



СБОРНИК ТРУДОВ

**XXIV международной
научно-технической конференции
«Чтения памяти В. Р. Кубачека»**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ГОРНОЙ И НЕФТЕГАЗОВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Кафедра горных машин и комплексов

СБОРНИК ТРУДОВ

**XXIV Международной научно-технической конференции
«Чтения памяти В. Р. Кубачека»**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ГОРНОЙ И НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

02-03 апреля 2026 г.

Под общей редакцией проф. Ю.А. Лагуновой

г. Екатеринбург

Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады 02-03 апреля 2026 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2026. – 528 с.

ISBN: 978-5-9967-0446-0

DOI: 10.21440/978-5-9967-0446-1-2026-1-532

В сборнике трудов представлены научные исследования и обзоры в области оборудования для горной и нефтегазовой отрасли. Рассмотрены **вопросы** автоматизации и роботизации горного и транспортного оборудования, современных технологий машиностроения, появления нового и совершенствования существующего оборудования, диагностики и ремонта, моделирования и расчетов сложных технических систем, а также предлагаются антикризисные программы для предприятий в условиях действия антироссийских санкций.

© Уральский государственный
горный университет

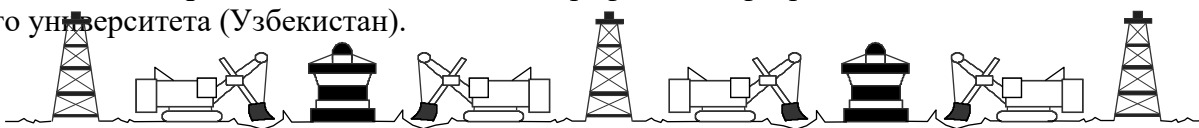
Компьютерная верстка кафедры горных машин и комплексов

Организационный комитет

1. **Лагунова Юлия Андреевна** – д-р техн. наук, профессор Уральского государственного горного университета (УГГУ), председатель конференции (г. Екатеринбург);
2. **Калянов Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, сопредседатель конференции (г. Екатеринбург);
3. **Комиссаров Анатолий Павлович** – д-р техн. наук, профессор УГГУ (г. Екатеринбург);
4. **Шестаков Виктор Степанович** – канд. техн. наук, профессор УГГУ (г. Екатеринбург);
5. **Трифанов Геннадий Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета (г. Пермь);
6. **Андреева Людмила Ивановна** – д-р техн. наук, гл. н. с. Челябинского филиала Института горного дела ИГД УрО РАН (г. Челябинск);
7. **Глебов Андрей Валерьевич** – д-р техн. наук, зам. директора Института горного дела ИГД УрО РАН (г. Екатеринбург);
8. **Фурин Виталий Олегович** – канд. техн. наук, начальник технической службы ПАО «Уралмашзавод»;
9. **Червяков Сергей Алексеевич** – канд. техн. наук, советник ген. директора по конструкторским разработкам ПАО «Уралмашзавод»;
10. **Муйземнек Александр Юрьевич** – д-р техн. наук, зав. каф. "Теоретическая и прикладная механика и графика" ПГУ (г. Пенза).

Международный программный комитет

1. **Ма Гоган** - директор института дистанционного образования, доктор наук Китайский нефтяной университет (Китай);
2. **Шэнь Ган** – д-р техн. наук, декан факультета машиностроения и электротехники Аньхойского университета науки и технологий (Китай);
3. **Фань Хундун** – д-р техн. наук, профессор Китайского университета горного дела и технологий (Китай);
2. **Рейнхард Сахсенхофер** - профессор Горного университета Леобена (Конго);
3. **Михайлов Александр Николаевич** – д.т.н., проф., зав. кафедрой технологии машиностроения Донецкого национального технического университета (ДНР);
4. **Сагинтаева Сауле Саветовна** - ректор Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова («КарТУ имени А. Сагинова»), (Р. Казахстан), доктор экономических наук, кандидат физико-математических наук, профессор математики, академик МАИИ.
5. **Мейрам Мухаметрахимович Бегентаев** - ректор, доктор экономических наук, доцент Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева (Р. Казахстан);
6. **Мустафа Баба оглы Бабанлы** – ректор, доктор технических наук Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности (Азербайджан);
7. **Маралбаев Акылбек Осмонбаевич** - ректор, профессор Института горного дела и горных технологий имени академика А.Асаналиева (Р.Казахстан).
8. **Умедов Шерали Халлокович** - д.т.н., проф., зав. кафедрой Навоийского технического университета (Узбекистан).



ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 622.68:553.3.9

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ РОССИИ: ВЫЗОВЫ, РЕАЛИИ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

А.В. Глебов, доктор технических наук, заместитель директора по научным вопросам
ИГД УрО РАН, glebov@igduran.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела
Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург

В текущий момент времени горнодобывающая отрасль экономики России по-прежнему остается импортозависимой. Одним из стратегических направлений комплексного развития горного и машиностроительного производства в современных условиях является поиск путей реструктуризации и модернизации производства, внедрения принципиально новых отечественных технологий и техники.

Ключевые слова: технологическое лидерство, технологии, импортонезависимость, горнотранспортное оборудование, машиностроение, горнодобывающая отрасль

TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF THE MINING INDUSTRY IN RUSSIA: CHALLENGES, REALITIES, AND STRATEGIC PERSPECTIVES

Glebov A.V.

At the current time, the mining industry in Russia remains import-dependent. One of the strategic directions of the complex development of mining and engineering production in modern conditions is to find ways to restructure and modernize production, and to introduce fundamentally new domestic technologies and equipment.

Keywords: technological leadership, technologies, import independence, mining and transport equipment, engineering, mining industry

Горнодобывающая отрасль России традиционно является одной из ключевых составляющих национальной экономики, обеспечивая значительную долю экспортных поступлений и сырьевую базу для промышленного развития. Однако в условиях современных геополитических вызовов и технологических трансформаций отрасль сталкивается с комплексом проблем, связанных с технологической зависимостью от иностранных поставщиков оборудования и технологий.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью формирования технологического суверенитета горнодобывающей отрасли в условиях санкционного давления и глобальной технологической конкуренции. Особую значимость приобретают вопросы развития отечественного горного машиностроения и внедрения передовых цифровых технологий, включая беспилотные системы для открытых горных работ.

Цель исследования - анализ текущего состояния и разработка стратегических перспектив достижения технологического суверенитета горнодобывающей отрасли России с учетом опыта открытой разработки месторождений и перспектив развития горного машиностроения.

Методология исследования включает анализ статистических данных, нормативно-правовых документов, научных публикаций, а также эксперт-

ные оценки и case-анализ практического опыта российских горнодобывающих предприятий.

Российская горнодобывающая отрасль демонстрирует высокую степень зависимости от импорта стратегических видов минерального сырья, особенно по добыче марганца, хрома, лития, титана, олова. Всего насчитывается 17 стратегических видов минерального сырья, по которым Россия имеет критическую зависимость от импорта. Эта ситуация создает существенные риски для развития высокотехнологичных отраслей промышленности, включая электронику, аэрокосмическую и оборонную промышленность.

Технологическая зависимость горнодобывающей отрасли проявляется в нескольких аспектах: доля импортного оборудования для открытых горных работ составляет 60-80 %, включая карьерные экскаваторы, самосвалы, буровые станки; зависимость от импортных двигателей, гидравлических систем, электронных компонентов; отсутствие отечественных аналогов для ряда технологических процессов открытой разработки.

Фундаментальной проблемой развития отечественного горного машиностроения является кризис станкостроительной отрасли. За период с 1990 по 2019 год производство металлорежущих станков сократилось в 16 раз. Дефицит современных станков с ЧПУ ограничивает возможности производства точных деталей для горного оборудования, что создает дополнительные барьеры для импортозамещения.

Введение санкций в 2022 году привело к серьезным нарушениям в цепочках поставок горного оборудования.

Отсутствие регулярного сервисного обслуживания и поставок оригинальных запчастей привело к росту аварийности горной техники на 25-30 %, снижению коэффициента технической готовности парка до 65-70 %, увеличению затрат на ремонт и техническое обслуживание.

В ответ на санкции произошла массовая переориентация на технику азиатских производителей: 25 % рынка карьерных автосамосвалов и экскаваторов заняла фирма XCMG; 20 % рынка экскаваторов и буровых станков – фирма SANY. Однако эта переориентация создает риск "смены иглы"-перехода от западной к китайской технологической зависимости. Дополнительные проблемы связаны с адаптацией китайской техники к российским климатическим условиям и особенностям эксплуатации.

В ответ на вызовы принимаются государственные меры поддержки развития отрасли. Так в 2024-2025 годах за счет бюджетного финансирования выделено 300 млрд. рублей на развитие станкостроения в рамках программы 2024-2030 годов, ведется финансирование научно-исследовательских работ в области горного машиностроения, реализуются специальные программы кредитования проектов импортозамещения.

На уровне стратегического планирования приняты Стратегия развития минерально-сырьевой базы до 2050 года, Федеральная научно-техническая программа развития горного машиностроения и целевые программы развития региональных горнопромышленных кластеров.

Внедрение беспилотных технологий в открытых горных работах явля-

ется одним из наиболее перспективных направлений цифровизации отрасли. Ключевые разработки в этой области:

- тестирование беспилотных модификаций автосамосвалов (БелАЗ, КамАЗ), создание инфраструктуры и организация телекоммуникационной инфраструктуры для работы беспилотного транспорта;
- системы диспетчеризации карьерного транспорта;
- автоматизация процессов погрузки горной массы на основе систем телеметрии, удаленного управления экскаватором из диспетчерского центра и программирования оптимальных траекторий движения рабочего оборудования;
- автоматизация процесса бурения с использованием систем автоматического управления параметрами бурения, спутниковых и лазерных систем наведения и позиционирования, а также адаптация параметров бурения к изменяющимся горно-геологическим условиям.

Ключевыми проблемами и рисками развития горнодобывающей отрасли являются:

- кадровый дефицит (образовательные программы отстают от потребностей цифровой трансформации, острая нехватка инженеров по робототехнике, ИТ-специалистов, аналитиков данных, миграция квалифицированных специалистов в другие отрасли);
- нормативные пробелы (недостаточная нормативная база для беспилотных систем, неразвитость стандартов защиты цифровых систем; сложности с сертификацией нового оборудования и технологий);
- качество импортозамещения (замена на менее надежную технику, сохранение зависимости от импортных компонентов);
- финансовые ограничения (значительные инвестиции в создание опытных образцов, продолжительные сроки возврата инвестиций, недостаток рискованного капитала для инновационных проектов).

На ближайшие три года приоритетными направлениями должны стать: инвентаризация оборудования и оценка технического состояния парка горной техники; запуск серийного производства ключевых видов горного оборудования, включенного на сегодняшний день Минпромторгом России в списки критически важной продукции; создание испытательных полигонов для беспилотных систем; разработка и внедрение современных образовательных программ.

Для системного развития отрасли необходимы:

- разработка и реализация государственной программы развития горного машиностроения;
- создание специализированного фонда поддержки инноваций в горном машиностроении и горнодобывающей отрасли;
- введение льготного налогообложения для производителей горного оборудования;
- создание отраслевых консорциумов для разработки сложных технических систем;
- разработка программ целевого обучения и стажировок для молодых специалистов.

Заключение

Технологический суверенитет горнодобывающей отрасли России является достижимой целью при условии реализации системного подхода, сочетающего государственную поддержку, научные исследования и промышленную кооперацию. Ключевое значение имеет переход от простого импортозамещения к созданию конкурентоспособных отечественных технологий, особенно в области беспилотных систем для открытых горных работ.

Успех технологической трансформации отрасли будет зависеть от способности интегрировать цифровые технологии, развивать кадровый потенциал и создавать инновационную экосистему для горного машиностроения. Особую роль играет синтез традиционного опыта открытой разработки с передовыми цифровыми и беспилотными технологиями, что позволит создать технологически независимую и конкурентоспособную горнодобывающую промышленность России.

Перспективы развития отрасли связаны не только с преодолением текущих вызовов, но и с формированием долгосрочных конкурентных преимуществ на основе инновационных технологий, цифровой трансформации и устойчивого развития. Реализация стратегических приоритетов позволит обеспечить технологический суверенитет горнодобывающей отрасли России к 2035 году и создать основу для ее устойчивого развития в долгосрочной перспективе.

УДК 377.35

ОТ 3D МОДЕЛИ К КАРЬЕРЕ: ПЕРВАЯ ПРОФЕССИЯ В ИНЖЕНЕРНОМ ДЕЛЕ

Н.В. Савинова¹, канд. техн. наук, Ю.О. Переверзев²

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

²АНО «Уральская научно-техническая творческая мастерская «М-Лабс»,
г. Екатеринбург, РФ

О получении школьниками первой профессии в рамках модели профессиональной ориентационной деятельности «Профминимум». В качестве базовой профессии для направления инженерное дело выбрана профессия Чертежник -конструктор. Она позволяет получить школьнику навыки построения цифровых моделей в системах автоматизированного проектирования, знания в области материаловедения и метрологии, качественно подойти к выбору будущей специализации.

Ключевые слова: профминимум, первая профессия, моделирование, САПР

FROM 3D MODEL TO CAREER: FIRST PROFESSION IN ENGINEERING

N.V. Savinova, Yu.O. Pereverzev

About obtaining the first profession by schoolchildren within the framework of the "Profminimum" model of professional orientation activities. The profession of Draftsman-Designer has been chosen as the basic profession for the engineering field. It allows schoolchildren to acquire the skills of building digital models in automated design systems, as well as knowledge in the fields of materials science and metrology, which helps them to choose their future specialization effectively.

Keywords: professional minimum, first profession, modeling, CAD

С сентября 2023 года в российских школах начался новый этап развития профориентации – единая модель профессиональной ориентационной деятельности «Профминимум» [1]. Это не только целенаправленная подготовка школьников к осознанному выбору профессии, это один из путей развития экономики и укреплению технологического суверенитета Российской Федерации. Сегодня у каждого ученика есть возможность освоить первую профессию прямо во время обучения в школе. И это не просто знакомство с возможными сферами профессиональной деятельности, а получение практических навыков, которые станут надежной опорой для профессионального роста. Речь пойдет о сквозных видах профессиональной деятельности, об универсальных навыках и компетенциях, которые востребованы в разных отраслях промышленности.

Многие школьники испытывают трудности при выборе будущей профессии. И это совершенно нормально! Мир профессий огромен и постоянно меняется. Возможно профессиональная программа, реализуемая в школах, должна определять направление будущей деятельности школьника. Это такие направления как инженерное дело, информационные технологии, медицина, образование, социальная работа, экономика и т.д. Уже выбор направления даст понимание о необходимых знаниях и компетенциях для получения будущей специальности. Но в этом состоит сложность

для составителей программ профессионального обучения в школах, так как они должны быть основаны на ФГОС конкретной профессии.

Рассмотрим направление инженерное дело. В приказе министерства просвещения РФ от 14 июля 2023 года «Об утверждении перечня профессий рабочих, должностей служащих, по которым осуществляется профессиональное обучение» выделены наименования профессии входящие в раздел «Сквозные виды профессиональной деятельности в промышленности». В перечне этого раздела включены Чертежник и Чертежник-конструктор с код в соответствии с Общероссийским классификатором профессий 27530 и 27534 соответственно. В нашем понимании чертежник это тот, что умеет чертить и оформлять техническую документацию. Но сегодня технические проекты создаются с помощью специальных компьютерных программ – систем автоматизированного проектирования (САПР). Современные предприятия активно переходят на «безбумажное» производство, широко применяя цифровые технологии во всех процессах. Основой производства становится трехмерная модель продукта. Она создается в САД системе САПР. Поэтому основными трудовыми функциями современного чертежника становится создание трехмерных математических моделей и оформление по ним всех видов документов в САПР. Как знать, возможно, и сама профессия изменит название на более современное, например, оператор САПР.

Таким образом, навыки создания трехмерных моделей и генерация на их основе любых технических документов — это фундамент профессионального направления Инженерное дело. Чертежник-конструктор может выбрать любую область для профессионального развития: машиностроение, строительство, авиастроение, электротехника, автомобильная промышленность, промышленный дизайн, аэрокосмическая отрасль и многое другое.

За выбор такой первой профессии и то, что школе нет необходимости приобретать специальное, узкопрофильное оборудование. Компьютерный класс теперь есть в каждой школе. Учебные версии российских САПР для школ стоят доступно. А для школьников, желающих выполнить домашнее задание или просто углубиться в мир проектирования, текущая версия САПР предоставляется бесплатно. Штангенциркули, угломеры, шаблонные радиусомеры – простейшие измерительные приборы тоже найдутся в школе, они используются на уроках технологии.

Теперь о вызовах, с которыми придется столкнуться учебному заведению при выборе любого направления профессионального обучения. И первое, о чем нужно позаботиться – это педагогические кадры необходимой квалификации, таких специалистов в школах нет. Обсудим ключевые направления для решения этой проблемы.

Первое из них, развитие школьных педагогов. Нужно направлять на курсы повышения квалификации по указанному направлению учителей технологии, информатики, черчения, рисования, а также руководителей инженерно-технических проектов, кружков по подготовки детей к техническим олимпиадам и профессиональным чемпионатам.

Проводить курсы по повышению квалификации педагогов могут лицензированные образовательные организации, реализующие дополнительные профессиональные программы (ДПО). Это такие организации как государственные, муниципальные или с госучастием центры ДПО, высшие учебные заведения и колледжи при наличии лицензии на ДПО, институты развития образования, а также научные организации при наличии лицензии, лицензированные частные образовательные центры [2]. С 1 сентября 2025 года обучение педагогов за счет образовательной организации возможен только в уполномоченных государственных и муниципальных организациях и в организациях с госучастием [3].

Круг преподавателей дисциплин «Первой профессии» может быть расширен за счет преподавателей ВО, СПО, ДПО, работающие по совместительству на основе договора ГПХ. Педагоги из этой среды обладают экспертными знаниями, следят за направлениями развития профессионального направления и понимают нужды рынка труда.

Организовать получение профессии Чертежник-конструктор можно и в рамках сетевого взаимодействия школа – колледж, школа – вуз, школа – ДПО. В этом случае организации ВО и СПО, кроме обучения, могут вести профориентационную активность: познакомить школьников со своими образовательными программами, показать им преимущества обучения в учебном заведении, заинтересовать и мотивировать их поступать к ним после окончания школы. Вуз, на базе которого проходило получение первой профессии, может начислять дополнительные баллы к ЕГЭ для своих абитуриентов на основании рекомендаций приказа Министерства науки и высшего образования РФ от 21 августа 2020 г. N 1076 [4]. Например, Мурманский арктический университет начисляет 10 баллов всем выпускников своих профильных классов в школах: инженерно-технических, Атом-классов, морских и других. Забайкальский государственный университет учитывает предпрофессиональное обучение абитуриентов в собственных подразделениях [5]. Московский педагогический государственный университет прибавляет до 10 баллов ученикам предпрофильных классов – инженерных, медицинских, кадетских, добившихся успехов на профильных конкурсах [6].

Ключевой момент в методической подготовке – это разработка рабочей программы по специальности. Примеров таких программ достаточно, к сожалению, они не имеют общих подходов к формированию современных навыков у школьников, а также сильно различаются в объемах подготовки.

Уральская научная мастерская (УНМ) «М-ЛАБС» в содружестве НОЧУ «ОДПО «Кадры цифровой экономики (КЦЭ)» (лицензия на образовательную деятельность № 20 502 от 12.05.2021), опираясь на свой опыт в обучении школьников профессиональным навыкам в области цифрового производства, представила программу по специальности «27534 Чертежник-конструктор». Она реализуется в рамках сетевого сотрудничества с несколькими школами Екатеринбурга для школьников 10–11 классов.

Реализация программы запланирована на 32 недели в 10 классе, что составит 144 часа. В 11 классе программа будет проходить в течение 16

недель, с общим объемом 72 часа. Занятия проводятся еженедельно в школьных классах на оборудовании «М-ЛАБС», и в каникулярное время на производственной базе УНМ, расположенной в Технопарке высоких технологий Свердловской области «Университетский». В таблице приведен краткий учебный план.

Таблица – Учебный план краткий

Учебные дисциплины		Объем, ака- дем. часы	Форма аттестации
10 класс			
1.	Организация и охрана труда	4	Опрос
2.	Технический рисунок и графика	12	Зачет
3.	Метрология и основы реверс-инжиниринга	16	Зачет
4.	Материаловедение	12	Зачет
5.	Трёхмерное моделирование в САПР	44	Зачет
			Проектная работа
6.	Инженерная графика	20	Зачет
7.	Основы 3D печати	16	Проектная работа
8.	Практика	20	
		144	
11 класс			
7.	Трёхмерное моделирование в САПР		Зачет, проектная работа
	Метрология и основы реверс-инжиниринга		Зачет
	Техническое творчество и основы проектирования		Проектная работа
	Демонстрационный экзамен	8	Экзамен
		72	
	Всего	216	

НОЧУ «КЦЭ» – Авторизованный учебный центр компании «Аскон» по специализации «Системы трехмерного моделирования «Компас-3D». Благодаря этому дисциплины «Трёхмерное моделирование в САПР» и «Инженерная графика» преподаются с использованием программного комплекса «Компас-3D» последней версии, обеспечивая актуальное и практико-ориентированное обучение.

Для освоения дисциплин «Трёхмерное моделирование» и «Метрология» в М-Лабс разработаны и выпущены специальные учебно-методические комплексы. Они называются «Основы моделирования в САПР» и «Основы инженерных измерений и реверс инжиниринга». Главная особенность этих комплексов – большое количество практических заданий, которые помогут учащимся качественно освоить материал и отработать полученные навыки.

Сегодня наблюдается уверенный и постоянный рост рынка 3D-моделирования. И это не просто модный тренд, а реальная потребность современной промышленности. Навыки создания трехмерных моделей становятся критически важными для специалистов самых разных инженерных направлений. В этом контексте выбор первой профессии «Чертежник–конструктор» выглядит абсолютно обоснованным. Это отличная стартовая площадка, которая позволит школьникам освоить базовые принципы рабо-

ты в САПР, получить ценный опыт и подготовиться к дальнейшему профессиональному росту.

Список литературы

1. Письмо Минпросвещения РФ от 01.06.2023 N АБ-2324/05. О внедрении единой модели профессиональной ориентации.
2. М-Лабс. Уральская научная мастерская: официальный сайт. – Екатеринбург – URL: <https://mlabs.pro/pedagogi-compas3d> (дата обращения 05.02.2026)
3. Федеральный закон от 21.04.2025 № 86-ФЗ «О внесении изменений в статьи 3 и 47 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации».
4. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 21 августа 2020 г. N 1076 «Об утверждении Порядка приема на обучение по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры».
5. Некрасова Ю. Новые индивидуальные достижения: приемная кампания 2025 – URL: <https://propostuplenie.ru/article/novye-individualnye-dostizheniya-priyomnaya-kampaniya-2025-goda> (дата обращения 10.02.2026)
6. Ивойлова И. Учет индивидуальных достижений при поступлении в вуз –URL: <https://rg.ru/2025/02/05/uchet-individualnyh-dostizhenij-pri-postuplenii-v-vuz.html> (дата обращения 10.02.2026)
7. М-Лабс. Уральская научная мастерская: официальный сайт. – Екатеринбург – URL: <https://mlabs.pro/news/tpost/7a6xz8frv1-m-labs-vozobnovila-proforientatsionnii-p> (дата обращения 12.02.2026)

УДК 622.73

УРАЛМАШЗАВОД – ТВОРЕЦ ГОРНОЙ ТЕХНИКИ

Ю.А. Лагунова^{1,2}, д-р техн. наук, проф., **С.А. Червяков**³ канд. техн. наук, директор,
В.О. Фурин⁴, канд. техн. наук, зам. гл. конструктора

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ,

³ ООО «СГИ», г. Екатеринбург, РФ; ⁴ ПАО «Уралмашзавод», г. Екатеринбург, РФ

Приведена краткая историческая справка о крупнейшем заводе тяжелого машиностроения в России, дан экскурс по этапам совершенствования конструирования и производства технологического оборудования, выпускаемого ПАО «Уралмашзавод», определена стратегическая политика развития.

Ключевые слова: историческая справка, диапазон продукции, стратегическая политика.

URALMASHZAVOD – THE CREATOR OF MINING EQUIPMENT

Yu. A. Lagunova, S.A. Chervyakov, V.O. Furin

This article provides a brief historical overview of Russia's largest heavy engineering plant, explores the stages of improvement in the design and production of technological equipment manufactured by Uralmashplant, and outlines its strategic development policy.

Keywords: historical overview, product range, strategic policy.

С легкой руки классика пролетарской литературы Максима Горького за Уралмашем прочно закрепилось образное название – отец заводов и фабрик. Производя доменное, прокатное, агломерационное, кузнечно-прессовое оборудование, поставляя в разные уголки земли экскаваторы, дробилки, мельницы, машины непрерывного литья заготовок, буровые установки, он взрастил сотни предприятий в СССР и по всему миру.

Краткая историческая справка

15 июля 1933 года состоялся пуск завода.

Значение Уралмашзавода в истории отечественной промышленности огромно. Здесь, на Уралмашзаводе, создавались новые, революционные технологии, сыгравшие огромную роль в техническом развитии Советского Союза и укреплении военного потенциала СССР и его союзников. Завод стал символом и маркой индустриализации страны, основой для создания и развития целых отраслей экономики, прежде всего, черной металлургии. Причем, не только отечественной, но и ряда стран – от Восточной Европы до Пакистана, Индии, Китая и КНДР.

Уже через 15 лет после пуска диапазон уралмашевской продукции охватывал все технологические переделы производства стали: от оборудования для добычи железной руды до производства проката и поковок.

Любая металлургия начинается с горного передела, где добывается и доводится до нужной кондиции природное сырье. Еще в 30-е годы Уралмашзавод освоил производство первых в стране электрических карьерных экскаваторов и крупных дробилок. В то время, изготовителей такой продукции в мире можно было пересчитать по пальцам.

За 75 лет своей истории предприятие изготовило огромное количество металлургического оборудования. В том числе, более 200 агломерационных установок и обжиговых машин, более 300 прокатных станов и другого прокатного оборудования, около 80 машин непрерывного литья заготовок, 250 гидравлических прессов. Все вводимые в строй доменные печи в СССР, в том числе, крупнейшие в мире, оснащались оборудованием с маркой «УЗТМ».

И сейчас с помощью уралмашевских машин и оборудования в России осуществляется добыча и переработка более трех четвертей железной руды, почти половина российской стали, разливаемой непрерывным способом, выпускается на уралмашевских МНЛЗ. Все железнодорожные рельсы и две трети холоднокатаного стального листа выпускается на уралмашевских прокатных станах.

Горнякам и нефтяникам с сороковых годов прошлого столетия тоже хорошо знакомо надежное и по ряду параметров — лучшее в мире - оборудование с маркой «УЗТМ».

Почти 12 тысяч уралмашевских карьерных и 250 шагающих экскаваторов применяются при открытой добыче руд бокситов, асбеста, угля и других полезных ископаемых. Все плотины на Волге и великих сибирских реках возводились с использованием уралмашевских шагающих и гусеничных экскаваторов. Добыча половины угля, добываемого открытым способом в России, осуществляется уралмашевскими экскаваторами.

Свыше 14,5 тысяч буровых установок изготовил Уралмашзавод, начиная с 1945 г. Все нефтяные и газовые месторождения в СССР разбуривались установками с маркой «УЗТМ». И сейчас добыча четырех пятых запасов нефти и половины запасов природного газа осуществляется буровыми установками, изготовленными на НПО «Уралмаш-ХОЛДИНГ».

Дробильно-размольное оборудование

Дробильно-размольное оборудование (ДРО) появилось в номенклатуре Уралмашзавода одним из первых. В 1938 г. была изготовлена мощная конусная дробилка ККД-1500 для Балхашского медного рудника. Балхашское предприятие, Среднеуральский медеплавильный завод были полностью оснащены уралмашевским ДРО. Было освоено производство дробилок крупного дробления 300, 400, 500, 900 и 1500; щековых дробилок 2100×1500, 1500×1200, 1200×900; конусных дробилок для среднего дробления 1200, 1650, 2100; валковых дробилок 600×600, 600×1500; зубчатых валковых дробилок; бегунов 600×1500 непрерывного действия; шаровых и стержневых рудных мельниц, наиболее крупной из которых была 2,8×3,7м; трубных мельниц для цементной промышленности. Всего за предвоенные годы было изготовлено 170 дробилок и мельниц.

В послевоенные годы активно нарастал выпуск ДРО: щековых дробилок, конусных дробилок крупного, среднего и мелкого дробления, шаровых и стержневых мельниц. Из номенклатуры были исключены валковые дробилки, бегуны, конусные дробилки малых размеров, углеразмольные мельницы. Дробилками Уралмашзавода были оснащены практически все горно-обоганительные комбинаты бывшего СССР. В это время активно

разрабатываются методы расчетов технологических и технических параметров ДРО, чему немало усилий отдал первый главный конструктор горного оборудования, а затем главный инженер завода Уралмашзавода Д.И. Беренов. По всем видам ДРО была произведена коренная модернизация, основанная на накопленном опыте эксплуатации машин предвоенного выпуска. С 1949 г. начато производство мельниц $3,2 \times 3,1$ м для стоящихся крупных предприятий: Норильского ГМК, Дзержинского ГМК и др. В 1956 г. на Уралмашзаводе были спроектированы мельницы $3,6 \times 4,0$ м и $3,2 \times 4,5$ м, а в 1958 г. самая крупная мельница $4,0 \times 5,5$ м. Пересмотрен ряд конусных дробилок крупного дробления, принявший современный вид: 500, 900, 1200, 1500. Изменена конструкция этих машин – все они стали с нижней разгрузкой продукта дробления. Профили камер дробления становятся криволинейными. На дробилке 900/100 впервые применено гидравлическое регулирование разгрузочной щели.

В 1955 г. увеличен диаметр дробящего конуса дробилок среднего и мелкого дробления с 2100 мм на 2200 мм. При этом увеличена частота качаний дробящего конуса до 240 мин^{-1} . Далее были модернизированы дробилки 1650, диаметр основания дробящего конуса был увеличен до 1750 мм. Была спроектирована и в 1958 г. изготовлена конусная дробилка 2200 с гидравлической амортизацией и гидравлическим регулированием разгрузочной щели.

В 70-х годах начато освоение конусных дробилок среднего и мелкого дробления с диаметром основания дробящего конуса 3000 мм, опережая зарубежных конкурентов. Этими машинами в дальнейшем были оснащены Костомукшский ГОК, Стойленский ГОК, комбинат Эрдэнэт (Монголия).

Производство ДРО в 1958 году возросло по сравнению с 1940 годом в 15 раз. За все эти годы выпущено 550 мельниц, 100 щековых дробилок и 380 конусных дробилок. К концу 80-х годов Уралмашзавод выпускал по 150-160 дробилок и мельниц в год. К настоящему времени общий выпуск дробилок составил около 5000 единиц, а работающий парк превышает 2000 машин.

В середине 90-х годов производство ДРО упало до нескольких единиц в год. В эти годы началось активное опробование российскими горняками зарубежных машин. Этот период продолжался вплоть до 2000-2001 гг. С 2003 года происходит рост продаж и соответственно производства ДРО. В 2005 г. объем продаж достиг 8 млн. USD, а в 2006 – 10 млн. USD.

География поставок ДРО – страны бывшего СССР, Болгария, Польша, Монголия, Германия, Румыния, Чехия, Словакия, Югославия, Венгрия, Вьетнам, Китай, Индия, Ирак, Сирия, Египет, Нигерия, Куба, Алжир, Турция, Греция, Финляндия,

В 2000 г. структурно объединены служба продаж и конструкторские подразделения горного оборудования в инжиниринговую фирму.

В 2005 г. бизнес ДРО был выделен в самостоятельное дочернее общество. Уже в 2006 г. как результат самостоятельности объем продаж ДРО вырос в 3,5 раза.

Основной стратегической целью ПАО «Уралмашзавод» является расширение продаж комплексных технических решений, основанных на предложениях по технологии рудоподготовки.

Политика продаж строится на формировании сильной товаропроводящей сети.

Основными рынками на 2007-09 гг. были Россия, страны СНГ, Монголия, Индия, Болгария, Вьетнам, Австралия и страны Южной Америки.

В последние годы завершена разработка аппарата математического моделирования рабочего процесса конусных дробилок, позволяющего адекватное проектирование новых машин с заданными характеристиками.

Модификация конусных дробилок мелкого и среднего дробления производится без изменения концепции конструктивного исполнения машин, развивается тип Symons с обеспечением снижения крупности дробленого продукта в питании мельниц первой стадии до 12-16 мм (в зависимости от условий). Увеличивается производительность дробилок среднего дробления.

Подготовлено производство крупных щековых дробилок: 2100×1500, 1500×1200, 1200×900.

Потребителям предлагаются сервисные услуги: шеф-монтаж и наладка, заводской ремонт машин, узлов и уникальных деталей, модернизация оборудования (доведение до современного уровня показателей назначения, механизации и автоматизации), которая может быть совмещена с заводским ремонтом.

Руководители и специалисты – опытные конструкторы и производственники, хорошо понимающие проблемы производства и эксплуатации ДРО. Значительна доля молодежи, принимаемой после прохождения стажировки из числа лучших выпускников преимущественно Уральского государственного горного университета.

Техническая политика ПАО «Уралмашзавод» в области дробильно-размольного оборудования

В современных рыночных условиях большинству Российских горно-обогатительных предприятий не нужны ни дробилки, ни мельницы, как таковые. На стадиях дробления и измельчения полезных ископаемых перед предприятиями стоит бизнес-задача по дезинтеграции в течение установленного промежутка времени определенного объема материала, обладающего конкретными физико-техническими свойствами, до определенной последующими технологическими переделами крупности с наименьшими инвестиционными расходами и эксплуатационными затратами. В качестве основных ограничений при реализации этой задачи в условиях уже действующего дробильно-обогатительного комплекса выступают:

- а) существующая технологическая схема;
- б) время, за которое планируется эту схему модернизировать.

В части рыночной стратегии был выбран курс на восстановление тесных долгосрочных контактов с ведущими проектно-технологическими компаниями. Но потребовались годы нелегкой работы в новых, непривычных для всех условиях, чтобы прийти к созданию первых таких альянсов, к

пониманию того, кто, за какой вклад, и какую выгоду от этого получит. Разработаны технологические регламенты, выполнены технико-экономические обоснования модернизации технологических линий дробления для многих горно-обогатительных комбинатов. Успешно проведена модернизация технологии среднего и мелкого дробления на Эрдэнэте. В стадии реализации находятся аналогичные проекты на ОАО «Михайловский ГОК» и ОАО «Апатит». Совместно проводя технологические аудиты, разрабатывая технологические регламенты, технико-экономические обоснования, мы выходим на решение проблем Заказчиков с формулировкой своих предложений в категориях его выгод. Совместно со специалистами ОАО «Уралгипроруда» начато создание дробильно-сортировочного комплекса по производству кубовидного щебня с годовой производительностью 1 млн. куб. м., вместе участвуем в тендерах на поставку этого оборудования.

В результате такой стратегии замечен переход от поставок отдельных агрегатов к решению технологических задач – поставке комплекса оборудования по дезинтеграции полезных ископаемых. Так реализованы наработки по созданию полустационарной дробильно-перегрузочной установки (ДПУ) с годовой производительностью до 20 млн. т для использования ее в составе комплекса циклично-поточной технологии (ЦПТ).

Уралмашзавод традиционно занимается проектированием и изготовлением конусных дробилок, реализующих разрушение материала методом статического сжатия. Совместно с учеными Уральского государственного горного университета разработаны оригинальные программы расчетов основных технологических параметров дробилок, энергетических и силовых показателей. В области дробилок среднего и мелкого дробления придерживаемся концепции машин типа «Саймонс»: с консольным валом дробящего конуса, большим подпятником и пружинным замыканием усилия дробления, реализующих принцип дробления «кусочек о броню». В разные годы были просчитаны, спроектированы и даже изготовлены отдельные опытные образцы конусных дробилок других типов: «Гидрокон» (с нижней гидравлической опорой дробящего конуса и «крутой» камерой дробления), «Жиродиск» (реализующий принцип дробления «в слое»). Однако расчеты, анализ работы конусных дробилок различных типов показывают, что именно компоновка «Саймонс» в подавляющем большинстве случаев позволяет обеспечить максимальную эффективность процесса рудоподготовки на стадии мелкого дробления. Эта эффективность определяется, во-первых, технологическими показателями дробилки (производительность, крупность, форма кусков), во-вторых, – надежностью и ресурсом работы узлов и деталей машины, от которых напрямую зависят эксплуатационные затраты.

Жесткая опора дробящего конуса в сочетании с пружинным замыканием усилия дробления обеспечивает стабильный гранулометрический состав продукта за счет стабильного размера разгрузочной щели.

Принцип дробления «кусочек о броню» позволяет получить готовый продукт, обладающий наименьшей энергоемкостью при последующем из-

мельчении. Известно, что материал (такой же крупности), продробленный «в слое», за счет своего упрочнения в дальнейшем измельчается с большим энергопотреблением.

Пружинная амортизация механизма дробилки – наиболее эффективна, надежна и проста в эксплуатации и обслуживании.

Большой сферический подпятник дробящего конуса обеспечивает стабильную кинематику основного рабочего органа дробилки, не требуя для этого специальных стабилизирующих устройств и дополнительных затрат при эксплуатации.

Корпусные детали дробилки рассчитаны на длительный срок ее высокопроизводительной и надежной работы.

Несмотря на приверженность схеме «Саймонс» конструктив дробилок не застыл на месте, а меняется с течением времени. Современные дробилки оснащаются:

- системами дистанционного регулирования разгрузочной щели;
- механическим уплотнением сферического подпятника, при котором не требуется подача воды в полость опорной чаши;
- автоматическими системами густой смазки;
- локальными автоматизированными системами управления («агрегатными АСУ») главным и вспомогательными приводами, которые могут быть включены в интегрированную АСУ ТП фабрики в качестве систем нижнего (базового) уровня автоматизации;
- системами диагностики состояния узлов и деталей.

Приоритетным направлением в области размольного оборудования является выход на рынок мельниц большой единичной мощности. Во-первых, освоение мельниц традиционной конструкции с диаметром барабана 3600 мм, 4000 мм и более. Во-вторых, создание так называемых бесцапфовых мельниц. Второй путь более перспективный, поскольку в ближайшее время у Заказчиков на повестке дня будут лишь проекты модернизации технологических линий измельчения с целью увеличения их пропускной способности в рамках существующих строительных конструкций.

Перенос подшипникового узла с цапфы на барабан позволяет в пределах существующего габарита мельницы на 40-45 % увеличить длину барабана и, следовательно, его рабочий объем и производительность мельницы. Такой вариант конструктивного исполнения мельницы известен в мировой практике (фирмы «Полизиус», FFE, «Оутокумпу»). Наиболее ответственный узел в конструкции такой мельницы – сегментный подшипник, применяли в практике на мельницах самоизмельчения МСС-8,7х2,6 (диаметр поверхности скольжения – 4,5 м). Эти подшипники уже эксплуатируются более 10 лет и не имели за этот период ни одного отказа.

Продолжаем поддерживать направление валковых дробилок для дезинтеграции непрочных неабразивных материалов: известняка, доломита, кокса, агломерата и т.д. Имеется опыт поставок одно-валковых зубчатых дробилок, 2-х и 4-х валковых дробилок с гладкими валками. В конструкциях дробилок с гладкими валками применены оригинальные технические решения, обеспечивающие удобство их эксплуатации и обслуживания.

Экскаваторостроение ПАО «Уралмашзавод»

В 1935 году был изготовлен первый гусеничный экскаватор с ковшом вместимостью 3 м³ для Коунрадского медного рудника. Всего за довоенные годы завод изготовил 12 гусеничных карьерных экскаваторов. Сразу после окончания Великой Отечественной войны завод приступил к выпуску мирной продукции, в июле 1945 года был утвержден проект перестройки завода, предусматривавший, в частности, организацию серийного производства карьерных экскаваторов. В мае 1947 года был выпущен первый послевоенный трехкубовый экскаватор СЭ-3 для Первоуральского рудника. Конструктивные решения, воплощенные в этой крупной по тому времени машине, масса которой 160-189 т, оказались удачными и на много лет определили характерные особенности гусеничных карьерных экскаваторов Уралмашзавода. Для обеспечения серийного производства экскаваторов СЭ-3 были спроектированы и изготовлены специальные станки для обработки крупногабаритных экскаваторных деталей, налажена машинная формовка гусеничных рам, созданы специализированные сборочные участки, организована система шеф-монтажа экскаваторов. Уралмашевские экскаваторы СЭ-3, а с 1956 года ЭКГ-4 с ковшом 4 м³ стали основой экскаваторного парка бурно развивавшегося в стране открытого способа ведения горных работ.

Одновременно с организацией производства гусеничных карьерных экскаваторов Уралмашзавод решил проблему создания крупного экскаватора-драглайна. Разрабатывая эту машину, конструкторы приняли смелые и оригинальные решения, обеспечивавшие высокие эксплуатационные показатели драглайнов, их характерный внешний облик. Сюда относятся стрела в виде пространственной конструкции с растянутыми элементами – вантами, придающими стреле требуемую прочность при небольшой массе, гидравлический механизм шагания, подвеска ковша с оригинальной системой тяговых блоков.

В декабре 1949 года строителям Волго-Донского канала был поставлен экскаватор ЭШ-14.65. Вскоре была проведена модернизация экскаватора с увеличением стрелы до 75 м. Благодаря мощным шагающим экскаваторам-драглайнам получил широкое развитие наиболее эффективный бестранспортный способ вскрышных работ при добыче полезных ископаемых. В 1958 году был спроектирован и изготовлен шагающий экскаватор с ковшом 25 м³ и стрелой 100 м.

В 1959 году завод начал серийный выпуск шагающих драглайнов модели ЭШ-15.90 с ковшом 15 м³ и стрелой 90 м. Выпуск горной техники в 70-х годах значительно увеличился, расширилась номенклатура продукции. Для угольного разреза Назаровский изготовлен экскаватор-драглайн ЭШ-100.100 производительностью 13-14 млн. м³ в год. Это было крупное достижение отечественного экскаваторостроения. Изготовлены первые экскаваторы-драглайны ЭШ-40.85 различных исполнений с ковшом 40 м³ и стрелой 85 м.

Начался выпуск мощных карьерных гусеничных экскаваторов ЭКГ-20 с ковшом вместимостью 20 м³, рассчитанных на работу при температу-

рах до -50°C . Первая партия этих машин была поставлена угольному разрезу Нерюнгринский, Якутия.

В 80-е годы Уралмашзавод практически полностью обновил номенклатуру оборудования для горной промышленности. В 1980 году серийная модель экскаватора ЭКГ-4,6Б, выпускавшаяся в течение ряда лет, была заменена более совершенной моделью ЭКГ-5А с ковшом $5,2\text{ м}^3$. Характерная особенность этой модели – полуавтоматическая система копания, обеспечивающая оптимальное использование усилия подъема и значительно облегчающая работу машиниста. По рабочим параметрам экскаватор находился на уровне лучших зарубежных образцов машин этого класса. С 1981 года вместо серийного экскаватора ЭШ-15.90А с ковшом 15 м^3 начат выпуск шагающего экскаватора ЭШ-20.90 с ковшом 20 м^3 . При одинаковых линейных размерах производительность нового драглайна за счет увеличения вместимости ковша при том же рабочем цикле повышена на 33 %. Уралмашзавод разработал проекты шагающих экскаваторов нового поколения. Изготовлен и введен в эксплуатацию на угольном разрезе Тулунский шагающий экскаватор ЭШ-65.100 с ковшом 65 м^3 и стрелой 100 м. Угольному разрезу Мугунский поставлен новый шагающий экскаватор ЭШ-40.100, который заменил ранее выпускаемую модель ЭШ-40.85. Заводом спроектирован экскаватор-драглайн малого класса ЭШ-11.75. Первая Машина поставлена золотодобытчикам Якутии. С учетом потребностей заказчиков разработаны модификации базовых моделей: экскаваторы с удлиненными стрелами, экскаваторы с уменьшенным давлением на грунт.

Техническая концепция карьерных механических лопат Уралмашзавода, обеспечивающая их надежную и производительную работу в самых тяжелых забоях, хорошо известна горнякам. Это двухбалочная рукоять, реечный напор, двухгусеничный ход с отдельным приводом на каждую гусеницу. Серийная машина Уралмашзавода экскаватор ЭКГ-5А с ковшом $5,2\text{ м}^3$ популярна в горнодобывающих отраслях. С 1980 г. выпущено более 5000 машин этой модели. В соответствии с пожеланиями заказчиков на базе ЭКГ-5А создано несколько его модификаций: экскаваторы со встроенными в ковш пневмоударными зубьями, автономные экскаваторы с дизельным приводом, экскаваторы с удлиненным рабочим оборудованием и, наконец, гусеничный драглайн с ковшом $3,2\text{ м}^3$ и стрелой 30 м для горных работ.

Для горной промышленности в настоящее время представляют интерес более крупные модели гусеничных карьерных экскаваторов Уралмашзавода: ЭКГ-12 с ковшом 12, 14 и 16 м^3 и ЭКГ-20А с ковшом 20 м^3 . Эти машины успешно работают на горных предприятиях Карелии, Якутии, Кузбасса. На базе экскаватора ЭКГ-12 также разработаны модификации: экскаватор со встроенными в ковш пневмоударными зубьями, гусеничный драглайн с ковшом 8 м^3 и стрелой 50 м.

Разработан карьерный гусеничный экскаватор ЭКГ-18 с ковшом $16-18\text{ м}^3$, и экскаватор ЭКГ-30 с ковшом $30-40\text{ м}^3$.

В середине 70-х годов перед Уралмашзаводом была поставлена задача создания мощных карьерных гидравлических экскаваторов, которые,

как известно, обладают рядом технологических преимуществ. Заводом были спроектированы и изготовлены опытные образцы гидравлических экскаваторов ЭГ-12, ЭГ-12А, ЭГ-20 с применением импортного комплектующего оборудования. Промышленные испытания подтвердили определенные технологические преимущества гидравлических экскаваторов, хотя в процессе их эксплуатации возникали трудности, вполне естественные при освоении машин нового типа.

На заводе разработан и изготовлен гидравлический экскаватор ЭГО-4А – обратная лопата с дизельным приводом, импортными комплектующими изделиями и электронным управлением. Машина поставлена одному из угольных разрезов Кузбасса. Сегодня разработан и выпущен новый гидравлический экскаватор УГЭ-300.

Интересно отметить, что с конца 60-х – начала 70-х годов, когда гидравлические экскаваторы начали активно внедряться в зарубежной горнодобывающей промышленности, в иностранной технической периодике систематически печатались публикации о роли и месте, которое займут гидравлические экскаваторы. Вопрос, в конечном счете, ставился так: будут ли электрические канатные экскаваторы вытеснены гидравлическими. Зарубежная практика последних лет, особенно с появлением сверхмощных автосамосвалов, показывает, что основными погрузочными машинами в перспективе останутся электрические лопаты, как более производительные, надежные, экономичные и долговечные. Гидравлические экскаваторы будут применяться в основном там, где требуется селективная выемка полезного ископаемого, где срок жизни карьера сравнительно небольшой.

Шагающие и карьерные экскаваторы Уралмашзавода по техническому уровню, в том числе по рабочим параметрам, надежности и другим показателям, соответствуют современному мировому уровню. Их проектирование ведется с использованием компьютерной техники с соответствующим программным обеспечением, что дает возможность выбирать оптимальные конструктивные решения.

Металлургическое оборудование

Уралмашзаводом с 1933 года производится металлургическое оборудование, а прокатное было первым: за всю историю изготовлено 22 блюминга, 7 крупносортовых и заготовочных станов, 4 рельсобалочных стана, 5 отделений для термообработки рельсов, 28 рельсо-сортоправильных машин, 27 листоправильных машин, 8 листовых станов, 5 отделений для термообработки листа, 4 колесо- и кольцепрокатных стана, 68 станов холодной прокатки, 22 непрерывно-травильных агрегата, 9 агрегатов непрерывного отжига, 6 агрегатов непрерывного покрытия горячим способом, 32 агрегата поперечной резки, 20 агрегатов продольной резки, 8 машин правки изгибом с растяжением.

ПАО «Уралмашзавод» изготавливает агломерационные машины конвейерного типа с рабочей площадью спекания до 400 м², обжиговые конвейерные машины с рабочей площадью до 520 м², стальные тележки для обжиговых и агломерационных машин из жаростойкой стали шириной до 3 м, колосники для тележек.

ПАО «Уралмашзавод» имеет опыт производства слябовых машин непрерывной разливки стали (МНЛЗ) годовым производством до 3 млн. т, блюмовых машин, комбинированных машин, роликов МНЛЗ с наплавкой, кристаллизаторов МНЛЗ. Изготовлено более 70 МНЛЗ.

Имеет опыт изготовления вертикальных гидравлических прессов дляковки, штамповки и прессования различных металлов и сплавов усилием до 150 MN, горизонтальных экструзивных прессов для цветных металлов и сплавов усилием до 200 MN, правильно-растяжных машин усилием до 60 MN, трубо- и панелегибочных станков для гибки труб диаметром до 820 мм.

Освоено производство загрузочных устройств клапанного типа для доменных печей объемом до 5000 м³, машин забивки чугунной летки, чугуновозов, шлаковозов, скиповых лебедок.

Уралмашзаводом освоено проектирование и производство подъемно-транспортного оборудования, специальных кранов большой грузоподъемности: разливочных кранов, мультимашин для металлургии, полярных кранов, кранов эстакады и перегрузочных машин для атомных электростанций. Грузоподъемность этих кранов достигает 600 тонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горное оборудование Уралмашзавода* / коллектив авторов; под ред. Г. Х. Бойко. Екатеринбург, 2003. 240 с.
2. Калянов А.Е., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Моделирование движения недробимого тела в камере дробления конусной дробилки // *Горное оборудование и электромеханика*. 2017. № 2. с. 39-45.
3. Лагунова Ю.А., Червяков С.А., Эпштейн В.Е. Уралмаш – искусство построения машин. // Препринт, 2007 г.

Машины и оборудование для открытых и подземных горных работ

***Чтобы в недра проникнуть глубже,
Чтобы вскрыть любой карьер,
С ними быть в глубокой дружбе
Каждый должен инженер!
Чтоб в любых забоях сложных
Эффективность не терять,
Нужно там, где только можно,
Беспилотники внедрять.***

Доц. П.А. Жиганов

УДК.622.673.1

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСОВ ШАХТНОГО ВОДООТЛИВА

Д.С. Дьяк^{1,2}, аспирант

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва,
Российская Федерация

Рассмотрены методы повышения энергоэффективности центробежных секционных насосов (ЦНС), применяемых в системах шахтного водоотлива. На примере насоса типа ЦНС-300 рассмотрены два метода модернизации рабочего колеса: применение лопаток с переменным шагом и добавление лопаток второго ряда. Установлено, что применение указанных методов позволяет увеличить гидравлический КПД насоса до 6,0 %.

Ключевые слова: центробежный насос секционный, гидравлический КПД, энергоэффективность, шахтный водоотлив, рабочее колесо.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF MINE DEWATER PUMPS

D.S. Dyak^{1,2}

This article examines methods for improving the energy efficiency of centrifugal section pumps (CSP) used in mine dewatering systems. Using the CSP-300 pump as an example, two impeller upgrade methods are discussed: the use of variable-pitch blades and the addition of a second row of blades. It has been established that these methods can increase the pump's hydraulic efficiency by up to 6.0 %.

Keywords: sectional centrifugal pump, hydraulic efficiency, energy efficiency, mine drainage, impeller.

Системы шахтного водоотлива предназначены для сбора и отвода подземных и инфильтрационных вод из горных выработок. Основным оборудованием являются центробежные насосы, в частности, многоступенчатые секционные типа ЦНС, позволяющие создавать высокий напор. Поскольку доля энергозатрат, приходящаяся на системы водоотлива в горной промышленности составляет 10÷25 % от всей потребляемой мощности, то повышение эффективности центробежных насосов является актуальной задачей [1, 2].

Наибольшие гидравлические потери в насосе приходятся на рабочее колесо, доля которых достигает 45÷50 %. В связи с чем, в статье рассматривается модернизация рабочего колеса за счет изменения геометрической решетки с обеспечением сохранения габаритных и присоединительных размеров. В работе рассматриваются методы повышения энергоэффективности за счет применения лопаток с переменным шагом и добавлением лопаток второго ряда [3].

Применение лопаток с переменным шагом.

Применение переменного шага лопаток (рис. 1), достигаемое за счет изменения межлопастного расстояния, направлено на снижение гидравлических потерь и расширение рабочей зоны насоса [4]. Данный метод позволяет увеличить рабочий диапазон от $0,7Q_{\text{ном}}$ до $1,5Q_{\text{ном}}$ и повысить гидравлический КПД до 3,5 % за счет снижения неравномерности поля скоростей и выравнивания потока перекачиваемой среды.

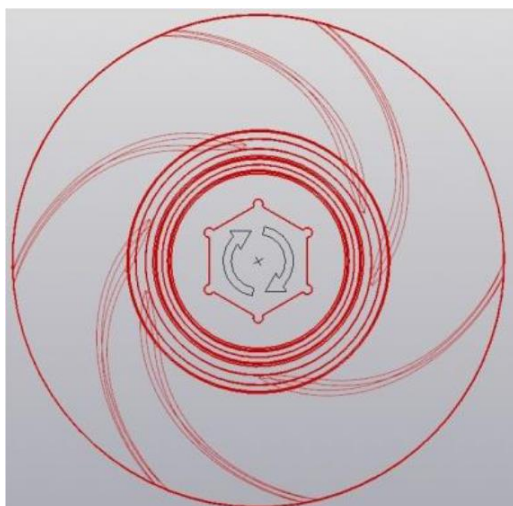


Рисунок 1. Цифровая модель рабочего колеса с переменным шагом лопаток

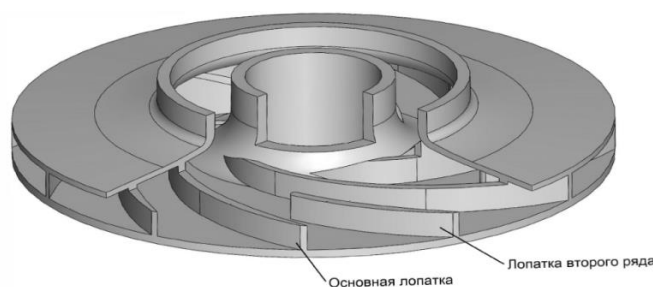


Рисунок 2. Рабочее колесо с лопатками второго ряда

Добавление лопаток второго ряда

Метод добавления лопаток второго ряда (рис. 2) заключается в установке дополнительных лопаток в межлопаточном канале рабочего колеса [5, 6]. Второй ряд лопаток, имеющий укороченную длину, позволяет снизить гидравлические потери и повысить напорные характеристики насоса за счет выравнивания поля скоростей по ширине канала и уменьшения вихревых зон, возникающих на выходе из рабочего колеса. В результате, представленный метод способствует повышению гидравлического КПД до 6,0 % и повышению напора до 6,1 %.

Рассматриваемые методы модернизации рабочего колеса применимы для конкретных условий эксплуатации центробежного насоса. Применение лопаток с переменным шагом целесообразно на предприятиях с неравномерным водопритокom, поскольку такое решение позволяет расширить диапазон эффективной работы насоса. Добавление лопаток второго ряда не зависит от условий эксплуатации центробежного насоса и способствует повышению как гидравлического КПД, так и напора. Методы направлены на сохранение габаритных и присоединительных размеров рабочего колеса центробежного насоса.

Выводы

Повышение энергоэффективности шахтных центробежных насосов является актуальной задачей, позволяющей снизить энергозатраты горнодобывающих предприятий.

Применение лопаток с переменным шагом обеспечивает расширение рабочей зоны насоса от $0,7Q_{\text{ном}}$ до $1,5Q_{\text{ном}}$ и повышение гидравлического КПД до 3,5 %.

Добавление лопаток второго ряда способствует повышению гидравлического КПД насоса до 6,0 % и увеличению напора до 6,1 % за счет снижения вихревых зон и выравнивания поля скоростей потока перекачиваемой среды.

Список литературы

1. Есорump.ru'2009 Эффективность и экологичность насосного оборудования: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. –Москва: Из-во РАПН, 2009 – 458 с. ISBN 978-5-7038-3359-9.
2. Husveg, R., Husveg, T., Van Teeffelen, N., Ottestad, M., & Hansen, M. R. (2018). Improving separation of oil and water with a novel coalescing centrifugal pump. SPE Production & Operations, 33(04), 857–865. <https://doi.org/10.2118/188772-pa>
3. Gradilenko N., Lomakin V. (2020). Overview of methods for optimizing the flow of the centrifugal pump. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 963(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/963/1/012016>
4. Isametova M. E., Nussipali R. K., Kaldan G. U., Dzhasinbekov O. A., Akhmedov H. A. Automation of centrifugal pump impeller designing with modified vane grille. Vestnik NRTU. 2021. Vol. 143, No. 1. pp. 135–14 <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.v143.i1.18>
5. Dyak D. S., Rakhutin M. G., & Merzlyakov V. G. (2025). Methods of energy efficiency enhancement of centrifugal pumps. Eurasian Mining, 2, 78–82. <https://doi.org/10.17580/em.2025.02.14>
6. Дьяк Д.С., Рахутин М.Г. Использование лопаток второго ряда для снижения гидравлических потерь центробежного насоса. Горная промышленность. 2025;(6):206–210. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-206-210>

УДК.622.673.1

СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ГОЛОВНЫХ КАНАТОВ НАКЛОННОГО ПОДЪЁМА

С.В. Белов, доц., канд. техн. наук., **Е.Л. Садыков**, **В.Я. Потапов**, проф., д-р техн. наук., **В.В. Потапов**, доц., канд. техн. наук., **П.В. Трутнев**

ФБГОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Рассмотрен ряд факторов интенсивного износа головных канатов наклонных подъёмных установок. Интенсивность образования мартенсита, а значит и износа канатов, в значительной степени зависит от прижимного усилия и температуры при проскальзывании каната по поверхности ролика. Для оптимизации условий взаимодействия пары «канат-ролик», необходимо минимизировать относительное проскальзывание их поверхностей. Предложено сделать конструкцию поддерживающего канат ролика наборным из нескольких независимых дисков, расположенных на одной оси вращения. Представлены графики зависимости скорости относительного перемещения точки на поверхности ролика традиционной и предлагаемой конструкции, и каната в момент его набегания на ролик, расположенные на одной координатной плоскости.

Ключевые слова: износ головных канатов, канатоподдерживающие ролики, мартенсит, графики зависимости скорости, наклонная подъёмная установка.

REDUCING THE INTENSITY OF WEAR ON THE HEAD ROPES OF AN INCLINED LIFT

S.V. Belov, E.L. Sadykov, V.Ya. Potapov, V.V. Potapov, P.V. Trutyev

A number of factors affecting the intensive wear of head ropes in inclined hoisting systems are considered. The rate of martensite formation, and hence rope wear, depends significantly on the clamping force and temperature during rope slippage along the roller surface. To optimize the rope-roller interaction, it is necessary to minimize the relative slippage of their sur-

faces. A proposed design for the rope support roller consists of multiple independent disks located on the same axis of rotation. Graphs are presented showing the dependence of the relative velocity of a point on the roller surface for the traditional and proposed designs, and the rope as it approaches the roller, all located on the same coordinate plane.

Keywords: head rope wear, rope support rollers, martensite, speed dependence graphs, inclined lifting unit.

Интенсивный износ головных канатов наклонных подъёмных установок обусловлен устранимыми и неустраняемыми факторами. К неустраняемым факторам относят проскальзывание каната относительно поверхности канатоподдерживающих роликов в момент набегания на них. По данным проводимых исследований, основной причиной разрушения канатов, в этом случае является образование хрупкого слоя мартенсита на поверхности проволок, составляющих подъёмный канат. Образование мартенсита происходит в результате пластических и упругих деформаций в металле каната при проскальзывании по поверхности ролика. Интенсивность образования мартенсита, а значит и износа канатов, в значительной степени зависит от прижимного усилия и температуры при проскальзывании каната по поверхности ролика. Зная конструкцию, размеры и материал канатоподдерживающего ролика, а также линейную массу головного каната можно получить выражение, определяющее характер взаимодействия каната с роликом, при набегании на последний. Из полученной, таким образом, зависимости можно определить относительную скорость проскальзывания, а также прижимное усилие соприкасающихся поверхностей каната и ролика (см. рис 1). Если известен закон изменения прижимного усилия в зависимости от времени, а также период и путь проскальзывания при трении двух поверхностей, легко определить работу, затрачиваемую на преодоление сил трения при набегании каната на ролик. Эта работа будет затрачена на нагрев, абразивный износ и образование мартенсита в поверхностном слое проволок каната, вызывая скорейший его износ. Для оптимизации условий взаимодействия пары канат-ролик, необходимо минимизировать относительное проскальзывание их поверхностей. С этой целью предлагается существенно усовершенствовать конструкцию роликов, и тем самым свести к минимуму затраты, возникающие вследствие износа каната и роликов при их взаимодействии, а также уменьшить вредное сопротивление движению подъёмной установки. Если канатоподдерживающий ролик сделать наборным из нескольких независимых дисков (рис.1), расположенных на одной оси вращения, то момент инерции вращающихся частей ролика при набегании каната уменьшится в разы, за счёт изменения формы и уменьшения массы вращающихся частей ролика. А значит ускорение точки на окружности такого ролика в момент набегания на него каната, будет больше, чем у роликов традиционной конструкции. Не мало важным фактором можно считать и то, что применение роликов из набора независимых дисков, значительно увеличит их ремонтпригодность [1-3].

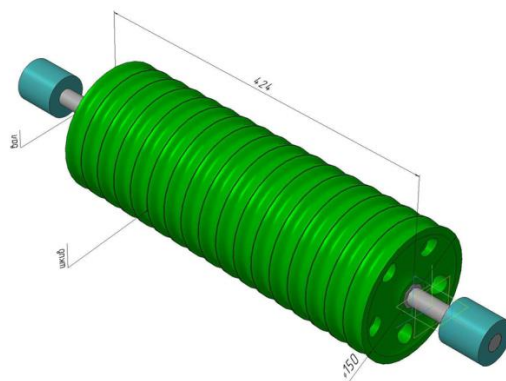


Рис 1. Путьной ролик предлагаемой конструкции

Графики зависимости скорости относительного перемещения точки на поверхности ролика традиционной и предлагаемой конструкции и каната в момент его набегания на ролик, расположенные на одной координатной плоскости, представлены на рисунке 2. Из приведённых зависимостей следует значительное превышение периода проскальзывания и прижимного усилия во время набегания каната на ролики традиционной конструкции по сравнению с малоинерционными роликами предлагаемой конструкции, при прочих равных условиях.

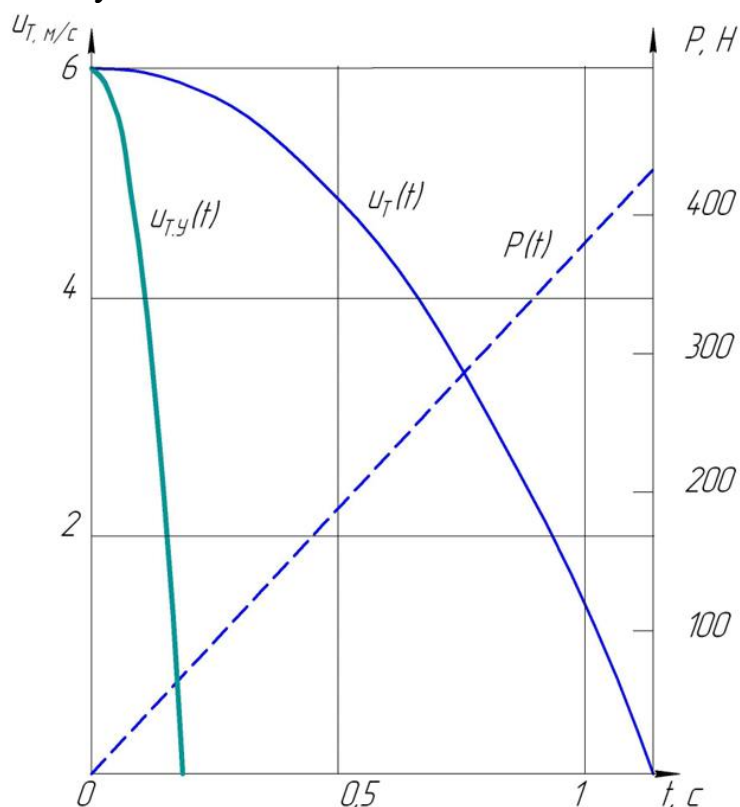


Рис 2. Зависимость скорости перемещения точки на поверхности ролика традиционной и предлагаемой конструкции относительно каната в момент его набегания на ролик: $U_T(t)$ – зависимость скорости относительного перемещения поверхностей каната и ролика традиционной конструкции от времени в период набегания; $U_T(t)$ – зависимость скорости относительного перемещения поверхностей каната и ролика предлагаемой в работе конструкции от времени в период набегания; $P(t)$ – зависимость усилия прижимающего канат к ролику от времени в период набегания

Сравнить влияние конструкции ролика на износ канатов, можно оценив отношение энергии затрачиваемой на преодоление сил трения между канатом и поверхностью ролика за время их относительного проскальзывания в момент набегания. При этом необходимо учитывать длину участка каната подверженного износу, т.к. работа сил трения, рассеянная на значительное расстояние по длине каната не вызывает интенсивного его разрушения, тогда как концентрация этой работы на небольшом участке каната, напротив, приведёт к скорейшему его разрушению.

$$\frac{A_{\text{мп1}} \cdot L_{\text{изн2}}}{A_{\text{мп2}} \cdot L_{\text{изн1}}} = \frac{32,4}{0,8} = 40,5. \quad (1)$$

Таким образом, влияние малоинерционных роликов предлагаемой конструкции на интенсивность износа канатов по энергетическим показателям более чем в 40 раз ниже, чем ролика традиционной конструкции.

Выводы:

1. Разработана и экспериментально обоснована конструкция малоинерционных канатоподдерживающих роликов для наклонных подъёмных установок. Проведённые исследования показали 40-ка кратное преимущество таких роликов над роликами традиционной конструкции по степени влияния на износ головных канатов.

2. Разработаны методики и пакеты прикладных программ для расчёта параметров многоканатных наклонных подъёмных установок, а также рекомендации по использованию малоинерционных канатоподдерживающих роликов переданные в ОАО «СУБР».

Список литературы

1. Садыков Е.Л. Возможность возникновения резонанса при работе многоканатных подъёмных установок. // Горный информационно аналитический бюллетень. 2011. депонирована. М.: Изд. «Горная книга».
2. Садыков Е.Л. Исследование и разработка канатоподдерживающих роликов повышенной надёжности для наклонных подъёмных установок. // ПГТУ – 2010 г.
3. Попов Ю.В., Тимухин С.А., Садыков Е.Л. О методике прогнозирования общего ресурса комплексов шахтных подъёмных установок// Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: материалы VII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. С. 116-119

УДК 622.7:658.274

АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД

В.Я. Потапов, проф., д-р техн. наук, **В.В. Потапов**, доц., канд. техн. наук,
М.В. Архипов, ст. преп., **А.М. Кузнецов**, ст. преп., **К.А. Парамонов**
ФБГОУ ВО Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

В практике конструирования горнодобывающего оборудования для сепарации и классификации рудных материалов широко используется принцип, основанный на дифференциации минералов по их фрикционным и упругим характеристикам. Ключевым ограничением существующих аппаратов, функционирующих на основе взаимодействия горной массы с рабочей поверхностью, является их способность осуществлять разделение не по совокупности физико-механических свойств, а по одному наиболее выраженному параметру (например, трению, упругости, форме или твердости). Это приводит к неоптимальному качеству сепарации. Перспективным направлением в развитии разделительных аппаратов является разработка систем, способных интегрировать множество физико-механических свойств горных пород, что обеспечит комплексное и эффективное разделение полезных ископаемых в одном технологическом цикле. В рамках представленной статьи анализируется кинематика частиц при соударении с наклонной поверхностью. Установлено, что в результате ударного и фрикционного воздействия происходит изменение вектора скорости частицы. Различия в коэффициентах трения и восстановления при ударе обуславливают различные параметры скорости частиц после соударения, что позволяет использовать эти коэффициенты в качестве эффективных критериев для разделения.

Ключевые слова: горная промышленность, разделение материалов, трение, разделение, энергоёмкость процесса, фрикционный метод.

ANALYSIS OF THE THEORY AND PRACTICE OF RESEARCHING THE FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF ROCKS

V.Ya. Potapov, V.V. Potapov, M.V. Arkhipov, A.M. Kuznetsov, K.A. Paramonov

In the design of mining equipment for the separation and classification of ore materials, a principle based on the differentiation of minerals by their frictional and elastic properties is widely used. A key limitation of existing equipment operating through the interaction of the rock mass with the working surface is their ability to separate not by a combination of physical and mechanical properties, but by a single, most pronounced parameter (e.g., friction, elasticity, shape, or hardness). This leads to suboptimal separation quality. A promising direction in the development of separation equipment is the development of systems capable of integrating multiple physical and mechanical properties of rocks, which will ensure comprehensive and efficient separation of minerals in a single process cycle. This article analyzes the kinematics of particles colliding with an inclined surface. It is established that impact and frictional interactions result in a change in the particle velocity vector. Differences in the coefficients of friction and impact recovery result in different particle velocity parameters after impact, allowing these coefficients to be used as effective criteria for separation.

Keywords: mining, material separation, friction, separation, process energy consumption, friction method

Актуальность. В основе классификации аппаратов фрикционного метода разделения минералов используется различие в механизме трения. Трение играет очень важную роль в процессах современных технологий разработки месторождений [1, 3, 10].

Основной вклад в научное развитие теории и разработки процессов и машин для разделения и классификации руд с использованием фрикционных и упругих характеристик горных пород внесли работы Е. В. Алексан-

дрова, М. Д. Барского, И. И. Блехмана, И. И. Быковского, В. Гольдсмит, Г. Ю. Джанелидзе, А. К. Зайцева, В. Б. Карнушина, Б. И. Крюкова, Л. Б. Левенсона, Г. И. Линдера, В.А. Мальцева, В.А. Олевского, В. В. Олюнина, Я.Г. Пановко, В.В. Троитского, К.В. Фролова, А.В. Юдина и др.[4, 11]

Теоретическими исследованиями разделения материалов по упругости и трению занимались А. И. Афанасьев, Г. Э. Вебер, М. Д. Барский, П. М. Заика, В. В. Иванов, С. А. Ляпцев, Н. К. Тимченко, В. В. Ушаков, Е. Ф. Цыпин [8, 9].

Наиболее полный анализ научных работ по методическому и экспериментальному определению фрикционных характеристик горных пород изложен в работе Л. И. Барона [1, 6].

Объект исследования. Технология определения коэффициентов трения горных пород.

Цель исследования. Экспериментальное определение величины коэффициента трения скольжения.

Методы исследований. Практические исследования разделения материалов по упругости и трению

Методология исследований. Определение параметров для нахождения коэффициентов трения горных пород.

Новая методика, применяемая для определения коэффициентов трения горных пород, была разработана под руководством Л. И. Барона в лаборатории механических способов разрушения горных пород в ИГД им. А. А. Скочинского (г. Москва) и изложена в работе [1]. По данной методике было определено значение коэффициентов трения покоя и движения для нескольких десятков горных пород отечественных месторождений [1]. Экспериментальное определение величины коэффициента трения скольжения проводилось с помощью трибометра, представленного на рис. 1 [5,7].

К штативу 1 шарнирно прикреплена плоскость 2, на которой закреплен транспортир 3. К сектору транспортира подвешена стрелка с отвесом 5. Изменения угла наклона плоскости 2 осуществлялось с помощью ручки 6 и червячной передачи 7.

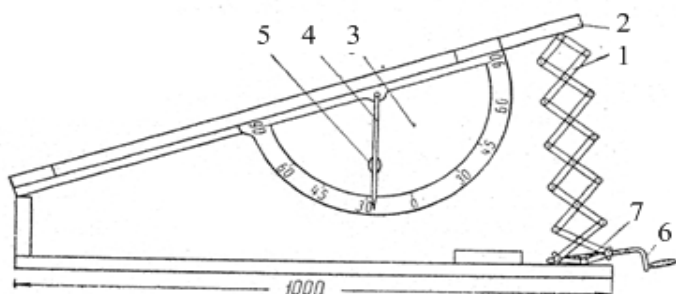


Рис. 1. Схема трибометра

В таблице 1 приведены данные ряда авторов о коэффициентах трения покоя f_n и коэффициентах трения движения (скольжения) f_d различных сортов каменных углей по стали [17, 21].

Таблица 1 Коэффициенты трения покоя $f_{\text{п}}$ и движения $f_{\text{д}}$ каменного угля по стали

Сорт угля	$f_{\text{п}}$	$f_{\text{д}}$	$f_{\text{д}}/f_{\text{п}}$
Антрацит	0,84	0,29	0,345
Бурый уголь	1,00	0,58	0,580
Смолистый уголь	0,84	0,32	0,381
Каменный уголь	0,45	0,35	0,778
	0,50	0,20	0,400
	0,40	0,30	0,750
	0,35	0,26	0,743
	0,60	0,45	0,750
	0,50	0,38	0,760
	0,40	0,33	0,825
Среднее	—	—	0,631

Данные аналогичного характера для отдельных горных пород приведены в таблице 2. В предпоследних колонках таблицы 1 и таблицы 2 приведены вычисленные значения соотношения $f_{\text{д}}/f_{\text{п}}$ [1].

Таблица 2 Коэффициенты трения покоя $f_{\text{п}}$ и движения $f_{\text{д}}$ горных пород по стали

Горные породы	$f_{\text{п}}$	$f_{\text{д}}$	$f_{\text{д}}/f_{\text{п}}$
Известняк	1,0	0,51	0,510
Сланец	0,40	0,30	0,750
	0,50	0,38	0,760
Ангидрит	0,38	0,36	0,946
	0,36	0,33	0,917
Песчаник	0,38	0,30	0,790
	0,36	0,33	0,916
Железная руда	1,0	0,58	0,580
	0,42	0,33	0,785
	0,38	0,31	0,815
Гранит	0,45	0,33	0,734
	0,36	0,30	0,834
Среднее	—	—	0,777

Важным фактором при разработке фрикционного разделения являются материалы, из которых изготовлены поверхности разделения. В научных трудах [4] приведены результаты исследований коэффициентов трения горных пород по разным материалам. Заслуживают внимания результаты исследований по определению коэффициентов трения по сухому и мокрому желобам, приведенные в работе [13].

Теоретический анализ движения частиц пустой породы и асбестовых волокон по наклонной плоскости был выполнен в работе [12]. Установлено, что коэффициент трения асбестового волокна и его агрегатов по железу равен 0,7 – 0,9, а пустой породы 0,3 – 0,5. С уменьшением крупности породных частиц разность коэффициентов трения уменьшается. Материал крупностью менее 1,5 мм на наклонной плоскости не разделяется.

Теоретический анализ взаимодействия частиц пустой породы и асбестового волокна с наклонной поверхностью при разделении по упругости в работах по обогащению асбеста отсутствует.

Несмотря на высокую эффективность разделения асбестосодержащих продуктов на наклонных плоскостях, низкую материалоемкость процесса, способ не нашел широкого применения в асбестовой промышленности из-за малой производительности аппаратов, чувствительности к внешним воздействиям: влажности, крупности, агрегатному состоянию асбеста и т. п. Аппараты для разделения асбестосодержащих продуктов по трению нашли применение, в основном, только при обработке проб.

Теоретические основы разделения разно компонентных продуктов по упругости и трению подробно рассмотрены в работах Н. К. Тимченко, П. М. Заики и ряда других авторов.

Предложенная в работе методика определения упругих свойств сыпучих материалов требует некоторых уточнений в определении коэффициентов восстановления и трения при ударе. Прежде всего, максимальная дальность отскока частицы соответствует начальному значению угла в 45° в случае, когда ее начальная скорость частицы V_0 постоянна для всех углов наклона плиты.

Рассмотренные фрикционные и упругие характеристики горных пород наиболее часто используются в практике исследования процессов разделения и создания новых аппаратов.

Большинство авторов (В. А. Бауман, И. И. Блехман, И. И. Быковский, Г. Г. Григорьев, И. Ф. Гончарович, Г. Линднер, В. А. Олевский и др.) в своих научных работах для описания движения горной массы использовали в уравнениях коэффициенты кинетического трения, восстановления и мгновенного трения при ударе [2].

Рассмотренные работы свидетельствуют о том, что процесс разделения асбеста, углесодержащих продуктов, слюд по упругости и трению недостаточно изучен [12].

Контрастность параметра разделения по упругим свойствам компонентов требует уточнения [13]. Нет сведений о фрикционных характеристиках минералов вмещающих пород и различных типов углей, слюд и асбестовых руд. Нет теоретического описания массового процесса разделения по упругости и трению с учетом механического взаимодействия частиц. Из анализа работ представляется возможным создание технических систем по производительности и эффективности не ниже известных для разделения углей, асбеста, слюд, и менее материалоемких.

Список литературы

1. Барон Л. И. Горно-технологическое породоведение. Предмет и способы исследований. – М.: Наука, 1977. – 324 с.
2. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. – М.: Наука, 1964. – 410 с.
3. Мальцев В. А., Юдин А. В. Особенности разделения горной массы на грохотильных секциях с открытой щелью // Известия вузов. Горный журнал. – № 9, 2002.
4. Барский М. Д. Фракционирование порошков. – М., Недра, 1980. – 327 с.

5. Левенсон Л. Б. Машины для обогащения полезных ископаемых: учебн. пособие / А. Б. Левенсон. – М.: Госмашметиздат, 1933. – 803 с.
6. Ревнивцев В. И. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработки / В. И. Ревнивцев, Е. И. Азбель, Е. Г. Баринов и др.; Под ред. В. И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1987. – 300 с.
7. Кравец Б. Н. Специальные и комбинированные методы обогащения. – М.: Недра, 1986. – 340 с.
8. Олюнин В. В. Переработка нерудных строительных материалов. – М.: Наука, 1988. – 232 с.
9. Заика П. М. Динамика вибрационных зерноочистительных машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
10. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка (пер. с англ.). М., Машгиз, 1960.
11. Покровский Г. И. Трение и сцепление в грунтах. М.: Стройиздат, 1941.
12. Иванов В. В., Умнова В. В., Чечулина Г. М. Упругие свойства частиц асбестосодержащих продуктов / Совершенствование технологии обогащения асбестовых руд. Сб. научных трудов ВНИИпроектасбеста – Асбест, 1990. С.100-109.
13. Цыпин Е. Ф., Потапов В. Я., Пелевин А. Е., Иванов В. В., Слесарев О.Ю. Коэффициенты трения частиц асбестосодержащих продуктов // Совершенствование технологии обогащения асбестовых руд: Сб. научных трудов ВНИИпроектасбеста. - Асбест, 1990. - С.110-115.

УДК 622.232:681.5

АЛГОРИТМ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ГОРНЫХ МАШИН

И.В. Бровченко, аспирант, **Е.Б. Мазаков**, канд. техн. наук, доцент,

Д.А. Задков, канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский горный университет имени императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, РФ

Рассматривается задача повышения эффективности контроля технического состояния режущего инструмента горных машин. Показано, что существующие методы оценки износа не обеспечивают непрерывного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса. Предложена математическая модель скорости износа инструмента как функции рабочих параметров машины, включая нагрузку, скорость резания и свойства разрушаемой породы. На основе модели разработан алгоритм оценки состояния инструмента и прогнозирования его остаточного ресурса.

Ключевые слова: горные машины, режущий инструмент, износ, диагностика, алгоритм контроля, математическая модель, система мониторинга, прогноз остаточного ресурса, системный анализ.

ALGORITHM FOR MONITORING CUTTING TOOL WEAR IN MINING MACHINES BASED ON OPERATING PARAMETERS

The paper addresses the problem of improving condition monitoring of cutting tools in mining machines. It is shown that existing wear assessment methods do not provide continuous monitoring or prediction of the remaining useful life. A mathematical model of cutting tool wear rate is proposed as a function of machine operating parameters, including load, cutting speed, and rock properties. Based on this model, an algorithm for tool condition assessment and remaining useful life prediction is developed.

Keywords: mining machines, cutting tools, wear, diagnostics, control algorithm, mathematical model, monitoring system, remaining useful life prediction, system analysis.

Режущий инструмент является одним из наиболее нагруженных элементов исполнительных органов горных машин, от состояния которого зависят производительность оборудования и надежность эксплуатации. В процессе работы резцы подвергаются интенсивному абразивному воздействию породы, что приводит к затуплению режущей кромки и росту нагрузки на привод [1-4].

Контроль состояния инструмента на практике чаще всего осуществляется визуально либо по регламентным срокам замены, что не позволяет учитывать реальные условия эксплуатации и прогнозировать остаточный ресурс. Современные системы мониторинга горных машин позволяют регистрировать параметры рабочего процесса – мощность привода, скорость вращения исполнительного органа и режимы резания [2]. Это создаёт предпосылки для построения моделей, связывающих параметры работы машины со скоростью изнашивания инструмента.

Поэтому целью работы является разработка математического и алгоритмического обеспечения системы контроля износа режущего инструмента горных машин на основе анализа рабочих параметров. Необходимо разработать модель и алгоритм, обеспечивающие вычисление скорости (интенсивности) изнашивания инструмента, оценку износа, классифика-

цию состояния и прогноз остаточного ресурса.

В качестве входных параметров системы рассматриваются нагрузка на исполнительный орган, скорость резания и характеристика массива породы, выходными параметрами являются величина износа инструмента, его состояние и прогноз ресурса.

Скорость износа режущего инструмента описывается степенной зависимостью от рабочих параметров машины, что соответствует классическим представлениям теории изнашивания контактных поверхностей [3]:

$$dW/dt = kP^\alpha V^\beta R^\gamma,$$

где W – интегральный показатель износа; P – нагрузочный параметр процесса (мощность или момент привода); V – скорость резания; R – показатель свойств разрушаемой породы, оказывающий существенное влияние на интенсивность изнашивания режущего инструмента [5-7]; k, α, β, γ – параметры модели.

Накопленный износ определяется интегрированием по времени:

$$W(t) = \int kP^\alpha(t)V^\beta(t)R^\gamma(t)dt.$$

Для потоковой реализации используется рекуррентная форма:

$$W_i + 1 = W_i + k \cdot P_i^\alpha(t) \cdot V_i^\beta(t) \cdot R_i^\gamma(t) \cdot \Delta t.$$

Предельное состояние инструмента определяется достижением порогового значения $W_{кр}$, задаваемого требованиями к резцам и методами контроля по нормативной документации [4]. Остаточный ресурс инструмента оценивается выражением:

$$T_{ост} = (W_{кр} - W)/W$$

Алгоритм реализует модель износа в режиме реального времени и включает последовательную обработку параметров рабочего процесса.

На первом этапе осуществляется сбор данных, включающий регистрацию потребляемой мощности привода, скорости исполнительного органа и параметров массива горной породы. Используются сигналы, уже присутствующие в системе управления машины, что позволяет реализовать контроль без установки дополнительных датчиков.

Далее выполняется предварительная обработка данных, включающая синхронизацию сигналов, фильтрацию шумов и нормализацию параметров для повышения устойчивости вычислений.

После этого производится расчёт скорости износа инструмента по математической модели. Полученное значение используется для последующего накопления износа во времени путём обновления интегрального показателя состояния инструмента.

Определение состояния инструмента осуществляется на основе пороговой классификации величины накопленного износа:

- $W < 0,6W_{кр}$ – исправное состояние;
- $0,6W_{кр} \leq W < 0,85$ – допустимый износ;
- $W \geq 0,85W_{кр}$ – предельное состояние.

На завершающем этапе выполняется прогноз остаточного ресурса инструмента, позволяющий оценить оставшееся время его работы и принять решение о необходимости замены.

Предложенная модель обеспечивает непрерывный контроль состояния режущего инструмента на основе анализа рабочих параметров машины. Проведённая верификация на производственных данных подтверждает адекватность модели и её применимость для прогнозирования износа в реальных условиях эксплуатации. Использование параметров разрушения массива в моделях износа подтверждается экспериментальными исследованиями [5-8]. Анализ модели показывает, что наибольшее влияние на точность прогноза оказывает корректность оценки нагрузочного параметра, что подтверждает целесообразность использования сигналов мощности привода в качестве диагностического признака износа.

Для оценки адекватности разработанной модели выполнена её верификация путём сопоставления расчётных значений накопленного износа с производственными данными эксплуатации режущего инструмента. Результаты сравнения представлены на рис. 1. Расчётная зависимость демонстрирует удовлетворительную сходимость с производственными данными, при этом среднее относительное отклонение не превышает 5-8 %, что подтверждает адекватность модели и её применимость для прогнозирования остаточного ресурса инструмента в реальных условиях эксплуатации.

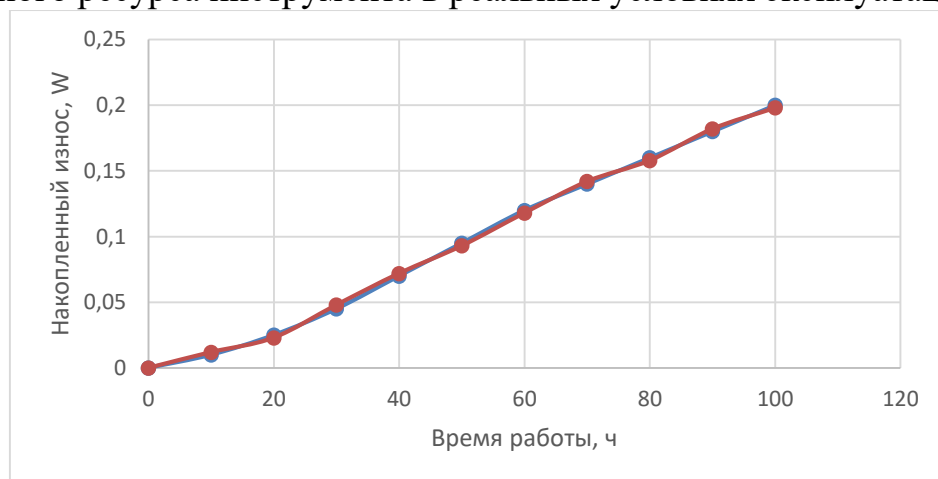


Рис. 1. Сравнение расчётной зависимости накопленного износа $W(t)$ по предложенной модели и производственных данных эксплуатации режущего инструмента

Применение разработанного алгоритма в системах мониторинга горных машин позволяет своевременно выявлять приближение предельного состояния режущего инструмента и принимать обоснованные решения о его замене на основе прогнозной оценки ресурса. Это обеспечивает повышение стабильности технологического процесса и снижение вероятности аварийных остановок оборудования.

Предложенный алгоритм обеспечивает непрерывный контроль состояния инструмента и прогноз его ресурса, снижает вероятность внеплановых остановок и может быть реализован в существующих системах мониторинга без установки дополнительных датчиков, что снижает затраты на внедрение и повышает надежность эксплуатации оборудования.

Вывод. Разработана математическая модель и алгоритм контроля износа режущего инструмента горных машин, позволяющие оценивать состояние и прогнозировать ресурс на основе параметров рабочего процесса.

Показано, что предложенный подход обеспечивает непрерывный мониторинг режущих органов без установки дополнительных датчиков и создаёт возможность перехода к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию, повышая надёжность эксплуатации и снижая затраты на техническое обслуживание.

Список литературы

1. Габов В.В., Задков Д.А., Прялухин А.Ф., Садовский М.В., Молчанов В.В. Совершенствование конструкции шнекового исполнительного органа очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 51-71.
2. Козлов В.В., Сафронов А.Н. Диагностика технического состояния горных машин по параметрам электропривода // Горный журнал. 2018. №7. С. 62–66.
3. Горные машины : учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2. Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых / Г.В. Казаченко, В.Я. Прушак, Г.А. Басалай. – Минск : Вышэйшая школа, 2018. – 228 с.
4. Горные машины. Практикум: учебное пособие. / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Г.И. Лютко. – Минск: Вышэйшая школа, 2020. – 200 с.
5. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. 1953. Vol. 24, No. 8. P. 981–988.
6. ГОСТ Р 51047-97. Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические требования.
7. Rostami J. et al. Effects of rock properties on cutting tool wear // Wear. 2016. Vol. 368–369. P. 132–145.
8. Pawlik J. et al. Volumetric wear assessment of mining picks // Materials. 2022. Vol. 15.
- Alber M. Stress dependency of the Cerchar abrasivity index // Tunnelling and Underground Space Technology. 2008. Vol. 23. P. 351–359.

УДК 622.285

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ УПЛОТНИТЕЛЬНОГО УЗЛА СИЛОВОГО ГИДРОЦИЛИНДРА

Г. Д. Буялич¹, профессор, д. т. н., К. Г. Буялич¹, доцент, к. т. н.,
М. А. Бяков¹, аспирант

¹ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени
Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, РФ

Рассмотрен принцип работы предлагаемого поршня силового гидроцилиндра, повышающего стабильность работы уплотнительного узла. Приведены результаты расчетов методом конечных элементов изменения уплотнительного зазора от давления рабочей жидкости, диаметра и толщины стенки рабочего цилиндра, а также от параметров предлагаемого поршня.

Ключевые слова: силовой гидроцилиндр, поршень, уплотняемый зазор, уплотнение.

INCREASING THE STABILITY OF THE SEALING UNIT OF THE POWER HYDRAULIC CYLINDER

G. D. Buyalich, K. G. Buyalich, M. A. Byakov

This paper examines the operating principle of the proposed hydraulic power cylinder piston, which improves the stability of the sealing unit. The results of finite element calculations are presented for the sealing gap changes depending on the working fluid pressure, the diameter and wall thickness of the working cylinder, and the parameters of the proposed piston.

Keywords: power hydraulic cylinder, piston, sealing gap, sealing.

На протяжении ряда лет на кафедре Горных машин и комплексов КузГТУ проводятся работы по силовому взаимодействию механизированных крепей с боковыми породами и влияние силовых и конструктивных параметров секций на тяжесть проявления горного давления [1-8].

Моделирование методом конечных элементов деформаций рабочих цилиндров показало, что уплотнительные зазоры в гидростойках могут достигать недопустимых значений [9-18].

Экспериментально в шахтных условиях было выявлено, что при определенных силовых параметрах динамические воздействия на гидростойки крепи имеют колебательный характер с продолжительностью от 0,01 до 0,1 с и скоростью смещения до 3,5 м/с на величину от 1 до 50 мм.

Математическое моделирование взаимодействия крепи с кровлей при вторичных осадках кровли подтвердили получаемых параметров при блочном обрушении [19-23].

При таких скоростях смещения кровли предохранительные клапаны не успевают срабатывать и даже при срабатывании некоторых конструкций клапанов расход рабочей жидкости через каналы гидроблока «обеспечивает» критические «забросы» давления в поршневой полости, что приводит к недопустимым деформациям рабочего цилиндра и потерю герметичности гидростойки.

Для устранения этого недостатка предлагается конструкция поршня [24], у которого деформация стенки примерно равна деформации стенки рабочего цилиндра (рис. 1) независимо от того какие максимальные давления рабочей жидкости в поршневой полости, и независимо от того, с какой скоростью нарастает давление.

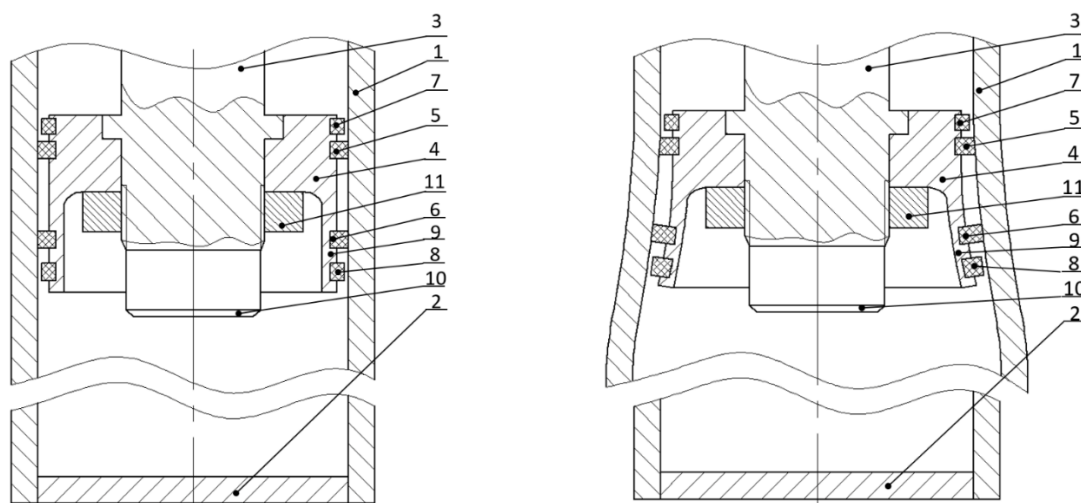


Рисунок 1 – Положения поршня при отсутствии (слева) и максимальном (справа) давления рабочей жидкости

На рис. 2 приведены результаты расчетов методом конечных элементов величины зазора между поршнем и рабочим цилиндром в зависимости от параметров поршня и рабочего цилиндра, что гораздо меньше максимальных зазоров, для которых спроектированы уплотнения.

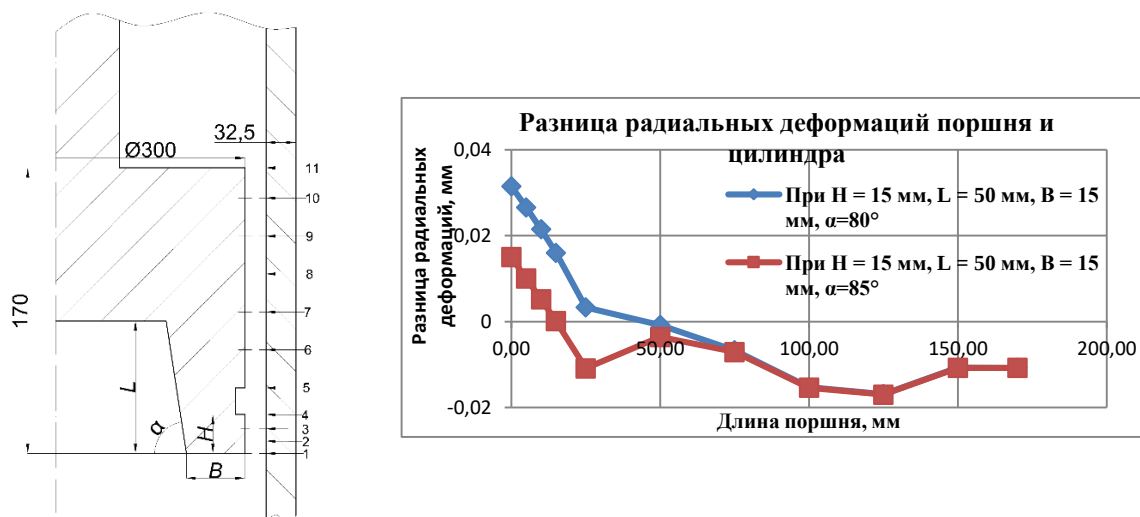


Рисунок 2 – Параметры поршня (слева) и примеры расчётных значений изменения уплотняемого зазора (справа)

Таким образом, в зависимости от конструкции рабочего цилиндра можно подобрать параметры предлагаемого поршня, при которых уплотняемый зазор между поршнем и рабочим цилиндром будет минимальным в широком диапазоне давления рабочей жидкости в поршневой полости силового гидроцилиндра, что обеспечит стабильность работы уплотнения.

Список литературы

1. Особенности взаимодействия механизированных крепей с боковыми породами в сложных горно-геологических условиях пологих и наклонных пластов / Б. А. Александров, Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, Ю. М. Леконцев, М. Г. Лупий. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. – 144 с. – ISBN: 5-7511-1608-9.
2. Контактное и силовое взаимодействие механизированных крепей с боковыми породами / Б. А. Александров, Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, В. И. Шейкин. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. – 130 с. – ISBN 5-7511-1783-2.

3. Буялич Г. Д. Направления совершенствования механизированных крепей для отработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях // Горная техника : добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых : каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2007. – С. 10–16.
4. Расширение технологических возможностей механизированных крепей / Б. А. Александров, А. Н. Коршунов, А. И. Шундулиди, Г. Д. Буялич, Ю. М. Леконцев, Ю. А. Антонов. – Кемерово : Изд-во Томского ун-та, Кузбассвуиздат, 1991. – 372 с. – ISBN 5-7511-0433-1.
5. О направлении снижения напряжённно-деформированного состояния призабойной зоны угольного пласта / Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, В. И. Шейкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S2 : Горное машиностроение. – С. 198–202. – ISSN 0236-1493.
6. Влияние начального распора механизированной крепи на частоту и интенсивность резких осадок кровли / Б. А. Александров, Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2002. – № 6. – С. 21–22.
7. Качество взаимодействия механизированных крепей с боковыми породами / Б. А. Александров, Ю. А. Антонов, Г. Д. Буялич, К. Г. Буялич, В. И. Шейкин. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2009. – 121 с. – ISBN 978-5-7511-1857-0.
8. Оценка характера взаимодействия крепи с труднообрушаемой кровлей // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых : сб. науч. тр. / Ассоциация «Кузбассуглетехнология». – Кемерово, 1995. – № 9. – С. 35–37.
9. Определение деформаций рабочего цилиндра шахтной гидростойки / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2000. – № 6. – С. 70–71.
10. Radial deformations of working cylinder of hydraulic legs depending on their extension / Buyalich G.D., Buyalich K.G., Voevodin V.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. – Vol. 91 : VI International Scientific Practical Conference on Innovative Technologies and Economics in Engineering 21–23 May 2015, Yurga, Russia. – # 012087. – ISSN 1757-899X (Online). – ISSN 1757-8981 (Print). – DOI 10.1088/1757-899X/91/1/012087.
11. Factors determining operation of lip seal in the sealed gap of the hydraulic props of powered supports / Buyalich G., Byakov M., Buyalich K. // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Vol. 41 : IIIrd international innovative mining symposium. – # 01045. – 6 p. – DOI [10.1051/e3sconf/20184101045](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101045).
12. Классификация факторов, оказывающих влияние на работу манжетных уплотнений гидростоек механизированных крепей / Бяков М. А., Буялич Г. Д., Буялич К. Г. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S65. – С. 29–37. – ISSN 0236-1493. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-12-65-29-37.
13. Оценка герметичности гидростоек механизированных крепей / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, К. Г. Буялич // Динамика и прочность горных машин : сб. тр. II Междунар. конф., 28–29 мая. – Новосибирск : Ин-т горного дела СО РАН, 2003. – Т. 2. – С. 86–88.
14. Оценка точности конечно-элементной модели рабочего цилиндра гидростойки крепи / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, К. Г. Буялич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S2 : Горное машиностроение. – С. 203–206. – ISSN 0236-1493.
15. Влияние размерности модели на расчёт параметров цилиндров гидростоек / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, К. Г. Буялич // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 5. – С. 42–44.
16. Radial Strains of Double-layer Cylinders in Hydraulic Props of Powered Supports / Buyalich G. D., Buyalich K. G., Voevodin V. V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engi-

- neering. – IOP Publishing, 2016. – Vol. 127: YIT-UPMME 2015. – # 012034. – DOI 10.1088/1757-899X/127/1/012034.
17. Modeling of Hydraulic Power Cylinder Seal Assembly Operation / Buyalich G. D., Buyalich K. G. // Mining 2014 : Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control : Chinese Coal in the Century: Mining, Green and Safety, China, Qingdao, 17–20 October 2014. – Amsterdam – Paris – Beijing : Atlantis Press, 2014. – P. 167–170. – (Advances in Engineering Research, ISSN 2352-5401). – ISBN 978-94-62520-28-8.
18. Исследование радиальных деформаций гидростоек двойной гидравлической подвижности / Бяков М. А., Буялич Г. Д., Буялич К. Г., Увакин С. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 1. – С. 133–140. – ISSN 0236-1493. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-1-0-133-140.
19. О динамических колебаниях блока кровли при реакции крепи в виде распределенной нагрузки / Г. Д. Буялич, К. Г. Буялич, В. Ю. Умрихина // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 7–10 окт. 2014 г. [Электронный ресурс] – Кемерово : СО РАН, КемНЦ СО РАН, ИУ СО РАН, Кузбас. гос. техн. ун-т, ООО КВК «Экспо-Сибирь», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска. – С. 108–110. – ISBN 978-5-902305-42-2.
20. О модели динамического взаимодействия крепи с кровлей / Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, К. Г. Буялич, М. В. Казанцев, В. М. Римова // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012 : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 1–2 нояб. 2012 г. В 2-х т. Т. 1. / КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 149–153. – ISBN 978-5-89070-764-2.
21. Математическая модель процесса динамического обрушения кровли / Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, К. Г. Буялич, М. В. Казанцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S7 : Современные технологии на горнодобывающих предприятиях. – С. 233–237. – ISSN 0236-1493.
22. Study of Falling Roof Vibrations in a Production Face at Roof Support Resistance in the Form of Concentrated Force / Buyalich G. D., Buyalich K. G., Umrikhina V. Yu. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Vol. 142: VII International Scientific Practical Conference «Innovative Technologies in Engineering». – # 012120. – DOI 10.1088/1757-899X/142/1/012120.
23. Исследование работы предохранительного клапана ЭКП в период резких осадок кровли / Г. Д. Буялич, Ю. М. Леконцев, Б. А. Александров // Механизация горных работ: межвуз. сб. науч. тр. / Кузбас. политех. ин. – Кемерово, 1978. – Вып. 2. – С. 49–55.
24. Гидравлическая стойка шахтной крепи: пат. 2702781 С1 РФ : МПК E21D 15/44 (2006.01) / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Увакин С. С., Умрихина В. Ю. ; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева» (КузГТУ). – № 2019103289 ; заявл. 06.02.2019; опубл. 11.10.2019, Бюл. № 29. – 8 с.

УДК 621.271.022

О ПРИЧИНАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

В. С. Великанов¹, проф., д.т.н.,

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Специфичность работы мостовых перегружателей предполагает, что они выполняют не только работу по подъему-опусканию материала, но и работу по его перемещению вдоль рельсов по всей длине склада, причем для складов характерны достаточно значительные расстояния. Рассмотрены особенности возникновения перекоса в перегружателях, применяемых на различных промышленных предприятиях, в том числе угольных складах, и проанализированы перемещения опорных стоек козловых кранов при воздействии сил перекоса. Цель - установление причин возникновения дефектов в металлоконструкциях мостовых перегружателей.

Ключевые слова: добыча, перегружатель, перекосное нагружение, реборда, рельс.

ABOUT THE CAUSES OF DEFECTS IN THE METAL STRUCTURES BRIDGE LOADERS

Velikanov V. S. doctor of technical sciences,

The specific nature of overhead crane operation means they not only lift and lower material but also move it along rails along the entire length of the warehouse, which typically spans considerable distances. This paper examines the potential for distortion in overhead cranes used in various industrial facilities, including coal yards, and analyzes the movements of gantry crane support legs under distortion forces. The purpose of this study is to identify the causes of defects in overhead crane metal structures.

Keywords: reloader, tilt loading, coal, flange, rail

В добыче полезных ископаемых преобладающим способом является открытый, на долю которого приходится более 80 % добычи твердых полезных ископаемых. Из года в год растет количество добываемой горной массы, а также увеличиваются масштабы карьеров. Одним из решающих условий дальнейшего совершенствования производства является обеспечение горнодобывающей промышленности высокопроизводительным и надежным оборудованием [1-4]. Эксплуатация технологических машин на горных предприятиях осуществляется при воздействии факторов различной природы, обусловленные конструктивными и функциональными особенностями (условиями эксплуатации) и случайными внешними воздействиями, которые приводят к изменениям их технического состояния. Технология работ на некоторых промышленных предприятиях (например, на обогатительных фабриках, дробильно-сортировочная фабрика, угольные склады и др.) предполагает использование большегрузных грузоподъемных машин, перемещающихся по специальному железнодорожному пути, к таким машинам относятся козловые краны. Согласно анализу экспертной организации MRFR, объем рынка козловых кранов на рельсовом ходу оценивается в 29,20 млрд. долл. в 2024 году [5]. Одним из вариантов компоновочных и технических решений козловых кранов выступают мостовые перегружатели, которые широко и активно применяются в угольной и металлургической промышленности.

Рудные (угольные) перегружатели оборудованы грейфером и используются для перегрузки сыпучих и навалочных грузов, в том числе агломерата железной руды, кокса, железорудных окатышей и угля. В отличие от козлового грейферного крана рудные перегружатели характеризуются повышенной грузоподъемностью, большей высотой подъема (в отдельных случаях достигающей 50 метров), увеличенной скоростью движения тележки и длиной пролёта до 120 метров [6]. Принято считать, что параметры угольного склада определяются размерами штабелей, расстоянием между штабелями, высотой штабелей и расстоянием между трубками для отбора проб.

Принципы и порядок проектирования механизмов козловых кранов, способы определения нагрузок, проектные и проверочные расчеты сборочных единиц механизмов, а также вопросы компоновки и конструирования механизмов подъема и передвижения подробно изучены и исследованы. В работе решаются две основные задачи, а именно: причины возникновения дефектов в металлоконструкциях мостовых перегружателей и как следствие вторая исследование процесса перекосного нагружения кранов-перегружателей (рис.).

Специфичность работы перегружателя предполагает, что он выполняет не только работу по подъему-опусканию материала, но и работу по его перемещению вдоль рельсов по всей длине угольного склада (причем для угольных складов характерны достаточно значительные расстояния, до 500 м). Перекос крана возникает в том случае, когда одна из его опор (сторона) «забегает» смещается по направлению движения крана относительно другой. Причинами перекоса являются: различия в сопротивлениях передвижения опор крана, неточности изготовления и монтажа ходовых колес; неодновременное срабатывание тормозов, неровности подкранового пути, проскальзывание приводных колес. Возможны два вида перекоса, а именно свободный - кран просто поворачивается в пределах зазоров между реборами колес и рельсом (*увеличенный зазор появляется в основном из-за повышенного износа их реборд; фиксировались случаи, когда крановые колеса служили 3–4 месяца при регламентированном сроке 5-12 лет, а срок службы подкрановых рельсов снижается до 40-50 % регламентированного*), и упругий – забег одной из опор вызван деформациями металлоконструкций, возникает из-за различий тяговых и тормозных усилий на разных опорах. Принято считать, что свободные перекосы намного меньше упругих, то есть относительный забег опор пропорционален упругому перекосу. Критичность и опасность перекосных нагрузок состоит в том, что, несмотря на относительно невысокие значения усилий перекоса по сравнению с остальными нагрузками, они способны приводить к возникновению существенных напряжений в металлоконструкциях крана, и влияют на процесс накопления усталостных повреждений, поскольку действуют в горизонтальном направлении, в котором сечение балок пролетных строений имеет меньший момент сопротивления [6-12].



Рис. Выборка данных по дефектам кранов и перегружателей за 2003–2024 гг., данные представлены ООО «СпецРемНаладка»

В результате проведенной работы выявлено, что причинами возникновения дефектов в металлоконструкциях мостовых перегружателей являются различия в сопротивлениях передвижения опор крана, неточности изготовления и монтажа ходовых колес; одновременное срабатывание тормозов, неровности подкранового пути, проскальзывание приводных колес. Наименее изученным направлением является влияние перекасного нагружения на вероятность отказов оборудования кранов и перегружателей, а также исследование неравномерности тормозных моментов при перекасе, при которой напряжения в элементах металлоконструкции крана превышают допустимые значения.

Список литературы

1. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (Kuz-Ram): сравнительное исследование / Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 822–832.
2. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35 / Маринин М. А., Рахманов Р. А., Аленичев И. А., и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. №6. С. 111–125.
3. <https://www.vnedra.ru/tehnologii/optimizacziya-fragmentaczii-vzorvannoj-gornoj-massy-8638/>
4. Дремин А. В., Великанов В. С. Постановка многокритериальной задачи анализа и прогнозирования гранулометрического состава взорванных горных пород // Горная промышленность. 2023. № 5. С. 52–60.
5. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/rail-mounted-gantry-crane-market-23544>.
6. <https://tehnoros.ru/products/gruzopodemnoe-oborudovanie/gantry-crane/rud/>
7. Голенищев А. В. Исследование процесс перекасного нагружения работающих в лесной промышленности козловых кранов с целью повышения их надежности автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.05 / Голенищев Александр Владимирович Алексей Михайлович. – Екатеринбург, 1991. 24 с.
8. Классификация нагрузок и структурный анализ перегрузочного крана / А. В. Гринек, И. П. Бойчук, Д. В. Тиняков, Е. А. Черкасов // Эксплуатация морского транспорта. – 2023. – № 2(107). – С. 174–181. – DOI 10.34046/aumsuomt107/31. – EDN GXISFA.
9. Анализ вариантов повышения несущей способности пролетного строения козлового крана / П.В. Витчук, Н.А. Витчук, Е. В. Славкина, К. А. Баранов, А.Н. Шафорост // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. Вып. 1. – С. 440–450. – DOI: 10.24412/2071–6168-2024-1-440-441

10. Барбас И. Г., Бойко П. П. Металлоконструкции перегружателей. Нормативные нагрузки. Особенности расчета // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. Вип. 5. С. 35–42. DOI: 10.15802/stp2004/20486.
11. Луцко Т. В., Гуляев А. С., Прудников С. С. Влияние перекосных нагрузок на перемещение опор козловых кранов // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 26–28 мая 2020 года. Том 3. Донецк: Донецкий национальный технический университет. 2020. С. 130–134.
12. Чечельницкий И. А. Оптимизация жизненного цикла системы «колесо–рельс» // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – Вып. 3. – С. 99–108. DOI: 10.20295/2223–9987-2020-3-99-108

УДК 62-622

ТИПОЛОГИЯ БАРЬЕРОВ ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДНЫХ ПРИВОДОВ В КАРЬЕРНЫЕ ЭКСКАВАТОРЫ РФ

П.С. Волобуева¹, аспирант, Ю.А. Лагунова^{1,2} проф., К.Ю. Летнев¹, доц.

¹ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Декарбонизация горнодобывающей промышленности РФ актуализирует переход карьерной техники на водородное топливо. Однако, несмотря на появление в 2023–2026 гг. опытных образцов водородных самосвалов (БелАЗ-7513V, проект МФТИ), разработка карьерных экскаваторов с аналогичным приводом находится в латентной стадии. Ранее в исследованиях была выделена группа сдерживающих факторов, однако системная классификация, учитывающая специфику именно экскаваторного парка и современные проектные решения, отсутствует.

Ключевые слова: водородный привод, карьерный экскаватор, типология барьеров, БелАЗ, электромеханическая трансмиссия, советское машиностроение, Сахалин, декарбонизация, институциональные ловушки.

TYPOLOGY OF BARRIERS TO THE IMPLEMENTATION OF HYDROGEN DRIVES IN MINING EXCAVATORS OF THE RUSSIAN FEDERATION

P.S. Volobueva, Yu.A. Lagunova, K.Yu. Letnev

Decarbonization of the mining industry in the Russian Federation necessitates the transition of mining machinery to hydrogen fuel. However, despite the emergence of prototype hydrogen-powered dump trucks in 2023–2026 (BelAZ-7513V, MIPT project), the development of mining excavators with a similar propulsion system remains in a latent stage. Previous studies have identified a range of constraining factors, yet a systematic classification that accounts for the specific characteristics of the excavator fleet and contemporary design solutions is still absent.

Keywords: hydrogen drive, mining excavator, barrier typology, BelAZ, electromechanical transmission, Soviet engineering, Sakhalin, decarbonization, institutional traps.

Повестка низкоуглеродного развития, закреплённая в Энергетической стратегии РФ до 2035 года, формирует запрос на замещение дизельного топлива в замкнутых пространствах карьеров. Наиболее технологически проработанной альтернативой признается водородный привод на базе топливных элементов. В 2023–2025 гг. в Российской Федерации сформи-

рован пул реальных проектных моделей карьерных самосвалов: макетный образец БелАЗ-7513V грузоподъемностью 130 тонн с энергоустановкой мощностью 440 кВт [1]; проект МФТИ по созданию «зеленого» самосвала на шасси БелАЗ-7530 с питанием от водорода, получаемого из коксового газа [2]; инфраструктурный полигон на о. Сахалин, заявленный как площадка для опытно-промышленной эксплуатации трех водородных машин [3].

Однако карьерные экскаваторы, являющиеся основным звеном технологической цепи добычи, в указанных проектах не представлены. Единственное упоминание — декларативное заявление БЕЛАЗа 2023 года о намерении разработать водородную версию гидравлического экскаватора BELAZ BX20012 без конкретики технических решений и сроков [4].

Гипотеза исследования заключается в том, что барьеры имеют не столько техническую, сколько институциональную и классификационную природу: они по-разному локализованы относительно субъекта внедрения и требуют различных механизмов преодоления.

Методология и результаты исследования.

Теоретико-методологическую основу работы составляет институциональный подход к анализу технологических сдвигов в промышленности. В качестве специальных методов применены:

- контент-анализ открытых источников (научные публикации, отраслевые СМИ, корпоративные отчеты) за период 2023 – I кв. 2026 гг.;
- сравнительно-сопоставительный анализ технических характеристик проектных моделей водородной карьерной техники;
- ретроспективный анализ советской школы электропривода (на примере экскаваторов ЭКГ производства «Уралмаш», Ижорского завода);
- метод дихотомической классификации – последовательное двухкритериальное деление множества барьеров на подмножества.

Критерий классификации: локализация источника барьера относительно горнодобывающего предприятия как конечного потребителя технологии. Выбор критерия обусловлен практической значимостью: определение «адресата» мер преодоления барьера.

Анализ историко-технической литературы показывает, что в СССР отсутствовали программы создания карьерной техники на водородном топливе. Это объясняется как доступностью дешевых углеводородов, так и отсутствием экологического регулирования как экономического фактора.

Вместе с тем, советский период сформировал критически важную технологическую платформу. Экскаваторы типа ЭКГ-20, ЭКГ-32, ЭШ-100/100 проектировались с электромеханической трансмиссией и питанием от внешней сети 6 (10) кВ. К 1980-м годам в СССР сложилась научная школа силовой электроники и тягового, обеспечившая мировой уровень развития карьерного электромашиностроения.

Принципиальный вывод: водородный привод — это не альтернатива электроприводу, а его эволюционная форма, где топливные элементы выступают автономным генератором электроэнергии для тех же тяговых электродвигателей. Таким образом, техническая база для водородного экс-

каватора в РФ существует. Отсутствие опытных образцов не является следствием технологического отставания, а носит институциональный характер.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ проектных моделей водородной карьерной техники, находящихся на различных стадиях реализации.

Таблица 1 - Проектные модели водородной карьерной техники в РФ (2023–2026 гг.)

Проект	Тип техники	Стадия	Мощность	Водород	Сроки
БелАЗ-7513М	Самосвал (130 т)	Макетный образец	440 кВт	Привозной	Испытания 2025–2026
БелАЗ-7530 (Проект МФТИ)	Самосвал (220 т)	Техпроект	~1 МВт	Из коксового газа	Стендовые испытания 2026
Сахалинский полигон	Инфраструктура	Подготовка	н/д	Электролизный	Заявка на 2026
BELAZ BX20012 (водородная версия)	Экскаватор	Декларация о намерениях	н/д	н/д	Не определены

Выявленная асимметрия:

1. Самосвалы имеют конкретные проектные проработки, включая компоновку энергоустановки и систему хранения водорода.
2. Экскаваторы находятся на нулевом уровне готовности (отсутствуют даже эскизные проекты).
3. Инфраструктурные проекты (Сахалин) ориентированы на мобильную, а не на стационарную технику.

Асимметрия не может быть объяснена техническими причинами. Более того, с инженерной точки зрения, экскаватор является более простым объектом для водородной конверсии: он не требует размещения топливных элементов и баллонов на подвижном шасси в условиях интенсивной вибрации и ударов. Стационарный характер работы позволяет реализовать модульную компоновку энергоустановки на поворотной платформе.

Типология барьеров.

На основе предложенного критерия (локализация источника барьера) разработана четырехуровневая классификация.

1. Экзогенные барьеры I уровня (глобальные)

Источник: внешний контур, мировой рынок, не зависит от РФ.

- Санкционные ограничения на поставку высокоэффективных мембран и катализаторов (платина, иридий);
- Контроль патентов на топливные элементы мегаваттного класса;
- Отсутствие международной кооперации по водородным стандартам для карьерной техники.

Субъект преодоления: Минпромторг, РАН, ГК «Росатом» (программы импортозамещения).

2. Экзогенные барьеры II уровня (национальные)

Источник: национальная институциональная среда, вне предприятия.

— Отсутствие специализированных ГОСТ и технических регламентов на водородные экскаваторы (действуют лишь общие нормы для автотранспорта);

— Неразвитость сети водородных заправочных станций на угольных и рудных разрезах;

— Отсутствие утвержденных методик оценки углеродного следа карьерной техники в РФ.
Субъект преодоления: государство (Росстандарт, Минэнерго, Минприроды).

3. Эндогенные технические барьеры

Источник: предприятие-недропользователь или производитель техники.

— Отсутствие обученного персонала по эксплуатации водородного оборудования;

— Дефицит свободных мощностей для НИОКР (у производителей экскаваторов);

— Неопределенность с выбором физической модели размещения баллонов высокого давления на экскаваторе.

Субъект преодоления: бизнес (горнодобывающие компании, «Уралмаш», ИЗ-КАРТЭКС).

4. Эндогенные институциональные барьеры

Источник: менталитет лиц, принимающих решения.

— Консерватизм: «экскаватор на сети 6 кВ работает 50 лет и дешевле»;

— Разделение бюджетов: затраты на технику и на инфраструктуру в разных статьях;

— Отсутствие «чемпиона» — первого заказчика, готового рискнуть.

Субъект преодоления: топ-менеджмент компаний, отраслевые ассоциации.

Ключевое наблюдение: на 2026 год полностью отсутствуют барьеры, относящиеся ко II и III уровню для самосвалов, но сохраняются все четыре уровня для экскаваторов. Это доказывает, что проблема внедрения водорода в экскаваторы имеет не техническую, а институционально-распределительную природу.

Полученная типология позволяет выделить основные направления преодоления барьеров:

1. Трансфер технологий с самосвалов. Необходимо инициировать НИР по адаптации водородного энергомодуля БелАЗ-7513V для питания экскаватора ЭКГ-18 (унификация тягового электропривода).

2. Создание демонстрационного полигона. В отличие от Сахалина, полигон должен быть расположен на действующем угольном разрезе (Кузбасс, Канско-Ачинский бассейн) с возможностью получения водорода из бурых углей.

3. Институциональный сдвиг. Введение в отраслевые стратегии целевого показателя «доля карьерных экскаваторов с альтернативным приводом» (по аналогии с электротранспортом).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Зеленый гигант» водородного самосвала // URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8023222> (дата обращения: 10.01.2026).
2. Спроектирован «зеленый» самосвал на водородном топливе // URL: <https://znanauku.mipt.ru/2025/08/21/sproektirovan-zelenyj-samosval-na-vodorodnom-toplive/> (дата обращения: 17.01.2026).
3. BelAZ participates in a breakthrough hydrogen project on Sakhalin Island // [Belaz.by](https://belaz.by/en/press-centre/BELAZ%20participates/) official website. – 2024. – 12 November. – URL: <https://belaz.by/en/press-centre/BELAZ%20participates/> (дата обращения: 25.12.2025).
4. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р (ред. от 01.03.2025) // Собрание законодательства РФ. – 2020. – № 24. – Ст. 3847.
5. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации: Распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 № 2162-р (ред. от 20.12.2025) // Собрание законодательства РФ. – 2021. – № 33. – Ст. 6224.

УДК 621.86

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ТОРМОЖЕНИЯ

С.В. Белов¹, канд. техн. наук, Л.А. Гаврилова¹, канд. техн. наук

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Показано применение грузоподъемных механизмов в различных технологических процессах. Проанализирована степень подвижности основных механизмов грузоподъемных кранов. Рассмотрены особенности тормозов. Предложена функциональная классификация тормозных устройств для выбора типа тормоза в соответствии с задачами технологических процессов.

Ключевые слова: *грузоподъемные машины, функциональное назначение, операции, степень подвижности, механизмы, привод, тормозные устройства, остановки.*

FUNCTIONAL PURPOSE OF LOAD-LIFTING MECHANISMS AND THEIR BRAKING CAPABILITIES

S.V. Belov, L.A. Gavrilova

The application of load-lifting mechanisms in various technological processes is shown. The degree of mobility of the main mechanisms of load-lifting cranes is analyzed. The features of brakes are considered. A functional classification of braking devices is proposed for selecting the type of brake according to the tasks of technological processes.

Keywords: *load-lifting machines, functional purpose, operations, degree of mobility, mechanisms, drive, braking devices, and stops.*

Оборудование, которое используется для работы с грузами, в наше время представлено обширным ассортиментом механизмов с функциональными возможностями, конструктивным назначением и исполнением, а также возможностями привода для технологических процессов.

Функциональное назначение грузоподъемных механизмов (ГПМ) заключается в перемещении груза из одной точки рабочего пространства в другую [1]. Для этого ГПМ должна иметь возможность перемещать груз в пространстве по трем взаимно перпендикулярным направлениям, т.е. иметь три переносные степени подвижности грузозахватного органа (крюка). По конструкции ГПМ можно классифицировать на стреловые краны, козловые краны, порталные краны, башенные краны.

В стреловых кранах (рис. 1, а) переносные степени подвижности достигаются: *механизмом подъема груза (МПГ), механизмом изменения вылета стрелы (МИВС), механизмом поворота платформы (МПП).*

В мостовых кранах (рис. 1, б) три переносные степени подвижности крюка обеспечиваются: *механизмом подъема груза (МПГ), механизмом передвижения моста (МПМ), механизмом передвижения грузовой тележки (МПГТ).*

В козловых кранах (рис. 2) по степени подвижности грузозахватного устройства обеспечиваются: *механизмом подъема груза (МПГ), механизмом передвижения крана (МПК), механизмом передвижения грузовой тележки (МПГТ).*

В порталных кранах (рис. 3) степени подвижности крюка достигаются: *механизмом подъема груза (МПГ), механизмом передвижения крана*

(МПК), механизмом подъема-опускания стрелы (МПОС), механизмом поворота платформы (МПП).

В башенных кранах (рис. 4) следующие механизмы: механизм подъема груза (МПГ), механизм передвижения крана (МПК), механизм передвижения грузовой тележки (МПГТ), механизм вращения головки башни (МВГБ).

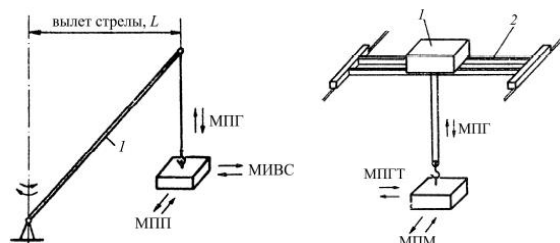


Рис. 1. Степени подвижности грузозахватного органа: а – стрелового крана: 1 – стрела; б – мостового крана: 1 – грузоподъемная тележка, 2 – мост

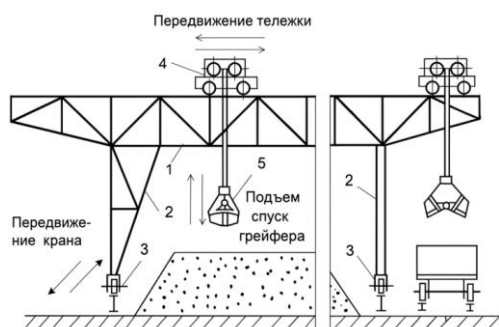


Рис. 2. Степени подвижности козлового крана: 1 – мостовое строение, 2 – поддерживающие ноги, 3 – балансирующая тележка, 4 – грузоподъемная тележка, 5 – грейфер.

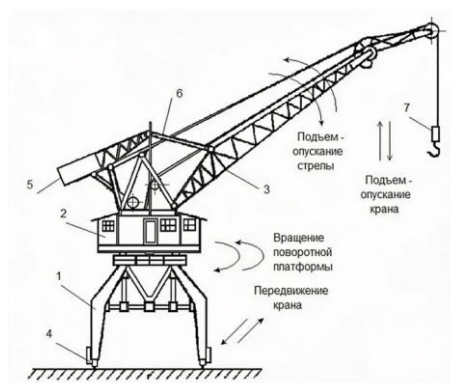


Рис. 3. Степени подвижности портального крана: 1 – П-образный портал, 2 – поворотная платформа, 3 – стрела, 4 – ходовая тележка, 5 – подвижный противовес, 6 – рычажно-канатная система, 7 – крюк.

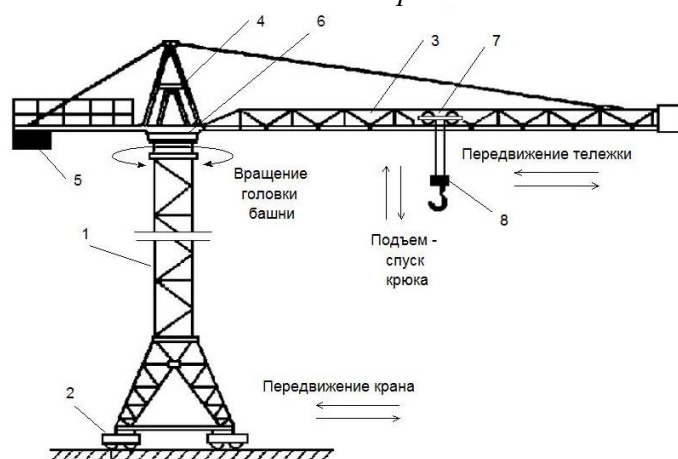


Рис. 2. Степени подвижности башенного крана: 1 – башня, 2 – ходовая тележка, 3 – стрела, 4 – головка башни, 5 – противовес, 6 – поворотная платформа башни, 7 – грузоподъемная тележка, 8 – крюк.

Каждый из этих механизмов, участвуя в соответствующих технологических операциях, обеспечивается приводом. Для безопасной работы и не-

обходимой дискретности движений в компоновку привода обязательно входит тормозное устройство [2, 3].

При анализе тормозных устройств грузоподъемных машин выделены следующие функции:

- удержание поднятого груза на весу,
- плавное опускание груза,
- остановка тележки крана,
- удержание в заторможенном состоянии,
- управление движениями,
- замыкание.

По принципу замыкания (по действию замыкающей силы) тормозные устройства представлены:

- нормально замкнутые – замыкаются постоянно действующей силой (вес груза, пружина), а размыкаются приводным механизмом;
- нормально разомкнутые – размыкаются постоянно действующей силой, а замыкаются приводным механизмом;
- комбинированные. В нормальных условиях работают как нормально разомкнутые, а в аварийных ситуациях – как нормально замкнутые.

Для мостового крана функции тормозных устройств включают:

- контроль механизма передвижения или перемещения тележки, спуска или подъема груза с регулировкой их скоростей,
- регулировка движения крана,
- предотвращение невозможных и запретных разгонов при работе.

Функции тормозных устройств ГПМ можно представить в виде таблицы.

Таблица. Функциональная классификация тормозных устройств ГПМ

Функции	Остановы			Тормоза		
	Храповые	фрикционные				
		Клиновые	Роликовые			
Удержание поднятого груза на весу						
Плавное опускание груза					Спускные (грузоупорные)	Комбинированные
Остановка тележки крана				Колодочные	Дисковые	Электромагнитные
Удержание в заторможенном состоянии				Стопорные	Спускные (грузоупорные)	Комбинированные
Управление движениями				Автоматическое замыкание	Управление замыканием	
Замыкание				Нормально замкнутые	Нормально разомкнутые	Комбинированные

У механизма подъема с двумя одновременно включаемыми приводами на каждом приводе должно быть установлено не менее одного тормоза с запасом торможения 1,25. В случае применения двух тормозов на каждом приводе и при наличии у механизма двух и более приводов коэффициент запаса торможения каждого тормоза должен быть не менее 1,1.

Механизмы подъема груза и изменения вылета должны быть снабжены тормозами, имеющими не размыкаемую кинематическую связь с барабанами, в кинематических цепях механизмов подъема электрических талей допускается установка муфт предельного момента.

При установке двух тормозов они должны быть спроектированы так, чтобы в целях проверки надежности одного из тормозов можно было безопасно снять действие другого тормоз. Груз, замыкающий тормоз, должен быть укреплен на рычаге так, чтобы исключалась возможность его падения или произвольного смещения. В случае применения пружин замыкание тормоза должно производиться усилием сжатой пружины. Колодочные, ленточные и дисковые тормоза сухого трения должны быть защищены от прямого попадания влаги или масла на тормозной шкив.

Материалы для тормозов характеризуются такими параметрами, как коэффициент трения, теплостойкость, износостойкость. Высокие показатели этих параметров обеспечивают надежную эксплуатацию тормозных устройств и, несомненно, всех грузоподъемных машин.

Вывод.

В результате исследования предложено рассмотрение грузоподъемных механизмов с позиции их функционального назначения с учетом требований безопасности.

Список литературы

1. Вахрушев, С. И. Грузоподъемные машины: учебное пособие / С. И. Вахрушев. — Пермь: ПНИПУ, 2012. — 152 с. — ISBN 978-5-398-00867-8.
2. Иванов И.Ю., Гаврилова Л.А., Деревягин С.Н. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ДИАГНОСТИРОВАНИИ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. - В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2021. С. 342-345.
3. Белов, С. В. Конструкции подъемных машин, канатов и сосудов [Электронный ресурс]: учебное пособие для практических занятий по дисциплине "Грузоподъемные машины и механизмы" для студентов специалитета 21.05.04 - "Горное дело" и бакалавриата 15.03.02 - "Технологические машины и оборудование" очного и заочного обучения / С. В. Белов, А. В. Семенов, 2024 on-line

УДК 622.331:004.9

СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

С.Н. Гамаюнов¹, д-р техн. наук, проф., А.И. Жигульская¹, канд. техн. наук, доц.,

Б.Ф. Зюзин¹, д-р техн. наук, проф., Л.В. Копенкина¹, канд. техн. наук, доц.

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь РФ

Статья посвящена адаптации фрезерного агрегата к меняющемуся сопротивлению торфяной залежи резанию – ключевой проблеме повышения надежности трансмиссии. Показано, что древесные включения формируют ударные перегрузки трансмиссии, кратные превышающие номинальные значения. Предложена структура бортовой системы управления на основе тензометрирования фрезерного барабана, контроля плотности и влажности. В САЕ-среде построен цифровой прототип, позволяющий оценивать глубину фрезерования при различных сценариях нагружения. Достоверность модели подтверждена сопоставлением с данными натурных измерений. Применение адаптивных алгоритмов обеспечивает снижение энергозатрат при сохранении производительности.

Ключевые слова: торфяные машины; фрезерование торфяной залежи; адаптивное управление; цифровой двойник; сопротивление резанию; динамическое нагружение; телеметрия

REDUCTION OF DYNAMIC LOADS IN PEAT DEPOSIT MILLING USING ADAPTIVE CONTROL ALGORITHMS

S.N. Gamayunov, A.I. Zhigulskaya, B.F. Zyuzin, L.V. Kopenkina

This work examines adaptation of milling aggregates to the variable cutting resistance encountered in peat deposits—a factor critical to transmission reliability. Woody inclusions generate impact loads that substantially exceed nominal torque ratings. The authors introduce an onboard control architecture based on strain measurement of the milling drum combined with real-time density and moisture monitoring. A digital prototype developed in a CAE environment simulates milling depth across diverse loading conditions. Model validity was established through comparison with field measurement data. Implementation of adaptive algorithms yields reduced energy consumption without compromising productivity.

Keywords: peat machines; peat deposit milling; adaptive control; digital twin; cutting resistance; dynamic loading; telemetry

Разрыв традиционных логистических цепочек возвращает в оборот местные топливные ресурсы, включая торфяные месторождения, ранее выведенные из эксплуатации. Однако анализ машинного парка торфодобывающей отрасли демонстрирует устойчивую консервацию технических решений полувековой давности. Парк торфодобывающей техники до сих пор формируют фрезерные агрегаты семидесятых-восемидесятых годов прошлого века и их модификации [1]. Ключевой недостаток данных систем – детерминированный алгоритм функционирования, не предусматривающий обратной связи по параметрам внешней среды. Оператор вынужден работать вслепую: система не реагирует на изменение прочности залежи или износ рабочих органов. Раньше инженеры закладывали избыточный запас прочности, компенсируя отсутствие автоматики. Сегодня эта стратегия приводит к усталостным повреждениям трансмиссии [1].

Эволюционное совершенствование элементной базы, заключающееся в замене оригинальных деталей на аналогичные, не позволяет преодолеть системное отставание. Требуется пересмотр самой концепции взаимодействия рабочего органа с разрабатываемым массивом. Торфяную залежь нельзя рассматривать как однородную среду. Ее параметры – плотность, влажность, наличие древесных включений – меняются на протяжении рабочего хода и требуют непрерывного контроля. Современная торфяная машина строится вокруг потока данных: именно телеметрия определяет архитектуру механических узлов и логику управления. Интеллектуальные функции встраиваются непосредственно в механическую систему, меняя логику управления на борту.

Цифровой прототип служит рабочим инструментом проектировщика: на нем отрабатывают сценарии нагружения ходовой части при работе на слабонесущих грунтах [2, 3]. Визуализация здесь вторична – главное, возможность смоделировать критические режимы до выхода техники на полигон. Построение виртуального прототипа с использованием методов конечных элементов позволяет идентифицировать зоны локализации критических нагрузок при взаимодействии движителя со слабонесущим основанием. В условиях ограниченной доступности торфяных полигонов для натурного эксперимента (вследствие сезонности и высокой стоимости доставки крупногабаритной техники) имитационное моделирование становится основным источником данных о вероятных сценариях провала грунта или пиковых моментах на валах отбора мощности. Точность прогнозов напрямую определяется единообразием сбора телеметрии: только при стандартизированных процедурах осциллограммы разных машин становятся сопоставимы. Как установлено в ходе исследования, внедрение протокола MQTT в контуре промышленного интернета вещей обеспечивает сквозную передачу не только осредненных, но и высокочастотных осциллограмм с датчиков, что необходимо для выявления корреляций, не фиксируемых при традиционном мониторинге.

Адаптивное управление требует размещения датчиков непосредственно в зоне резания – на барабане устанавливают тензометрические мосты, а в поток материала – емкостные влагомеры и плотномеры. В пнистых залежах сопротивление резанию меняется скачкообразно: попадание на древесное включение вызывает ударную нагрузку, в 3–5 раз превышающую расчетную. В традиционной конструкции это ведет к срезу штифтов или разрушению редукторов [1]. При резком росте тока система мгновенно уменьшает заглубление барабана, одновременно переключаясь на пониженную передачу для сохранения крутящего момента. При выходе на однородный слой система увеличивает подачу, стабилизируя фракционный состав крошки и минимизируя термическое воздействие на силовые цепи.

Снятие барьеров между бортовой электроникой и диспетчерскими центрами меняет статус диагностической информации. Данные о вибрации корпусов подшипников, температуре масла и токовой нагрузке становятся элементами единого временного ряда. Применение регрессионных моделей и анализ времени до отказа позволяет перейти от констатации факта

отказа к оценке функции интенсивности отказов [4]. Современные системы переходят от простой сигнализации к прогнозированию остаточного ресурса узла – это позволяет планировать обслуживание до возникновения отказа. Реализация подобного подхода в рамках отечественных SCADA-систем (в частности, платформы «Атом-М» или аналогичных) критична ввиду необходимости обеспечения кибербезопасности и автономного логирования при разрывах каналов связи.

Экономическая эффективность малых торфопредприятий достигается сокращением номенклатуры одновременно эксплуатируемых машин. Предлагается переход от набора узкоспециализированных агрегатов (фрезер, ворошилка, пневмоуборочная установка) к единой энергетической платформе, оснащенной системой быстросъемного крепления с автоматическим распознаванием модуля. Идентификация осуществляется путем считывания электронного идентификатора, после чего контроллер загружает калибровочную карту и ограничивает максимальные режимы работы в зависимости от функционала навески. Это сокращает потребность в складских площадях и снижает инвестиционную нагрузку на оператора.

Унификация механических и электрических интерфейсов позволяет в дальнейшем наращивать функционал платформы без изменения базового шасси – например, подключать оборудование для глубокой переработки торфа или рекультивации.

Снижение удельного давления на грунт может быть достигнуто не только оптимизацией геометрии движителя, но и применением современных композитных материалов в несущих и ограждающих конструкциях. Аддитивные технологии, в частности методы лазерной наплавки, открывают возможности для оперативного восстановления геометрии быстроизнашиваемых элементов (фрезерных зубьев, посадочных мест подшипников) непосредственно в ремонтных подразделениях предприятий, сокращая зависимость от поставок оригинальных запасных частей.

Ужесточение природоохранных требований распространяется и на технику для торфяных месторождений, особенно расположенных в границах лесного фонда и особо охраняемых природных территорий. Нормирование ширины колеи, глубины колеи и уровня вибрационного воздействия переходит из сферы рекомендаций в разряд лицензионных условий. В связи с этим актуальными направлениями становятся применение биоразлагаемых смазочных материалов, гибридных силовых установок, а также обеспечение рекультивации нарушенных земель после завершения добычи.

Промышленная апробация элементов адаптивного управления на предприятиях показала снижение волатильности фракционного состава фрезерованной крошки на 17 %. Удельный расход дизельного топлива сократился на 9–11 % за счет исключения работы привода в режиме насыщения. Количество простоев, связанных с заменой вышедших из строя карданных валов, снизилось более чем на треть.

Главный критерий цифровизации – снижение себестоимости добычи. Количество установленных датчиков имеет значение лишь постольку, поскольку оно влияет на этот показатель. Однако достижение этого показателя

теля невозможно при сохранении зависимости от зарубежных PLM-систем. Применение CAD/CAE-пакетов Autodesk и Dassault Systèmes, равно как и проприетарных SCADA-систем Siemens, в текущих условиях сопряжено с риском принудительной деградации функционала. Вынужденная миграция на отечественные платформы (nanoCAD, «Топ Системы», MasterSCADA) является не идеологическим жестом, а мерой обеспечения непрерывности производственного цикла [2]. Указанные платформы требуют доработки в части специализированных библиотек для расчета торфяных машин, однако их архитектура открыта для внесения изменений силами российских интеграторов.

Модернизация существующих машин путем дооснащения не решит задачу. Новое поколение техники требует сквозного проектирования – от гидравлики до алгоритмов управления. Инновация возникает на стыке механики, гидравлики, алгоритмики и материаловедения. Формируется киберфизический комплекс, интегрирующий проектирование, добычу, технический сервис и рекультивацию в единую систему управления жизненным циклом машины [2, 3]. Автоматизация здесь лишь один из компонентов жизненного цикла машины. Дальнейшее развитие подразумевает интеграцию бортовой системы с облачной платформой для централизованного сбора данных от парка машин и оптимизации логистики технического обслуживания на основе предиктивных моделей.

Список литературы

1. Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И. Технологические машины и оборудование для разработки торфяных месторождений: оптимальные параметры и режимы работы фрезерующих устройств: монография. – Тверь: Издатель Кондратьев А.Н., 2023. – 175 с.
2. Захаров В.Н., Кубрин С.С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горно-технических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5-2. – С. 31–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.
3. Артемов И.В., Носырев М.Б. Технология цифровых двойников и ее применение в горнодобывающей промышленности // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 5. – С. 38–43. DOI: 10.56195/20793332_2024_5_38_43.
4. Самарин И.В. Интеллектуальная система мониторинга качества программного обеспечения горнодобывающих комплексов с применением метрик дефектоустойчивости в реальном времени // Горная промышленность. – 2025. – № 5. – С. 105–112. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5-105-112.

УДК 622.23.054

ПОВЫШЕНИЕ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ РЕЗЦОВОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Д.С. Грибов¹, аспирант, К.А. Просовский¹, аспирант, А.О. Говорливых², ассистент, Д.И. Шишлянников², д.т.н., доцент

¹ АО «ВНИИ ГАЛУРГИИ», г. Санкт-Петербург, РФ

² ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, РФ

Рассмотрены особенности механизированного способа добычи калийных руд и используемого для данного способа породоразрушающего инструмента (тангенциальных неповоротных резцов). Обоснована актуальность задачи совершенствования конструкции тангенциальных неповоротных резцов проходческо-очистных комбайнов и определены основные направления ее решения. Приведены сведения о перспективных конструкциях тангенциальных неповоротных резцов, а также выполнен анализ результатов их исследований по разрушению горных пород резанием на лабораторном стенде. Экспериментально подтверждена перспективность конструкции тангенциального неповоротного резца с крышевидной формой передней грани и треугольной формой режущей кромки, способствующая повышению его наработки в сравнении с серийно выпускаемыми резцами.

Ключевые слова: калийная руда, проходческо-очистные комбайны, резцовый породоразрушающий инструмент, лабораторный стенд, удельные энергозатраты, увеличение наработки.

INCREASE IN OPERATING TIME BEFORE FAILURE OF CUTTING TOOLS FOR SINKING AND CLEANING COMBINES

D.S. Gribov, K.A. Prosovskii, A.O. Govorlivikh, D.I. Shishlyannikov

The features of the mechanized method of mining potash ores and the rock-crushing tool (tangential non-rotating cutters) used for this method are considered. The relevance of the task of improving the design of tangential non-rotating cutters for mining and cleaning combines has been substantiated, and the main directions for solving this task have been identified. Information about promising designs of tangential non-rotating cutters has been provided, and the results of their research on rock cutting at a laboratory bench have been analyzed. The experimental results have confirmed the potential of a tangential non-rotating cutter with a roof-shaped front face and a triangular cutting edge, which can increase its service life compared to commercially available cutters.

Keywords: potash ore, sinking and cleaning combines, rock-crushing tool, laboratory stand, specific energy consumption, resource increase.

Комплекты горного оборудования – механизированные комбайновые комплексы (МКК) – нашли широкое применение в России и странах ближнего зарубежья при добыче калийных руд подземным способом с использованием камерной системы разработки. В состав МКК традиционно входят: проходческо-очистной комбайн, бункер-перегрузатель, один или два самоходных вагона [1-3].

В составе МКК преимущественно применяются проходческо-очистные комбайны типа «Урал» производства АО «Копейский машиностроительный завод», с пространственными планетарно-дисковыми ис-

полнительными органами бурового типа и его аналоги – «КПО» производства ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» и «Универсал» производства ОАО «ЛМЗ Универсал» (УПП «НИВА», г. Солигорск). В качестве породоразрушающего инструмента, как правило, используются серийно изготавливаемые тангенциальные неповоротные резцы РС-14 (РС-14У) с прямоугольной долотчатой формой режущей кромки и плоской формой передней грани (рис. 1, а) [4]. При этом конструкция исполнительных органов резцового типа и применяемого резцового породоразрушающего инструмента, упомянутые выше, принципиально не менялась последние 40...50 лет.

Во время эксплуатации, устанавливаемые на проходческо-очистных комбайнах резцы воспринимают значительные по величине нагрузки, имеющие переменный циклический характер действия, а также подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию и нагреву. Наибольшему изнашиванию, как правило, подвергается именно головная часть резца (головная часть державки), что в дальнейшем может привести к потере твердосплавной армирующей вставки и переходу резца в неработоспособное состояние.

Анализ работы комбайнов на калийных рудниках показывает, что значительное количество простоев (более 50 %) из-за технических неполадок приходится на повреждение деталей рабочего органа, в том числе породоразрушающего инструмента (резцов), что оказывает негативное влияние на технико-экономические показатели процесса ведения проходческих и добычных работ. В связи с этим, повышение наработки на отказ используемых резцов и снижение их удельного расхода является актуальной научно-практической задачей.

Одним из направлений, связанных с совершенствованием тангенциальных резцов и поиском их перспективных конструкций, является применение тангенциальных неповоротных резцов с крышевидной формой передней грани и треугольной формой режущей кромки [5]. На основании этого был спроектирован перспективный резец РП (рис. 1, б).

Исследование процесса разрушения горных пород резцами РС-14 и РП было выполнено на лабораторном стенде (рис. 2), разработанном специалистами ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) при участии специалистов АО «ВНИИ Галургии». Стенд является физической моделью механизма разрушения породного массива одиночным резцом горного комбайна [4].

При проведении экспериментальных исследований учитывались следующие условия:

- исследования были проведены на блоках калийной руды (выполнены установочные резы), а также плитах гипса строительного - изотропного материала, свойства которого приближены к свойствам калийной руды, но характеризующегося меньшей величиной сопротивляемости резанию, что обеспечивает выполнение проводимых исследований в полном объеме при фактических прочностных характеристиках стенда;

– плиты гипса разрушались с применением шахматной и последовательной схем резания с шагом резания $t = 20; 40; 60$ мм и толщиной стружки $h = 5; 10; 15$ мм.

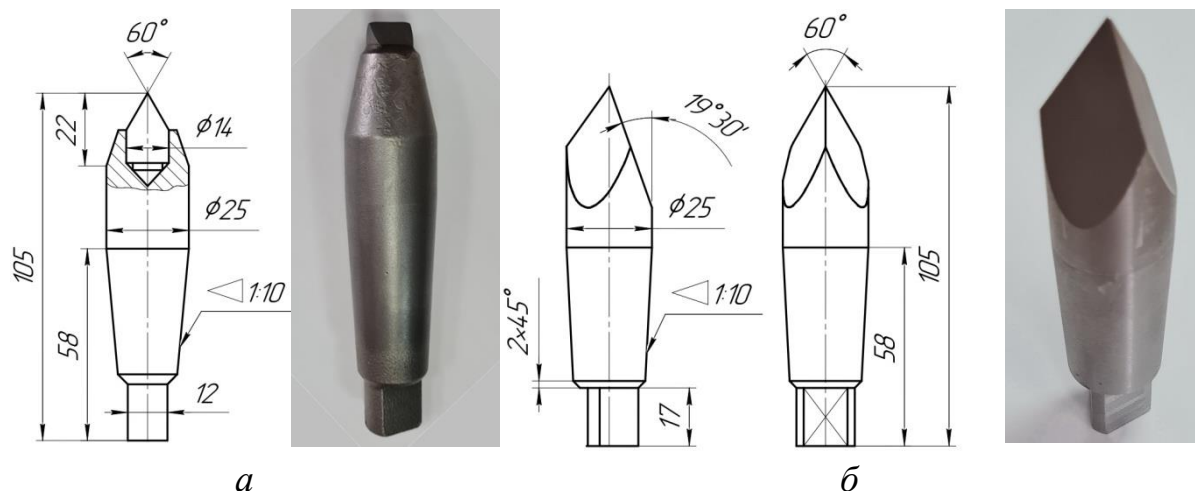


Рис. 1. Геометрические параметры и общий вид тангенциальных неповоротных резцов: серийного РС-14 (а) и перспективного РП (б)

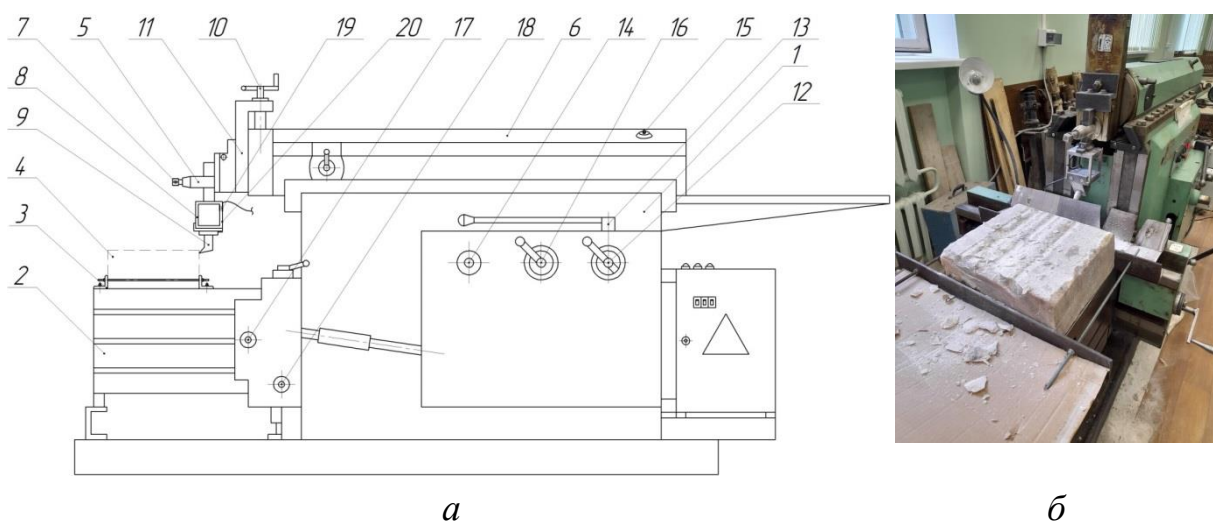


Рис. 2. Общий вид (схема (а) и фото (б)) лабораторного стенда на базе поперечно-строгального станка 7307ТД:

1 – станина; 2 – стол; 3 – захваты; 4 – блок исследуемого материала;
5 – резцедержатель; 6 – ползун; 7 – крепежный винт; 8 – измерительная головка
9 – одиночный резец; 10 – штурвал суппорта; 11 – суппорт; 12, 14, 15 – рукоятки управления ползуном; 13 – тормоз ползуна; 16, 17, 18 – рукоятки управления столом;
19 – тензорезисторы; 20 – стойки для крепления тензорезисторов

Результаты проведенных исследований показали, что:

– удельные затраты энергии на разрушение исследуемого материала резанием для перспективного резца РП находятся, в целом, на уровне аналогичных показателей для резца РС-14, как для шахматной, так и для последовательной схем резания;

– динамика изменения силы резания для резца РП, при принятых толщинах стружки и практически на всем принятом диапазоне шагов резания, качественно схожа с серийно выпускаемым резцом РС-14 и, в сред-

нем, меньше последнего на 31...47 % при последовательной схеме резания, и на 27...60 % при шахматной схеме резания.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что принятые геометрические параметры перспективного резца РП, характеризующиеся крышевидной формой передней грани и треугольной формой режущей кромки, будут способствовать повышению его наработки в сравнении с серийно выпускаемыми резцами РС-14. Кроме того, указанные результаты, согласуются с результатами ранее проведенных специалистами АО «ВНИИ Галургии» шахтных исследований, свидетельствующих, что наработка резцов с крышевидной формой передней грани и треугольной формой режущей кромки превышает в 3,7 раза наработку серийно выпускаемых резцов РС-14 [5].

К достоинствам перспективных резцов РП следует также отнести возможность изготовления на их базе составных резцов, имеющих сменную головку [6], что в свою очередь будет способствовать повышению их износостойкости, увеличению наработки и снижению материальных издержек горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислов Н. В. Основы расчета затрат мощности и производительности очистных и проходческих комбайнов / Н. В. Кислов, Г. В. Казаченко, Г. А. Басалай. – Минск: БНТУ, 2015. – 75 с
2. Казаченко Г.В. Анализ рабочего процесса комбайна избирательного действия. / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, В.А. Тройнич, Д.В. Душкевич // Горная механика и машиностроение, № 4, 2022. – С. 26-34.
3. Басалай Г.А. Повышение эффективности работы спаренного планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна. // Н-т. журнал «Горная механика и машиностроение», № 1, 2014. – С. 83-92.
4. Грибов Д.С. Перспективные конструкции резцового породоразрушающего инструмента комбайновых комплексов калийных рудников / Д. С. Грибов, Д. А. Ситников, Д. И. Шишлянников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Изд. «Горная книга». – 2025. – № 11. – С. 99–111.
5. Брусиловский Д. В. Режущий инструмент отечественных и зарубежных калийных комбайнов (Пром-сть по пр-ву минер. удобрений, Серия «Калийная промышленность», Обзор. информ.) / М-во по пр-ву минер. удобрений, НИИ техн.-экон. исслед) / Д.В. Брусиловский, Л.Н. Вировец, С.М. Ушеренко – М.: НИИТЭХИМ, 1983. – 42 с.
6. Пат. RU2755106 C1 МПК E21C 35/18. Составной резец с устройством крепления на исполнительном органе машины / Шишлянников Д. И., Суханов А. Е., Васильев А. Л., Борисов А. В., Грибов Д. С. - № 2020141330; заявл. 14.12.2020; опубл. 13.09.2021. Бюл. № 26. – 12 с.

УДК 622.24

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ БУРОВЫЕ УСТАНОВКИ ОЧИСТНОГО БУРЕНИЯ

О.С. Данилов¹, канд. техн. наук, доцент, С.М. Баладжаев¹, студент,
Д.Л. Сливец¹, студент

¹ФГБОУ ВО «Заполярный университет им. Н.М. Федоровского», г. Норильск, Россия

В связи с усложнением горно-геологических условий подземной добычи полезных ископаемых (увеличение глубины, давления и температур) в настоящее время реализуется пятый этап глобальной цифровой трансформации горных работ с переходом на применение самоходных буровых установок, функционирующих в автоматическом режиме. Приведен опыт эксплуатации подобных машин на руднике «Комсомольский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» и Кольской ГМК. Показано, что использование разработанного Компанией электронного паспорта («Ассистент очистного бурения») позволяет значительно уменьшить брак при бурении, снизить разубоживание и издержки на укрепление горных выработок.

Ключевые слова: роботизированные буровые установки очистного бурения, цифровая трансформация, горные работы, ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», рудник «Комсомольский», Кольская ГМК.

ROBOTIC DRILLING TREATMENT DRILLING UNITS

O.S. Danilov, S.M. Baladzhaev, D.L. Slivets

Due to the increasing complexity of mining and geological conditions of underground mining (increasing depth, pressure and temperature), the fifth stage of the global digital transformation of mining operations is currently being implemented with the transition to the use of self-propelled drilling rigs operating in automatic mode. The experience of operating such machines at the Komsomolsky mine of ZF PJSC MMC Norilsk Nickel and Kola MMC is given. It has been shown that the use of the electronic passport developed by the Company ("Drilling Assistant") can significantly reduce defects during drilling, reduce dilution and costs for re-bracing of mine workings.

Keywords: robotic drilling rigs, digital transformation, mining, PJSC MMC Norilsk Nickel, Komsomolsky mine, Kola MMC.

В настоящее время подземная добыча полезных ископаемых на отечественных горных предприятиях осуществляется на значительных глубинах, в том числе на сверхглубоких горизонтах (например, шахта «Глубокая» ПАО «ГМК «Норильский Никель» - 2056 м). В связи с этим значительно усложняется реализация всех процессов горного производства из-за негативного влияния геомеханических (значительное горное давление) и термических (увеличение температуры горных пород) факторов.

Оптимальным решением сложившейся ситуации, как в России, так и за рубежом, где наблюдаются аналогичные тенденции в горнодобывающей отрасли является цифровизация работы рудников с широким внедрением роботизированной техники, в том числе для реализации очистного бурения. Как показывает мировой опыт, это позволит, с одной стороны, увеличить производительность труда посредством повышения эффективности проведения горных работ, с другой стороны, улучшить безопасность за счет минимизации участия человека [1, 2].

Курс на цифровую трансформацию производственных процессов (на основе концепции «Индустрия 4.0») был принят большинством стран мира

в 2010-х годах прошлого столетия. Наибольшая степень автоматизации и роботизация на настоящий момент достигнута в реализации технологических процессов бурения на базе автономной цифровой системы, включающей в себя непосредственно компьютер, софт, дисплеи, манипуляторы и т.д. [3].

Согласно [4] процессы бурения в роботизированных самоходных установках производятся на базе разработанного электронного паспорта, который позволяет точно выдерживать координаты скважин, что критически важно для горнодобывающей отрасли.

Непосредственно роботизация заключается в автономном управлении движением податчиков и манипуляторов в целях точного позиционирования, расчете оптимального усилия подачи, также разработчиками предусматриваются меры по защите от заклинивания. Программа отвечает за соблюдение заданных технологических операций:

- бурение шпура или скважины в забое, с регулирование их глубины и угла наклона (с постоянным мониторингом и фиксацией параметров);
- замена штанг и буровых коронок.

В ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» (далее – Компания) с 2015 по 2025 гг. реализованы стратегические программы по цифровизации горного производства - «Технологический прорыв», в том числе в области автоматизации процессов очистного бурения роботизированными самоходными установками и разработке собственных электронных паспортов бурения («Ассистент очистного бурения» - АОБ).

В целях первоначальной апробации разработанного АОБ Компания использовала его на базе зарубежных самоходных буровых установок (СБУ) Stellar и Sandvik в своем структурном подразделении Кольской ГМК. По результатам опытно-промышленных испытаний (далее - ОПИ) зафиксированы следующие производственные эффекты:

- 1) уменьшение брака при проведении выработок с 24 % до 2 % (визуализация результатов приведена на рис.1,2);
- 2) уменьшение издержек на укрепление за счет сокращения количества отклонений в проходке горных выработок;
- 3) снижение разубоживания и объемов горной массы за счет уменьшения перебуров;

Далее по результатам ОПИ «Бурение по электронному паспорту очистных выработок» на руднике «Комсомольский» зафиксированы следующие производственные эффекты:

- по результатам маркшейдерской съемки КАМ 3-39-1 (рис. 3) и КАМ 2-86-1 (рис.4) отклонение фактического разубоживания от проектного не превышает 3 %;
- исключение человеческого фактора при навигации СБУ, параметров глубины и угла наклона скважин при бурении.

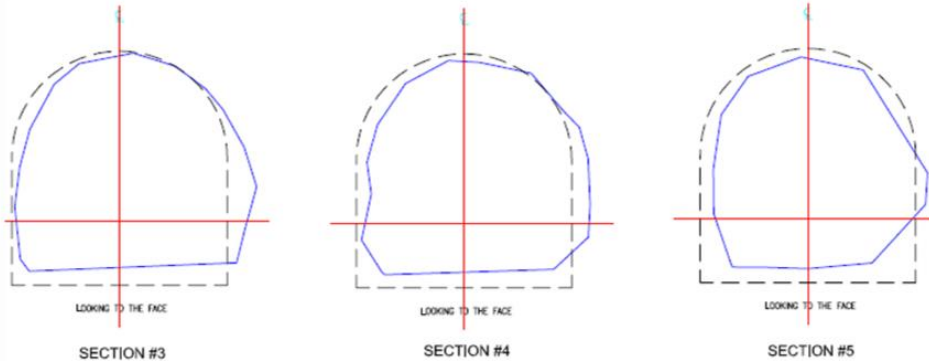


Рис.1. Контур выработки при бурении в ручном режиме без электронного паспорта

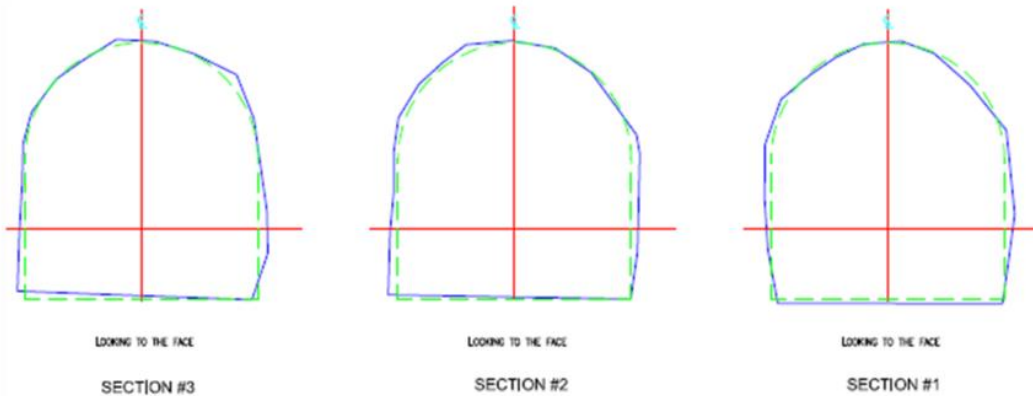


Рис.2. Контур выработки при бурении с применением электронного паспорта и навигации



Рис.3. Результаты бурения в автоматическом режиме
на руднике «Комсомольский», КАМ-03-39-1

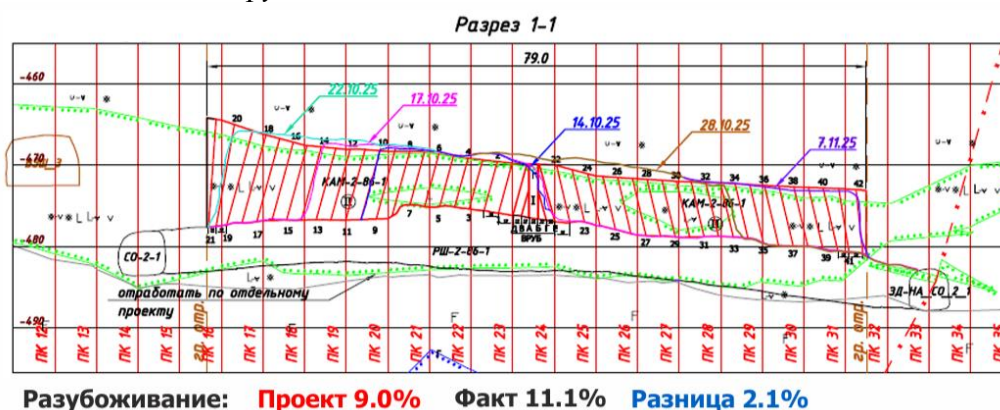


Рис. 4. Результаты бурения в автоматическом режиме
на руднике «Комсомольский», КАМ-2-86-1

Исходя из представленных теоретических и практических результатов, можно заключить, что разработка и применение роботизированных самоходных установок в очистном бурении эффективно и перспективно.

Список литературы

1. Антипин Ю.Г., Смирнов А.А., Никитин И.В. Прогноз развития подземной геотехнологии при освоении глубокозалегающих рудных месторождений на период до 2030 года // Проблемы недропользования. 2021. №4. – С. 74-86. DOI 10.25635/2313-1586.2021.04.074.
2. Li J.-G., Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment // Engineering. 2018. No. 4. P. 381-391. DOI 10.1016/j.eng.2018.05.013.
3. Громов Е.В. Цифровая трансформация технологических процессов подземных горных работ: ретроспективный анализ и мировой опыт // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. №8. С. 90-108. DOI 10.21440/0536-1028-2020-8-90-108.
4. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г. Концепция построения горнотехнических систем при переходе к роботизированным подземным геотехнологиям // Горная промышленность. 2025. №5. С.14-19. DOI 10.30686/1609-9192-2025-5S-14-19.

УДК 622.232

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНЫХ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЕЙ

Д.Я. Соловых¹, к.т.н, доцент, А.И. Есюнин¹, аспирант

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
г. Москва, РФ

В статье представлен анализ современного состояния исследований шахтных пневмодвигателей и направлений повышения их энергетической эффективности. Рассмотрены исторические этапы развития конструкций, термодинамические особенности рабочего процесса, влияние параметров шахтной пневмосети на характеристики привода, а также современные методы математического и CFD-моделирования. Обоснована необходимость комплексного подхода «двигатель – пневмосеть – управление» при проектировании энергоэффективных приводов для подземной добычи.

Ключевые слова: пневмодвигатель, шахтный привод, энергоэффективность, CFD-моделирование, пневмосеть, коэффициент полезного действия.

MODELING AND IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF MINE PNEUMATIC MOTORS

D.Y. Solovikh, A.I. Esyunin

The paper presents an analysis of the current state of research on mine pneumatic motors and the directions for improving their energy efficiency. The historical stages of design development, thermodynamic features of the working process, the influence of mine compressed air networks on drive characteristics, and modern methods of mathematical and CFD modeling are considered. The necessity of an integrated “motor – pneumatic network – control” approach for designing energy-efficient drives for underground mining is substantiated.

Keywords: pneumatic motor, mine drive, energy efficiency, CFD modeling, compressed air network, efficiency factor.

Пневматические двигатели на протяжении десятилетий остаются одним из ключевых типов приводов в подземной горнодобывающей промышленности. Их широкое применение обусловлено взрывобезопасностью, конструктивной простотой и устойчивостью к работе в условиях повышенной влажности и запылённости [1–3]. В то же время современная практика эксплуатации выявляет их существенный недостаток — низкий общий коэффициент полезного действия системы «компрессор – сеть – двигатель», который в реальных условиях может составлять лишь 5–20 % [7].

Исторически развитие теории и конструкции пневмодвигателей проходило несколько этапов. В 1940–1970 гг. были сформированы основы расчёта объёмных машин (поршневых, лопастных, шестерённых), определены параметры рабочих процессов и предложены методы инженерного расчёта [1–4]. В 1970–1990-е гг. акцент сместился в сторону прикладной оптимизации конструкций, направленной на снижение металлоёмкости и повышение надёжности [5].

Современный этап характеризуется активным внедрением численных методов анализа. Рабочий процесс пневмодвигателя рассматривается как политропический процесс открытой термодинамической системы с учётом

теплообмена, утечек, гидравлических сопротивлений и неполного заполнения рабочих объёмов [2,4]. Коэффициент заполнения обычно находится в пределах 0,45–0,7, а политропический показатель n — 1,1–1,3. При увеличении частоты вращения возрастает доля утечек и снижается эффективное давление, что приводит к падению удельной работы и КПД.

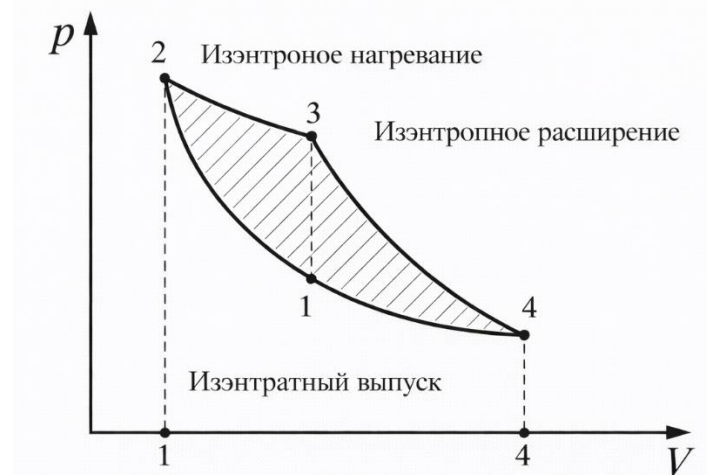


Рис. 1 Индикаторная диаграмма p – V рабочего цикла

В последние годы широкое распространение получили методы динамического математического моделирования в средах MATLAB/Simulink и Simscape, позволяющие совместно описывать газодинамическую и механическую подсистемы двигателя. Такие модели демонстрируют высокую степень соответствия экспериментальным данным и дают возможность исследовать переходные режимы, оптимизировать параметры газораспределения и прогнозировать поведение двигателя при изменении давления питания [8].

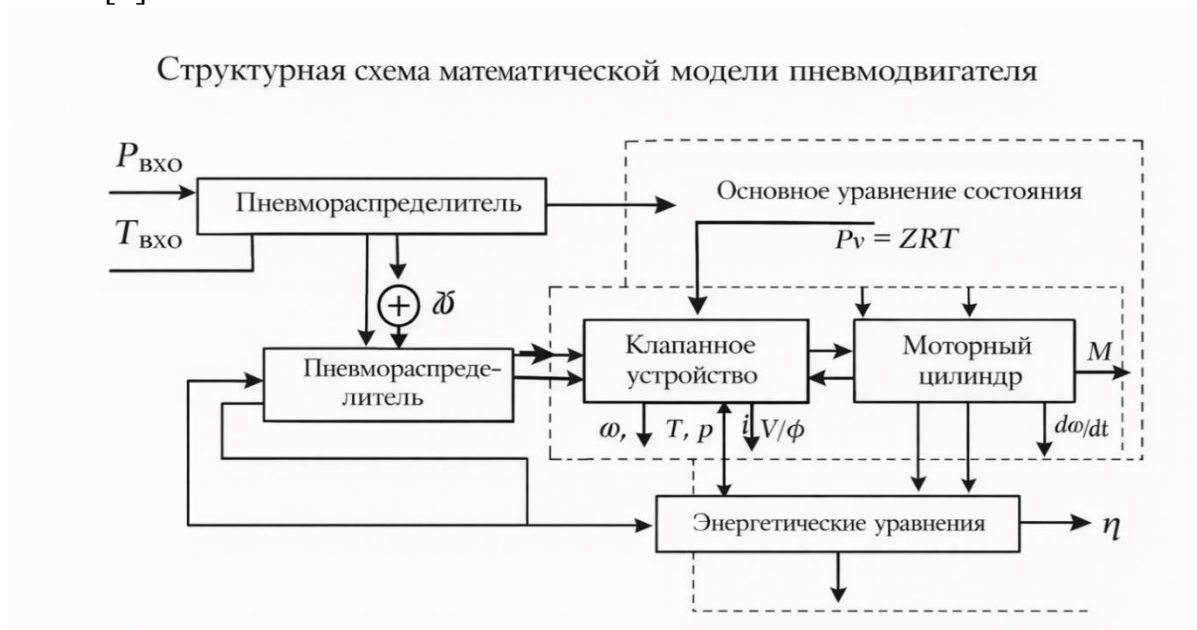


Рис. 2 Структурная схема математической модели пневмодвигателя

Особую роль играет вычислительная гидрогазодинамика (CFD-анализ), позволяющая детально исследовать структуру потоков в рабочих камерах и каналах. Оптимизация геометрии впускных и выпускных трак-

тов, формы камер расширения и параметров распределительных органов позволяет повысить коэффициент заполнения, снизить вихреобразование и уменьшить гидравлические потери [9]. По данным экспериментально-расчётных исследований, применение CFD-оптимизации может обеспечить прирост выходной мощности до 20–25 % при неизменных параметрах питания [9,10].

Важнейшим фактором, определяющим эффективность пневмопривода, является состояние шахтной пневмосети. Потери давления в магистральных могут достигать 30–40 %, а утечки – до 35 % подаваемого объёма воздуха [6]. Производство сжатого воздуха потребляет до 20 % общего энергобаланса предприятия [7]. Следовательно, совершенствование только конструкции двигателя без оптимизации пневмоснабжения не обеспечивает требуемого эффекта.

В современных исследованиях подчёркивается необходимость комплексного подхода, включающего:

- оптимизацию газораспределения (в том числе применение самодействующих клапанов) [10];
- использование многоступенчатого расширения [10];
- снижение массогабаритных показателей подвижных элементов;
- внедрение CFD-оптимизации проточных частей [9];
- устранение утечек и децентрализацию генерации сжатого воздуха [7];
- применение гидропневматических аккумуляторов для сглаживания пиковых нагрузок.

Перспективным направлением являются радиально-поршневые и многоступенчатые конструкции, демонстрирующие изоэнтропический КПД порядка 60–65 %, что существенно превышает показатели классических схем [10].

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что проблема повышения энергетической эффективности шахтных пневмодвигателей носит системный характер. Научная новизна современных исследований заключается в интеграции термодинамического анализа, динамического моделирования и CFD-методов с оптимизацией параметров шахтной пневмосети. Создание компактного, энергоэффективного и надёжного пневмодвигателя для подземных условий возможно только при реализации комплексной модели «двигатель – сеть – управление», учитывающей реальные эксплуатационные факторы.

Вывод. Анализ современных исследований и конструктивных решений показал, что повышение энергетической эффективности шахтных пневмодвигателей возможно только при реализации комплексного подхода, основанного на интеграции термодинамического анализа, динамического математического моделирования и CFD-оптимизации проточных частей, а также совершенствовании параметров шахтной пневмосети. Применение оптимизированных схем газораспределения, снижение массогабаритных характеристик подвижных элементов и уменьшение сетевых потерь обеспечивают существенное снижение удельного расхода сжатого

воздуха и повышение выходной мощности привода в условиях подземной эксплуатации.

Список литературы

1. Мишарин А.М. Пневматические и шестерёнчатые двигатели. — М.: Машгиз, 1948.
2. Борисенко К.С. Пневматические двигатели горных машин. — М.: Недра, 1958.
3. Кусничкин Г.И. Пневматические двигатели для горных машин и механизмов. — М.: Машгиз, 1953.
4. Зиневич В.Д., Гешлин Л.А. Поршневые и шестерённые пневмодвигатели горно-шахтного оборудования. — М.: Недра, 1982.
5. Шаповалов Н.И. Functional characteristics of air motors for brake systems of mine hoists // *Mechanization in Mining*. — 1983. — Vol. 19. — P. 44–51.
6. Цейтлин Ю.А. Исследование течения воздуха по трубопроводу с распределённой утечкой // *Известия вузов. Машиностроение*. — 1965. — № 6. — С. 72–80.
7. Simulating operational improvements on mine compressed air systems // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. — 2018. — Vol. 118. — P. 637–646.
8. Dvořák R., et al. Calculations of parameters and mathematical model of rotary air motor // *Polish Journal of Environmental Studies*. — 2017. — Vol. 26(3). — P. 148–151.
9. Vallavi A. CFD analysis of rotary air motor // *International Journal of Applied Engineering Research*. — 2016. — Vol. 10(6). — P. 15969–15978.
10. Grimaldi A., et al. Dynamic Modelling and Experimental Validation of a Pneumatic Radial Piston Motor // *Energies*. — 2023. — Vol. 16(4). — Article 1954.

УДК 621.646.45

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LS-УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОПРИВОДОМ ГОРНЫХ МАШИН

П.А. Ефимов¹, аспирант

¹Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, РФ

Рассмотрены различные типы регулирования гидросистем. Представлен метод регулирования с использованием LS-управления. Рассмотрены различные подтипы LS-систем. Приведено практическое применение гидравлических распределителей с LS-управлением.

Ключевые слова: регулируемый насос, дроссель, LS-управление, гидравлический распределитель, золотник, прекомпенсация, посткомпенсация.

APPLICATION OF LS-CONTROL IN HYDRAULIC DRIVE OF MINING MACHINES

P.A. Efimov

Various types of hydraulic system control are discussed. A control method using LS control is presented. Various subtypes of LS systems are considered. Practical applications of hydraulic distributors with LS control are presented.

Keywords: variable displacement pump, throttle valve, load-sensing (LS) control, hydraulic directional control valve, spool valve, pre-compensation, post-compensation.

В существующих исследованиях [1, 2, 3, 4] подробно рассмотрены методы регулирования параметров гидросистем, под которым понимается обеспечение и поддержание заданных режимов работы исполнительных механизмов (ИМ). Основными способами регулирования расхода являются дроссельное, объёмное (изменение рабочего объёма насоса или гидромотора), частотное регулирование, а также их комбинации.

Применение указанных методов позволяет обеспечить требуемые скорости ИМ и их стабильность в процессе эксплуатации. Однако при проектировании сложных гидросистем с несколькими ИМ, работающими параллельно или последовательно, необходимо учитывать ряд ограничений. В мобильных машинах, например, существует лимит по отбираемой мощности от КПП. В этих условиях ключевой задачей становится оптимизация гидросистемы с целью снижения потерь на регулирование, уменьшения энергопотребления и повышения общего КПД [5].

Одним из наиболее эффективных способов регулирования является применение LS-системы (Load Sensing). Она обеспечивает адаптацию подачи насоса к текущей нагрузке на исполнительный механизм (ИМ), используя давление в гидродвигателе как сигнал обратной связи. Управляющее устройство устанавливает необходимую подачу и давление в напорной линии, при этом заданная скорость ИМ сохраняется независимо от изменения нагрузки.

Принцип LS-управления основан на поддержании постоянного перепада давления на дросселе между напорной линией насоса и гидродвигателем ИМ.

Уравнение расхода через дроссель имеет следующий вид:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}},$$

где μ – коэффициент расхода; A – площадь открытия дросселя, м^2 ; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; Δp – перепад давления на дросселе, Па ; Q – расход жидкости через дроссель, $\text{м}^3/\text{с}$.

Очевидно, что при постоянном коэффициенте расхода и плотности рабочей жидкости расход является функцией от площади открытия дросселя и перепада давления, т.е. $Q = f(A, \Delta p)$. Это характерно для обычного дроссельного регулирования, при котором расход зависит не только от положения запорного элемента, но и от изменения нагрузки. В результате часть подачи насоса сбрасывается через клапан, что увеличивает потребляемую мощность и снижает энергоэффективность системы.

При использовании LS-системы, рис 2 вне зависимости от повышения давления до дросселя или после него, перепад сохраняется постоянным и равняется давлению настройки LS- клапана, т.е. $Q = f(\Delta p)$. В зависимости от типа LS-системы, о которых будет рассказано в следующем разделе, часть жидкости уходит либо через переливной клапан (система с нерегулируемым насосом), либо на LS-регулятор, установленный в системе управления регулируемого насоса [6].



Рис. 1. Способы управления гидросистемой

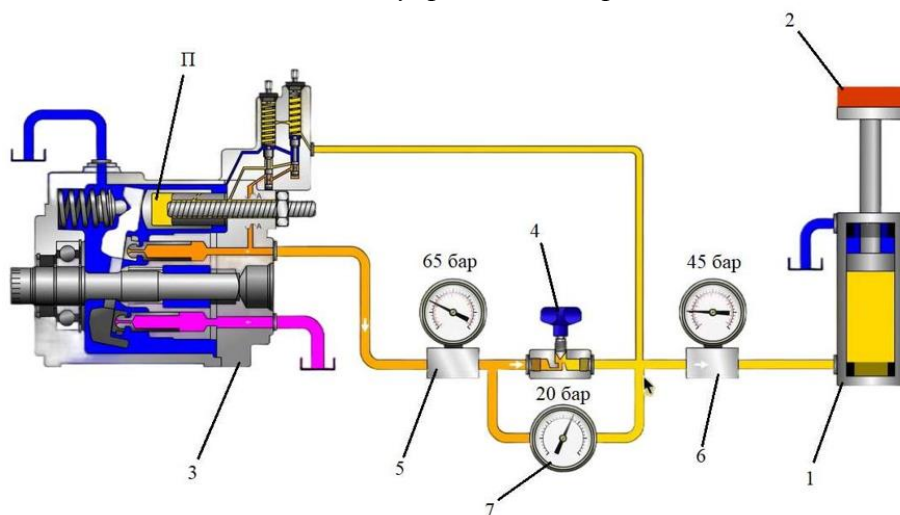


Рис. 2. Принцип работы LS-системы

Прекомпенсация (pre-compensated LS), рис. 3. Компенсаторы давления установлены до переменных дросселей. Каждый компенсатор поддерживает постоянный перепад давления на своём золотнике, обеспечивая независимость скорости ИМ от нагрузки.

Недостаток проявляется при «насыщении» насоса: если суммарный расход превышает подачу, поток распределяется в зависимости от нагруз-

ки - менее нагруженные механизмы получают больше, более нагруженные замедляются или останавливаются.

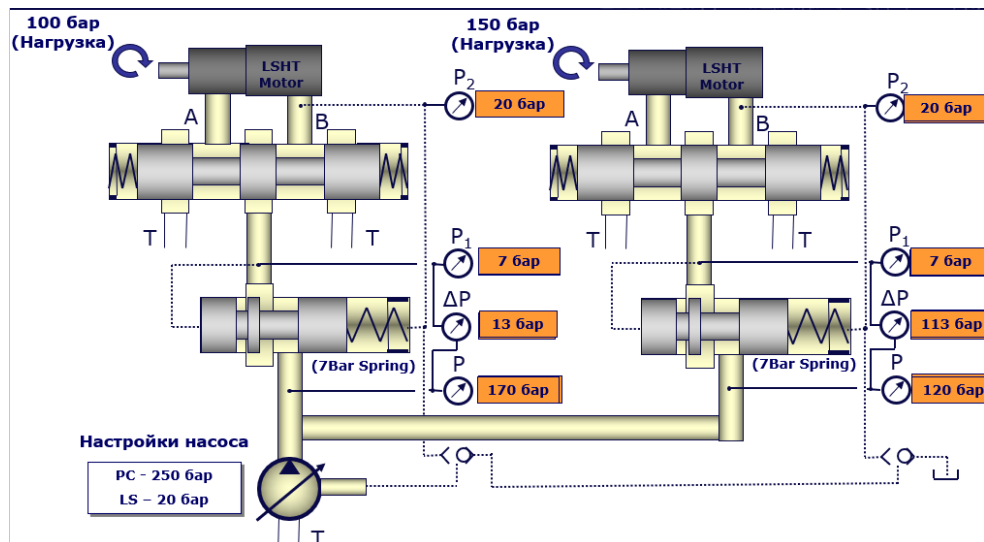


Рис. 3. Прекомпенсация распределителя

Посткомпенсация (post-compensated LS, flow sharing), рис 4. Компенсаторы расположены после переменных дросселей. Давление наиболее нагруженного потребителя передаётся всем секциям.

Даже при недостатке подачи насоса расход делится пропорционально положениям золотников, независимо от нагрузки. Это обеспечивает синхронность работы ИМ и устойчивость системы при ограниченной мощности.

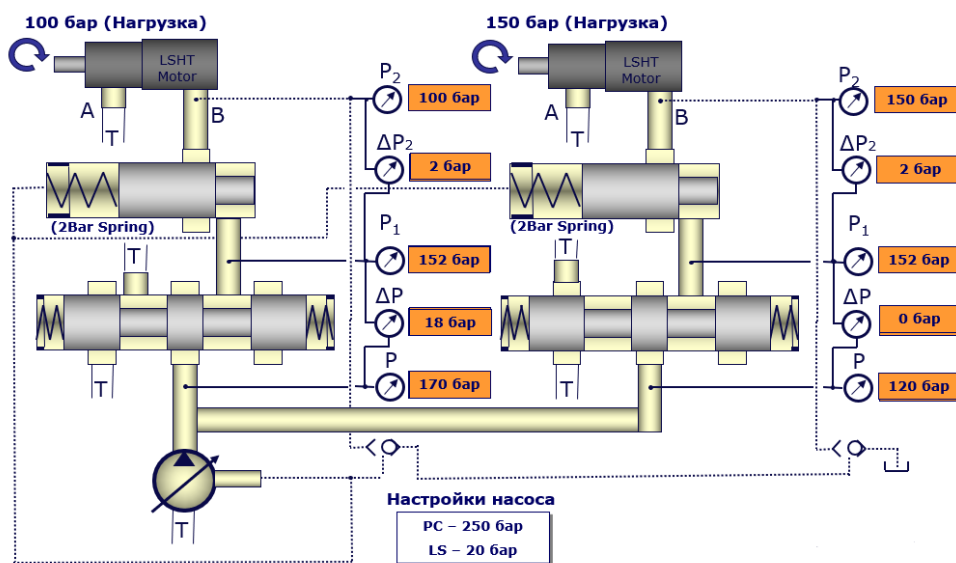


Рис. 4. Посткомпенсация распределителя

Прекомпенсация обеспечивает независимость от нагрузки до насыщения насоса; пост-компенсация дополнительно гарантирует пропорциональное распределение потока при дефиците подачи

Практическое применение гидросистем с LS-управлением широко распространено в горных машинах, прежде всего в гидравлических экскаваторах, LS-системы используются для управления рабочим оборудованием (стрела, рукоять, ковш), обеспечивая стабильную скорость перемещения ИМ при изменяющейся нагрузке.

Также LS-системы применяются в буровых установках, погрузочно-доставочных машинах и гидравлических манипуляторах, где требуется точное позиционирование рабочих органов при переменных нагрузках и ограниченной установленной мощности силовой установки.

Вывод. Перепад Δp , формируемый LS-регулятором, используется как общий управляющий параметр системы, обеспечивая пропорциональное распределение потока между потребителями даже при ограниченной подаче насоса. LS-управление позволяет повысить эффективность эксплуатации гидравлических экскаваторов, включая колесно-шагающие (spider-excavator).

Список литературы

1. Шестаков В. С., Безкоровайный П. Г., Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Аббаров Р. Р. Совершенствование рабочего оборудования карьерного гидравлического экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 48–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_48.
2. Митусов А.А., Лагунова Ю.А., Решетникова О.С. Машинные исследования золотниковых распределителей / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции. 2017. С. 327-330.
3. Лагунова Ю.А., Решетникова О.С. Исследование рабочего цикла гидромолота К-14 / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в рамках Уральской горнопромышленной декады. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. 2018. С. 113-116.
4. Бондарь В.А. Принципы LS и LUDV в гидросистемах открытого контура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hydrostat.ru/ls-and-ludv.html> (дата обращения: 15.02.2026).
5. М. Г. Рахутин, В. Х. Тран, А. Е. Кривенко, К. Х. Джианг. Влияние технического состояния главных насосов на расход топлива в гидравлическом экскаваторе // Горные науки и технологии. – 2025. – № 10(1). С. 67–74. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-179
6. Götz W. Theory and Applications. – Robert Bosch GmbH, Automation Technology, 1998. – 291 p.

УДК 622.3

МОБИЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДОБЫЧИ ТОРФА

А.И. Жигульская¹, А.А. Иванов¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, РФ

Рассматривается применение мобильных комплексов в торфодобыче для преодоления проблем крупного производства: высоких затрат, отчуждения территорий и логистических издержек. Обсуждаются преимущества внедрения мобильных комплексов. Приведен обзор источников по классификации и структуре таких систем. Предложен вариант использования возобновляемых источников энергии для энергонезависимости комплекса.

Ключевые слова: торфяные машины, мобильные комплексы, автономный комплекс, торфяное производство, энергонезависимость.

MOBILE COMPLEXES FOR OPTIMIZATION OF PEAT EXTRACTION

A.I. Zhigulskaya, A.A. Ivanov

This article examines the use of mobile systems in peat extraction to overcome the challenges of large-scale production, including high costs, land acquisition, and logistics. The advantages of implementing mobile systems are discussed. A review of sources on the classification and structure of such systems is provided. A proposal is made for using renewable energy sources to ensure energy independence for the system.

Keywords: peat machines, mobile systems, autonomous system, peat production, energy independence.

На большом протяжении времени, добыча торфа представляла масштабное, капиталоемкое производство, отчуждающее крупные территории, выводя их из естественного водно-болотного режима. На современном этапе развития отрасли, в связи с переустройством экономики, и переориентацией на другие источники топлива, крупная добыча оказалась невостребованной, что всерьез ударило по жизнеспособности предприятий и отрасли в целом.

Для сокращения затрат и оптимизации производств в условиях уменьшения добычи возможен вариант применения мобильных комплексов.

Мобильные комплексы представляют собой вариант усовершенствования технологического процесса, ключевым аспектом которого является переработка сырья на месте добычи (in-pit processing). Данный подход позволяет решать ряд задач: повышение производительности, снижение логистических издержек, а также сокращение негативного влияния на окружающую среду [1].

Одним из значимых преимуществ мобильных комплексов является их высокая адаптивность к специфическим условиям торфяных месторождений: высокий уровень грунтовых вод, низкая несущая способность грунта. Крупные торфяные производства неразрывно связаны с применением тяжелой техники, для которой необходимо создавать подъездную инфраструктуру (насыпи, дороги, мосты и пр.), что само по себе не только отчуждает полезную площадь добычи, но и требует постоянных финансовых

ресурсов на поддержание ее в рабочем состоянии. Также, процесс транспортировки сырья с высоким содержанием влаги до места переработки может существенно удорожать конечный продукт, закладывая в итоговую стоимость транспортные издержки.

Также стоит отметить, что на сегодняшний день торфодобыча, в основном, осуществляется частными организациями, нацеленными на реализацию продукции и получение прибыли. Объемы добычи и переработки на таких предприятиях сравнительно невелики и имеется необходимость в многофункциональном оборудовании, которое возможно оперативно перенаправить на более загруженные цепочки производства торфяного продукта, либо переместить на новый участок разработки. Идея применения мобильных комплексов позволит осуществлять предварительную переработку торфяного сырья в пределах мест добычи путем механического обезвоживания и удаления влаги обратно в карьер.

Комплекс представляет собой набор мобильных модулей (дробилка, сепаратор, пресс-фильтр, формовочный станок и пр.), расположенных непосредственно в месте добычи. Добытый торф сразу же попадает в этот комплекс, где происходит его первичная обработка: дробление, разделение на фракции (например, отделение древесных примесей), первичное обезвоживание и формирование готового продукта, такого как торфобрикеты или гранулы.

Технологические преимущества мобильных комплексов также проявляются в их способности работать в различных климатических условиях и с различными типами торфа. Исследования, проведенные Е.А. Череповицыным и П.С. Цветковым, показывают, что даже в суровых условиях северных регионов можно добиться эффективной добычи, если правильно подобрать технологию и оборудование [2].

Вопросы создания и эксплуатации мобильных комплексов затронуты в работе [3]. Авторы предлагают ряд решений по созданию модульных блоков, разделенных по этапам создания продукта из сырья. Также авторами выполняется поэтапный подбор оборудования и приводится итоговый расчет энергозатрат.

В работе [4] рассматривается структура мобильных комплексов с применением внутрикарьерной переработки и транспортирования переработанного сырья. Авторы отмечают экономическую эффективность и надежность в сравнении с традиционными системами. Мобильные комплексы позволяют сокращать объемы перевозок внутри разработок, отделять отходы и производить первичную переработку на месте добычи.

Состав мобильного комплекса можно подбирать исходя из ряда факторов: величины месторождения и объемов производства продукции, удаленности от потребителей, климатических условий, а также от желаемого конечного продукта.

Кроме этого, мобильный комплекс, ввиду его возможной установки на большом расстоянии от энергосетей, целесообразно выполнять энергонезависимым. Это возможно осуществить при помощи теплоэнергетических установок с выработкой тепловой и электрической энергии, работающих

на предварительно высушенном добываемом сырье. Таким образом, комплекс избавляется от зависимости от привозного топлива.

Энергетический блок мобильного комплекса можно реализовать на основе существующих блочно-модульных котельных (БМК), которые имеют небольшие размеры (часто в габаритах прицепа, либо вагона) и могут транспортироваться к месту установки по дорогам общего пользования, а также могут быть установлены на прицепы на гусеничном, либо колесном ходу.

Также, часть электрической энергии возможно получать при помощи нетрадиционных источников. К таким можно отнести солнечные панели, устанавливаемые на крышах строений, а также установкой ветрогенераторов малой мощности.

Помимо блока с энергоустановкой, при необходимости, систему возможно укомплектовать мобильной ремонтной мастерской для выполнения ремонтных и монтажных работ.

Необходимость проведения ремонтных работ в полевых условиях возникает достаточно часто из-за крупных габаритов оборудования. Мобильную ремонтную мастерскую легко доставить на отдаленные и труднодоступные участки торфодобывающих предприятий к месту стоянки оборудования и мобильного комплекса. Непосредственно на месте осуществляют ремонт методами изготовления новых и восстановления изношенных деталей. Для этого используют станочное оборудование мастерской, электроснабжение которого обеспечивается двумя способами: от электрогенератора, приводимого от вала отбора мощности трактора или от автономного бензогенератора [5].

Возможность комбинирования машин и механизмов для достижения целей конкретных производителей, а также возможность применения небольшого парка техники для выполнения нескольких видов работ, является преимуществом мобильных комплексов над традиционными.

Мобильные комплексы представляют перспективное решение для возрождения и продолжения торфодобычи в условиях снижения объемов и экономических вызовов. Их внедрение позволит повысить конкурентоспособность отрасли, минимизировать экологический ущерб и адаптироваться к нуждам малых производителей. Дальнейшие исследования должны фокусироваться на экономических расчетах и пилотных внедрениях для подтверждения выдвинутых предположений.

Список литературы

1. Мякотных А. А., Иванова П. В., Иванов С. Л. К вопросу классификации комплексов добычи торфяного сырья // Горная промышленность. 2023. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-klassifikatsii-kompleksov-dobychi-torfyanogo-syrya> (дата обращения: 05.02.2026).
2. Cherepovitsyn A.E., Tsvetkov P.S. Methodical Approach to Evaluation of the Russian Peat Deposits Exploitation Attractiveness Based on Geology-Technological Criteria // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 7 2020 URL: https://www.researchgate.net/publication/303368850_Methodical_approach_to_

evaluation_of_the_russian_peat_deposits_exploitation_attractiveness_based_on_geology-technological_criteria (дата обращения: 10.02.2026).

3. Худякова И. Н., Резванова Э. А., Коконков А. А., и др. Формирование структуры основного технологического оборудования автономного комплекса для добычи торфа из неосушенного месторождения // Вестник евразийской науки. 2021. №3 (40). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-struktury-osnovnogo-tehnologicheskogo-oborudovaniya-avtonomnogo-kompleksa-dlya-dobychi-torfa-iz-neosushennogo> (дата обращения: 10.02.2026).

4. Михайлов А. В., Казаков Ю. А., Гарифуллин Д. Р., и др. Анализ структуры мобильного комплекса для добычи органогенного сырья карьерным способом // ГИАБ. 2022. №6-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-struktury-mobilnogo-kompleksa-dlya-dobychi-organogenennogo-syrya-kariernym-sposobom> (дата обращения: 15.02.2026).

5. Яблонев А. Л., Гусева А. М., Панов С. В. Мобильная ремонтная мастерская // Документ RU 183 219 U1 // Роспатент платформа. URL: https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU183219U1_20180913?q=&from=search_simple&hash=1909520008&pos=3 (дата обращения: 22.02.2026).

УДК 622.23.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО МАССИВА РАБОЧИМ ИНСТРУМЕНТОМ ГОРНЫХ МАШИН

Д.А. Задков¹, канд. техн. наук, доцент, С.Е. Речкин¹, студент

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, РФ

Рассмотрены вопросы исследования процесса разрушения горного массива резцовым инструментом с использованием современных методов математического моделирования. Приведены обоснования применяемых методов и показаны результаты моделирования с использованием программного комплекса ANSYS.

Ключевые слова: *резец, очистной комбайн, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, метод дискретных элементов*

MODELING THE PROCESS OF COAL MASSIVE DESTRUCTION BY THE WORKING TOOL OF MINING MACHINES

D.A. Zadkov, S.E. Rechkin

The article considers issues related to the study of the process of rock mass destruction using cutting tools and modern mathematical modeling methods. It provides justification for the methods used and shows the results of modeling using the ANSYS software package.

Keywords: *bit, shearer, computer modeling, finite element method, discrete element method*

В настоящее время при подземной добыче угля в длинных очистных забоях основным оборудованием механизированных комплексов являются очистные узкозахватные комбайны, которые оснащаются преимущественно шнековыми исполнительными органами с тангенциальными поворотными резцами.

Одной из ключевых задач является повышение эффективности этих машин, что подразумевает как увеличение их производительности, так и сокращение затрат и времени на простои техники, осуществляемые путем подбора рациональных параметров исполнительных органов и оптимизации режимов их работы. Одним из факторов, влияющих на производительность очистных комбайнов, является уровень надежности исполнительных органов [1], который, в свою очередь, зависит от принятой схемы расстановки резцов на шнеке. Для обеспечения работоспособного состояния в течение заданного промежутка времени необходим комплексный подход при решении задачи выбора схемы расстановки резцов.

В настоящий момент основные параметры шнекового исполнительного органа выбираются согласно ОСТ 12.44.258-84. В проведенных исследованиях [2, 3] показывается ряд недостатков данной методики: углы установки резцов, а также их количество не регламентируются однозначно, в связи с чем, при эксплуатации наблюдается повышенный износ рабочего инструмента и самих исполнительных органов (рисунок 1).

С момента утверждения отраслевых стандартов произошел стремительный скачок в области развития вычислительной техники. Для проверки существующих теоретических положений и разработки конкретных практических рекомендаций по разрушению угольного массива резцовым инструментом стало применяться компьютерное моделирование. Компью-

терная модель дает возможность изменять характеристики разрушаемого материала, геометрические параметры резцов, параметры их расстановки. Возможность гибко изменять параметры модели по сравнению с натурным экспериментом снижает время проведения испытаний, а также связанные с ним экономические затраты.

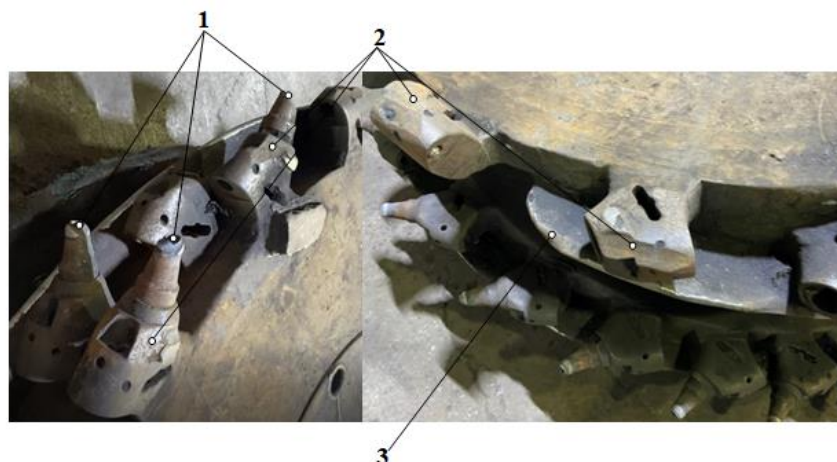


Рис. 1. Характер изнашивания шнекового исполнительного органа:
1 – износ резцов; 2 – износ резцедержателей; 3 – износ реборды

В практике моделирования процесса разрушения угля и горных пород резцовым инструментом наибольшее распространение получили методы дискретных (МДЭ) и конечных элементов (МКЭ). Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, выбор между ними часто определяется конкретной задачей и имеющимися данными. Однако, стоит отметить, наряду с данными методами численные исследования проводят и другими методами [5].

МДЭ предполагает разбиение разрушаемого массива на сферические элементы, связанные контактными силами. Важной задачей при моделировании является выбор корректных параметров разрушаемого материала, оказывающих существенное влияние на расчет контактных сил между частицами в модели, в связи с чем, проводятся натурные лабораторные испытания. Испытания также необходимы для верификации результатов моделирования.

На этапе построения модели угольного массива выбираются размер и форма дискретных элементов – частиц, отображающих его свойства. Вышеперечисленные параметры оказывают существенное влияние на точность моделирования, время и вычислительную мощность, затрачиваемую для проведения данного процесса. В связи с этим исследователи принимают различные допущения, упрощающие вычислительный процесс [4-6].

В ходе анализа научной базы проведенных исследований в области моделирования процесса разрушения угольного массива было установлено, что метод дискретных элементов применялся преимущественно для анализа движения частиц угля с целью подбора рациональных параметров шнека (угла навивки и числа лопастей), а для анализа нагрузок, возникающих на рабочем инструменте, применялся в меньшей степени или в качестве дополнительного метода в исследовании (верифицирующего резуль-

таты основной модели исследования) [5]. Распространенной проблемой при моделировании горных пород с помощью сферических дискретных элементов является нереалистичное макроскопическое соотношение прочности, получаемое в результате моделирования. Для решения этой проблемы было предложено несколько подходов [6].

Для более точного решения задачи нахождения нагрузок на резцах используется метод конечных элементов. Сущность метода заключается в разбиении твердотельной модели материала с рядом заданных ему свойств на конечные элементы: тетраэдры, гексаэдры и другие плоские или объемные фигуры. Для каждого элемента формулируются соотношения механики сплошных сред с учётом конкретных физико-механических свойств материала [7]. Составленные уравнения сводятся в систему, при решении которой для каждого элемента рассчитываются суммарные напряжения и деформации, из значений которых и формируется результат расчета.

В различных исследованиях, проведенных в области моделирования процесса разрушения, применялись различные программные комплексы, такие как ABAQUS, ANSYS (LS-DYNA, Static structural, Ncode) [8].

Построение модели резания. С помощью программного комплекса ANSYS LS-DYNA было проведено моделирование процесса разрушения угольного массива одиночным резцом.

Исходные модели породоразрушающего инструмента и самого массива были созданы в программе трехмерного моделирования КОМПАС-3D, а затем экспортированы в формате .step в программный комплекс ANSYS, модуль LS-DYNA.

В предлагаемой модели резец РШ 30-75L85 разрушает угольный массив в виде параллелепипеда с размерами $200 \times 150 \times 150$ мм, резец движется с постоянной линейной скоростью $v = 5$ м/с, глубина резания $h = 30$ мм, угол атаки $\theta = 45^\circ$. Схема резания представлена на рисунке 2, а.

В качестве модели материала угля была использована карта *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (JHC). Модель JHC различает несимметричные прочностные свойства материала при растягивающих и сжимающих нагрузках. Модель связывает внутреннее давление и дифференциальное напряжение в деформированном состоянии материала для определения фактической прочности. Материал резца задавался с помощью карты *MAT_RIGID.

В результате моделирования была получена силовая характеристика разрушения угля (рисунок 2, б), из которой видно, что разрушение материала происходит по закономерному процессу свойственному реальному разрушению угольного массива резцом.

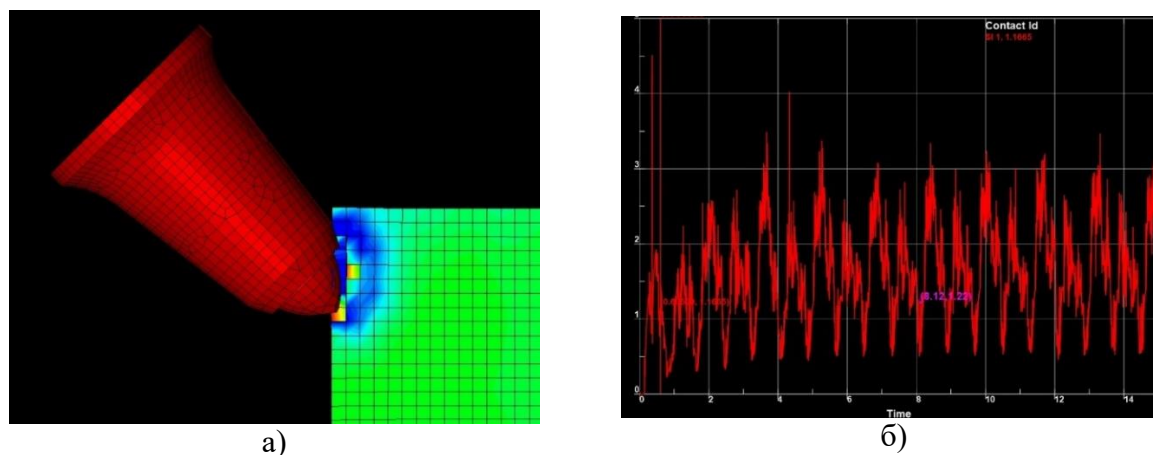


Рис. 2. Моделирование процесса резания угля:

а – схема резания угля; б – силовая характеристика разрушения угля

Вывод. Таким образом, имеются широкие возможности для анализа нагрузок, возникающих на резцах в зависимости от углов их установки. Анализ результатов моделирования позволяет определить на этапе проектирования рациональные геометрические параметры, как исполнительного органа, так и резцового инструмента в условиях конкретного массива.

Список литературы

1. Анализ структуры отказов шнеков очистных комбайнов / Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник, Э.Ю. Воронова и др. // Уголь. 2021. № 4. С. 20-24. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-20-24.
2. Габов В. В., Задков Д. А., Прялухин А. Ф., Садовский М. В., Молчанов В. В. Совершенствование конструкции шнекового исполнительного органа очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 51-71.
3. Габов В. В., Задков Д. А., Нгуен Ван Суан, Хамитов М. С., Молчанов В. В., К проблеме совершенствования рабочего инструмента горных выемочных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 205-222.
4. Tian, Ying. Numerical Investigation on Rotational Cutting of Coal Seam by Single Cutting Pick / Ying Tian, Shengda Zhang, Qiang Zhang et al. // Processes. – 2026. – Vol. 14, No. 3. – Article 531.
5. Xu, W., Huang, Q., Zhang, W., Zhang, S., Ma, Z., Gao, K., & Jiang, N. Optimization of Vane Number for Coal Loading in Shearer Drums (1400 mm and 2240 mm) via Discrete Element Modeling // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 21. – Article 11522.
6. Zhen Tian, Shuangxi Jing, Lijuan Zhao, Wei Liu, Shan Gao. Numerical simulation on coal loading process of shearer drum based on discrete element method // Energy Exploration & Exploitation. – 2021. – Vol. 39, № 6. – P. 1919–1938.
7. Jaime M. C., Gamwo I.K., Finite element modeling of rock cutting and its validation with bench-scale tests, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, V. 75, pp. 123-134, 2015.
8. Xie, B.; Yan, Z.; Du, Y.; Zhao, Z.; Zhang, X. Determination of Holmquist-Johnson-Cook Constitutive Parameters of Coal: Laboratory Study and Numerical Simulation. Processes 2019, 7, 386.

УДК 622.6

РЕЖИМЫ ПУСКА И ТРОГАНИЯ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН

В.Ю. Зверев¹, канд. техн. наук, доцент

¹ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, РФ

В статье описан процесс трогания подъемной машины, который сопровождается запуском электродвигателя и снятием тормоза. Некорректный пуск подъемной машины может стать причиной обратного хода скипов, причиной увеличения динамической нагрузки на канат и сбоев в режиме работы установки. Оптимизация пуска должна быть обоснована обеспечением надежности эксплуатации подъемной машины и минимизацией возникающих динамических явлений из-за рывка.

Ключевые слова: шахтная подъемная машина, тахограмма, электропривод, дисковые и колодочные тормоза, скипы.

STARTING AND TOUCHING MODES OF THE HOIST MACHINES

V.Yu. Zverev

In this paper, was describes the process of starting a hoist machine, which is accompanied by starting the electric motor and releasing the brake. Incorrect starting of the hoisting machine can cause the skips to reverse, increase the dynamic forces on the wire rope and cause malfunctions in the operation of the plant. Optimization of the start-up must be justified by ensuring the reliability of the operation of the hoist machine and minimizing the dynamic phenomena that arise due to the jerk.

Keywords: mining hoist machine, speed diagram, electric drive, skips disc and pad brakes.

Поддержание эффективной эксплуатации скиповых подъемных установок имеет непосредственную зависимость от оптимизации режима ее работы. Цикл подъема производится по заданной заранее тахограмме. Нормами проектирования регламентированы значения скоростей и ускорений на разных периодах при подъеме груза [1]. При этом ни теория шахтного подъема при проектировании ни нормативные требования не учитывают происходящие переходные процессы. Рывки – нарастание и снижение ускорения, скругляют вид тахограммы, приводят к увеличению фактической продолжительности подъема, являются причиной возбуждения динамики в системе. Описание процесса пуска и трогания подъемной машины позволит частично оптимизировать систему ее управления, обеспечит поддержание эффективной работы от момента ее проектирования до запуска в эксплуатацию.

Проблема оптимизации наладки пуска подъемной машины заключается в разнообразии применяемых типов привода и систем их управления [2, 3], большое влияние оказывает тип тормозов и точность определения тормозного усилия. Именно взаимная работа привода и тормоза зачастую определяет рывок и большое ускорение при трогании подъемной машины.

Пуск подъемной машины происходит ее отмораживанием и разгоном до значения скорости, настраиваемой для движения в разгрузочных кривых [4]. Требуемое быстрое снятие тормоза подъемной машины обуславливает его срабатывание как стопора, практически не создавая сопротивление движению. Еще на застопоренной подъемной машине на двигатель

подается напряжение и начинает расти создаваемое движущее усилие, одновременно с этим снимается тормозное усилие. Трогание подъемной машины и скипов при превышении движущего усилия над тормозным [5]. Важным является момент достижения величины усилия, соответствующего разности статических натяжений:

1. При достижении тормозного усилия $F_t(t)$ значения разности статических натяжений F_{st} в момент, когда движущее усилие $F_{d1}(t)$ меньше их величины, то произойдет обратный ход скипов (рис. 1). Скорость на видеотерминальной станции машиниста соответствует опусканию груженого скипа в ствол. За счет дальнейшего нарастания тормозного усилия, скип подхватывается и начинается подъем груза. Такой режим работы небезопасен и является причиной раскачивания скипа на канате и создания дополнительного динамического усилия. Наладка таких подъемных машин при этом сопровождается некоторой корректировкой защиты от обратного хода. Настройка защитных устройств направлено на допущение небольшого опускание груженого скипа при трогании.

2. Соответствие тормозного $F_t(t)$ и движущего $F_{d2}(t)$ усилий значению разности статических натяжений F_{st} в момент трогания подъемной машины является оптимальным режимом пуска (рис. 2). При расстопорении подъемной машины возможно плавное увеличение движущего усилия до значения, соответствующего требуемому ускорению. Может быть оптимизирована динамика подъемной установки. В реальных условиях из-за изменения массы груза в скипе разность статических усилий канатов может изменяться, как в большую сторону, так и в меньшую при изменении плотности груза, налипании горной массы на стенках и так далее.

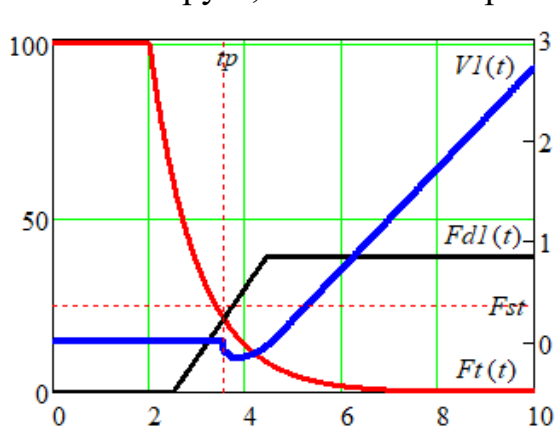


Рис. 1. Пуск подъемной машины с обратным ходом скипов

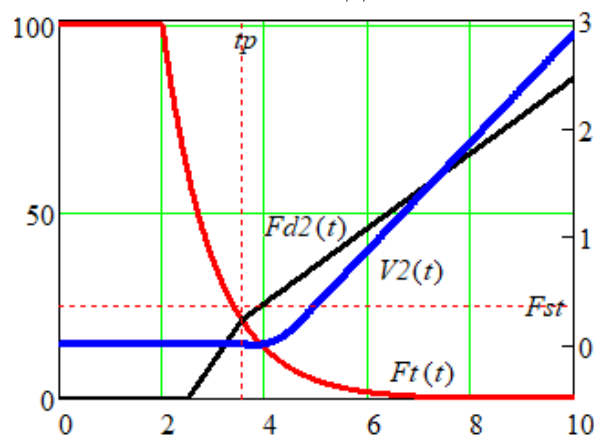


Рис. 2. Оптимальный режим пуска подъемной машины

3. В момент растормаживания подъемной машины при значениях движущего и тормозного усилий, больше чем разность статических натяжений приведет к мгновенному разгону в момент расстопорения. При этом важным является настройка задания скорости (рис. 3, 4).

3.1. Если после трогания подъемной машины движущее усилие $F_{d3}(t)$ не меняется, то раскачивание скипа на канате вызывается только рывком при пуске. При этом величина этого рывка зависит не только от величины движущего усилия, но и жесткости механической системы, которая до мо-

мента трогания оказывается, перенапряжена. [3] Изменение концевой нагрузки корректируется системой управления подъемной машины, что может вызвать автоколебательный процесс. При этом, за счет поддержания постоянного значения ускорения, динамические процессы до окончания разгона, как правило, быстро затухают.

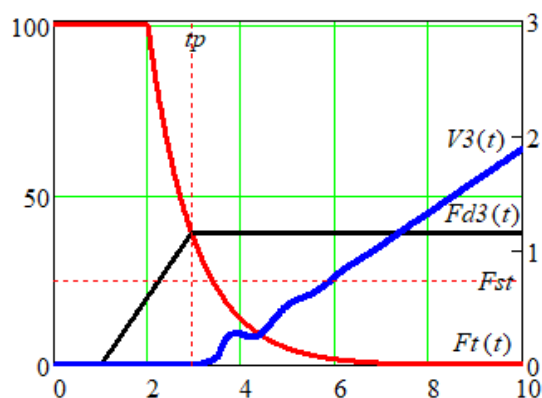


Рис. 3. Пуск подъемной машины с рывком

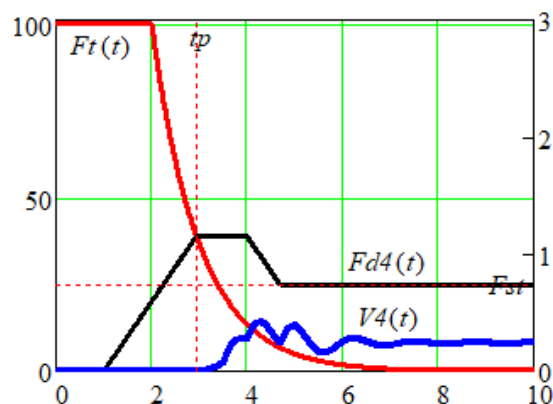


Рис. 4. Пуск подъемной машины с рывком и перерегулированием скорости

3.2. Если после трогания подъемной машины движущее усилие $Fd4(t)$ корректируется для поддержания заданного ускорения разгона. Возникающий автоколебательный процесс усугубляется перерегулированием скорости. Данный режим работы является самым неблагоприятным с точки зрения динамики подъема.

Таким образом, из анализа режимов пуска подъемной машины видно, что на трогание скипов большое влияние оказывает взаимодействие привода и тормоза. Их параметры определяют возникающие рывок и ускорение в трех из четырех режимов работы. Оптимизация процесса трогания подъемной машины возможна при соответствии движущего и тормозного усилия разности статических натяжений, при условии точного определения массы подъемного сосуда, например, за счет загрузки по весу.

Список литературы

1. Временные нормы технологического проектирования угольных и сланцевых шахт. ВНТП 1–92 / Минтопэнерго России. – М., 1993. – 111 с.
2. Ещин, Е. К. Формирование тахограммы подъемной машины средствами асинхронного электропривода / Е. К. Ещин // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 5(157). – С. 57-62.
3. Степанов А.Г. Динамические процессы шахтной подъемной установки с двигателем постоянного тока // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – С.36-44.
4. Соловьев В.С. Шахтные подъемные установки: учеб. пособие. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2006. – 82 с.
5. Трифанов Г.Д., Зверев В.Ю., Бут С.А. Возможности увеличения производительности эксплуатируемых скиповых подъемных установок калийных рудников // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 9 (127). – С. 3–8.

УДК 622.331.002.5

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РЕЗЦОВ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ
ПОГРЕБЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ****Д.С. Юсов¹, П.В. Иванова¹, С.Л. Иванов¹**¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена исследованию процесса резания погребённых древесных включений при фрезерной добыче торфа, являющихся основным фактором, ограничивающим эффективность работы оборудования из-за возникновения переменных нагрузок. В работе проанализированы физико-механические свойства древесины в зависимости от её влажности и направления волокон. Экспериментальным путём на копре с использованием резцов различной геометрии оценено влияние угла резания и ширины режущей кромки на усилие резания и износостойкость инструмента. Установлено, что углы резания менее 25° приводят к выкрашиванию кромки, а углы свыше 40° вызывают рост коэффициента сопротивления вследствие увеличения работы деформации и сил трения. Обоснован рациональный диапазон угла резания (50–60°), обеспечивающий баланс между прочностью режущего элемента и энергозатратами. Также подтверждена прямая пропорциональная зависимость усилия резания от ширины срезаемого слоя. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании рабочих органов фрезерных машин для повышения их долговечности, энергоэффективности и производительности на месторождениях с высоким содержанием древесных включений.

Ключевые слова: фрезерная добыча торфа, погребённая древесина, геометрия резца, угол резания, усилие резания, оптимизация технологического процесса.

EVALUATION OF PARAMETERS OF CUTTERS FOR MILLING BURIED WOOD**D.S. Yusov, P.V. Ivanova, S.L. Ivanov**

The paper investigates the cutting process of buried wood inclusions during milled peat extraction, which represents the primary factor limiting equipment efficiency due to variable load generation. The physico-mechanical properties of bog wood were analyzed with respect to moisture content and fiber orientation. Experimental studies conducted using a testing stand with cutting tools of various geometries evaluated the effects of cutting angle and cutting edge width on cutting force and tool wear resistance. It was established that cutting angles below 25° lead to edge chipping, while angles exceeding 40° cause an increase in the resistance coefficient due to enhanced chip deformation work and friction forces. An optimal cutting angle range of 50–60° was substantiated, providing a balance between cutting element strength and energy consumption. A direct proportional relationship between cutting force and the width of the cut layer was also confirmed. The obtained results can be applied in the design of working organs for milling machines to improve their durability, energy efficiency, and productivity in deposits with high content of wood inclusions.

Keywords: milled peat extraction, buried wood, tool geometry, cutting angle, cutting force, technological process optimization.

Введение

Технологическое развитие торфяной промышленности в значительной мере связано с модернизацией оборудования и оптимизацией процессов добычи, особенно при использовании фрезерного способа. Этот метод применяется как на низинных, так и на верховых месторождениях и предполагает сплошное фрезерование торфяного пласта. Однако его эффектив-

ность ограничивается наличием в залежах погребённых древесных включений, которые при контакте с фрезерным барабаном вызывают резкие переменные нагрузки на рабочие органы.

Методология исследования

Недостаточная изученность процесса резания древесных включений затрудняет обоснованный выбор геометрических параметров режущих элементов и рациональных режимов их работы [1]. В связи с этим особую актуальность приобретает исследование физико-механических свойств погребённой древесины. Так, например, временное сопротивление сжатию вдоль волокон у болотной древесины составляет 150–190 кг/см² при относительной влажности 59–65 %, 165–200 кг/см² – при влажности около 25 % и достигает 400–500 кг/см² в абсолютно сухом состоянии [2]. При этом следует учитывать, что в естественных условиях залегания влажность древесных включений, как правило, на 10–12 % ниже влажности окружающего торфа [3].

В рамках исследования оценивалось влияние таких параметров, как угол резания, ширина режущей кромки и общая геометрия резца, на эффективность процесса резания. Эксперименты проводились на копре с использованием набора специально подготовленных резцов различной геометрии.

Одним из ключевых факторов, определяющих сопротивление резанию, является волокнистая структура древесины [4]. Анализ результатов показал, что при увеличении угла резания свыше 40° наблюдается рост коэффициента сопротивления. Это объясняется возрастанием работы, затрачиваемой на деформацию стружки, а также увеличением силы трения на передней поверхности резца вследствие повышения давления со стороны формируемой стружки. В то же время при углах менее 25° отмечается снижение эффективности резания, обусловленное недостаточной прочностью режущей кромки, что проявляется в виде выкрашивания. Подобное явление, хотя и в меньшей степени, сохраняется и при углах до 50°. Таким образом, рациональный диапазон угла резания для данных условий составляет 50–60°.

Ширина резца, как один из основных геометрических параметров, напрямую влияет на площадь срезаемого слоя и, соответственно, на величину усилия резания. В ходе экспериментов использовался прямой резец с прямоугольной режущей кромкой [5]. Установлено, что при резании погребённой древесины – как вдоль, так и поперёк волокон, а также в торцевом направлении – усилие резания пропорционально возрастает с увеличением ширины среза.

Заключение

Полученные данные могут быть положены в основу проектирования режущих органов для фрезерных машин, эксплуатируемых на торфяных месторождениях с высоким содержанием древесных включений. Рациональный подбор геометрических параметров резцов позволяет не только повысить их долговечность, но и существенно улучшить энергоэффективность и производительность технологического процесса.

Список литературы

1. Фомин К.В. Расчет взаимных спектральных плотностей моментов сопротивления на рабочих органах торфяного фрезерующего агрегата // Записки Горного института. 2021. – Т. 251. – С. 745-756. – DOI:10.31897/PMI.2021.5.14
2. Михайлов А.В., Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Особенности размещения модуля измельчения при внутрикарьерной переработке торфяного сырья // Горная промышленность. 2024– №5 – С.94–100. DOI:10.30686/1609-9192-2024-5-94-100.
3. Аксенов В.В., Садовец В.Ю., Пашков Д.А., Захаров А.Ю. Влияние формы режущей кромки на силу резания ножевым исполнительным органом // Горное оборудование и электромеханика. 2020. – № 1 (147). – С. 30–36. DOI:10.26730/1816-4528-2020-1-30-36
4. К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов // Горные науки и технологии. 2022. – Т.7; №2. – С. 161-169. – DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-161-169.
5. Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Систематизация рабочих органов машин глубокого фрезерования. Горная промышленность. 2024;(3):85–89. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-85-89>

УДК 621.879

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКСКАВАТОРОВ

К.М. Исаев¹, аспирант, **В.С. Шестаков¹**, проф., канд. техн. наук

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Проведен анализ современных тенденций и перспектив развития карьерных экскаваторов, применяемых при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. В работе рассмотрены особенности механизмов и рабочего оборудования экскаваторов. Выполнен анализ существующих решений, направленных на повышение износостойкости, надежности и безопасности эксплуатации экскаваторов. Выявлены основные направления совершенствования конструкций экскаваторов с учетом применения современных расчетных методов и новых инженерных решений.

Ключевые слова: экскаваторы, рабочее оборудование, ковш экскаватора, механизм поворота, опорно-поворотное устройство, износостойкость, безопасность эксплуатации.

TRENDS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF EXCAVATORS

K.M. Isaev, V.S. Shestakov

The analysis of current trends and prospects for the development of quarry excavators used in the open-pit mining of mineral deposits is carried out. The paper considers the features of the mechanisms and working equipment of excavators. The analysis of existing solutions aimed at improving the wear resistance, reliability and safety of excavators is carried out. The main directions of improving excavator designs have been identified, taking into account the use of modern calculation methods and new engineering solutions.

Keywords: excavators, working equipment, excavator bucket, turning mechanism, pivoting device, wear resistance, safety of operation.

Введение. Экскаваторы – это выемочно-погрузочное оборудование, широко применяемое при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Анализ современного состояния парка карьерных экскаваторов в Российской Федерации показывает преобладание одноковшовых гу-

сеничных машин с электромеханическим приводом типа ЭКГ (рис. 1). Значительная часть таких машин эксплуатируется в условиях, приводящих к быстрому износу деталей и узлов. Большие объёмы горных работ, их сложность и повышенные требования к безотказности техники побуждают инженеров искать новые подходы – совершенствовать устройство экскаваторов и методы их технического обслуживания [1].

Одним из наиболее нагруженных элементов экскаватора является ковш. Анализ эксплуатационного износа ковшей карьерных экскаваторов показывает, что наиболее сильно повреждаются их контактные зоны с горной породой – зубья, днище и боковые стенки. Исследование, направленное на изучение причин износа ковша экскаватора, показывает, что защитить наиболее слабо защищенные участки можно с помощью футеровки и добиться тем самым увеличения срока службы ковша и снижения частоты его замены [2].

Развитие этого направления дополняется исследованиями, посвященными повышению износостойкости зубьев. Испытание наплавочных материалов в условиях мерзлых и абразивных грунтов показывает, что применение специализированных порошковых проволок в значительной степени увеличивает срок работы зубьев ковша [3].

Еще одно перспективное направление – применение новой конструкции ковша с четырьмя рычагами поворота козырька (рис. 2), что способствует расширению технологических возможностей копания и защищает гидромеханизмы от повреждений крупнообломочными породами. Такое решение отражает тенденцию на повышение функциональности рабочего оборудования без значительного увеличения их массы [4].

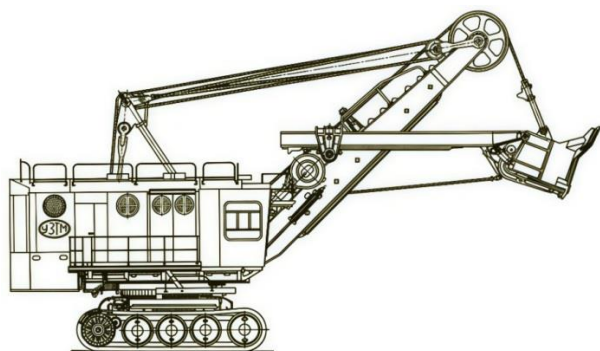


Рис. 1. Экскаватор карьерный гусеничный

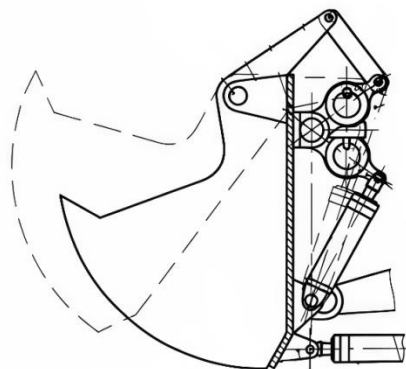


Рис. 2. Ковш с четырьмя одноплечими рычагами поворота козырька

Современные требования к безопасности и ремонтпригодности карьерных экскаваторов обуславливают необходимость совершенствования вспомогательных узлов, применяемых при обслуживании техники. Для достижения этой цели предложен кронштейн для подъема поворотной платформы экскаватора, конструкция которого обеспечивает повышение жесткости и исключает перекося под нагрузкой за счет С-образной формы корпуса. Такое решение позволяет устранить недостатки присущие известным аналогам, а именно недостатки, связанные с зазорами и подвижными со-

единениями, и в то же время отвечает очень актуальной потребности – повышению эксплуатационной безопасности [5].

Поворотный механизм карьерного экскаватора – один из наиболее ответственных узлов машины, на котором сосредоточены большие нагрузки и от которого зависит надежность работы всей машины. Проведенный анализ существующих опорно-поворотных устройств показывает, что существующие механизмы поворота обладают сложностью конструкции и высокими потерями энергии на трение, что приводит к ускоренному износу и снижению коэффициента полезного действия. Современные направления развития механизма поворота ориентированы на снижение трения и повышение ресурса узла за счет применения новых материалов и инженерных решений, обеспечивающих более устойчивую и эффективную эксплуатацию экскаваторов [6].

Существенное влияние на надежность и экономичность экскаватора оказывает рабочее оборудование – стрела и рукоять. Современные методики расчета прочности с применением программ для анализа методом конечных элементов ANSYS или иных схожих по функционалу программ позволяют учитывать большое количество режимов работы и выявлять концентрации напряжений в наиболее нагруженных зонах. Это позволяет проектировать конструкции с оптимальным соотношением массы и прочности [7].

В существующих патентах учтено демпфирование динамических нагрузок. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора с упруго-демпфирующим механизмом позволяет сократить колебания верхней части стрелы, повысить долговечность узлов и сократить простои при их техническом обслуживании [8].

Современные тенденции развития экскаваторов невозможно рассматривать без учета человеческого фактора. Ограниченная обзорность из кабины машиниста существенно снижает безопасность и эффективность работы. Исследования показывают, что оптимизация конструкции кабины, увеличение площади остекления и внедрение систем кругового обзора и датчиков препятствий позволяют снизить аварийность и повысить производительность труда. В перспективе данные решения интегрируются с цифровыми системами управления и мониторинга [9].

Вывод. Анализ научных публикаций и патентных разработок показывает, что развитие экскаваторов осуществляется по нескольким взаимосвязанным направлениям: повышение износостойкости рабочего оборудования, совершенствование конструкций и механизмов, оптимизация рабочего оборудования с применением численного моделирования, а также улучшение эргономики и безопасности. Использование современных методов расчета и технических решений позволяет повысить надежность, производительность и экономичность экскаваторов. В перспективе дальнейшее развитие будет связано с внедрением интеллектуальных систем управления, цифровых двойников и новых материалов, что обеспечит устойчивое развитие экскаваторов в условиях усложняющихся производственных задач.

Список литературы

1. Анализ структуры и надежности современного парка карьерных экскаваторов / П. В. Иванова, С. А. Асонов, С. Л. Иванов, С. Ю. Кувшинкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 7. – С. 51-57. – EDN YTSRNX.
2. Эргашбаев, М. Д. у. Анализ износа ковша карьерного экскаватора для дальнейшей футеровки и повышение ресурса ковша карьерного экскаватора / М. Д. у. Эргашбаев, Н. М. у. Эрматов // Современные тенденции и инновации в науке и производстве : Материалы XIII международной научно-технической конференции, Междуреченск, 24 апреля 2024 года. – Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – EDN XNVRPR.
3. Фетисов, А. О. Повышение износостойкости зубьев одноковшового экскаватора в условиях рыхления мёрзлых грунтов при пониженных температурах / А. О. Фетисов // Материалы 80-й студенческой научной конференции : Сборник докладов, Брянск, 17–21 марта 2025 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2025. – С. 91-96. – EDN JDELAS.
4. Патент № 2787228 С1 Российская Федерация, МПК E02F 3/40. Ковш экскаватора : № 2022103620 : заявл. 11.02.2022: опубл. 30.12.2022 / Д. А. Васильев, С. А. Шемякин, А. Ю. Чебан; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тихоокеанский государственный университет".
5. Патент № 2845406 С1 Российская Федерация, МПК F16B 1/00, B60S 9/00, E02F 3/36. Кронштейн для подъема поворотной платформы экскаватора : заявл. 03.03.2025 : опубл. 18.08.2025 / А. А. Рудоминский, А. Н. Степанчев ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "ИРМАШ". – EDN AMIXAQ.
6. Логиновских, Д. С. Особенности механизма поворота карьерного экскаватора / Д. С. Логиновских, Ю. А. Лагунова // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 15 декабря 2023 года. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. – С. 221-225. – EDN RUPOLM.
7. Прочность рабочего оборудования карьерного экскаватора / А. Н. Костюкович, М. И. Лашук, И. А. Балацун, Н. И. Костюкович // Актуальные вопросы машиноведения. – 2023. – Т. 12. – С. 173-176. – EDN SGNNXD.
8. Патент № 2779865 С1 Российская Федерация, МПК E02F 3/28. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора : № 2022105530 : заявл. 02.03.2022 : опубл. 14.09.2022 / Н. К. Кузнецов, И. А. Иов, Е. С. Долгих, А. А. Иов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет". – EDN QPYWYT.
9. Седошенко, А. М. Улучшение обзорности кабины машиниста карьерного экскаватора / А. М. Седошенко, Ю. А. Лагунова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 149-151. – EDN TMGKFQ.

УДК 621.86/.87

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПОРЦИЙ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА BUCYRUS 495HD

И.А. Иов^{1,3}, канд. техн. наук, И.В. Зырянов^{1,2}, д-р техн. наук, проф.,
Н.К. Кузнецов¹, д-р техн. наук, проф.

¹ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
г. Иркутск, РФ

²ФГАОУ ВО «Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального
университета им. М. К. Аммосова», г. Мирный, РФ

³ПАО «Уралмашзавод», г. Екатеринбург, РФ

Выполнен расчет комплексного значения вурфа рабочего оборудования карьерного экскаватора Bucyrus 495HD. Определены максимальные и минимальные действительные значения, располагающиеся на границе рабочей зоны, с локальным минимумом при положении ковша для зачистки забоя. Показана связь диапазона изменения действительной величины вурфа при средних положениях ковша со значениями этих величин, характерных для биомеханических манипуляционных систем высших позвоночных. Полученные результаты указывают на возможность использования комплексного вурфа для синтеза геометрических параметров рабочего оборудования карьерных экскаваторов, при которых обеспечивается максимальная эффективность его функционирования.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, рабочее оборудование, пропорции, комплексная плоскость, вурф.

STUDY OF THE PROPORTIONS OF THE WORKING EQUIPMENT OF THE BUCYRUS 495HD MECHANICAL SHOVEL

I.A. Iov, I.V. Zyranov, N.K. Kuznetsov

A calculation of the complex wurf of the working equipment of the Bucyrus 495HD mining excavator was performed. Maximum and minimum values located at the boundary of the working zone were determined, with a local minimum at the bucket position for face cleaning. A relationship was demonstrated between the range of variation of the actual wurf at average bucket positions and the values of these quantities characteristic of the biomechanical manipulation systems of higher vertebrates. The obtained results indicate the possibility of using the wurf to synthesize the geometric parameters of the working equipment that ensure maximum operational efficiency.

Keywords: mining excavator, working equipment, proportion, complex plane, wurf.

Введение. Эффективность функционирования рабочего оборудования механических карьерных экскаваторов определяется совокупностью геометрических, кинематических и динамических характеристик, а также качеством управления. Величина реализуемых значений скорости, усилия на зубьях ковша и частоты собственных колебаний механической системы определяются, преимущественно, геометрическими параметрами рабочего оборудования, выбор и обоснование которых является одной из главных задач при проектировании машины и не имеет однозначного решения [1]. В результате, облик машины формируется в процессе поиска некоторого «оптимального решения» на основе опыта создания различных схем рабочего оборудования, в равной мере удовлетворяющего противоречивым требованиям, предъявляемым к конструкции.

Преодоление указанных трудностей возможно при обращении к опыту Природы, успешно решающей подобные задачи в биомеханических манипуляционных системах высших позвоночных [2]. Конструкции рабочего оборудования экскаваторов мехлопат с электрическим приводом могут быть приведены к эквивалентному трехзвенному манипулятору, который, в свою очередь, оказывается близок к трехзвенным биомеханическим системам, и, в частности, к руке человека [3,4], исследование которой показывает наличие некоторых устойчивых соотношений длин кинематических звеньев или пропорций, при которых реализуется максимальная функциональная эффективность [5]. Учитывая, что движение рабочего оборудования связано с непрерывным изменением пространственного положения звеньев, определение пропорций целесообразно производить в комплексной системе координат, как показано в [6] на примере движений конечностей высших позвоночных.

В работе исследованы пропорции рабочего оборудования карьерного экскаватора с прямой механической лопатой в комплексной системе координат и показана их взаимосвязь с биомеханикой конечностей высших позвоночных.

Объектом исследования выбрано рабочее оборудование карьерного экскаватора Bucyrus 495HD с вместимостью ковша 41 м^3 , которые эксплуатируются на АО «Разрез Тугнуйский» в республике Бурятия.

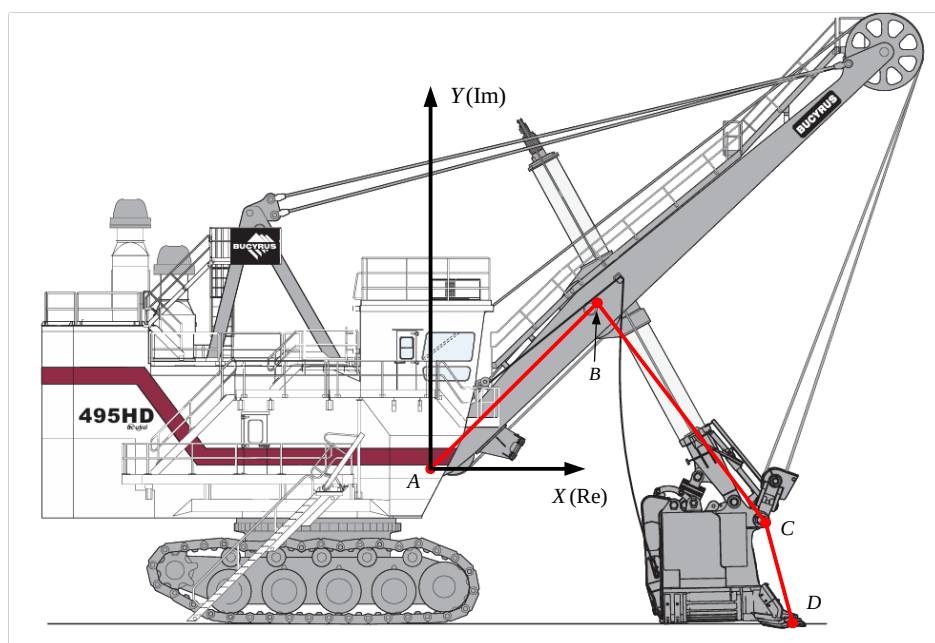


Рис. 1. Расчетная схема определения комплексных координат

Выбор этой модели обусловлен следующими факторами. Во-первых, предварительный расчет пропорций линейных размеров трехзвенного механизма рабочего оборудования этого экскаватора показал близость полученных значений к пропорциям руки человека. Во-вторых, этой машине принадлежит мировой рекорд по производительности в своем классе грузоподъемности [7].

Расчетная схема определения комплексных координат по линейным размерам звеньев приведена на рис. 1. Геометрические размеры трехзвен-

ной манипуляционной системы рабочего оборудования a , b и c измерялись по точкам вращения и приложения усилий.

Одной из форм симметрии трехзвенных кинематических блоков биомеханических систем является значение вурфа W или положение четырех точек на одной прямой. В случае пространственного движения величина W приобретает комплексный вид [6], и при условии расположения первого звена трехзвенника в начале координат ($X_A = Y_A = 0$) определяется следующей формулой

$$W_k = \frac{[X_C(X_D - X_B) + Y_C(Y_B - Y_D)] + j[X_C(Y_D - Y_B) + Y_C(X_D - X_B)]}{[X_D(X_C - X_B) + Y_D(Y_B - Y_C)] + j[Y_D(X_C - X_B) + X_D(Y_C - Y_B)]}, \quad (1)$$

в которой X_i и Y_i проекции точек на соответствующие оси системы координат, размещенной на оси вращения пят стрелы.

На основании формулы (1) были определены комплексные значения вурфа W_k , с делением на действительную и мнимую части. Значения действительной составляющей $W_k(\text{Re})$ показаны на рис. 2.

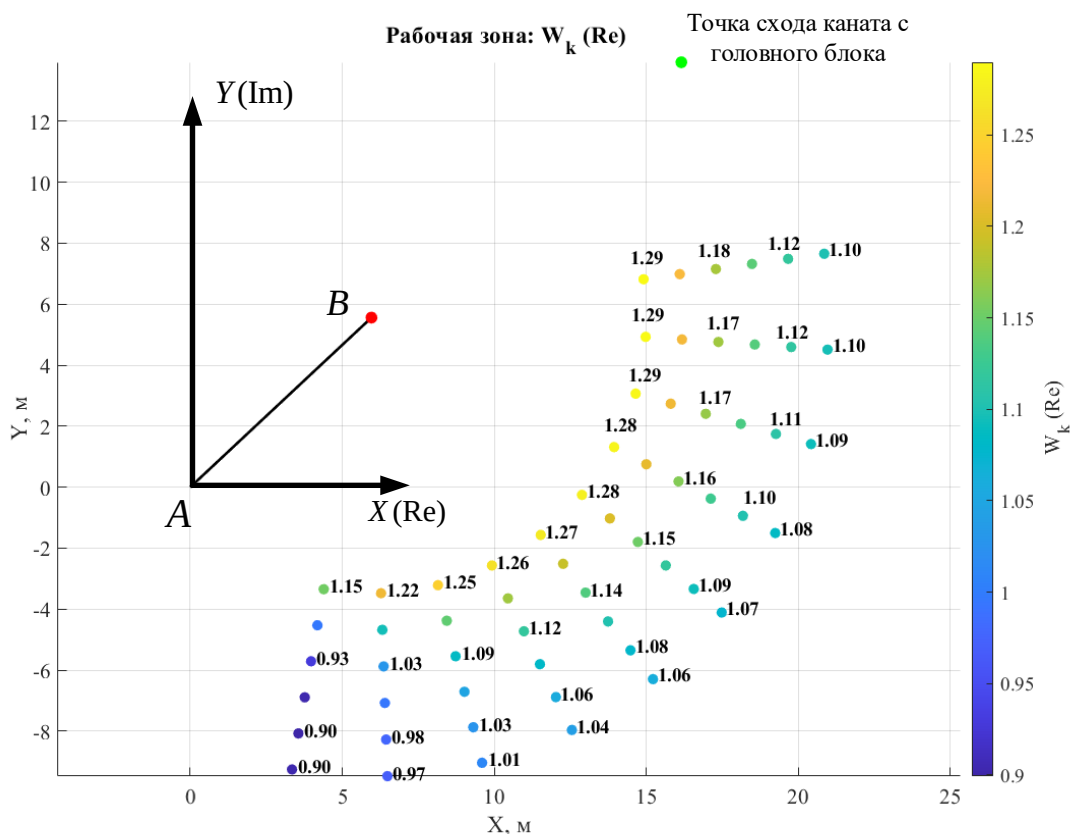


Рис. 2. Действительная составляющая $W_k(\text{Re})$ рабочей зоны

Установлено, что минимальные и максимальные значения $W_k(\text{Re})$ достигаются преимущественно на границе рабочей зоны экскаватора; при этом, минимум соответствует максимальному вылету рабочего оборудования, с наименьшими величинами при положении ковша для зачистки забоя перед экскаватором. Максимум $W_k(\text{Re})$ располагается на границе рабочей

зоны при минимальном вылете рукояти и линейно убывает по мере ее выдвижения. Следует подчеркнуть, что диапазон $W_k(Re) = 1,29...1,12$ реализуются в середине рабочей зоны, и характерен для нижней границы значений, встречаемых у биомеханических манипуляционных систем высших позвоночных [6].

Заключение. Исследование пропорций рабочего оборудования карьерного экскаватора Bucyrus 495HD в комплексной системе координат позволило установить максимальные значения действительной составляющей вурфа, реализующейся при минимальном вылете рабочего оборудования с последующим убыванием при выдвижении рукояти, и наименьшими значениями в позиции ковша для зачистки забоя. Показана близость диапазона изменения вурфа в функции выдвижения рукояти к нижней границе значений, распространенных в биомеханических манипуляционных системах высших позвоночных. Полученные результаты указывают на возможность использования комплексного вурфа для синтеза геометрических параметров рабочего оборудования, при которых обеспечивается максимальная эффективность его функционирования.

Список литературы

1. Горное оборудование Уралмашзавода/ Коллектив авторов. Ответственный редактор составитель Г.Х. Бойко. Екатеринбург: «Уральский рабочий». 2003. 240 с.
2. Бернштейн Н.А. Биомеханика и физиология движений: Изб-е психологические труды/ Под ред. В.П. Зинченко. – 2-е изд., – М.: Изд-во МПСИ; Воронеж: Изд-во НПО «МОДЭК», 2004. – 688 с.
3. Побегайло П. А. Биомеханика, геометрии и рабочее оборудование одноковшовых гидравлических экскаваторов / П. А. Побегайло // Технол. Оборуд. для горной и нефтегаз. пром.: сб. тр. XIV международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», Екатеринбург, 07–08 апреля 2016 года / Лагунова Юлия Андреевна (отв. ред.). – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 118-123.
4. Певзнер Л. Д. Математическая модель динамики карьерного экскаватора как объекта управления / Л. Д. Певзнер, С. Е. Бабаков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 249-252.
5. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории. – М.: Наука, 1985. – 344 с.
6. Петухов С.В. Биомеханика, бионика и симметрия. М.: Наука, 1981. – 240 с.
7. Анистратов К.Ю. (ред.). Открытые горные работы - XXI век. Справочник. М.: ООО "Система максимум"; 2019. Т. 2. 872 с.

УДК 622.5

УВЕЛИЧЕНИЕ НАРАБОТКИ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОПНИЖАЮЩИХ СКВАЖИН

В. К. Картавец¹, аспирант, **М. О. Говорливых¹**, студент, **Н. К. Кинетов¹**, студент
Научный руководитель: **Д. И. Шишлянников¹**, д-р техн. наук, доцент, профессор
¹ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Рассмотрены особенности функционирования насосного оборудования в условиях водопонижающих скважин горных предприятий. Установлено, что основными причинами отказов погружных электроцентробежных насосов являются гидроабразивный износ и заклинивание подшипниковых опор, обусловленные высоким содержанием механических примесей в скважинной жидкости. Указывается, что наиболее простым и доступным решением является включение входных фильтров в состав насосных установок. Отмечено, что серийные фильтры обладают малой грязеемкостью и, соответственно, малой наработкой. Предложены технические решения, позволяющие устранить указанный недостаток.

Ключевые слова: водопонижение, электроцентробежный насос, механические примеси, фильтр, грязеемкость, удлинитель колонны НКТ, самоочистка

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0005)

INCREASING OF OPERATING TIME OF PUMPING EQUIPMENT OF WATER- LOWERING WELLS

Vadim K. Kartavtsev, Mihail O. Govorlivyh, Nurlan K. Kinetov,
Scientific supervisor: **Dmitrij I. Shishlyannikov**

Characteristics of pumping equipment operating in mining enterprise water-lowering well conditions are considered. It's established that main failure reasons of electrical-centrifugal submersible pumps are hydro-abrasive wear and jamming of bearings, what caused by high concentration of mechanical impurities in well liquid. It's noted that most available solution is including of input filters in pumping installation structure. It's pointed that serial filters have unsatisfactory dirt holding capacity. It's reason of low operating time of filters. The technical solutions which allows remove the pointed disadvantages are proposed.

Keywords: water lowering, electrical-centrifugal submersible pump, mechanical impurities, filter, dirt holding capacity, extender of lifting pipe column, self-cleaning

Acknowledgments: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSNM-2024-0005)

В России и за рубежом более половины полезных ископаемых добывается открытым способом разработки. Открытая разработка осложняется обильным водопритоком в горные выработки, величина которого существенно изменяется в течение года и имеет сезонный характер [1]. Обводненность бортов карьеров и разрезов обуславливает снижение эффективности и безопасности добычи. В связи с этим необходимы дренажные мероприятия, среди которых широко распространено сооружение систем водопонижающих скважин (ВПС). Основным преимуществом систем ВПС является простота и скорость строительства, введения в эксплуатацию и вывода из неё скважин.

Эксплуатация водопонижающих скважин осуществляется установками электроцентробежных насосов водяных (УЭЦВ). Откачиваемая ЭЦВ жидкость содержит в себе механические примеси (частицы горных пород), причиной выноса которых может быть, как режим работы насосной уста-

новки, так и суффозионные явления в прифилтровой зоне скважины [2]. Это обуславливает малую наработку насосного оборудования (НО), которая в условиях высокой концентрации механических примесей в перекачиваемой жидкости, согласно данным [3], не превышает 60 суток. Таким образом, актуальной задачей является повышение наработки насосного оборудования водопонижающих скважин.

Простым и доступным решением указанной задачи считается включение в компоновку УЭЦВ входного каркасно-стержневого фильтра [4]. Однако серийные фильтры обладают ограниченной грязеемкостью. Для устранения указанного недостатка, авторами предлагаются следующие технические решения (рисунок 1) – входной самоочищающийся фильтр ЭЦВ [5] и удлинитель колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) [6], устанавливаемый над ЭЦВ.

Предложенные устройства функционируют в составе УЭЦВ следующим образом. При запуске насоса внутри удлинителя (рис. 1, б) создается избыточное давление, в результате чего его шток 15 занимает рабочее положение, при этом фильтр (рис. 1, а) и насос перемещаются вглубь скважины на некоторую величину. Далее, в таком положении осуществляется эксплуатация скважины, до момента засорения фильтра. При выявлении засорения фильтра оператор скважины кратковременно увеличивает давление на выкиде насоса, например, с помощью регулируемого дросселя на устье. За счет этого, возрастает гидравлическое усилие на поршне 16, обеспечивается сжатие упругого элемента 19 и выдвижение штока 15, в результате чего осуществляется перемещение фильтра вглубь скважины на требуемую величину.

При возвращении давления на выкиде насоса до исходного значения, происходит обратный процесс – шток 15 втягивается и перемещает фильтр в сторону устья скважины. При этом, за счет манжеты 5 подвижный упор 4 перемещается с запаздыванием, относительно всего фильтра, благодаря чему происходит растяжение соединенного с ним фильтрэлемента грубой очистки 8. За счет этого происходит, как регенерация фильтрэлемента грубой очистки 8, в результате кратковременного увеличения размера фильтровых щелей, так и фильтрэлемента тонкой очистки 7, ввиду контакта его поверхности с витками фильтрэлемента 8. Фильтрэлемент 8 принимает исходное положение после регенерации за счет возвратной пружины 9.

Предложенные решения позволяют обеспечить увеличение грязеемкости входного фильтра ЭЦВ и, соответственно, долговременную защиту НО ВПС от механических примесей, тем самым повышая его наработку.

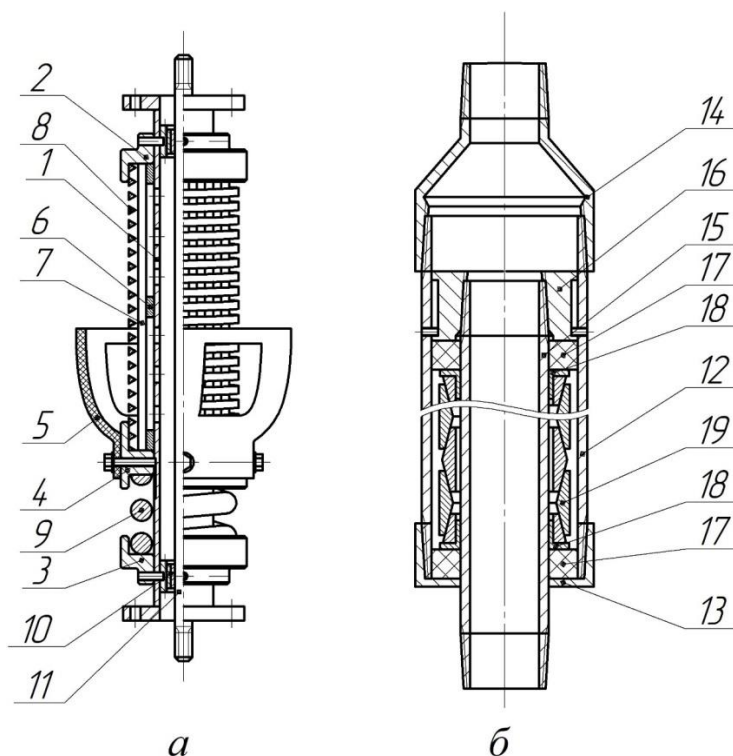


Рисунок 1 – Предлагаемые устройства:

а – самоочищающийся фильтр; б – удлинитель колонны НКТ;

1 – фильтровая труба; 2, 3 – неподвижные упоры; 4 – подвижный упор; 5 – манжета; 6 – каркасные кольца; 7, 8 – фильтрыэлементы тонкой и грубой очистки соответственно; 9 – возвратная пружина; 10 – радиальные подшипниковые опоры; 11 – вал; 12 – корпус; 13 – торцевая крышка; 14 – переводник; 15 – шток; 16 – поршень; 17 – уплотнения штока; 18 – опорно-центрирующие шайбы; 19 – упругий элемент (кольцевая пружина)

Список литературы

1. Гузеев А. А. Обоснование технологии экскаваторной разработки обводненных месторождений: монография / А. А. Гузеев, В. Е. Кисляков, Р. З. Нафиков. – Красноярск: СФУ, 2017. – 164 с.
2. Атрощенко Ф. Г. Опыт эксплуатации водопонижающих скважин при открытой разработке алмазонасных трубок месторождения им. М.В. Ломоносова / Ф.Г. Атрощенко, И. Э. Шкиль // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 1. – С. 25-32.
3. Крутиков И. А. Модернизация погружного насосного оборудования с целью повышения энергоэффективности на месторождении алмазов им. В.Гриба // Актуальные проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктических территорий России: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Архангельск, 17–18 окт. 2024 г. – Архангельск: САФУ им. М.В. Ломоносова, 2024. – С. 69-74.
4. Аксенова Н. А. Технология и технические средства заканчивания скважин с неустойчивыми коллекторами: монография / Н. А. Аксенова, В. П. Овчинников, А. Е. Анашкина. — Тюмень: ТИУ, 2018. – 134 с.
5. Патент № 232200 РФ, МПК E21B 43/08. Щелевой фильтр: № 2025101563: заявл. 27.01.2025; опубл. 28.02.2025, Бюл. № 7 / Д. И. Шишлянников, Ю. Г. Коротков, Д. А. Ситников [и др.]. – 9 л.
6. Патент № 2811050 РФ, МПК E21B 17/07. Удлинитель колонны насосно-компрессорных труб : № 2023107251 : заявл. 27.03.2023 : опубл. 10.01.2024, Бюл. № 1 / Д. И. Шишлянников, В. К. Картавцев, Д. И. Дремина [и др.]. – 12 л.

УДК 622.73

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА

А.В. Кожей, ст. преп., Д.С. Стожков, доц., Н.В. Шнайдер, доц.,
А.Е. Угольникова, преп.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург,

Выход из строя исполнительных органов проходческих комплексов до настоящего времени остаётся актуальной проблемой для рудников, которая не имеет однозначных решений и требует проведение более детальных исследований. Для рудников данная проблема прежде всего связана с постоянным увеличением затрат на ремонт и обслуживание проходческих комплексов, а также как следствие не выполнение производственного плана.

Ключевые слова: системы управления, магнитные станции, проходческий комбайн, исполнительный орган, горный массив.

TO THE QUESTION OF ANALYZING THE REASONS FOR THE FAILURE OF EXECUTIVE BODIES OF MINING MACHINES IN THE PROCESS OF DESTROYING A ROCK MASSIF

A.V. Kozhey, D.S. Stozhkov, N.V. Schneider, A.E. Ugolnikova

The failure of the executive bodies of the tunneling complexes still remains an urgent problem for mines, which does not have unambiguous solutions and requires more detailed research. For mines, this problem is primarily related to the constant increase in the cost of repair and maintenance of sinking complexes, as well as the failure to fulfill the production plan.

Keywords: control systems, magnetic stations, a tunneling combine, an executive body, a mountain range.

Практические исследования данного вопроса показывают, что на срок эксплуатации исполнительных органов проходческих комбайнов [1-2] прямое влияние могут оказывать следующие показатели:

– вид применяемой системы управления в магнитной станции комбайна [3-4];

– действие электрических защит;

– формы исполнения режущих органов и его назначение;

– способы подвода режущего органа к поверхности горного массива.

Цель работы – выполнить структуризацию полученных результатов практических исследования для последующей разработки системы (алгоритма) увеличения (сохранения) срока эксплуатации исполнительных органов проходческих комбайнов.

Для получения статистических данных был проведен сравнительный анализ выхода из строя исполнительных органов проходческих комбайнов и буровых станков [5].

В результате проведения сравнительного анализа было установлено, что применение однотипных систем управления на разных видах проходческих комбайнов имеет разную эффективность, что приводит к вопросу о целесообразности такого применения.

На рисунке 1 представлены данные о числе возникновения аналогичных неисправностей на разных типах горных машин, приведённые к 100 % общего числа случаев.

Также были получены данные о ненадёжности действия электрических защит, т.е. речь идёт не о полном отсутствии действия электрических защит, а о моменте, когда электрические защиты не позволяют обеспечить более точный контроль параметров работы исполнительных органов [6].

В результате практических исследований было установлено, что данный вопрос напрямую зависит от формы режущего органа и совершаемой им работы [7].

На рисунке 2 представлены основные методы взаимодействия исполнительного органа проходческого комбайна с горным массивом в случаях полного или частичного контакта поверхности режущего диска.

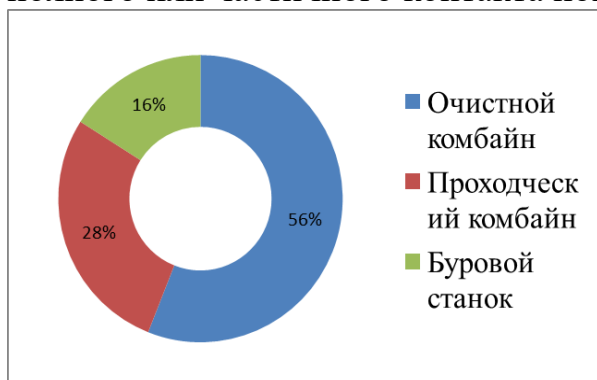


Рис. 1. Показатели числа выхода из строя электродвигателей исполнительных органов по причине отсутствия действия электрических защит

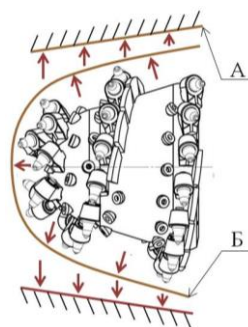


Рис. 2. Методы воздействия режущего органа проходческого комбайна на горный массив: А) частичный контакт; Б) полный контакт

После выполнения практических опытов было установлено, что эффективность работы электрических защит гораздо выше в случае полного контакта режущего диска с горным массивом [8].

Также удалось установить, что при настройке действия электрических защит в магнитной станции проходческого комбайна в одном из режимов работы режущего диска по отношению к контактной плоскости горного массива не исключает вероятность не срабатывания электрической защиты при переходе работы исполнительного органа в другой режим.

Решением по увеличению срока эксплуатации исполнительного органа [9] будет являться учёт дополнительных параметров при настройке уставок защитных блоков. Одним из параметров учёта может являться мощность электропривода, расходуемой на резание исполнительными органами от привода относительно движения, рассчитываемой по следующей формуле [10]:

$$N = \frac{Z_{p.p} \times P_z \times v_p}{1000 \times \eta_p \times \eta_{и.о.}}, \quad v_p = \frac{\pi \times D_d \times \omega_0}{60}$$

где P_z – сила резания; v_p – скорость резания, м/с; η_p , $\eta_{и.о.}$ – КПД редуктора и исполнительного органа; $Z_{p.p}$ – число резцов, одновременно участвующих в резании; D_d – диаметр исполнительного органа (диска) по резцам; ω_0 – частота относительного вращения исполнительного органа, об/мин.

В результате расчётов мы можем получить значения уставок электрических защит, позволяющих более точно производить контроль параметров работы исполнительных органов проходческих комбайнов. При практическом же применении есть вероятность получить обратный эффект т.е. есть способствовать выходу из строя механических и гидравлических частей комбайна. Этот эффект связан с особенностью работы систем управления и процессом эксплуатации комбайна.

Выводы:

1. Практические исследования принципов работы исполнительного органа проходческого комбайна показывают, что на работоспособность исполнительного органа оказывает прямое влияние форма и способ подачи режущего органа к горному массиву. В свою очередь на сохранение работоспособности исполнительного органа будет влиять корректность вводимых значений уставок электрических защит.

2. Несвершенство применяемых систем управления требуют более детального дополнительного изучения системы: электродвигатель – редуктор – режущий орган и принципы взаимодействия между системами проходческого комбайна для последующей организации и разработки методов повышения эффективности работы проходческих комплексов.

Список литературы

1. Бувеч В.В., Чекмасов Н.В., Шишляников Д.И., Габов В.В. Совершенствование исполнительных органов проходческо – очистных комбайнов «Урал» // Горный журнал, 2016. № 4. – С. 52-56.
2. Семенов В.В., Шмакин И.Г., Жабин А.Б., Чеботарев П.Н. Результаты сравнительных исследований исполнительных органов комбайнов «Мариятта-900А» и «Урал-20Р» // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 2. С. 11–16.
3. Фам Т.Л. Исследование информационно – измерительной и управляющей системы проходческого комбайна // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 9. – С. 46-50.
4. Хусинов Х.С., Хамракулов Б.Т.У. К вопросу проведения подготовительных выработок проходческими комбайнами в угольных шахтах. В сборнике: Современные тенденции и инновации в науке и производстве. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Т.Н. Гвоздкова (отв. редактор), С.О. Марков [и др.]. Междуреченск. 2023. С. 105.1-105.5.
5. Линник Ю.Н., Линник В.Ю., Жабин А.Б., Цих А. Закономерности влияния надежности исполнительных органов и свойств угольных пластов на производительность очистных комбайнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 169–180. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-11-0-169.
6. Шабаев О.Е., Семеченко А.К., Хиценко Н.В., Стадник Н.И. Экспериментальные исследования режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 10. С. 49–53.
7. Трифанов М.Г., Шишляников Д.И., Иванов С.Л. Оценка нагруженности приводов проходческо – очистных комбайнов «УРАЛ» в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 1. – С. 166–174. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-166-174.
8. Семенов В. В., Шмакин И. Г., Жабин А. Б., Чеботарев П. Н. Совершенствование метода расчета нагруженности резцов при разрушении калийных руд // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 4. С. 13–16.

9. Шишлянников Д. И. Обеспечение надежной работы и эффективного сервиса проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 7. С. 103–109. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-103-109.

10. Расчет эксплуатационных параметров проходческо очистных комбайнов для добычи калийных руд : метод. указания / сост. Н.В. Чекмасов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 31 с.

УДК 62-97/-98

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЭКСКАВИРОВАННОГО ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ ПОЛОЙ КОНИЧЕСКОЙ ФРЕЗОЙ С ПРОХОДНЫМИ НОЖАМИ

Г. С. Козачков¹, аспирант

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, РФ

Разработана методика проведения лабораторного эксперимента для исследования влияния количества ножей рабочего органа мобильного модуля измельчения и частоты его вращения на процесс резания экскавированного торфяного сырья с применением теории планирования эксперимента. Составлена схема лабораторного стенда для моделирования процесса резания экскавированного торфяного сырья полый конической фрезой с проходными ножами. Определено направление дальнейших исследований, заключающихся в разработке модели степени механической переработки торфяного сырья полый конической фрезой с проходными ножами.

Ключевые слова: торфяное сырье, полный факторный эксперимент, фрезерный барабан, мобильный модуль измельчения.

METHODOLOGY FOR EXPERIMENTAL STUDY OF PEAT FEEDSTOCK COM- MINUTION USING A HOLLOW CONICAL CUTTER WITH PASS-THROUGH BLADES

G. S. Kozachkov

This study presents an experimental methodology to investigate the influence of knife count and rotational speed of the mobile comminution module's cutting assembly on the processing of excavated peat feedstock, utilizing design of experiments (DoE) principles. A laboratory test rig was designed to simulate the cutting process employing a hollow conical milling cutter with through-cutting blades. Subsequent research will focus on developing a predictive model for the degree of mechanical comminution of peat feedstock using this cutter configuration.

Keywords: peat feedstock, full factorial experiment, milling drum, mobile comminution module.

Повышение энергоэффективности процесса добычи и качества подготовки экскавированного торфяного сырья, характеризующегося неоднородной структурой и наличием древесных включений является актуальной и значимой задачей для устойчивого развития горной отрасли. Существующие технологии измельчения часто не обеспечивают рационального соотношения производительности и затрат энергии, что требует разработки новых научно обоснованных технических решений.

Рабочий орган в виде полой конической фрезы с проходными ножами в составе мобильного модуля измельчения рационален для осуществления процесса резания, совмещенного со сдвиговым измельчением экскавированного торфяного сырья.

Для определения рациональных конструктивных и геометрических параметров полого фрезерного барабана с проходными ножами и схемы их расстановки на поверхности барабана на основе анализа научно-технической литературы, разработана методика проведения лабораторного эксперимента.

Исходными данными для проведения исследования является массив экскавированного торфяного сырья частично нарушенной структуры с определенными физико-механическими характеристиками [1].

Для моделирования процесса резания сырья разработана схема масштабной модели полого фрезерного конического барабана с проходными ножами диаметром равным 300 мм (рис. 1). На схеме предусмотрен приемный бункер для подачи натуральных образцов экскавированного торфяного сырья размеры которого обусловлены диаметром барабана, фрезерный барабан с расположенными на нем проходными ножами с возможностью изменения их количества от 1 до 10 штук. На схеме показано направление вращения барабана с частотой вращения n и стружка q_i поступающая через отверстия расположенные на поверхности барабана под проходными ножами [2].

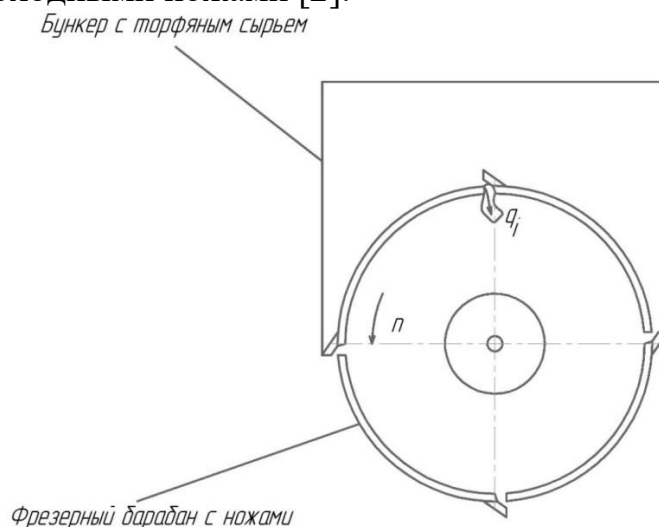


Рис. 1. Схема модели полого фрезерного конического барабана

Движение сырья в бункере-накопителе происходит под действием сил гравитации, и вертикальное давление является основным фактором, под действием которого формируется все поле давления на фрезерный барабан.

Вращение фрезерного барабана обеспечивается мотор-редуктором с мощностью двигателя 1,1 кВт и частотой вращения ротора $23,3 \text{ с}^{-1}$. Управление частотой вращения фрезерного барабана осуществляется через частотный регулятор типа – Hyundai N100 plus.

В целях снижения энергозатрат в процессе исследования с учетом времени и средств на проведение эксперимента за счет сокращения количества опытов был принят метод теории планирования эксперимента [3].

При этом за переменные факторы принимаются количество ножей N (шт.) и частота вращения фрезерного барабана n (с⁻¹)

Выбран полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 3^2 (9 опытов) для определения оптимального значения параметров внутри диапазона [3]. Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 1.

Таблица 1– Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_1	X_2	N , шт.	n , с ⁻¹
1	-1	-1	1	0.1
2	0	-1	5	0.1
3	+1	-1	10	0.1
4	-1	0	1	1.05
5	0	0	5	1.05
6	+1	0	10	1.05
7	-1	+1	1	2.0
8	0	+1	5	2.0
9	+1	+1	10	2.0

Опыты повторяются не менее 3 раз с постоянной продолжительностью по времени, затем фиксируется отклик Y – производительность кг/с и строится математическая модель в виде уравнения регрессии [3]

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2;$$

где $X_1, X_2, b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{12}, b_{22}$ – кодированные значения факторов и коэффициентов.

После получения уравнения в физических переменных возможно прогнозирование отклика при любых допустимых X_1 и X_2 , нахождение оптимума (через частные производные), построение поверхности отклика в привычных единицах измерения.

Вывод. Определение и обоснование рационального количества ножей на фрезерном барабане и частоты вращения барабана при проведении полного факторного эксперимента позволяет задать рациональную энергоэффективность мобильного модуля измельчения сырья для последующей разработки модели степени механической переработки торфяного сырья поллой конической фрезой с проходными ножами и определения суммарной степени механической переработки при заданной производительности и мощности фрезы.

Список литературы

1. Казаков Ю. А., Козачков Г. С. Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 12-3. — С. 85—99. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_85.
2. Патент № 232986 РФ. Фрезерный барабан для измельчения сырья / А. В. Михайлов, Ю. А. Казаков, Г. С. Козачков – Заявка №2025100813 от 17.01.2025; опубл. 31.03.2025, Бюл. №10.
3. Плохов И. В. Основы теории планирования эксперимента и ее приложения в электроприводе / И. В. Плохов – СПб: СПбГТУ, 2003. –126 с.

УДК 621.879.3, 622.271.4, 629.7.063.7

**О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ
ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕГЛАМЕНТОВ
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА
АВТОМАТИЧЕСКИХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ СМАЗКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ**

В.О. Колпаков¹, асп., **Д.А. Шибанов¹**, канд. техн. наук, доц.

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, РФ

Приведены результаты исследования влияния технического состояния автоматических централизованных систем смазки (АЦСС) на надежность электрических карьерных экскаваторов. Установлена прямая корреляция между работоспособностью АЦСС и частотой аварийных отказов. На основе анализа данных разработана структура регламента технического обслуживания и ремонта (ТОиР) АЦСС.

Ключевые слова: электрический карьерный экскаватор, автоматическая система смазки, АЦСС, аварийные отказы, техническое обслуживание и ремонт.

**ON THE NECESSITY OF DEVELOPING OPERATING-CONDITION-BASED
DIFFERENTIATED MAINTENANCE AND REPAIR REGULATIONS FOR
AUTOMATIC CENTRALIZED LUBRICATION SYSTEMS OF ELECTRIC MINING
EXCAVATORS**

V.O. Kolpakov, D.A. Shibanov

The results of a study on the impact of the technical condition of automatic centralized lubrication systems (ACLS) on the reliability of electric mining excavators are presented. A direct correlation between ACLS readiness and the frequency of emergency failures has been established. Based on the data analysis, a structure for an ACLS maintenance and repair (M&R) regulation has been developed.

Keywords: electric mining excavator, automatic lubrication system, centralized lubrication system, emergency failures, maintenance and repair.

Интенсивная эксплуатация электрических карьерных экскаваторов большой единичной мощности в условиях железорудных разрезов сопряжена тяжелыми условиями эксплуатации, вызывающими прогрессирующие повышение интенсивности изнашивания сопряжений, реализованных парами трения [1, 2]. В подобных условиях эффективность процесса смазывания становятся детерминирующими факторами для определения интенсивности расходования ресурса горной машины. Исследование существующих регламентов технического обслуживания на горнодобывающих предприятиях демонстрирует, что применяемые регламенты обслуживания систем смазки, сформированные на основе эмпирических данных, не учитывают вариативность реальных эксплуатационных параметров. Отсутствие алгоритмов адаптации режимов смазки к изменяющимся горно-геологическим условиям, изменяющимся нагрузкам и гранулометрическому составу горной массы после проведения буровзрывных работ приводит к нерациональному планированию сервисных работ, необоснованному расходованию смазочных материалов и повышению частоты аварийных отказов. Установленная причинно-следственная связь между количеством не-

работоспособных элементов автоматической централизованной системы смазки (АЦСС) и интенсивностью отказов свидетельствует о том, что нарушения в работе АЦСС выступают параметром снижения эксплуатационной производительности и росту операционных издержек [3–5]. Целью данной работы является повышение эксплуатационной готовности экскаваторов типа ЭКГ за счет разработки и внедрения оптимизированной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) систем АЦСС, основанной на адаптивном регламенте, обеспечивающем переход от ремонтов по факту отказа к планово-предупредительной модели.

Методологическую основу работы составил ретроспективный анализ эксплуатационной статистики отказов парка экскаваторов ЭКГ-20 в период 2024-2025 гг. на железорудном месторождении. Первичной причиной простоев, связанных с аварийными отказами (87-93 % от общего количества) являются аварийные отказы по механической части. Рассмотрены отказы, связанные с элементами седлового подшипника, который является ресурсоопределяющим узлом. Статистическая обработка данных показала, что хотя седловой подшипник является причиной каждого пятого отказа (21 %), он обуславливает почти треть (31 %) всех внеплановых простоев. Это указывает на наибольшую сложность и трудоемкость его ремонта среди всех узлов. Аналогичная, но еще более выраженная диспропорция наблюдается для опорно-поворотного устройства: при 11 % отказов на его ремонт уходит 34 % времени, что делает его самым продолжительным по времени восстановления. В то же время, такие узлы, как подвеска ковша, хотя и лидируют по частоте отказов (27 %), требуют сравнительно меньших затрат времени на ремонт (14 %), что говорит об их менее трудоемком ремонте. Прочие отказы имеют относительно невысокие показатели по отношению к упомянутым узлам как в количестве, так и в общем времени простоя.

Проведенные расчеты фактических объемов подачи смазочного материала, основанные на анализе реальных гидравлических схем и режимов работы насосов АЦСС, и их сопоставление с рекомендациями завода-изготовителя выявили системные расхождения по подаваемому объему (таблица 1). По большинству позиций наблюдается многократное превышение фактических объемов над регламентированными.

Дальнейшая оценка технического состояния АЦСС на исследуемых машинах выявила устойчивую статистическую зависимость между долей неработоспособных элементов и показателями эксплуатационной надежности горной машины. На Рисунке 2 графически представлена регрессионная зависимость доли времени, в аварийных простоях, от доли неработоспособных компонентов в составе АЦСС. Анализ кривой демонстрирует, что уже при незначительной деградации системы (рост доли неисправных элементов на 2 % в интервале 0–10 %) наблюдается практически двукратная увеличение продолжительности простоев.

Таблица 1 — Объем подачи смазочного материала в пару трения, рекомендуемый заводом-изготовителем и фактический за 8 часов работы, см³ (составлено автором)

Параметры	Объем подачи в точку, см ³	
	Рекомендуемый заводом	Фактический
Подшипники головных блоков	17,6	132
Напорная ось	17,6	300
Ось блока открывания днища ковша	35,2	0
Ролики седлового подшипника	17,6	48
Балка рукояти, боковая поверхность	0	72
Балка рукояти, верх	0	48

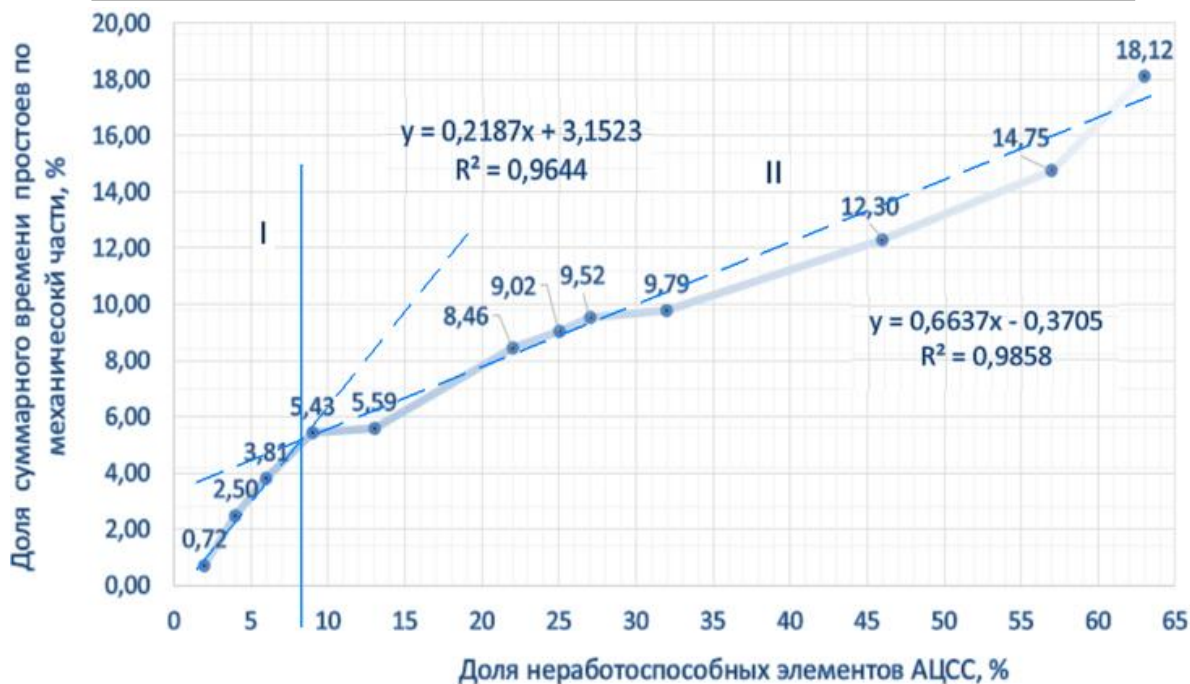


Рисунок 2 – Изменение доли суммарного времени простоев карьерных экскаваторов от доли неработоспособных элементов АЦСС за период 2024-2025 гг. (составлено автором)

Эмпирическим подтверждением зависимости выступили работы по восстановлению АЦСС седлового подшипника на одном из экскаваторов. Суммарная длительность простоев, связанных со стрелой и седловым подшипником, до проведения ремонтных мероприятий составляла 52,47 часа. После ввода в эксплуатацию горной машины с восстановленной системой смазки за сопоставимый хронологический период аналогичные простои сократились до 4,3 часов (Рисунок 3). Столь существенная положительная динамика при отсутствии иных изменений в эксплуатационной практике служит доказательством определяющего влияния функциональности АЦСС на ресурсный потенциал сопряжений, реализуемых парами трения.

Обнаруженная корреляция актуализировала задачу перехода от практики обслуживания по факту отказа к реализации регламентированной проактивной стратегии. В качестве системного решения для поддержания АЦСС в проектом состоянии разработана концепция и структура диффе-

ренцированного регламента ТОиР. Данный документ охватывает полный жизненный цикл сервисных операций: визуальный и инструментальный контроль, диагностику функциональных блоков, обслуживание подсистем подготовки и подачи смазки (пневмоблок, дозаторы, фильтры), сервис основных исполнительных модулей (насосные станции, распределители, магистрали), а также комплекс планово-предупредительных и капитальных ремонтных работ. Регламент предусматривает стратификацию операций по уровням технического сервиса (ежесменное обслуживание, ТО-1, ТО-2, плановый и капитальный ремонт), устанавливает нормативы трудоемкости и рекомендованный состав бригад. Такой подход обеспечивает синхронизацию графика обслуживания АЦСС с общим циклом ТОиР экскаватора, вводит процедуры нормирования и способствует точному планированию расхода ресурса электрического экскаватора.

Сравнение времени простоя с неработоспособной и восстановленной АЦСС

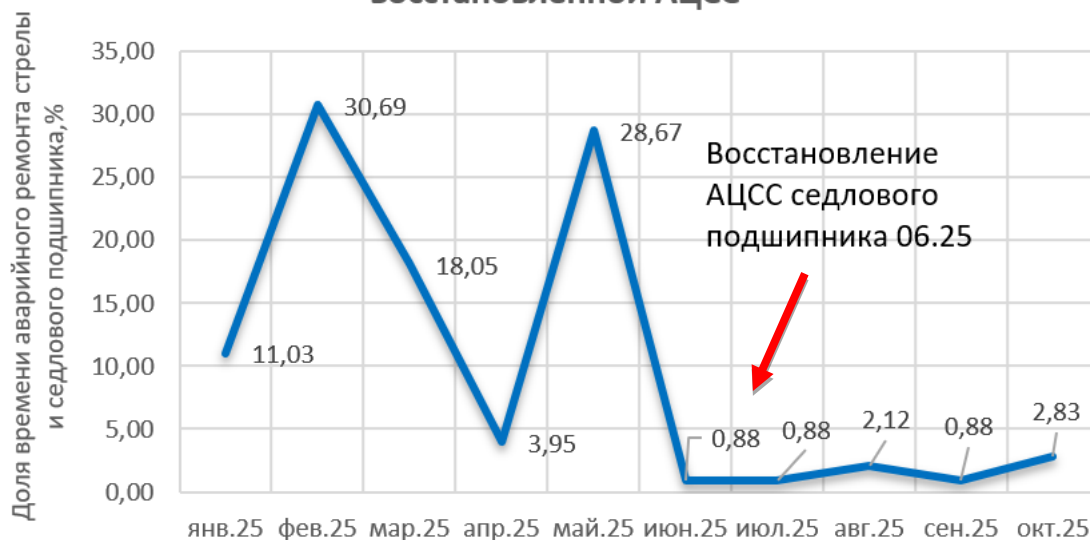


Рисунок 3 – Изменение доли времени простоев в ремонте рабочего оборудования по месяцам от суммарного времени в ремонте за период 01.25-10.25 г. (составлено автором)

Вывод. На основании проведенного анализа эксплуатационных данных статистически подтверждена прямая корреляционная зависимость между техническим состоянием автоматической централизованной системы смазки и уровнем аварийных отказов карьерных экскаваторов, в особенности их ресурсопределяющих узлов. В качестве практического механизма для нивелирования выявленных проблем и перехода на планово-предупредительную модель сервиса предложена и детально описана структура дифференцированного регламента ТОиР АЦСС. Внедрение данного регламента позволит структурировать регламент технического обслуживания, минимизировать нерациональное расходование смазочных материалов, сократить продолжительность внеплановых простоев, увеличить межремонтные интервалы и снизить совокупную стоимость владения электрическим карьерным экскаватором, тем самым существенно повысив его эксплуатационную надежность и экономическую эффективность.

Список литературы

1. Knyazkina, V.I., Ivanov, S. (2022). Improvement of the system of maintenance and repair of mining machines according to the actual state/ V.I. Knyazkina, S. Ivanov // Mining Informational and Analytical Bulletin, 6-2, 223-236. DOI: 10.25018/0236 1493 2022 62 0 223.
2. Агагена Абдельвахаб, Репкина К. С., Михайлов А. В. Корректировка регламента технического обслуживания карьерного гидравлического экскаватора на руднике Буха-дра / Абдельвахаб Агагена, К. С. Репкина, А. В. Михайлов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 146–151. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24–146–151
3. Колпаков В.О., Шибанов Д.А., Селезнев М.С., Хамидов О.У., Анализ функционирования систем централизованного смазывания узлов карьерных экскаваторов/ В.О. Колпаков, Д.А. Шибанов, М.С. Селезнев, О.У. Хамидов // ТГиСМ НиП. - 2025. - №34 С.122- DOI: 10.26160/2658-3305-2025-34-122-128
4. Иванов С. Л., Дудко П. П., Дмитриев Г. Ю., Подхалюзин С. П./Автоматические централизованные системы смазки. Опыт применения, проблемы и перспективы использования / С. Л. Иванов, П. П. Дудко, Г. Ю. Дмитриев, Подхалюзин С. П. // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 22-26. – EDN: LHPWVD.
5. Ковалев М. А., Москвичев В. В. Надежность карьерных экскаваторов на угольных разрезах Кузбасса / М. А. Ковалев, В. В. Москвичев // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. – 2024. – № 1. – С. 300–303. DOI: 10.24412/cl-37269–2024–1-300–303

УДК 622.72

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОГРУЗЧИКА В УСЛОВИЯХ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

А. А. Коминов¹

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Рассматриваются актуальные вопросы проектирования рабочего оборудования гидравлических погрузчиков применительно к условиям эксплуатации в Российской Федерации и странах постсоветского пространства. Проведен анализ современных проблем эксплуатации, выполнено сравнение существующих методов обоснования параметров, определены перспективные направления развития гидравлических систем с учетом климатических и производственных особенностей региона. Особое внимание уделено методике проектирования принципиальной гидравлической схемы с учетом требований эффективности, надежности и ремонтпригодности в условиях отечественного машиностроения.

Ключевые слова: погрузчик, гидравлическая схема, проектирование, импортозамещение.

PROBLEMS OF DESIGNING A HYDRAULIC LOADER IN THE CONDITIONS OF DOMESTIC MECHANICAL ENGINEERING

A. A. Kominov

The current issues of designing the working equipment of hydraulic loaders in relation to the operating conditions in the Russian Federation and the countries of the former Soviet Union are considered. The analysis of modern operational problems has been carried out, a comparison of existing methods for justifying parameters has been carried out, promising direc-

tions for the development of hydraulic systems have been identified, taking into account the climatic and industrial characteristics of the region. Special attention is paid to the design methodology of the basic hydraulic circuit, taking into account the requirements of efficiency, reliability and maintainability in the conditions of domestic engineering.

Keywords: loader, hydraulic circuit, engineering, import substitution.

Гидравлические погрузчики занимают ключевое место в системе подъемно-транспортных и выемочно-транспортирующих машин. В условиях импортозамещения и необходимости модернизации отечественного машиностроения особую актуальность приобретает развитие собственной научно-технической базы для проектирования конкурентоспособной подъемно-транспортной техники.

Актуальность темы обусловлена *необходимостью повышения технического уровня отечественных погрузчиков для обеспечения их конкурентоспособности по сравнению с зарубежными аналогами*, а также адаптации существующих разработок к специфическим условиям эксплуатации: широкому диапазону климатических температур, особенностям ремонтной базы, квалификации обслуживающего персонала.

Анализ современного состояния гидравлических погрузчиков, эксплуатируемых в Российской Федерации, позволяет выделить ряд *проблем*, требующих решения при обосновании параметров рабочего оборудования.

Климатические ограничения эксплуатации. Значительная часть территории характеризуется суровыми климатическими условиями с продолжительной зимой и низкими температурами. Эксплуатация гидравлических погрузчиков при температурах ниже -30°C требует применения специальных сортов рабочих жидкостей, подогрева гидробаков, учета изменения вязкости при расчетах гидравлических потерь.

Проблемы ремонтпригодности и обеспечения запасными частями. В условиях ограниченного доступа к оригинальным запасным частям импортного производства возрастают требования к ремонтпригодности гидравлических систем. Отечественные предприятия сталкиваются с необходимостью использования взаимозаменяемых комплектующих, адаптации гидравлических схем под доступную элементную базу.

Проблемы унификации производства. Существующие гидравлические схемы часто разрабатываются под конкретные модели машин, что затрудняет модернизацию и создание унифицированных узлов, применимых к различным типам погрузчиков. Для отечественного машиностроения, ориентированного на мелкосерийное и среднесерийное производство, унификация является ключевым фактором снижения себестоимости.

В практике проектирования гидравлических погрузчиков, сложившейся в научных и инженерных школах, применяются различные подходы к обоснованию параметров рабочего оборудования.

Методы компьютерного моделирования позволяют создавать цифровые двойники гидравлических систем и исследовать их поведение в различных режимах.

Экспериментальные методы предполагают натурные испытания опытных образцов с регистрацией реальных параметров. Эксперименталь-

ные методы дают наиболее достоверные результаты, но требуют значительных временных и материальных затрат.

Дроссельное регулирование – наиболее распространенный метод управления гидроприводом погрузчиков благодаря простоте конструкции и низкой стоимости ремонта.

Объемное регулирование предполагает изменение подачи насоса при постоянных оборотах приводного двигателя. Этот метод обеспечивает более высокий КПД и плавность движения рабочих органов, но отличается сложностью конструкции.

В рамках политики *импортозамещения* активно развивается производство гидравлических компонентов: насосов, гидрораспределителей, гидроцилиндров, фильтровального оборудования. Предприятия ПАО «Уралмашзавод», ОАО «Пневмостроймашина» и другие осваивают выпуск современной гидравлической аппаратуры, способной конкурировать с зарубежными аналогами. Перспективным направлением является создание унифицированных рядов гидравлических агрегатов для погрузчиков различной грузоподъемности.

Для расширения географии применения *отечественных погрузчиков* необходимо развитие систем, обеспечивающих работоспособность при низких температурах:

- применение всесезонных гидравлических масел с улучшенными вязкостными характеристиками;
- разработка систем подогрева рабочей жидкости в гидробаке;
- создание гидравлических схем с минимальным временем выхода на рабочий режим при холодном пуске.

В условиях ограниченной сети специализированных сервисных центров особое значение приобретает *ремонтпригодность гидравлических систем*. Перспективными направлениями являются:

- модульное построение гидравлических систем с быстросъемными соединениями;
- унификация гидравлических компонентов в пределах модельного ряда;
- разработка встроенных систем диагностики с индикацией неисправностей.

Перспективным направлением является создание *модульных гидравлических систем*, позволяющих компоновать различные варианты рабочего оборудования из унифицированных узлов. Это сокращает затраты на проектирование и производство, упрощает техническое обслуживание и ремонт.

Вывод.

Проектирование отечественного гидравлического погрузчика для условий эксплуатации в Российской Федерации представляет собой сложную многокритериальную задачу.

Существующие методы проектирования, разработанные в советский и постсоветский период, обеспечивают достаточную точность расчетов, но

требуют адаптации к современным требованиям энергоэффективности, адаптивности и ремонтпригодности гидропривода. Перспективными направлениями развития являются развитие отечественной компонентной базы в рамках импортозамещения, адаптация к климатическим условиям, повышение ремонтпригодности и создание модульных унифицированных систем.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание цифровых моделей гидравлических систем, позволяющих оптимизировать их параметры на ранних стадиях проектирования без изготовления дорогостоящих физических прототипов, а также на разработку методов ускоренных испытаний, учитывающих специфику эксплуатации в различных климатических зонах Российской Федерации.

Список литературы

1. Суслов Н. М. Элементная база объемного гидропривода. Учебное пособие. – 2- изд. Москва: Ай Пи Эр Медиа, 2023. – 178 с.
2. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. Некрасов Б.Б. Справочник по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 382 с.
4. Анализ эксплуатационных характеристик гидравлических погрузчиков в условиях низких температур // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – Омск: СиБАДИ, 2023. – № 4. – С. 45-52.
5. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – Москва: Стандартиформ, 2006. – 58 с.
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. – Москва: Машиностроение, 2021. – Т. 3. – 832 с.
7. Ковалевский В.Ф., Железняков Н.Т., Бейлин Ю.Е. Справочник по гидроприводам горных машин. – Москва: Недра, 1987. – 366 с.

УДК 622.72

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ВЫЕМОЧНО-ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН

П.А. Коновалов¹, аспирант, А. Федченков¹, аспирант,

Ю.А. Лагунова^{1,2}, д-р техн. наук, проф.

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, РФ

Рассмотрены повышенные требования к транспортно-технологическим средствам специального назначения, а именно к выемочно-транспортным машинам для условий Крайнего Севера. Проанализированы существующие методики, выяснено, что эксплуатационная надежность и живучесть выемочно-транспортных машин являются взаимодополняющими характеристиками, требующими дополнительного изучения. Выделены основные проблемы, дан анализ достоинств и недостатков существующих методов, намечены перспективы развития.

Ключевые слова: арктический регион, экстремальные условия, надежность и живучесть, интеллектуальные системы, новые материалы, управление.

REVIEW OF EXISTING METHODS FOR ASSESSING THE RELIABILITY AND SURVIVABILITY OF EXTRACTING-AND-TRANSPORTING MACHINES

P.A. Konovalov, A. Fedchenkov, Yu.A. Lagunova

The article considers increased requirements for special-purpose transport and technological means, namely, for extracting-and-transporting machines for the conditions of the Far North. The existing methods are analyzed, it is found that the operational reliability and survivability of extracting-and-transporting machines are mutually complementary characteristics that require further study. The main problems are identified, an analysis of the advantages and disadvantages of the existing methods is given, and development prospects are outlined.

Keywords: Arctic region, extreme conditions, reliability and survivability, intelligent systems, new materials, control.

Введение

Активное освоение арктического региона, развитие инфраструктуры в условиях Крайнего Севера и Сибири, а также выполнение специальных задач в различных климатических зонах предъявляют повышенные требования к транспортно-технологическим средствам специального назначения (ТТС СН). Под ТТС СН понимаются колесные и гусеничные машины, выполняющие задачи транспортировки, монтажа, эвакуации, жизнеобеспечения в условиях, исключающих или ограничивающих применение серийной техники.

Экстремальные климатические условия, характеризующиеся низкими температурами (до -60°C), резкими перепадами температур, высокой влажностью, ледяными покровами, снежными заносами и др., выступают в качестве агрессивной внешней среды, интенсифицирующей процессы изнашивания, старения материалов и выхода из строя систем [1]. Традиционные подходы к оценке надежности, основанные на усредненных данных, в таких условиях оказываются несостоятельными, что ведет к необоснованным простоям, срыву выполнения задач и росту затрат на обслуживание.



Рис. 1 - бульдозер ДСТ-УРАЛ серии D12.

Особую значимость приобретает свойство живучести – способности ТТС СН сохранять ограниченную работоспособность и выполнять минимально необходимый объем функций после воздействия дестабилизирующих факторов (в данном случае – экстремальных климатических воздействий и вызванных ими отказов). Таким образом, эксплуатационная надежность (как свойство сохранять работоспособность в нормальных условиях) и живучесть (как свойство противостоять последствиям экстремальных воздействий) являются взаимодополняющими характеристиками, требующими комплексного подхода к их оценке и повышению.

Тема имеет высокую научно-техническую и стратегическую значимость для Российской Федерации, обусловленную тремя факторами:

геополитические – активное освоение Арктической зоны РФ, развитие Северного морского пути, обеспечение национальной безопасности в приполярных регионах;

экономические – реализация крупных инфраструктурных проектов (Ямал СПГ, Восток Ойл) в условиях Крайнего Севера и Сибири, где надежность техники влияет на экономическую эффективность;

технологические - необходимость обеспечения технологического суверенитета и импортнезависимости в области создания специальной техники для работы в экстремальных условиях (ЭУ).

Государственная поддержка закреплена в ряде стратегических документов, таких как «Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности до 2035 года»; «Основы государственной политики РФ в области экологического развития»; Государственная программа «Научно-технологическое развитие РФ» [2].

Проанализировав существующие подходы и методики [3-8], было выявлено, что в российских исследованиях прослеживаются несколько основных направлений. Так, разработан обширный фонд ГОСТ, ОСТ и ведомственных нормативов на испытания в условиях низких температур, повышенной влажности, обледенения (например, серия ГОСТ Р 50823, ГОСТ 28206). Методы в основном носят верификационный характер («соответ-

ствует/не соответствует») и часто не дают количественной прогнозной модели деградации надежности. Также доминирует классическая теория надежности (ГОСТ 27.XXX) [4]. Широко используются методы расчета показателей надежности (ВБР, наработка на отказ) на основе статистики отказов. Недостаток – слабая увязка статистики с конкретными физико-химическими процессами, инициируемыми ЭКУ. Учитывая непосредственно географическое расположение местности с экстремальными климатическими условиями, ведутся активные исследования поведения материалов (металлов, полимеров, композитов, резин) при низких температурах, влияния смазочных материалов. Разрабатываются модели износа пар трения в загрязненной абразивом среде (снег, лед, песок).

Основные проблемы:

1. Разрыв между проектированием и эксплуатацией. Данные о реальных отказах в экстремальных климатических условиях часто носят ведомственный или коммерческий характер, слабо систематизированы и не всегда поступают к конструкторам для корректировки проектов.

2. Дефицит комплексных методик. Большинство существующих методик оценивают либо надежность, либо прочность, либо климатическую стойкость по отдельности. Цепочки, начинающейся, с интегрированной методики, связывающей климатический фактор, с физическим процессом износа/разрушения, переходящем к отказу элемента, которое приводит к снижению функциональности системы (живучести), при экономическом/операционном ущербе, в явном виде не предложено.

3. Слабая цифровизация. Ограниченное применение технологий цифровых двойников для прогнозного моделирования поведения ТТС СН в экстремальных климатических условиях на всем жизненном цикле. Не хватает моделей, учитывающих деградацию характеристик во времени под совокупным воздействием множества факторов.

4. Кадровый вопрос. Нехватка специалистов междисциплинарного профиля, соединяющих знания в области машиностроения, материаловедения, климатологии, теории надежности и системного анализа.

Анализ достоинств и недостатков существующих методов [3-8]

Статистические методы анализа надёжности, регламентированные в ГОСТ 27.XXX [4] и основанные на обработке данных об отказах, представляют собой устоявшийся инструмент инженерной практики. Их ключевое достоинство заключается в возможности получения объективных количественных показателей – наработки на отказ, вероятности безотказной работы и интенсивности отказов – которые формируются на базе реальной эксплуатационной статистики. Благодаря стандартизации эти методы обеспечивают воспроизводимость результатов и позволяют проводить корректное сравнение различных образцов техники. Кроме того, полученные показатели отличаются простотой интерпретации: они интуитивно понятны техническому руководству и заказчикам, активно используются при планировании ремонтных работ и формировании парка запасных частей и инструментов (ЗИП). Не менее важно, что именно статистические методы служат фундаментом для установления гарантийных обязательств и расчё-

та ресурса изделий, подтверждая свою практическую ценность многолетней эксплуатацией.

Однако применение этих методов сопряжено с рядом существенных ограничений. Прежде всего, они носят ретроспективный характер: опираясь на уже имеющийся опыт эксплуатации, они не способны адекватно прогнозировать поведение новых систем или работу в ранее неучтённых условиях. Серьёзным барьером становится и высокая требовательность к объёму исходных данных – для достоверных выводов необходима длительная и представительная статистика отказов, которая зачастую отсутствует для новой техники или оборудования, редко используемого в экстремальных климатических условиях (ЭКУ). Ещё одна принципиальная слабость заключается в том, что статистические методы не раскрывают причинно-следственных связей между внешними воздействиями (например, климатическими факторами), процессами деградации материалов и финальным отказом, функционируя по принципу «чёрного ящика». Наконец, они демонстрируют слабую адаптивность к индивидуальным особенностям эксплуатации: не учитывают специфику режимов нагрузки и реальные температурные профили конкретных экземпляров техники.

Таким образом, несмотря на доказанную эффективность в анализе накопленных данных, статистические методы требуют дополнения иными подходами в ситуациях, связанных с внедрением новых технических решений или изменением условий эксплуатации. Это обуславливает необходимость развития комплексных методик, интегрирующих статистический анализ с учётом физики отказов и индивидуальных эксплуатационных параметров.

Перспективы развития

Связь между перспективными направлениями носит характер последовательной технологической цепочки и обратных связей, формирующих замкнутый цикл повышения надёжности.

Интеллектуальные системы мониторинга являются источником критически важных данных о реальном состоянии техники и процессах её деградации в экстремальных условиях. Эти данные служат основой для двух параллельных процессов.

Они информируют и направляют разработку новых материалов и покрытий. Анализ информации о конкретных видах износа, коррозии и обледенении позволяет материалововедам ставить точечные задачи по созданию композитов и покрытий с точно заданными свойствами для борьбы с выявленными проблемами. А собранные массивы данных о причинах и характере отказов обосновывают и диктуют принципы новой парадигмы проектирования, смещающей фокус на живучесть и ремонтпригодность. Статистика показывает, какие узлы критически важны и должны быть модульными, а какие режимы работы приводят к катастрофическим последствиям, которых необходимо избегать.

Новые материалы, в свою очередь, являются технологическим фундаментом для реализации новой концепции живучести. Без морозостойких

полимеров, гидрофобных покрытий и износостойких композитов создание эффективных модульных и ремонтпригодных конструкций для работы при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ становится невозможным.

Все эти направления генерируют огромные объемы разнородной информации – от показаний датчиков и результатов испытаний материалов до чертежей модульных узлов и протоколов ремонтов. Единая цифровая платформа выступает в роли системообразующего интегратора и «нервного центра». Она аккумулирует данные от систем мониторинга, результаты испытаний новых материалов, схемы проектных решений и экономические расчеты, создавая целостную цифровую модель (двойник) жизненного цикла техники.

Наконец, управление всей этой сложной взаимосвязанной системой и извлечение из неё максимальной пользы невозможно без междисциплинарных исследований. Интеграция усилий инженеров, материаловедов, климатологов и экономистов является связующим механизмом, который обеспечивает перевод набора данных с платформы в конкретные технические задания, корректировку моделей прогнозирования, оценку экономической эффективности новых решений и, в итоге, – замыкание цикла путем возврата усовершенствованных проектов и технологий обратно в производство и эксплуатацию.

Заключение. В России существует солидный научно-технический задел по теме обеспечения работоспособности техники в экстремальных климатических условиях, подкрепленный острой практической востребованностью. Однако текущая ситуация характеризуется фрагментарностью исследований и прикладных решений.

Основной вектор развития заключается в преодолении этого разрыва через создание сквозных междисциплинарных методик, основанных на цифровом моделировании и данных реальной эксплуатации. Успех в этой области будет определяться не только технологическими прорывами, но и налаживанием эффективной кооперации между академической наукой, отраслевыми институтами, производителями и конечными эксплуатантами ТТС СН. Тема является исключительно перспективной для аспирантских исследований, так как позволяет внести вклад, как в фундаментальную науку (модели деградации), так и в решение прикладных государственных задач.

Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Акентьева Е.М., Алейникова А.М., и др. Санкт-Петербург, 2022.
2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года (утв. Указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru> (дата обращения: 26.01.2026).
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 276 с.

4. ГОСТ Р 27.102-2019. Надежность в технике. Живучесть и безопасность. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019.
5. Петров А.А. Влияние низких температур на эксплуатационные свойства материалов и узлов транспортных средств / А.А. Петров, В.В. Сергеев // Транспорт: наука, техника, управление. – 2021. – № 5. – С. 34–39.
6. Кабанов В.И. Материалы для арктической техники: структура, свойства, применение / В.И. Кабанов, Е.С. Луковникова. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2019. – 198 с.
7. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021.
8. Бочкарев А.Н. Перспективные наноструктурированные покрытия для защиты от обледенения и коррозии в условиях Арктики / А.Н. Бочкарев, Т.К. Алексеева // Инженерная физика. – 2020. – № 4. – С. 15–23.
9. Федченков А., Лагунова Ю.А. Современные технологии в освоении Арктики: специализированная техника и роботизированные системы / В сборнике: Уральская горная школа – регионам. Материалы Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2025. – С. 137-138.

УДК 622.331.002.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПРУГОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОХОДИМОСТИ ПО НЕОСУШЕННОЙ ЗАЛЕЖИ

Л.В. Копенкина¹, доцент, В.Ф. Синицын¹, профессор

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

В статье излагаются результаты получения распределения коэффициента упругости торфяной верховой неосушенной залежи для прогнозов о проходимости машины по верховой неосушенной торфяной залежи. Для расчетов коэффициента упругости используется закон распределения сопротивления сдвигу верхнего слоя этих залежей и метод статистического моделирования. При реализации метода статистического моделирования используется 10000 значений.

Ключевые слова: деформационные свойства торфяной залежи, коэффициент упругости залежи, торфяная верховая неосушенная залежь, метод статистического моделирования.

DETERMINATION OF THE ELASTICITY COEFFICIENT FOR ASSESSING THE PASSABILITY OF A MACHINE ON AN UNDERDRIED DEPOSIT

L.V. Kopenkina, V.F. Sinicyn

The article presents the results of obtaining the distribution of the coefficient of elasticity of a peat high moor undried deposit for forecasts of the machine's patency over a riding undried peat deposit. The law of the distribution of shear resistance of the upper layer of these deposits and the method of statistical modeling are used to calculate the coefficient of elasticity. When implementing the statistical modeling method, 10,000 values are used.

Keywords: deformation properties of peat deposits, the coefficient of elasticity of the deposit, peat high moor non-dried deposits, statistical modeling method.

Для работы машины на верховой неосушенной залежи необходимо соответствие параметров ходового устройства условиям ее эксплуатации. Особенностью такой залежи является наличие деятельного слоя толщиной 0,2-0,5 м, состоящего из неразложившихся остатков отмерших растений и пронизанного корнями травяно-кустарниковой растительности, образующими своеобразный каркас, обладающий значительной прочностью [1].

Несущая способность верховой неосушенной залежи обеспечивается в основном прочностью деятельного слоя, от чего зависит осадка колеса, что и показали экспериментальные исследования В.И. Персикова [2].

В 1970-е годы В.И. Персиковым в Калининском филиале ВНИИТП проводились натурные эксперименты с целью количественной оценки степени соответствия параметров ходового устройства машины КПО условиям эксплуатации ее на верховой неосушенной залежи.

Прочность такого слоя залежи определялась сдвигомером-крыльчаткой СК и характеризовалась величиной сопротивления сдвигу τ , кг/см².

Многочисленные измерения τ (5100), проводившиеся в течение нескольких лет на торфяных месторождениях Калининской (Тверской), Московской и Вологодской областей позволили установить закон его распределения. Результаты исследований были представлены В.И. Персиковым в виде статистического ряда [2].

В результате была получена эмпирическая формула, позволяющая вычислять осадку колеса H машины КПО через сопротивление сдвигу τ деятельного слоя залежи:

$$H = 0,064/\tau - 0,167 \text{ м}, \quad (1)$$

где τ – сопротивление сдвигу деятельного слоя залежи, кг/см².

Персиков установил, что максимально допустимое значение осадки колеса машины КПО равна 0,78 м. При осадке больше 0,78 м происходит разрушение деятельного слоя, и колесо теряет способность перекатываться. Осадка увеличивается по мере уменьшения прочности деятельного слоя. Используя зависимость (1), можно определить, что осадка 0,78 м имеет место при $\tau = 0,067$ кг/см². Следовательно, проходимость машины обеспечена, если прочность деятельного слоя залежи $\tau \geq 0,067$ кг/см².

Используя закон распределения сопротивлению сдвигу, можно вычислить вероятность того, что значение τ в любом месте верховой неосушенной залежи будет не меньше предельного $\tau = 0,66$ кН/м². Эта вероятность (вероятность того, что проходимость машины КПО будет обеспечена) равна 0,95.

Таким образом, экспериментальные исследования Персикова потребовали больших затрат времени и средств, позволили количественно оценить работоспособность машины КПО на неосушенной залежи.

Эти результаты исследований непосредственно не могут быть использованы ни для чего другого, даже для иных размеров колеса и иных нагрузок на колесо.

Известно, что для вычисления осадки колеса в общем случае необходимо знать деформационные свойства залежи. В качестве параметра, характеризующего деформационные свойства торфяной залежи и широко применяемого при расчете ходовых устройств торфяных машин, используется коэффициент упругости k_u [1].

Значения коэффициента упругости k_u торфяной верховой неосушенной залежи изменяются в очень широких пределах. Эти изменения выступают как следствие пространственной неоднородности торфяной залежи и проявляются, в частности, в изменении значений коэффициента упругости по пути движения машины. На пути в несколько сотен метров наблюдаемые значения коэффициента упругости могут отличаться в десятки раз. Это означает, что при оценке проходимости машин по верховым неосушенным залежам коэффициент упругости залежи нужно считать случайной величиной и учитывать закон его распределения.

Непосредственное экспериментальное определение закона распределения коэффициента упругости k_u торфяной верховой неосушенной залежи является задачей, требующей для своего решения больших затрат времени, труда и средств.

Авторы статьи нашли способ получить закон распределения коэффициента упругости торфяной верховой неосушенной залежи.

Наши предварительные исследования показали, что с использованием результатов экспериментальных исследований В.И. Персикова установле-

ние закона распределения коэффициента упругости торфяной верховой неосушенной залежи сводится к чисто математической задаче.

В соответствии с формулой (1) каждому значению τ соответствует вполне определенное значение осадки H колеса машины КПО. Каждому значению осадки H соответствует вполне определенное значение объема V_k погруженной в залежь части колеса – объема залежи, вытесненной колесом. Коэффициент упругости залежи, кН/м^3 , можно вычислить по формуле

$$k_u = Q/V_k, \quad (2)$$

где Q – нагрузка на колесо КПО, 12,25 кН; V_k – объем залежи, вытесненной колесом, м^3 .

Следовательно, k_u является функцией τ . Закон распределения τ известен. Нахождение закона распределения k_u в данном случае – нахождение закона распределения функции случайного аргумента.

Аналитического решения этой задачи предложено не было – в частности из-за того, что нет формулы, выражающей объем погруженной части арочного колеса через осадку. В связи с этим, для решения задачи установления закона распределения коэффициента упругости верховой неосушенной залежи использовался метод статистического моделирования [3].

В соответствии с законом распределения τ методом обратных функций моделируется одна реализация τ . С использованием полученной реализации τ по формуле (1) вычисляется соответствующая осадка арочного колеса H . По величине H определяется объем залежи V_k , вытесненной колесом. Используя V_k , по формуле (2) вычисляют значение реализации k_{ui} . Алгоритм определения объема погруженной части арочного колеса методом статистического моделирования реализован в программе VKOL [4].

Авторами применено моделирование случайной величины, когда закон распределения задан гистограммой. Приняли 10000 реализаций случайной величины.

Изложенная последовательность и методы вычислений были оформлены в виде компьютерной программы. Коэффициент упругости верховой неосушенной залежи представлены в виде статистического ряда и гистограммы.

Математическое ожидание коэффициента упругости неосушенной верховой залежи m_{ku} оказалось равным 59,6 кН/м^3 , среднее квадратичное отклонение σ_{ku} составило 38,9 кН/м^3 . Средние квадратичные погрешности этих числовых характеристик находятся в пределах 0,5-1%.

Значения коэффициента упругости неосушенной верховой залежи варьируют в диапазоне от 16,9 до 77 кН/м^3 .

Гистограмма показывает, что закон распределения коэффициента упругости асимметричен: правая граница распределения удалена от математического ожидания на 117,1 кН/м^3 , а левая – на 42,7 кН/м^3 .

Закон распределения коэффициента упругости торфяной верховой неосушенной залежи получен авторами статьи в результате косвенной информации, содержащейся в работе В.И. Персикова [2].

Расчетные значения коэффициента упругости должны быть намного меньше математического ожидания. Используя гистограмму и статистическую функцию распределения, можно делать прогнозы о расчетных значениях коэффициента упругости, при которых будет обеспечиваться проходимость машины.

Расчетное значение коэффициента упругости должно приниматься с учетом тех выгод и рисков, которые будут при том или ином значении коэффициента упругости. Для этого надо знать конструкцию машины.

Список литературы

1. Самсонов Л.Н., Сеницын В.Ф. Торфяные машины и оборудование: учебное пособие. Часть 1. Общие сведения о торфяных машинах. Взаимодействие ходовых устройств с торфяной залежью. Тверь: ТГТУ, 2006. 140 с.
2. Персиков В.И. Исследование взаимодействия колесного движителя на арокных шинах с неосушенной торфяной залежью верхового типа. Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук 05.02.17. Калинин, 1974. 22с.
3. Сеницын В.Ф., Серков Д.А. Исследование деформационных свойств неосушенной торфяной залежи методом статистического моделирования // Научный вестник Московского государственного горного университета, 2011. №2. С. 76-80.
4. Сеницын В.Ф., Копенкина Л.В. Математические модели теории вероятностей в задачах исследования и проектирования торфяных машин: монография. Тверь: ТвГТУ, 2017. 172 с.

УДК. 621.86

ПРИВОД ПОВОРОТНОГО МЕХАНИЗМА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА: ВИДЫ, ОТЛИЧИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.Д. Ларионов¹, аспирант.

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

В статье рассмотрены конструктивные особенности приводов поворотного механизма карьерных экскаваторов, выполнен сравнительный анализ гидравлических, электрических гибридных и механических систем. Выявлены основные причины снижения ресурса и предложено применение адаптивного электрогидравлического привода с рекуперацией энергии для повышения надежности и долговечности оборудования.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, механизм поворота, привод, надежность, ресурс, гидропривод, электропривод, гибридная система.

DRIVES OF THE ROTARY MECHANISM OF A QUARRY EXCAVATOR: TYPES, DIFFERENCES, OPERATION EFFICIENCY

M.D. Larionov

The article discusses the design features of the rotary mechanism drives of quarry excavators, and a comparative analysis of hydraulic, electric, hybrid and mechanical systems is performed. The main reasons for the decrease in resource have been identified, and the use of an adaptive electrohydraulic drive with energy recovery has been proposed to increase the reliability and durability of the equipment.

Keywords: quarry excavator, rotation mechanism, drive, reliability, resource, hydraulic drive, electric drive, hybrid system.

Введение. Горные машины, такие как экскаваторы, подвергаются интенсивным механическим воздействиям в условиях сложных и агрессивных средах. Такие машины работают в экстремальных условиях: высокие нагрузки, высокая абразивность, температура, влажность и химическое воздействие на детали. Именно поэтому износостойкость материалов для рабочих органов экскаваторов является одной из ключевых характеристик, определяющих их долговечность и эффективность [1-6].

Механизм поворота платформы является одним из наиболее нагруженных узлов карьерного экскаватора. Он обеспечивает циклическое перемещение рабочей платформы и воспринимает значительные динамические нагрузки. Надежность данного механизма во многом определяет работоспособность всей машины [4, 5].

Типы приводов поворотного механизма [3].

В современных карьерных экскаваторах применяются различные типы приводов поворотного механизма обладающие своими техническими особенностями и возможностью эксплуатации в различных условиях, принимая попеременные, критические нагружения.

Существуют гидравлические, электрические комбинированные и механические приводы. Каждый из них обладает своими особенностями, преимуществами и недостатками.

Гидравлический привод.

Отличается высокой удельной мощностью и устойчивостью к перегрузкам, однако характеризуется энергетическими потерями, нагревом рабочей жидкости и ускоренным износом элементов при ударных нагрузках.

Электрический привод.

Обеспечивает высокий коэффициент полезного действия и точность регулирования скорости, снижает эксплуатационные потери, но требует стабильного электроснабжения и защиты от перегрузок.

Гибридный привод [6].

Сочетает преимущества гидравлических и электрических систем, позволяет реализовать рекуперацию энергии торможения и снизить динамические нагрузки на зубчатые передачи. В ходе проведения анализа составлена сравнительная таблица 1, типов приводов карьерных экскаваторов.

Таблица 1. Сравнительная таблица приводов карьерных экскаваторов

Критерий/ Тип привода	<i>Гидравлический</i>	<i>Электрический</i>	<i>Гибридный</i>	<i>Механический (Канатный)</i>
Удельная мощность	<i>Очень высокая (компактные компоненты передают огромные усилия)</i>	<i>Средняя/высокая</i>	<i>Высокая (сочетает преимущества гидро- и электроприводов)</i>	<i>Высокая</i>
Передача усилия на расстояние	<i>Легко и гибко (трубопровод)</i>	<i>Легко (кабели)</i>	<i>Средне (требует комбин. линий)</i>	<i>Сложно (требуют валы, муфты)</i>
Регулирование скорости	<i>Плавное, бесступенчато (дрессели, регулируемые насосы)</i>	<i>Плавное (с частотным преобразователем)</i>	<i>Плавное (комбинированное управление)</i>	<i>Ступенчатое (КПП)</i>
Реализация линейного движения	<i>Просто и эффективно (гидроцилиндр)</i>	<i>Сложно (требуются преобразователи)</i>	<i>Умеренно сложно (гибридные актуаторы)</i>	<i>Сложно (Кривошип, кулачок)</i>
Защита от перегрузки	<i>Простая (предохранительный клапан)</i>	<i>Сложная (электронная система)</i>	<i>Комбинированная</i>	<i>Сложная (муфта предельного момента)</i>
Общий КПД	<i>Низкий (0,5-0,8)</i>	<i>Высокий (0,85-0,95)</i>	<i>Высокий (0,75-0,9) за счет рекуп.</i>	<i>Средний (0,8-0,9)</i>
Стоимость системы	<i>Средняя</i>	<i>Высокая (силовые компоненты)</i>	<i>Очень высокая</i>	<i>Низкая</i>
Требования к	<i>Высокие (заме-</i>	<i>Низкие</i>	<i>Умеренные (об-</i>	<i>Средние (Смаз-</i>

ТО	<i>на фильтров, жидкости)</i>		<i>служивание обоих конту- ров)</i>	<i>ка, канаты)</i>
Надежность в тяжелых условиях	<i>Высокая (при больших пере- грузках)</i>	<i>Высокая (при стабильном питании)</i>	<i>Очень высокая (резервирова- ние систем)</i>	<i>Высокая (про- стая механика)</i>
Масса и га- бариты	<i>Компактные компоненты, но треб. бак</i>	<i>Компактные двигатели, но нужны преоб- разователи</i>	<i>Большие (два типа приводов)</i>	<i>Большие габа- риты из-за мех. передач</i>
Точность управления	<i>Высокая (плав- ное регулирова- ние)</i>	<i>Высокая (с цифровой си- стемой)</i>	<i>Очень высокая (оптимизация обоих типов)</i>	<i>Низкая (сту- пенчатые пе- редачи)</i>
Примени- мость к крупным экскавато- рам	<i>Да (до 26м³)</i>	<i>Особенно для сверхтяжелых машин</i>	<i>Перспективен для новых мо- делей</i>	<i>Драглайны, грейферы</i>
Экологич- ность	<i>Средняя (риск утечки масла)</i>	<i>Высокая (нет выбросов)</i>	<i>Высокая (реку- перация)</i>	<i>Средняя (смаз- ка)</i>
Энергоэф- фективность	<i>Низкая (потери в гидросисте- ме)</i>	<i>Высокая (пря- мое преобразо- вание)</i>	<i>Очень высокая (рекуперация энергии)</i>	<i>Средняя (мех. потери)</i>
Автоном- ность	<i>Зависит от ДВС</i>	<i>Зависит от сети</i>	<i>Высокая</i>	<i>Высокая (раб. от ДВС)</i>
Сложность ремонта	<i>Средняя (рас- пространенные компоненты)</i>	<i>Низкая (мо- дульные блоки)</i>	<i>Высокая (тре- буется спец- подготовка)</i>	<i>Низкая (до- ступные запча- сти)</i>
Чувстви- тельность к загрязнени- ям	<i>Очень высокая (требует тон- кой фильтра- ции)</i>	<i>Низкая</i>	<i>Средняя (гидро. часть требует фильтрации)</i>	<i>Средняя</i>
Риск утечек	<i>Высокий (гид- равлическое масло)</i>	<i>Отсутствует</i>	<i>Умеренный (только в гид- равлическом контуре)</i>	<i>Низкий (утечки смазки)</i>
Пожаро- опасность	<i>Есть (горючее масло)</i>	<i>Низкая</i>	<i>Умеренная (снижена за счет электри- фикации)</i>	<i>Низкая</i>

Причины снижения ресурса.

Основными факторами износа являются ударные нагрузки, неравномерность распределения крутящего момента, тепловые потери и циклический характер работы механизма [2].

Выводы по применению

Гидравлический – оптимален для машин среднего и крупного класса, где нужны мощность и компактность.

Электрический – предпочтителен для стационарных работ с питанием от сети; максимальный КПД и экологичность.

Гибридный – перспективен для мобильных экскаваторов, где важны энергоэффективность, автономность и резервирование систем (пока ограничен высокой стоимостью).

Механический – остаётся нужным в драглайнах и тяжёлых мехлопатах благодаря простоте, надёжности и низкой стоимости обслуживания.

Направление для технологического прорыва – применение адаптивного электрогидравлического привода с системой накопления энергии, обеспечивающего сглаживание нагрузок, повышение энергоэффективности и увеличение межремонтного ресурса [6].

Список литературы

1. Кузнецов Е. С. Гидравлические системы горных машин. – М.: Машиностроение, 2019.
2. Гришин А. В. Надёжность механического оборудования карьерных экскаваторов. – Екатеринбург: УрФУ, 2020.
3. Коротков В. П. Приводы горных машин. – М.: Горная книга, 2018.
4. Чернышов, В. Г., Губернский, С. В. Технологии повышения износостойкости рабочих органов горных машин. – Новосибирск: Наука, 2019. – 250 с.
5. Ситдикова С.В., Иванов И.Ю., Лагунова Ю.А., Макарова В.В. Оценка возможности управления опорно-поворотным устройством карьерного экскаватора / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2022. С. 60-65.
6. Волобуева П.С., Лагунова Ю.А. Обзор существующих приводов карьерных экскаваторов / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2025. С. 39-43

УДК 631.31

БАРАБАННАЯ ФРЕЗА С НЕКРУГЛЫМИ КОЛЕСАМИ В ПРИВОДЕ

Я.Л. Либерман¹, канд. техн. наук, доц., О.А. Лукашук¹, канд. техн. наук, доц.,
А.Г. Мазеин¹, магистрант

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

В статье рассматривается метод повышения эффективности разрушения горных пород при помощи барабанной фрезы с некруглыми зубчатыми колесами в приводе. Предложенная конструкция обеспечивает создание пульсирующих нагрузок на разрушаемый материал за счет использования передачи с переменным передаточным отношением. Проведенные расчеты подтверждают увеличение суммарной силы удара резцов по сравнению с прототипом, что значительно повышает производительность процесса разрушения. Разработанная технология может найти широкое применение в горнодобывающей отрасли при оснащении экскаваторной техники.

Ключевые слова: барабанная фреза, некруглые зубчатые колеса, переменное передаточное отношение, разрушение горных пород, импульсная нагрузка, эффективность разрушения, экскаваторное оборудование.

A DRUM CUTTER WITH ROUGH-CUTTING GEARS IN THE DRIVE

Ya. L. Liberman, O. A. Lukashuk, A. G. Mazein

This article discusses a method for increasing the efficiency of rock breaking using a drum cutter with non-circular gears in the drive. The proposed design creates pulsating loads on the material being broken by using a variable-ratio transmission. Calculations confirm an increase in the total impact force of the cutters compared to the prototype, significantly improving the productivity of the breaking process. The developed technology can find wide application in the mining industry for equipping excavator equipment.

Keywords: drum cutter, non-circular gears, variable gear ratio, rock destruction, impulse load, destruction efficiency, excavator equipment.

Горнодобывающая и строительная отрасли занимают фундаментальное место в экономической структуре Российской Федерации, выступая не просто как сектора промышленности, а как опорные столпы национальной инфраструктуры, энергетической безопасности и технологического суверенитета. Россия обладает одним из самых богатых в мире природно-ресурсного потенциала: её территория охватывает более 20 % мировых запасов полезных ископаемых. Более 15 тысяч месторождений, расположенных по всей территории государства, обеспечивают не только внутренние потребности страны, но и являются важной частью её экспортного потенциала, формируя значительную долю валютных поступлений и влияя на баланс торговых отношений с Европой, Азией и другими регионами мира.

В то же время масштабная и динамично развивающаяся строительная отрасль, охватывающая жилищное, транспортное, энергетическое, промышленное и социальное строительство, требует беспрецедентных объёмов строительных материалов, которые напрямую зависят от эффективности горнодобывающего сектора. Каждый километр новой дороги, каждая электростанция, каждый жилой комплекс, каждый порт или трубопровод — всё это невозможно без добычи и переработки минерального сырья. В условиях растущей урбанизации, модернизации транспортной сети, реали-

зации национальных проектов и необходимости восстановления и обновления изношенной инфраструктуры, строительная отрасль сталкивается с вызовами, требующими не просто увеличения объёмов, но увеличения эффективности проведения работ.

Обе эти отрасли создают спрос на современный высококачественный и эффективный инструмент. Зачастую речь идет о навесном инструменте для экскаваторов – крайне широко распространенной и очень востребованной землеройной спецтехники, имеющей очень разнообразный функционал благодаря различному навесному оборудованию.

Барабанная фреза является одним из видов такого навесного оборудования. Учитывая тенденцию промышленности к внедрению новых технологий в свои процессы, следует рассмотреть вопрос повышения эффективности использования барабанных фрез. Для этого необходимо проанализировать различные аспекты их конструкции и применения, обозначить проблемы и представить способы решения этих проблем, а также способы улучшения характеристик барабанных фрез [1].

В статье предложен способ увеличения силы удара резцов по разрушаемому материалу и добавление импульсных нагрузок на разрушаемую породу. Это обеспечивается тем, что барабанная фреза, включающая в себя установленные на общем валу первый и второй цилиндрические барабаны, резцы, закрепленные на поверхности первого барабана вдоль винтовой линии, направленной влево, на поверхности второго барабана вдоль винтовой линии, направленной вправо, и двигатель, соединённый через зубчатый редуктор с общим валом барабанов, отличается тем, что редуктор выполнен из некруглых зубчатых колес в виде передачи с переменным передаточным отношением. На рис. 1 показана конструктивная схема предлагаемой барабанной фрезы [2].

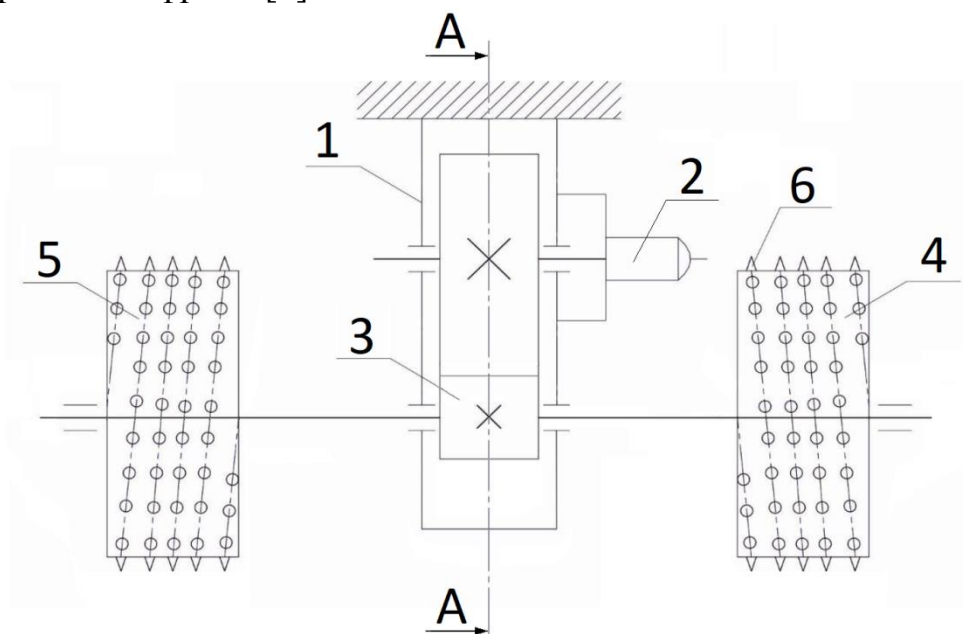


Рис. 1. Конструктивная схема фрезы с некруглыми колесами

Фреза состоит из корпуса 1, внутри которого расположен мотор роторно-поршневого типа 2, редуктор 3 с двухсторонним выходным валом, на котором крепятся первый 4 и второй 5 цилиндрические барабаны, име-

ющих резцы 6, закрепленные на поверхности первого барабана 4 вдоль винтовой линии, направленной вправо, и на поверхности второго барабана 5 вдоль винтовой линии, направленной влево, при этом редуктор 3 выполнен из некруглых зубчатых колес (в данном случае эллиптических) в виде передачи с переменным передаточным отношением.

При использовании фрезы ее корпус (он на рис. 1 изображен условно) монтируют на конце стрелы экскаватора. Затем запускают в действие мотор и вводят резцы в соприкосновение с объектом разрушения. Резцы ударяются об объект и разрушают его. Некруглая форма колес зубчатой передачи обеспечивает приведения в движение рабочих органов с переменной в течение рабочего цикла скоростью.

На рис. 2 изображена схема передачи с переменным передаточным отношением в двух положениях (пример с эллиптическими зубчатыми колесами).

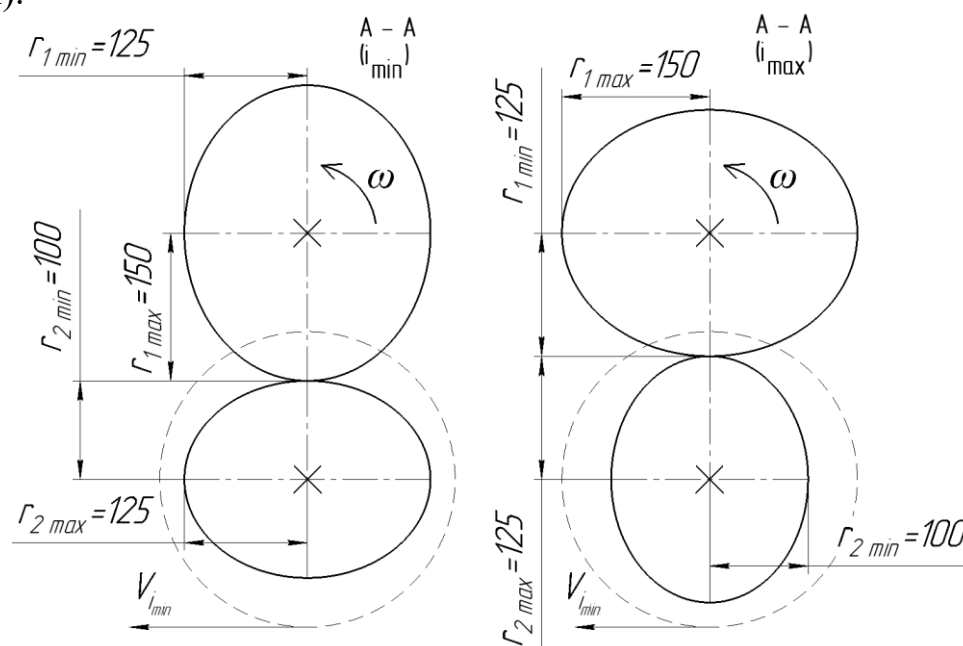


Рис. 2. Схема передачи с переменным передаточным отношением

Передаточное отношение зубчатой передачи

$$i = \frac{r_2}{r_1}, \quad (1)$$

где r_1 – радиус эллипса ведущего зубчатого колеса, r_2 – радиус эллипса ведомого зубчатого колеса. Поскольку радиус эллипса обоих колёс непостоянен, то i – переменен.

Из формулы мощности вращательного движения $P = M \cdot \omega = \frac{M \cdot v}{R}$ следует, что момент вращения и линейная скорость вращения обратно пропорциональны. Таким образом, при i_{max} момент вращения барабанов будет максимальным, а скорость вращения будет минимальной. При i_{min} наоборот, момент вращения барабанов будет минимальным, а скорость вращения будет максимальной.

При переменном передаточном числе редуктора барабанной фрезы сила воздействия её на породу становится пульсирующей, что усиливает эффективность разрушения породы. В результате сила удара резцов об

объект оказывается большей, чем у прототипа. Для проверки эффективности необходимо рассчитать суммарную силу воздействия на породу.

Расчет передаточных отношений будет проводиться при принятых $r_{1max} = 150$ мм, $r_{1min} = 125$ мм, $r_{2max} = 125$ мм, $r_{2min} = 100$ мм. Тогда передаточное отношение, вычисляемое по формуле (1), будет равно

$$i_{max} = \frac{r_{2max}}{r_{1min}} = \frac{125}{125} = 1$$

$$i_{min} = \frac{r_{2min}}{r_{1max}} = \frac{100}{150} = \frac{2}{3}$$

Далее определяется окружная сила F_0 для максимального и минимального передаточного отношения.

$$F_{0(i_{max})} = \frac{M \cdot i_{max}}{R} = \frac{2300 \cdot 1}{0,25} = 9200 \text{ Н}$$

$$F_{0(i_{min})} = \frac{M \cdot i_{min}}{R} = \frac{2300 \cdot \frac{2}{3}}{0,25} = 6133,4 \text{ Н}$$

Затем производится расчет центробежной силы $F_{ц}$ для максимального и минимального передаточного отношения.

$$V_{(i_{max})} = \frac{2\pi \cdot R \cdot n}{60 \cdot i_{max}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 140}{60 \cdot 1} = 3,67 \text{ м/с}$$

$$F_{ц(i_{max})} = \frac{m \cdot v^2_{(i_{max})}}{R} = \frac{150 \cdot 3,67^2}{0,25} = 8081,3 \text{ Н}$$

$$V_{(i_{min})} = \frac{2\pi \cdot R \cdot n}{60 \cdot i_{min}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 140}{60 \cdot \frac{2}{3}} = 5,5 \text{ м/с}$$

$$F_{ц(i_{min})} = \frac{m \cdot v^2_{(i_{min})}}{R} = \frac{150 \cdot 5,5^2}{0,25} = 18150 \text{ Н}$$

Можно сделать вывод, что при максимальном передаточном отношении $i_{max} = 1$ окружная и центробежная силы аналогичны изначальным параметрам у фрезы без некруглых колес, а значит, суммарная сила удара F_{Σ} не изменится.

При минимальном передаточном отношении $i_{min} = \frac{2}{3}$ окружная сила уменьшилась, а центробежная возросла:

$$F_{0(i_{min})} = 6133,4 \text{ Н} < F_0 = 9200 \text{ Н}$$

$$F_{ц(i_{min})} = 18150 \text{ Н} > F_{ц} = 8081,3 \text{ Н}$$

Суммарная сила удара резцов об объект при минимальном передаточном отношении $i_{min} = \frac{2}{3}$ определяется по формуле

$$F_{\Sigma i_{min}} \approx \sqrt{F_{0(i_{min})}^2 + F_{ц(i_{min})}^2} \approx \sqrt{6133,4^2 + 18150^2} = 19158,3 \text{ Н}$$

Исходя из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:
 $F_{\Sigma i_{min}} = 19158,3 \text{ Н} > [F] = 12500 \text{ Н}$, следовательно, суммарной силы удара резцов об объект для барабанной фрезы с некруглыми колесами в приводе будет достаточно для разрушения объекта.

$F_{\Sigma i_{min}} = 19158,3 \text{ Н} > F_{\Sigma} = 12245,3 \text{ Н}$, что подтверждает возможность увеличения силы удара.

Исходя из данных расчётов можно сделать следующие выводы: максимальная сила удара увеличилась относительно ударной силы прототипа, но центробежная сила имеет ещё более выраженный синусоидальный характер.

Дальнейшее развитие исследований может быть направлено на оптимизацию геометрических параметров некруглых колес и изучение влияния различных факторов на динамику процесса разрушения, что откроет дополнительные возможности для повышения эффективности работы барабанных фрез в горнодобывающей отрасли. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения предложенной технологии в производственный процесс и открывают новые перспективы для совершенствования навесного оборудования землеройной техники.

Список литературы

1. Global Excavator Drum Cutters Market Size By Type (Rotary Drum Cutters, Vertical Drum Cutters), By Application (Tunnel, Municipal Pipeline, Road, Mining, Forestry, Other), By Geographic Scope, And Future Trends Fore-cast // Market research intellect. URL: <https://www.marketresearchintellect.com/product/excavator-drum-cutters-market/> (дата обращения 20.12.2025).
2. Заявка на патент № 2023131293. Барабанная фреза. Заявитель: Либерман Я.Л., Лукашук О.А., Маалаоуи Х.; опубл. 30.11.2023.

УДК 622.2

УВЕЛИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КОМБАЙНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Д.А. Лосев¹, аспирант, Д.А. Ситников², аспирант, И.Х. Тюбеев², аспирант,
Д.И. Шишлянников², д.т.н., профессор

¹ АО «ВНИИ ГАЛУРГИИ», г. Санкт-Петербург, РФ

² ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, РФ

Приведены основные сведения о работе механизированных комбайновых комплексов (МКК), применяемых на предприятиях Российской Федерации по добыче и переработке калийных руд. Обоснована актуальность задачи поиска решений по увеличению эксплуатационной производительности МКК. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению времени производительной работы машин МКК с использованием переносных регистраторов параметров работы. Проведен анализ опытных результатов и сопоставление их с методическими исследованиями типовых алгоритмов расчета. Предложены и обоснованы решения, повышению времени производительной работы машин, входящих в состав МКК.

Ключевые слова: добыча калийной руды, механизированный комбайновый комплекс, проходческо-очистной комбайн, шахтный самоходный вагон, коэффициент производительной работы, бункер-накопитель, ленточный конвейер, рудоспуск

INCREASING THE PRODUCTIVE WORK TIME OF MECHANIZED COMBINE COMPLEXES IN POTASH MINES

D.A. Losev, D.A. Sitnikov, I.K. Tyubeev, D.I. Shishlyannikov

The basic information about the operation of mechanized combine complexes (MCC) used at enterprises of the Russian Federation for the extraction and processing of potash ores is given. The relevance of the task of finding solutions to increase the operational productivity of the MCC is substantiated. The results of experimental studies on determining the time of productive operation of MCC machines using portable operation parameter recorders are presented. The experimental results are analyzed and compared with methodological studies of standard calculation algorithms. Solutions are proposed and justified to increase the productive operation time of MMC's machines.

Keywords: potash ore mining, mechanized combine complex, sinking and cleaning combine, shuttle-wagon, productivity coefficient, storage hopper, conveyor belt, ore discharge

Горные предприятия России, осуществляющие добычу калийной руды подземным способом, широко применяют камерную систему разработки продуктивных пластов с использованием механизированных комбайновых комплексов, в состав каждого из которых традиционно входит проходческо-очистной комбайн, бункер-перегрузатель и шахтный самоходный вагон (ШСВ). Принятая система отработки обуславливает потери времени производительной работы МКК в виду особенности цикличной работы шахтных самоходных средств [1-3].

В этой связи, актуальной является задача разработки решений по увеличению времени производительной работы МКК при ведении проходческо-добычных работ в условиях калийных рудников.

Для определения времени производительной работы машин МКК на одном из рудников Верхнекамского месторождения были проанализирова-

ны полученные в ходе 72-часового опытного наблюдения данные с использованием регистратора параметров работы приводных двигателей «ВАТУР», установка которого осуществлялась в магнитные станции комбайна «Урал-20Р» и самоходного вагона 10BC15 [1].

На рисунке 1 графически отображено изменение коэффициентов производительной работы рассматриваемых горных машин при отбойке руды от забоя полным сечением исполнительного органа (ИО) комбайна, а также в режиме подрубки пласта.

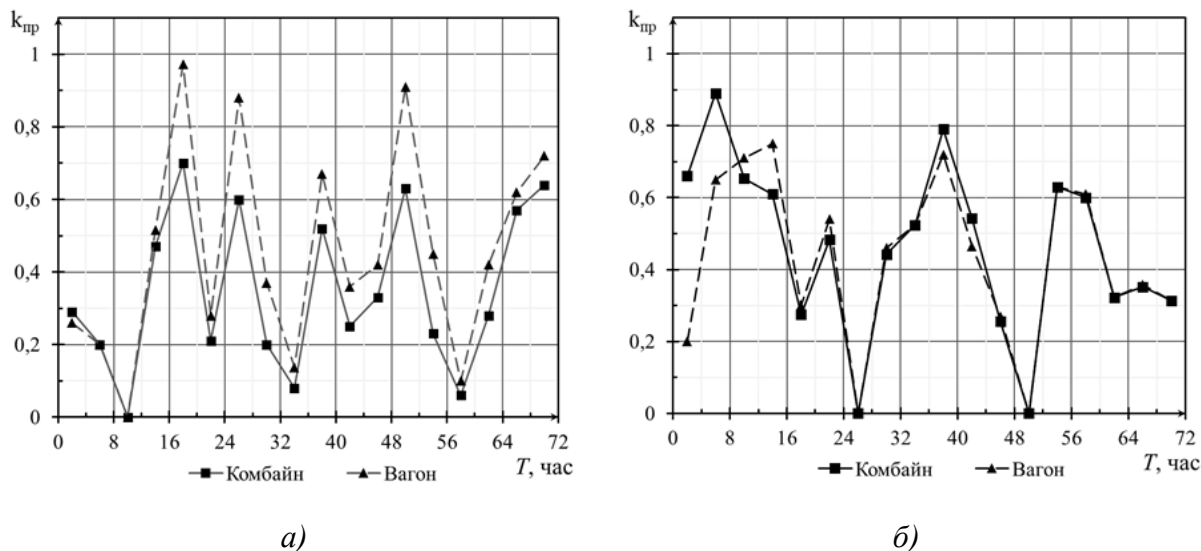


Рис. 1. Изменение коэффициента производительной работы $k_{п.р.}$ оборудования МКК при режимах работы комбайна: а – «сплошной забой», б – «подрубка пласта»

Величины коэффициентов производительной работы в период функционирования МКК в течение первых восьми часов составили $k_{п.р.к.} = 0,29$ и $k_{п.р.в.} = 0,26$ соответственно (рисунок 1, а). В таком случае производительность МКК будет ограничиваться производительностью комбайна. Дальнейшая дистанция ведения проходческо-добычных работ сплошным забоем в течение рассматриваемого 72-часового периода показывает превосходство в производительной работе ШСВ.

Значения коэффициентов производительной работы при работе МКК вторым ходом (рисунок 1, б), как и в режиме работы полным сечением ИО, на старте проходки имеют относительно схожий характер друг относительно друга: $k_{п.р.в.} = 0,2$ у ШСВ и $k_{п.р.к.} = 0,66$ у комбайна, а с дальнейшим отдалением рабочей площади забоя характеризуются близкими друг к другу значениями $k_{п.р.в.} = 0,54...0,75$ и $k_{п.р.к.} = 0,48...0,79$.

В ходе экспериментальных наблюдений установлено, что существенные временные потери были обусловлены простоями конвейерных линий. Следующим фактором, существенно снижающим величину коэффициента производительной работы комбайна в ходе ведения очистных работ, что подтверждается как опытно, так и исследованиями алгоритмов расчета производительности МКК [4], является увеличение расстояния доставки руды.

Увеличение времени производительной работы МКК и всего проходческо-добычного комплекса возможно посредством установки над ру-

доспускными скважинами бункеров-дозаторов, позволяющих не только разово разгрузиться ШСВ, но и продолжать работу МКК при остановках конвейерных линий (рисунок 2).

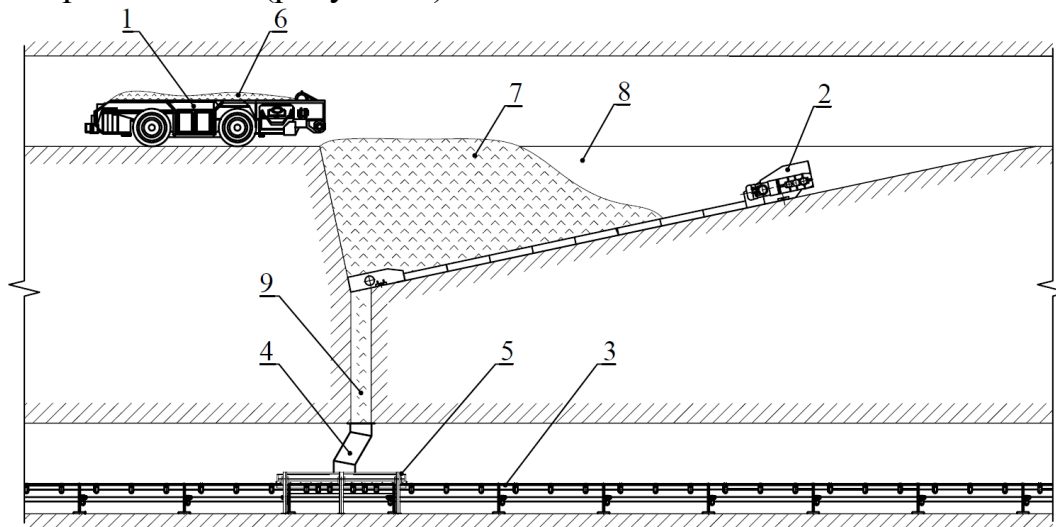


Рис. 2. Схема аккумулярования и дозированной подачи руды из бункера-накопителя на ленточный конвейер: 1 – шахтный самоходный вагон; 2 – скребковый конвейер; 3 – ленточный конвейер; 4 – точка; 5 – загрузочное устройство; 6 – транспортируемая руда; 7 – аккумуляруемая руда; 8 – бункер-накопитель; 8 – рудоспуск

Одним из возможных решений, направленных на компенсацию величины коэффициента производительной работы комбайна $k_{п.р.к.}$ при увеличении расстояния доставки, является использование второго ШСВ в составе МКК. Стоит отметить, что применение данного решения целесообразно при наличии условий для свободной разминовки вагонов, например, за счет реализации дополнительных ниш или сбоек.

Перспективным направлением является применение средств конвейерного транспорта, позволяющее шахтной самоходной машине разгружаться в пределах доставки руды, при которой реализуется непрерывная работа комбайна. Предлагаемое технологическое решение (рисунок 3) предусматривает проведение сбойки забойной камеры с ранее пройденной и установку в них конвейеров [5].

Анализ типовых алгоритмов расчета производительности механизированных комбайновых комплексов, а также сопоставление их с экспериментальными данными показывают необходимость комплексного подхода к определению факторов, негативно влияющих на эффективность работы горных машин, функционирующих в составе МКК. Приведенные в статье решения могут позволить повысить время производительной работы механизированных комбайновых комплексов, работающих в условиях калийных рудников.

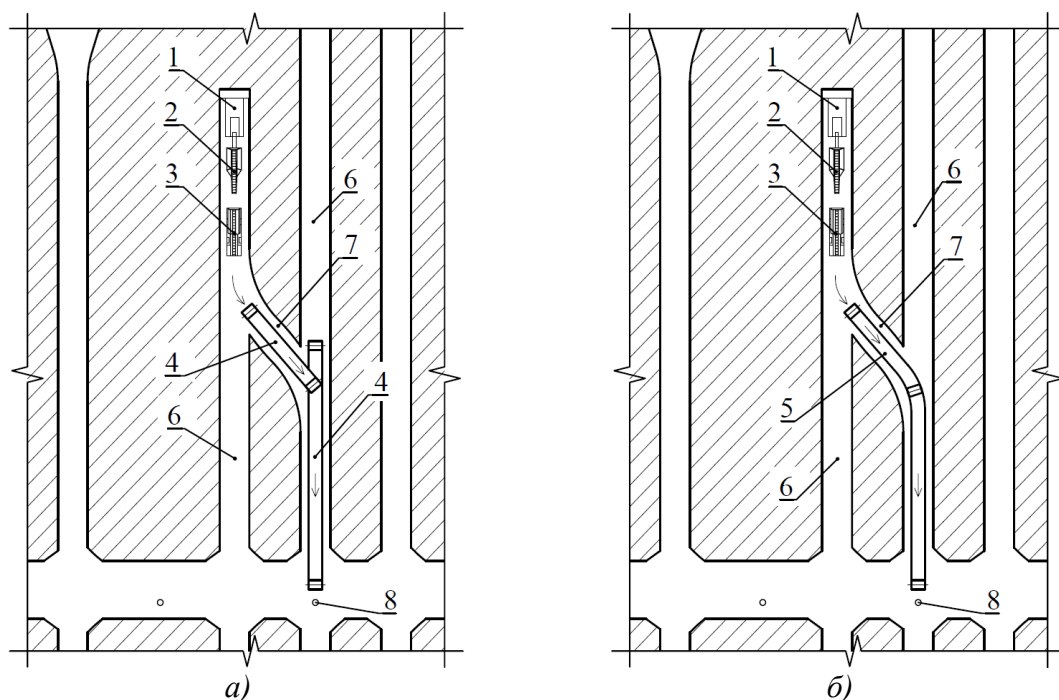


Рис. 3. Схема применения средств конвейерного транспорта для разгрузки шахтного самоходного вагона в пределах очистной камеры: а – с использованием двух конвейеров; б – с использованием изгибающегося конвейера; 1 – проходческо-очистной комбайн; 2 – бункер-перегрузчик; 3 – самоходный вагон; 4 – конвейер; 5 – конвейер изгибающийся; 6 – очистная камера; 7 – межкамерная сбойка; 8 – рудоспуск

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишлянников Д. И. Совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов функционирования: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет". – СПб., 2021. – 42 с.
2. Басалай Г.А. Оценка запаса устойчивости очистных комбайнов на ставе забойного конвейера в рабочем режиме // Горная механика и машиностроение, № 2, 2019. – С. 54-64
3. Басалай Г.А. Перспективные варианты приводов соосных роторов проходческих комбайнов. // Горное оборудование и электромеханика, № 10 (РФ), 2010. – С. 2-7
4. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит» / ОАО «Галургия». – Новосибирск: Наука, 2011. – 487 с.
5. Пат. RU 2817486 С1 МПК E21C41/20. Способ разработки пологих пластов калийных солей комбайновыми комплексами / Д. И. Шишлянников, Д. А. Ситников, А. В. Сенькин, Д. А. Лосев, И. Х. Тюбеев. № 2024102121; заявл. 29.01.2024; опубл. 16.04.2024. Бюл. № 14. – 7 с.

УДК 622.24

ОЦЕНКА СЛОЙНОСТИ УРАВНОВЕШЕННОГО ЧЕТЫРЕХСАТЕЛЛИТНОГО ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО РОБОТА

И.В. Максимов¹, М.И. Верховский¹

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, РФ

Роботизированные проходческие и буровые комплексы предъявляют повышенные требования к ресурсу и вибронегативности приводов исполнительных органов. Для снижения неравномерности нагрузок и износа перспективны уравновешенные многосателлитные планетарные передачи. Рассмотрен уравновешенный четырехсателлитный планетарный механизм по патенту РФ №229267, в котором четыре сателлита передают движение выходному звену одинаковым образом, обеспечивая равномерное распределение нагрузки и увеличение срока службы. Снижение слойности достигается конструктивным совмещением шарниров в одном слое.

Ключевые слова: планетарный механизм, динамическое уравновешивание, слойность, проходческий робот.

ASSESSMENT THE LAYERING OF A BALANCED FOUR-PLANET PLANETARY MECHANISM FOR A TUNNELING ROBOT ACTUATOR

I.V. Maksimov, M.I. Verkhovskiy

Robotic tunneling and drilling complexes impose strict requirements on service life and vibration of actuator drives. Balanced multi-planet planetary transmissions are promising for reducing load non-uniformity and wear. This paper considers the balanced four-planet mechanism described in RU patent No. 229267, where all four planets transmit motion to the output link in the same manner, ensuring uniform load sharing and longer life. Layering is reduced by combining hinges in one layer.

Keywords: planetary mechanism, dynamic balancing, layering, tunneling robot.

Введение

Проходческие роботы для бурения и разрушения породы предъявляют повышенные требования к компактности и виброустойчивости планетарной передачи. В ряде конструкций приводные узлы выполняются на базе планетарных передач. Одним из примеров использования планетарных передач в проходческих роботах является конструкция, в которой планетарный механизм устанавливается в буровой головке для вращения породоразрушающего инструмента. Для таких узлов характерны высокие нагрузки, поэтому задача повышения ресурса и надежности привода головки становится определяющей при проектировании. При этом уравновешенные многосателлитные схемы потенциально позволяют равномерно распределять нагрузку между несколькими сателлитами, что также положительно сказывается на ресурсе машины [1].

Конструкция уравновешенного четырехсателлитного механизма (по патенту РФ №229267)

Полезная модель относится к планетарным зубчатым механизмам с неподвижным центральным колесом и сателлитами, имеющими подвижные геометрические оси [2]. Технический результат — уменьшение износа

сателлитов за счет равномерного распределения нагрузки, поскольку все сателлиты передают крутящий момент от ведущего центрального колеса на выходное звено одинаковым образом. В предложенной схеме четыре сателлита расположены под углами 90° друг к другу, а связь между ними и водилом реализована тремя трехшарнирными рычагами, выполненными симметрично относительно центральной оси: два рычага имеют форму полуколец (радиус равен межосевому расстоянию), третий — форму квадрата (диагональ равна двум межосевым расстояниям), при этом центр квадрата находится на оси механизма. Водило выполнено в виде стержня, длина которого также равна двум межосевым расстояниям механизма.

Оценка слойности и пути ее уменьшения

Слойность характеризует количество параллельных слоев, в которых могут быть размещены вращательные кинематические пары [3]. Для самоустанавливающихся планетарных механизмов с рычажными звеньями максимальное число слоев рассчитывают по зависимости:

$$f_{max} = p_5 - k + 1,$$

где p_5 — число шарниров (кинематических пар пятого класса); k — число сателлитов.

В настоящее время формула применима для планетарных передач, поскольку фактически все рычажные звенья вращаются вокруг неподвижной центральной оси, что дает возможность размещать несколько шарниров, а также вместе с ними и трехшарнирные рычаги в один слой. Следовательно, задача компоновки сводится к снижению фактического числа слоев (по сравнению с максимальным) за счет рационального расположения шарниров и рычажных звеньев.

Снижение слойности достигается конструктивными приемами, продемонстрированными на примере трехсателлитного механизма:

- совмещение некоторых шарниров в одном слое;
- установка шарнира в пространстве между сателлитами;
- размещение в одном слое нескольких вращательных пар.

При переносе этих приемов на четырехсателлитную схему целесообразно стремиться к максимальному совмещению осей шарниров рычажной системы и исполнению трехшарнирных рычагов в одном слое, чтобы уменьшить осевые габариты планетарного редуктора (рис. 1).

Интеграция в исполнительный орган проходческого робота

Применение планетарных механизмов в качестве исполнительного органа робота-бурильщика (рис. 2) позволяет, при установке режущего инструмента на сателлиты с эксцентриситетом относительно их геометрической оси, осуществлять разрушение породы по всей поверхности забоя. При компоновке уравновешенного четырехсателлитного механизма важен малый диапазон перемещений самоустанавливающихся звеньев: в этом случае звенья фактически могут быть расположены вплоть до одного слоя, а результатом компоновки будет служить установление предельных габаритов рабочего органа.

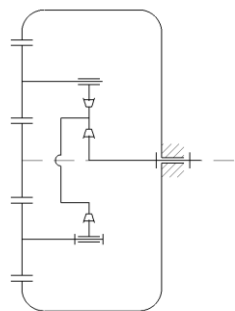


Рис. 1 Схема компоновки четырехсателлитного планетарного механизма (составлено авторами)

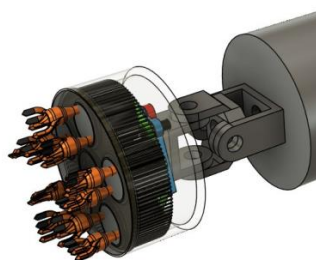


Рис. 2 Модель робота с уравновешенным четырехсателлитным планетарным механизмом (составлено авторами)

Дополнительно создается возможность варьирования формы «квадратного» рычага при его размещении в разных слоях при условии сохранения расположения центра масс на оси редуктора. Так, исполнение третьего трехшарнирного рычага в «квадратной» форме необходимо лишь в том случае, когда его необходимо располагать в одном слое с первым и вторым трехшарнирными рычагами. В остальных же случаях возможно исполнение этого рычага в различных формах, например, в форме кольца (рис. 3).

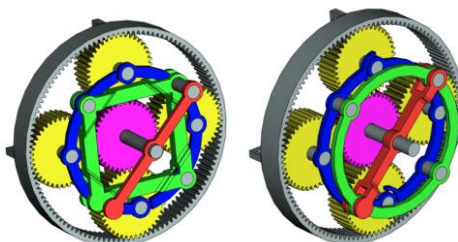


Рис. 3 Варианты исполнения планетарного механизма (составлено авторами)

Заключение

Показано, что в приводе буровой головки проходческого робота применение уравновешенного четырехсателлитного планетарного механизма обеспечивает равномерное распределение нагрузки по сателлитам и уменьшение их износа. Структурная оценка даёт верхнюю границу слойности $f_{\max}=6$, но использование симметричных рычажных звеньев, совмещения осей шарниров и трехпарных шатунов позволяет перейти к мало-слойной компоновке и сократить габариты планетарного редуктора. Предложенный подход задаёт технологически реализуемый путь к внедрению уравновешенных многосателлитных планетарных механизмов в компактные роботизированные проходческие системы.

Список литературы

1. Дворников Л. Т., Дмитриев В. В. Проблема избыточных связей в планетарных зубчатых механизмах и ее разрешение // Известия ТПУ. 2010. №2. – С. 13-15.
2. Патент № 229267 РФ, МПК F16H 1/48. Уравновешенный четырехсателлитный планетарный механизм / Жуков И.А., Филипенко И.А., Максимов И.В. - №2024120014 приоритет от 17.07.2024; опубл. 30.09.2024, Бюл. №28.
3. Андреева Я. А., Жуков И. А. Решение проблемы слойности многосателлитных самоустанавливающихся планетарных механизмов // Вестник КузГТУ. 2013. №1. – С. 65-68.

УДК 622.233.05

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ РАСШИРИТЕЛЕЙ ОБРАТНОГО ХОДА ДЛЯ БУРЕНИЯ ВОССТАЮЩИХ СКВАЖИН

Л.Е. Маметьев¹, А.А. Хорешок¹, А.Ю. Борисов¹, О.А. Алиткина¹

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,

Представлена поэтапная разработка конструктивных схем расширителей обратного хода для бурения восстающих скважин, повышающих эффективность процессов гравитационного истечения продуктов разрушения в восстающую пионерную скважину при разбуривании обратным ходом до требуемого диаметра дисковым инструментом со ступенчатой схемой разрушения забоя.

Ключевые слова: буровой станок, редуктор, расширитель, забурник, резец, диск, фонарь, штанга, шнек, бурение, скважина.

CONSTRUCTIVE SCHEMES OF EXPANDERS REVERSE GEAR FOR DRILLING RISING WELLS

L.E. Mametyev, A.A. Khoreshok, A.Yu. Borisov, O.A. Alitkina

A step-by-step development of design schemes for reverse flow expanders for drilling rising wells is presented, which increase the efficiency of the processes of gravitational outflow of fracture products into a rising pioneer well when drilling in reverse to the required diameter with a disk tool with a stepwise bottom hole destruction scheme.

Keywords: drilling machine, gearbox, expander, drill bit, cutter, disc, stabilizer, rod, auger, drilling, borehole.

На кафедре горных машин и комплексов КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева накоплен огромный опыт по разработке, испытанию и совершенствованию расширителей обратного хода. Каждое последующее техническое решение позволило решать как технологические, так и технические вопросы.

Одним из актуальных вопросов является повышение эффективности процессов гравитационного истечения продуктов разрушения в восстающую пионерную скважину при разбуривании обратным ходом. Для решения данного вопроса предложена поэтапная разработка конструктивных схем расширителей обратного хода для бурения восстающих скважин с углом наклона к горизонту от 45° до 90°.

На первом этапе разработано базовое техническое решение по патенту РФ 189655 (рис. 1), содержащее: секционный штанговый буровой став 1, промежуточный опорный фонарь 2, приводную шлицевую штангу-проставку 3, шестерню 4, шлицевую втулку-проставку 5, гаечное резьбовое соединение 6, подшипниковые опоры 7, корпус редуктора 8, оформленный овально-ромбической формой, опорно-центрирующие лыжи 9, выполняющие роль опорного фонаря-стабилизатора, промежуточное зубчатое колесо 10, шлицевую ось 11, подшипниковые опоры 12, выходное зубчатое колесо 13, нижнюю шлицевую секцию 14 с учетом длины l_n , опережающую многолучевую коронку 15, содержащую резцы и забурник 16. В области верхней части l_v размещены: замковый вкладыш 17, верхняя шлицевая секция 18, многолучевой ступенчатый корпус 19 с дисковым инструментом 20 [1], задний опорный фонарь 21 с крепежным винтом 22. При этом секционный штанговый буровой став 1, а также нижняя 14 и верхняя 18 шлицевые сек-

ции расположены по отношению друг к другу на расстоянии l .

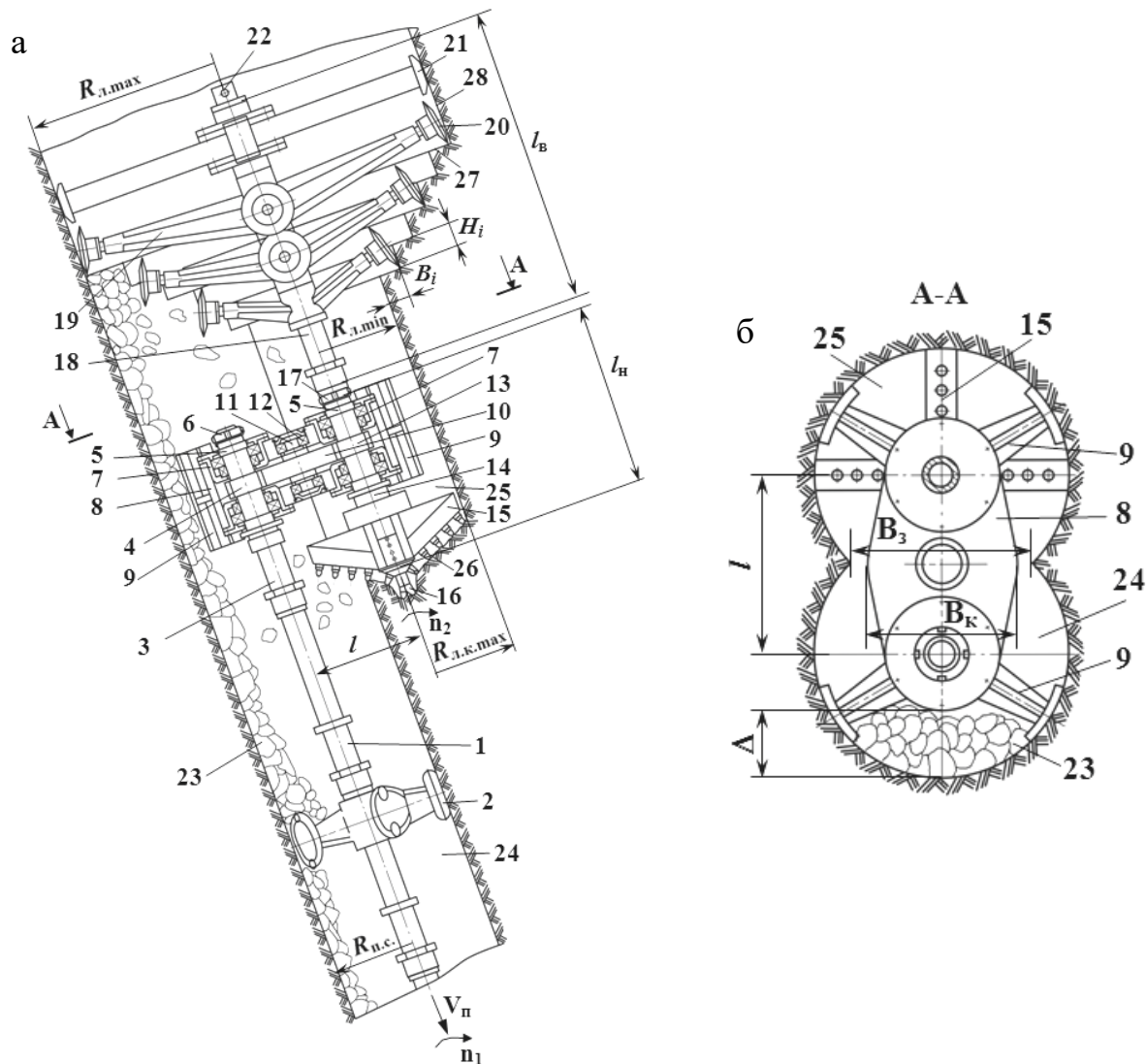


Рис. 1. Конструкция расширителя обратного хода:
а – общий вид; б – корпус редуктора

Дисковый инструмент 20 многолучевого ступенчатого корпуса 19 формирует луч с максимальным радиусом $R_{л. \max}$, складывающийся из расстояния l и радиуса пионерной скважины $R_{п.с.}$. К тому же луч минимального радиуса $R_{л. \min}$ имеет ограничение относительно луча с максимальным радиусом $R_{л.к. \max}$ по отношению к опережающей многолучевой коронке 15.

Редуктор 8 имеет корпус шириной B_k , что позволяет размещать его в пространстве шириной B_z . Данное пространство формируется за счет перекрытия пионерной 24 и опережающей 25 восстающих скважин, размещенных параллельно. К тому же образуется зазор Δ , обеспечивающий прохождение разрушенной горной массы 23 между поверхностями корпуса редуктора 8 и пионерной восстающей скважины 24 в области с размещенными опорно-центрирующими лыжами 9. Тем самым, разрушенная горная масса 23 истекает по направлению вдоль наклонной поверхности пионерной восстающей скважины 24.

Опережающая многолучевая коронка 15 размещается в пространстве опережающей восстающей скважины 25, посредством резцов и забурника 16 обеспечивается силовое взаимодействие с поверхностью забоя 26.

Для ступенчатого забоя 27 расширяемой скважины характерны следующие параметры: радиус R_i , определяющий траекторию перемещения дискового инструмента 20 вдоль уступа расширяемой скважины; высота уступа H_i ; шаг разрушения B_i .

В итоге, разработанное техническое решение позволяет бурить восстающие скважины с последующим их разбуриванием дисковым инструментом до необходимого диаметра с формированием ступенчатой схемы разрушения забоя.

Следующим направлением в научных исследованиях явились разработки технических решений (рис. 2), способствующие улучшению истечения разрушенной горной массы в область пионерной восстающей скважины.

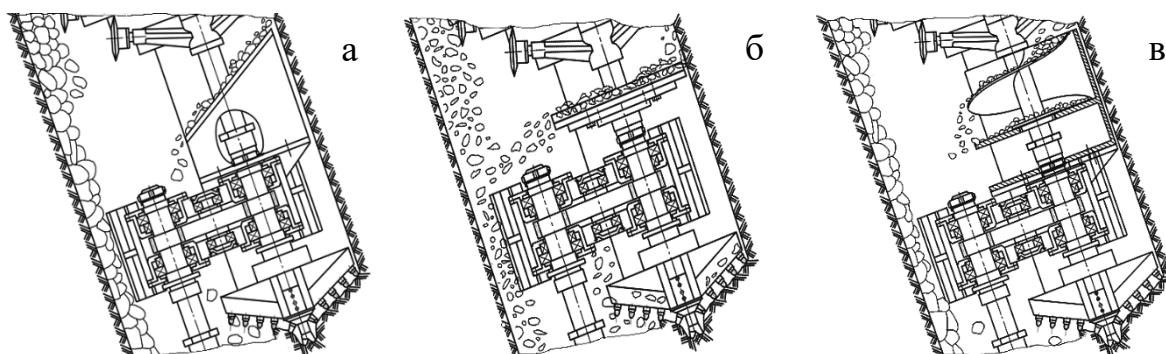


Рис. 2. Перегрузочные устройства расширителя:

а – перегрузочный щит; б – разборный диск; в – шнековая спираль с лотком

На втором этапе разработано техническое решение по патенту РФ 217329 (рис. 2, а), включающее в себя устройство в виде перегрузочного щита, который жестко зафиксирован сверху наружной поверхности корпуса редуктора. Перегрузочный щит состоит из: нижнего крепежного основания, верхнего наклонного плоского перекрытия и тонкостенной цилиндрической стойки, которые жестко зафиксированы между собой. К тому же перегрузочный щит размещен таким образом, что его внутреннее пространство позволяет насквозь свободно размещать в нем приводную шлицевую штангу-проставку с квадратным буртиком. Разрушенная горная масса под действием гравитации разделяется на потоки, истекая с каждого уступа ступенчатого забоя, затем проходит по наружной поверхности наклонного плоского перекрытия, далее в область рабочей поверхности пионерной скважины с последующим выходом к ее устью.

При этом следует отметить недостатки, присущие данному техническому решению в процессе работы. Конструкция перегрузочного щита является сложной, имеет большие габариты. Тем самым повышается трудоемкость операций при монтаже и демонтаже в рабочем пространстве буровой машины.

На третьем этапе разработано техническое решение по патенту РФ 222574 (рис. 2, б), обеспечивающее иной подход при реализации перегрузочных операций. Устройство оформлено как разборный в осевом направлении диск, жестко зафиксированный на квадратном буртике приводной шлицевой штанги-проставки. Диск включает в себя нижнюю и верхнюю

части, которые жестко прикреплены друг к другу благодаря потайным штифтовым и винтовым соединениям. Верхняя часть состоит из наружных погружных дугообразных лопастей. При вращении диска с лопастями наблюдается воздействие центробежных и гравитационных сил, что приводит к процессу разгрузки продуктов разрушения в область восстающей пионерной скважины прямого хода.

В итоге, представленное техническое решение обеспечивает: простоту конструкции погружного устройства; повышение эффекта при гравитационном истечении разрушенной горной массы в пространство восстающей пионерной скважины в процессе разбуривания расширителем обратного хода; снижение трудоемкости операций при монтаже и демонтаже в рабочем пространстве буровой машины.

На четвертом этапе разработано техническое решение по патенту РФ 2855993 (рис. 2, в), включающее в себя устройство в виде шнековой спирали, жестко прикрепленной к наружной поверхности приводной штанги-проставки, которые размещены внутри загрузочно-разгрузочного лотка.

Реализация данного технического решения позволит упростить конструкцию перегрузочного устройства, повысить эффективность гравитационного истечения продуктов разрушения в пионерную восстающую скважину при разбуривании расширителем обратного хода, снизить трудоемкость монтажно-демонтажных операций в рабочем пространстве бурового станка.

Таким образом, представленные выводы, полученные на базе рассмотренных технических решений, позволят продолжить научные исследования в рамках разработки и совершенствования конструкций перегрузочных устройств для расширителей обратного хода при бурении восстающих скважин.

Список литературы

1. Проходческие комбайны со стреловидным исполнительным органом. Часть 3. Выбор и обоснование рабочих параметров двухкорончатых реверсивных исполнительных органов: монография / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин и др.; Кузбасский государственный технический университет, Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 136 с.

УДК 621.878.6

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛОВ БУЛЬДОЗЕРОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Д.С. Москвина¹, студ., С.Ю. Кувшинкин¹, канд. техн. наук, доцент

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, РФ

В тексте рассматриваются особенности выбора конструкции отвала бульдозера. Описываются факторы, влияющие на эффективность работы оборудования. Приведены методики расчета производительности бульдозеров. Рассматриваются различные конфигурации профилей отвалов. Особое внимание уделяется расчёту призмы волочения для оценки производительности бульдозеров.

Ключевые слова: выемочно-транспортирующая машина, бульдозер, отвал, профиль, призма волочения, производительность, конструкция, выработка.

ANALYSIS OF THE DESIGN PARAMETERS OF BULLDOZER DUMPS AND THEIR IMPACT ON PRODUCTIVITY

D.S. Moskvina, S.Yu. Kuvshinkin

The text discusses the specifics of choosing a bulldozer blade design. The factors affecting the efficiency of the equipment are described. The methods of calculating the productivity of a bulldozer are given. Various configurations of dump profiles are considered. Special attention is paid to the calculation of the drawing prism to evaluate the performance of bulldozers.

Keywords: excavation and conveying machine, bulldozer, blade, profile, dragging prism, productivity, design, production.

Среди выемочно-транспортирующих машин бульдозеры занимают одно из ведущих мест в горнодобывающей промышленности, строительстве и других областях, где требуется выполнение разнообразных земляных и вспомогательных операций. Для осуществления работ по срезанию и перемещению грунта бульдозер снабжен специализированным рабочим оборудованием – отвалом, его рамой и устройствами управления положением отвала [1, с.6]. В зависимости от условий эксплуатации и свойств разрабатываемой породы применяются отвалы различной конструкции.

Существует множество видов бульдозерных отвалов, различающихся по форме и назначению. К ним относятся прямой поворотный и неповоротный отвалы, сферический и полусферический неповоротные отвалы, а также специализированные.

Выбор конструкции отвала для бульдозера – это сложная задача, которая требует внимательного анализа и учета множества параметров. Основными факторами, которые влияют на то, насколько надежной будет конструкция машины и рациональной в использовании, являются:

1. Свойства разрабатываемого грунта – определяют условия работы и необходимые требования к оборудованию. Так, при работе с более крепкими породами следует предусмотреть конструктивные элементы повышенной прочности.

2. Климатические условия, при которых будет эксплуатироваться оборудование. Например, при работе в условиях высоких температур эле-

менты отвала следует изготавливать из материалов, устойчивых к тепловым деформациям.

3. Характеристики базового трактора или тягача, включающие в себя мощность двигателя, грузоподъемность, размеры и вес машины. Данные параметры непосредственно влияют на массу и геометрию бульдозерного оборудования.

4. Материалы, из которых изготовлен отвал. Выбранный материал не должен быстро изнашиваться, ржаветь и его использование должно быть экономически целесообразным.

5. Требуемый объем выработки, напрямую зависящий от величины призмы волочения отвала.

В зависимости от вида работ эксплуатационную производительность бульдозера определяют по соответствующим зависимостям. Ключевым конструктивным параметром, влияющим на эффективность выполнения планировочных работ, является длина бульдозерного оборудования, так как её значение непосредственно определяет ширину полосы прохода. При резании и перемещении породы производительность рассчитывается следующим образом [2, с.296]:

$$Q_э = 3600V_в \frac{K_в K_н}{T_ц K_p},$$

где $V_в$ – фактический объем призмы волочения, $м^3$; $K_в = 0,85 \dots 0,9$ – коэффициент использования бульдозера по времени; $K_н = 0,9 \dots 1,15$ – коэффициент наполнения; $T_ц$ – продолжительность цикла, с; $K_p = 1,2, \dots 1,35$ – коэффициент разрыхления.

На энергоёмкость процесса формирования призмы волочения оказывают наибольшее влияние высота отвала H , кривизна профиля и угол резания α (рис. 1).

В случае прямых поворотных отвалов наиболее эффективным считается конфигурация с постоянным радиусом кривизны R и углом резания 40° [2, с.301]. Наибольшая накапливающая способность неповоротных отвалов обеспечивается отвальной поверхностью переменной кривизны с радиусом уменьшающимся книзу, однако ввиду сложности выполнения профиль не получит широкого распространения. С точки зрения технологичности наиболее рациональным профилем неповоротного отвала является отвал, радиус кривизны которого равен высоте отвала.

Призма волочения (рис. 2) представляет собой объём грунта, перемещаемый бульдозером перед отвалом за один рабочий цикл. Данный параметр является ключевым показателем для расчета производительности бульдозера, поскольку его увеличение прямо пропорционально повышению потенциальной выработки при прочих неизменных условиях.

Объем призмы волочения отвала согласно ГОСТ 29295-92 в общем случае можно рассчитать по следующей формуле [3, с.3]:

$$V_в = 0,8WH^2 + ZH(W - Z)tg\alpha,$$

где W – длина отвала, м; H – эффективная высота отвала, м; Z – длина боковой части отвала, м; α – угол установки боковой части отвала, град.

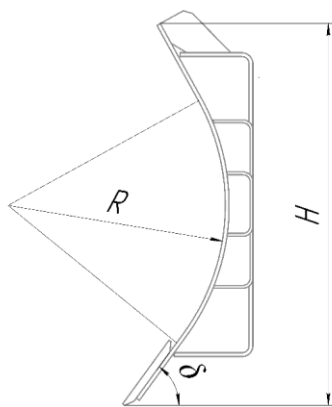


Рис. 1 Форма профиля отвала бульдозера

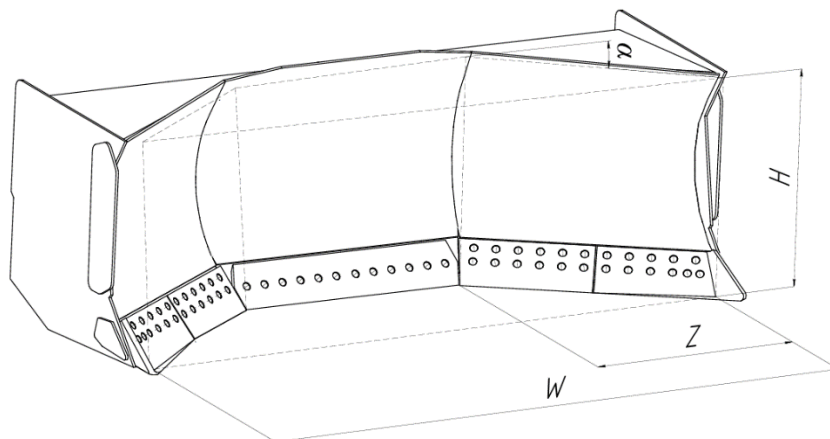


Рис. 2 Эффективный контур сферического отвала

Так как у *прямых отвалов* боковая часть отсутствует, то есть $\alpha = 0^\circ$, формула принимает вид:

$$V_B = 0,8WH^2.$$

Таким образом, посредством изменения геометрических параметров отвала можно регулировать объем призмы волочения, что, в свою очередь, способствует повышению производительности бульдозера.

Однако по мере срезания слоя породы и увеличения призмы волочения возрастает сопротивление перемещению бульдозера [4, с.211]. Важно учитывать, что суммарное сопротивление на ноже бульдозера при копании и перемещении породы не должно превышать номинального тягового усилия базовой машины.

Выбор рациональной конструкции отвала бульдозера является актуальной задачей, которая влияет на эффективность и производительность работы машины. Проведение обзора и систематизации знаний о существующих конструктивных особенностях бульдозерного оборудования и их влиянии на производительность являются важным этапом для дальнейшего проектирования новых моделей отвалов и повышения эффективности работы машин в специфических условиях.

Список литературы

1. ГОСТ ISO 6747—2018. Машины землеройные. Бульдозеры. Термины, определения и технические характеристики для коммерческой документации: межгосударственный стандарт: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 02.12.2020 №1230-ст: введен взамен ГОСТ 29194-91 (ИСО 6747-88) : дата введения 2021-07-01 / подготовлен ООО «ИЦ «ЦНИП СДМ». - Москва: Стандартинформ, 2018. – 32 с.
2. Фрейнкман, И.Е. Землеройные машины. 2-е изд. / И.Е. Фрейнкман, В.К.Л. Ильгисонис. – Санкт-Петербург: Издательство «Машиностроение», 1972. – 320 с.
3. ГОСТ 29295-92 (ИСО 9246—88). Машины землеройные. Бульдозерные отвалы к гусеничным и колесным тракторам. Расчет объема призмы волочения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 05.02.92 №107 : введен впервые : дата

введения 1992-02-05 / подготовлен Министерством тяжелого машиностроения. - Москва: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 7 с.

4. Подэрни, Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ: Учебное пособие. В 2 т. Т. 2. – 4-е изд., стер. – М.: Издательство Московского государственного университета, 2001. – 332 с.

УДК 621.879.31

РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА ТИПА «ОБРАТНАЯ ЛОПАТА» С РЕГУЛИРУЕМЫМ УГЛОМ РЕЗАНИЯ ЗУБЬЯМИ КОВША

А.К. Муравский¹, Д.Б. Ковалевский¹, Р.В. Разорвин¹, К.Д. Ложкин¹
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

В статье рассмотрена конструкция рабочего оборудования гидравлического экскаватора типа «обратная лопата» с возможностью регулирования угла резания зубьями ковша в процессе копания породы. Рабочее оборудование содержит ковш с поворотными зубьями, положение которых влияет на угол резания зубьями ковша. При копании породы поворотные зубья могут изменять положение относительно корпуса ковша, что позволяет автоматически обеспечить оптимальный угол резания зубьями ковша. Поддержание оптимального угла резания в процессе копания повышает эффективность работы экскаватора за счет обеспечения минимальной силы сопротивления породы резанию, что положительно сказывается на энергоэффективности, производительности, надежности и технологических возможностях экскаватора.

Ключевые слова: гидравлический экскаватор, обратная лопата, процесс копания породы, зубья ковша, оптимальный угол резания.

WORKING EQUIPMENT OF A HYDRAULIC EXCAVATOR BACKHOE WITH ADJUSTABLE CUTTING ANGLE OF BUCKET TEETH

A.K. Muravskiy, D.B. Kovalevsky, R.V. Razorvin, K.D. Lozhkin

The article discusses the design of the working equipment of a hydraulic excavator backhoe with the ability to adjust the cutting angle of the bucket teeth during the process of digging rock. The working attachment includes a bucket with rotating teeth, the position of which influences the cutting angle of the bucket teeth. When digging rock, the rotating teeth can change position relative to the bucket body, automatically maintaining an optimal cutting angle for the bucket teeth during digging. Maintaining an optimal cutting angle during digging increases the efficiency of the excavator by ensuring minimal resistance to cutting rock, which has a positive effect on energy efficiency, productivity, reliability and technological capabilities of the excavator.

Keywords: hydraulic excavator, backhoe, the process of digging rock, bucket teeth, optimal cutting angle.

Мировая тенденция применения гидравлических экскаваторов в горнодобывающей промышленности показывает, что их число при производстве выемочно-погрузочных работ неуклонно растет, они постепенно заменяют механические лопаты [1-3].

Гидравлические экскаваторы, оснащенные рабочим оборудованием типа «обратная лопата» (ковш при копании движется в направлении к экскаватору), позволяют эффективно осуществлять выемочные работы ниже уровня стоянки, а также выше уровня стоянки, но в последнем случае с меньшей эффективностью, чем экскаваторы с прямой лопатой [4-6].

Использование гидравлического привода для перемещения звеньев рабочего оборудования экскаватора дает возможности реализации значительных сил на зубьях ковша, сложной траектории движения режущей

кромки ковша, что позволяет разрабатывать массив с высокой производительностью в сложных горно-геологических условиях.

При копании ковшем экскаватора осуществляется разрушение горной породы в процессе внедрения зубьев ковша в массив. Процесс взаимодействия зубьев ковша с породой характеризуется углом резания, т.е. углом между передней гранью зуба и поверхностью среза. Угол резания влияет на процесс резания, от величины этого угла зависит сопротивление породы внедрению в массив зубьев ковша. Оптимальный угол резания обычно является от 30 до 35° [7].

Процесс копания породы при оптимальном угле резания дает возможность обеспечения минимальной величины силы сопротивления массива резанию, что позволяет снизить энергопотребление процессов резания и копания, повысить производительность и надежность экскаватора, расширить технологические возможности машины за счет возможности разработки более прочных пород, что, в конечном счете, повышает эффективность работы выемочно-погрузочной машины.

На практике достаточно сложно обеспечить оптимальный угол резания при копании обычным гидравлическим экскаватором. При функционировании такого экскаватора возможно изменение угла резания в достаточно широком диапазоне, что вызывает снижение эффективности работы выемочно-погрузочной машины, особенно, если текущий угол резания существенно отличается от оптимального значения.

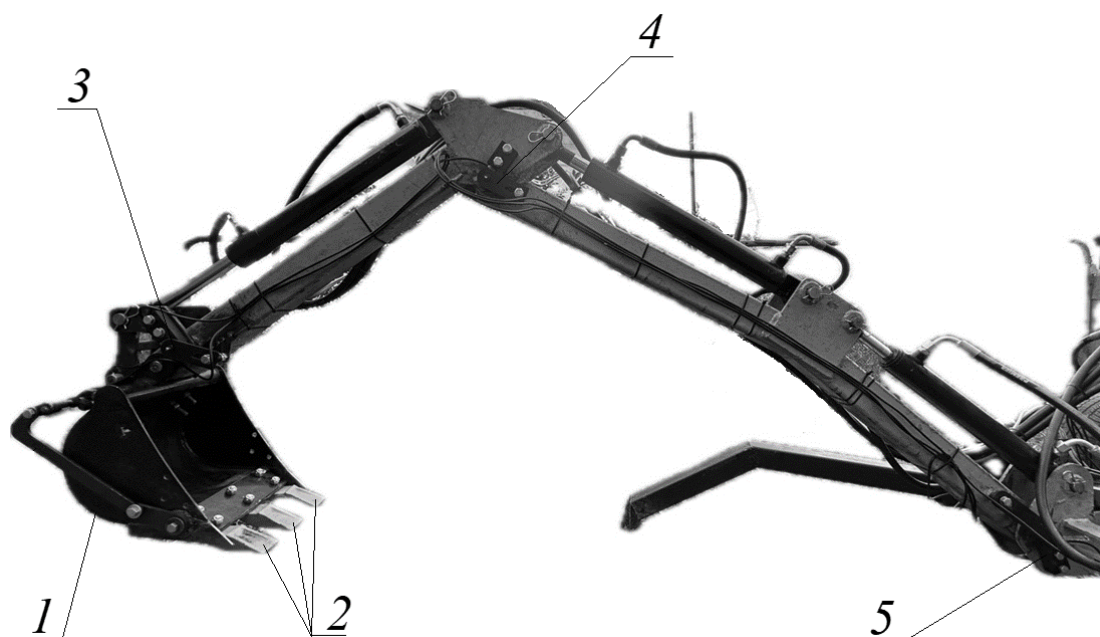


Рис. 1. Рабочее оборудование экскаватора:

1 – корпус ковша; 2 – поворотные зубья; 3, 4, 5 – датчики углового положения соответственно ковша, рукояти и стрелы

Предлагаемое рабочее оборудование экскаватора типа «обратная лопата» с регулируемым углом резания зубьями ковша позволяет автоматически обеспечить оптимальный угол резания зубьями ковша экскаватора в процессе копания. Это происходит за счет применения ковша 1 с поворотными зубьями 2, положение которых относительно корпуса ковша в процессе копания породы может изменяться на основании информации от

датчиков углового положения ковша 3, рукояти 4 и стрелы 5 (рис. 1) [4]. Для случая копания поворотом рукояти получено уравнение, позволяющее найти угол, определяющий положение поворотных зубьев относительно корпуса ковша в зависимости от требуемого оптимального угла резания [5].

Применение рабочего оборудования гидравлического экскаватора с регулируемым углом резания зубьями ковша позволяет повысить эффективность работы машины за счет возможности автоматического поддержания оптимального угла резания, что обеспечивает минимальную величину силы сопротивления породы резанию в процессе копания выемочно-погрузочной машиной.

Список литературы

1. Подэрни Р.Ю. Мировой рынок поставок современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных работ. Издательство «Горная книга», Горный информационно-аналитический бюллетень, № 2, 2015. С. 148-167.
2. Ларионов М.Д., Логиновских Д.С., Лагунова Ю.А. Особенности экскаваторов зарубежного производства / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2025. С. 102-105.
3. Макарова В.В., Лагунова Ю.А. Анализ конструктива стрелы гидравлического экскаватора / В сборнике: Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. Сборник статей. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. 2022. С. 43-45
4. Лукашук О.А. Машины для разработки грунтов. Проектирование и расчет: учебное пособие / Лукашук О.А., Комиссаров А.П., Летнев К.Ю. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. — 128 с.
5. Макарова В.В., Лагунова Ю.А., Ковязин Р.А. Разработка гидравлического экскаватора сверхтяжелого класса с системой рекуперации энергии / Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. 2021. Т. 1. С. 3-7.
6. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Рабочее оборудование экскаватора. Патент на изобретение 2721357 С1, 19.05.2020. Заявка № 2019125709 от 15.08.2019.
7. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
8. Рабочее оборудование экскаватора: пат. 2779252 Рос. Федерация, МПК E02F 3/28, E02F 3/43. / Г.Д. Трифанов, А.К. Муравский; заяв. и патентооблад. ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – № 2022103968; заявл. 16.02.2022; опубл. 05.09.2022, Бюл. № 25.
9. Муравский А.К., Ковалевский Д.Б., Разорвин Р.В., Ложкин К.Д. Рабочее оборудование гидравлического экскаватора с возможностью регулирования угла резания // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. «Горная и нефтяная электромеханика – 2025», г. Пермь, 11–13 ноября 2025 г. / под общ. ред. д-ра техн. наук Г.Д. Трифанова; ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. поли-техн. ун-та, 2025. – С. 238-244.

УДК 621.879

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

П.А. Побегайло¹ канд. техн. наук; А.Н. Ильина², канд. физ-мат. наук

¹ Независимый исследователь, Москва, РФ; ² ФГБОУВО МАИ (НИУ), Москва, РФ

В тексте поставлена, важная в практическом смысле, инженерная проблема: о том, как уменьшить время разработки проекта по созданию гидравлического экскаватора и/или его части и снизить при этом объемы потребляемых ресурсов. Предложено создать библиотеки стандартных Шаблонов и стандартных Паттернов проектирования, которые позволят избежать многократных повторений рутинных процедур при проектировании, а также значительно быстрее собирать (создавать) и автоматизировать нестандартные (новые) структурные единицы проекта (расчётные блоки). Исследование основано на ранних публикациях, связанных с созданием и развитием методологии проектирования одноковшовых гидравлических экскаваторов, а также входит в число работ связанных с разработкой основ системы экспресс диагностики карьерных одноковшовых экскаваторов, и, в частности, в области инженерных онтологий.

Ключевые слова: одноковшовый гидравлический экскаватор; проектирование; библиотека типовых шаблонов; паттерны проектирования

IMPROVING THE STRUCTURE OF A HYDRAULIC EXCAVATOR PROJECT

P.A. Pobegailo¹, A.N. Ilyina²

In this text, we highlight and pose an important engineering problem from a practical standpoint: how can we reduce the time it takes to develop a project for creating a hydraulic excavator and/or its parts, while also reducing the amount of resources consumed? To achieve this, we propose creating libraries of standard Templates and standard Design Patterns, which will allow us to avoid repeated routine design procedures and significantly speed up the process of assembling (creating) and automating non-standard (new) structural units of the project (calculation blocks). This work is part of a series of our earlier publications on the creation and development of a methodology for designing hydraulic excavators, as well as our work on developing the foundations of an express diagnostics system for quarry excavators, particularly in the field of engineering ontologies.

Keywords: hydraulic excavator; design; library of standard templates; design patterns

Введение. В ходе разработки одноковшовых гидравлических экскаваторов (ОГЭ) и/или их элементов, многие проектные процедуры являются типовыми и, что важно - многократно востребованными (используемыми, применяемыми), часто одни и те же процедуры можно найти в самых разных частях проекта.

Очевидно, что такого рода процедуры должно выявлять и стандартизировать (нормировать), дабы избежать бессмысленных затрат ресурсов, и, в частности, времени (для справки отметим, что во времена СССР во ВНИИСДМ был отдел типовых расчётов, выпускались и соответствующие нормативные документы).

Иными словами, имеет место методологически и практически нерешенная проблема отечественного экскаваторостроения - как выявлять и в дальнейшем стандартизировать типовые процедуры проектирования (а в

частном случае, и расчётов), а ведь в проекте их обычно куда больше половины от используемых.

Идея работы. Не претендуя на полное снятие практически важной инженерной проблемы, опишем кратко видение одного из возможных подходов к стандартизации выделенной некоторым особым образом типовой процедуры. При этом будем вести речь только о проектных расчётах.

Итак, в качестве примеров часто повторяемых элементарных фрагментов мозаики проектирования укажем на следующие процедуры (только простые, расчётные):

- решение системы из двух квадратных уравнений;
- применение теоремы синусов и/или косинусов;
- определение длины отрезка по координатам его концов;
- вычисление тех или иных параметров треугольника (высоты, углы и пр.);
- выполнение простых статистических оценок;
- вычисление площадей и объемов и т.д.

Все такого рода примитивные проектные процедуры назовём шаблонными, а их сложные комплексы (объединения) того или иного рода (вида) - паттернами.

Проектирование экскаватора и/или его элемента во многом может быть сведено к автоматической сборке из "кубиков" (шаблонов) крупных проектных модулей-фигур (паттернов), которые позднее удобнее и автоматизировать, и применять (а также и модернизировать).

В качестве примеров паттернов укажем на:

- решение прямой и/или обратной позиционной задачи для рабочего оборудования (РО) ОГЭ;
- определение всех необходимых статических и кинематических характеристик четырех- и/или шестизвенных исполнительных механизмов РО;
- оценку максимальных усилий копания на зубьях ковша ОГЭ;
- анализ временных рядов, характеризующих те или иные процессы, протекающие в экскаваторе и/или его элемент(-ах) в ходе эксплуатации;
- технико-экономический анализ проекта;
- ряд стандартных задач классических "Деталей машин" (расчёт вала, подбор подшипников и пр.) и "ТММ", и многие, многие др.

Итак, еще раз: есть конечное множество элементарных шаблонов; есть другое конечное множество паттернов (проектирования). Механизм сборки вторых из первых не обсуждаем.

Но важную роль при предлагаемом подходе начинает играть т.н. интерфейс и, в первую очередь, для ряда основных паттернов, с которыми только и "общается" пользователь (и это уже необязательно только человек, но человек пока что все-таки превалирует в этом аспекте).

Иными словами, интерфейс должен быть эргономичным и максимально полным, и дружелюбным в части того, что пользователь должен там ввести (обычно - исходные данные и условия расчёта) и что он там увидит по завершению его работы (обычно - числа, графики).

В теоретическом плане отметим, что таким образом реализуем классическую инкапсуляцию.

Итак - фиксируем несколько строже. В общем случае расчётов экскаваторов имеют место множество элементарных операций, пример: $1+1=2$, извлечь логарифм Икс, определить Синус Игрек, вычислить квадратный корень и т.д.

На основе конечного множества такого рода элементарных операций обычно решается та или иная также элементарная практически важная мелкая задача. Чаще всего она при этом сводится к некоторой последовательности различных уравнений, то есть к шаблону.

В заводских условиях проделывать такого рода банальные вычисления - контрпродуктивно. И посему - шаблоны некоторым образом сводятся в паттерны.

Паттерн - это некоторая логически увязанная совокупность шаблонов - это совокупность элементарных операций (самый нижний уровень - это уровень, отражающий вычисления в "машинном" железе, допустим, в процессоре - на уровне машинного кода, что для практики неважно). Другое дело, анализ динамики и/или применение МКЭ, где вопросы скорости счёта, его точности и сходимости части получаемых решений выступают на первый план.

В свою очередь, паттерны проектирования также могут быть объединены тем или иным образом (можно сказать, что имеет место пирамида проектных вычислений, кусочек - а-ля квази **Enterprise Resource Planning**).

Конечная совокупность шаблонов – это Библиотека Шаблонов, а конечное множество паттернов – Библиотека Паттернов.

Каждый шаблон и каждый паттерн должны быть "оборудованы" соответствующими интерфейсами, реализующими инкапсуляцию. Касается это как основного пользователя (напомним: он не обязательно - человек), так и сторонних программ, желающих обратиться (использовать) к тому или иному шаблону (паттерну) (никто не мешает вести с ними и обычную коммерческую деятельность, патентовать и пр.).

Отметим, что в общем случае набор шаблонов и паттернов, используемых в проекте создания ОГЭ, образует некоторый гиперграф. На нём можно ставить и решать ряд специфических задач оптимизации процесса разработки машины и/или её частей (в части снижения затрат ресурсов на само проектирование; совершенствования численности персонала и его расстановки в проекте и т.д.).

Заметим также, что важным элементом, без которого не могут работать многие шаблоны и/или паттерны, является база(-ы) данных.

Для тех, кто хотел бы познакомиться с современными взглядами на т.н. шаблоны и/или паттерны можно обратиться к работам [1-5].

Небольшой пример. На рис.1 приведен один из возможных вариантов построения паттерна (процедуры, модуля) оценки значений теоретических коэффициентов концентрации (ТКК) [6 и др.] некоторых несущих металлоконструкций одноковшовых карьерных экскаваторов. Представлен

ный на рисунке 1 паттерн, безусловно, будет в дальнейшем совершенствоваться. Касается это и принятой выше общей терминологии.

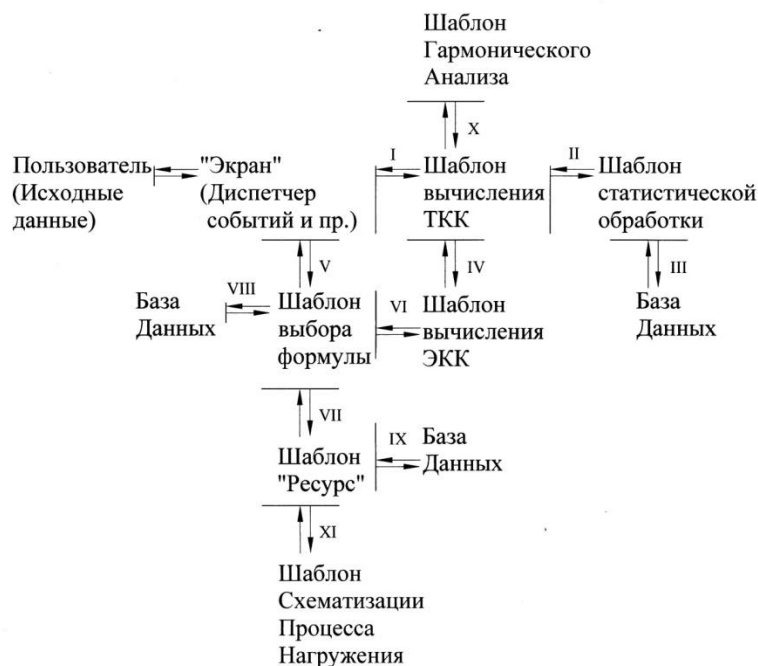


Рис. 1. Один из вариантов Паттерна анализа значений ТКК
(Экран – это интерфейс; ЭКК - эффективный коэффициент концентрации)

Закключение. Рассмотрена практическая проблема - многократная разработка тех инженерных положений проекта по созданию экскаватора и/или его части(-ей), которые стали стандартными. Это, очевидно, приводит к существенному росту затрат ресурсов на проект.

Работа тесно связана с более ранними публикациями в части создания и развития методологии проектирования ОГЭ [7 и др.], а также с трудами, посвященными системе экспресс-анализа одноковшовых экскаваторов, затрагивая и т.н. инженерные онтологии.

Список литературы

1. Гамма Э. и др. Приёмы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2006. 366 с.
2. Степанов А.А., Мак-Джонс П. Начала программирования. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2011. 272 с.
3. Вайсфельд М. Объектно-ориентированный подход. СПб.: Питер, 2020. 256 с.
4. Брукс Ф.П. Проектирование процесса проектирования: записки компьютерного эксперта. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2013. 464 с.
5. Эванс Э. Предметно-ориентированное проектирование (DDD): структуризация сложных программных систем. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2012. 448 с.
6. Ряхин В.А., Мошкарёв Г.Н. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. М.: Машиностроение, 1984. 230 с.
7. Побегайло П.А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: методология проектирования рабочего оборудования (на ранних стадиях проектирования). – М.: СвР-АРГУС, 2017. – 210 с.

УДК 622.232

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИДРОПЕРФОРАТОРОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ КРЕПКИХ ПОРОД

К.Б. Кызыров¹, к.т.н., проф., О.С. Решетникова¹, PhD, асс.проф.,

Д.А. Ашимбаев¹, докторант

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
г. Караганда, Казахстан

В статье приведен обзор моделей гидравлических перфораторов на основе анализа их технических характеристик, области применения, срока службы, стоимости и др. Даны рекомендации по выбору гидроперфораторов.

Ключевые слова: гидроперфоратор, подземное бурение, энергия удара, частота ударов, мощность.

ANALYSIS OF THE MAIN TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF HYDRAULIC PERFORATORS FOR DRILLING HARD ROCKS

K.B. Kyzzyrov, O.S. Reshetnikova, D.A. Ashimbaev

This article provides an overview of hydraulic drill models based on an analysis of their technical characteristics, applications, service life, cost, and other characteristics. Recommendations for selecting hydraulic drills are also provided.

Keywords: hydraulic drill, underground drilling, impact energy, impact frequency, power.

Много работ посвящено исследованию рабочего процесса гидроударников и гидроперфораторов [1-3 и др.]. Анализ, представленный в статье, направлен на выявление современных тенденций в производстве гидравлических перфораторов, их технических характеристик, оценке преимуществ и недостатков существующих конструкций для разработки рекомендаций по выбору оборудования. Данные собраны из технических каталогов и паспортов производителей, патентных баз и научных публикаций и представлены графически на рис. 1-5. Для анализа выбраны наиболее известные производители гидроперфораторов: Atlas Copco (серия COP), Sandvik (серии HL/HLX/RD), Doofor (серия DF), Montabert (серия HC), Furukawa (серии HD/FRD), Woserld (А-серия), Everdigm (серия ECD), Klemm (серия KD/KR), хотя компаний, производящих и реализующих такую технику достаточно много и охватить все не представляется возможным. Для оценки отобрано десять моделей от каждого производителя в диапазоне энергии удара $A = 180 \div 1200$ Дж, предназначенных для бурения шпуров диаметром $45 \div 127$ мм в горных породах крепостью $f = 6 \div 20$ по шкале проф. М.М. Протоdjяконова. Также учитывались значения мощности ($N = 8 \div 45$ кВт), частоты ударов ($n = 35 - 100$ Гц), расхода рабочей жидкости ($Q = 35 \div 165$ л/мин), рабочего давления ($P = 12 \div 40$ МПа).

На рис. 1 приведены значения энергии удара выпускаемых гидроперфораторов. Как видно из диаграммы, всеми производителями освоен выпуск ударных механизмов с энергией в диапазоне $300 \div 650$ Дж. Лидерами с самой большой энергией удара 1200 Дж являются гидроперфораторы COP 5060CR (Atlas Copco), RD925 (Sandvik), HC200 (Montabert), HD1800

(Furukawa). Китайский производитель Woserld предлагает оборудование с наименьшим диапазоном значений энергии от 400 до 800 Дж.

Значения частоты ударов гидроперфораторов представлено на рис. 2. Здесь можно отметить, что гидропрефораторы с частотой ударов в диапазоне 40-60 Гц выпускаются всеми производителями. Atlas Copco предлагает более широкий ряд гидроперфораторов с диапазоном частоты от 40 до 100 Гц. Klemm предлагает в основном модели с частотой от 38 до 47 Гц, но есть и более высокочастотные модели KD407 и KD308. У Montabert также имеется две модели с высокой частотой удара HC55 (86 Гц) и HC110 (70.5 Гц).

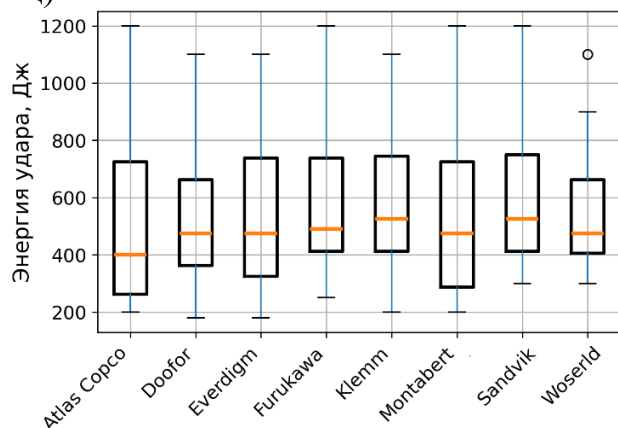


Рис. 1. Распределение величины энергии удара по производителям ГУМ

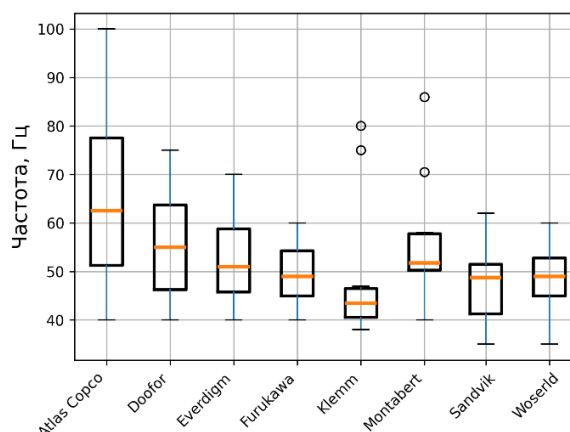


Рис. 2. Распределение значений частоты ударов по производителям ГУМ

Диаграмма с потребляемым расходом жидкости показана на рис. 3. Самый большой диапазон значений расхода имеют гидроперфораторы Atlas Copco (30 ÷ 140 л/мин), Doofor (45 ÷ 130 л/мин), Everdigm (42 ÷ 130 л/мин). Наименьший диапазон потребляемого расхода жидкости имеют гидроперфораторы Furukawa (80 ÷ 140 л/мин) и Woserld (80 ÷ 125 л/мин).

Максимальный расход жидкости, потребляемый гидроперфораторами, у большинства производителей достигает 130-140 л/мин.

Рабочее давление гидроперфораторов в среднем составляет 15 ÷ 25 МПа (рис. 4). И лишь в технических характеристиках моделей COP 5060CR (Atlas Copco), HD1800 (Furukawa), HC200 (Montabert) заявлено давление 30 - 32 МПа. Гидроперфораторы Klemm имеют самые высокие значения давления до 40 МПа (модель KR806-4GM).

На рис. 5 приведены данные о мощности гидроперфораторов. Точками отмечены значения мощности гидроперфораторов и наименования моделей с низкими и высокими значениями мощности в линейке каждого производителя. Так, самым мощным является гидроперфоратор COP 5060CR (Atlas Copco) – 50 кВт. Гидроперфораторы с самой низкой мощностью до 10 кВт предлагают Klemm (модель KD308) и Montabert (модель HC28). Большинство производителей освоило выпуск гидроперфораторов мощностью до 45 кВт, кроме Doofor и Woserld - до 35 кВт.

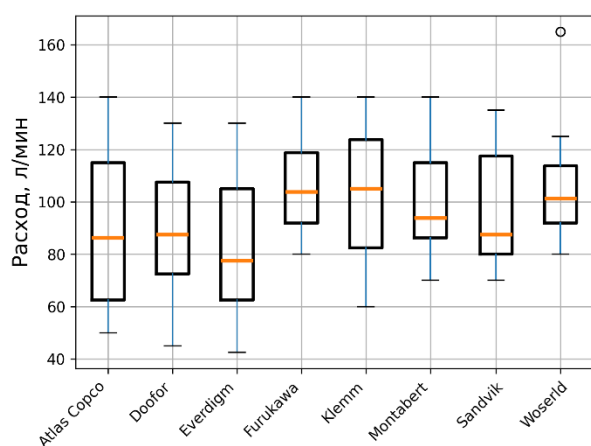


Рис. 3. Распределение величины расхода жидкости по производителям

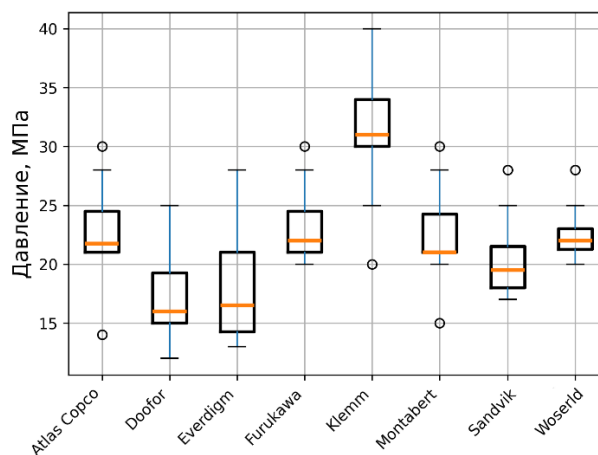


Рис. 4. Диапазон величины давления рабочей жидкости по производителям

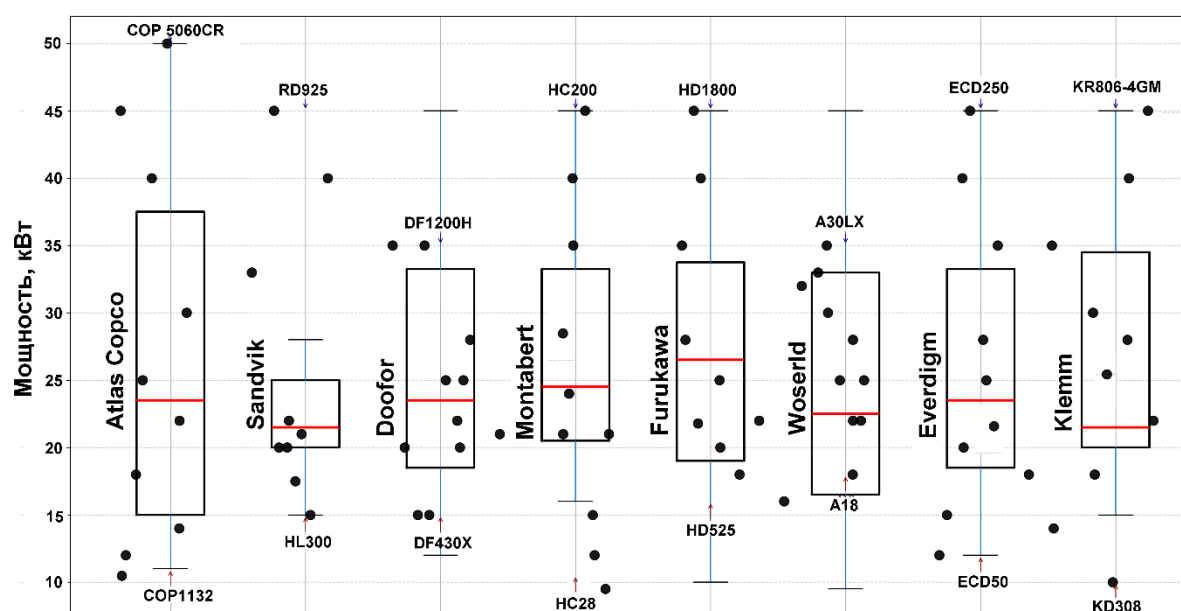


Рис. 5. Распределение значений мощности по производителям

Анализ показывает, что производители Atlas Copco, Sandvik и Montabert лидируют по мощности и универсальности для тяжёлых пород, а Doofor, Furukawa, Woserld, Everdigm - по балансу цены и среднего класса. Гидроперфораторы Klemm предназначены для точного, высокотехнологичного бурения, выполнения специфических видов горных работ.

Что касается производителей в отдельности, можно отметить следующее:

1. Atlas Copco (Швеция, часть Epiroc с 2018). Является одним из лидеров по производству гидроперфораторов с акцентом на высокую энергию удара и надёжность. Гидроперфораторы отлично подходят для подземного бурения шпуров/скважин, длинных скважин в крепких породах ($f=12\div20$) в рудных шахтах, тоннелях большого сечения. Подходят для jumbo-установок (Boomer серии). Преимущества: высокая эффективность (КПД $>80\%$) и надёжность, низкая вибрация, глобальный сервис. Недостатки: высокая цена (80÷150 тыс. \$, большой расход в тяжёлых моделях (до 140

л/мин). Рекомендуется для проектов, где производительность важнее бюджета [4].

2. Sandvik (Финляндия/Швеция). Является конкурентом Atlas Copco. Гидроперфораторы серии HL/RD отличаются высокой энергией и автоматизацией. **Применяются** для подземного бурения в очень крепких породах ($f > 15 \div 20$), бурения длинных скважин (до 40 м). Подходят для установки на DT/DD jumbo. Преимущества: отличная адаптивность (работают в мягких/твёрдых породах), интеллектуальная система управления (real-time monitoring), высокая эффективность (КПД $75 \div 85\%$). Недостатки: относительно низкая частота в тяжёлых моделях ($35 \div 40$ Гц), что снижает скорость бурения в мягких породах. Цена средняя ($60 \div 120$ тыс. \$) [5].

3. Doofor (Финляндия). Гидроперфораторы серии DF отличаются компактностью, экономичностью. Применяются для бурения горных пород средней крепости ($f = 6 \div 14$) в узких штреках/тоннелях, для анкерного крепления. Подходят для малых jumbo. Преимущества: компактность, низкий расход ($45 \div 130$ л/мин), доступная цена ($30 \div 60$ тыс. \$). Недостатки: низкая энергия и меньшая автоматизация по сравнению с Sandvik, КПД составляет $70 \div 80\%$. Рекомендуется для бюджетных проектов в ограниченном пространстве [6].

4. Montabert (Франция). Гидроперфораторы серии HC отличаются высокой надёжностью, долговечностью, низким износом. Применяются для подземного бурения в крепких породах ($f = 10 \div 18$) и вторичного дробления. Идеальны для jumbo в тоннелях. Преимущества: компактность в узких выработках; надёжная система защиты от пыли, влаги благодаря специальной конструкции уплотнений, автоматика. Недостатки: высокая цена ($70 \div 130$ тыс. \$). КПД составляет более $> 80\%$. Подходит для длительных проектов с высокой влажностью/загрязнением [7].

5. Furukawa (Япония). Гидроперфораторы серии HD/FRD отличаются надёжностью, высоким качеством сборки. Применяются для подземного бурения в крепких породах ($f = 12 \div 18$), для бурения длинных скважин (до 30 м). Преимущества: долговечность, низкие шум и вибрация. Недостатки: низкая частота тяжёлых гидроперфораторов (40 Гц), высокий расход до 140 л/мин. КПД составляет $75 \div 80\%$, цена $60 \div 110$ тыс. \$ [8].

6. Woserld (Китай). Гидроперфораторы серии A/S конструктивно схожи с европейскими. Применяются для подземного бурения в горных породах крепостью $f = 6 \div 14$. Преимущества: низкая цена ($30 \div 70$ тыс. \$), простота обслуживания. Недостатки: низкий КПД ($\sim 65 \div 75\%$), повышенный износ в крепких породах, меньшая автоматизация [9].

7. Everdigm (Южная Корея). Гидроперфораторы серии ECD/ECP схожи с Furukawa. Применяются для подземного бурения в горных породах средней крепости ($f = 8 \div 15$), вторичного дробления. Преимущества: хороший баланс цены/качества ($40 \div 80$ тыс. \$), низкий расход жидкости. К недостаткам относятся низкие значения энергии удара по сравнению с Sandvik, средняя надёжность в тяжёлых условиях. КПД $\sim 70 \div 80\%$ [10].

8. Klemm (Германия). Гидроперфораторы серии KD/KR применяются для точного, высокотехнологичного бурения с использованием электро-

гидравлических систем при проходке тоннелей. Преимущества: высокое давление (до 40 МПа), низкая вибрация. Недостатки: высокая цена (70÷120 тыс. \$). КПД составляет ~75÷80 % [11].

Вывод. Таким образом, при выборе гидроперфоратора стоит обратить внимание на выходные параметры – энергию и частоту ударов; вид и сроки выполняемых работ; крепость горных пород; соотношение цена/качество.

Список литературы

1. Митусов А.А., Лагунова Ю.А., Решетникова О.С. Выбор параметров гидромолота МГК-1 для регулирования его выходных характеристик / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2020. С. 97-100.
2. Кызыров К.Б., Исаев В.Л., Лагунова Ю.А., Решетникова О.С. К вопросу оптимизации рабочего цикла гидрообъемных ударных механизмов / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. 2019. С. 90-93.
3. Лагунова Ю.А., Решетникова О.С. Исследование рабочего цикла гидромолота К-14 / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в рамках Уральской горнопромышленной декады. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. 2018. С. 113-116
4. <https://mining.tgc.ru/catalog/zapasnyie-chasti/gidravlicheskie-perforatoryi/>
5. <https://www.mining.sandvik/globalassets/products/rock-drills/pdf/hl710s-specification-sheet-english.pdf>
6. <http://rockdrill.ru/doofor>
7. <https://machinary.ru/product/gidravlicheskiy-perforator-montabert-hc95lm/>
8. <https://www.rackersequipment.com/frd-furukawa-rock-drill/>
9. <https://community.b-china.cn/en/product/info/7894>
10. <https://www.rdw.com.au/everdigm-hammer-rock-breakers/>
11. <https://www.klemm.de/en/products-1/hydraulic-drifters/kd-511/>

УДК 622.232.5

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С КОМПАКТНЫМИ РОТОРНЫМИ ЭКСКАВАТОРАМИ

И.А. Сайдаминов¹, д-р техн. наук, проф., Д.В. Ермолаев¹, канд. техн. наук

¹ Филиал ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС» в г. Губкине Белгородской области

Предложена система критериев, которая может быть использована для оценки работы ГТМК с компактными роторными экскаваторами при работе вертикальными и горизонтальными стружками. Предложенная система показателей дает возможность произвести анализ деятельности ГТМК в различные оценочные периоды времени и принять соответствующие меры для повышения его эффективности и на ее базе можно определить необходимый объем информации, требуемый для управления ГТМК.

Ключевые слова: горно-транспортных комплексов машин (ГТКМ), эффективность, критерия, управления, производственный процесс.

ECONOMIC INDICATORS OF EFFICIENCY OF MINING AND TRANSPORT COMPLEXES WITH COMPACT BOOTHROAR EXCAVATORS

I.A. Saidaminov, D.V. Ermolaev

A system of criteria is proposed that can be used to evaluate the performance of mining and metallurgy equipment (MME) with compact rotary excavators (CREs) when working with vertical and horizontal chips. The proposed system of indicators allows for analyzing MME operations over various assessment periods and responding appropriately improving their effectiveness. Based on this system, the necessary information required for MME management can be determined.

Keywords: mining and transport complexes of machines (MTCM), efficiency, criteria, management, production process

Современное направление научных исследований в области использования горно-транспортных комплексов машин (ГТКМ) непрерывного действия на открытых горных работах характеризуется стремление к оптимизации производственного процесса для получения максимальной технико-экономической эффективности, причем тенденция к оптимизации наблюдается как в области разработки более совершенной технологии, так и в области организации, контроля и управления производственным процессом.

Для оценки эффективности работы предприятия необходим единый критерий технико-экономической эффективности производственного процесса.

Специфика работы ГТКМ заключается в том, что они являются лишь отдельными звеньями технологического процесса и не производят реализуемую продукцию; их связь с остальными звеньями не жесткая, номенклатура и качество производимой предприятием продукции не влияют на результаты работы ГТКМ. В этих условиях в качестве основного экономического критерия эффективности работы ГТКМ рационально принять затрат к фактически отсыпанному объему в течение вскрышного сезона:

$$C_{\phi} = \frac{Z_{\phi}}{V_{\phi}},$$

где Z_{ϕ} - фактические затраты; V_{ϕ} - фактически добытый объем.

Однако этот показатель может быть отчетным только за значительный промежуток времени. Действительно, если принять, что себестоимость подсчитывается за смену, то мелкий случайный ремонт немедленно приведет к увеличению себестоимости, а смена, занятая профилактикой, планово-предупредительным ремонтом или ликвидацией аварии, дает бесконечное значение себестоимости. Понятно, что, чем больше отрезок времени, за который подсчитывается себестоимость, тем меньше дисперсия полученных значений и тем точнее себестоимость, как критерий, может характеризовать степень оптимальности управления процессом. Практически можно принять декаду таким минимальным отрезком времени, за который вычисленное значение себестоимости можно использовать для оценки работы ГТКМ с допустимой погрешностью.

Тогда сравнение работы ГТКМ за длительные промежутки времени следует производить по коэффициенту выполнения плана по себестоимости

$$k_c = \frac{C_{пл}}{C_{ф}}.$$

Этот показатель представляет собой отношение плановой себестоимости - $C_{пл}$ к фактической себестоимости - $C_{ф}$ и возрастает с уменьшением последней.

В связи с тем, что для оптимального управления горными работами не применим принцип «расчлененных» ситуаций, возникает необходимость определения системы критериев, по которым можно оценить работу ГТКМ при выполнении технологических операций за определенные отрезки времени, например, смена, сутки, месяц.

Требования к системе критериев должны быть следующие: если улучшается работа по одному из показателей без изменения остальных, то в конечном итоге это должно привести к уменьшению себестоимости. Для снижения себестоимости нужно уменьшить затраты и увеличить производительность. Если производительность имеет какой-то верхний предел, то и затраты не могут опускаться ниже определенной величины, так как это приведет к падению производительности. Значит, при существующей технологии работ, неизменном составе ГТКМ и данных геолого – климатических условиях имеется некоторый минимум значения себестоимости, которого нужно стремиться достигнуть.

В этом случае не рассматривается другой путь снижения себестоимости капитальные затраты на реконструкцию ГТКМ для повышения производительности или надежности работы.

Планирующие органы определяют план работы ГТКМ на месяц, квартал, год по объему экскавируемого грунта - $V_{пл}$ и себестоимости - $C_{пл}$. Предполагается, что этот план научно обоснованный и является результатом тщательного изучения всех особенностей работы ГТКМ. На основе этого план определяют задания на декаду, сутки, смену работы ГТКМ. Тогда коэффициент выполнения плана по объему отсыпанного в отвал грунта можно принять за критерий эффективности работы ГТКМ за смену и сутки определить из выражения

$$k_V = \frac{V_\Phi}{V_{\text{пл}}},$$

где $V_{\text{пл}}$ - запланированный объем.

Принятые критерии эффективности не могут объяснить причин удовлетворительной и неудовлетворительной работы ГТКМ за данный оценочный период. Известно, например, что машинисты разной квалификации в одинаковых условиях работают с разной производительностью, хотя стоящая перед ними задача одинакова: поддержание максимально возможной в данных условиях производительности Q_{max} . Однако при управлении экскаватором машинист в силу статистической неравномерности процесса резания не может поддерживать производительность на строго постоянном уровне. Она колеблется около некоторого среднего уровня с размахом, который помимо прочих объективных условий зависит и от квалификации машиниста. Величина размаха может быть оценена по величине среднеквадратичного отклонения - σ_Q определяемого по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{\text{ср}})^2}{n-1}}.$$

Если $Q_{\text{ср}} = Q_{\text{max}}$, то при малейшем превышении значения этой величины работа будет остановлена. Поэтому практически машинист вынужден работать со средней производительностью $Q_{\text{ср}}$ которая меньше максимально возможной, причем снижение производительности можно определить по формуле

$$\theta = Q_{\text{max}} - Q_{\text{ср}} = f(\sigma_Q).$$

Ясно, что чем больше σ_Q , тем больше снижение производительности. Поэтому оценивать работу машиниста ГТКМ за короткие оценочные периоды целесообразно следующими коэффициентами:

- коэффициент производительности

$$k_Q = \frac{Q_\Phi}{Q_{\text{пл}}} = \frac{V_\Phi}{T_{\text{раб}} Q_{\text{пл}}};$$

- коэффициентом стабилизации производительности

$$k_{\text{ст}} = \frac{\theta}{3\sigma_Q}$$

где Q_Φ - фактическая производительность, с которой работал машинист в рассматриваемый отрезок времени; $Q_{\text{пл}}$ - запланированная для данных условий производительность; $T_{\text{раб}}$ - время работы; $Q_{\text{пл}}$ - фактическое среднеквадратичное отклонение значений производительности от средней на слое.

Величины $Q_{\text{пл}}$, $Q_{\text{зад}}$ и $T_{\text{раб}}$ заданные допустимые отклонения от средней производительности должны задаваться машинисту на основании проведенного анализа реальных условий работы ГТКМ.

Таблица

Класс показателей	Характер показателя	Наименование показателя	Обозначение	формула	оценочные периоды времени				
					месяц	декада	сутки	смена	блок (подступ)
Обобщенный	Экономический	Коэффициент выполнения плана по себестоимости	k_c	$k_c = \frac{C_{пл}}{C_{ф}}$	1	1			
Оперативные	Технологические	Коэффициент выполнения плана по объему вскрыши	k_v	$k_v = \frac{V_{ф}}{V_{пл}}$	x	x	1	1	
		Коэффициент производительности	k_q	$k_q = \frac{V_{ф}}{T_{раб} Q_{пл}}$					1
		Коэффициент стабилизации по производительности	$k_{ст}$	$k_{ст} = \frac{\theta}{3\sigma_q}$					x
	Временные	Коэффициент потерь	$k_{пот}$	$k_{пот} = \frac{T_{пер}}{T_{раб}}$				x	
		Коэффициент аварийности	$k_{ав}$	$k_{ав} = \frac{T_{ав}}{T}$	x	x	x	x	

Для более полной оценки эффективности управления, а также для определения надежности работы ГТМК вводятся коэффициенты:

- коэффициент потерь, характеризующий часть рабочего времени $T_{раб}$ которая тратится на переходные, установочные операции,

$$k_{пот} = \frac{T_{пер}}{T_{раб}};$$

- коэффициент аварийности

$$k_{ав} = \frac{T_{ав}}{T},$$

где $T_{ав}$ – время, затраченное на ликвидацию аварийных положений; T – общее календарное время работы ГТМК.

Показатели, оценивающие работу ГТМК, приведены в таблице. По данным таблицы можно сделать следующие выводы.

1. Система критериев может быть использована для оценки работы ГТМК с компактными роторными экскаваторами при работе вертикальными и горизонтальными стружками. Различие заключается только в определении минимального оценочного периода. Если в первом случае он

равен времени работы экскаватора на подступе, то во втором - времени экскавации одного блока.

2. В каждом оценочном периоде времени есть один главный критерий (в таблице отмечен цифрой 1) и несколько второстепенных (в таблице отмечены крестом), которые характеризуют менее важные стороны работы ГТМК за рассматриваемый период времени и объясняют причины выполнения или невыполнения задания согласно главному критерию;

3. Технологические критерии могут быть главными в кратковременные оценочные периоды, а также второстепенными (за декаду, месяц), объясняя степень выполнения плана согласно обобщенному критерию эффективности;

4. Все временные критерии являются второстепенным, причем чем ближе значения временного показателя к нулю, тем лучше работе ГТМК;

5. На более крупных оценочных периодах времени (квартал, вскрышной сезон, год) действует те же критерии, что и за месяц;

6. Предложенная система показателей дает возможность произвести анализ деятельности ГТМК в различные оценочные периоды времени и принять соответствующие меры для повышения его эффективности;

7. На базе предложенной системы показателей можно определить необходимый объем информации, требуемый для управления ГТМК.

УДК 622.2

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ РАБОТЕ КОМБАЙНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ

А. В. Сенькин¹, асп., Д. И. Шишлянников¹, д.т.н., проф., А.А. Иванченко¹, ст. преп.,
С.А. Фролов¹, к.т.н., доцент, А.А. Рыбин¹, д.т.н, проф.

¹ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический
университет», г. Пермь

Существует достаточное количество мероприятий по борьбе с пылью в калийных рудниках. Применение того или иного способа борьбы с пылью влияет на коэффициент машинного времени, а соответственно и на эксплуатационную производительность. В качестве одного из способов улучшения пылевой обстановки применяют исключение бункер-перегрузателя из состава комбайнового комплекса, которое приводит к снижению производительности примерно на 16 %. Авторами статьи предлагается применение съемного тента, который позволяет избежать снижения производительности и способствует снижению пылеобразования в среднем на 36 %.

Ключевые слова: пылеобразование, калийный рудник, проходческо-очистной комбайн, бункер-перегрузатель.

WAYS TO INCREASE PRODUCTIVITY AND IMPROVE THE DUST ENVIRONMENT DURING THE OPERATION OF COMBINE COMPLEXES IN POTASH MINES

A.V. Senkin, D.I. Shishlyannikov, A.A.Ivanchenko, S.A.Frolov, A.A.Rybin

There are a sufficient number of measures to combat dust in potash mines. The use of one or another method of dust control affects the machine time factor, and, consequently, operational productivity. As one of the ways to improve the dust situation, the exclusion of the hopper loader from the combine complex is used, which leads to a decrease in productivity by about 16 %. The authors of the article propose the use of a removable awning, which helps to avoid productivity degradation and helps reduce dust formation by an average of 36 %.

Keywords: dust formation, potash mine, tunneling combine, hopper loader.

Ведение горных работ на калийных рудниках зачастую сопровождается экстремально высокими концентрациями пыли в рабочем пространстве. Существует достаточное количество мероприятий по борьбе с пылью в калийных рудниках. Большинство из них требуют дополнительных капитальных затрат и значительно ухудшают эксплуатационную производительность комбайнового комплекса. В настоящее время существует потребность в улучшении пылевой обстановки на калийных рудниках без снижения эксплуатационной производительности.

Проблема высокого пылеобразования наиболее характерна на глубоких рудниках с сухим и горячим воздухом в очистных выработках. На одном из таких рудников были произведены замеры концентрации пыли на рабочих местах проходческо-очистного комбайна и самоходного вагона, а также на расстоянии 30 метров от комбайна и в устье очистной камеры. Замеры производились при различных производительностях проходческо-очистного комбайна (рис. 1).

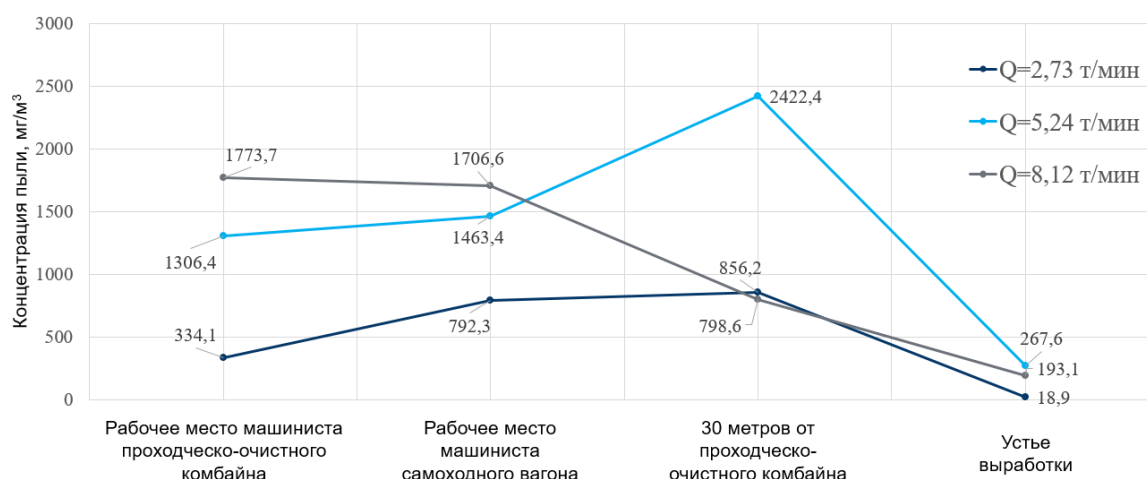


Рис. 1. Замеры концентрации пыли в очистной камере

Имеющиеся замеры концентрации пыли свидетельствуют об экстремальных условиях труда горнорабочих, при которых концентрация пыли может превышать предельно допустимую в 300-400 раз.

Учитывая высокие концентрации пыли и негативное влияние ее на организм и горно-шахтное оборудование, возникает необходимость разрабатывать мероприятия по борьбе с пылью.

Среди них мероприятия «сухого» улавливания, в рамках которых применяются аспирационные установки. Метод обладает высокой эффективностью [1], но требует размещения в стесненных условиях габаритного оборудования. Учитывая, что на 1 тонну добытой руды образуется 12 кг пыли, применение методов «сухого улавливания» требует постоянную очистку фильтров и обслуживание аспирационных установок, что влияет на производительность комбайновых комплексов.

В научных исследованиях встречаются методы комбинированного способа проветривания рабочих зон [2]. Этот метод также обладает высокой эффективностью, но характеризуется высокими капитальными затратами и высокими трудозатратами на обслуживание двух вентиляторов местного проветривания с вентставами.

Наиболее распространенный способ борьбы с пылью – это применение герметичных коробов мест перегрузки и отбойки калийной руды. Перегрузы ленточных конвейеров оснащают стальными укрытиями, а также оснащают их столами пылегашения на местах загрузки. На проходческо-очистном комбайне применяется герметичный щит, отделяющий забой от рабочего места машиниста.

Одним из способов борьбы с пылью является сокращения количества перегрузов отбитой руды. Например, исключение из состава комбайнового комплекса бункер-перегрузжателя, что приводит к снижению эксплуатационной производительности на 16 %.

В угольных шахтах применяют «мокрые» способы улавливания пыли. На калийных рудниках были попытки применить аналогичные методы, но результаты испытаний признаны не удовлетворительными, так как повышается риск разупрочнения целиков и увеличиваются капитальные затраты на монтаж разветвленной сети трубопроводов в руднике. Среди прочих

методов борьбы с пылью существуют такие методы как подбор оптимальных режимов работы комбайна, пересмотр конструкции погрузочного и исполнительного органов комбайна и т.д.

Авторами статьи предлагается решение, которое позволяет снизить пылеобразование, возникающее при перегрузке руды с проходческо-очистного комбайна в бункер-перегрузатель (без его исключения из состава комбайнового комплекса) [3]. Предлагаемое техническое решение заключается в модернизации кузова бункер-перегрузателя в части оснащения его съемным тентом, который позволит изолировать пылевое облако, образовавшееся при перегрузе с комбайна в бункер-перегрузатель.

Для оценки эффективности предлагаемого съемного перекрытия был проведен ряд замеров концентрации пыли с применением прототипа съемного перекрытия в виде брезента, который плотно прилегал к конструкции бункер-перегрузателя и выполнял функцию герметичного съемного тента (рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальный прототип съемного тента

Замеры производились при различных подачах комбайна в двух вариантах: со съемным тентом и без него (рисунок 3).

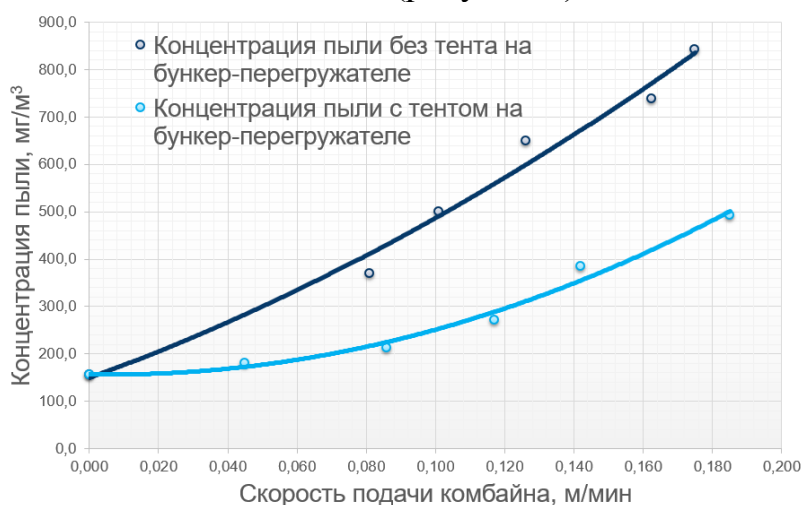


Рисунок 3 – Результаты замеры концентрации пыли с применением съемного тента и без него

По результатам замеров было получено, что концентрация пыли значительно снижается при использовании съемного тента. Примерно на 36 %, что подтверждает эффективность предлагаемого технического решения.

Для применения того или иного способа борьбы с пылью требуется выполнить комплексную оценку влияния примененного метода на эксплуатационную производительность комбайнового комплекса. Применение съемного перекрытия на бункер-перегрузателе позволяет снизить пылеобразование в среднем на 36 % без снижения эксплуатационной производительности комбайнового комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земсков А. Н., Лискова М. Ю., Гайдин А. М. Способы и средства борьбы с сероводородом в рудничном воздухе и в подземных водах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2021. – № 1. – С. 91-100.
2. Медведев И. И., Красноштейн А. Е. Аэрология калийных рудников. – Свердловск: УрО РАН. – 1990. – 250 с.
3. Сенькин А.В., Шишлянников Д.И. Совершенствование бункеров-перегрузателей механизированных комбайновых комплексов для добычи калийных руд // Известия Тульского государственного Университета. Науки о земле. – 2025. – Выпуск 2. – С. 131-139.

УДК 622.2.023.65

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СЫПУЧЕСТИ СМЕРЗШЕГОСЯ УГЛЯ НА РАЗГРУЗОЧНЫХ ТЕРМИНАЛАХ МОРСКИХ ПОРТОВ

Р. Д. Скворцов¹, аспирант,

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, г. Москва

В работе рассматриваются основные проблемы восстановления сыпучести смерзшегося угля при разгрузке из железнодорожных полувагонов. Определены ключевые недостатки дробильно-фрезерных машин. Проведен анализ затрат энергии при разрушении смерзшегося угля. Предложены направления для повышения эффективности дробильно-фрезерных машин.

Ключевые слова: дробильно-фрезерная машина, смерзшийся уголь, восстановление сыпучести, эффективность оборудования, тангенциальный горный резец, угольный терминал.

RESTORING THE FLOWABILITY OF FROZEN COAL AT UNLOADING TERMINALS IN SEAPORTS

R. D. Skvortsov

The paper discusses the main problems of restoring the flowability of frozen coal during unloading from railway open wagons. The key disadvantages of crushing and milling machines are identified. An analysis of energy costs during the destruction of frozen coal is carried out. Directions for improving the efficiency of crushing and milling machines are proposed.

Keywords: crushing and milling machine, frozen coal, restoration of flowability, equipment efficiency, tangential mining cutter, coal terminal.

Зоны добычи угля в России распределены неравномерно, примерно 90 % запасов располагаются в азиатской части. При этом пункты перевалки угля значительно удалены от основных месторождений. Например, морской порт «ВаниноТрансУголь» находится на расстоянии 3588 км от разрезов Кузбасса.

В 2023 году общая отгрузка угля составила 383,56 млн. тонн. Из которых на внутренний рынок пошло 181,21 млн. тонн, а на экспорт 202,74 млн. тонн. Импорт угля составил 18,01 млн. тонн (рис. 1). Экспортная направленность угольного бизнеса выступает ключевым фактором развития угольной отрасли. Наблюдается рост экспортных поставок в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. По итогам 2023 года объем экспорта угля в Восточном направлении составил 70 % от всего объема перевозок в России [1].

Основным видом транспорта для перевозки угля от зон добычи до пунктов перевалки – морских угольных терминалов является железнодорожный транспорт. В определенные периоды года в процессе перевозки с грузом происходят циклические изменения температуры – смерзание-оттаивание. Поэтому уголь приходит в пункты разгрузки в смерзшемся виде, что значительно увеличивает затраты на перевалку угля.

Существуют различные методы предотвращения смерзания и восстановления сыпучести смерзшегося сыпучего груза. Механический способ восстановления сыпучести является самым эффективным и превосходит по показателям термический и химический.



Рис. 1. Поставка угля, тыс. тонн

Процесс измельчения смерзшегося угля при механическом способе происходит с помощью дробильно-фрезерных машин (ДФМ), которые располагаются на решетке приемного бункера. После разгрузки вагона через вагоноопрокидыватель около 30-60% угля проходит через решетку. При завале решетки запускается ДФМ и в процессе возвратно-поступательного движения по решетке измельчает негабаритные куски смерзшегося материала с помощью исполнительного органа-фрезы.

Для обогатительных фабрик, тепловых электростанций и коксохимических заводов необходимо создание и использование эффективных машин для предварительного дробления поступающего смерзшегося материала.

Энергоэффективность технологического оборудования определяется двумя факторами:

- энерговооруженность машины;
- энергопотребление при ее работе.

За последние сорок лет технический прогресс и разработка инновационных решений привели к значительному улучшению показателей энерговооруженности оборудования. За это время его энергетический потенциал и КПД возросли в 15-20 раз. На текущий момент задача оптимизации энерговооруженности может считаться решенной, однако для машиностроителей есть еще множество задач для минимизации энергопотребления при эксплуатации оборудования. Это включает в себя разработку более эффективных систем управления, оптимизацию рабочих режимов и внедрение инновационных технологий энергосбережения.

Затраты энергии на измельчение смерзшегося угля составляют 0,9-1,5 кВт. Это сопоставимо с затратами энергии при его добыче. При этом в процессе разрушения, существенная часть энергии расходуется на переизмельчение материала. Распределение энергии при разрушении угля представлено в таблице 1.

Существует проблема низкой надежности работы разрушающего инструмента. Отказы режущих частей являются преобладающими и составляют 60 % от общего числа отказов дробильно-фрезерной машины. По

данным работы [2], 70 % этих отказов происходит по причине утраты работоспособности инструмента. Приваренные резцы не могут оперативно заменяться при их износе или поломках и заменяются только при отрыве группы резцов, что сказывается на эффективности дробления угля.

Таблица 1 – Распределение энергии при разрушении угля

№	Название параметра	Распределение энергии, %
1	Диспергирование при дроблении, включая образование пылевого ядра	50-80
2	Диспергирование при трении резца об уголь	20-45
3	Образование трещин и отрыв элементов угля от массива, не более	1
4	Упругие деформации угля, не более	1
5	Деформации элементов машин	0,5-2

Большинство дробильно-фрезерных машин оборудованы рельсо-колесным движителем, который имеет существенные недостатки: буксование колес, недостаточность тягового усилия, сход машины с рельс и связанные с этим большие затраты на ее установку. Отказы системы подачи составляют 28,4 % всех отказов ДФМ и занимают второе место после отказов режущих частей, при этом средняя трудоемкость их ликвидации составляет 35,5 % от общей трудоемкости восстановления всех отказов и является наибольшей. Для исключения этих недостатков целесообразно использовать рельсовые захваты и зубчато-реечный тип подачи аналогично безцепной системы подачи очистного комбайна. [3]

Эффективность работы дробильно-фрезерной машины зависит от: параметров фрезы – глубины и шага резания, конструкции и схемы расстановки резцов на барабане фрезы, режимных параметров машины – частоты вращения фрезы и скорости подачи, а также свойств разрушаемого материала. Обычно машины работают с частотами вращения фрезы, превышающими оптимальные, что увеличивает износ резцов, отрывы по сварке и переизмельчение. Вследствие этого с углем контактирует поверхность барабана фрезы, происходит наезд на штабель материала и происходит сход опорных колес машины с рельс.

Западные работы развивают теоретические положения разрушения углей резцовым инструментом, предложенные Эвансом несколько десятилетий назад. Развитие происходит путем расширения области применения моделей Эванса на другие горные породы и включением в расчетные методы ранее не учтенных параметров, характеризующих процесс резания. Отечественные исследования основываются на обширных экспериментах, учитывающих существенное число параметров, но не описывающих механизм разрушения. Их результаты нашли широкое применение не только в России и странах бывшего СССР, но и в Китае при проектировании горной техники и компьютерном моделировании процессов взаимодействия одноконтурных резцовых инструментов и исполнительных органов с горным массивом.

Несмотря на проведенные исследования по разрушению смерзшегося угля дробильно-фрезерными машинами, отсутствует модель, отображающая все особенности взаимодействия исполнительного органа машины именно со смерзшимся материалом. Расчет нагрузок на исполнительном органе основан на отраслевом стандарте «ОСТ 12.44.258-84 Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах», который применим к исполнительным органам очистных комбайнов, разрушающих уголь в массиве при добыче. По данным исследования [4], полученный по существующим методам расчета результат, превышает фактические значения показателей резания на 20 %.

Для повышения эффективности работы дробильно-фрезерных машин предлагается:

- совершенствование расчета процесса резания смерзшегося угля на основе опыта изучения механических свойств мерзлых грунтов и их разрушения;
- использование оптимальных параметров разрушения смерзшегося угля;
- использование тангенциальных горных резцов для резания смерзшегося и крупногабаритного угольного топлива;
- определение оптимальной схемы расстановки резцов на исполнительном органе машины;
- вместо рельсо-колесного использовать зубчато-реечный или цевочно-реечный тип движителя [5].

Список литературы

1. Основные показатели угольной промышленности // Министерство энергетики Российской Федерации: официальный сайт. — URL: <https://minenergo.gov.ru/industries/coal> (дата обращения: 16.02.2026)
2. Пучков Л. А., Кантович Л. И., Гетопанов В. Н., Берлявский Г. П. Технологические процессы и машины для измельчения смерзшегося и крупногабаритного угольного топлива // изд. МГГУ, 2003. 144 с.
3. Гетопанов В. Н., Рахутин М. Г., Полосина И. А. Определение уровня надежности дробильно-фрезерной машины ДФМ-11А для измельчения смерзшегося угля на тепловых электростанциях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 3. С. 139-141.
4. Секачев Д. Е., Рахутин М. Г. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности // Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 20–21 мая 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 98-101.
5. Рахутин М. Г., Скворцов Р. Д. Резервы повышения эффективности оборудования для измельчения смерзшегося угля // Уголь. 2024. №6. С. 45-52.

УДК 622.271.4; 621.879.3

ДИНАМИЧЕСКИЙ СИЛОВОЙ АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКГ-20К С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНОГО МАНИПУЛЯТОРА

О.У. Хамидов¹, аспирант, Д.А. Шибанов¹, канд. техн. наук, доцент

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, РФ

В работе рассмотрен динамический силовой анализ рабочего оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-20К на основе метода эквивалентного манипулятора. Многозвенная кинематическая схема преобразована к плоской модели с двумя обобщёнными координатами, непосредственно связанными с подъёмным и напорным приводами. На основе метода Денавита–Хартенберга получены аналитические зависимости положения режущей кромки ковша, а также выражения для угловых и линейных скоростей и ускорений звеньев с учётом призматического сочленения рукояти. Сформирована динамическая постановка расчёта нагрузок на приводы по рекурсивному алгоритму Ньютона–Эйлера. Предложенная модель обеспечивает однозначную связь между траекторией движения ковша и усилиями в приводах и может использоваться для анализа режимов копания и обоснования рациональных параметров работы экскаватора.

Ключевые слова: карьерный экскаватор ЭКГ-20К, рабочее оборудование, метод эквивалентного манипулятора, динамический анализ

DYNAMIC FORCE ANALYSIS OF THE WORKING EQUIPMENT OF THE EKG-20K USING THE EQUIVALENT MANIPULATOR METHOD

O.U. Khamidov, D.A. Shibanov

The paper presents a dynamic force analysis of the working equipment of the EKG-20K mining shovel based on the equivalent manipulator method. The multi-link kinematic structure is transformed into a planar model with two generalized coordinates directly associated with the hoist and crowd drives. Using the Denavit–Hartenberg approach, analytical expressions for the position of the bucket cutting edge, as well as angular and linear velocities and accelerations of the links, are obtained, taking into account the prismatic joint of the handle. A dynamic formulation for calculating drive loads is developed based on the recursive Newton–Euler algorithm. The proposed model establishes a direct relationship between the bucket trajectory and the drive forces and can be applied to the analysis of digging regimes and the justification of rational operating parameters of the excavator.

Keywords: mining shovel EKG-20K, working equipment, equivalent manipulator method, dynamic analysis.

Рабочее оборудование карьерного экскаватора ЭКГ-20К представляет собой многозвенную механическую систему, в которой формирование усилий на приводах определяется не только величиной сопротивления копанию, но и текущей конфигурацией кинематической цепи. При выполнении операции копания внешняя нагрузка прикладывается к режущей кромке ковша и далее передаётся через рукоять, седловой подшипник и стрелу к напорному и подъёмному приводам. Поскольку в процессе набора горной массы изменяются угловое положение рукояти и её вылет, конфигурация кинематической цепи непрерывно варьируется.

В инженерной практике усилия на приводах часто определяются по статическим или эмпирическим схемам, что не позволяет учитывать влияние траектории ковша и динамических составляющих движения и приво-

дит к расхождению расчётных и фактических нагрузок. В связи с этим возникает задача разработки кинематической и динамической модели рабочего оборудования, позволяющей определить нагрузки на напорный и подъёмный приводы при заданной траектории движения ковша и известных характеристиках внешнего сопротивления копанию. Модель должна обеспечивать однозначную связь между управляющими параметрами приводов и положением режущей кромки, а также учитывать инерционные свойства звеньев [1].

Целью работы является построение математической модели рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-20К на основе метода эквивалентного манипулятора с последующей постановкой динамического расчёта по рекурсивному алгоритму Ньютона–Эйлера для определения усилий приводов при различных режимах копания и формирования базы для дальнейшего анализа рациональных траекторий движения ковша.

Положение и ориентация рабочего органа экскаватора в пространстве однозначно определяется шестью координатами: тремя линейными (декартовыми) и тремя угловыми (например, углами Эйлера). Использование метода Денавита-Хартенберга позволяет сократить это число до четырех параметров, называемыми параметрами Денавита-Хартенберга (DH).

Рассмотрим параметрическую схему, изображённую на рис. 1. Механизм состоит из четырех вращательных и одного сферического сочленений, включает в себя пять звеньев: база 0, стрела 1, седловой подшипник 2, рукоять 3 и ковш 4. Место крепления стрелы к поворотной платформе принято за основание.

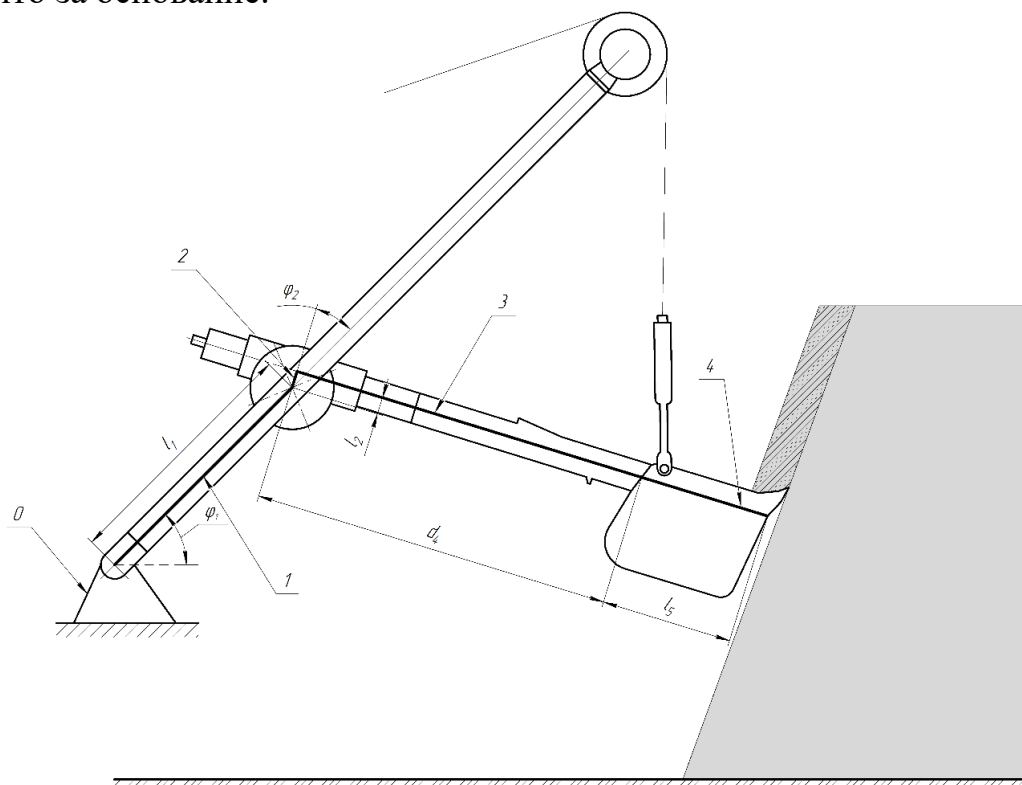


Рис. 1. Параметрическая схема рабочего оборудования экскаватора (составлено авторами)

Были введены неподвижная (базовая) и подвижные системы координат, связанные со звеньями экскаватора, и в них обобщенные координаты

системы: φ_1 – угол наклона стрелы экскаватора; φ_2 – угол наклона седлового подшипника; d_4 – вылет рукояти.

Полученные ДН параметры для звеньев экскаватора сведены в таблицу.

Таблица 1. Параметры Денавита-Хартенберга звеньев манипулятора (материалы авторов)

Звено, i	Расстояние вдоль оси x_i от z_{i-1} до z_i, l	Угол вокруг оси x_i от z_{i-1} до z_i, a_i	Расстояние вдоль оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i, d_i	Угол вокруг оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i, φ_i
1 (стрела)	l_1	0	0	φ_1
2 (седловой подшипник)	l_2	0	0	φ_2
3 (рукоять)	0	$\frac{\pi}{2}$	0	0
4 (ковш)	0	$-\frac{\pi}{2}$	d_4	0
5 (точка зуба)	l_5	0	0	$\frac{\pi}{2}$

При постоянных входных параметрах модели регулируемые параметрами являются углы φ_1, φ_2 между звеньями экскаватора и вылет рукояти d_4 .

Положение режущей кромки ковша определяется последовательным перемножением матриц однородных преобразований:

$$T_5^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4$$

В результате получаются аналитические выражения координат точки зуба ковша в базовой системе координат:

$$\begin{cases} x = l_1 c_{\varphi_1} + (l_2 + l_5) c_{\varphi_{12}} + d_4 s_{\varphi_{12}} \\ y = l_1 s_{\varphi_1} + (l_2 + l_5) s_{\varphi_{12}} - d_4 c_{\varphi_{12}} \end{cases}$$

Решение обратной задачи кинематики выполняется на основе геометрических соотношений и тригонометрических преобразований. Для заданной точки $K(x, y)$ определяются значения φ_2 и d_4 при фиксированном φ_1 . Проверка достижимости осуществляется на основе ограничения по суммарной длине кинематической цепи. Таким образом, кинематическая модель обеспечивает возможность задания траектории движения ковша в декартовых координатах и вычисления соответствующих управляющих параметров приводов.

После получения аналитических выражений координат режущей кромки ковша определяется скорость и ускорение звеньев рабочего оборудования. Поскольку рассматривается только процесс набора горной массы движение происходит в одной плоскости, все угловые векторы направлены перпендикулярно плоскости движения.

Угловые скорости звеньев рабочего оборудования определяются как производные соответствующих обобщённых координат по времени. В рас-

смаатриваемой модели переменными являются угол поворота φ_2 и продольное перемещение d_4 , при этом угловая скорость каждого последующего звена формируется с учётом кинематической связи с предыдущими звеньями механизма. Линейные скорости точек механизма определяются дифференцированием их радиус-векторов относительно базовой системы координат. Угловые ускорения звеньев получаются дифференцированием угловых скоростей с учётом вторых производных обобщённых координат.

Полученные выражения для угловых скоростей, угловых ускорений и линейных ускорений формируют необходимую основу для динамического анализа рабочего оборудования. Кинематическая модель позволяет однозначно определить состояние механизма в каждый момент времени при заданных законах изменения обобщённых координат $\varphi_2(t)$ и $d_4(t)$. В отличие от чисто геометрической постановки, динамический расчёт требует учёта масс звеньев, положений их центров масс и моментов инерции. Таким образом, задача определения нагрузок на напорный и подъёмный приводы сводится к последовательному вычислению внутренних сил и моментов в звеньях механизма при известной внешней нагрузке на рабочий орган.

В качестве инструмента решения используется рекурсивный метод Ньютона-Эйлера, позволяющий выполнять расчёт поэтапно: от базы к ковшу – для определения кинематических параметров, и от ковша к базе – для определения силовых величин [2]. Структура вычислительной процедуры представлена на рис. 2. Прямая рекурсия использует ранее полученные ускорения звеньев, тогда как обратная рекурсия обеспечивает определение реакций в кинематических парах и формирование обобщённых усилий приводов. Тем самым обеспечивается переход от описания движения рабочего оборудования к определению требуемых усилий на приводах.

Вывод. Разработана кинематическая модель рабочего оборудования ЭКГ-20К на основе метода эквивалентного манипулятора. Получены аналитические выражения координат, скоростей и ускорений звеньев с учётом призматического сочленения. Сформирована динамическая постановка задачи расчёта усилий приводов по рекурсивному алгоритму Ньютона–Эйлера. Разработанная модель создаёт основу для численного определения нагрузок на напорный и подъёмный приводы при различных траекториях копания.

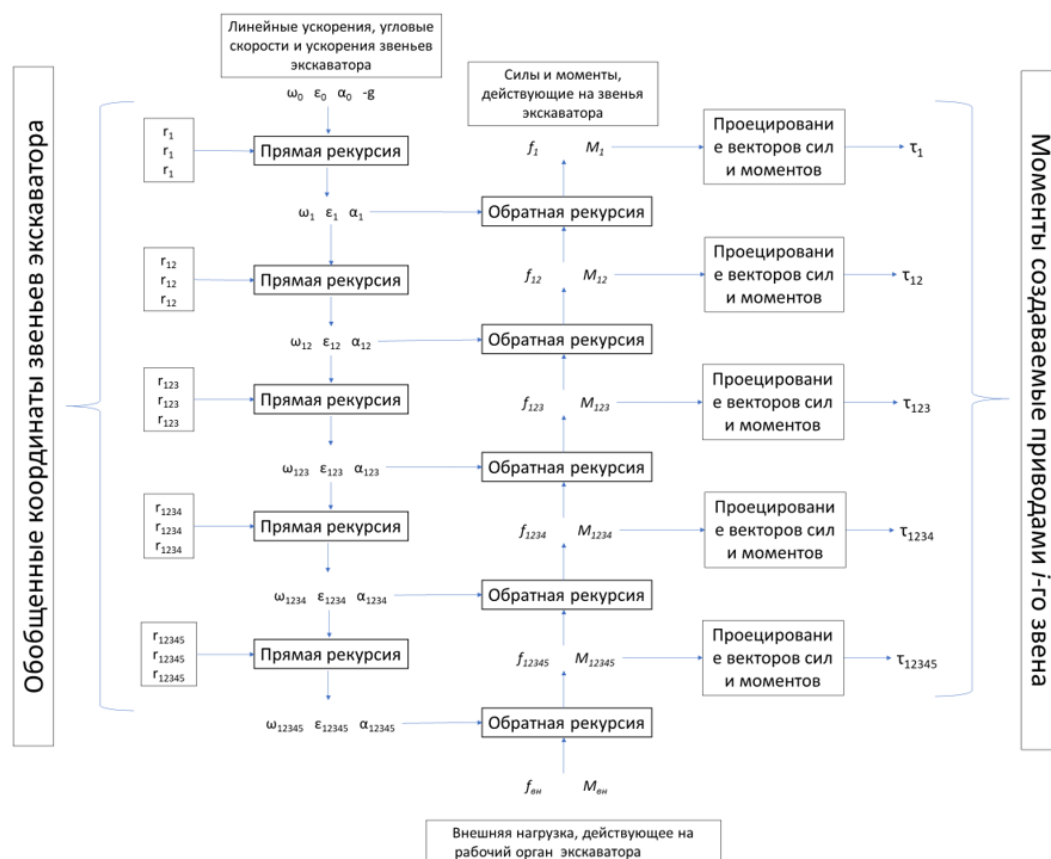


Рис. 2. Схема численного решения обратной задачи динамики на основе метода Ньютона-Эйлера (составлено авторами)

Список литературы

1. Завьялов, В. М. Математическая модель механической части взаимосвязанных электроприводов напора и подъема карьерного экскаватора / В. М. Завьялов, И. Ю. Семькина // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310, № 3. – С. 40-43. – EDN HZVQPZ.
2. Певзнер, Л. Д. Моделирование и управление операцией транспортирования экскаватора-мехлопаты / Л. Д. Певзнер, С. Е. Бабаков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 2. – С. 207-222. – EDN TJUUSD.

УДК 622.23.054

КОМБИНИРОВАННЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН АГРЕГАТА ДЛЯ ПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ

В.И. Шишлянников¹, студент, **О.И. Плотникова¹**, студент,
Е.А. Бисерова¹, студент, **А.О. Щенин¹**, студент, **Д.И. Шишлянников¹**, д.т.н., доцент
¹ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Повышение эффективности использования выемочных и проходческих машин возможно посредством совершенствования существующих и разработки новых перспективных конструкций исполнительных органов горных комбайнов, обеспечивающих разрушение массивов наименее энергоёмкими способами. Предложена перспективная конструкция, представляющая собой комбинированный исполнительный орган проходческого агрегата, включающий в себя баровый исполнительный орган и двусторонние гидроцилиндры-отрывники, установленные внутри балки бара. Описан принцип действия и порядок работы предлагаемого исполнительного органа. Использование предлагаемого исполнительного органа позволит разрушать горный массив наименее энергозатратным способом, обеспечивающим высокую производительность и наименьший удельный расход режцов.

Ключевые слова: комбинированный исполнительный орган; разрушение горных пород; режцы; гидроотрывники; повышение эффективности использования горных комбайнов.

COMBINED EXECUTIVE BODY OF THE UNIT FOR MINING WORKS

V.I. Shishlyannikov, O.I. Plotnikova, E.A. Biserova, A.O. Shchenin, D.I. Shishlyannikov,

Improving the efficiency of the use of excavation and tunneling machines is possible through the improvement of existing and the development of new promising designs of executive bodies of mining combines, providing destruction of arrays of the least energy-intensive ways. A design is proposed which is a combined executive body of the tunneling-cleaning unit, which includes a bar executive and two-sided hydrocylinders-tappets installed inside the bar beam. The principle of operation and the order of work of the proposed executive body are described. The use of the proposed executive body will allow to destroy the mountain massif in the least energy-intensive way, ensuring high productivity and the lowest specific consumption of cutters.

Keywords: combined executive body; destruction of mountain rocks; incisors; hydrotractors; increasing the efficiency of the use of mountain combines.

Для предприятий, осуществляющих добычу твердых полезных ископаемых, проведение горно-строительных и проходческих работ подземным способом, актуальными остаются задачи повышения эффективности использования проходческих машин механизированных комплексов, снижения удельных энергозатрат процесса разрушения забоя и уменьшения количества мелких пылевидных классов в продуктах отбойки. При выборе рациональных параметров режущих исполнительных органов комбайнов наиболее важным критерием является минимальный путь резания, отнесенный к единице объема разрушаемого массива, что обуславливает достижение наименьших значений удельной энергоёмкости процесса разрушения горных массивов, количества пылевидных классов в продуктах отбойки, износа режущего инструмента. Минимальный путь резания обеспечивается при максимальном значении толщины стружки. В тоже время, увеличение толщины стружки обуславливает повышение нагрузок на по-

родоразрушающий инструмент и приводы исполнительных органов горных машин, что определяет необходимость увеличения стойкости резцов, металлоёмкости и установленной мощности приводов исполнительных органов горных комбайнов [1, 2].

Авторами предложена конструкция, представляющая собой исполнительный орган проходческо-очистного агрегата, включающий в себя баровый исполнительный орган и двусторонние гидроцилиндры-отрывники, установленные внутри балки бара [3]. Исполнительный орган монтируется на каретке, которая крепится на оголовке универсального силового манипулятора, который в свою очередь монтируется на ходовой части проходческо-очистного агрегата. Баровый исполнительный орган разрушает горный массив резанием, внедряясь в него торцевой частью на всю его полезную длину. После заглубления бара в массив, двусторонние гидроцилиндры-отрывники воздействуют на боковые поверхности прорезанной баром щели, осуществляя тем самым отделение от массива объема горной породы путём отрыва в сторону свободной поверхности.

Предлагаемый исполнительный орган агрегата для проходческо-очистных работ (рис. 1) состоит из плоского режущего бара 1 с резцами 2, установленными на режущей цепи 3. Режущий бар 1 смонтирован на каретке 4 универсального силового манипулятора 5. Податчик 6 каретки 4 обеспечивает внедрение режущего бара 1 своей торцевой частью в массив и прорезание в массиве щели размером $B \times L \times H$. Вращающий момент на приводную звездочку бара 1 передаётся от привода 7. Фиксация исполнительного органа проходческо-очистного агрегата относительно плоскости забоя осуществляется посредством силового манипулятора 5 и распорных гидроцилиндров 8, пики 9 которых внедряются в массив при зарубке бара 1 и выводятся из контакта с забоем при осуществлении отрыва целика. Внутри корпуса 10 установлен ряд гидроотрывников 11, предназначенных для воздействия на боковые поверхности щелей для отделения от массива подрезанного целика породы посредством отрыва.

Цилиндрические гидроотрывники (рис. 2) содержат корпус 1 с каналами 2, поршневую полость 3, поршень 4, перемещение которого ограничено упором 5. При подаче рабочей жидкости по каналам 2, выполненным в корпусе 1, в поршневой полости 3 цилиндра создаётся избыточное давление, под действием которого перемещаются поршни 4. Величина перемещения поршней ограничивается упорами 5. Пружины 6 обеспечивают возврат поршней в исходное положение при подключении каналов 2 к сливным трубопроводам (не показаны на рисунке).

На рис. 3 представлен общий вид предлагаемого агрегата для проходческих и очистных работ. Каретка 1 исполнительного органа монтируется на универсальный силовой манипулятор 2, который в свою очередь устанавливается на ходовой части 3 агрегата. В зависимости от условий работы ходовая часть может быть выполнена на колесно-рельсовом, пневмоколесном или гусеничном ходу. Универсальный силовой манипулятор 2 обеспечивает ориентирование исполнительного органа (перемещение в вертикальной и горизонтальной плоскости, поворот вокруг оси симметрии на

360°), а также жесткую фиксацию устройства по всему сечению проходческого или очистного забоя 4.

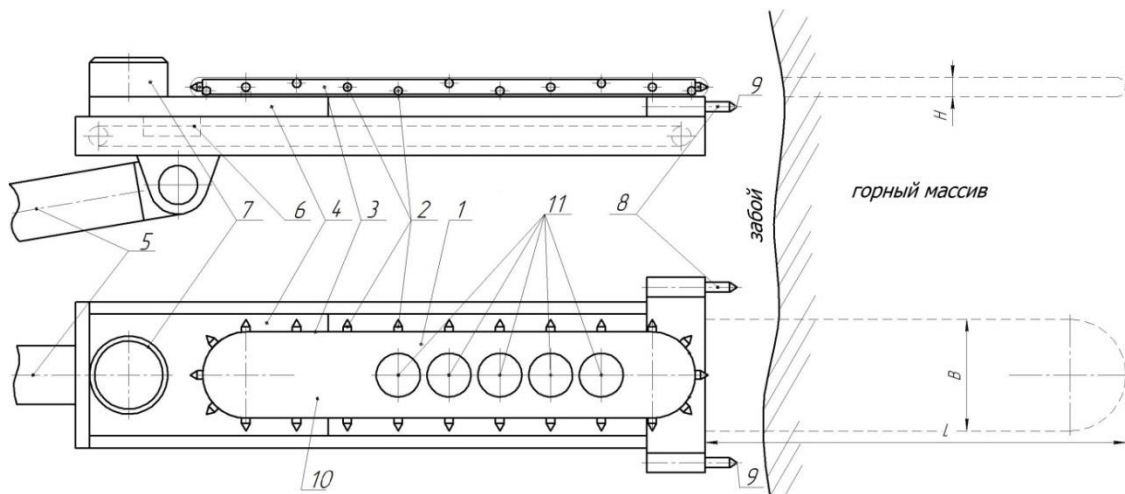


Рис. 1. Схема исполнительного органа агрегата для проходческо-очистных работ: 1 – плоский режущий бар; 2 – резцы; 3 – режущая цепь бара; 4 – каретка; 5 – силовой манипулятор; 6 – податчик каретки; 7 – приводной двигатель бара; 8 – распорные гидроцилиндры; 9 – пики распорных гидроцилиндров; 10 – корпус режущего бара; 11 – цилиндрические гидроотрывники

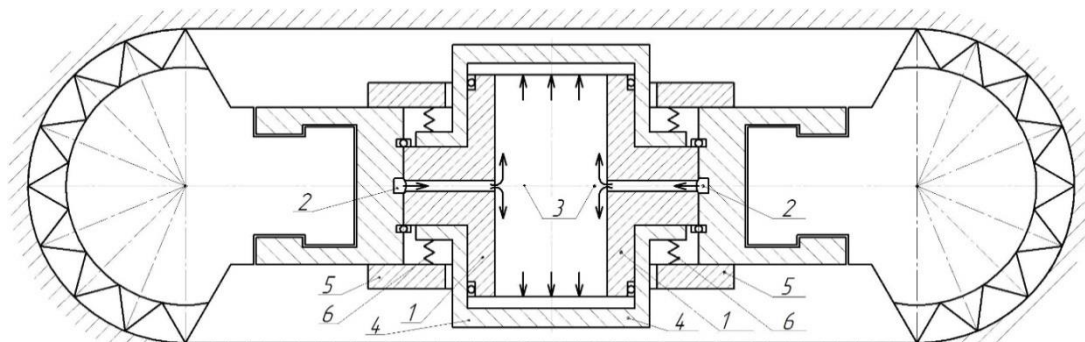


Рис. 2. Поперечный разрез гидроотрывника исполнительного органа: 1 – корпус гидроотрывника; 2 – каналы; 3 – поршневая полость; 4 – поршень; 5 – упор; 6 – пружина

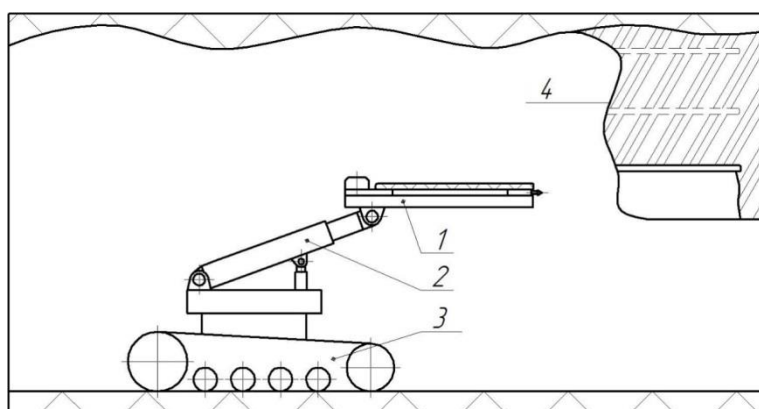


Рис. 3. Общий вид агрегата для проходческо-очистных работ (вид сбоку): 1 – каретка; 2 – универсальный силовой манипулятор; 3 – ходовая часть агрегата; 4 – забой

Работа устройства осуществляется следующим образом. После установки и фиксации ходовой части перед забоем исполнительный орган с

помощью универсального силового манипулятора подводят к поверхности забоя и с помощью распорных гидроцилиндров фиксируют относительно поверхности забоя. После этого включают привод плоского режущего бара. С помощью податчика режущий бар торцевой частью подают в горный массив, прорезая в нем первоначальные врубы, после чего по заданной схеме осуществляют разрушение остального массива за счет последовательных операций прорезания щели баром и дальнейшего отрыва большого объема породы подрезанного целика от массива с помощью цилиндрических гидроотрывников.

Поскольку при использовании предлагаемого устройства отделение от массива существенных объемов горной породы будет производиться путем отрыва, большая часть горного массива будет разрушаться наименее энергоемким способом, обеспечивающим высокую производительность и наименьший удельный расход резцов. Отсутствие излишнего дробления горной породы при отделении ее от массива позволит существенно снизить количество пылевидных классов в отделяемой горной массе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Позин, Е.З. Измельчение углей при резании / Е.З. Позин, В.З. Меламед, С.М. Азовцева. – М.: Наука, 1977. – 139 с.
2. Лавренко С.А., Труфанова И.С. Экспериментальные исследования процесса разрушения кембрийских глин режущим инструментом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2015. - № 5. - С. 113–119.
3. Исполнительный орган агрегата для проходческо-очистных работ: пат. 2652778 Рос. Федерация / Л.И. Старков, Д.И. Шишлянников, А.Б. Максимов, С.А. Лавренко. № 2017113633; заявл. 19.04.2017; опубл. 28.04.2018. Бюл. №13. – 10 с.

УДК 656.342.071.8

АНАЛИЗ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ВОДЫ В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ШАХТНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК

Т. И.Юсупов¹, ассистент, В.Я.Потапов², проф., д-р техн. наук,
В.В.Потапов², доц., канд. техн. наук

¹Сибайский институт (филиал) Уфимского университета науки и технологий, г. Сибай

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

В статье на основе принципов классической механики выполнен анализ затрат энергии при транспортировании потоков воды в нагнетательных трубопроводах шахтных водоотливных установок. Получены зависимости полной энергии потока воды в функции скорости движения воды в трубопроводе. Рассмотрены особенности энергетики режима холостого хода насосной установки. Показано, что в этом режиме работа в трубопроводе не совершается, однако расход энергии имеет место. Он пропорционален, в том числе, времени поддержания этого режима и высоте столба, удерживаемой в трубопроводе воды.

Ключевые слова: потенциальная и кинетическая энергия; полная гидравлическая энергия; расход воды; потери напора; удельная теплоёмкость; скорость потока воды.

ANALYSIS OF ENERGY COSTS DURING WATER TRANSPORTATION IN INJECTION PIPELINES OF MINE DRAINAGE INSTALLATIONS

Yusupov T. I., Potapov V.Ya., Potapov V.V.

On the basis of the principles of classical mechanics authors analyze the costs of energy during transportation of water flows in the discharge lines of mine drainage systems. Authors obtain the dependences of the total energy of the water flow in the function of velocity of water in the pipeline. The article describes the features of energetics of idling pumping unit. It is shown that in this mode operation in the pipeline is not performed, but the energy consumption takes place. It is proportional to, inter alia, the maintenance time of this mode and the height of the column of retained water in the pipeline.

Keywords: potential and kinetic energy; full hydraulic energy; water consumption; pressure loss; specific heat capacity; flow velocity.

При расчетах параметров нагнетательных трубопроводов шахтных водоотливных установок скорость движения воды в них принимается в пределах 2–3 м/с [1, 2]. Принятые еще в 1920–40 гг., эти значения скоростей не пересматривались, хотя значительно устарели и нуждаются в соответствующей переоценке. Выполним её с точки зрения энергетических затрат на транспортирование воды по нагнетательным трубопроводам.

Передаваемая от насоса полная гидравлическая энергия трубопроводного става $E_{\text{полн}}$ расходуется на подъём воды на геометрическую высоту H_r (потенциальная составляющая $E_{\text{пот}}$), на перемещение воды по трубопроводу со скоростью $v_{\text{тр}}$ (кинетическая составляющая $E_{\text{кин}}$), на преодоление гидравлического сопротивления трубопровода $E_{\text{сопр}}$ и на увеличение теплосодержания потока воды в трубопроводе $E_{\text{тепл}}$. Следовательно, полная энергия потока воды в нагнетательном трубопроводе составит

$$E_{\text{полн}} = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} + E_{\text{сопр}} + E_{\text{тепл}}.$$

Или в другом виде:

$$E_{\text{полн}} = \rho Q g H_r + \rho Q_{\text{тр}} \frac{v_{\text{тр}}^2}{2} + \rho Q_{\text{тр}} g \Delta H_{\text{тр}} + \rho Q_{\text{тр}} C_p \Delta T$$

где $Q_{\text{тр}}$ – расход воды через трубопровод, равный подаче насоса (насосов); ρ – плотность шахтной воды; $\Delta H_{\text{тр}}$ – потери напора воды в трубопроводе; C_p – удельная теплоёмкость шахтной воды; ΔT – разность температур потока воды на входе и на выходе из трубопровода.

С учетом того, что $\rho Q_{\text{тр}} = m_{\text{тр}}$ – секундная масса воды, проходящей через трубопровод, получим

$$E_{\text{полн}} = m_{\text{тр}} g H_r + m_{\text{тр}} \frac{v_{\text{тр}}^2}{2} + m_{\text{тр}} g \Delta H_{\text{тр}} + m_{\text{тр}} C_p \Delta T.$$

Пренебрегая последним слагаемым в этом уравнении ввиду его незначительности и с учетом того, что

$$\Delta H_{\text{тр}} = \varepsilon_{\text{тр}} \frac{v_{\text{тр}}^2}{2g},$$

где $\varepsilon_{\text{тр}}$ – коэффициент потерь напора в трубопроводе, запишем уравнение полной удельной энергии трубопроводного става (для единичной массы воды):

$$q_{\text{полн}} = g H_r + 0,5(1 + \varepsilon_{\text{тр}}) v_{\text{тр}}^2. \quad (1)$$

Уравнение соответствует любым видам трубопроводов (вертикальным, наклонным или горизонтальным) и может служить основой для энергетического анализа процесса транспортирования в них воды.

Поскольку размерность слагаемых уравнения (1) представляет собой энергию в единицу времени, то определение полного удельного расхода энергии $\omega_{\text{полн}}$ должно осуществляться с учетом времени прохождения воды через трубопровод $Z_{\text{тр}}$:

$$w_{\text{полн}} = g H_r Z_{\text{тр}} + 0,5(1 + \varepsilon_{\text{тр}}) v_{\text{тр}}^2 Z_{\text{тр}}. \quad (2)$$

Для типовых шахтных вертикальных нагнетательных трубопроводов, длина которых $L_{\text{тр}}$ незначительно отличается от H_r , уравнение (2) можно записать как

$$w_{\text{полн}} = g v_{\text{тр}} Z_{\text{тр}}^2 + 0,5(1 + \varepsilon_{\text{тр}}) v_{\text{тр}}^2 Z_{\text{тр}}.$$

Тогда, с учетом изложенного, КПД трубопровода составит

$$n_{\text{тр}} = \frac{g H_r + 0,5 v_{\text{тр}}^2}{g H_r + 0,5 v_{\text{тр}}^2 + 0,5 \varepsilon_{\text{тр}} v_{\text{тр}}^2}.$$

Рассмотрим энергетику режима холостого хода насосной установки (насос + трубопровод), при котором напор насоса при нулевой подаче H_0 меньше H_r . В этом режиме насос передаёт в трубопровод мощность, эквивалентную мощности удержания столба воды в трубопроводе при $v_{\text{тр}} = 0$. Следовательно, полная энергия трубопровода будет равна только её потенциальной составляющей:

$$E_{\text{полн}}^{xx} = E_{\text{пот}}^{xx} = m_{\text{пм}} g H_0,$$

где $m_{\text{пм}}$ – масса одного погонного метра столба воды в трубопроводе.

Расход электроэнергии в этом режиме

$$W_{xx} = m_{\text{пм}} g H_0 Z_{xx},$$

где Z_{xx} – время работы установки в режиме холостого хода.

Согласно физике процесса в режиме холостого хода насосной установки работа в трубопроводе не совершается, хотя энергия будет расходу-

ваться. Этим и объясняется наличие мощности на валу насоса и на зажимах сетевого двигателя в данном режиме. Например, для насоса ЦНС 300–600 мощность в режиме холостого хода составляет около 350 кВт при номинальной мощности 700 кВт.

Расход электроэнергии в рабочем режиме работы трубопровода

$$W_{\text{тр}} = m_{\text{тр}} Z_{\text{тр}} [gH_r + 0,5(1 + \varepsilon_{\text{тр}})v_{\text{тр}}^2].$$

Результаты анализа этого уравнения на примере шахтной водоотливной установки с насосами ЦНС 300–600 и высотой водоподъема $H_r = 500$ м приведены в таблице и на рис. 1, 2. Определение внутреннего диаметра нагнетательного трубопровода $d_{\text{внутр}} = f(v_{\text{тр}})$ осуществлялась при этом по известным методикам.

Результаты показывают, что зависимости $\omega_{\text{полн}}(W_{\text{пр}}) = f(v_{\text{тр}})$ носят экстремальный характер, следовательно при $v_{\text{тр}} = 11$ м/с расход электроэнергии на перемещение воды по трубопроводу будет минимален, поэтому данный режим работы трубопровода будет оптимальным по критерию энергозатрат. Однако такие значения скоростей не реальны для шахтных водоотливных установок, поэтому наиболее приемлемым диапазоном, по нашему мнению, следует считать 4–6 м/с. Этим значениям соответствуют значительно меньшие, чем в настоящее время, энергетические затраты (в среднем в 1,8 раза меньше, чем при рекомендуемом в настоящее время диапазоне 2–3 м/с). Кроме того, внутренний диаметр трубопровода уменьшается при этом с 230 до 160–130 мм (см. таблицу и рис. 2). Следовательно, переход к более высоким значениям скоростей $v_{\text{тр}}$ обеспечивает значительное снижение как эксплуатационных (энергетических), так и капитальных затрат на сооружение трубопроводов.

Таблица 1 - Расход электроэнергии в рабочем режиме работы трубопровода шахтной водоотливной установки с насосами ЦНС 300–600

$v_{\text{тр}}$, м/с	$Z_{\text{тр}}$, с	$\omega_{\text{пот}}$, кВтч/кг	$\omega_{\text{кин}} + \omega_{\text{сопр}}$, кВтч/кг	$\omega_{\text{пол}}$, кВтч/кг	$W_{\text{тр}}$, кВтч	$d_{\text{внутр}}$, мм
2	250,00	0,340	0,012	0,352	30,78	230,25
4	125,00	0,170	0,023	0,193	16,91	162,81
6	83,33	0,113	0,035	0,148	12,96	132,94
8	62,50	0,085	0,046	0,131	11,49	115,13
10	50,00	0,068	0,058	0,126	11,01	102,97
12	41,67	0,057	0,069	0,126	11,03	94,00
14	35,71	0,049	0,081	0,130	11,34	87,03
16	31,25	0,043	0,093	0,135	11,82	81,41
18	27,78	0,038	0,104	0,142	12,42	76,75
20	25,00	0,034	0,116	0,150	13,10	72,81
22	22,73	0,031	0,127	0,158	13,84	69,42
24	20,83	0,028	0,139	0,167	14,62	66,47
26	19,23	0,026	0,150	0,177	15,45	63,86
28	17,86	0,024	0,162	0,186	16,29	61,54
30	16,67	0,023	0,174	0,196	17,16	59,45

По данным работы [2] капитальные затраты на сооружение трубопроводных ставов составляют 15–20 % от стоимости всей водоотливной установки. Следовательно, реализация изложенных предложений может существенно повысить эффективность всего комплекса шахтного водоотлива.

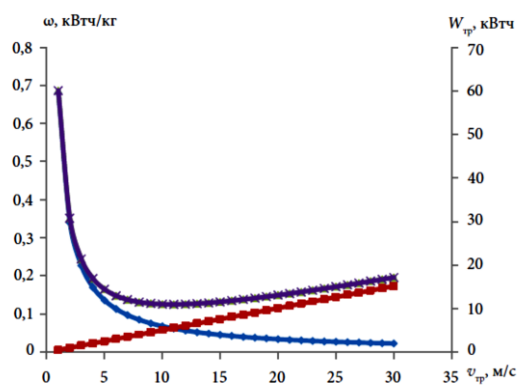


Рис. 1. Энергетические зависимости нагнетательных трубопроводов

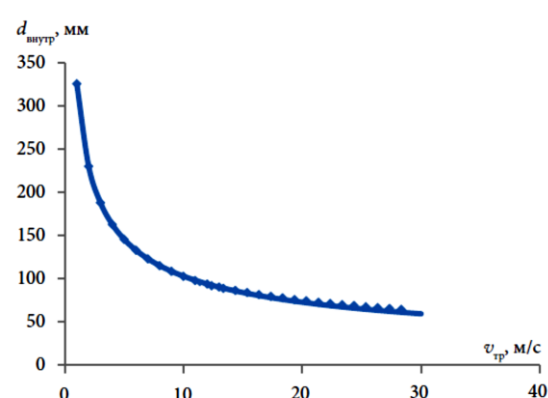


Рис. 2. Зависимость внутреннего диаметра нагнетательного трубопровода от скорости движения в нём воды

Конечно, отрицательным последствием увеличения скоростей потока воды в нагнетательных трубопроводах является повышение величины гидравлического удара. Однако его снижение до требуемых значений может быть достигнуто простым увеличением числа обратных клапанов на трубопроводе или применением других, более совершенных технических средств. При этом некоторое увеличение сопротивления трубопроводной линии в диапазоне скоростей 4–6 м/с (см. рис. 1) не окажет существенного влияния на энергетические затраты при перемещении по ней воды.

Список литературы

1. Веселов А. И. Рудничный водоотлив. Свердловск, 1956. 532 с.
2. Попов В. М. Рудничные водоотливные установки. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1983. 304 с.
3. Тимухин С. А. [и др.] Оценка энергетической эффективности шахтной водоотливной установки с учетом фактора времени // Изв. УГГУ. 2005. Вып. 20. С. 74–77.
4. Долганов А.В., и др. Обоснование и расчет потерь электроэнергии при эксплуатации насосных установок // В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 2024. С. 60-65.
5. Потапов В.Я., Стожков Д.С., Потапов В.В., Юсупов Т.И. Сравнительная оценка функциональной надежности секционных шахтных одно- и двухпоточных насосов ... Теория и практика мировой науки. 2024. - № 3. С. 25-30.

МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

***Чтоб из масс, «N-содержащих»,
Зёрна ценные извлечь,
В цепь событий предстоящих
Труд машин сих должен лечь!
Чтоб от шума и вибраций
Человеку не страдать,
Больше этих операций
Надо роботам отдать.***

Доц. П.А. Жиганов

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКЕ «ЧЕРНИГОВСКАЯ»

М.С. Горяйнов¹, В.М. Ефременко¹

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

Представлены результаты исследования показателей качества электрической энергии в системе электроснабжения обогатительной фабрики «Черниговская». Рассмотрены особенности электропотребления технологического оборудования с электрическим приводом. На основе натурных измерений выполнена оценка соответствия показателей качества электрической энергии требованиям ГОСТ 32144–2013 [1]. Проведен анализ гармонического состава напряжения и выявлено влияние нелинейной нагрузки, обусловленной работой частотно-регулируемых приводов. Установлено, что основные показатели качества электрической энергии соответствуют нормативным требованиям, однако наблюдается увеличение гармонических составляющих напряжения.

Ключевые слова: качество электрической энергии, система электроснабжения, электрический привод, гармонические искажения.

POWER QUALITY INVESTIGATION AT THE CHERNIGOVSKAYA COAL PREPARATION PLANT

M.S. Goryainov, V.M. Efremenko

The paper presents the results of electric power quality investigation in the power supply system of the Chernigovskaya coal preparation plant. Field measurements were performed and compliance with power quality standards was assessed [1]. The voltage harmonic spectrum was analyzed. It was found that nonlinear loads, including variable frequency drives, significantly affect harmonic distortion.

Keywords: electric power quality, power supply system, harmonic distortion, electric drive.

Введение. Обогажительные фабрики являются крупными промышленными потребителями электрической энергии и важными элементами горнодобывающего комплекса. Основные технологические процессы реализуются с использованием оборудования с электрическим приводом, включая дробильные установки, насосы, конвейеры и мельницы [3, 4].

Современные системы электропривода широко используют частотно-регулируемые преобразователи, обеспечивающие повышение энергоэффективности и надежности технологических процессов. Однако применение преобразовательной техники приводит к появлению нелинейных нагрузок, являющихся источниками высших гармоник [6].

Высшие гармоники вызывают ухудшение качества электрической энергии, увеличение потерь мощности, перегрев оборудования и снижение срока службы электрических машин [7]. В соответствии с требованиями ГОСТ 32144–2013 [1], показатели качества электрической энергии должны находиться в допустимых пределах.

В связи с этим исследование качества электрической энергии на промышленных предприятиях является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью работы является исследование показателей качества электрической энергии в системе электроснабжения обогатительной фабрики.

Для достижения поставленной цели выполнены: натурные измерения показателей качества электрической энергии; анализ гармонического состава напряжения; оценка соответствия показателей требованиям нормативных документов [1].

Характеристика объекта исследования.

Обогатительная фабрика представляет собой предприятие с непрерывным технологическим циклом. Основными потребителями электрической энергии являются асинхронные электродвигатели технологического оборудования.

Система электроснабжения включает трансформаторные подстанции, распределительные устройства и питающие линии. Частотно-регулируемые приводы являются основными источниками гармонических искажений напряжения [6].

Методика и результаты исследования.

Исследование проводилось методом натурных измерений показателей качества электрической энергии. Оценка выполнялась в соответствии с требованиями ГОСТ 32144–2013 (результаты измерений представлены в таблице 1) [1].

Таблица 1 – Результаты измерений

Показатель	Норматив	Измеренное значение	Примечание
Отклонение напряжения, %	± 10	$-6,5 \dots +7,2$	В пределах нормы
THD_U, %	≤ 8	6,1	Повышение при работе ЧРП
5-я гармоника, %	≤ 6	4,8	—
7-я гармоника, %	≤ 5	3,9	—
Несимметрия напряжений, %	≤ 2	1,4	—
Фликер Pst	$\leq 1,38$	1,1	Пуск двигателей
Частота сети, Гц	$50 \pm 0,2$	49,9–50,1	В пределах нормы

Полученные результаты показывают, что показатели качества электрической энергии находятся в допустимых пределах. Спектр гармонических составляющих напряжения показан на рис. 1.

Анализ спектра показал, что наибольший вклад в коэффициент гармонических искажений вносят 5-я и 7-я гармоники, характерные для работы частотно-регулируемых приводов [6, 7].

Обсуждение результатов. Установлено, что качество электрической энергии в значительной степени определяется режимами работы электроприводов. Частотно-регулируемые приводы являются основными источниками гармонических искажений напряжения.

Гармонические искажения могут приводить к увеличению потерь энергии; к перегреву оборудования; к снижению срока службы электрических машин; к снижению надежности системы электроснабжения [2, 6].

Полученные результаты соответствуют данным других исследований [6, 7].

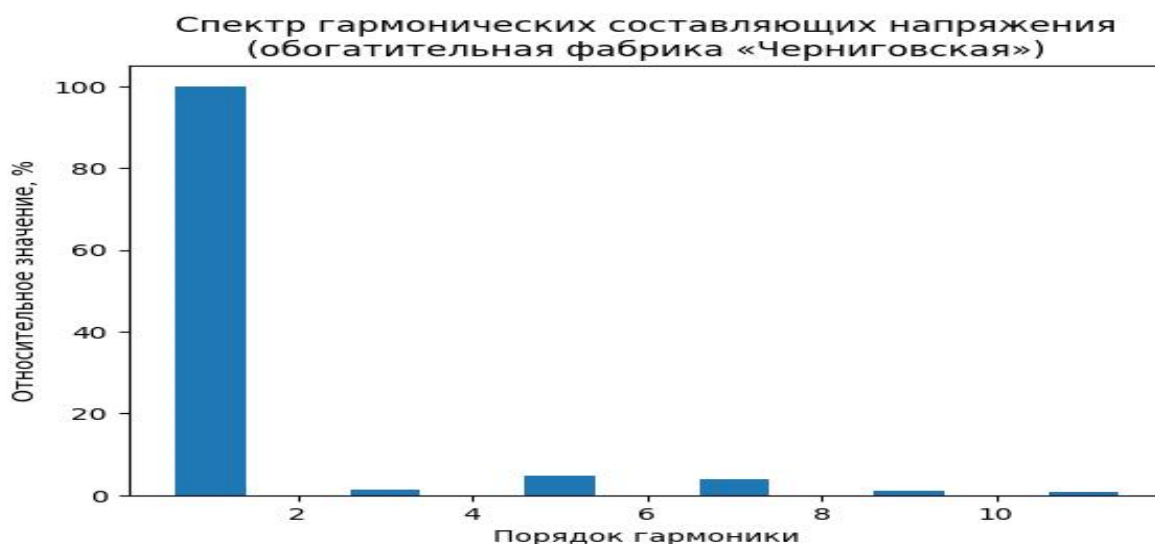


Рисунок 1 – Спектр гармонических составляющих напряжения

Научная новизна.

Получены экспериментальные данные о показателях качества электрической энергии на действующем промышленном предприятии и установлено влияние высших гармоник на качество электрической энергии.

Заключение:

Показатели качества электрической энергии соответствуют требованиям ГОСТ 32144–2013 [1].

Установлено, что основным источником гармонических искажений являются частотно-регулируемые приводы.

Полученные результаты подтверждают необходимость контроля качества электрической энергии и применения мероприятий по снижению гармонических искажений.

Список литературы

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2014. – 20 с.
2. Правила устройства электроустановок: ПУЭ. – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 712 с.
3. Веников В. А. Электрические системы и сети. – М.: Высшая школа, 2006. – 512 с.
4. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация промышленных установок. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 408 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 2010. – 640 с.
6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 331 с.
7. Розанов Ю. К., Ковалев А. В. Влияние нелинейных нагрузок на качество электрической энергии // Электричество. – 2015. – № 6. – С. 12–18.

УДК 622.732

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ

Г.А. Басалай¹, Д.А. Карпович¹

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Проведен анализ факторов, влияющих на эффективность эксплуатации, а также на проведение планово-предупредительного ремонта конусных дробилок крупного дробления. Разработаны организационные мероприятия, направленные на сокращение времени безопасного проведения планово-предупредительного ремонта конусной дробилки. Предложена методика мониторинга состояния брони с использованием 3Д-сканера.

Ключевые слова: конусная дробилка, горная порода, крупное дробление, ремонт дробилки

DEVELOPMENT OF MEASURES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF REPAIR OF A CONE CRUSHER FOR COARSE CRUSHING

R.A. Basalai, D.A. Karpovich

An analysis of factors influencing the operational efficiency as well as scheduled preventive maintenance of coarse cone crushers was conducted. Organizational measures have been developed aimed at reducing the time for safe scheduled preventive maintenance of the cone crusher. A method for monitoring the condition of armor using a 3D scanner is proposed.

Keywords: cone crusher, rock, coarse crushing, crusher repair

Введение. В подготовительных отделениях горно-обогатительных комбинатов (ГОК) основным оборудованием являются дробилки и мельницы [1-3], предназначенные для измельчения горной породы до требуемых фракций, поступающей из карьеров или рудников. Эффективность работы ГОК в значительной степени определяется конструктивными и эксплуатационными параметрами основного технологического оборудования [4-6].

Содержание исследований и некоторые результаты. Авторами проведен анализ основных факторов, влияющих на скорость и качество проведения ремонта оборудования горно-обогатительной фабрики.

В качестве ключевых критериев выбраны:

- квалификация работников;
- конструктивные особенности оборудования;
- интенсивность использования подъемных механизмов;
- время на выполнение конкретной технологической операции.

В результате построены диаграммы (рис. 1), на которых отражены трудозатраты в %-человеко/часов по каждому из четырех участков фабрики: рудоподготовки, обогащения, флотации и сортировки.

Таким образом, максимальные показатели по трудозатратам на проведение ППР фабрики относятся к ремонту оборудования рудоподготовки с общим числом около 2 тыс.человеко/часов. При этом одна из самых трудоемких операций, т.е. ремонт дробилки, составляет 32 % от общего объема работ на этом участке.

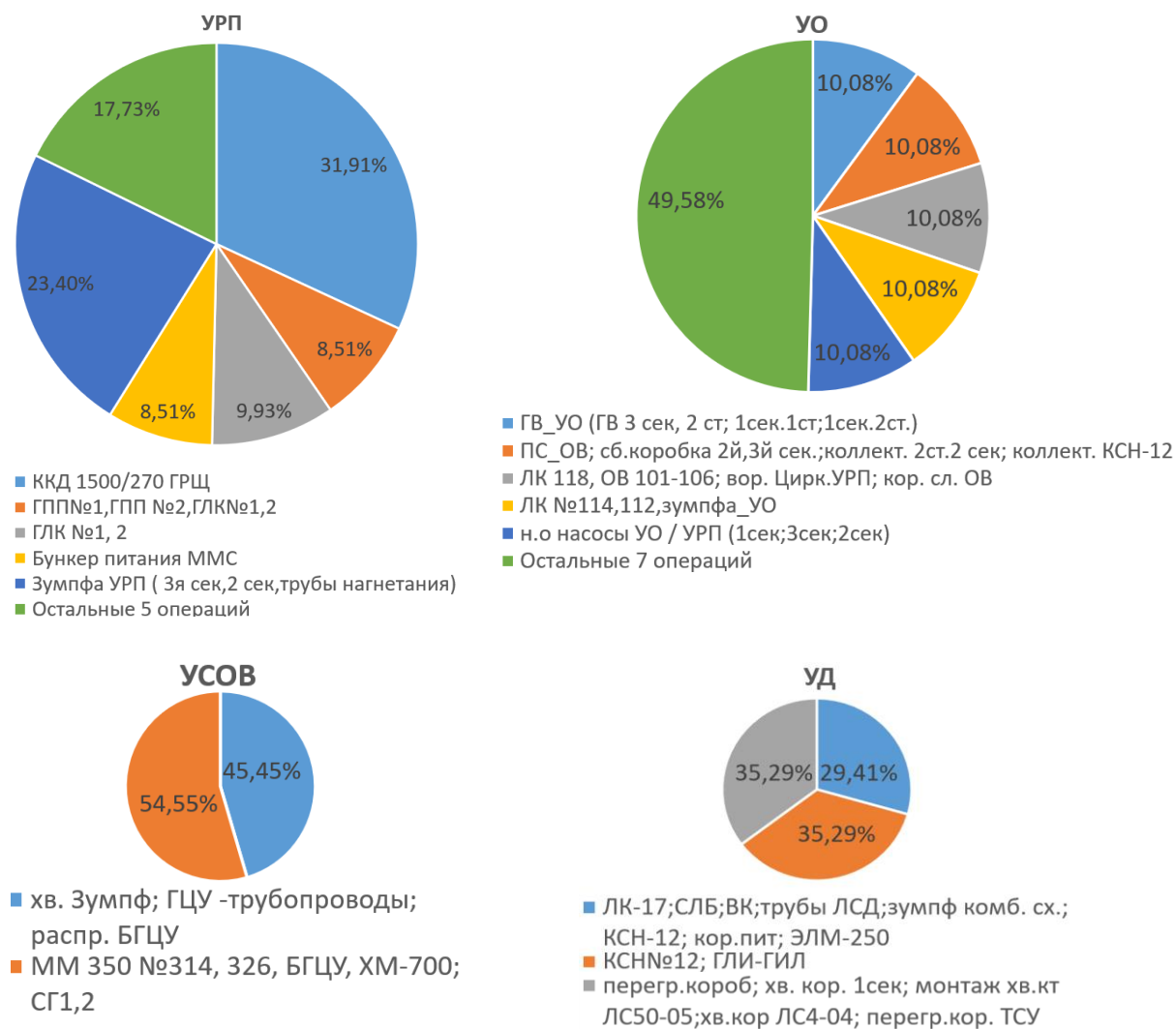


Рис.1. Основные факторы, влияющие на эффективность проведения ремонта технологического оборудования ГОФ

Авторы провели также анализ факторов, влияющих на проведение ППР конусной дробилки крупного дробления серии ККД-1500. Для этого изучены ее устройство, эксплуатационные свойства, а также особенности ремонта. В результате, построена диаграмма (рис. 2), отображающая процентное соотношение трудозатрат на выполнение основных работ по ее ремонту. Из нее следует, что наиболее трудоемкие – это демонтаж домкратов траверсы и укрытия, а также монтаж лесов. На их проведение суммарно требуется до 42 % человеко/часов.

Комплексный анализ проведения ППР как всей фабрики, так и непосредственно – конусной дробилки, позволил сформировать дополнительно к применяемым на горно-обогатительных фабриках следующие мероприятия:

1. Обучающие презентации и видеоролики для теоретического усвоения методик проведения работ в составе бригады;
2. Подготовку персонала, привлекаемого для проведения ППР сложного технологического оборудования (дробилка и мельница), отработку основных приемов демонтажа, сборки и регулировки элементов конструкции на симуляторах;

3. Анализ информации, содержащейся в отчетах по предыдущим (аварийным, планово-предупредительным или капитальным) ремонтам;
4. Обмен опытом с коллегами профильных предприятий;
5. Повышение квалификации инженерно-технических работников на предприятиях-разработчиках и изготовителях профильного технологического оборудования.



Рис.2. Основные факторы, влияющие на эффективность проведения ремонта дробилки ККД-1500

Эффективность проведения ремонта дробилки зависит не только от проведения работ в запланированные сроки остановки фабрики, но и мониторинга состояния основных элементов и режимов работы при ежедневном ТО.

Одним из важных факторов, влияющих на продолжение надежной эксплуатации дробилки, является, в том числе, и текущее состояние комплектов брони на дробящем конусе и чаше. Проводимый визуальный осмотр брони – это субъективное заключение без документального подтверждения параметров.

Мы предлагаем инновационную методику мониторинга состояния брони с использованием 3Д-сканера поверхности с соответствующим программным обеспечением. Это позволит получать объективную информацию не только о текущем состоянии брони, но и отслеживать кинетику износа с формированием прогнозных показателей проведения ППР.

Заключение. Таким образом, разработанные инновационные предложения в комплексе с другими мероприятиями позволят значительно улучшить технико-экономические показатели на проведение ремонта на обогащательной фабрике, где используется в подготовительном отделении конусные дробилки крупного дробления, а также обеспечивать конкурентоспособность на мировом рынке горного оборудования, производимого на территории Союзного государства.

Список литературы

1. Дробилки конусные. Общие технические требования: ГОСТ 6937-91. – Взамен ГОСТ 6937-81; введен 01.01.1992. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 15 с.
2. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
3. Лагунова Ю.А., Калянов А.Е. Гидропривод в конусных дробилках. //Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленностиб сборник трудов XXIII МНТК. «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады 03-04 апреля 2025 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 218-222.
4. Лагунова Ю.А., Калянов А.Е., Назаров М.А., Гусельникова Д.Р. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ. / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2022. С. 307-312.
5. Калянов А.Е., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Моделирование движения недробимого тела в камере дробления конусной дробилки // Горное оборудование и электромеханика. 2017 № 2 (129). С. 23-29
6. Лагунова Ю.А., Ибраева Н.Р. Повышение эффективности и безопасности дробилок путем применения систем интеллектуального управления / Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. 2019. Т.1. С. 10-13.

УДК 622.732

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОФИЛИРОВАНИЮ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ КОНУСНЫХ ДРОБИЛОК КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ

И.Д. Бодров, студент

Научный руководитель: Н.С. Голиков, канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург

Кратко изложена суть методов профилирования рабочей камеры конусных дробилок крупного дробления с использованием математического анализа и средств ЭВМ. Тема модернизации броней конусных дробилок рассматривается с разных ракурсов и позволяет производить оценку переоборудования существующих машин в разных направлениях.

Ключевые слова: конусная дробилка крупного дробления; профилирование; математическая модель; рабочая камера конусной дробилки; модернизация.

Стремительное развитие горной промышленности, наблюдаемое в последнее время, определяется необходимостью в наращивании производственных мощностей и снижению эксплуатационных затрат технологических машин и оборудования. Современное состояние горной промышленности говорит о необходимости постоянного внедрения новых технологий с целью оптимизации процесса переработки минерального сырья поскольку роль данной отрасли в мировой экономике сложно переоценить. Так например на циклы дробления расходуется до 12 % всей вырабатываемой в мире электроэнергии, а в балансе энергетических затрат предприятия в горнодобывающей отрасли порядка 53 %, и до 60 % - в химической. При этом на эксплуатацию процессов дробления на предприятиях доходит до 44 %, а КПД операций измельчения составляет 0,1 %. Учитывая и другие внешние факторы, связанные с ростом цен на топливо и электроэнергию становится очевидным необходимость модернизацию существующих технологических процессов и технологий.

Анализируя первоочередные этапы обработки минерального сырья стоит отметить неэффективность использования футеровок, преждевременно выходящих из строя в силу неравномерного износа, приводящего к увеличению затрат на обслуживание и уменьшению коэффициента технического использования.

К этой проблеме приходили учёные и исследователи ещё с 50-х годов прошлого века [1-3], однако и по сей день, эта проблема является актуальной и необходимой к рассмотрению.

Рассматриваемые методики [1-4] подразумевают комплексный подход к проектированию геометрических параметров рабочей камеры (соответственно подразумевают наличие в математическом моделировании эксплуатационных и технологических параметров).

Цели и задачи исследования.

1. Исследование особенностей изменения профиля камеры дробления
2. Исследовать на модели конусной дробилки взаимосвязь производительности и качества дроблёного продукта с геометрическими параметрами профиля камера дробления.

3. Разработать теоретическую основу и методику оптимального профилирования камеры дробления конусных дробилок, учитывающий характер износа брони.

Для исследования взаимосвязи можно прибегнуть к методам математического моделирования, описанных в работах отечественных и зарубежных авторов. Основа этих трудов – связывание параметра постоянного износа и производительности конусных дробилок и дальнейшее решение вариационной задачи, содержащей в себе различные эксплуатационные показатели, путём нахождения минимума или максимума функции по некоторым факторам. Или же создание некоего безразмерного коэффициента, совмещающего в себе показатели производительности и износа.

К рассмотрению предлагаются многие методики, однако наиболее перспективными выглядят те, что предлагают аппроксимирующие методы анализа и методы создания функций, опирающиеся на эмпирические данные в создании зависимостей между эксплуатационными параметрами работы дробилок.

Так, например, имеется методика [5], связанная с созданием аппроксимирующей функцией для объединения параметров производительности дробилки, среднего диаметра дробимого куска руды и интенсивности изнашивания. Решением функции является катеноида, описывающая геометрический контур дробящего конуса.

Преимуществом метода является решение вариационной задачи с применением метода оптимизации через ЭВМ, многостадийность математических исчислений для учёта ряда эксплуатационных показателей и возможность применения алгоритма для дробилок широкого списка по условиям производственного процесса и техническим параметрам.

Так же можно отметить методику [6], опирающуюся на создание функции безразмерного коэффициента, описывающего сумму эмпирических разниц зазоров между новой и изношенной бронями в некотором i -ом количестве сечений вдоль длины рабочей камеры конусной дробилки. Находя оптимальное значение этого показателя через решение параметрической задачи с помощью ЭВМ, попарно рассчитываются координаты точек поверхности подвижного и неподвижного конуса каждого i -го сечения рабочей камеры.

Преимуществами же этого метода являются простота, возможность работы с эмпирическими данными исследуемой дробилки, применение ЭВМ для подбора оптимальных значений заданной функции и учёт характера перерабатываемой руды.

Методики профилирования модернизируются с каждым годом и позволяют более точно оценивать динамику и характер износа футеровок дробилок, а так же становятся более ориентированными на современные условия горнорудного предприятия.

Предложенные методики позволяют применять ресурсы ЭВМ и оптимизировать строение существующих конусных дробилок крупного дробления под современные условия эксплуатации, что даёт возможность

назвать тему профилирования камер дробления дробилок актуальной темой, требующей внимания для развития теоретической базы и практического применения на современном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагунова Ю.А., Орочко А.В. Взаимозависимости конструктивных и режимных параметров конусных дробилок // Горное оборудование и электромеханика. 2013. - № 8. С. 38-42.
2. Калянов А.Е., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Моделирование движения недробимого тела в камере дробления конусной дробилки / Горное оборудование и электромеханика, 2017. - № 2 (129)ю С. 23-29.
3. Lagunova Y., Shestakov V., Ibrayeva N. THE STUDY OF THE MOVEMENT OF A PIECE ON THE CAMERA CRUSHING IN NETWORK TYPE BASES AS APPLIED TO THE WORKFLOW OF THE FCC / В сборнике: E3S Web of Conferences. 18. Сер. "18th Scientific Forum "Ural Mining Decade", UMD 2020" 2020. С. 03011.
4. Лагунова Ю. А. Искусственный интеллект в проектировании камеры дробления конусной дробилки / Ю. А. Лагунова, Н. Р. Ибраева, С. С. К. Ш. Аль // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 185-188.
5. Шестаков А.М. Профилирование камеры дробления конусных дробилок по критериям износа броней. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. КГРИ (ныне КНУ), Кривой Рог, 1987 г. – 195 с.
6. Zilong Zhang*,Tingzhi Ren and Jiayuan Cheng // Constant Wear Criterion for Optimization of the Crushing Chamber of Cone Crushers. 2022 №1 URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/12/7/807> (дата обращения 10.02.2026)

УДК 621.926.22

В ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ПРАКТИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИДЕИ ВЫПОЛНЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫМ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЩЕК ДРОБИЛЬНЫХ МАШИН

В.С. Бойко¹, студент, И.А. Жуков¹, д.т.н., профессор

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург

Использование щековых дробилок в качестве оборудования для первичной дезинтеграции сырья задает производительность последующих этапов переработки. Геометрия рабочей камеры щековых дробилок является одним из ключевых параметров, оказывающих влияние на механизм разрушения перерабатываемого материала. В этой связи разработка дробильного оборудования с повышенными параметрами рабочего процесса является актуальной задачей, а вопросы конструирования таких машин требуют проведения исследований на предмет определения оптимальных характеристик.

Ключевые слова: дробление, гранулометрический состав, щековая дробилка, продольный профиль щеки, криволинейная форма щеки.

TO PROVE THE PRACTICAL FEASIBILITY OF THE IDEA OF MAKING A CURVED LONGITUDINAL PROFILE OF CRUSHING MACHINE CHEEKS

V.S. Boiko, I.A. Zhukov

The use of jaw crushers as equipment for the primary disintegration of raw materials sets the productivity of subsequent processing stages. The geometry of the working chamber of jaw crushers is one of the key parameters influencing the mechanism of destruction of the processed material. In this regard, the development of crushing equipment with increased work-flow parameters is an urgent task, and the design of such machines requires research to determine the optimal characteristics.

Keywords: crushing, granulometric composition, jaw crusher, longitudinal cheek profile, curved cheek shape.

Щековые дробильные машины относятся к технологическому оборудованию, задействованному на стадиях крупного и среднего дробления. Данный тип дробилок нашел применение в первичной переработке сырья при производстве строительных материалов, на дробильно-сортировочных линиях обогатительных фабрик, а также предприятиях нерудной промышленности.

Несмотря на большое разнообразие предложенных в литературе вариантов исполнения геометрии рабочей камеры [1, 2], на практике зачастую применяются дробильные машины традиционной конструкции, в которых продольный профиль дробящих плит выполнен прямолинейным. Авторами выдвигается предположение о том, что сложность внедрения в производство дробилок с криволинейными щеками обуславливается необходимостью подбора оптимальной кривизны профиля под конкретный перерабатываемый материал, что в настоящий момент мало изучено на практике. Однако для современных производств конструктивное исполнение профиля щековых дробилок криволинейным может найти промышленное применение, поскольку в литературе есть упоминание о машинах-грануляторах, которые использовались для задач получения продукта

дробления более однородного гранулометрического состава [3]. В этой связи машины-грануляторы могут найти применение в областях, где предъявляются определенные качественные требования к получаемому продукту. Например, такие щековые дробильные машины могут использоваться в составе автоматизированного комплекса по сжиганию угля, поскольку от гранулометрического состава угля при сжигании зависит эффективность работы котла – фракция материала строго заданного диапазона обеспечивает более равномерный процесс горения.

Таким образом, изучение влияния геометрии дробящих плит на характеристики процесса переработки является актуальной задачей.

Авторами было проведено экспериментальное исследование на установке Zwick Roell, предназначенной для испытания материалов на растяжение и сжатие. Исследование заключалось в дроблении образцов каменного угля оснасткой криволинейной формы с разными углами кривизны α – 160° , 150° , 140° , 130° . Также для сравнительной характеристики образцы были подвергнуты сжатию плоской поверхностью. Кусок угля определенной массы ($m_{обр}$) устанавливался на неподвижной платформе и подвергался сжатию подвижной траверсой с закрепленной на ней оснасткой при фиксированном ходе в 10 мм для всех испытаний (рис. 1).

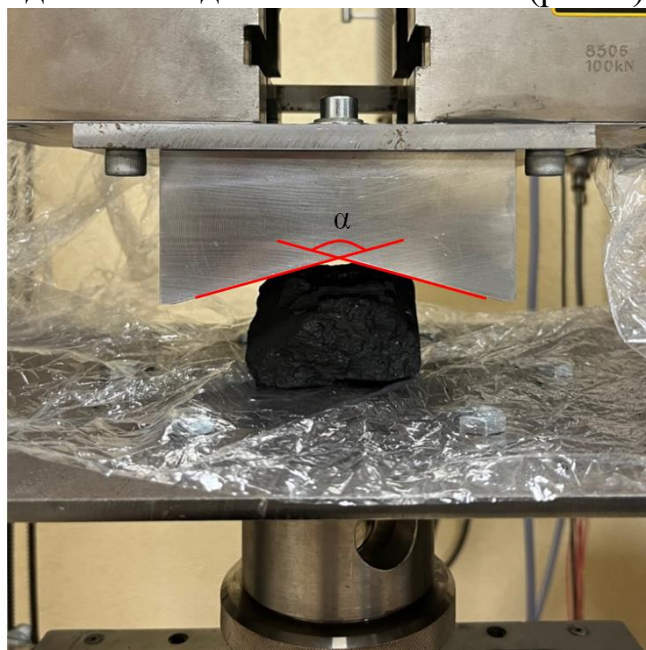


Рис. 1. Испытание каменного угля на сжатие криволинейной оснасткой

Для каждой оснастки проводилось по 3 опыта, и определялись такие показатели как: максимальное усилие дробления (F_{max}), удельная энергоемкость разрушения ($E_{уд}$), а также массовый процент фракций различной крупности. В табл. 1 представлены полученные усредненные значения каждого из показателей для опытов на оснастках с шагом в 20° .

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Наименьшие удельные затраты энергии на разрушение наблюдаются при величине угла профиля 160° .
2. По мере увеличения кривизны профиля оснастки возрастает процент выхода мелочи (фракция <5 мм).

3. Наибольший процент получения фракции продукта, пригодной для дальнейшего использования в требуемых технологических целях (например, для автоматизированных угольных котлов диапазон требуемой фракции составляет 25...50 мм), получен на оснастке с углом 160°, наименьшему же проценту соответствует угол 180°, то есть плоская оснастка.

4. Наибольший выход крупных кусков, которые необходимо дополнительно подвергать вторичному дроблению, получен при сжатии кусков материала плоской поверхностью.

Табл. 1. Усредненные результаты эксперимента

№ опыта	α , град.	$m_{обр}$, кг	F_{max} , Н	$E_{уд}$, Дж/кг	Массовый процент фракций по крупности (мм), %			
					<5	5...25	25...50	>50
1-3	180	0,164	4 172	0,105	6	4	38	52
4-6	160	0,242	4 702	0,078	15	8	59	18
7-9	140	0,289	6 979	0,109	20	9	50	21

Таким образом, в ходе эксперимента по сжатию каменного угля криволинейной оснасткой было определено влияние угла кривизны профиля на энергоемкость и гранулометрический состав получаемого продукта дробления. На основании проведенных опытов можно сделать вывод о том, что среди используемых в ходе эксперимента оснасток, наилучшие показатели дробления обеспечивает оснастка с углом 160°, что свидетельствует о целесообразности исполнения продольного профиля щек криволинейным и промышленной применимости щековых дробилок с нелинейной формой дробящих плит. Однако ввиду большого разброса значений исследование требует проведения дополнительных опытов с оснасткой меньшего шага.

Список литературы

1. Копосов П.В., Жуков И.А., Бойко В.С. Обзор кинематических схем дробильных машин с непрямолинейной формой щеки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №11-1. – С. 102-115. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_102.
2. Копосов П.В., Жуков И.А., Голиков Н.С. Щековые дробилки с криволинейным продольным профилем щек: классификация, тенденции развития и перспективы применения // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 135-145. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-135-145.
3. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
4. Шпанькова Д.О., Майоров С.А., Лагунова Ю.А. Анализ геометрической формы дробящих плит в лабораторных щековых дробилках // Горное оборудование и электромеханика, 2025. - № 6 (182). – С. 34-41.

УДК 622.72

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В.С. Бочков¹, канд. техн. наук, доц., **А.Г. Бабенко¹**, д-р техн. наук, доц.,
К.В. Бочкова¹, аспирант

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Рассматривается проблема повышения эффективности эксплуатации шаровых мельниц за счёт внедрения интеллектуальных систем мониторинга и управления. Предложена методология, основанная на комплексном анализе виброакустических, электрических и гидравлических параметров работы мельницы. Проведены лабораторные эксперименты на мельнице Бонда для установления зависимостей вибросигналов от типа и степени загрузки. Результаты работы могут быть использованы для создания адаптивных систем управления шаровыми мельницами в горно-обогатительной промышленности.

Ключевые слова: шаровая мельница, интеллектуализация, виброакустический контроль, комбинированное управление, упрочнение футеровки, 3D-сканирование, мониторинг.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF BALL MILL OPERATION

V. S. Bochkov, A. G. Babenko, K.V. Bochkova

The paper addresses the problem of enhancing the operational efficiency of ball mills through the implementation of intelligent monitoring and control systems. A methodology is proposed based on comprehensive analysis of vibroacoustic, electrical, and hydraulic parameters of mill operation. Laboratory experiments were conducted on a Bond mill to establish relationships between vibration signals and the type and degree of mill loading. The results obtained can be used to develop adaptive control systems for ball mills in the mineral processing industry.

Keywords: ball mill, intelligentization, vibroacoustic monitoring, combined control, liner hardening, condition monitoring.

Введение

Анализ данных о работе горных предприятий показывает, что в связи с постепенным обеднением месторождений в горнодобывающих районах Российской Федерации наблюдается рост переработки полезных ископаемых на обогатительных фабриках, соответственно, растёт интенсивность работы технологического оборудования, в частности барабанных мельниц. В связи с этим наблюдается увеличение расхода сменных элементов барабана мельницы, а именно её футеровки. Также отмечено увеличение числа случаев, связанных с аварийными режимами эксплуатации мельниц – возникновением перегрузов при закупорке разгрузочной решётки и несвоевременной реакции оператора по уменьшению или остановке подачи перерабатываемого полезного ископаемого в барабан мельницы. Каждый год на замену изношенных деталей горно-обогатительного оборудования расходуется более 4 млн. т. металла или более 2,5 % от его производства в России.

Предотвращение указанных негативных явлений может быть обеспечено посредством автоматизированной системы управления технологическим размольным оборудованием, в частности барабанных мельниц для

обеспечения рациональных режимов их работы и повышением эксплуатационных характеристик последних, посредством увеличения износостойкости футеровок. При этом стоимость футеровки и её замены составляет около половины стоимости всей шаровой мельницы. Эксплуатация шаровых мельниц в горно-обогатительной промышленности характеризуется преобладанием двух режимов: рабочего (номинального) и ремонтного. Существующие системы контроля часто ограничиваются мониторингом основных параметров, таких как объёмная загрузка, частота вращения барабана, вибрация и акустические сигналы. Однако ручные методы оценки износа футеровки, высокая скорость её изнашивания, а также недостаточная точность моно-критериальных систем управления загрузкой остаются актуальными проблемами [1-3].

Разработана и экспериментально обоснована методология повышения эффективности функционирования шаровой мельницы, ядром которой является комплексный подход, сочетающий: системный контроль динамических параметров работы мельницы (виброакустических, электрических, гидравлических); обоснование и поддержание рациональных режимов работы на основе разработанных алгоритмов комбинированного управления; внедрение контролируемой упрочняющей обработки футеровки в межремонтный период.

В области управления и автоматизации: разработан и апробирован методом имитационного моделирования новый алгоритм комбинированного управления загрузкой мельницы; алгоритм основан на совместном использовании звукового сигнала в частотном диапазоне 0,5–4 кГц и активной мощности электропривода, что обеспечивает повышенную точность и устойчивость поддержания рационального режима помола по сравнению с моно-критериальными системами.

В области сервисных мероприятий и оценки технического состояния: теоретически и экспериментально установлена возможность контроля эффективности упрочняющей обработки футеровки шаровой мельницы на основе анализа параметров вибрации барабана; разработана методика вибрационного мониторинга, позволяющая в реальном времени оценивать степень упрочнения поверхностного слоя футеровки без остановки оборудования; апробирована на промышленном объекте методика мониторинга износа футеровки с применением 3D-лазерного сканирования, обеспечивающая объективную оценку состояния конструктивных элементов с высокой точностью и позволяющая оптимизировать графики ремонтных работ.

Методы исследования

В работе использованы лабораторные эксперименты [4] на мельнице Бонда (рис. 1, 2) с регистрацией виброскорости и виброперемещения по трём осям (X, Y, Z) при различной загрузке (шары, песок, вода). Для обработки данных применялись методы статистического анализа (mean, median, max, std) и фильтрации временных рядов. Также разработана цифровая модель в среде Simulink для имитации комбинированного управления загрузкой по звуковому сигналу и активной мощности.



Рис. 1. Фотографии лабораторной установки

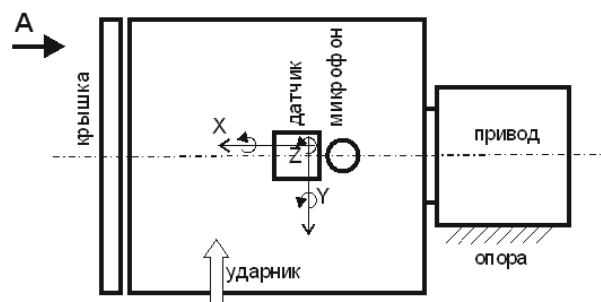


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Для контроля состояния футеровки использовано 3D-сканирование с помощью наземного лазерного сканера Trimble SX10 [5] и мобильного сканера LiGrip H300. Упрочняющая обработка футеровки моделировалась на основе расчётов ударного воздействия шаров с учётом параметров траектории и твёрдости материала.

Результаты и обсуждение.

1. Зависимости вибросигналов от загрузки.

Эксперименты показали, что добавление песка снижает виброскорость по осям X и Z в 2 раза, а виброперемещение – на порядок (рис. 3). Удаление шаров приводит к обратному эффекту – увеличению сигналов. Это свидетельствует о значительном влиянии массы и состава загрузки на распространение упругих волн в барабане мельницы.

2. Алгоритм комбинированного управления загрузкой.

Разработан алгоритм, использующий звуковой сигнал в диапазоне 500–4000 Гц и активную мощность электропривода. При объёме загрузки до 0,5 работают оба регулятора, после – только звуковой (рис. 4). Погрешность поддержания режима не превышает 5 %.

S, D

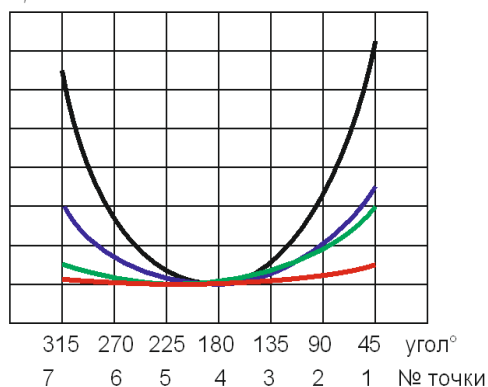


Рис. 3. Зависимость виброскорости от угла расположения датчика при различной загрузке

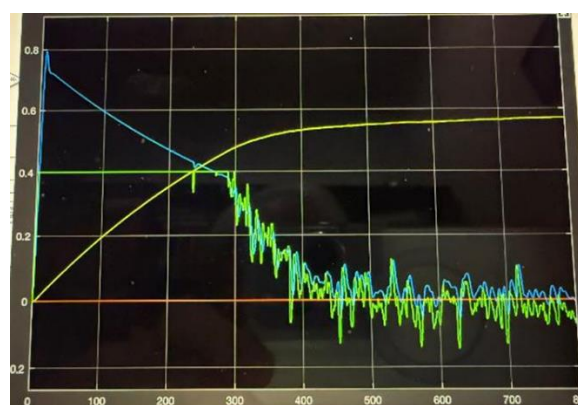


Рис. 4. Осциллограмма работы комбинированного регулятора загрузки

3. Контроль и упрочнение футеровки.

3D-сканирование позволило точно оценить износ футеровки и спланировать сервисные мероприятия. Разработан режим упрочняющей обработки с параметрами: угол отрыва шаров $\alpha = 55^\circ 44'$; частота вращения $n = 0,24 \text{ с}^{-1}$; степень заполнения шарами $\phi = 30\%$.

Глубина наклёпанного слоя после многократных ударов составила до 10 мм, что подтверждается расчётами по формуле Кудрявцева (5).

4. Промышленная апробация

На мельнице МПСИ 7000×2300 зарегистрированы вибросигналы, показавшие возможность контроля упрочняющей обработки в реальном времени. Зависимость виброскорости от наличия породы в барабане подтвердила эффективность предложенного метода.

Заключение

1. Предложена методология повышения эффективности функционирования шаровых мельниц на основе комплексного подхода, объединяющего контроль динамических параметров, обоснование рациональных режимов работы и сервисные мероприятия по упрочнению футеровки.

2. Предложен новый алгоритм комбинированного управления загрузкой мельницы, основанный на совместном использовании звукового сигнала в частотном диапазоне 0,5–4 кГц и активной мощности электропривода, обеспечивающий повышенную точность и устойчивость по сравнению с моно-критериальными системами.

3. Экспериментально установлена и теоретически обоснована возможность контроля эффективности упрочняющей обработки футеровки шаровых мельниц на основе анализа параметров вибрации барабана в процессе эксплуатации без остановки оборудования.

4. Разработана методика мониторинга износа футеровки с применением 3D-лазерного сканирования, обеспечивающая объективную оценку состояния конструктивных элементов с высокой точностью (до 0,1 мм) и позволяющая оптимизировать графики ремонтных работ.

Список литературы

1. Бочков В.С., Бочкова К.В., Бабенко А.Г., Клюкин Д.О. Исследование вибрационных сигналов для определения уровня загрузки шаровой мельницы // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – № 35. – С. 119-125.
2. Лагунова Ю.А., Шестаков В.С., Савинова Н.В., Мукатов А.Р. Обоснование возможности повышения загрузки шаровых мельниц / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2021. С. 160-164.
3. Лагунова Ю.А., и др. Исследование влияния повышения шаровой загрузки на металлоконструкции мельницы. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11-1. С. 171-178.
4. LoadIQ. Системы мониторинга загрузки мельниц. URL: https://prod.flsmidth.com/globalassets/frontify/2024/11/fls_loadiq_millscanningtechnology_brochure_en.pdf (дата обращения: 27.01.2026).
5. Trimble SX10. Руководство по лазерному сканированию. URL: <https://trimble.com> (дата обращения: 19.02.2026).

УДК 532.133:66.067

АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТОРФО-ВОДЯНОЙ СУСПЕНЗИИ

А.С. Данилов¹, студент, А.А. Гажов¹, студент

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

В работе исследуются реологические свойства торфо-водяной суспензии для получения торфяных гуматов. Представлены экспериментальные данные по изменению динамической вязкости суспензии на ротационном вискозиметре. Проведен сравнительный анализ эффективности рамного фильтр-пресса и декантерной центрифуги для стадии разделения суспензии.

Ключевые слова: динамическая вязкость, неньютоновская жидкость, торфяная суспензия, вискозиметр, фильтр-пресс, декантерная центрифуга

ANALYSIS OF EQUIPMENT FOR PEAT-WATER SUSPENSION CLEANING

A.S. Danilov, A.A. Gazhov,

This paper examines the rheological properties of a peat-water suspension used to produce peat humates. Experimental data on the dynamic viscosity of the suspension using a rotational viscometer are presented. A comparative analysis of the efficiency of a frame filter press and a decanter centrifuge for the suspension separation stage is conducted.

Keywords: dynamic viscosity, non-Newtonian fluid, peat suspension, viscometer, filter press, decanter centrifuge

Агропромышленные и природоохранные (рекультивация территорий после горных разработок) технологии предусматривают создание плодородного слоя почвы для выращивания растений. Кроме удобрений и почвоулучшителей в настоящее время применяются торфогуминовые препараты в качестве натурального биостимулятора роста и развития растений.

Для того чтобы получить концентрат гуматов, необходимо провести процессы диспергирования торфо-водяной суспензии и экстракции гуматов из органогенного сырья, позволяющие перевести большую часть сырья в легкодоступные формы гуматов. Основой его «активации» является процесс разрушения органических молекул. Механическая активация суспензии диспергированием проводится при помощи кавитатора. Химическая активация проводится посредством щелочной экстракции [1].

В ходе эксперимента в лопастной мешалке была подготовлена торфо-водяная суспензия текучей консистенции из низинного торфа степенью разложения 33 %. Торфяное сырье, не только связывают дисперсионную среду, но и набухает. Плотность полученной суспензии 1071 кг/м³, рН=4,17, влажность 92 %. Значение плотности оказалось завышенным из-за высокой зольности исходного сырья $A^c=19,45\%$.

В рамках исследования вязкость суспензии была измерена на ротационном вискозиметре ИКА ROTAVISC hi-vi II Advanced (шпиндель SP10). В таблице приведены результаты измерений при температуре суспензии +17 °С.

По результатам эксперимента отмечено, что вязкость суспензии зависит от градиента скорости вращения шпинделя вискозиметра. Установлена

зависимость между вязкостью и градиентом скорости, что важно для неньютоновских (псевдопластичных) жидкостей.

Таблица. Результаты измерений вязкости суспензии

Частота вращения, мин ⁻¹	Крутящий момент, %	Динамическая вязкость, Па·с
10	44,9	18,08
20	52,5	10,54
40	59,8	5,78
80	70,0	3,45
100	73,5	2,93
130	78,5	2,42
160	82,7	2,03
180	85,0	1,86
200	87,0	1,72

Определения динамической вязкости суспензий на основе органогенных материалов играет большую роль в гидродинамических процессах, связанных с перекачиванием суспензии по трубопроводам и рабочим полостям гидравлических машин (фильтры, центрифуги).

Таким образом, динамическая вязкость суспензии зависит от механического воздействия на нее. Полученные данные ложатся в основу при выборе характеристик перекачивающих насосов, фильтров или центрифуг для очистки суспензии от взвешенных нерастворимых микрочастиц (особенно включений мелкого песка) перед проведением активации для получения гуматов.

В технологии получения гуматов одной из ключевых стадий является разделение суспензии на твердую фазу (шлам) и жидкую фазу (целевой раствор). На рисунке 1 показан внешний вид отфильтрованного и подсушенного шлама из суспензии.



Рис. Внешний вид шлама из суспензии при увеличении $10^{\times}$

Средний диапазон размеров частиц $-1,0 +0,1$ мм. Следует отметить значительное количество частиц песка и загрязнений органического характера.

Анализ вариантов оборудования для разделения суспензии. Для выделения целевого продукта из суспензии рассмотрены два типа аппаратов: рамный фильтр-пресс [2] и декантерная центрифуга [3].

Эффективность фильтр-пресса определяется рядом факторов:

- фильтрующими свойствами перегородок (проницаемость, задерживающая способность, устойчивость к засорению). Качественные и количественные показатели процесса фильтрации в большей степени зависят от правильного выбора фильтрующего материала;
- типом фильтра и организацией процесса обезвоживания (фильтрация, промывка, подсушка, съем осадка и др.);
- физико-химическими свойствами фильтруемой суспензии, определяющими характер потери проницаемости фильтрующей перегородки и выбором метода ее регенерации.

Особенности рамного фильтр-пресса:

- При подаче суспензии насосом в фильтр-пресс скорость потока падает по мере распределения по камерам фильтр-пресса. Для густых растворов могут потребоваться более мощные насосы и усиленные рамы для управления давлением.
- Высокое содержание твердых веществ в суспензии требует фильтр-пресса с камерами большего размера для размещения большего количества материала.
- в периодических процессах могут использоваться ручные системы, тогда как в непрерывных процессах используются автоматические фильтр-прессы.
- материал фильтрующей ткани играет решающую роль в производительности и долговечности. Важными являются такие факторы, как химическая совместимость и размер пор.
- Время цикла очистки. При работе с торфяным осадком полный цикл очистки занимает в среднем 15-25 минут.
- Фильтр-прессы потребляют меньше энергии и их проще при обслуживании.

Рамный фильтр-пресс является эффективным оборудованием для очистки торфо-водной суспензии.

При функционировании центрифуги материал вращается вокруг оси и за счет центробежной силы происходит отделение твердой части суспензии от жидкой.

Декантерная центрифуга – осадительная центрифуга с горизонтальным ротором и шнековой выгрузкой осадка. Декантерные центрифуги предназначены для отделения твердых частиц (диаметром от 5 мм до нескольких мкм) от жидкой фазы. Они также могут обрабатывать суспензии с массовым содержанием твердой фазы от 0,1 % до 65%.

Декантерные центрифуги являются эффективным оборудованием для сепарации твёрдых частиц благодаря их высокой надёжности, низкому отношению капитальных затрат к производительности и низкими затратами на техническое обслуживание.

Простая базовая конструкция декантера позволяет адаптировать его в технологическую линию.

1. Особенности декантерной центрифуги:

- В центрифугах типа ОГШ шнек обеспечивает постоянный сдвиг слоев, снижая вязкость среды и облегчая транспортировку осадка.

- Центрифуги имеют большую производительность, чем рамные фильтр-прессы.

- Защита от изнашивания. Учитывая высокое содержание песчаных частиц шнек, рекомендуется выполнять с дополнительной защитой кромок (напыление или пластины), чтобы избежать абразивного изнашивания минеральными включениями.

- Центрифуги подходят для обработки больших объемов осадка, но отличаются высоким энергопотреблением и затратами на техническое обслуживание.

Достоинства декантерной центрифуги заключаются в ее эффективности, автоматизации и непрерывности процесса. Преимуществами данной установки также является автоматическая выгрузка кека шнековым конвейером в закрытый бункер.

Сравнительный анализ рассмотренного оборудования показал, что для стадии разделения суспензии:

1. Рамный фильтр-пресс обеспечивает максимальную чистоту фильтрата, но чувствителен к вязкости и дисперсности сырья.

2. Декантерная центрифуга является более предпочтительным решением для непрерывных процессов с высокой производительностью. Она менее чувствительна к вязкости суспензий в изученном диапазоне.

Список литературы

1. Денисюк, Е. А. Технологии получения гуминовых веществ / Е. А. Денисюк, Р. А. Митрофанов, И. А. Кузнецова // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 2(33). – С. 66-80. – EDN RXMJUN.
2. Саламатов В.И., Головачёв С.Н., Горнов Ю.Н. Жизненный цикл фильтрующих перегородок // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2 (55). С. 88–95. DOI 10.21285/0301- 108X-2016-55-2-88-95.
3. Рамочный фильтр-пресс или центрифуга: какой из них/ URL: <https://www.sewagetreat.com/info/frame-filter-press-vs-centrifuge-which-one-d-101523533.html> (дата доступа 18.02 2026).

УДК. 622.784.4

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ В ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ АСБЕСТООБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

В.А. Елохин¹, доц., канд. техн. наук, **В.Я. Потапов¹**, проф., д-р техн. наук,
В.В. Потапов, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Гредина**

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

На основе отчетных материалов и опубликованных данных испытаний рукавных фильтров выполнен анализ эффективности различных типов рукавных фильтров (прямоточных СМЦ-100/101 и противоточных ЦА 3808) в условиях дробильно-сортировочных корпусов (ДСК) асбестообогажительных фабрик. Рассмотрены особенности состава пыли на разных технологических участках (дробление I–II и III–IV стадий, сушильное отделение) и их влияние на гидравлическое сопротивление, регенерацию фильтровальных тканей и остаточную запыленность. Показано, что ворсованные ткани (вельветон, суровая байка) обеспечивают лучшую регенерацию и более низкую остаточную запыленность по сравнению с гладкими. Обоснованы условия применения рециркуляции очищенного воздуха. Сделан вывод о сохранении методологической ценности выявленных закономерностей для современного проектирования систем газоочистки на горно-обогажительных предприятиях. Определены перспективные направления дальнейших исследований, связанные с применением новых фильтровальных материалов и интеллектуальных систем управления.

Ключевые слова: рукавный фильтр, аспирация, асбестовая пыль, ДСК, прямоточный фильтр, противоточный фильтр, регенерация, фильтровальная ткань, дробильно-сортировочный корпус, новые материалы.

ANALYSIS OF BAG FILTER TEST RESULTS IN CRUSHING AND SCREENING COMPLEXES OF ASBESTOS PROCESSING PLANTS

V.A. Elokhin, V.Ya. Potapov, V.V. Potapov, T.V. Gredina

Based on reporting materials and published data from bag filter tests conducted at the Research and Design Institute, an analysis of the efficiency of various types of bag filters (uni-flow SMTs-100/101 and counterflow TsA 3808) under the conditions of crushing and screening buildings (CSB) of asbestos processing plants was performed. The features of dust composition at different technological sections (crushing stages I–II and III–IV, drying department) and their influence on hydraulic resistance, filtration fabric regeneration, and residual dust concentration are considered. It is shown that napped fabrics (velveton, gray flannel) provide better regeneration and lower residual dust concentration compared to smooth fabrics. The conditions for applying purified air recirculation are substantiated. A conclusion is drawn about the preservation of the methodological value of the identified patterns for the modern design of gas cleaning systems at mining and processing enterprises. Promising directions for further research related to the application of new filter materials and intelligent control systems are identified.

Keywords: bag filter, aspiration, asbestos dust, crushing and screening building (CSB), uni-flow filter, counterflow filter, regeneration, filter fabric, crushing and screening plant, new materials.

Проблема охраны атмосферного воздуха от промышленных выбросов является одной из приоритетных задач современности, закреплённой как на международном уровне, так и в национальных законодательствах. Горно-обогажительная промышленность относится к числу наиболее значи-

тельных источников техногенного воздействия на окружающую среду. Дробильно-сортировочные корпуса (ДСК) асбестообогащительных фабрик являются основным источником пылевых выбросов, на долю которых приходится около 65 % всей пыли, выбрасываемой предприятиями в атмосферу. Традиционно применяемое пылеулавливающее оборудование (циклоны, электрофильтры) не обеспечивает требуемой эффективности очистки: остаточная запыленность после них составляет 200–300 мг/м³, что значительно превышает как ранее действовавшие, так и современные экологические нормативы. При этом рукавные фильтры, доказавшие свою высокую эффективность (до 99,999 %) в цехах обогащения, требуют адаптации к специфическим условиям ДСК: низкое содержание волокна, высокая доля тонкодисперсных минеральных частиц, переменные температура и влажность. В связи с ужесточением природоохранного законодательства и необходимостью снижения потерь ценного минерального сырья задача оснащения ДСК высокоэффективными рукавными фильтрами сохраняет свою актуальность до настоящего времени.

Охрана окружающей среды от промышленных загрязнений является одной из приоритетных задач современности, закреплённой как на международном уровне, так и в национальных законодательствах. Горно-обогащительная и перерабатывающая промышленность относится к числу наиболее значительных источников техногенного воздействия на атмосферный воздух. Асбестоцементная промышленность, являясь крупным потребителем минерального сырья, сопровождается выделением значительных объёмов пыли, содержащей как волокна асбеста, так и частицы вмещающих пород. В связи с неуклонным ростом объёмов переработки руды на действующих фабриках, повышением удельных расходов аспирационного воздуха, а также вводом в эксплуатацию новых производственных мощностей, проблема охраны воздушного бассейна от пылевых выбросов приобретает всё большую остроту и требует постоянного совершенствования систем газоочистки [1, 2].

Основными потребителями воздуха на асбестообогащительных фабриках являются цеха обогащения, где происходит окончательное выделение волокна.

Опыт эксплуатации крупных промышленных установок убедительно доказал, что наиболее эффективным и надёжным видом пылеулавливающего оборудования для этих цехов являются рукавные фильтры. Благодаря высокой эффективности очистки (до 99,999 %), способности улавливать тонкодисперсные и волокнистые частицы, а также относительно невысоким эксплуатационным затратам, рукавные фильтры получили широкое распространение. К середине 1970-х годов в рукавных фильтрах очищалось около 70 % всего воздуха, вырабатываемого цехами обогащения действующих фабрик, что составляло порядка 55 % от общего объёма воздуха, потребляемого всеми цехами асбестообогащительных предприятий [1].

Однако совершенно иная ситуация сложилась в дробильно-сортировочных корпусах (ДСК), которые осуществляют первичную и вторичную подготовку руды перед подачей в обогащательные цеха.

Очистка дымовых газов и аспирационного воздуха в ДСК производится преимущественно в пылеочистительных устройствах (ПОУ), где последней ступенью служат циклоны различных типов и электрофильтры. Эти аппараты, хотя и обеспечивают некоторое снижение запыленности, имеют существенные недостатки: циклоны малоэффективны для улавливания частиц размером менее 10–20 мкм, а электрофильтры чувствительны к изменению физико-химических свойств пыли (особенно к удельному электрическому сопротивлению) и не всегда стабильно работают в условиях переменной влажности и температуры.

В результате остаточная запыленность воздуха после ПОУ в ДСК составляла 200–300 мг/м³, что значительно превышает санитарные нормы того времени и современные экологические стандарты [2, 5].

Особую тревогу вызывал тот факт, что именно корпуса ДСК являются основным источником неорганизованных и организованных выбросов на фабриках. На долю ДСК приходится около 65 % всей пыли, выбрасываемой предприятиями в атмосферу. Это обусловлено как большими объёмами перерабатываемого материала, так и несовершенством пылеулавливающих систем. Высокая остаточная запыленность не только ухудшает экологическую обстановку в районе размещения фабрик, но и приводит к безвозвратным потерям ценного минерального сырья (волокна), которое может быть дополнительно извлечено.

Таким образом, задача оснащения ДСК высокоэффективными рукавными фильтрами, способными обеспечить остаточную запыленность на уровне, сопоставимом с цехами обогащения (менее 1–2 мг/м³), стала одной из актуальнейших для асбестовой промышленности в 1970-е годы и сохраняет свою значимость до настоящего времени в связи с ужесточением природоохранного законодательства [1, 2].

Настоящая работа обобщает результаты промышленных испытаний рукавных фильтров различных конструкций и анализирует их с позиций современного инженерного знания, а также намечает пути дальнейших исследований с учётом появления новых фильтровальных материалов и технологий.

Конструктивные особенности рукавных фильтров и методика проведения испытаний.

Рукавные фильтры, в которых осаждение пыли происходит на внутренней поверхности рукавов, подразделяются на две принципиально различные группы: противоточные и прямоточные. Это деление обусловлено направлением движения запыленного потока относительно осыпающейся пыли и способом регенерации фильтровальной ткани.

В противоточных фильтрах запыленный воздух поступает в бункеры секций и через открытый нижний конец направляется внутрь рукава. Пройдя через фильтрующую систему «ткань + слой пыли», очищенный воздух попадает в камеру чистого газа. Внутри рукава поток движется навстречу пыли, осыпающейся с внутренней поверхности, что исключает эффект авторегенерации. Регенерация ткани в таких фильтрах осуществля-

ется механическим отряхиванием – встряхиванием с поперечными колебаниями рукава.

К противоточным относятся рукавные фильтры ЦА 3808, применяемые в цехах обогащения, фильтры ФАР, а также установки, эксплуатировавшиеся в сушильном отделении [1, 2].

В прямоточных фильтрах очищенный воздух, пройдя через ткань, поступает в камеру чистого газа, ограниченную верхней и нижней решетками для крепления рукавов. Пыль, осаждающаяся на внутренней поверхности, под

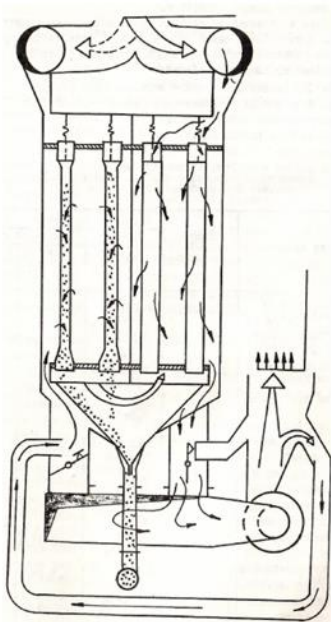


Рисунок 1 – Схема фильтра СМЦ-100

действием гравитации осыпается в бункер через нижнее отверстие. Таким образом, внутри рукава направления движения потока и осыпавшейся пыли совпадают, что создаёт условия для авторегенерации. К данной группе относятся рукавные фильтры СМЦ-100 (РП) и СМЦ-101 (РВ) по ГОСТ 20877-75. Регенерация ткани в фильтре СМЦ-100 осуществляется только обратной продувкой, а в фильтре СМЦ-101 – комбинированным способом (обратная продувка с одновременным механическим отряхиванием) [2].

Фильтры ЦА 3808, несмотря на высокую эффективность в цехах обогащения, имеют ограничения: они не могут использоваться в установках производи-

тельностью менее 500 тыс. м³/ч и не пригодны для очистки дымовых газов из-за конструктивных особенностей. В связи с этим для оснащения дробильно-сортировочных корпусов наиболее приемлемыми были признаны фильтры типов СМЦ-100 (рис.1) и СМЦ-101, что и определило направление опытно-промышленных работ. Диаметр рукавов составлял 130 мм. Опытная установка испытывалась в летних и зимних условиях на очистке воздуха аспирационных систем корпусов I–II и III–IV стадий дробления, а также на очистке аспирационного воздуха и дымовых газов сушильных печей ДСК фабрики № 6 комбината «Ураласбест». В ходе экспериментов в установку подавался запыленный воздух непосредственно от действующих промышленных аспирационных систем и газового тракта сушильных печей, что обеспечивало высокую достоверность получаемых данных.

Испытания проводились в круглосуточном непрерывном режиме. Регенерация фильтровальной ткани осуществлялась пульсирующей обратной продувкой со следующими параметрами: длительность импульса продувки – 0,2 с, частота импульсов – 12 Гц, общая длительность продувки одной секции – 55–65 с. Управление продувочными и отключающими клапанами выполнялось по заданной программе с помощью схемы программного управления. Длительность цикла работы фильтра (период между регенерациями) задавалась оператором вручную с учетом текущих условий [2].

Применённая методика позволила получить представительные данные о работе прямоточных фильтров в различных технологических условиях, которые легли в основу рекомендаций по выбору оборудования и фильтровальных материалов для всех основных участков ДСК.

Сравнение прямоточных и противоточных фильтров

Прямоточные фильтры (СМЦ-100, СМЦ-101) характеризуются тем, что направление запыленного потока совпадает с направлением осыпания пыли в бункер. Это создает эффект авторегенерации: по данным испытаний, 50–90 % всей поступающей пыли выпадает в бункер непосредственно во время фильтрации, не задерживаясь на ткани [2]. В противоточных фильтрах (ЦА 3808) поток направлен снизу вверх, навстречу осыпающейся пыли, поэтому авторегенерация практически отсутствует, и после встряхивания требуется обязательный отстой секции в течение 3–5 мин для осаждения взвешенной пыли, иначе происходит вторичное запыление ткани.

При наиболее высокой запыленности воздуха на входе в фильтр наблюдалось снижение сопротивления отдельных секций на 20–50 Па (2–5 кгс/м²). Чаще такие колебания сопротивления отмечались при испытании установки на очистке аспирационного воздуха в корпусе III–IV стадии и в сушильном отделении.

Важной особенностью прямоточных фильтров является выпадение значительной части пыли в бункер непосредственно во время фильтрации: в бункеры секций попадало 50–90 % общего количества пыли, поступающей в фильтр в течение цикла. С учётом этого явления (авторегенерации) фактическая удельная пылевая нагрузка на ткань, обуславливающая прирост сопротивления системы «ткань + слой пыли», не превышала 700–800 г/м² за цикл, что значительно ниже расчётных значений, приведённых в табл. 2 (например, в корпусе III–IV стадии расчётная нагрузка достигала 4160 г/м²).

Выход пыли из бункера в течение цикла был неравномерным вследствие колебаний начальной запыленности воздуха и осыпания пыли, осевшей на ткани. При низкой начальной запыленности воздуха (менее 1 г/м³) пыль в бункер во время фильтрации практически не выпадала. Это явление наиболее ярко проявлялось в корпусе I–II стадии, что согласуется с данными табл. 2 (начальная запыленность 0,15–0,53 г/м³). Выпадение значительной части пыли в бункер во время фильтрации является характерной особенностью прямоточных рукавных фильтров, обеспечивающей им более высокую степень авторегенерации по сравнению с противоточными фильтрами.

Наиболее эффективная регенерация фильтрующей ткани наблюдалась в сушильном отделении, где сопротивление после продувки снижалось до 100–350 Па (10–35 кгс/м²), т.е. практически до сопротивления чистой ткани. Удельная нагрузка на ткань по воздуху в среднем за импульс достигала 65–95 м³/(м²·ч), что соответствует соотношению удельных нагрузок при фильтрации и продувке, близкому к единице. В дробильных корпусах эффективность регенерации была ниже. Удельная нагрузка по воздуху в среднем за импульс продувки составляла 60–65 м³/(м²·ч). Соотношение

удельных нагрузок при продувке и фильтрации для корпуса III–IV стадии находилось в пределах 1,1–1,3, а для корпуса I–II стадии – 0,6–0,75. В обоих случаях уменьшение этого соотношения сопровождалось снижением эффективности регенерации.

Наименьшая эффективность регенерации зафиксирована при температуре воздуха в корпусе I–II стадии ниже нуля и во время снегопадов. В эти периоды среднее сопротивление фильтра в отдельные циклы достигало 1300–1400 Па (130–140 кгс/м²). Это объясняется, с одной стороны, особенностями состава пыли (низкое содержание волокна, высокая дисперсность), а с другой – увлажнением пылевого слоя из-за конденсации влаги при температурах, близких к точке росы (см. табл. 2: точка росы в I–II стадии от –6 до +0,3 °С).

Выводы: Результаты испытаний подтверждают, что эффективность работы прямооточных фильтров в условиях ДСК определяется комплексом факторов: запыленностью и дисперсным составом пыли, температурно-влажностными условиями, а также соотношением скоростей фильтрации и продувки. Наибольшая эффективность регенерации достигнута в сушильном отделении благодаря высоким температурам и отсутствию конденсации. В дробильных корпусах, особенно в зимний период, необходимы дополнительные меры (подогрев воздуха, использование ворсованных тканей) для обеспечения стабильной работы фильтров.

Список литературы

1. Исследование опытно-промышленных и промышленных установок рукавных фильтров асбестообогачительных фабрик: Отчет / ВНИИпроектасбест; Рук. работы А.Г. Молчанов. – № ГР 77032748; Инв. № Б 679498. – Асбест, 1976. – 45 с.
2. Исследование режимов очистки аспирационного воздуха в корпусах ДСК асбестообогачительных фабрик: Отчет / ВНИИпроектасбест; Рук. работы А.Г. Молчанов. – № ГР 75027241; Инв. № Б 678101. – Асбест, 1978. – 48 с.
3. Банит Ф.Г., Мальгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1979. – 351 с.
4. Разработка средств пылеподавления при транспортировке горячей руды и пылящих отходов на асбестообогачительных фабриках. Раздел II: Отчет / ВНИИпроектасбест; Рук. работы В.М. Сипович. – № ГР 76007351; Инв. № Б 646786. – Асбест, 1977. – 79 с.
5. Ужов В.Н., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов фильтрами. – М.: Химия, 1970. – 316 с.
6. Хамидуллин С.В. Рукавные фильтры: экологически чистая и ресурсосберегающая технология очистки воздуха и газов от пыли / С.В. Хамидуллин, Л.Л. Абржина // Система управления экологической безопасностью : сб. тр. XIX междунар. науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 15–16 мая 2025 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2025. – С. 336–339.
7. СП 2.2.3670-20. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 02.12.2020 № 40 : введ. в действие 01.01.2021. – Москва, 2020. – 45 с.

УДК 622.72

НАГРУЗКИ, ВОСПРИНИМАЕМЫЕ ГУСЕНИЧНОЙ ХОДОВОЙ ЧАСТЬЮ ПРИ РАБОТЕ САМОХОДНЫХ ДРОБИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УСТАНОВОК

Ю.А. Лагунова^{1,2}, д-р техн. наук, проф., Д.О. Шпанькова¹, аспирант

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

Исследованы особенности формирования и передачи нагрузок, возникающих при дроблении и перегрузке горной массы, на гусеничную ходовую часть самоходных дробильно-перегрузочных установок. Рассмотрены механизмы возникновения статических, квазистатических и ударно-вибрационных воздействий, их влияние на напряжённо-деформированное состояние несущей рамы и гусеничных тележек, а также особенности перераспределения опорных реакций в условиях нестационарного нагружения. Предложены расчётные соотношения для оценки контактных напряжений, эквивалентных напряжений и усталостного ресурса элементов ходовой части с учётом спектрального характера нагрузок.

Ключевые слова: гусеничная ходовая часть, динамические нагрузки, дробление, перегрузка, вибрации, контактные напряжения.

LOADS BEARED BY THE TRACKED UNDERCARRIAGE DURING OPERATION OF SELF-PROPELLED CRUSHING AND HANDLING PLANTS

Yu.A. Lagunova, D.O. Shpankova

This article examines the formation and transmission of loads arising during crushing and handling of rock mass onto the tracked undercarriage of self-propelled crushing and handling units. It examines the mechanisms underlying static, quasi-static, and shock-vibration effects, their influence on the stress-strain state of the supporting frame and tracked bogies, and the redistribution of support reactions under transient loading conditions. Calculation relationships are proposed for assessing contact stresses, equivalent stresses, and the fatigue life of undercarriage components, taking into account the spectral nature of the loads.

Keywords: crawler undercarriage, dynamic loads, crushing, overload, vibration, contact stress

Современные самоходные дробильно-перегрузочные установки находят широкое применение в горнодобывающей промышленности при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, а также в строительной и перерабатывающей промышленности. Их основным преимуществом является совмещение в одной машине функции дробления, транспортирования и перегрузки горной массы, что позволяет отказаться от стационарных дробильных пунктов и сократить протяжённость транспортных коммуникаций. Размещение технологического оборудования на гусеничном шасси обеспечивает высокую мобильность и работу в непосредственной близости от забоя. [1, 2]

Одновременно с этим такая компоновка приводит к существенному усложнению условий работы гусеничной ходовой части. В отличие от транспортных машин, для которых основными являются нагрузки от собственного веса и перемещения, гусеничное шасси дробильно-перегрузочного агрегата воспринимает значительные силовые и динамиче-

ские воздействия, обусловленные процессами дробления и непрерывной перегрузки материала. Отсутствие жёсткого фундамента приводит к тому, что все усилия, возникающие в технологическом оборудовании, замыкаются через металлоконструкции рамы и элементы ходовой части, формируя сложное напряжённо-деформированное состояние.

Конструктивно самоходный дробильно-перегрузочный агрегат представляет собой совокупность дробильного устройства, перегрузочного конвейерного оборудования, силовой установки, несущей рамы и гусеничной ходовой части, которая состоит из гусеничной тележки, опорных и поддерживающих катков, ведущих и направляющих колёс, а также гусеничной ленты. Ходовая часть выполняет функции опоры, распределения нагрузок и передачи усилий на грунт, одновременно играя роль демпфирующего элемента, снижающего уровень вибраций.

В процессе работы агрегата на гусеничную ходовую часть постоянно действует совокупность статических нагрузок, определяемых массой оборудования, технологических узлов и перерабатываемого материала. Эти нагрузки формируют базовый уровень напряжений и определяют распределение опорных реакций между гусеницами и отдельными катками. При этом даже в стационарном режиме дробления распределение нагрузок, как правило, является неравномерным вследствие асимметричного размещения дробильного и перегрузочного оборудования на раме агрегата.

Наряду со статическими нагрузками в процессе дробления возникают квазистатические технологические усилия, обусловленные сопротивлением разрушению горной породы. Для щековых и валковых дробильных устройств характерны периодически изменяющиеся силы сжатия, достигающие максимальных значений в моменты интенсивного разрушения кусков материала. Эти усилия передаются через корпус дробилки и элементы рамы на гусеничное шасси, вызывая перераспределение нагрузок и дополнительный изгиб несущих конструкций. Для конусных и роторных дробилок нагрузки носят более равномерный характер, однако их величина также остаётся значительной, особенно при переработке крепких и абразивных пород.

Наиболее неблагоприятное воздействие на гусеничную ходовую часть оказывают динамические и ударные нагрузки, возникающие при неравномерной подаче материала, попадании в камеру дробления кусков повышенной крупности, а также при кратковременных перегрузках и заедании материала. Дополнительным источником динамических воздействий являются инерционные силы, возникающие при работе эксцентриковых, кривошипно-шатунных и вращающихся механизмов дробильных устройств и конвейеров. Кратковременные ударные импульсы могут многократно превышать средние технологические нагрузки и сопровождаться интенсивными вибрациями всей конструкции агрегата.

Передача нагрузок от дробильного и перегрузочного оборудования на грунт осуществляется по сложной силовой цепи, включающей корпус технологических узлов, несущую раму, гусеничную тележку, опорные катки, гусеничную ленту и опорную поверхность. При этом элементы рамы рабо-

тают в условиях совместного изгиба и кручения, а гусеничные тележки воспринимают как вертикальные, так и горизонтальные составляющие усилий. В условиях динамического нагружения наблюдается неравномерное распределение контактных напряжений между катками и гусеничной лентой, что приводит к локальным перегрузкам и ускоренному износу.

Интенсивность и характер нагрузок в значительной степени определяются физико-механическими свойствами перерабатываемого материала и режимами работы агрегата. При дроблении крепких, неоднородных и трещиноватых руд возрастает амплитуда динамических нагрузок и уровень вибраций. Особенно это характерно для агрегатов, оснащённых щековыми дробилками со сложной траекторией движения щеки, для которых типичны значительные переменные усилия, передающиеся на раму и ходовую часть. В таких условиях существенно возрастает нагрузка на крайние опорные катки и элементы гусеничных тележек, расположенные в зоне дробильного агрегата.

Длительное воздействие совокупности статических и динамических нагрузок приводит к ускоренному износу элементов ходовой части, появлению усталостных трещин в раме и гусеничных тележках, нарушению натяжения гусеничных лент и снижению устойчивости агрегата на слабых грунтах. В тяжёлых эксплуатационных условиях возможны отказы отдельных элементов ходовой части, что вызывает вынужденные простои и снижение производительности горных работ.

Нагружение гусеничной ходовой части самоходного дробильно-перегрузочного агрегата может быть представлено в виде совокупности внешних сил и моментов, действующих на пространственную систему с конечным числом степеней свободы. В общем виде результирующая нагрузка, передающаяся на ходовую часть, определяется как сумма весовых, технологических и инерционных составляющих, что может быть записано как:

$$R(t) = G + F_{\text{тех}}(t) + F_{\text{ин}}(t),$$

где G – сила тяжести агрегата с учётом перерабатываемого материала, $F_{\text{тех}}(t)$ – временно изменяющаяся технологическая сила дробления и перегрузки, $F_{\text{ин}}(t)$ – инерционные силы, обусловленные колебаниями и движением механизмов.

Такое представление позволяет связать реальные режимы работы оборудования с реакциями в опорах гусеничных тележек и последующим расчётом напряжённо-деформированного состояния.

Технологическая сила дробления для агрегатов, оснащённых щековыми дробильными устройствами, носит периодический характер вследствие кинематики эксцентрикового механизма привода. Изменение усилия во времени связано с чередованием фаз сближения и расхождения дробящих плит, что обуславливает циклическое возрастание и снижение сопротивления разрушению материала.

С целью аналитического описания временной зависимости технологической силы её можно аппроксимировать гармонической или квазигар-

монической функцией, основная частота которой соответствует частоте вращения эксцентрикового вала:

$$F_{\text{tex}}(t) = F_0 + F_a \sin(\omega t),$$

где F_0 – средняя составляющая, F_a – амплитуда, ω – круговая частота, соответствующая частоте вращения эксцентрикового вала. Величина амплитуды F_a определяется физико-механическими свойствами перерабатываемой породы, геометрическими параметрами рабочей камеры и кинематикой подвижного органа дробления; при переработке крепких и неоднородных руд её рост приводит к усилению динамического воздействия на раму и элементы ходовой части.

С позиций механики деформируемого твёрдого тела самоходный дробильно-перегрузочный агрегат может быть представлен в виде пространственной рамной системы, опирающейся на две параллельные гусеничные тележки, взаимодействующие с упругим основанием «гусеница–грунт». Технологическое оборудование моделируется как совокупность сосредоточенных и распределённых нагрузок, приложенных в узлах крепления к раме. Такое представление позволяет учитывать совместное действие изгибающих и крутящих моментов в элементах рамы при восприятии вертикальных и горизонтальных составляющих усилий гусеничными тележками.

На уровне ходовой части расчётная схема включает систему опорных и поддерживающих катков, ведущие и направляющие колёса, а гусеничная лента представлена замкнутым упруго-пластическим контуром, взаимодействующим с упругим основанием грунта. Распределённое контактное давление в зоне опирания гусеницы задаётся соотношением

$$p(x, t) = \frac{R(t)}{bL_c} \varphi(x, t),$$

где b – ширина гусеницы, L_c – длина пятна контакта, $\varphi(x, t)$ – безразмерная функция, описывающая неравномерность распределения давления и его изменение во времени. Это позволяет учитывать неравномерное нагружение опорных катков и влияние динамики на контактное давление.

Контактные напряжения в сопряжении «каток – гусеничная лента» определяются условиями упругого взаимодействия тел качения с деформируемой опорой и существенно зависят от величины реакции на конкретном катке. В инженерной практике максимальное контактное давление оценивается по приближённой зависимости

$$p_{\text{max}}(t) \approx k_p \frac{R_k(t)}{b_k l_k}$$

где $R_k(t)$ – реакция на рассматриваемом катке, b_k и l_k – приведённые размеры пятна контакта, k_p – коэффициент, учитывающий реальные условия контакта. В реальной эксплуатации наблюдается значительная неравномерность нагружения катков, при которой крайние катки воспринимают нагрузки, превышающие средние значения, что приводит к локальным перегрузкам и ускоренному износу элементов ходовой части.

Для оценки усталостной прочности рамы, тележек и деталей ходовой части, работающих в условиях многоосного переменного нагружения, ис-

пользуется эквивалентное напряжение по критерию Мизеса. При заданных главных напряжениях $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ эквивалентное напряжение определяется как [3]

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]},$$

что позволяет свести сложное напряжённое состояние к однопараметрической оценке, и сопоставлять полученные значения с усталостными характеристиками материала. При динамическом нагружении $\sigma_{\text{экв}}(t)$ носит переменный характер, а параметры цикла ($\sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{min}}, \sigma_a, \sigma_m$) определяются по результатам расчёта или измерений и при необходимости корректируются по известным диаграммам с учётом влияния средних напряжений.

Расчёт усталостного ресурса элементов гусеничной ходовой части при действии спектра нагрузок различной амплитуды целесообразно вести на основе линейной гипотезы накопления повреждений Минера. В этом случае суммарное повреждение определяется выражением [4].

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i},$$

где n_i – число циклов при уровне эквивалентных напряжений σ_i , N_i – число циклов до разрушения при том же уровне по S – N -кривой материала, а условие отказа имеет вид $D \geq 1$. Такой подход позволяет учитывать реальный спектр нагрузок, формируемый изменением производительности агрегата, колебаниями крупности и прочности перерабатываемого материала и нестабильностью подачи.

Таким образом, анализ напряжённого состояния элементов рамы и ходовой части требует учёта многоосного переменного нагружения. Для интегральной оценки используется эквивалентное напряжение по критерию Мизеса, позволяющее привести пространственное напряжённое состояние к однопараметрическому показателю, сопоставимому с усталостными характеристиками материала. При динамическом воздействии эквивалентное напряжение является функцией времени, а параметры цикла уточняются с учётом влияния среднего напряжения по диаграммам Гудмана.

При оценке долговечности следует отметить, что в условиях переменного спектра нагрузок расчёт ресурса целесообразно выполнять на основе линейной гипотезы Минера–Палгрена. Суммарное накопленное повреждение определяется как сумма долей использованного ресурса при каждом уровне нагружения, а условием предельного состояния принимается достижение единичного значения накопленного повреждения. Такой подход обеспечивает учёт реальных эксплуатационных режимов, характеризующихся изменением производительности, крупности и прочности перерабатываемого материала.

Наряду с этим случайный характер динамических воздействий, разброс механических свойств материалов и вариабельность грунтовых условий обуславливают необходимость вероятностной интерпретации ресурса. В рамках надёжного подхода долговечность рассматривается как слу-

чайная величина, а допустимые уровни напряжений назначаются исходя из требуемой вероятности безотказной работы.

Комплексное воздействие статических, технологических и динамических нагрузок приводит к концентрации напряжений в зонах сварных соединений, переходных сечений и узлах крепления гусеничных тележек к раме. В этих областях сочетание вибрационного нагружения и геометрических концентраций существенно снижает усталостную прочность, инициируя развитие трещин и ускоряя износ элементов ходовой части.

Вследствие этого повышение надёжности гусеничного шасси должно базироваться на системном учёте динамики работы агрегата. Перспективными направлениями являются структурная оптимизация несущих рам по критериям жёсткости и прочности, применение виброизолирующих вставок между технологическими модулями и шасси, совершенствование режимов дробления, а также использование конечно-элементного моделирования с последующей экспериментальной верификацией. Дополнительный потенциал повышения эксплуатационной надёжности связан с внедрением цифровых систем мониторинга нагрузок и вибраций, обеспечивающих раннее выявление неблагоприятных режимов и переход к предиктивному обслуживанию.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н. 3. Справочник. Открытые горные работы / К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Винницкий, Н.Н. Мельников и др. – М.: Горное бюро, 1994.- 590 с.
2. Жилинков А.А. Методика экспериментальных исследований процессов деформации ходовой части горных машин / А. А. Жилинков, В. В. Макарова, Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 27 сентября 2023 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 297-302. – EDN VINASV.
3. Скопинский В.В. Сопротивление материалов : учебник. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 464 с.
4. Писаренко, Георгий Степанович. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Киев: Дельта, 2008. - 816 с.

УДК 621.926.4; 622.73

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУД ПРИ ДРОБЛЕНИИ В АППАРАТАХ МНОГОКРАТНОГО УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Е.С. Львов¹, А.И. Матвеев¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Якутск

В работе представлена методика количественного определения степени дезинтеграции кусковых геоматериалов при ударном дроблении. В отличие от традиционно используемой степени дробления, предлагаемый показатель позволяет выделить долю материала, разрушенного селективно по межминеральным границам и текстурным дефектам. Методика основана на анализе двухмодального характера гранулометрического распределения продуктов дробления и аппроксимации моды крупных классов логнормальным законом. Апробация выполнена на золотосодержащих рудах месторождений Дуэтское и Малый Тарын (коэффициент крепости $f = 7\div 16$) при дроблении в аппаратах многократного ударного действия ДАУ-250 и ДКД-300. Установлена взаимосвязь степени дезинтеграции с энергоэффективностью процесса: повышение доли дезинтеграции сопровождается ростом степени дробления и снижением удельных энергозатрат.

Ключевые слова: дезинтеграция, рудоподготовка, ударное дробление, раскрытие минералов, гранулометрический состав, энергоэффективность, дробилки ударного действия.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE DEGREE OF ORE DISINTEGRATION DURING CRUSHING IN MULTIPLE IMPACT CRUSHING MACHINES

E.S. Lvov, A.I. Matveev

This paper presents a method for quantitatively determining the degree of disintegration of lump geomaterials during impact crushing. Unlike the traditionally used degree of crushing, the proposed indicator allows for the determination of the proportion of material selectively destroyed along intermineral boundaries and textural defects. The method is based on a bimodal analysis of the particle size distribution of crushed products and the approximation of the mode of large classes by a lognormal law. The test was conducted on gold-bearing ores from the Duetskoye and Maly Taryn deposits (hardness factor $f = 7-16$) crushed in DAU-250 and DKD-300 multiple impact crushers. A correlation was established between the degree of disintegration and the process energy efficiency: an increase in the disintegration rate is accompanied by an increase in the degree of crushing and a decrease in specific energy consumption.

Keywords: disintegration, ore preparation, impact crushing, mineral disintegration, particle size distribution, energy efficiency, impact crushers.

Процессы рудоподготовки являются наиболее энергоемкой стадией переработки минерального сырья, потребляя до 60 % общих энергозатрат обогатительной фабрики. При этом значительная часть энергии расходуется на переизмельчение уже раскрытых минеральных фаз. Основная задача дробления и измельчения заключается в максимально полном раскрытии (высвобождении) зерен ценных компонентов из сростков с пороодообразующими минералами. Возможность повышения процесса дезинтеграции в

циклах дробления является одним из перспективных направлений повышения эффективности переработки руд [1,2].

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальное обоснование методики, позволяющей количественно определить долю дезинтеграционной составляющей в общем процессе дробления руды применительно к аппаратам ударного типа.

Предлагаемая методика базируется на гипотезе о том, что гранулометрическая характеристика продуктов дробления полиминеральных руд представляет собой двухмодальное распределение (рис. 1). Первое соответствует собственно механическому разрушению прочной породной матрицы и, согласно теории А.Н. Колмогорова [3], подчиняется логарифмически нормальному закону. Второе обусловлено дезинтеграцией – самопроизвольной диспергации слабых фаз и межминеральных сростков по текстурным дефектам.

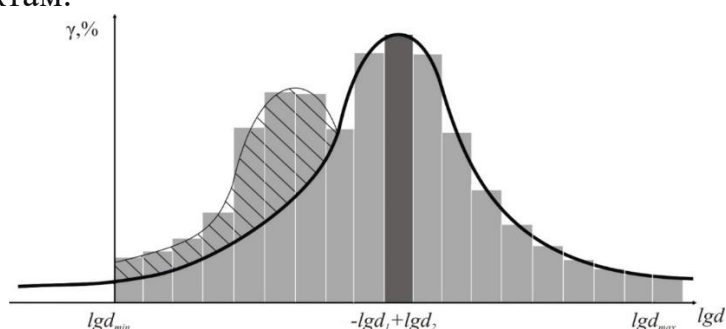


Рис. 1. Графическая интерпретация методики определения степени дезинтеграции

Алгоритм расчетной части методики выглядит следующим образом. По данным гранулометрического состава идентифицируется мода в области крупных фракций, ограниченная значениями lgd_1 и lgd_2 и значение выхода γ_{max} . Далее определяется площадь.

$$S_0 = \int_{lgd_1}^{lgd_2} f(x) dx \quad (1)$$

Из условия: $S^I = f(x)$ приравненной к функции логарифмически нормального распределения

$$e^{-\frac{\ln(x-a)^2}{2\delta^2}} = f(x), \quad (2)$$

где x -значения выхода продукта дробления данной крупности, a - среднее значение класса крупности дробленного материала.

$$e^{-\frac{(x-\frac{d_1+d_2}{2})^2}{2\delta^2}} = f(x), \quad (3)$$

определяется значение δ - среднеквадратичное отклонение, затем вычисляется площадь под функцией логнормального распределения на интервале (n_i, N_i) :

$$S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_{n_i}^{N_i} e^{-\frac{\ln(x-a)^2}{2\delta^2}} dx, \quad (4)$$

где n_i - логарифм минимальной крупности дробленного материала, N_i логарифм максимальной крупности дробленного материала. Параметры распределения (среднеквадратическое отклонение δ и a) могут быть определены методом трех характерных точек, описанном в предыдущей работе [7].

Степень дезинтеграции (D) определяется как доля материала, не вписывающегося в логнормальное распределение, т.е. образовавшегося за счет избирательного разрушения по слабым связям:

$$D = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_{n_i}^{N_i} e^{-\frac{\ln(x-a)^2}{2\delta^2}} dx. \quad (5)$$

Графически эта величина соответствует отношению заштрихованной площади (рис. 1) к общей площади продуктов дробления.

Экспериментальные исследования по апробации предложенной методики и определению взаимосвязи определения степени дезинтеграции с общими показателями процесса дробления на аппаратах ударного действия, проводились на золотосодержащих рудах месторождений Малый Тарын представленных среднезернистым песчаником ($f = 7$) и месторождения Дуэтское представленных темно-серый песчаником ($f = 16$) и жильный кварцем ($f = 9$).

Много работ посвящено исследованию процесса разрушения горной породы свободным ударом в дробилках ударного действия [4, 5, 6].

В качестве аппаратов дробления с ударным принципом дробления использовались трех роторная дробилка ДАУ-250 и шестироторная дробилка ДКД-300. Принцип действия дробилок основан на свободном ударе кусков о вращающиеся роторы, что обеспечивает многократное динамическое нагружение и способствует разрушению по границам минеральных фаз.

Сводные результаты обработки экспериментальных данных представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследований по апробации методики

Наименование руды	Дробилка	Коэффициент крепости	Степень дробления	Степень дезинтеграции	Удельный расход энергии, кВт*ч/т
Темно-серый песчаник	ДАУ-250	16	5,63	0,23	1,334
Кварцевая руда		9	8,15	0,32	0,870
Песчаник		7	8,98	0,48	0,851
Темно-серый песчаник	ДКД-300	16	8,78	0,32	1,000
Кварцевая руда		9	9,23	0,42	0,902
Песчаник		7	11,93	0,63	0,763

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. Апробация методики определения степени дезинтеграции при дроблении золоторудных образцов с разной степенью крепости с использованием аппаратов ударного действия (ДАУ-250 и ДКД-300) выявила важную взаимосвязь между степенью дезинтеграции и показателями процессами дробления. Увеличение степени дезинтеграции сопровождается ростом степени дробления и снижением удельных энергозатрат.

Показатель степени дезинтеграции позволяет проводить сравнительную оценку эффективности дробильного оборудования с точки зрения селективности дробления.

Предложенная методика может быть использована для оптимизации процессов рудоподготовки, выбора типа дробильного оборудования и прогнозирования эффективности раскрытия полезных компонентов на стадии дробления.

Список литературы:

1. Чантурия В.А., Бочаров В.А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 11-18.
2. Мамонов С. В., Закирничный В. Н., Метелев А. А., Дресвянкина Т. П., Волкова С. В., Кузнецов В. А., Зиятдинов С. В. Перспективные технологии раскрытия минерального сырья при подготовке к флотационному обогащению// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых- — 2019. — № 5. — С. 158—169.
3. Колмогоров, А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении / А. Н. Колмогоров // ДАН СССР – 1941. – т. 31, №2. – С. 99-101.
4. Лагунова Ю.А., Брусова О.М., Саитов В.И. Увеличение срока службы молотковых дробилок // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2012. № 1. С. 74-77.
5. Лагунова Ю.А., Брусова О.М. Математическая модель процесса дробления горной породы молотковыми дробилками // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S1-1. С. 108-117.
6. Брусова О.М., Лагунова Ю.А. Использование системы автоматизированного расчета для выбора рациональной конструкции вала ротора молотковой дробилки // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2012. № 1. С. 19-22.
7. Матвеев А. И., Львов Е. С. Разработка методики определения степени дезинтеграции геоматериалов в процессе многократного ударного дробления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 2. — С. 137 – 143.

УДК 622.232.8

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД

В.Я. Потапов, проф., **Д.С. Стожков**, доц., **В.В. Потапов**, доц. **К.А. Парамонов**
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Выполнен анализ существующих сепараторов для предварительного разделения забалансовых руд. Анализ приведенных конструкции сепараторов для разделения горных пород показал, что в качестве разделительных признаков используются различные методы на основе покускового анализа содержаний полезных компонентов. Внедрение новых аппаратов по одному признаку лишь частично обеспечивает возможности качественного разделения горных пород. Наиболее перспективным направлением в совершенствовании и проектировании разделительных аппаратов является создание аппаратов, использующих комплекс физико-механических свойств горных пород, что обеспечивает более полное разделение полезных ископаемых в одном аппарате. Установлены основные разделительные факторы, позволяющие выбрать режимы сортировки.

Ключевые слова: анализ, конструкции сепараторов, горные породы, разделительные признаки, класс крупности, индукционные и радиорезонансные методы

TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF APPARATUS FOR PRELIMINARY SEPARATION OF SULFIDE ORES

V.Ya. Potapov, D.S. Stozhkov, V.V. Potapov, Paramonov K.A.

The article analyzes the existing separators for the preliminary separation of off-balance ores. An analysis of the above designs of separators for separating rocks has shown that various methods based on a piece-by-piece analysis of the contents of useful components are used as separation features for their separation. The introduction of new devices based on a single separation feature only partially ensures the possibility of high-quality separation of rocks. The most promising direction in the improvement and design of separation devices is the creation of devices using a complex of physical and mechanical properties of rocks, which ensures a more complete separation of minerals in one device. The main dividing factors have been established, allowing you to choose the sorting modes.

Keywords: analysis, separator designs, rocks, separation features, size class, induction and radioresonance methods

В настоящее время в связи с истощением сырьевой базы все большую актуальность приобретает вовлечение в переработку бедных и забалансовых руд. Особое место при подготовке их к обогащению занимает предварительная концентрация, позволяющая удалять основную часть отвальных хвостов в крупнокусковом виде, повышать и стабилизировать качество минерального сырья, снижать себестоимость его переработки [1-13].

Указанные руды характеризуются весьма низкими содержаниями меди и цинка. В основном состоят из пустой породы с редкой вкрапленностью сульфидов, иногда встречаются сплошные куски пирита. Рудные минералы составляют около 5%, главным образом представлены пиритом, незначительными скоплениями халькопирита и сфалерита. Из нерудных минералов наиболее распространены хлорит, амфибол, кварц

Предварительное разделение руды решает несколько задач.

Во-первых – предварительное разделение, которое позволяет сократить на 20...50 % объем полезного ископаемого, поступающего на дробление и измельчение. Для забалансовых руд сокращение объема существенно больше.

Во-вторых – предварительное разделение сложного по вещественному составу полезного ископаемого на отдельные составляющие, которые перерабатываются по различным схемам.

В-третьих – получение крупнокусковых концентратов, которые затем направляются в пирометаллургические процессы.

В-четвертых – доводка концентратов, получаемые при промывке смешанных руд, содержащих окисные и карбонатные минералы марганца и трудноразделимых другими обогащательными способами [1, 3].

Перед проведением предварительного разделения производится подготовка сырья, которая включает в себя дробление и грохочение.

Основной задачей дробления является дробление кусков крупностью более 250 мм, которые не могут быть обработаны на сепараторах. При этом при дроблении не должно образовываться большое количество мелких классов, которые также не перерабатываются на радиометрических сепараторах. Иногда перед дроблением целесообразно проводить крупное поверочное грохочение.

Грохочение необходимо для обеспечения равномерного по крупности питания сепаратора рудой; повышения точности измерения интенсивности излучений и, соответственно, содержания ценного компонента в кусках обрабатываемой руды.

При предварительном разделении руды существенное значение имеет выбор оптимального граничного содержания ценного компонента, по которому должно осуществляться разделение полезного ископаемого. При этом необходимо выделить как можно больше пустой породы и обеспечить максимальное извлечение. Граничное содержание ценного компонента, в первом приближении можно принимать равным бортовому содержанию, по которому были установлены контуры промышленных запасов полезных ископаемых и определены запасы полезного ископаемого. Определение граничного содержания должно производиться на основе экономических расчетов.

1. Фотометрические сепараторы

Оптические сепараторы осуществляют разделение руд по цветовым характеристикам, форме и симметричности частиц. Принцип их работы заключается в отражении света минералами с различной интенсивностью, которая зависит от фона, на котором регистрируется свет. В нашей стране эти сепараторы были разработаны в середине прошлого столетия. Золото-содержащие руды обогащались на фотометрическом сепараторе «Кварц». За рубежом в 70-80-е годы прошлого века широкое распространение получили английские фотометрические сепараторы «Gunsons Sortex Ltd» [1, 7]. Они использовались для разделения материала крупностью – 150 + 3 мм. В этих сепараторах интенсивность отраженного света измерялась при свободном падении кусков. Удаление кусков производится сжатым воздухом.

Максимальная частота срабатывания воздушных клапанов для материала менее 20 мм 200 Гц.

Фотометрические полихромные сепараторы OptoSort компании AIS Sommer и сепараторы MicroSort компании Mogensen нового поколения выпускаются за рубежом, начиная с конца 1990-х годов. Эти сепараторы имеют монослойную подачу материала и могут работать в отраженном или прошедшем свете и в люминесцентном варианте.

Технология и принципиальная конструктивная схема сепаратора Microsort® приведена на рисунке 1.

Исходный материал подается вибропитателем на гравитационный сепаратор или ленту, где формируется монослой с коэффициентом загрузки до 0,4. Затем материал подается в область распознавания, где сканируется высокоскоростной камерой. Сигналы обрабатываются ЭВМ, которая принимает решение об удалении и включает нужную группу пневмоклапанов. Основным недостатком сепараторов является пропуск в хвосты кусков, содержащих полезные компоненты внутри куска.

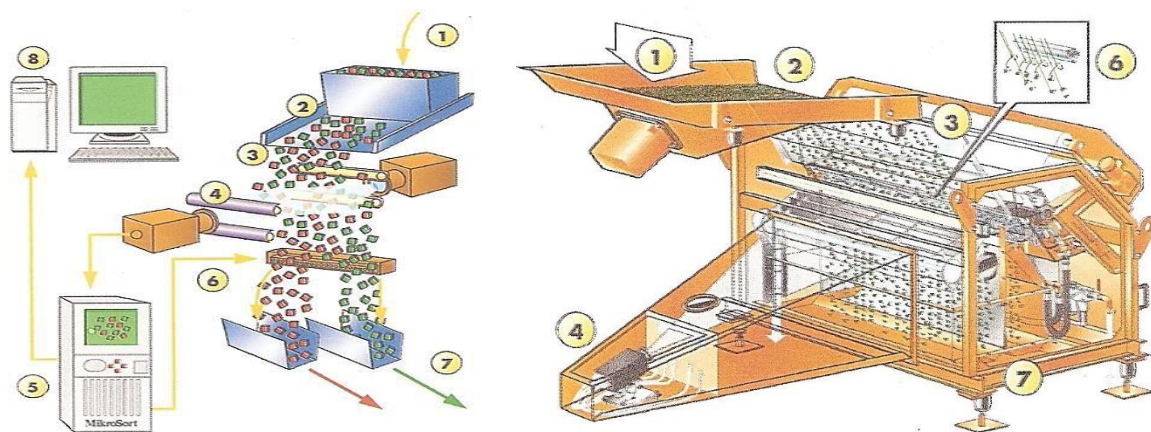


Рис. 1. Технология и конструктивная схема оптического сепаратора MikroSort®: 1 – предварительное грохочение, обеспыливание; 2 – распределение частиц по поверхности вибропитателя; 3 – свободное падение частиц; 4 – сканирование «завесы» потока материала оптической системой; 5 – обработка информации; 6 – выделение продуктов; 7 – разделение потоков готовых продуктов; 8 – обработка и накопление полученных данных.

2. Радиометрические (радиорезонансные) сепараторы

В радиорезонансных сепараторах используется высокочастотное электромагнитное излучение диапазона радиоволн. Первоначально развитие получил радиоадсорбционный метод применительно к углеобогащению, а затем емкостной радиорезонансный, оказавшийся более производительным и перспективным [7].

Разделение руд цветных (серноколчеданных, свинцовых, свинцово-цинковых, оловянных, медно-никелевых, вольфрамовых и др.), редких металлов (сурьмяных, ртутных, молибденовых, танталонийобиевых и др.) с помощью индукционного и емкостного радиорезонансных методов показали их высокую эффективность. При этом параметры сепарации на конкретном типе руд должна устанавливаться на основе специальных иссле-

дований. Такие исследования, в частности, были проведены на медно-никелевых и других сульфидных рудах на классах крупности – 50 + 10 мм, имеющих удельное электрическое сопротивление $10^{-6} \dots 10^{-2}$ Ом·м, а порообразующие минералы (кварц, кальцит, слюда и др.) – $10^{-12} \dots 10^{-16}$ Ом·м. Эти руды были подвергнуты сепарации на одноканальном ленточном сепараторе В-75 с индукционным проходным датчиком. Куски в свободном падении проходят через индукционный датчик и по команде прибора разделяются сортирующим устройством пневматического типа. При частоте срабатывания пневмосистемы до 20 Гц сепаратор позволяет получить приемлемую производительность.

Исследования, а также работы, проведенные в 80-ых годах в УГГУ, показали практическую перспективность применения радиорезонансной сепарации для предварительной подготовки бедных сульфидных медно-никелевых руд. Достоверность информации обеспечивается соответствующим числом датчиков. Увеличение числа датчиков используют для повышения достоверности информации. Она увеличивает статистику информации, накопленную за счёт суммирования статистик сигналов от всех датчиков по одному куску, что необходимо делать при сортировке относительно бедных руд. Для этого метода характерно ограничение, связанное с эффектом влияния аномально богатых кусков на близко расположенные бедные, что ведёт к снижению производительности из-за необходимости увеличения интервалов между кусками.

Сепараторы УАС включают в модульные сепарационные комплексы (рис. 2).

Радиометрические сепараторы используют для разделения материала крупностью – 200 + 20 мм. Радиометрические сепараторы производят ФГУП «ВНИИХТ» совместно с ООО «Консит-А» и НПЦ «Аспект» и ГП «Восточный ГОК».

3. Люминесцентные сепараторы

Люминесценция характерна не для всех минералов. В большинстве случаев причиной люминесценции минералов является наличие в них примесей – люминогенов: уран, редкоземельные элементы, марганец и хром, рубидий, стронций, теллур, сурьма, молибден, титан.

Примеси в минералах (железо, никель и др.) могут ослаблять и даже гасить люминесценцию. Существуют минералы, люминесценция которых зависит от примесей: кальцит, арагонит, опал, сфалерит, топаз и др.

Одноканальный сепаратор 811М (рис. 3) предназначен для класса 50 – 150 мм.

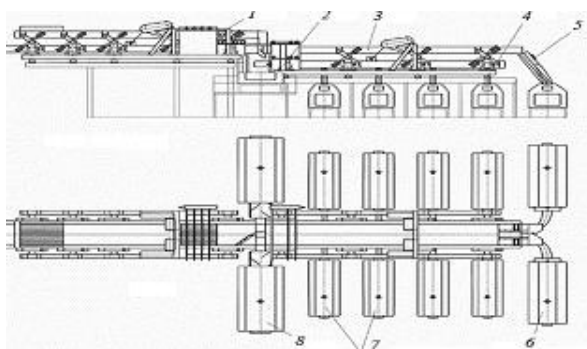


Рис. 2. Сепарационный комплекс:
1, 3 – конвейеры-грохоты вибрационные КВГ-1; 2 – система отмывки; 4, 5 – погрузочно-формирующие устройства; 6 – сепаратор УАС-100; 7 – сепаратор УАС-50; 8 – сепаратор УАС-200

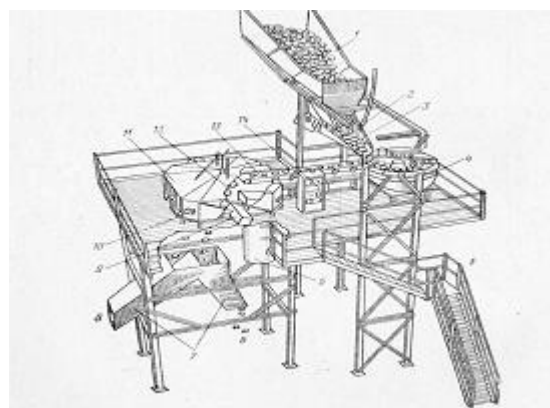


Рис. 3. Схема сепаратора «Сортекс» 811М: 1 – питающий желоб; 2 – брызгало; 3 – вибродатчик; 4 – выравниватель; 5 – ресивер; 6, 8 – продукты сепарации; 7 – желоба; 9 – оптическая система; 10 – осветительная лампа; 11 – оптическая камера; 12 – эжектор; 13 – конвейер; 14 – пульт управления

4. Рентгенофлуоресцентные сепараторы

Рентгенофлуоресцентные сепараторы применяются для разделения руд цветных, черных и редких металлов и неметаллических полезных ископаемых. Их производство осуществляют ООО «РАДОС», компания «Интегра», ООО «ЭГОНТ» и др.

Принцип их работы основан на измерении спектральных характеристик вторичного характеристического рентгеновского излучения элементов, а на их спектре сформируют

параметр разделения. Параметр разделения позволяет идентифицировать в кусках отдельные элементы и их количественное содержание. Сепараторы, производимые различными фирмами, отличаются организацией потоков питания, способах удаления частиц, конструкцией измерительных систем, исполнительных механизмов и удаляющих механизмов. Сепараторы «РАДОС» (рис. 4) имеют механический способ уда-

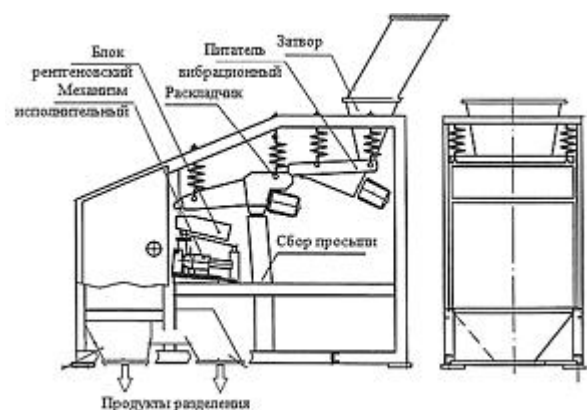


Рис. 4. Сепаратор СРФ 4-50 М
ООО «РАДОС»

ления кусков – электромагнитными шибберными устройствами [3-13].

Движение кусков через зоны идентификации и удаления обеспечивается вибрационным многоручьевым питателем – раскладчиком. Измерение и удаление кусков производятся при свободном падении.

Обработка информации, принятие решения об удалении, накопление информации осуществляются компьютером. Настройка сепаратора, анализ эффективности их работы – ПЭВМ, установленным в операторском пункте.

Разнообразие конструктивных особенностей рассмотренных сепараторов позволяет использовать их при разделении различных полезных ископаемых в широком диапазоне крупности от 10 до 350 мм.

5. Комбинированные схемы сепарации

В результате экспериментальных исследований и анализа физических процессов, возникающих при взаимодействии кусков горной породы с излучением, проявляется не одно, а несколько его свойств, каждое из которых пригодно для радиометрического разделения. При работе с мягкими гамма-лучами можно использовать различие руд и пород в линейном коэффициенте ослабления, энергии вторичного флуоресцентного излучения. Для электромагнитного излучения радиоволнового диапазона такими свойствами являются электропроводность, диэлектрическая проницаемость и магнитная восприимчивость.

Использование при радиометрическом разделения не одного, а двух или более различных физических свойств разделяемых компонентов руд открывает дополнительные возможности в повышении селективности данного процесса, расширении области его применения. Эта работа проведена на комплексных сульфидно-шеелитовых рудах. Разделение руды производилось на два типа индукционным радиорезонансным методом [2] и далее рентгенолюминесцентной сепарацией силикатно-шеелитовой разновидности для выделения отвальных хвостов [1].

Выводы:

Как показал обзор известной литературы по конструкции и физическим признакам использующих сортировку руд различными методами.

Установлено, что тепловой пробой сопровождается существенным уменьшением прочностных характеристик кусков руды и в дальнейшем приводит к снижению энергозатрат на дробление, измельчение и росту эффективности работы дробильно-размольного оборудования [3]. Такого эффекта в рассмотренных ранее конструкциях сепараторов не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпин Е. Ф. Информационные методы обогащения полезных ископаемых: учебное пособие / Е. Ф. Цыпин; Урал. гос. горный ун-т. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. – 206 с.
2. Потапов В.Я., Афанасьев А.И., Потапов В.В., Стожков Д.С. Разделение сульфидных руд индукционным радиорезонансным методом (ИРМ). Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 24. № 4. С. 43-57.
3. Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Потапов В.В., Стожков Д.С. Эффективность процесса разделения забалансовых медно-цинковых руд. В сборнике: Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья. материалы научно-технической конференции, проводимой в рамках VII Уральского горнопромышленного форума. 2017. С. 70-72.
4. Алгоритмы рентгенофлуоресцентной сепарации многокомпонентных руд / Е. Ф. Цыпин, Т. Ю. Овчинникова, В. В. Пестов и др. // Материалы научно-технической конференции, проводимой в рамках IV Уральского горнопромышленного форума, 12-14 октября 2011 г., г. Екатеринбург. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. С. 55-58.
5. Архипов О. А. Радиометрическая обогатимость руд при их разведке. М.: Недра, 1985.

144 с.

6. Леман Е. П., Рыбакова Т. Г. Физико-теоретические основы рентгенорадиометрической сепарации руд // Обогащение руд. 1988. № 1. С. 6-10.
7. Мокроусов В. А., Лилеев В. А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М.: Недра, 1976. 192 с.
8. Назаров В. В., Ершов В. И. Радиометрическая сепарация и усреднение руд // Обогащение руд. 1990. № 6. С. 8-12.
9. Обогащение минерального и техногенного сырья с использованием рентгенорадиометрической сепарации / Е. Ф. Цыпин, В. С. Шемякин, С. В. Скопов и др. // Сталь. 2009. № 6. С. 75-78.
10. Ревнивцев В. И. Фотометрическая сортировка – новый перспективный метод обогащения // Цветные металлы. 1969. № 5. С. 25-31.
11. Ревнивцев В. И., Рыбакова Т. Г., Леман Е. П. Рентгенорадиометрическое обогащение комплексных руд цветных и редких металлов. М.: Недра, 1990. 120 с.
12. Рентгенорадиометрическая сепарация медно-цинковых руд / Е. Ф. Цыпин, Н. М. Тююшева, С. Г. Комлев и др. // Цветные металлы. 1992. № 12. С. 58-61.
13. Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных образований Уральского региона / В. С. Шемякин, С. В. Скопов, А. В. Шемякин и др. // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 29-33.

ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

***Чтобы нефть и газ бессменно
Горный комплекс добывал,
И в других месторожденьях
Недостаток не настал,
Чтоб районы шахт и скважин
Нам дарили, что хотим –
Сей раздел не только важен,
А совсем незаменим!***

Доц. П.А. Жиганов

УДК 622.235

ЭВОЛЮЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КУСТОВЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Н.М. Баженов¹, студент; Л.А. Гаврилова, доцент
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Рассмотрена проблематика кустового бурения, дано описание отечественных разработок слайдерных и рельсовых систем передвижения, приведено описание технологических решений американских буровых установок, проведен сравнительный анализ подходов и перспектив развития отечественного и зарубежного бурового машиностроения.

Ключевые слова: буровая установка, сравнительный анализ, перспективы развития.

EVOLUTION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF SPATIAL POSITIONING SYSTEMS FOR CLUSTER DRILLING RIGS

N.M. Bazhenov, L.A. Gavrilova,

This paper examines the challenges of cluster drilling, describes domestic developments in slider and rail-based systems, describes technological solutions for American drilling rigs, and provides a comparative analysis of approaches and development prospects for domestic and foreign drilling machinery.

Keywords: drilling rig, comparative analysis, development prospects.

Введение в проблематику кустового бурения.

Современный этап развития нефтегазодобывающей отрасли характеризуется интенсификацией процессов строительства скважин и повсеместным внедрением методов кустового бурения [1, 2]. Такой подход, изначально разработанный для сложных ландшафтных условий: заболоченных территорий, гористой местности и районов с развитой гидрографической сетью, в настоящее время демонстрирует свою экономическую эффективность и в обычных условиях. Концентрация устьев нескольких скважин на одной технологической площадке позволяет радикально сократить объемы строительно-монтажных работ, минимизировать протяженность коммуникаций (дорог, трубопроводов, линий электропередач) и снизить антропогенную нагрузку на сельскохозяйственные угодья. Однако ключевой технической задачей при такой организации работ становится обеспечение быстрого и технологичного перемещения буровой установки от одного устья к другому в пределах одного куста [3, 4]. Традиционный метод, подразумевающий полный демонтаж оборудования, транспортировку с помощью шести-семи единиц тяжелой техники и последующий монтаж на новой точке, занимает от трех до семи суток, что создает значительные простои в цикле строительства скважин [5, 6].

Отечественные разработки: слайдерные и рельсовые системы передвижения.

В ответ на потребность в ускорении вышккомонтажных работ российскими инженерами, в частности учеными Передовой инженерной нефтяной школы «Высшая школа нефти» (Альметьевск) в кооперации с ПАО

«Татнефть» и ООО «Завод Ленмаш», были разработаны инновационные системы внутрикустового перемещения буровых установок. Созданная конструкторская документация и трехмерные модели позволяют реализовать принципиально иной подход к перемещению тяжелого бурового оборудования.

Разработанная система для мобильной буровой установки МБУ-3000/170 представляет собой платформу слайдерного типа, функционирующую на основе рельсового механизма. Перед началом бурения куста скважин буровая установка монтируется на специальной платформе, которая способна перемещаться по пяти рельсовым направляющим. Привод осуществляется с помощью мощных гидравлических цилиндров-толкателей, обеспечивающих необходимое усилие для сдвига многотонной конструкции. Ключевым технологическим решением является снижение коэффициента трения: направляющие обрабатываются специальным антифрикционным составом, что позволяет установке буквально «скользить» по металлической поверхности подобно лыжам. Конструкция направляющих выполнена секционной: по мере продвижения платформы, освободившиеся сзади секции демонтируются и переносятся вперед для наращивания пути. Это решение обеспечивает компактность системы и позволяет осуществлять перемещение на расстояние до двадцати и более метров без потери функциональности.

Эффективность данной технологической инновации впечатляет: время, необходимое для переезда между скважинами в пределах одного куста, сокращается с нормативных 6,9 суток (при традиционном методе с разборкой) до 12 часов, а по некоторым данным — до половины рабочего дня. При этом отпадает необходимость в сложных и дорогостоящих операциях по демонтажу верхнего привода, укладке мачты и отсоединению коммуникаций, что не только экономит время, но и значительно снижает трудозатраты и потребность в тяжелой грузоподъемной технике. Важной особенностью является также функция выравнивания основания буровой установки на слабонесущих грунтах, которую могут выполнять опорные балки системы, что повышает устойчивость и безопасность буровых работ.

Технологические решения в американском буровом машиностроении

Рассмотрение американского опыта в области мобильности бурового оборудования демонстрирует иной технологический вектор, ориентированный не столько на горизонтальное перемещение внутри куста, сколько на сверхбыстрое вертикальное разворачивание и мобильность между удаленными точками бурения. Характерным примером такого подхода является вертикальная буровая установка VR-500 производства American Augers (входит в корпорацию Astec Industries), представленная как революционное решение для добычи нефти и газа.

Концепция мобильности установки VR-500 базируется на ее самовозводимости и трехагрегатной конструкции, включающей собственно буровую установку, силовую станцию и трубный манипулятор. Смонтированная на трейлере, она способна оперативно доставляться к месту работ и приводиться в вертикальное рабочее положение при помощи встроенных

гидравлических домкратов, что практически исключает необходимость в монтажно-демонтажных работах и крановой технике. Принципиальным отличием является использование зубчато-реечного привода каретки со скользящим шпинделем, что позволяет развивать усилие прямой и обратной тяги до 250 тонн и крутящий момент до 40500 Нм. Такая кинематическая схема снижает нагрузку на трубную резьбу и обеспечивает высокую производительность даже на экстремально неглубоких пластах, где традиционные установки, полагающиеся на гравитацию, малоэффективны.

Сравнительный анализ подходов и перспективы развития

Сопоставление российских и американских технологий перемещения буровых установок выявляет два различных инженерных подхода, сформированных спецификой решаемых задач. Отечественная школа, представленная разработками «Высшей школы нефти» и «Татнефти», сконцентрировалась на оптимизации внутрикустового перемещения тяжелых установок большой грузоподъемности. Слайдерные системы ориентированы на работу в условиях уже обустроенного куста, где требуется высокая точность и стабильность позиционирования при перемещении на десятки метров. Они позволяют использовать мощные стационарные буровые установки в режиме, приближающемся по эффективности к конвейерному бурению нескольких скважин с одной подготовленной площадки. Экономический эффект достигается за счет драматического сокращения простоев и ликвидации циклов демонтажа-монтажа.

Американские разработки, на примере VR-500, делают акцент на стратегической мобильности и скорости разворачивания на новых, в том числе труднодоступных, площадях. Эти установки проектируются как полностью автономные транспортные единицы, способные самостоятельно прибыть на объект и в кратчайшее время (часы, а не дни) приступить к бурению. Если российская система оптимизирует процесс переезда со скважины на скважину, то американская – переезд с куста на куст или с месторождения на месторождение. Важно отметить, что американский подход, реализованный в VR-500, часто сопряжен с ограничениями по глубине бурения и ориентирован на специфические задачи, включая работу с неглубокими пластами, что следует из его технологической наследственности от установок горизонтального направленного бурения.

Перспективным направлением является синтез этих двух подходов. Российские инженеры уже анонсировали планы по созданию собственных «шагающих» буровых установок, которые могли бы сочетать высокую автономность американских аналогов с мощностью и надежностью, необходимой для бурения глубоких скважин в условиях Западной Сибири или Татарстана. Параллельно ведется работа по адаптации слайдерных систем под все типы буровых установок, что указывает на стремление к унификации и тиражированию успешного опыта внутрикустового перемещения. Развитие систем автоматизации и спутниковой навигации, подобных HPGPS на Komatsu ZR122, также открывает возможности для интеграции интеллектуальных систем управления перемещением в отечественную слайдерную технологию, что позволит выйти на качественно новый уро-

вень точности и безопасности при позиционировании тяжелого бурового оборудования. Таким образом, несмотря на различие исходных концепций, наблюдается конвергенция технологий, направленная на достижение общей цели – максимальной интенсификации процесса строительства скважин при безусловном обеспечении надежности и безопасности работ [7].

Заключение. Таким образом, современный этап развития бурового оборудования характеризуется переходом от статичного монтажа к динамичному позиционированию. Российские и американские инженерные школы, стартовав с разных позиций, движутся к общей цели – созданию буровых комплексов, способных совмещать высокую мощность с экстремальной мобильностью и точностью, что является ключевым фактором рентабельности в современной нефтегазодобыче.

Список литературы

1. Порожский К.П., Мурахтин В.Л., Epshtein V. От перспективных технологий нефтедобычи - к новой буровой технике/ Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сб. трудов XV Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р.Кубачека. – Екатеринбург; Уральский государственный горный университет, 2017. – С. 261-267
2. Асманкин Ю.Н., Гаврилова Л.А. Пути совершенствования конструкции модуля моста приемного/ Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сб. трудов XX Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека, - Екатеринбург; Уральский государственный горный университет, 2022. – С.145-148.
3. Завархин Е.А., Шестаков В.С. Оптимизация параметров направляющей приемного моста буровой установки /В сборнике: [Международная научно-практическая конференция "Уральская горная школа - регионам"](#) Уральская горнопромышленная декада: материалы конференции. УГГУ (2019). С. 233-234.
4. Markelov A., Gavrilova L., Belov S. Features of the tripping mechanization with the horizontal pipe laying// E3S Web of Conferences. Volume 177, 2020. XVIII Scientific Forum “Ural Mining Decade” (UMD 2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017703007>
5. Зобнин Г.К., Лагунова Ю.А. Возможности применения тензорезисторов в нефтяной и газовой промышленности / Технологическое оборудование для горной и нефтяной промышленности: сборник трудов XXIII международной научно-техн. конференции. Чтения памяти В.Р.Кубачека. – Екатеринбург: УГГУ, 2025. – С.271-272.
6. Гаврилова Л.А. Научно-методологические подходы к совершенствованию бурового оборудования/ Технологическое оборудование для горной и нефтяной промышленности: сборник трудов XVI международной научно-техн. конференции. Чтения памяти В.Р.Кубачека. – Екатеринбург: УГГУ, 2018. – С.176-179.
7. Авхадиев А.Е., Лагунова Ю.А. Анализ эффективности использования свечеукладчика в спускоподъемных операциях / Технологическое оборудование для горной и нефтяной промышленности: сборник трудов XIX международной научно-техн. конференции. Чтения памяти В.Р.Кубачека. – Екатеринбург; УГГУ, 2021. – С. 201-204.

УДК 622.235

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ BLAST MAKER ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПАСПОРТА БУРЕНИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

О.С.Данилов¹, канд. техн. наук, доц., А.С.Звягина¹, студ., Д.А.Охрименко¹, студ.
¹ФГБОУ ВО «Заполярный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Россия

В горнодобывающей отрасли на подземных рудниках одним из ключевых «узких» мест, негативно сказывающихся на эффективности добычи полезного ископаемого, выступает расхождение параметров фактического бурения с показателями электронных паспортов. На примере ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» проанализирован опыт внедрения программного обеспечения (ПО) «Blast Maker» для повышения эффективности бурения путем повышения точности и скорости моделирования буровзрывных работ. Показано, что использование ПО «Blast Maker» по сравнению с ПО «Autocad» сокращает время моделирования на 20 % и увеличивает его точность, что положительно сказывается на фактических показателях бурения, в расхождении между фактическими и запланированными показателями разубоживания.

Ключевые слова: Blast Maker, Autocad, бурение, электронный паспорт, ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель».

USING BLAST MAKER TO GENERATE ELECTRONIC DRILLING DATA SHEET FOR UNDERGROUND MINING

Danilov O.S., Zvyagina A.S., Okhrimenko D.A.

In the mining industry at underground mines, one of the key bottlenecks that negatively affect the efficiency of mining is the discrepancy between the parameters of actual drilling and the indicators of electronic passports. Using the example of PJSC MMC Norilsk Nickel, the experience of implementing the new Blast Maker software to improve drilling efficiency by increasing the accuracy and speed of modeling drilling and blasting operations was analyzed. The paper shows that the use of Blast Maker software compared to Autocad software reduces modeling time by 20% and increases its accuracy, which has a positive effect on actual drilling indicators, in particular in the discrepancy between actual and planned dilution indicators.

Keywords: Blast Maker, Autocad, drilling, electronic passport, ZF PJSC MMC Norilsk Nickel.

Отечественный и зарубежный опыт подземной добычи полезных ископаемых [1, 2] показывает, что в настоящее время одной из наиболее острых проблем при осуществлении технологических операций бурения является отклонение показателей фактического бурения от заданных в плане, что несет в себе негативные последствия в виде:

- обеднения (разубоживания) получаемой рудной массы и необходимости дополнительного бурения;
- снижения качества буровзрывных работ, вследствие нарушения проектных углов и глубины скважин (шпуров).

На рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» (далее – Компания) бурение проходческих выработок осуществляется бурильщиком шпуров на самоходных буровых установках (СБУ) в ручном режиме без возможности автоматического контроля точности бурения в соответствии с

утвержденным паспортом бурения, что зачастую приводит к отклонениям фактических параметров от планируемых.

Ключевыми факторами в данной ситуации выступают:

1. Отсутствие технико-технологических решений автоматического точного позиционирования СБУ веерного и стрелового вида не позволяет производить бурение согласно показателям, заложенным в электронных паспортах.

2. Существующий регламент точного позиционирования (провеска с маркшейдерами) не осуществляется по причине достаточно высокой трудоемкости и дефицита необходимого технологического оборудования.

3. Системы точного позиционирования, размещенных на СБУ зарубежного производства (Epiroc, Sandvik), используемых на рудниках Компании, недоступны из-за выхода из строя базовых датчиков и невозможности получения доступа к программной части этих решений.

4. Субъективный (человеческий) фактор.

Решением проблемы в Компании выступили разработка и внедрение двух программных комплексов - Ассистента Проходческого Бурения (АПБ) для проходки и Ассистента Очистного Бурения (АОБ) для очистных работ соответственно.

Передовые технологические решения точного позиционирования и ассистентов бурения по цифровому паспорту позволяют реализовывать точное бурение в части целевых индикаторов (в соответствии с утвержденным цифровым паспортом) - расстояние между шпурами, тоннельная ось, координаты устья шпура, угол его наклона. Технология доступна для испытаний на применяемых штатных системах Epiroc стреловых СБУ, а также различных аналогах.

Автоматическое бурение базируется на применении разнообразных программных продуктов для создания электронного паспорта бурения. В применяемых в настоящее время СБУ зарубежного производства (Epiroc, Sandvik), в т.ч. с АПБ, внедрена программа Epiroc (Швеция). Она рассчитана на моделирование буровзрывных работ только на проходку.

Импортозамещающим аналогом выступает программа Blast Maker [3], внедренная в Компании, которая позволяет формировать паспорта как на проходческие, так и на очистные работы. Совместима с иностранными СБУ (СБУ с АПБ и АОБ). В табл.1 приведены основные преимущества ПО «ГМК «Blast Maker» по сравнению с ПО «AutoCad».

Как показал опыт использования «Blast Maker», ПО повышает точность моделирования БВР и сокращает время проектирования на 20 %.

Примеры отклонений при проектировании в «AutoCad» и «Blast Maker»:

1. Не учитывается изменение контура выработки и камеры в рамках пикета (5 м). Три одинаковых веера на один пикет. (рис. 1, 2).

3. Проектирование в «AutoCad» проводится на сечениях выработки с углом в 90° (наклон веера в 8° дает на 10 метровой скважине погрешность в 0,8 м) (рис.3).

В табл. 2 приведены плановые и фактические результаты очистных буровзрывных работ (рудник «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель»).

Таблица 1. Преимущества ПО Blast Maker по сравнению с AutoCad

№ п/п	Проектирование в AutoCad	Моделирование в Blast Maker
1.	Не учитывается изменение контура выработки и камеры в рамках пикета (5 м). Три одинаковых веера на один пикет.	Индивидуальное проектирование скважин по каждому вееру внутри пикета (у каждого веера индивидуальные параметры глубины и углов скважин).
2.	Округление глубины и углов скважин при проектировании. Визуальное изображение вееров не всегда соответствует указанным длинам и углам скважин.	Высокая точность расчетных глубин и углов каждой скважины веера.
3.	Проектирование проводится на сечениях выработки с углом в 90° (наклон веера в 8° дает на 10 метровой скважине погрешность в 0,8 м).	При проектировании учитываются углы наклона вееров.
4.	Расчет расхода взрывчатых материалов осуществляется в Excel с ручной корректировкой.	Автоматический расчет расхода взрывчатых материалов проекта.
5.	Для создания электронных паспортов бурения для загрузки на СБУ необходимо дополнительное проектирование в стороннем ПО.	Автоматическое создание электронных паспортов бурения для загрузки на СБУ.
6.	Среднее время оформления одного проекта (без расчета расхода взрывчатых материалов) – 4 часа.	Среднее время оформления одного проекта (с расчетом расхода взрывчатых материалов) – 3 часа.

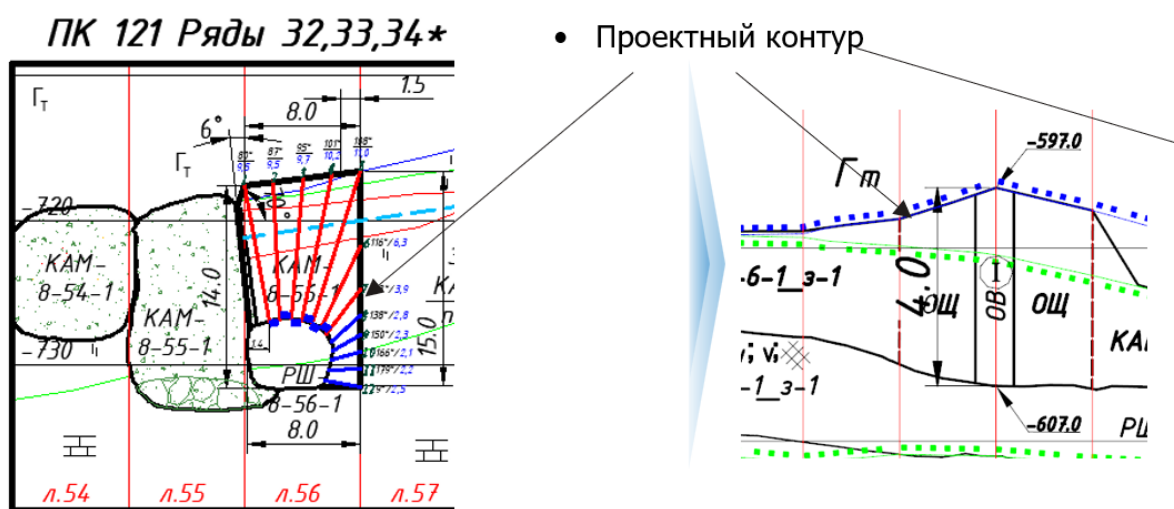


Рис.1. Проект БВР в AutoCad (утвержденный)

Исходя из представленных материалов можно сделать следующие выводы по эффективности применения ПО «Blast Maker»:

- высокая степень автоматизирования, индивидуальное проектирование скважин, высокая точность задания параметров скважины (глубины и угла), быстрота расчетов;

- среднее отклонение разубоживания с момента начала проектирования очистных БВР в BlastMaker в разрезе план\факт – 2,45 % (ниже плана).

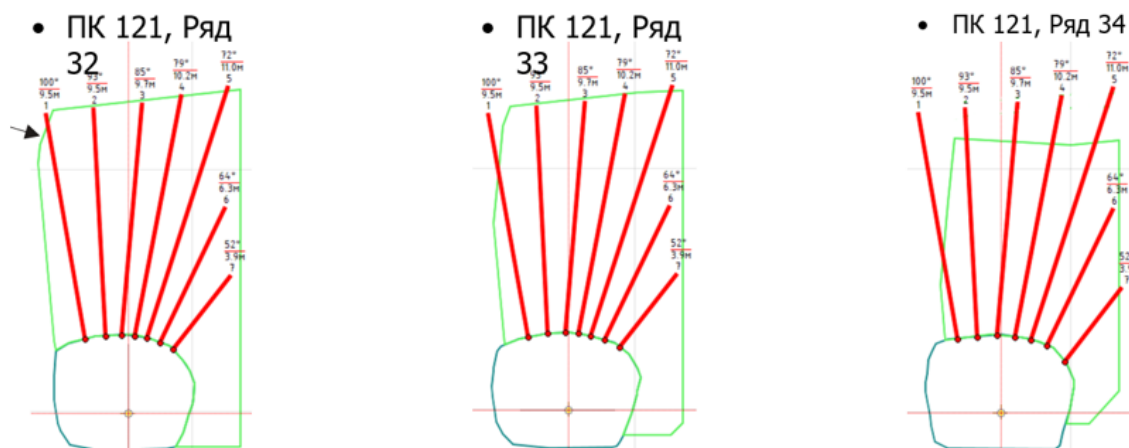


Рис. 2. Тот же проект БВР рудника, реализованный в ПО Blast Maker

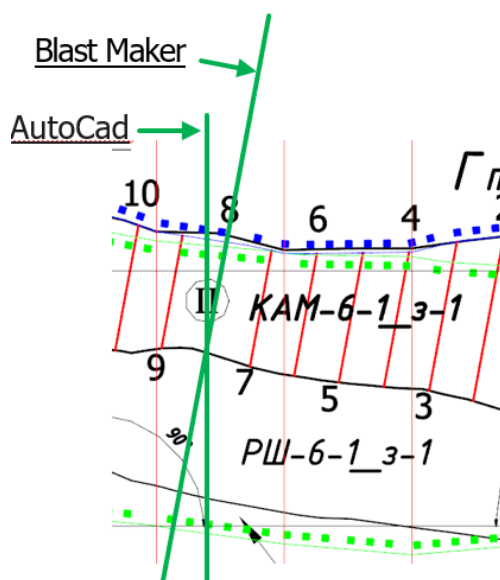


Рис.3. Сравнение вееров

Таблица 2. Плановые и фактические результаты очистных БВР

Месяц	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Ноя
План, %	12,3	12,3	12,3	13,5	13,5	13,5	17,0	17,0	17,0	17,9	17,9
Факт, %	25,8	18,5	18,5	23,0	17,8	11,2	11,4	16,1	14,5	19,8	12,6
Откл, %	13,5	6,2	6,2	9,5	4,3	-2,3	-5,6	-0,9	-2,5	1,9	-5,3
Проект	Без Blast Maker					С Blast Maker					
Ср.откл	7,94					-2,45					

Следовательно, применение программного обеспечения эффективно для повышения точности бурения и эффективности проведения подземных горных выработок.

Список литературы

1. Кирсанов А.К. Обоснование параметров буровзрывных работ при строительстве подземных горизонтальных и наклонных горных выработок: специальность 25.00.22 «Гео-

технология (подземная, открытая и строительная)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кирсанов Александр Константинович; Сибирский федеральный университет. Красноярск, 2019. 186 с.

2. Batruna M., Daggez A. Drilling and Completion of horizontal wells, 2010. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://oilfieldteam.com/static/uploads/uploaded_files/8ddc5ec798dd0b12b655d18d96c8c979.pdf (дата обращения: 15.02.2026).

3. Blast Maker [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eac-reestr.digital.gov.ru/reestr/1407828/> (дата обращения: 15.02.2026).

УДК 622.242.5

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СПУСКОПОДЪЕМНОГО КОМПЛЕКСА БУРОВЫХ УСТАНОВОК

С.В. Воробель¹, канд. техн. наук, доц., **А.К. Муравский¹**, канд. техн. наук, доц.
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

При строительстве глубоких скважин значительную часть времени занимают спускоподъемные операции. Это время является непроизводительным и логичной необходимостью является поиск возможностей его сокращения. Актуальной является задача расчета времени спускоподъемных операций при планировании буровых работ.

Ключевые слова: буровая установка, буровая лебедка, спускоподъемный комплекс, эффективная скорость, время подъема бурильной колонны.

TO THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PRODUCTIVITY OF THE LIFTING COMPLEX OF DRILLING RIGS

S. Vorobel, A. Muravskiy

During the construction of deep wells, operations for lifting and lowering drill strings take up a significant part of the time. This time is unproductive and it is a logical necessity to look for ways to reduce it. The task of calculating the time of operations for lifting and lowering drilling tools is relevant when planning drilling operations.

Keywords: drilling rig, drilling winch, lifting system, effective speed, lifting time of the drill string.

При строительстве глубоких скважин значительную часть времени занимают спускоподъемные операции (СПО). Объем и время спускоподъемных операций зависит от конструкции скважины, искривленности её ствола, бурового раствора, горных пород, по которым ведется проходка, надежности долот и забойных двигателей и других факторов. Это время является непроизводительным и логичной необходимостью является поиск возможностей его сокращения. Для этого, в первую очередь, спускоподъемный комплекс должен обладать мощной лебедкой с хорошими разгонными характеристиками и высокоэффективной и надежной тормозной системой. Для оценки предположительного времени СПО, а конкретнее времени подъема бурильных колонн, известна методика [1], для ступенчатого изменения скорости подъема. Такая подъемная характеристика буровой лебедки соответствует дизель-механическому приводу или приводу от электродвигателей двигателей переменного тока без плавного регулирова-

ния частоты вращения. Методика учитывает объем СПО, определяемый по фактической или теоретической кривой проходки – зависимости числа рейсов и их глубины от глубины забоя скважины. При бурении типовой скважины на месторождении с заранее известными параметрами теоретической кривой проходки можно определить время подъема бурильной колонны за все рейсы, используя подъемную характеристику буровой лебедки – зависимость скорости подъема от нагрузки на крюке. Подъемная характеристика буровой лебедки рассчитывается из условия загрузки привода на номинальную мощность, т.е. близка к кривой постоянной мощности. Минимальная рабочая скорость подъема крюка для спускоподъемных комплексов буровых установок равна 0,4-0,5 м/с, максимальная – 1,7-2 м/с. Последняя ограничена максимальной скоростью навивки каната на барабан буровой лебедки 20 м/с.

Предлагается время подъема колонн определять по эквивалентной или эффективной скорости подъема, которую можно заранее рассчитать для различных условий бурения скважин. Эффективная скорость подъема определяется из равенства общего времени подъема при ступенчатой подъемной характеристике буровой лебедки и времени подъема колонны на одной эффективной скорости.

$$t_n = \frac{\varepsilon}{3600} \left(\frac{S_1}{v_1} \lambda_1 + \frac{S_2}{v_2} \lambda_2 + \dots + \frac{S_n}{v_n} \lambda_n \right) = \frac{\varepsilon}{3600} \frac{S_{\Pi}}{v_{\text{эф}}} \lambda_{\text{эф}},$$

где $v_{\text{эф}}$ – эффективная скорость подъема; $\lambda_{\text{эф}}$ – коэффициент заполнения тахограммы на эффективной скорости.

Расчетные эксперименты проведены для 4 и 6-ти скоростных буровых лебедок, при глубине скважины 3000-5000 м, для электрического привода. Масса 1 м бурильной колонны 30 кг; масса 1 м УБТ 156 кг, длина УБТ 150 м; вес талевого блока 150 кН (система верхнего привода). Минимальная скорость подъема крюка 0,4 м/с, максимальная 2 м/с; длина свечи 27 м. Результаты расчетов представлены в таблицах 1 и 2.

При увеличенной мощности привода буровой лебедки есть возможность повысить минимальную скорость подъема, что существенно повышает эффективную скорость подъема и снижает время подъема при тех же условиях работы буровой установки. Результаты расчетов представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 1. Количество рейсов и эффективная скорость подъема при 4-х скоростной буровой лебедке

Глубина бурения,	Мощность буровой лебедки, кВт	Количество рейсов/эффективная скорость подъема при показателях теоретической кривой проходки		
		$A = 600$ $m = 0,4$	$A = 600$ $m = 0,5$	$A = 700$ $m = 0,6$
3000	710	56/0,6	25/0,61	12/0,62
4000	900	115/0,65	45/0,66	19/0,67
5000	1100	201/0,69	70/0,7	27/0,72

Таблица 2. Количество рейсов и эффективная скорость подъема при 6-ти скоростной буровой лебедке

Глубина бурения,	Мощность буровой лебедки, кВт	Количество рейсов/эффективная скорость подъема при показателях теоретической кривой проходки		
		$A = 600$ $m = 0,4$	$A = 600$ $m = 0,5$	$A = 700$ $m = 0,6$
3000	710	56/0,68	25/0,69	12/0,7
4000	900	115/0,73	45/0,75	19/0,76
5000	1100	201/0,78	70/0,79	27/0,81

Таблица 3. Эффективная скорость подъема при 6-ти скоростной буровой лебедке и увеличенной мощности привода до 1500 кВт

Глубина бурения,	Мощность привода лебедки, кВт/ минимальная скорость подъема, м/с	Эффективная скорость подъема при показателях теоретической кривой проходки, м/с		
		$A = 600$ $m = 0,4$	$A = 600$ $m = 0,5$	$A = 700$ $m = 0,6$
3000	1500/0,8	1,46	1,48	1,5
4000	1500/0,7	1,25	1,27	1,29
5000	1500/0,6	1,08	1,1	1,12

Таблица 4. Время подъема бурильных колонн при 6-ти скоростной буровой лебедке и различной эффективной скорости подъема

Глубина бурения,	Эффективная скорость подъема, м/с	Время подъема колонн, час		
		$A = 600$ $m = 0,4$	$A = 600$ $m = 0,5$	$A = 700$ $m = 0,6$
3000	1,46-1,5	27,6	11,4	4,8
3000	0,6-0,62	52,2	21,4	8,9

Выводы:

1. При бурении скважин глубиной 3000-5000 м и минимальной скорости подъема бурильных колонн 0,4-0,5 м/с, характерной для буровых лебедок, эффективная скорость подъема находится в узких пределах 0,6-0,8 м/с, что соответствует, примерно, второй скорости подъема со ступенчатой подъемной характеристикой буровой лебедки.

2. Увеличение числа скоростей лебедки приводит к повышению эффективной скорости подъема для одних и тех же условий, также как и к увеличению коэффициента использования мощности буровой лебедки.

3. При расчетной мощности буровой лебедки, обеспечивающей подъемную характеристику буровой лебедки с минимальной скоростью 0,4 м/с и максимальной 2 м/с с увеличением глубины бурения и значительного увеличения объема спускоподъемных операций, например с 12 до 200 рейсов, эффективная скорость подъема возрастает незначительно.

4. Повышение мощности привода буровой лебедки приводит к возможности увеличения минимальной скорости подъема, что также ведет к

существенному росту эффективной скорости и снижению времени подъема колонн.

Список литературы

1. Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы. - М.: Недра, 1988.-452 с.
2. Буровые комплексы / под общ. ред. К.П. Порожского. – Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2013. – 768 с.: ил.
3. Ефимченко С.И., Прыгаев А.К. Расчет и конструирование оборудования нефтяных и газовых промыслов. Часть I. Расчет и конструирование оборудования для бурения нефтяных и газовых скважин. Учебник для вузов. – М.:ФГУП «Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2006. – 736 с.

УДК 622.32

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕМОНТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

В.Ф.Копачев¹, д-р техн. наук, **Ю.В.Холодников**², канд. техн. наук, **Е.А.Копачева**¹
¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ
²ООО СКБ «Мысль», г. Екатеринбург, РФ

Показано применение композитных материалов при ремонте технологических трубопроводов, имеющих высокую степень износа. Приведены основные преимущества новой технологии ремонта трубопроводов. Произведён расчет основных параметров ремонтного бандаж, выполненного из стеклопластика. Приведен анализ физических параметров бандаж в зависимости от диаметра ремонтируемого трубопровода. Представлены перспективные данные о дальнейшем применении данной технологии в разных отраслях промышленности.

Ключевые слова: композитные материалы, ремонт, технологический трубопровод, ремонтный бандаж, метод восстановления.

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN THE REPAIR OF TECHNOLOGICAL PIPELINES

V.F. Kopachev, Yu.V. Kholodnikov, E.A. Kopacheva

The use of composite materials in the repair of process pipelines with high wear rates is demonstrated. The main advantages of this new pipeline repair technology are presented. The key parameters of a fiberglass repair bandage are calculated. An analysis of the bandage's physical parameters is presented depending on the diameter of the pipeline being repaired. Promising data on the further application of this technology in various industries are presented.

Keywords: composite materials, repair, process pipeline, repair bandage, restoration method.

Технологические трубопроводы являются одним из важнейших видов нефтезаводского оборудования. Транспортируемые по ним продукты могут быть различного вида с различными параметрами давления и температуры. Также трубопроводные системы могут быть разной конфигурации с ответвлениями и с различной протяжённостью. В количественном отношении технологические трубопроводы в 2-3 раза больше всех остальных видов применяемого оборудования. Исследования показывают, что

наибольшее количество отказов и аварий, связанных с пропуском рабочей среды, приходится на технологические трубопроводы. А основным видом нарушения является локальный износ стенки трубопровода [1]. Поэтому вопросы восстановления дефектных технологических трубопроводов являются актуальной задачей.

Перспективным направлением в настоящее время является восстановление дефектных трубопроводов непосредственно на месте путем использования композитных материалов, обладающих высокой прочностью и высокой адгезией к металлическим материалам. Традиционный ремонт трубопроводов сваркой и врезкой ремонтных участков не всегда может быть выполнен на месте, и в большинстве случаев, приходится прибегать к полной замене целых участков трубопроводов. Следует отметить, что трубопроводы из металлов обладают всеми необходимыми характеристиками, но являются массивными и дорогостоящими элементами.

Перспективными в настоящее время являются материалы, обладающие прочностью, сопоставимой с металлами, но имеющие значительно меньший вес, а также стоимость [2]. К таким материалам относятся композиты – многокомпонентные материалы, изготовленные из двух или более компонентов. Перспективность использования таких материалов также подтверждается развитием технологий изготовления композитных элементов различных деталей с использованием различных наполнителей, которые придают материалу дополнительные улучшенные физические и химические свойства.

Рассмотрим возможность применения композитных материалов для ремонта технологических трубопроводов в нефтехимической промышленности методом «мокрого» ламинирования [3]. Данный технологический процесс подразумевает нанесение на поврежденную поверхность сухого стеклоармирующего материала (стекломат, стеклоткань) с последующей его пропиткой жидкой органической смолой (эпоксидной, фенолформальдегидной, полиэфирной, эпоксивинилэфирной и др.). Смола выполняет функции связующего, а стеклоармирующий материал обеспечивает механическую прочность конструкции. Для придания композиту специальных свойств в смолу вводят функциональные наполнители в виде минеральных или полимерных дисперсий.

Преимуществами данного вида ремонта являются: возможность работы «по месту», в том числе в труднодоступных и замкнутых пространствах; без огневой способ ремонта и ремонтпригодность наносимых покрытий; высокая прочность покрытия, возможность создания покрытий для различных рабочих сред и условий эксплуатации; возможность модернизации оборудования и интенсификации производственных процессов при нанесении специальных видов покрытия на существующие конструкции.

Выполним расчет стеклопластикового бандажа для ремонта стальных труб. Исходными данными для расчета являются основные геометрические размеры бандажа, физические свойства материала из которого изготовлен

бандаж, основные действующие нагрузки на бандаж. Общий вид бандажа показан на рисунке 1.

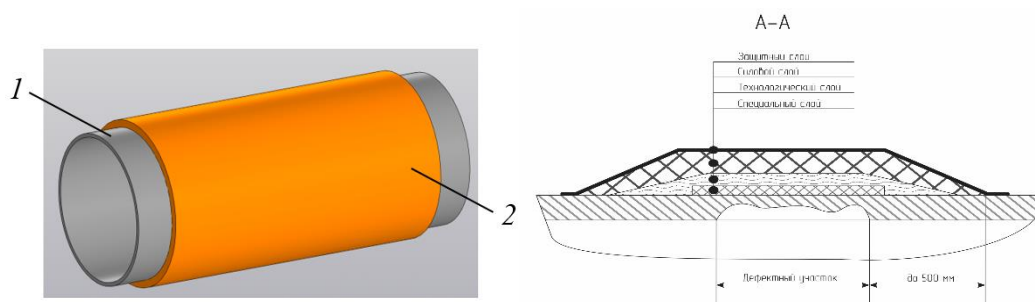


Рис. 1. Стеклопластиковый бандаж на трубопроводе:
1 – металлическая труба; 2 – стеклопластиковый бандаж

Бандаж изготовлен из композитного материала: стеклопластик (S-стекло), основные физико-механические свойства которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства композита – стеклопластик (S-стекло)

№ п/п	Наименование показателя	Условное обозначение	Единица измерения	Значение
1	Плотность	ρ	г/см ³	1,95
2	Удельная прочность	σ_b/ρ	МПа·см ³ /г	564
3	Предел прочности на растяжение	$\sigma_{вр}$	МПа	1100
4	Предел прочности на сжатие	$\sigma_{вс}$	МПа	800
5	Модуль упругости материала при температуре 20°C	E^{20}	МПа	46000
6	Модуль упругости материала при расчетной температуре (120°C)	E	МПа	27600
7	Ударная вязкость	KCU	КДж/м ²	115
8	Усталостная прочность (% от статической)	σ_{-1}	%	60

Расчет ремонтного бандажа выполнен на основании ГОСТ Р 59411-2021 «Трубопроводы промышленные из стеклопластиковых труб. Правила проектирования и эксплуатации» и ГОСТ 32388-2013 «Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия».

Расчет бандажа на прочность включает:

- расчет минимальной толщины исходя из действующего избыточного внутреннего давления и избыточного наружного давления;
- проведение проверочного расчета на прочность при условиях эксплуатации трубопровода (временные длительные нагрузки (внутреннее избыточное давление или вакуум в трубопроводе), кратковременные нагрузки (испытание трубопровода на прочность и проверка герметичности, гидравлический удар).

Результаты математического моделирования и проверочные расчеты показывают, что минимальная величина толщины ремонтного бандажа S_R ,

выполненного из стеклопластика, без учета напуска на технологию производства и прибавки для компенсации эрозии материала при эксплуатации, составляет менее 1 мм для давления до 1,5 МПа и диаметра трубопроводов до 300 мм для температурных условий до 120 °С (рис. 2). Данный результат показывает, что толщина ремонтного слоя в три раза меньше толщины трубы, выполненной из металла.

Условия прочности бандажа при воздействии гидравлического удара соблюдается для любых сочетаний его конструктивных форм.

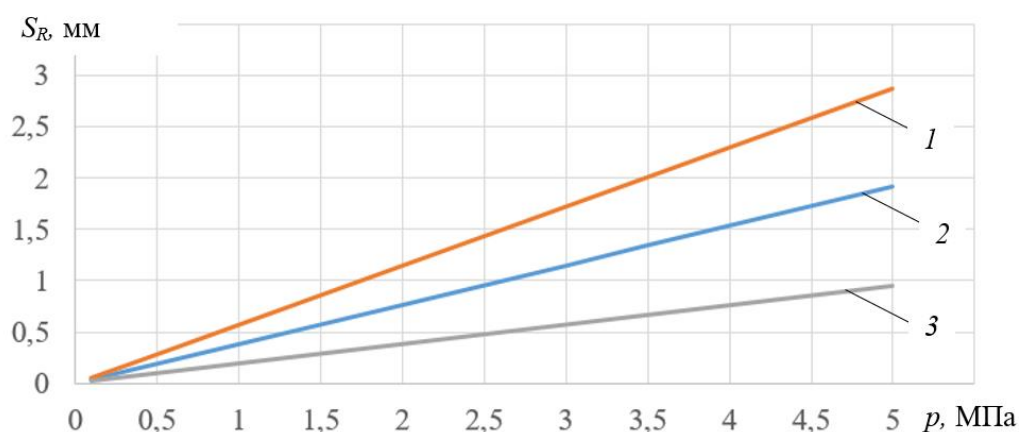


Рис. 2. Зависимость минимальной расчетной толщины ремонтного стеклопластикового бандажа от избыточного давления для труб диаметром: 1 – $D_H = 300$ мм; 2 – $D_H = 200$ мм; 3 – $D_H = 100$ мм

Такими образом, предварительные исследования показывают, что применение композитов для ремонта стальных труб методом изготовления композитного бандажа на трубе способом «мокрого» ламинирования, позволяет достичь необходимых результатов. При этом стоимость ремонтных работ не превышает стоимости традиционных методов восстановления труб. А срок службы трубопровода увеличивается, так как бандаж из стеклопластика обладает высокой химической стойкостью к агрессивным условиям внешней среды. Данное решение может найти применение для восстановления изношенных трубопроводов и для других отраслей промышленности.

Список литературы

1. Бадьин Ю.А., Солоденков С.В., Феоктистов В.А. Предотвращение повышенного эрозивно-коррозионного износа в технологических трубопроводах нефтеперерабатывающих предприятий. – URL: <https://chemtech.ru/predotvrashhenie-povyshennogo-erozionno-korrozionnogo-iznosa-v-tehnologicheskikh-truboprovodah-neftepererabatyvajushhih-predpriyatij/> (дата обращения 2026-02-15).
2. Любимова О.Н., Любимов Е.В., Андреев В.В. Армирующие элементы на основе стеклометаллокомпозита: анализ целесообразности их внедрения: учебное пособие для вузов / Политехнический институт ДВФУ. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. – 1 CD. [117 с.]. – Систем. требования: Acrobat Reader, Foxit Reader или любой другой их аналог. – ISBN 978-7444-5539-2. – Текст: электронный.
3. Холодников Ю.В., Альшиц Л.И., Дербышев А.С. «Применение композитов в оборудовании для химических производств. Часть 1» // Композитный мир. №3, 2019 г. – С. 36-44.

УДК 622.276.53

ЗАЩИТА ПОГРУЖНЫХ ГАЗОСЕПАРАТОРОВ ОТ ПОЛЕТА В СКВАЖИНУ

Ю. Г. Коротков¹, старший преподаватель, **Д. И. Дремина¹**, ассистент,
А. О. Будыкин¹, студент, **Д. В. Мусихин¹**, студент, **А. М. Кадыров¹**, студент
¹ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Описаны основные причины и рассмотрены закономерности гидроабразивного изнашивания погружных газосепараторов, входящих в состав установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Указывается, что при использовании установок электроцентробежных насосов, оснащенных центробежными и вихревыми газосепараторами, велика вероятность перерезания корпусов газосепараторов вследствие интенсивного развития гидроабразивного износа, что приводит к разрушению установок и падению погружных двигателей с гидрозащитами в скважины. Предложен способ защиты погружных газосепараторов УЭЦН от гидроабразивного перерезания и полета с частью погружной установки в скважину. Описана сущность предложенного способа.

Ключевые слова: добыча нефти, газосепаратор, установка электроцентробежного насоса, гидроабразивный износ, защита от перерезания.

PROTECTING SUBMERSIBLE GAS SEPARATORS FROM FLIGHT INTO THE WELL

Yu.G. Korotkov, D.I. Dremina, A.O. Budikin, D.V. Musihin, A.M. Kadyrov

Features of well oil production in high inclusion of gas with high mechanical impurities concentration conditions were considered. Indicates that exploitation of electric centrifugal pump installations with centrifugal or vortex separators of gas is at risk of cutting of gas separator's body and falling of part electric centrifugal pump installations on bottom of well because intense hydro-abrasion wear. Liquidation of this emergency requires long timeouts oil production for repair work. Some regularities of hydro-abrasion wear were described. Method of protection from cutting body of gas separator is proposed.

Keywords: oil production, gas separator, electric centrifugal pump installation, hydro-abrasive wear, protection from cutting

В настоящее время более 80 % нефти на месторождениях добывается с использованием установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Свыше 60 % нефтяных скважин оборудовано УЭЦН [3].

Среди наиболее распространённых факторов, осложняющих механизированную добычу нефти, существенное влияние на эффективность функционирования УЭЦН оказывают высокое содержание газа в пластовой жидкости и значительные концентрации частиц механических примесей в перекачиваемой жидкости, вызывающих гидроабразивный износ погружного оборудования.

Известно, что гидроабразивный износ защитных гильз и корпусов газосепараторов УЭЦН развивается неравномерно [1]. Результаты многочисленных стендовых испытаний, приведенные в технической литературе, показывают, что основной причиной гидроабразивного изнашивания является накопление частиц твердых механических примесей между входными, напорными и сепарирующими ступенями газосепараторов [2]. То есть в местах изменения скорости и характера течения перекачиваемой жидкости

внутри газосепаратора создаются условия для концентрации твердых частиц и локального развития износа.

Отечественными и зарубежными учеными разработаны модели абразивостойких газосепараторов, показывающих высокую эффективность работы. Однако конструктивная сложность и высокая цена таких изделий обуславливают их малое распространение на нефтедобывающих предприятиях. В то же время, процент аварийных отказов, связанных с полётами УЭЦН в скважины по причине перерезания газосепараторов увеличивается с каждым годом. Устранение таких отказов определяет длительные остановки скважин для проведения ловильных и ремонтных работ, что негативно сказывается на прибыли нефтедобывающего предприятия.

Авторами предложено и запатентовано техническое решение, позволяющее эффективно предотвращать возникновение полетов УЭЦН в скважины при интенсивном гидроабразивном износе газосепараторов серийных конструкций. Суть предлагаемого решения заключается в том, что теоретически или экспериментально выявляются зоны локализации гидроабразивного износа по длине защитной гильзы обследуемого газосепаратора (рис. 1).

В корпусе газосепаратора, напротив выявленных зон локального износа защитной гильзы, выполняются технологические отверстия.

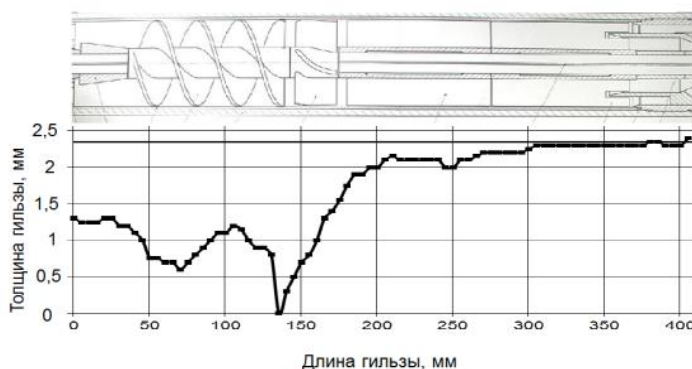


Рис. 1 – Результаты стендовых испытаний по определению зон локализации гидроабразивного износа газосепараторов УЭЦН при перекачке жидкости, содержащей частицы механических примесей [1]

При работе газосепаратора, после перерезания гильзы, внутренняя полость газосепаратора сообщается с затрубным пространством, в которое через указанные технологические отверстия в корпусе сбрасывается весь накопленный объем абразивных частиц, после чего происходит срыв подачи электроцентробежного насоса и остановка всей УЭЦН. Таким образом, предупреждается полное перерезание корпуса газосепаратора и последующий полет УЭЦН на забой скважины, в результате чего существенно сокращаются издержки добывающего предприятия на ремонт скважины, ловильные работы и замену уничтоженной части оборудования. После отказа УЭЦН по срыву подачи установка поднимается из скважины, а газосепаратор подвергается дефектации и ремонту.

Конструкция газосепаратора, соответствующая предложенному техническому решению, приведена на рис. 2.

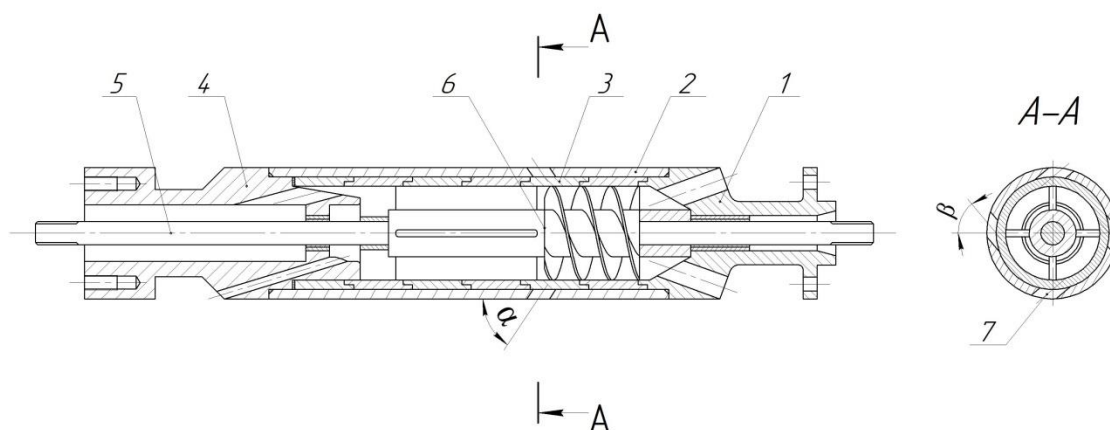


Рис. 2 – Газосепаратор УЭЦН с модернизированным корпусом

Представленный газосепаратор состоит из входного модуля 1, корпуса 2 с защитной гильзой 3, выходного модуля 4 и ротора, представляющего собой вал 5 с расположенными на нем рабочими органами 6. В корпусе 2, в выявленной зоне интенсивного гидроабразивного износа выполнены отверстия 7, оси которых могут быть расположены под углами α и β так, чтобы отверстия были сонаправлены с потоком перекачиваемой среды. Помимо этого, гильза 3 может быть выполнена составной. Те сегменты, которые находятся напротив отверстий и наиболее подвержены гидроабразивному износу, могут быть выполнены из более износостойкого материала, чем остальные сегменты защитной гильзы, что позволяет существенно увеличить период наработки на отказ без существенного удорожания газосепаратора. Выполнение защитной гильзы из отдельных сегментов упрощает ее производство и обеспечивает ремонтпригодность, что снижает издержки при эксплуатации газосепараторов.

Предложенное техническое решение применимо практически для всех конструкций газосепараторов УЭЦН с защитными гильзами внутри корпусов. Внедрение описанного технического решения в практику нефтяного машиностроения не потребует значительных затрат и перестройки технологического процесса.

Список источников

1. Мусинский А.Н. Разработка и исследование вихревых газосепараторов для высокодебитных скважин: дис. ... канд. техн. наук – 168 с.
2. Перельман, М.О. Особенности многофазных течений в газосепараторах, определяющие их гидроабразивную стойкость / М.О. Перельман, М.П. Пещеренко, С.Н. Пещеренко // Бурение и нефть. – 2013. – №5. С. 42 – 44.
3. Повышение наработки скважинных насосных установок в условиях добычи нефти с высоким содержанием механических примесей / Д. И. Шишлянников, Ю. Г. Коротков, Д. Н. Лебедев, А. А. Иванченко, С. А. Фролов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. № 5 (353). – С. 29–35.
4. Лыкова, Н.А. Оборудование для работы УЭЦН в условиях интенсивного выноса механических примесей/ Н.А. Лыкова // Инженерная практика. – 2017. – № 3. – С. 58–62.

УДК 622.276.53

СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СРОКА СЛУЖБЫ БУРОВЫХ СТАНКОВ СБШ-250 В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

М.Б. Хамидов¹, аспирант,
¹НИТУ МИСИС, Москва, Россия

В настоящее время на 2 больших карьерах Республики Узбекистан эксплуатируются более 50 буровых станков СБШ-250, некоторые из которых имеют срок эксплуатации более 14-16 лет. Определение рациональности эксплуатации таких буровых станков является задачей, которую нужно решить и решение которого поможет спланировать производству будущие капитальные вложения на буровые станки.

Ключевые слова: Буровой станок, СБШ-250, рациональный срок эксплуатации, Республика Узбекистан, срок эксплуатации, группа станков, наработка, прогнозирование.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING AND FORECASTING THE RATIONAL SERVICE LIFE OF SBSH-250 DRILLING RIGS IN THE CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

M.B. Khamidov

Currently, more than 50 SBSH-250 drilling rigs are in operation at 2 large open-pit mines in the Republic of Uzbekistan, some of which have been in service for over 14-16 years. Determining the rationality of further operation of such drilling rigs is a task that needs to be solved, and its solution will help production plan future capital investments for drilling rigs.

Keywords: Drilling rig, SBSH-250, rational service life, Republic of Uzbekistan, service life.

Бурение буровзрывных скважин составляет около 30 % всех затрат на приходящих на добычу 1 тонны полезного ископаемого. В двух самых больших карьерах Республики Узбекистан эксплуатируются более 50 буровых станков СБШ-250. Эффективность бурения взрывных скважин определяется параметрами используемого оборудования [1, 2]. Большая часть эксплуатируемых станков имеют продолжительный срок эксплуатации. Их своевременная замена является важной проблемой [3].

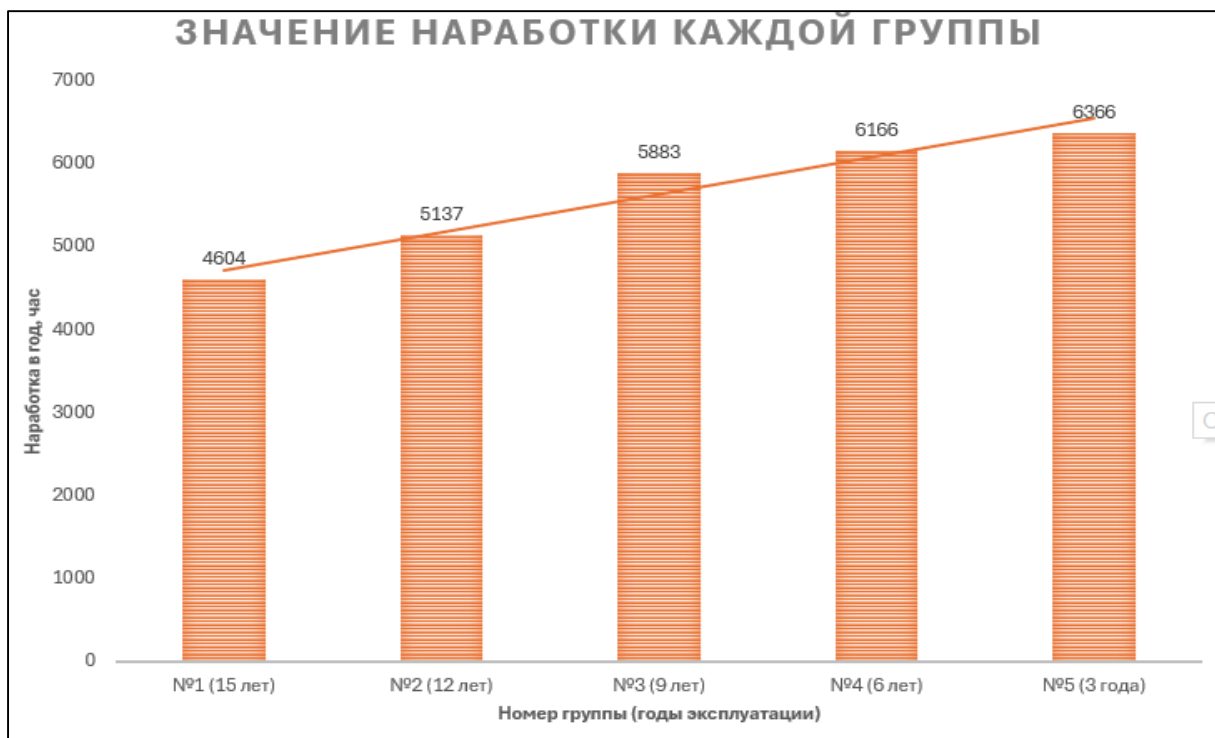
Для создания методики прогнозирования было сделано следующее:

1. Сбор статистических данных о времени эксплуатации и простоев работы буровых станков за определенный период времени. В нашем случае наблюдаемый период времени – 1 год, количество наблюдаемых буровых станков 21 шт., сроки эксплуатации буровых станков от новых до 16 лет.

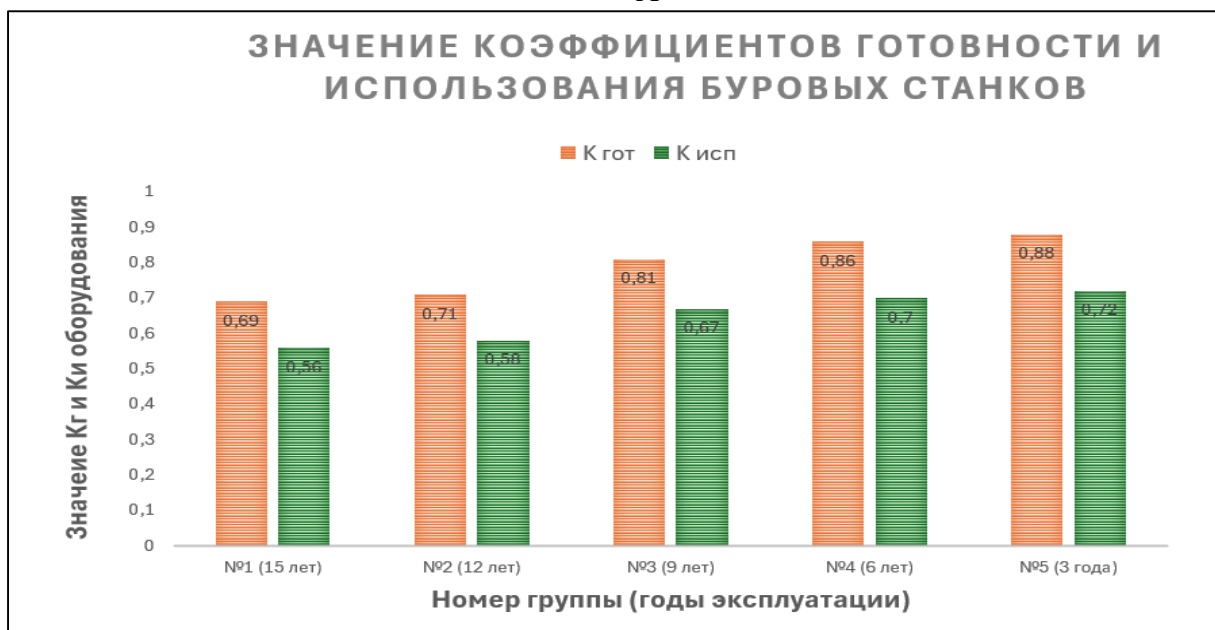
2. Группировка буровых станков по определенному принципу. В нашем случае по срокам их введения в эксплуатации с периодом 3 года и полученные результаты приведены на рисунке 1.

3. Определение количественного описания влияния срока службы от наработки буровых станков. После обработки данных получили следующую функцию:

$$f(x) = -0,86x^3 + 34,7x^2 - 500,6x + 7500.$$



А



Б

Рисунок 1. Рабочие диаграммы:

*А - Среднее значение наработки за наблюдаемый период 1 год каждой из групп;
Б – среднее значение коэффициентов готовности и использования оборудования.*

Полученная зависимость позволяет прогнозировать снижение наработки при дальнейшем увеличении срока эксплуатации станков.



Рисунок 2. График прогнозируемой наработки по годам, по полученной функции.

Пример. Прогнозируемый год (x) – 15-й год; продолжительность смены – 11,5 часов; количество смен – 2; количество рабочих дней в году – 325;

Решение: $f(x) = -0,86x^3 + 34,7x^2 - 500,6x + 7500$

$f(15) = -0,86 * 15^3 + 34,7 * 15^2 - 500,6 * 15 + 7500 \approx 4800$

Ответ: к 15 году буровой станок, эксплуатируемый в тех условиях, в которых эксплуатировались его предшественники, будет набирать примерно 4800 часов в год.

Предложенную зависимость можно использовать при прогнозе производительности буровых станков типа СБШ в условиях АГМК и НГМК.

Список литературы

1. Toshov Zh.B., Rahutin M.G., Toshov B.R., Baratov B.N. Tracking prevention in roller cone bit drilling // Eurasian Mining. 2024. № 1. С. 62–66.
<https://www.rudmet.ru/journal/2325/article/38305/?ysclid=m5fpgmkbj9233135009>
2. Хамидов М.Б. Влияние сроков эксплуатации на производительность буровых станков СБШ-250МНА-32 в условиях Республики Узбекистан // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – № 33. – С. 95-100.
3. Коллегаев Р.Н. Определение оптимальной долговечности технических систем. «Советское Радио», Москва 1967.

УДК 629.11

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОВЫХ ПЕРЕДВИЖНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С.А. Хорошавин^{1,2}, доцент, Д.Ф. Гайсин¹, магистрант

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Рассмотрена проблема комплексной оценки эффективности паровых передвижных установок, представляющих собой гибрид теплоэнергетического оборудования и оборудования для обслуживания нефтяных месторождений. Предложена классификация видов эффективности и проведен анализ методов её оценки. Уделено внимание адаптации нормативных методик по энергосбережению в промышленности к задачам оценки мобильных паровых установок. Результаты работы формируют методологическую основу для разработки практических инструментов технико-экономического обоснования применения, модернизации и эксплуатации паровых передвижных установок на нефтедобывающих предприятиях.

Ключевые слова: паровая установка, депарафинизация, эффективность, энергосбережение, технико-экономический анализ, показатели, методика оценки.

SYSTEM APPROACH TO ASSESSING THE EFFICIENCY OF STEAM MOBILE UNITS FOR OIL FIELDS SERVICE

S.A. Khoroshavin, D.F. Gysin

The problem of a comprehensive assessment of the efficiency of steam mobile units, which are hybrid thermal power equipment and equipment for servicing oil fields, is considered. It proposes a classification of efficiency types and analyzes methods for their evaluation. Special attention is given to adapting industrial energy-saving regulatory methodologies to the tasks of assessing mobile steam installations. The results of the study form a methodological foundation for developing practical tools for technical-economic justification of the application, modernization, and operation of mobile steam units at oil production enterprises.

Keywords: steam unit, dewaxing, efficiency, energy saving, technical-economic analysis, indicators, evaluation methodology.

Паровые передвижные депарафинизационные установки, такие как ППУА-1600/100 (рис. 1), представляют собой котельные агрегаты высокого давления на автомобильном шасси, и являются ключевым оборудованием для обеспечения технологических процессов удаления парафиновых отложений в скважинах, резервуарах, трубопроводах и разморозки коммуникаций [1]. Их эксплуатация сопряжена со значительными затратами топливно-энергетических ресурсов, а результаты работы напрямую влияют на производительность фонда скважин.

Целью работы является систематизация существующих подходов к оценке эффективности оборудования для обслуживания нефтяных месторождений и теплоэнергетической техники для формирования комплексной методики применительно к паровым передвижным установкам.

Актуальность исследования обусловлена постоянным ростом операционных затрат на сервисное обслуживание скважин, что требует поиска

оптимальных технологических решений и действующим курсом на энергосбережение и повышение экологической безопасности в промышленности. Эти тренды обуславливают необходимость перехода от традиционных «ресурсных» критериев оценки техники (например, наработка на отказ) к комплексным технико-экономическим и энерго-экологическим показателям, учитывающим полный жизненный цикл оборудования [2].



Рис. 1. Установка паровая передвижная СИН53.02 (ППУА-1600/100)

Для всесторонней оценки таких гибридных систем, как ППУА, предлагается использовать систему взаимосвязанных показателей, объединенных в несколько групп:

1) техническая эффективность – производительность, рабочий диапазон давлений и температур; коэффициент технической готовности, наработка на отказ, ремонтпригодность и сохраняемость в полевых условиях;

2) энергетическая и топливная эффективность – расход топлива на единицу полезного эффекта (кг на м² удаленных загрязнений, кг на обслуженную скважину); КПД тепловой схемы установки, потери энергии в паропроводах, показатели, определяемые по методикам энергетических обследований [6];

3) экономическая эффективность – сокращение прямых расходов на ремонт скважин, минимизация простоев фонда, оптимизация расхода ГСМ и ТЭР [5]; чистый дисконтированный доход, срок окупаемости модернизации, внутренняя норма доходности при внедрении новых установок или технологий сервиса.

Качественная и сервисная эффективность: доля успешно выполненных операций, затраты на качество, оцениваемые по моделям РАФ (Prevention-Appraisal-Failure) или стоимостным моделям процесса [2]; уровень соответствия эксплуатации установки промышленным и экологическим нормативам.

В практике оценки эффективности ППУА можно выделить три взаимодополняющих блока методов.

Расчетно-аналитические методы включают расчет энергетических и материальных балансов, моделирование рабочих режимов установки [3].

На этом этапе оценивается потенциал энергосбережения от возможных мероприятий: замена горелочного устройства, улучшение теплоизоляции, внедрение систем автоматического регулирования и т.п.

Опытнo-экспериментальные и приборные методы основаны на натуральных испытаниях в реальных условиях эксплуатации. К ним относятся: замеры рабочих параметров (давление, температура пара, расход топлива, время операции) непосредственно на скважине; диагностические испытания и неразрушающий контроль критических узлов (котел, трубопроводы, арматура) для оценки влияния их технического состояния на общую эффективность.

Статистические и экономические модели предполагают анализ больших массивов эксплуатационных данных: анализ статистики отказов, простоев и расхода ТЭР в разрезе сервисных подразделений или месторождений [5]; применение моделей оценки затрат на качество (например, RAF-модель) для анализа экономических потерь от неэффективного сервисного обслуживания нефтепромыслового оборудования [2].

Конкретизация подходов рассмотрена на примере типовой паровой передвижной установки на шасси КамАЗ-43118 [1]. Оценка должна проводиться на двух уровнях:

Уровень 1 – эффективность установки как оборудования:

- технические показатели: производительность 1600 кг/ч пара (до 300°C), мобильность, автономность, наличие систем автоматики безопасности;
- энергетические показатели: удельный расход дизельного топлива и воды на час работы; оценка потерь в паропроводе и через теплоизоляцию кузова.

Уровень 2 – эффективность сервиса скважины как процесса:

- экономические показатели: сокращение времени простоя скважины по сравнению с альтернативными методами (химическими, механическими);
- сервисные показатели: влияние таких факторов, как квалификация экипажа и скорость перебазирования, на общую результативность технологической операции.

Для корректной оценки энергетической составляющей ППУА необходимо адаптировать нормативные методики, разработанные для стационарного топливно-энергетического оборудования (ТЭО) [3, 6]. Экономия ТЭР, полученную за счет модернизации парогенератора, следует пересчитывать в операционные единицы: количество дополнительно обслуженных скважин, сокращенные часы простоя добывающего фонда. Удельные показатели энергоэффективности должны быть увязаны с конечной себестоимостью ремонта и обслуживания скважины. Такой синтез подходов позволяет оценить не только энергетическую, но и итоговую экономическую эффективность применения мобильных паровых установок.

Проведенный анализ показал, что оценка эффективности паровых передвижных установок для обслуживания нефтяных месторождений требует комплексного подхода, синтезирующего методы из смежных областей.

Предложенная классификация показателей и многоуровневая система оценки (оборудование – технологический процесс) создают основу для разработки детальной методики. Практическое внедрение такой методики, опирающейся на нормативные документы по энергосбережению [3, 6] и современные модели менеджмента качества [2], позволит обоснованно выбирать типы и режимы работы ППУА; точно рассчитывать себестоимость сервисных операций; выявлять потенциал для модернизации оборудования и оптимизации технологических процессов; принимать эффективные инвестиционные решения, направленные на сокращение общих затрат на поддержание фонда скважин.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на формализацию предложенной системы показателей, создание соответствующих расчетных алгоритмов и программных инструментов для их автоматизированного применения в условиях конкретных месторождений.

Список литературы

1. Паспорт изделия ППУА-1600/100 (Син53.02). Официальный сайт производителя ООО «Синергия» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sinergia.ru/product/ppua-1600-100-sin53-02> (дата обращения: 12.10.2023).
2. Одинец Т. А., Замиралова Е. В. Применение моделей оценки затрат на качество в организации сервисного обслуживания нефтепромыслового оборудования // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2018. № 8. С. 201–207.
3. Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 29 июля 2019 года N 468 «Об утверждении Методических рекомендаций по оценке эффективности реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в промышленности».
4. Методические рекомендации и типовые программы энергетических обследований систем коммунального энергоснабжения. Госстрой России.
5. Дубинина Н. А., Винярский Д. В. Анализ и оценка эффективности использования основных средств на предприятии // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2019.
6. Методические рекомендации по проведению энергетических обследований (для систем коммунального энергоснабжения). Госстрой России.

ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Чтоб трагичное мгновенье
Горняков бежало прочь,
Кто-то должен, без сомненья,
Рассчитать весь риск точь-в-точь.
Чтоб работало творенье
Для народа и страны,
Непременно к примененью
Инновации нужны!*

Доц. П.А. Жиганов

УДК 622.281.4:519.67

К РАСЧЕТУ АРОЧНОЙ КРЕПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЕКТА

К. Бейсембаев, проф., д.т.н., **В. Гаузер**, студент, **В. Куклич**, студент
Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда,
Казахстан

Представлен расчет взаимодействия арочной крепи с боковыми породами. Приведены элементы блока команд программы участкового построения арки. Решение задачи позволяет определить нагрузки на секцию арки. Рассмотрен принцип использования ИИ для формирования и обработки деформационных таблиц в реальных условиях нагружения, позволяющих сравнивать данные, полученные расчетным путем с табулированными данными шахтных замеров деформаций арок в типичных или аномальных условиях для получения основных расчетных моделей.

Ключевые слова: арочная крепь, порода, Ansys, ИИ, цикл, профиль арки, секция, боковое давление, деформация

CALCULATION OF ARCH SUPPORT USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

K. Beysembaev, V. Gauzer, V. Kuklich

This article presents a calculation of a parametric problem for the interaction of arch support with wall rock. Elements of a program block for sectional arch construction are presented. Solving this problem allows one to determine the loads on an arch section. The principle of using AI to generate and process deformation tables under real-world loading conditions is discussed. This allows one to compare calculated data with tabulated data from mine arch deformation measurements under typical or anomalous conditions to derive key calculation models.

Keywords: arch support, rock, Ansys, AI, cycle, arch profile, section, lateral pressure, deformation

В Модели создаются блоки пород и вводятся их свойства, полость выработки и рамы арочной крепи. Программирование ведется в языке Ansys – APDL. Это текстовый язык, имеющий мощную визуальную поддержку и простые переходы в программировании с кодового на визуальное (с использованием меню) при возможности разработки программы с ИИ GPT, при указании: основных параметров задачи, особенностей методики решения. И особенно в случае, когда имеется программа решения близкой задачи и можно указать ИИ преимущественный набор операторов и их опции. При этом часть программы легко перевести на другой высокоуровневый язык для её надежной верификации и более эффективного выполнения, включая использование подключаемых exe модулей. Используются команды для объектов типа, block, cylind, процессные, двоичные типа vsbv. Вместо создания циклов для повторяющихся операций часто используется визуальное меню типа Copy, Move, код которых затем легко вынимается из log файла. Текст программы, за счет GPT, можно существенно сократить и совокупность команд выбора и выделения элементов расчетной схемы заменяется одной строкой кода. Оптимизация программы показала, что лучшим способом создания модели является её участковое построение по секторам, ограничиваемых углами u1 и u2. Сектора можно задавать оператором

рами циклов, но поскольку обычно используются до 4 – 6 секторов их можно строить копированием с соответствующим изменением некоторых операторов команды (обычно номера вычитаемых объемов). Площади секторов используются для ввода граничных условий и создания на них нагрузок со стороны кровли или опорных элементов вводимых в выработку при аварийных ситуациях. Укажем, что контакт профиля арки с породами неравномерен и случаен. Вероятность контактов выше в верхней части и снижается к нижней части контура. Расчетная схема включает упор ножек арки в почву пласта, контакт с кровлей верхнего и одного из боковых секторов арки. Решение задачи позволяет определить нагрузки на секцию арки. Она погружена основаниями в почву пласта (склеена с ней) а контакт с кровлей происходит в 2 - 3 случайно расположенных зонах. Причем, чаще всего, вертикальное давление превосходит боковое. Исходя из среднего давления, найденного в задаче взаимодействия арок и пород (мета моделирование) вертикальное можно принять в пределах, 1.2 - 1.4 от среднего, учитывая, что теперь всю нагрузку пород будет воспринимать не большой по площади участок. Давление на боковой участок тем меньше, чем ниже он расположен и составляет от среднего 0.8 – 0.6. В результате решения определяется деформационный профиль арки и сравнивается с тем, что получен в реальных условиях. Применение ИИ позволяет задание деформационных таблиц, для различных условий нагружения, которые сравниваются с табулированными данными шахтных замеров арок, деформированных в типичных или наоборот аномальных условиях, что позволяет создать основные расчетные модели. Заметим, что решение легко проводить и исходя из упруго пластического подхода по методике [1]. Но учитывая нестабильность пластического течения пород, предпочтительным является упругий подход при корректировке данных на основе шахтных замеров. Задание переменных, используемых в программе следует выполнить так, чтобы было легко управлять расположением контактных площадок и легко менять параметры для различных выработок. Ниже фрагмент программы частного случая нагружения отдельной секции арки, нагрузками, определенными на основе мета моделирования группы секций с породами пластовой выработки:

```
/prep7
```

```
/units,si
```

```
ET,1,SOLID92
```

```
...
```

```
! МАТЕРИАЛ порода
```

```
MPDATA,EX,1,,2e9
```

```
MPDATA,PRXY,1,,0.35
```

```
MPDATA,DENS,1,,3000
```

```
Block,-12,12,5,200,0,20!x1,x2,y1,y2,z1,z2 ! блок породы,
```

```
Block,-12,12,0,5,0,20!x1,x2,y1,y2,z1,z2 ! блок породы, Жаныс блогі
```

```
Block,-12,12,-20,0,0,20!x1,x2,y1,y2,z1,z2 Vglue,all
```

```
! Исходные данные по размерам арки
```

```
! Средняя часть арки
```

```
r1 = 1.5
```

```
r2 = 1.35
```

```

z1= - 0.1
z2=  0.1
Block,-2.5,2.5,-r1,0,-1, 1! блок !породы основания
!участок арки от 0-40 гр.
u1=0
u2=40
r3=1.37
z3=  0.09
z4= - 0.09
! Буртики арки
r4 = 1.48
z5 = 0.13
! Углы для участковых нагрузок
Cylind,r1,r2,z1,z2,u1,u2  Cylind,r1,r3,z3,-z3,u1,u2
Vsbv,2,3
! Буртики арки
Cylind,r1,r4,z2,z5,u1,u2
Cylind,r1,r4,-z2,-z5,u1,u2
Vglue,all
    
```

На рисунках 1, 2 показаны картины напряжений и деформаций арок

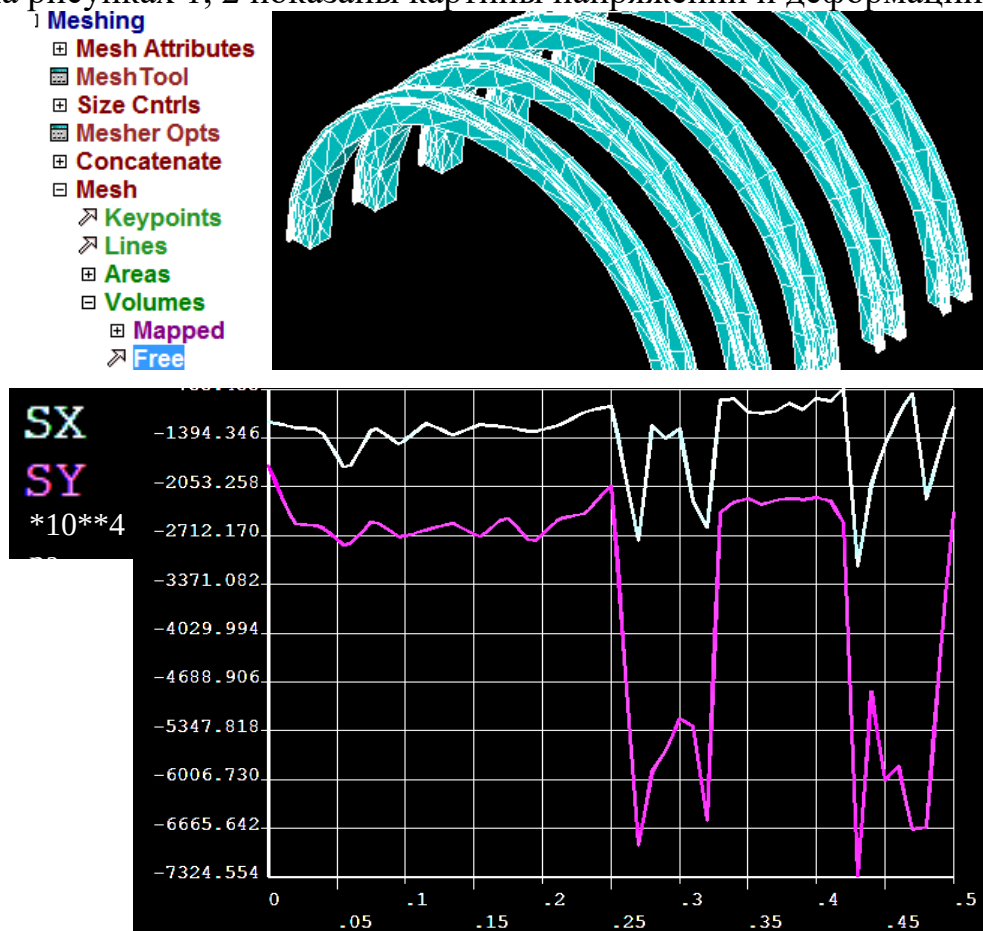


Рис. 1 Построение сетки на арках и напряжения по линии вдоль почвы в зоне расположения буртиков арки

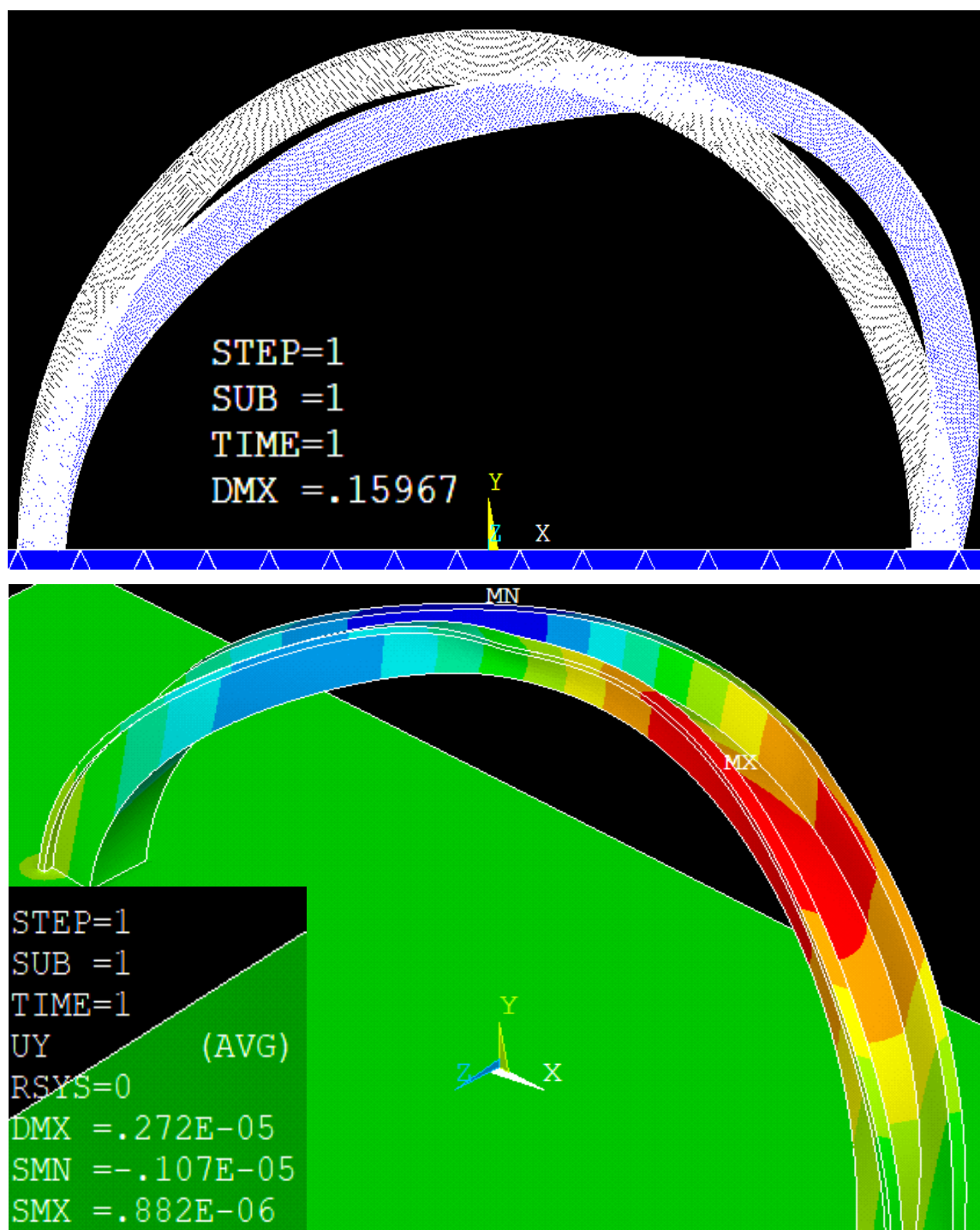


Рис. 2 Картина распределения напряжений и деформации арочной крепи
взаимодействии с боковой породой

Список литературы:

1. Автопроектирование горных машин в 3D: проектно - модельный подход / К.М. Бейсембаев, Г.С. Жолдыбаева, В.Ф.Демин [и др.]. – Москва: Издательский дом «Академия Естествознания», 2020. – 137 с. <https://www.monographies.ru/en/book/view?id=832>

УДК 621.926.5

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ENAS DEM

С.В. Брякунов^{1,2}, ст. преподаватель, А.С. Бормотов¹².

¹ООО «Системы инженерного анализа», г. Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

Выполнена кросс-верификация счетного модуля ENAS DEM на задаче моделирования работы шаровой мельницы. В качестве эталонного решения использован коммерческий пакет ANSYS Rocky, прошедший экспериментальную валидацию и признанный отраслевым стандартом. Сопоставление проведено при идентичных начальных и граничных условиях с применением модели контактного взаимодействия Герца-Миндлина. Показано, что прогнозы ENAS DEM демонстрируют высокую степень согласованности с результатами ANSYS Rocky: расхождение по максимальной скорости частиц составило менее 1 %, по максимальной силе соударения и максимальной кинетической энергии — в пределах 10 %. Установлено качественное совпадение временной динамики контролируемых параметров, включая моменты пиковых нагрузок и характер колебаний. Вычислительная эффективность счетных модулей оказалась сопоставимой (разница во времени счёта не превысила 5 %). Полученные результаты подтверждают эффективность счетного модуля программного комплекса ENAS DEM для моделирования динамики сыпучих сред.

VERIFICATION OF CONTACT INTERACTION MODELS OF PARTICLES IN SIMULATING BALL MILL OPERATION USING THE ENAS DEM

S.V. Briakunov, A.S. Bormotov

A cross-verification of the discrete element method (DEM) solver ENAS DEM was performed using a ball mill simulation problem. The commercial package ANSYS Rocky, which has been experimentally validated and is recognized as an industry standard, was used as a reference solution. The comparison was carried out under identical initial and boundary conditions using the Hertz-Mindlin contact model. The predictions of ENAS DEM show a high degree of consistency with the results of ANSYS Rocky: the discrepancy in the maximum particle velocity was less than 1%, and in the maximum collision force and maximum kinetic energy — within 10%. Qualitative agreement in the temporal dynamics of the monitored parameters, including the moments of peak loads and the nature of oscillations, was established. The computational efficiency of the solvers was comparable (the difference in computation time did not exceed 5%). The obtained results confirm the suitability of the ENAS DEM software package for simulations of bulk media dynamics in mining and mineral processing equipment.

Keywords: discrete element method (DEM), ball mill, verification, Hertz-Mindlin model, ENAS DEM, ANSYS Rocky, granular media, comminution, contact interaction, particle dynamics.

Обоснование применимости дискретно-элементного моделирования. Опыт применения дискретно-элементного моделирования для исследования процессов измельчения в барабанных мельницах насчитывает более двух десятилетий, за которые DEM превратился из академического инструмента в признанный промышленный стандарт, обязательный при проектировании и оптимизации горно-обогатительного оборудования [1, 2]. Фундаментальная причина такого положения заключается в принципиаль-

ной недоступности внутреннего пространства работающей мельницы для прямых инструментальных измерений: агрессивная среда с высокой концентрацией абразивных частиц, ударными нагрузками и наличием пульпы исключает размещение датчиков в зоне активного измельчения, а остановка или вскрытие мельницы мгновенно разрушают исследуемую динамическую картину [3]. Как отмечается в работе Макгиллского университета, «суровые внутренние условия мельниц десятилетиями препятствовали доступу к внутримельничной динамике, что вынудило исследователей разрабатывать модели на основе DEM для прогнозирования происходящих процессов» [4].

Именно эта невозможность получить эмпирические данные иначе, чем косвенными методами, сделала DEM не просто удобным, а единственно приемлемым способом изучения процессов внутри работающего агрегата [5]. Согласно обзору китайских исследователей (2023), «промышленный эксперимент для изучения процесса измельчения является дорогостоящим и крайне сложным, тогда как методы моделирования позволяют визуально анализировать особенности движения рудного материала, что удобно для раскрытия и освоения закономерностей процесса измельчения» [6]. Таким образом, приемлемость DEM обоснована не столько экономической эффективностью, сколько эпистемологической необходимостью: современная наука не располагает иными средствами получения требуемой информации о внутрикамерной динамике [7, 8]. В этой связи критически важным этапом внедрения любого DEM-решателя является его кросс-верификация – количественное сопоставление прогнозируемых параметров с результатами, полученными в программных комплексах, ранее прошедших валидацию на экспериментальных данных.

Постановка задачи и методика моделирования.

Объектом моделирования выбрана горизонтальная шаровая мельница барабанного типа – классическая задача горнорудной отрасли, в которой динамика соударений частиц непосредственно определяет интенсивность износа футеровки.

Геометрическая модель представляет собой цилиндрический барабан с торцевыми стенками, вращающийся вокруг горизонтальной оси с постоянной угловой скоростью (рис. 1). Частота вращения барабана принята равной 10 об/мин, что соответствует типичному режиму каскадного движения мелющих тел, характерному для промышленных мельниц тонкого измельчения [9]. Длительность моделирования составляет 5 секунд, что обеспечивает выход системы на установившийся режим перекатывания частиц и достаточную статистику для анализа контактных взаимодействий.

В расчетной области присутствуют три типа объектов, различающихся физико-механическими свойствами и функциональным назначением. Границы, включающие корпус и торцевые стенки мельницы, выполнены из материала «Сталь» (рис. 2) и моделируют жесткие неподвижные поверхности, ограничивающие область движения частиц. Мелющие тела представляют собой стальные шары, выступающие в роли измельчающей среды и обеспечивающие ударно-истирающее воздействие на руду. Из-

мельчаемый материал представлен частицами руды, которые являются объектом разрушения и подлежат энергетическому воздействию со стороны мелющих тел и футеровки (рис. 3). Таким образом, вся совокупность взаимодействий в системе сводится к трем базовым парам контакта: «сталь-сталь» (шар-шар, шар-граница), «руда-руда» и «руда-сталь» (руда-шар, руда-граница).

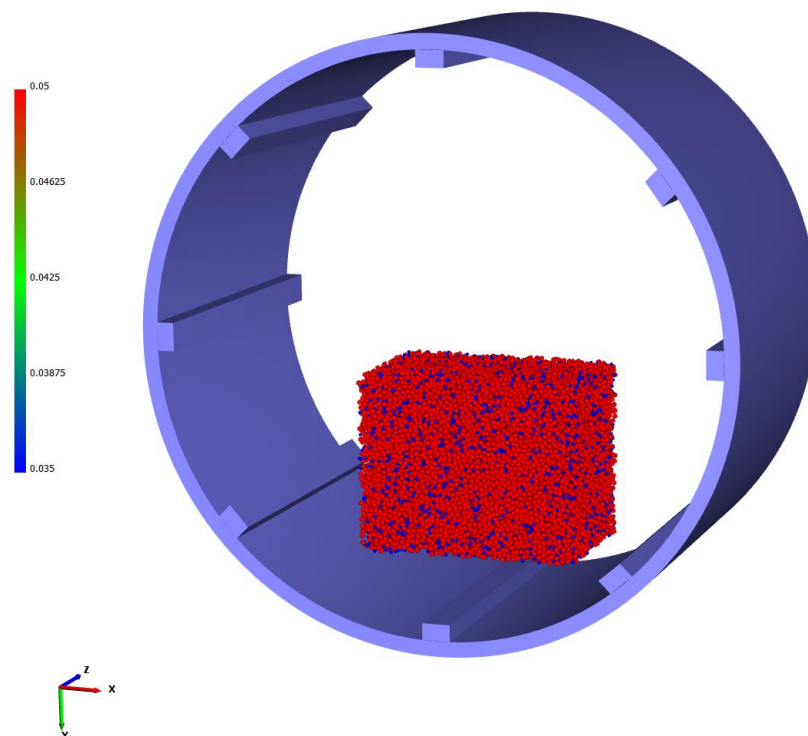


Рис. 1. Размеры частиц руды и шаров, м

Имя	Единицы	Значение
Плотность	кг/м³	7750
Теплоёмкость	Дж/(кг·К)	490
Динамическая вязкость	Па·с	1e+40
Теплопроводность	Вт/(м·К)	16
Модуль Юнга	Па	2e+11
Нормальная прочность	Па	4e+09
Тангенциальная прочность	Па	4e+09
Коэффициент Пуассона	-	0.3
Поверхностная энергия	Дж/м²	1
Атомарный объем	м³/моль	2e-05
Поверхностное натяжение	Н/м	0.7
Зависящий от времени коэф. темп. расщ.	1/(К·с)	1.7e-05
Прочность на разрыв	Па	2e+10

Рис. 2. Свойства стали (границы, шары)

Имя	Единицы	Значение
Плотность	кг/м³	2500
Теплоёмкость	Дж/(кг·К)	840
Динамическая вязкость	Па·с	1e+40
Теплопроводность	Вт/(м·К)	0.9
Модуль Юнга	Па	5e+10
Нормальная прочность	Па	5e+07
Тангенциальная прочность	Па	5e+07
Коэффициент Пуассона	-	0.22
Поверхностная энергия	Дж/м²	1
Атомарный объем	м³/моль	2e-05
Поверхностное натяжение	Н/м	0.7
Зависящий от времени коэф. темп. расщ.	1/(К·с)	1.7e-05
Прочность на разрыв	Па	2e+10

Рис. 3. Свойства руды (частицы)

Для описания контактного взаимодействия во всех без исключения парах «частица-частица» и «частица-граница» используется модель Герца-Миндлина, реализующая упругий контакт с учетом трения скольжения и качения [10, 11]. Это модель упругой сферы, которая используется для расчёта контакта между частицами или частицами и границами. В обоих случаях расчёты схожи, однако при расчёте контакта между частицами и стенкой радиус и масса частицы считаются эквивалентными радиусу R^* и массе M^* [12].

Относительная скорость контакта.

Относительная скорость в точке контакта определяется с учётом поступательных и вращательных движений частиц:

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 + \vec{\omega}_1 \cdot \vec{r}_{c1} - \vec{\omega}_2 \cdot \vec{r}_{c2},$$

где $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ – векторы скоростей центров частиц, $\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2$ – векторы угловых скоростей, $\vec{r}_{c1}, \vec{r}_{c2}$ – векторы от центра частицы до точки контакта.

Нормальная и тангенциальная составляющие относительной скорости:

$$\vec{v}_{rel,n} = \vec{r}_n(\vec{r}_n \cdot \vec{v}_{rel}), \quad \vec{v}_{rel,t} = \vec{v}_{rel} - \vec{v}_{rel,n}.$$

где $\vec{r}_n$ – единичный вектор нормали в точке контакта, направленный от частицы 1 к частице 2.

Эквивалентные параметры контакта.

Эквивалентный радиус и эквивалентная масса:

$$R^* = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}, \quad M^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2},$$

где r_1, r_2 – радиусы частиц, m_1, m_2 – массы частиц.

Эквивалентный модуль Юнга и эквивалентный модуль сдвига:

$$E^* = \sqrt{\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}}, \quad G^* = \sqrt{\frac{2(2 - \nu_1)(1 + \nu_1)}{E_1} + \frac{2(2 - \nu_2)(1 + \nu_2)}{E_2}},$$

где E_1, E_2 – модули Юнга частиц, ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона частиц.

Коэффициент демпфирования, связанный с коэффициентом восстановления e :

$$\alpha = \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}}.$$

Нормальная сила.

Нормальное перекрытие частиц:

$$\xi_n = r_1 + r_2 - |\vec{O}_2 - \vec{O}_1|,$$

где $\vec{O}_1, \vec{O}_2$ – векторы положения центров частиц.

Нормальная жёсткость:

$$k_n = 2E^* \cdot \sqrt{\xi_n \cdot R^*}.$$

Нормальная сила складывается из упругой составляющей (по Герцу) и диссипативной составляющей:

$$\vec{F}_n = -\vec{r}_n \cdot \left(\frac{2}{3} \xi_n \cdot k_n \right) - \vec{r}_n (1,8257 \alpha |\vec{v}_{rel,n} \cdot \vec{r}_n| \cdot \sqrt{k_n M^*}) \cdot \text{sgn}(\vec{v}_{rel,n} \cdot \vec{r}_n),$$

где sgn – функция знака, 1,8257 – эмпирический коэффициент модели.

Тангенциальная сила (Миндлина).

Приращение тангенциального смещения за шаг интегрирования Δt :

$$\Delta \xi_n = \vec{v}_{rel,t} \cdot \Delta t,$$

Тангенциальная жёсткость:

$$k_t = 8G^* \sqrt{R^* \xi_n}.$$

Приращение тангенциальной силы:

$$\Delta \vec{F}_t = k_t \Delta \xi_t$$

Диссипативная составляющая в тангенциальном направлении:

$$\Delta \vec{F}_{t,damp} = -1,8257 \alpha \cdot |\vec{v}_{rel,t}| \cdot \sqrt{k_t \cdot M^*}.$$

Тангенциальная сила с предыдущего шага корректируется с учётом нормали:

$$\vec{F}_{t,pr}^{kor} = \vec{F}_{t,pr} - \vec{r}_n(\vec{r}_n \cdot \vec{F}_{t,pr}), \quad \vec{F}_{t,pr}^{kor} = \vec{F}_{t,pr}^{kor} \frac{|\vec{F}_{t,pr}|}{|\vec{F}_{t,pr}^{kor}|},$$

где $\vec{F}_{t,pr}$ – тангенциальная сила, вычисленная на предыдущем шаге.

Полная тангенциальная сила:

$$\vec{F}_t = \vec{F}_{t,pr}^{kor} + \Delta\vec{F}_t + \vec{F}_{t,damp}.$$

Проверка условия скольжения (закон Кулона):

$$|\vec{F}_t| > \mu_s |\vec{F}_n| \Rightarrow \vec{F}_t = \mu_s |\vec{F}_n| \cdot \frac{\vec{F}_t}{|\vec{F}_t|},$$

где μ_s – коэффициент трения скольжения.

Трение качения.

Момент трения качения, действующий на каждую частицу:

$$\dot{M}_{r0,i} = -\mu_r |\vec{F}_n| r_i \frac{\vec{\omega}_i}{|\vec{\omega}_i|}, \quad i = 1, 2,$$

где μ_r – коэффициент трения качения, r_i – радиус частицы, $\vec{\omega}_i$ – её угловая скорость.

Суммарные силы и моменты.

Суммарная сила, действующая на каждую частицу в контакте:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_n + \vec{F}_t, \quad \vec{F}_2 = -\vec{F}_n - \vec{F}_t.$$

Суммарные моменты сил, действующие на частицы:

$$\dot{\vec{M}}_{tot,1} = \vec{r}_n \times \vec{F}_t \cdot r_1 + \dot{M}_{r0,1}, \quad \dot{\vec{M}}_{tot,2} = -\vec{r}_n \times \vec{F}_t \cdot r_2 + \dot{M}_{r0,2}.$$

где $\times$ – обозначение векторного произведения.

Такая модель является стандартом для DEM-моделирования сыпучих сред в горнорудном оборудовании, поскольку обеспечивает приемлемый баланс между вычислительной эффективностью и точностью воспроизведения макроскопических параметров потока, таких как мощность привода, характер движения загрузки и распределение контактных усилий [13]. В рамках модели нормальная сила упругости определяется на основе теории Герца, а тангенциальная компонента с учетом микропроскальзывания – на основе решения Миндлина, что позволяет корректно описывать диссипацию энергии при соударениях и формирование силовых цепочек в объеме загрузки.

Параметры взаимодействия заданы дифференцированно в зависимости от природы соударяющихся материалов. Для пары «частица-граница» (руда-сталь, шар-сталь) коэффициент восстановления принят равным 0,8, трение скольжения – 0,6, трение качения – 0,05. Значение коэффициента восстановления соответствует умеренно упругому удару о стальную футеровку, а повышенное трение скольжения учитывает шероховатость контактирующих поверхностей [14, 15].

Для пары «частица-частица» параметры разделяются. При соударении стальных шаров, а также шара с рудой коэффициент восстановления составляет 0,9, что отражает высокую упругость стали. Для контакта двух

частиц руды коэффициент восстановления также принят равным 0,9, однако в данном случае это эффективная величина, учитывающая диссипацию энергии при микрорастрескивании в рамках упругой модели [16]. Коэффициент трения скольжения для всех межчастичных контактов установлен 0,45, трение качения унифицировано и составляет 0,05 для всех пар взаимодействия. Унификация трения качения является допущением, направленным на минимизацию варьируемых параметров при верификации решателей [17, 18].

Результаты моделирования.

Верификация дискретно-элементного решателя ENAS DEM выполнялась путем прямого сопоставления его прогнозов с результатами моделирования в ANSYS Rocky при идентичных начальных и граничных условиях (рис. 4). Ключевые контролируемые параметры включали максимальную скорость частиц, максимальную силу соударения и максимальную кинетическую энергию, а также характер временной эволюции указанных величин.

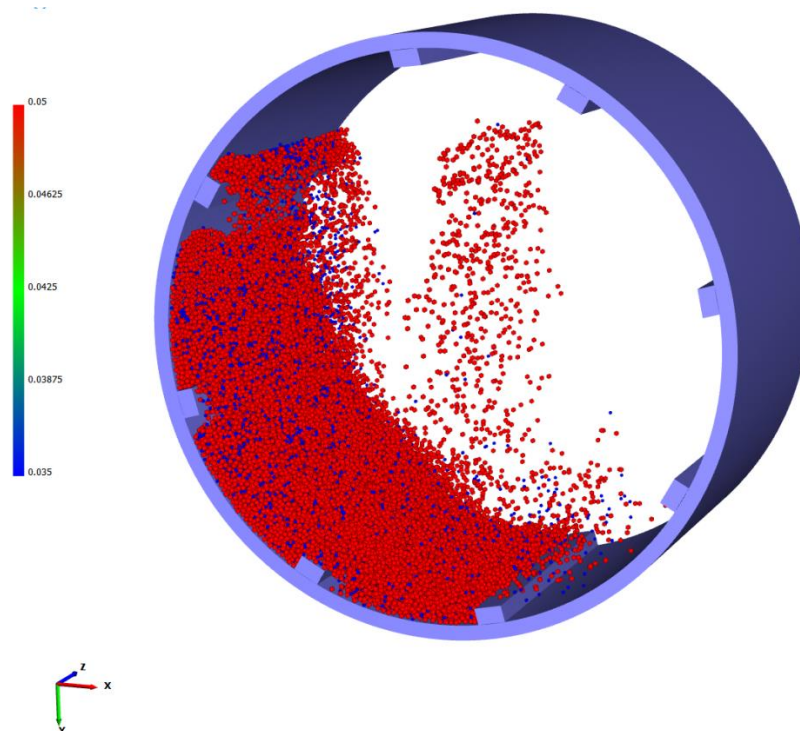


Рис. 4. Размеры частиц руды и шаров, м (5 сек)

По результатам расчетов максимальная абсолютная скорость частиц, зафиксированная в расчетной области, составила 9,34 м/с в ENAS DEM (рис. 5) и 9,41 м/с в ANSYS Rocky (рис. 6). Относительное расхождение не превышает 0,75%, что свидетельствует о практически идентичном прогнозе кинематики потока обоими решателями. Столь высокая сходимость достигнута благодаря строгой унификации геометрических параметров, свойств материалов и контактных моделей, а также идентичным условиям интегрирования уравнений движения.

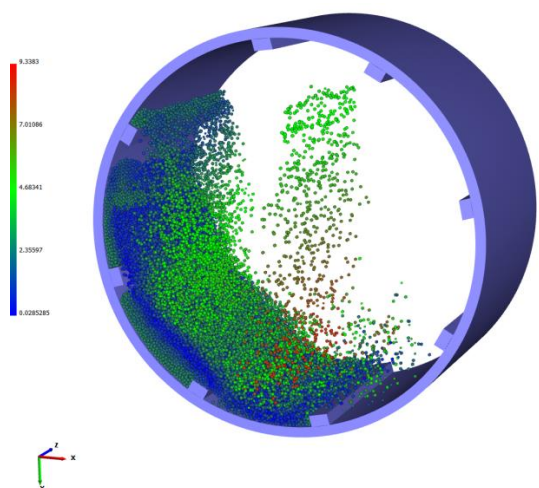


Рис. 5. ENAS EDEM. Абсолютная скорость частиц, м/с
(Затраченное время: 3 часа 35 мин)

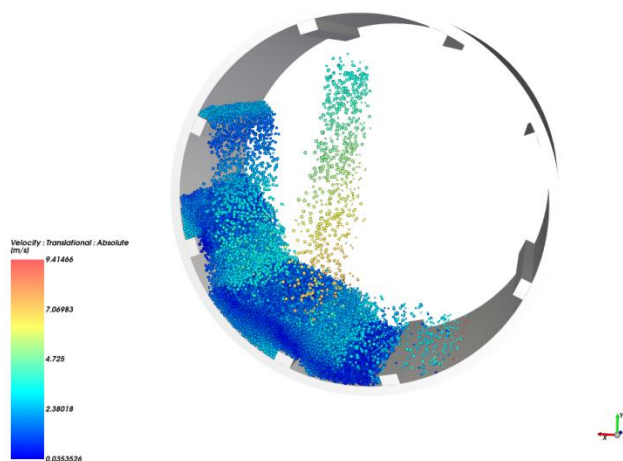


Рис. 6. ANSYS Rocky. Абсолютная скорость частиц, м/с
(Затраченное время: 3 часа 45 мин)

При сопоставлении результатов, полученных в ENAS DEM и ANSYS Rocky, по наиболее чувствительным к численной реализации контактных моделей параметрам – максимальной силе соударения (рис. 7) и максимальной кинетической энергии частиц (рис. 8) – наблюдается удовлетворительная сходимость. Значение максимальной силы соударения, зафиксированное в ENAS DEM, составило 0,82 Н, в ANSYS Rocky – 0,90 Н. Максимальная кинетическая энергия частиц, вычисленная как $E_k = \frac{mv^2}{2}$ для частицы с наибольшей скоростью, достигла $2,40 \cdot 10^{-5}$ Дж в ENAS DEM и $2,73 \cdot 10^{-5}$ Дж в ANSYS Rocky. Достигнутая степень согласованности результатов соответствует диапазону, характерному для кросс-верификации различных DEM-решателей, и подтверждает корректность реализованных в ENAS DEM контактных алгоритмов [19, 20].



Рис. 7. Изменение кинетической энергии во времени



Рис. 8. Изменение максимальной силы во времени

Принципиально важным результатом является качественное совпадение временных зависимостей контролируемых параметров. Кривые изменения кинетической энергии и контактных усилий, построенные для обоих расчетов, демонстрируют идентичный характер: моменты пиковых нагрузок совпадают, амплитуды колебаний близки по значениям, отсутствуют систематические расхождения или трендовые смещения. Это позволяет утверждать, что оба решателя корректно воспроизводят не только стационарные, но и переходные режимы динамики сыпучей среды.

Вывод. Выполнена кросс-верификация дискретно-элементного решателя ENAS DEM на задаче моделирования работы шаровой мельницы. В качестве референтного решения использовался коммерческий пакет ANSYS Rocky, прошедший многократную экспериментальную валидацию и являющийся признанным отраслевым стандартом.

По результатам сопоставительных расчетов установлено, что прогнозы ENAS DEM демонстрируют высокую степень согласованности с результатами ANSYS Rocky. Максимальная скорость частиц, являющаяся интегральной характеристикой кинематики потока, различается менее чем на 1%. Более чувствительные к численной реализации контактных моделей параметры — максимальная сила соударения и максимальная кинетическая энергия частиц — показывают сходимость в пределах 10%, что является удовлетворительным для задач кросс-верификации различных DEM-решателей. Критически важным результатом выступает качественное совпадение временной динамики контролируемых величин: моменты пиковых нагрузок и характер колебаний идентичны для обоих программных комплексов.

Дополнительно подтверждена сопоставимая вычислительная эффективность решателей: разница во времени счета при идентичных аппаратных ресурсах и параметрах дискретизации не превышает 5%.

Таким образом, результаты проведенного исследования свидетельствуют о принципиальной пригодности программного комплекса ENAS DEM для моделирования динамики сыпучих сред. Достигнутая степень сходимости с верифицированным решателем ANSYS Rocky позволяет рекомендовать ENAS DEM к применению в инженерной практике при решении задач оптимизации режимов измельчения и прогнозирования оценки интенсивности износа футеровки.

Список литературы

1. Mishra B.K., Rajamani R.K. The discrete element method for the simulation of ball mills // *Applied Mathematical Modelling*. 1992. Vol. 16, № 4. P. 171–178.
2. Weerasekara N.S., Powell M.S., Cleary P.W., Tavares L.M., Evertsson M., Morrison R.D., Quist J., Carvalho R.M. The contribution of DEM to the science of comminution // *Powder Technology*. 2013. Vol. 248. P. 3–24.
3. Powell M.S., Weerasekara N.S., Cole S., LaRoche R.D., Favier J. DEM modeling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills // *Minerals Engineering*. 2006. Vol. 19, № 6. P. 61–69.
4. Morrison R.D., Cleary P.W. Towards a virtual comminution machine // *Minerals Engineering*. 2008. Vol. 21, № 11. P. 770–781.
5. Govender I., Powell M.S. An empirical power model derived from 3D particle tracking experiments // *Minerals Engineering*. 2006. Vol. 19, № 10. P. 1005–1012.
6. Ронг В.Д., Цзя П.Ч., Ли Б.К., Сун Т., Чжоу Цз.В., Фэн Ю.Ц. Исследование прогресса в моделировании процесса измельчения в полусамоизмельчающихся мельницах // *Mining and Metallurgy*. 2023. Т. 32, № 6. С. 59–74.
7. Daraio D., Stitt E.H., Alexiadis A., Ingram A., Marigo M. Dynamics and Energetics for a Vertically Stirred Mill: Validation of a Discrete Element Method (DEM) Model Via Positron Emission Particle Tracking (PEPT) // 8th World Congress on Particle Technology. Orlando: AIChE, 2018.
8. Cleary P.W., Morrison R.D. Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill

using DEM // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24, № 3–4. P. 352–366..

9. Powell M.S., Weerasekara N.S., Cole S., LaRoche R.D., Favier J. DEM modeling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills // Minerals Engineering. 2006. Vol. 19, № 6. P. 61–69.

10. Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper // Journal für die reine und angewandte Mathematik. 1882. Vol. 92. P. 156–171.

11. Mindlin R.D., Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces // Journal of Applied Mechanics. 1953. Vol. 20, № 3. P. 327–344.

12. Mirele Horsth Paiva Teixeira, Vasyl Skorych, Rolf Janssen, Sergio Yesid Gómez González, Agenor De Noni Jr, João Batista Rodrigues Neto, Dachamir Hotza, Maksym Dosta, High heating rate sintering and microstructural evolution assessment using the discrete element method, Open Ceramics, Volume 8, 2021, 100182, ISSN 2666-5395

13. Weerasekara N.S., Powell M.S., Cleary P.W., Tavares L.M., Evertsson M., Morrison R.D., Quist J., Carvalho R.M. The contribution of DEM to the science of comminution // Powder Technology. 2013. Vol. 248. P. 3–24.

14. Chung Y.C., Ooi J.Y. A study of influence of gravity on bulk behaviour of particulate solid // Particuology. 2008. Vol. 6, № 6. P. 467–474.

15. Wensrich C.M., Katterfeld A. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM // Powder Technology. 2012. Vol. 217. P. 409–417.

16. Mishra B.K., Murty C.V.R. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulations of ball mills // Powder Technology. 2001. Vol. 115, № 3. P. 290–297.

17. Cleary P.W. Charge behaviour and power consumption in ball mills: sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition // International Journal of Mineral Processing. 2001. Vol. 63, № 2. P. 79–114.

18. Iwashita K., Oda M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM // Journal of Engineering Mechanics. 1998. Vol. 124, № 3. P. 285–292.

19. Govender N., Rajamani R.K., Wilke D.N., Wu C.Y., Khinast J., Glasser B.J. Effect of particle shape in grinding mills using a GPU based DEM code // Minerals Engineering. 2018. Vol. 129. P. 71–84.

20. Cleary P.W., Morrison R.D. Particle size and shape effects in tumbling mills: A DEM study // Minerals Engineering. 2012. Vol. 26. P. 24–33.

УДК 004.94

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ENAS SOLIDSIM

С.В. Брякунов^{1,2}, ст. преподаватель

¹ООО «Системы инженерного анализа», г. Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

В работе приведено описание реализованных алгоритмов и подходов в программном комплексе ENAS SolidSim, который может применяться для численного моделирования материальных потоков. Представлены математические модели классификаторов, дробильного оборудования и перемешивания потоков. На примере моделирования процесса измельчения показана оценка эффективности работы классификатора.

Ключевые слова: материальный поток, дробление, моделирование процесса измельчения, системное моделирование.

NUMERICAL SIMULATION OF THE ORE GRINDING PROCESS IN ENAS SOLIDSIM

S.V. Bryakunov

The paper describes the implemented algorithms and approaches in the ENAS SolidSim software package, which can be used for numerical modeling of material flows. Mathematical models of screen, crusher, and flow mixer are presented. The paper uses the example of modeling the grinding process to evaluate the efficiency of a screen.

Keywords: material flow, milling, grinding process modeling, system modeling.

Моделирование технологических переделов горных предприятий.

Разработка технологического передела является сложной и достаточно дорогостоящей процедурой, при которой необходимо учитывать множество технических и экономических критериев.

На сегодняшний день для оценки эффективности и прогноза работы технологического оборудования широко применяются различные средства моделирования. В работе [1] авторы применяют метод дискретных элементов для исследования процесса дезинтеграции в шаровых мельницах. Данный метод широко используется для моделирования различных процессов сыпучих сред. Однако рассмотреть совместную работу всей технологической цепочки с помощью данного метода невозможно. При необходимости моделирования всех участков передела совместно, как правило, применяются такие средства как MetSim, Aspen HYSYS и др., или средства математического моделирования общего назначения, такие как Matlab, SimInTech и др. Они позволяют на системном уровне выполнить моделирование переделов, а также построить цифровые двойники фабрик.

Приведено описание программного комплекса ENAS SolidSim (разработчик ООО «Системы инженерного анализа», г. Екатеринбург), а также представлены результаты моделирования процесса размола руды на системном уровне.

Алгоритмы, методы и подходы, реализованные в программном комплексе ENAS SolidSim.

ENAS SolidSim – программное обеспечение для численного моделирования материальных потоков сыпучих сред, которое может применяться для системного моделирования физических и химических процессов с учетом твердой, жидкой и газовой фаз или их смесей.

Общая архитектура программного комплекса представлена на рис.1



Рис. 1. Архитектура программного комплекса SolidSim

Отличительными особенностями программного комплекса является реализация блочно-модульного подхода, который позволяет решать отдельный каждый блок (модуль), что позволяет выбрать наиболее подходящий метод решения СЛАУ или ДАУ для каждой модели (рис.2).

В качестве решателей СЛАУ и ДАУ используется библиотека SUNDIALS [2]. Библиотека обеспечивает точное и эффективное решение и используется в программном комплексе Matlab.

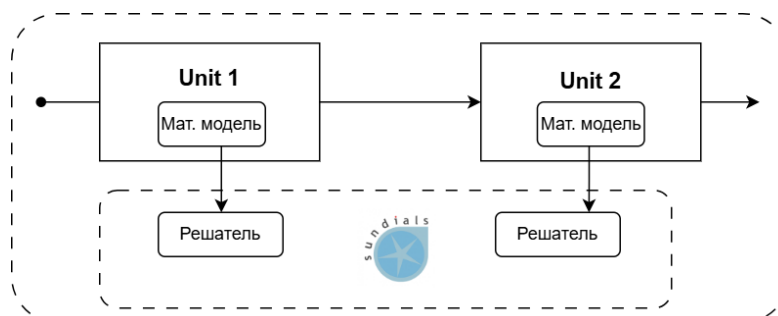


Рис. 2. Блок-схема архитектуры модулей и решателей для них

Также важной особенностью является возможность учета и определения многомерного распределения параметров материальных потоков.

Есть возможность определить зависимости формы, размеров, массы фракций и прочих параметров при моделировании процессов (рис. 3).

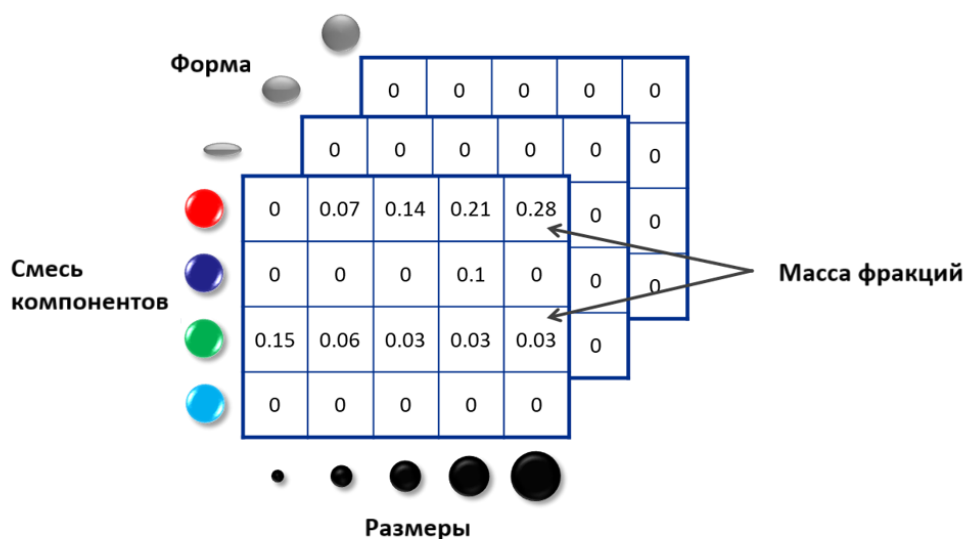


Рис. 3. Многомерное распределение параметров твердых тел

Также важной особенностью является возможность учета и определения многомерного распределения параметров материальных потоков. Есть возможность определить зависимости формы, размеров, массы фракций и прочих параметров при моделировании процессов (рис. 3)

Исходные данные и результаты моделирования процессов записываются в файлы в формате HDF5, что обеспечивает надежность хранения и доступность данных (рис.4). Кроме того, для расширения функциональности предусмотрены средства разработки пользовательских моделей с возможностью встраивания в графический интерфейс пользователя.

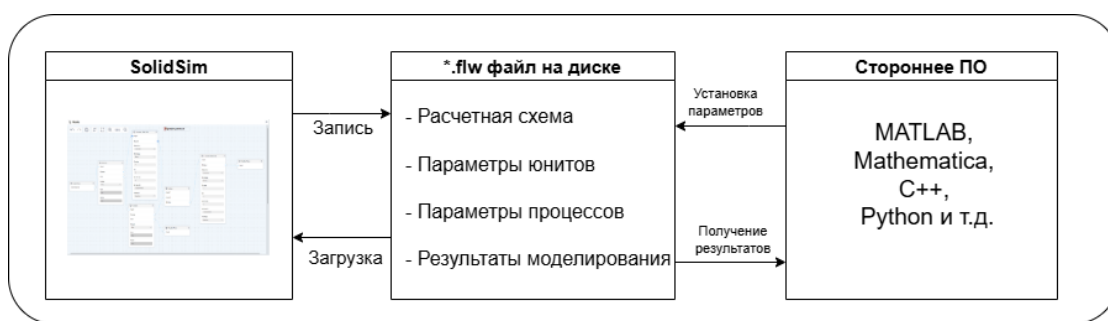


Рис. 4. Блок-схема реализации I/O-системы

Численное моделирование процесса размола в программном комплексе SolidSim.

Рассмотрим технологический участок, включающий в себя две стадии измельчения, классификацию и перемешивание. Общий вид блок-схемы цепочки представлен на рисунке 5.

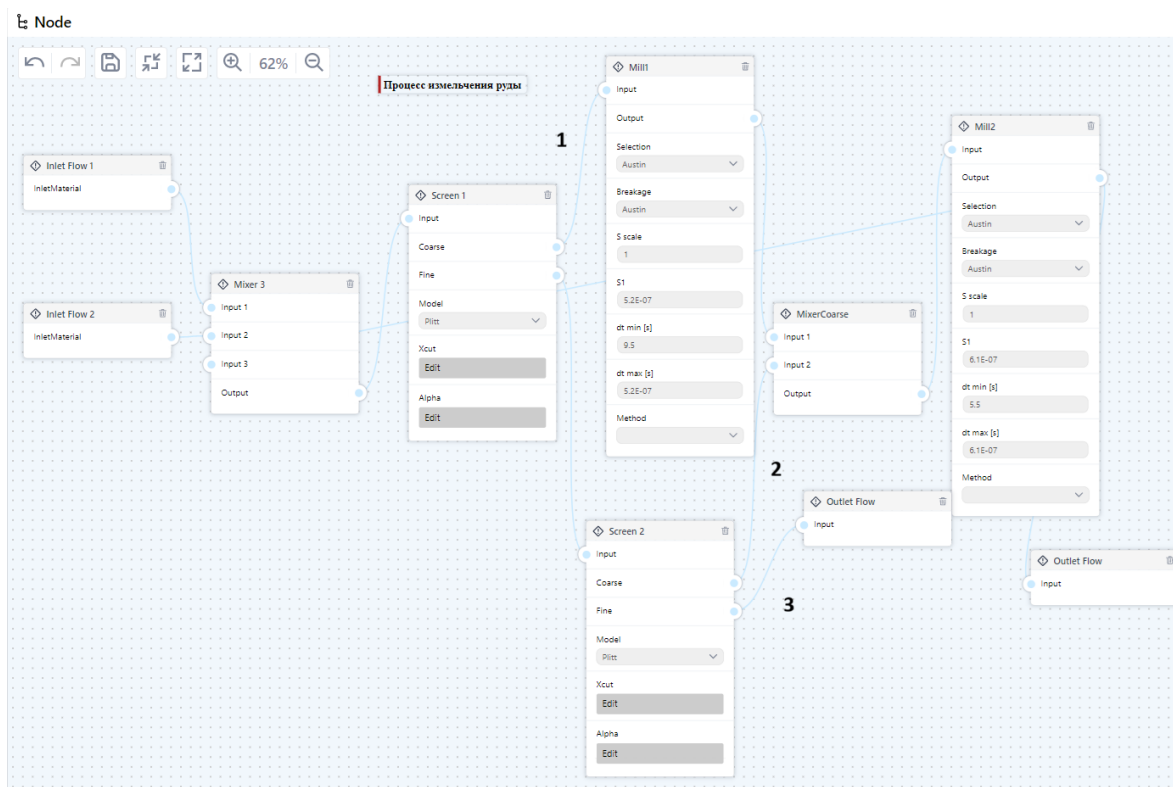


Рис. 5. Блок-схема процесса измельчения руды

Модули реализуют следующие математические модели:

1. Модель классификатора.

Связь между входным и выходными потоками классификатора описывается следующим соотношением:

$$\dot{m}_{out,c} = \dot{m}_{in} \sum_i G(x_i) \omega_{in,i};$$

$$\dot{m}_{out,f} = \dot{m}_{in} (1 - \sum_i G(x_i) \omega_{in,i}),$$

где $\dot{m}_{out,c}$ – массовый расход материала на выходе крупной фракции; $\dot{m}_{out,f}$ – массовый расход материала на выходе мелкой фракции; $\dot{m}_{in}$ – массовый расход на входе; $\sum_i G(x_i)$ – эффективность работы классификатора (массовая доля материала определенного гранулометрического состава в потоке, которая получается на выходе крупной фракции); $\omega_{in,i}$ – массовая доля материала в зависимости от гранулометрического состава.

Эффективность работы классификатора определяется моделью Тейлора-Хеннига [3]:

$$G(x_i) = \left(1 - \left(1 + 3 \left(\frac{x_i}{x_{cut}} \right)^{\left(\frac{x_i}{x_{cut}} \right)^\beta} \right)^{-\frac{1}{2}} \right) * (1 - a) + a,$$

где x_i – размер частиц, x_{cut} – размер среза классификации; β – степень разделения на классы; a – смещение.

2. Модель перемешивания.

Перемешивание осуществляет смешивание двух потоков в один. Параметры потока на выходе рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{out} &= \dot{m}_{in1} + \dot{m}_{in2}; \\ \dot{H}_{out} &= \dot{H}_{in1} + \dot{H}_{in2}; \end{aligned}$$

$$T_{out} = f(h_{out}) = f\left(\frac{\dot{H}_{out}}{\dot{m}_{out}}\right);$$

$$P_{out} = \min(P_{in1}, P_{in2}),$$

где $\dot{H}$ – расход энтальпии; h – удельная энтальпия; P – давление.

3. Модель дробления.

Для описания процесса дробления использована модель Бонда [4, 5]:

$$x_{80,out} = \frac{1}{\left(\frac{P}{10\omega_i\dot{m}} + \frac{1}{\sqrt{x_{80,in}}}\right)^2};$$

$$\mu = x_{80,out} - 0,83\sigma;$$

$$q_3(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где x_{80} – характерный размер частиц на входе и выходе; ω_i – индекс прочности, зависящий от материала, P – потребляемая мощность; $q_3(x)$ – распределение плотности, зависящее от массы на выходе; σ – стандартное отклонение; μ – среднее значение (нормальное распределение).

В задаче рассмотрена только твердая фаза (песчаник) со следующими физико-механическими свойствами (табл. 1):

Таблица 1 – Физико-механические свойства твердой фазы

Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг*К)	Индекс Бонда
2200	890	15,51

Результаты моделирования и их обсуждение.

На рис. 6, 7 представлены результаты моделирования технологического участка. Наиболее низкая скорость массового расхода и наибольшая крупность фракции достигается на участке 1. На участках 2 и 3 наблюдается регулярный массовый расход после 100 секунд счета. Таким образом, может быть оценена эффективность работы классификаторов, что в дальнейшем можно использовать для подбора дробильного оборудования.

Вывод. Программный комплекс ENAS SolidSim может эффективно применяться для численно моделирования материальных потоков твердой, жидкой и газовой фазы и их смесей. Реализованные подходы и алгоритмы позволяют моделировать стационарные и динамические процессы для оценки эффективности технологического оборудования. Дальнейшие работы будут направлены на расширение перечня модулей с различными математическими моделями.

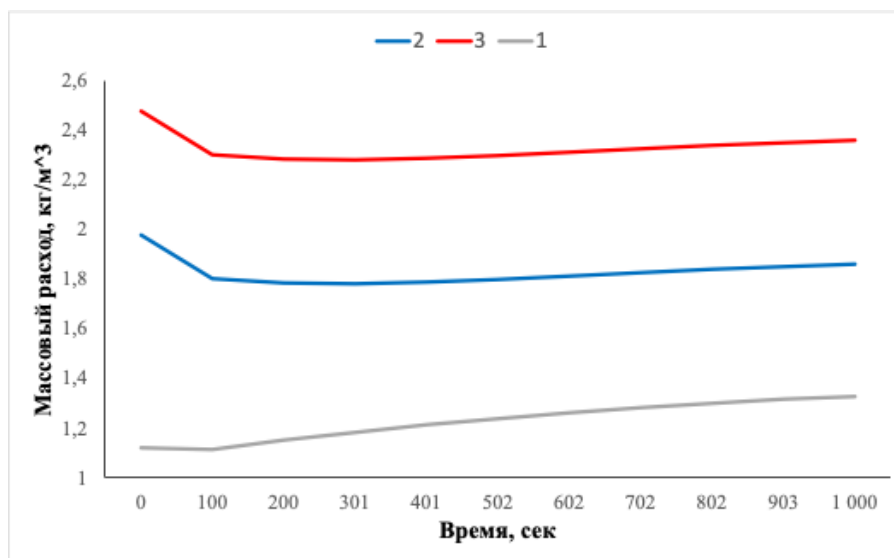


Рис. 6. Изменение массовых расходов на участках 1-3

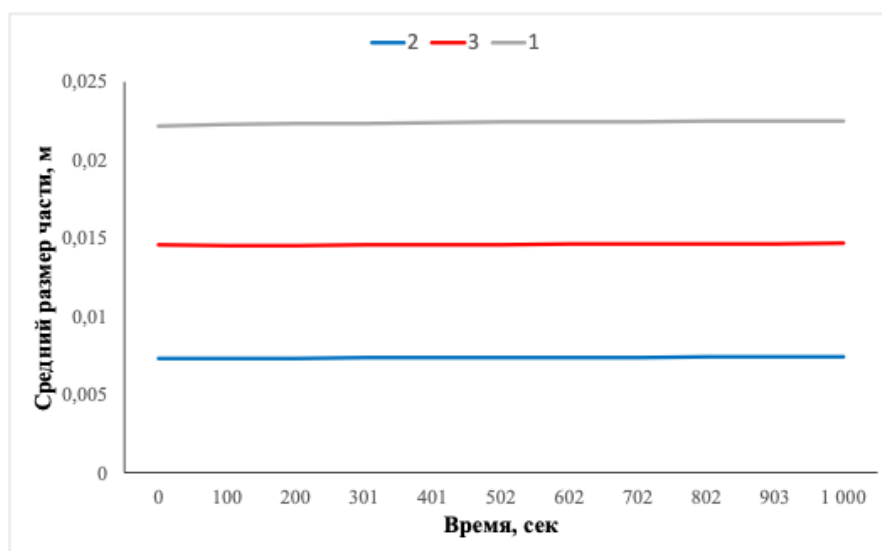


Рис. 7. Изменение среднего размера частиц на участках 1-3

Список литературы

1. Белоглазов И. И., Сабинин Д. С., Николаев М. Ю. Моделирование процесса дезинтеграции в шаровых мельницах барабанного типа с использованием метода дискретных элементов // MINING INFORMATIONAL AND ANALYTICAL BULLETIN. 2022. 6-2. с. 268-282.
2. Gardner, David J and Reynolds, Daniel R and Woodward, Carol S and Balos, Cody J. Enabling new flexibility in the SUNDIALS suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers // ACM Transactions on Mathematical Software. 2022. V.48-3. pp. 1-24.
3. Hennig, M. and Teipel, U. Stationäre Siebklassierung. // Chemie Ingenieur Technik. 2016. V.88. pp. 911-918.
4. F.C. Bond. Crushing and grinding calculation – Part I // British Chemical Engineering. 1961. V.6(6). pp. 378-385.
5. F.C. Bond. Crushing and grinding calculation – Part II // British Chemical Engineering. 1961. V.6(8). pp. 543-548.

УДК 621.271.022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕКОСНЫХ НАГРУЗОК В ЭЛЕМЕНТАХ ОПОР МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

В. С. Великанов, проф. д.т.н.,

«Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

В работе представлены результаты моделирования перекосных нагрузок в элементах опор мостовых перегружателей. Установлено, что при варьировании величины пролета в сторону увеличения, перемещения от перекоса возрастают, а наибольшие деформации возникают при расположении груза на консоли и при работе одного двигателя, что коррелируется с результатами ранее проводимых исследований.

Ключевые слова: перегружатель, перекосное нагружение, уголь, реборда, рельс, моделирование

MODELING OF SKEWIL LOADS IN SUPPORT ELEMENTS BRIDGE LOADERS

Velikanov V. S. doctor of technical sciences

This paper presents the results of modeling skewing loads in the support elements of overhead cranes. It was found that with increasing span, skew displacements increase, and the greatest deformations occur when the load is placed on the cantilever and when a single motor is operating, which correlates with the results of previous studies.

Keywords: reloader, tilt loading, coal, flange, rail, modeling

Технологические достижения в различных отраслях промышленного производства стимулируют инновации в разработке и производстве кранов на рельсовом ходу. Производители кранового оборудования инвестируют в исследования и разработки для улучшения технологических возможностей, при этом внедряются передовые технологии, как дистанционное управление, системы контроля нагрузки и системы предотвращения столкновений, это способствует повышению безопасности, производительности и снижению эксплуатационных расходов [1].

Перегружатели, как правило, входят в состав оборудования, обеспечивающего непрерывный технологический процесс погрузочно-разгрузочных операций, поэтому к ним предъявляются высокие требования с точки зрения прочности и надежности. Механизмы перегружателей рассчитывают с учетом режима работы механизмов. Расчет металлоконструкций производят с учетом режима работы перегружателей в целом [2]. Использование цифровых технологий на этапе проектирования и создания грузоподъемных машин позволяют более точно моделировать и рассчитывать конструкцию оборудования, подкрановых путей, а также контролировать влияние отдельных элементов на напряженное состояние конструкции в целом. Для оценки влияния перекосных нагрузок на напряжения в металлоконструкциях перегружателя в 5–20 грамме трехмерного проектирования КОМПАС-3D 21.0.1.1172 (64-разрядная версия) компании ООО «АС-КОН-Системы проектирования» создана по геометрическим размерам 3D-модель угольного перегружателя. Параметры нагружения моделировались для следующих условий: перекосная нагрузка, действующая на металлоконструкцию, была принята равной 5-20 кг на тонну веса перегружателя в

зависимости от конструктивной схемы, пролета, высоты, жесткости опор, качества укладки подкрановых путей и состояния узлов механизмов передвижения (балансиров, ходовых колес и т.п. Воздействие перекосных нагрузок принято учитывать смещением одной опоры относительно другой. Перекосная деформация в рабочем состоянии принимается равной 0,5–0,8 % величины пролета. Металлоконструкции рассчитывают при максимальной перекосной деформации (при пролете 80 м она составляет 607 мм) (рис.). На схеме рисунка представлено нагружение козлового перегружателя со следующими нагрузками: осевая нагрузка H ; нагрузка от перекоса S_{II} ; суммарные сопротивления (нагрузки) опор A и B соответственно W_A и W_B

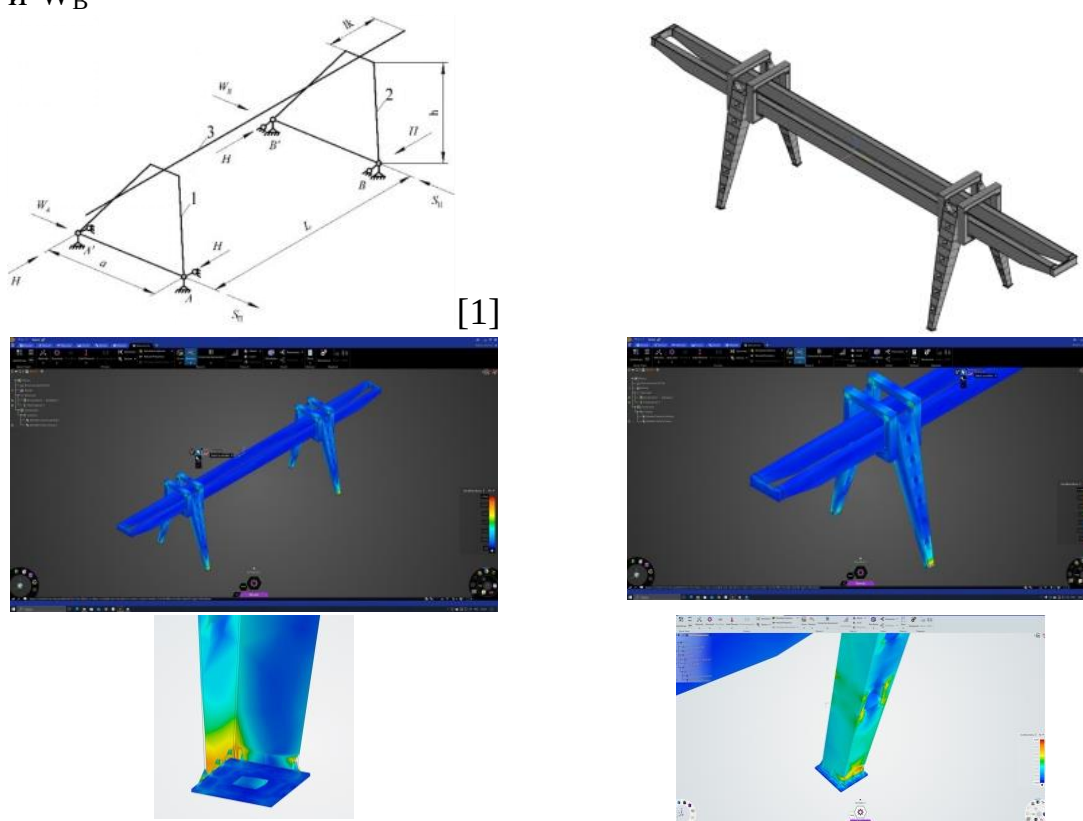


Рис. Схема нагрузок и результаты моделирования НДС мостового перегружателя

Исследование процесса перекосного нагружения перегружателя позволило определить точное напряженно-деформированное состояние, максимально приближенное к реальному, и в дальнейшем реализовать на этапе проектирования рекомендации по наиболее рациональному способу усиления металлоконструкций перегружателя.

Список литературы

1. Великанов В. С., Исмагилов К. В. Проектирование отечественных мехлопат с учетом требований рынка горной техники и эргономических показателей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 2. С. 30–32.
2. Барбас И. Г., Бойко П. П. Металлоконструкции перегружателей. Нормативные нагрузки. Особенности расчета // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. Вип. 5. С. 35–42. DOI: 10.15802/stp2004/20486.

УДК 622.23.05: 007.52

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОХОДЧЕСКИМ ЦИКЛОМ НА ОСНОВЕ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Е.А. Волкова¹, канд. техн. наук, А.В. Дружинин¹, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Предложена методология построения киберфизической системы для сквозного автономного управления проходческим циклом. Ключевым элементом методологии является двунаправленная синхронизация цифровых двойников забоя и бурового оборудования в реальном времени. Формализована уровневая архитектура КФС, разработаны методы прямой связи (трансляция проектного контура в траектории инструмента) и обратной связи (уточнение свойств породы по телеметрии и самокалибровка оборудования по реперным точкам). Предложен алгоритм замкнутого управления, охватывающий фазы планирования, исполнения и адаптации.

Ключевые слова: киберфизическая система, цифровой двойник забоя, цифровой двойник оборудования, проходческий цикл, буровзрывные работы

METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING A CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR TUNNELING CYCLE CONTROL BASED ON BIDIRECTIONAL SYNCHRONIZATION OF DIGITAL TWINS

E.A. Volkova, A.V. Druzhinin

A methodology for constructing a cyber-physical system for end-to-end autonomous control of the tunneling cycle is proposed. The key element of the methodology is the real-time bidirectional synchronization of digital twins of the rock face and drilling equipment. A layered architecture of the CPS is formalized, and methods of forward communication (translation of the design contour into tool trajectories) and feedback (refinement of rock properties via telemetry and self-calibration of equipment using reference points) are developed. A closed-loop control algorithm encompassing the phases of planning, execution, and adaptation is proposed.

Keywords: cyber-physical system, digital twin of the rock face, digital twin of equipment, tunneling cycle, drilling and blasting operations.

Введение. Переход к безлюдным технологиям подземной добычи является магистральным направлением развития горной промышленности. В проходческих работах этот тренд выражается в стремлении к полной автоматизации буровзрывного цикла [1,2]. На сегодняшний день разработаны системы лазерного сканирования, созданы буровые установки с автоматическим позиционированием стрелы, внедряются цифровые паспорта буровзрывных работ (БВР). Однако существующие решения носят фрагментарный характер – отсутствует целостный замкнутый контур управления. Ключевая проблема заключается в отсутствии методологической базы, позволяющей интегрировать цифровой двойник забоя и цифровой двойник проходческого оборудования в единую киберфизическую систему (КФС).

Архитектура киберфизической системы. Предлагаемая архитектура киберфизической системы управления проходческим циклом оперирует двумя ключевыми сущностями, находящимися в состоянии непрерывного

информационного обмена: цифровой двойник забоя и цифровой двойник оборудования.

Цифровой двойник забоя (ЦДЗ) представляет собой динамическую трехмерную модель, формируемую на основе данных лазерного сканирования, включающую не только геометрию поверхности в формате облака точек, но и семантическую информацию: зоны различной крепости породы и трещиноватости, положение проектного контура выработки. Цифровой двойник оборудования (ЦДО) является точной кинематической моделью проходческой буровой установки, содержащей математическое описание кинематических цепей манипулятора, параметры гидроцилиндров и модели датчиков, что позволяет с высокой точностью вычислять текущее и прогнозировать требуемое положение бурового инструмента.

Принцип работы КФС основан на реализации замкнутого управляющего цикла. Входной точкой является операция сканирования, в результате которой актуализируется цифровой двойник забоя. Опираясь на актуальную модель забоя и базу знаний, содержащую типовые паспорта БВР, система автоматической генерации плана формирует оптимальную сетку расположения шпуров и целевые траектории движения бурового инструмента. Эти параметры передаются цифровому двойнику оборудования, который вычисляет управляющие сигналы для гидроприводов и отрабатывает заданные траектории. В процессе исполнения ведется непрерывная запись телеметрии. Завершается цикл повторным сканированием забоя для верификации и адаптации моделей. С точки зрения системной организации, предлагаемая архитектура адаптирует общепромышленные стандарты ISA-95 и RAMI 4.0 к специфике подземных горных работ. Схема архитектуры системы представлена на рисунке 1. Физический уровень представлен объектом управления, исполнительным оборудованием и средствами сенсорики. Уровень связи обеспечивает агрегацию первичной информации посредством промышленных сетей и ее унификацию в формате IREDES. На цифровом уровне разворачиваются вычислительные сервисы, обслуживающие цифровые двойники и базу знаний. Уровень приложений включает модули автоматизированного проектирования паспорта БВР, оптимизации траекторий и предиктивной аналитики. Верхний уровень интеграции обеспечивает единый человеко-машинный интерфейс и диспетчеризацию.

Методология двунаправленной синхронизации цифровых двойников. Ключевым элементом предлагаемой методологии является принцип двунаправленной синхронизации цифровых двойников. Формально состояние киберфизической системы в произвольный момент времени может быть описано упорядоченной парой вида (1):

$$S(t) = \langle Mz(t), Mo(t) \rangle, \quad (1)$$

где $Mz(t)$ представляет текущее состояние цифрового двойника забоя, а $Mo(t)$ — текущее состояние цифрового двойника оборудования.

Уровневая архитектура киберфизической системы

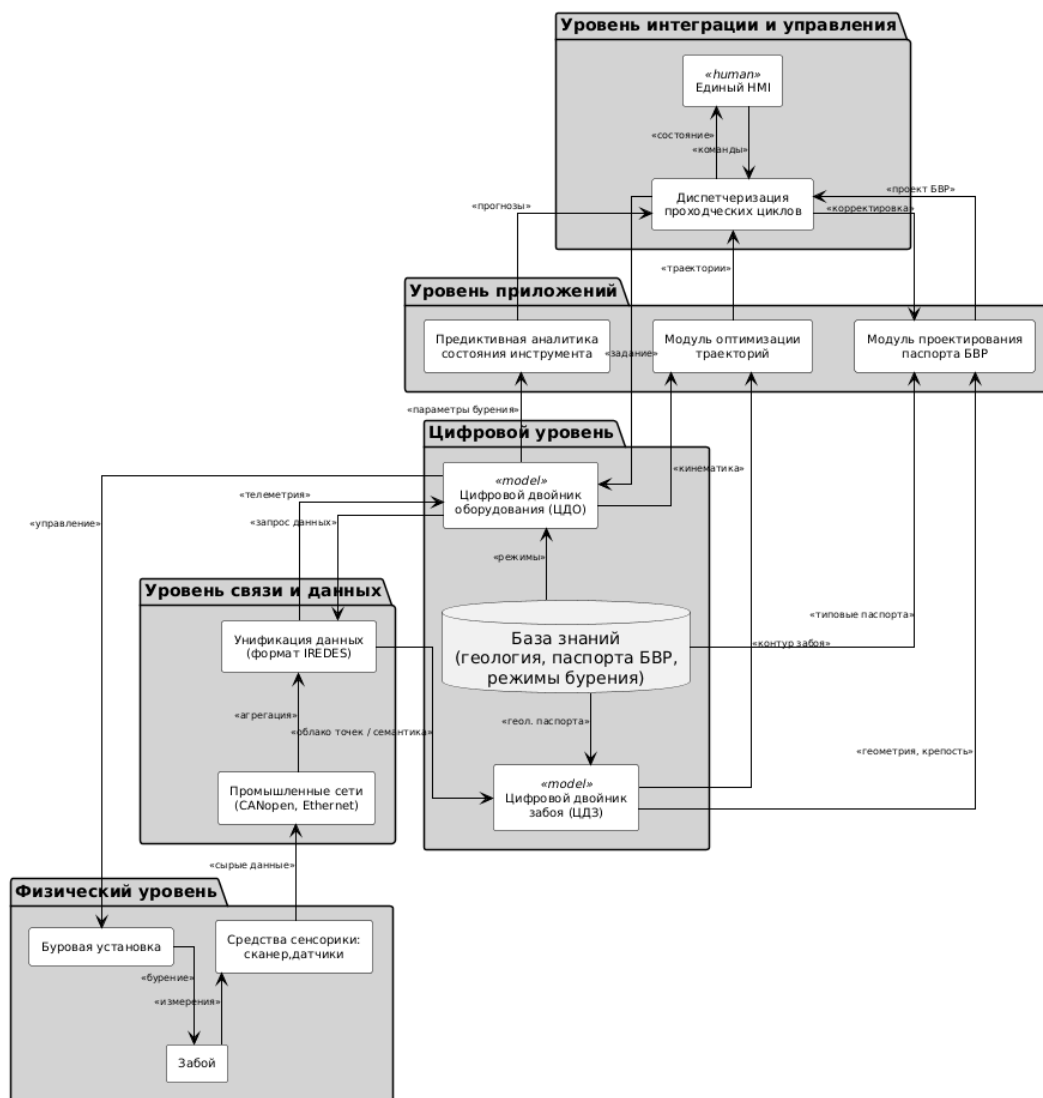


Рис. 1. Архитектурная схема киберфизической системы

Под синхронизацией понимается достижение такого непротиворечивого состояния пары, при котором пространственное положение инструмента, вычисленное на основе кинематической модели $Mo(t)$, соответствует фактической геометрии забоя, зафиксированной в $Mz(t)$, с заданной степенью точности.

Прямая связь обеспечивает трансляцию требований проектного контура и параметров БВР в исполнительные команды для буровой установки. Входными данными служат координаты шпуров. Задача заключается в преобразовании декартовых координат в обобщенные координаты манипулятора. Математически это обратная задача кинематики, которая для установок с кинематической схемой ангулярного типа представляется системой нелинейных уравнений (2):

$$x = f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, l), y = f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, l), z = f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, l), \quad (2)$$

где x, y, z – координаты позиционирования коронки, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – углы поворота звеньев, l – выдвижение податчика. Решение системы формирует целевые установки для контуров регулирования гидроприводов.

Обратная связь реализует механизмы коррекции. Первый механизм направлен на уточнение семантической карты прочностных свойств поро-

ды в ЦДЗ. В процессе бурения ЦДО фиксирует телеметрические параметры. Поскольку усилие бурения находится в прямой зависимости от крепости разрушаемой породы, используется эмпирическая регрессионная модель вида (3):

$$f = a \cdot P + b \cdot v + c, \quad (3)$$

где f – показатель крепости по шкале Протодяконова, P – давление, v – скорость подачи, a, b, c – эмпирические коэффициенты.

Дискретные оценки крепости вдоль траектории каждого шпура интерполируются на область забоя, формируя обновленную семантическую карту в структуре Mz . Второй механизм решает задачу калибровки цифрового двойника оборудования, для чего предлагается процедура Homing, использующая реперные точки в цифровом двойнике забоя. Буровая установка позиционирует коронку на реперную точку, ЦДЗ предоставляет эталонные координаты, ЦДО вычисляет предполагаемое положение по показаниям датчиков. Вектор рассогласования фиксируется, на его основе вычисляются аддитивные поправки к нулевым положениям датчиков, а обновленные поправочные коэффициенты сохраняются в структуре Mo и применяются при всех последующих вычислениях кинематики.

Предложенная архитектура дополняется протоколом разрешения конфликтных ситуаций, основанном на принципе кибериммунитета.

Заключение и перспективы. В отличие от существующих подходов, рассматривающих цифровые модели как автономные инструменты, разработанная методология обеспечивает их непрерывное взаимное влияние: цифровой двойник забоя формирует целевые траектории для оборудования, а цифровой двойник оборудования поставляет данные для уточнения геомеханической модели и самокалибровки собственной кинематической схемы. Формализованная уровневая архитектура, методы прямой и обратной связи, а также алгоритм замкнутого управления составляют целостную теоретическую базу, пригодную для реализации на различных типах проходческих установок.

Список литературы

1. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Абиров А. А., Жаркенов Е. Б., Матин И. Т. Результаты испытания экспериментального образца шнекового бурового оборудования с системой управления траекторией скважины // Наука, техника и образование. 2017. №9 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-ispytaniya-eksperimentalnogo-obraztsa-shnekovogo-burovogo-oborudovaniya-s-sistemoy-upravleniya-traektoriey-skvazhiny> (дата обращения: 13.02.2026).
2. Макаров И. Г. Автоматизация процесса бурения с целью его оптимизации // Известия УГТУ. 2003. №16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessa-bureniya-s-tselyu-ego-optimizatsii> (дата обращения: 13.02.2026).

УДК 622.23.05:004.8

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ В КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РОБОТИЗАЦИИ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА УГЭ-300

Е.А. Волкова¹, канд. техн. наук, С.А. Хорошавин¹², канд. техн. наук., доцент,

В.Н. Полузадов¹, канд. техн. наук., доцент

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

²Уральский Федеральный Университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина

Представлена концепция киберфизической системы для роботизации рабочего цикла карьерного гидравлического экскаватора УГЭ-300. Ключевая роль отводится нейросетевым алгоритмам технического зрения, которые обеспечивают прямую идентификацию объектов забоя и обратную связь для коррекции цифровых двойников оборудования и забоя. Предложена уровневая архитектура КФС, включающая цифровые двойники забоя, экскаватора и самосвала. Описаны методы двунаправленной синхронизации этих двойников. Затронуты вопросы кибериммунитета, обеспечивающего безопасную интеграцию автоматических режимов с действиями машиниста. Результаты работы являются теоретической базой для опытно-конструкторских работ по созданию программно-аппаратного комплекса роботизации.

Ключевые слова: машинное зрение, нейросетевые алгоритмы, киберфизическая система, цифровой двойник, карьерный экскаватор, УГЭ-300, роботизация, кибериммунитет.

NEURAL NETWORK-BASED TECHNICAL VISION IN THE CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR ROBOTIZATION OF THE UGE-300 MINING EXCAVATOR

E.A. Volkova, S.A. Khoroshavin, V.N. Poluzadov

The paper presents a concept of a cyber-physical system for robotizing the work cycle of the UGE-300 open-pit hydraulic excavator. The key role is assigned to neural network-based technical vision algorithms, which provide direct identification of face objects and feedback for correcting digital twins of the equipment and the face. A layered architecture of the CPS is proposed, including digital twins of the face, the excavator, and the dump truck. Methods for bidirectional synchronization of these twins are described. The principles of cyber immunity ensuring safe integration of automatic modes with operator actions are addressed. The results provide a theoretical foundation for development work on creating a software and hardware complex for robotization.

Keywords: machine vision, neural network algorithms, cyber-physical system, digital twin, mining excavator, UGE-300, robotization, cyber immunity.

Введение. Переход к безлюдным технологиям и повсеместная цифровизация производственных процессов, объединяемые концепцией Индустрии 4.0, являются магистральным направлением развития горной промышленности. В открытых горных работах ключевым звеном технологической цепочки остаются карьерные экскаваторы, эффективность и безопасность которых во многом определяют технико-экономические показатели всего предприятия. Современные исследования в области интеллектуализации экскаваторов охватывают четыре ключевых направления: восприятие окружающей среды, принятие решений, планирование траекторий и управление движением, при этом особое внимание уделяется мультимодальной сенсорной интеграции и нейросетевым методам обработки данных

[1]. Ранее авторами были разработаны и апробированы методы нейросетевой идентификации технологических операций и определения положения ковша для тросовых электрических экскаваторов (ЭКГ, ЭШ) [2, 3]. В работе [4] было показано, что применение нейросетевых алгоритмов для распознавания ковша и самосвала позволяет достичь точности идентификации до 99,7% даже в условиях плохой видимости. Однако полученные решения не образовывали замкнутого управляющего контура и не опирались на современную парадигму киберфизических систем (КФС) и цифровых двойников, которая сегодня активно развивается в контексте автоматизации сложных промышленных объектов [5].

В рамках создания программно-аппаратного комплекса роботизации карьерного гидравлического экскаватора УГЭ-300 ключевая роль отводится нейросетевым алгоритмам машинного зрения, которые обеспечивают не только восприятие окружающей обстановки, но и являются основным каналом обратной связи для непрерывной синхронизации цифровых моделей.

Архитектура киберфизической системы. Предлагаемая киберфизическая система управления экскаватором включает в себя совокупность трёх взаимосвязанных цифровых двойников, обменивающихся данными в реальном времени. Общая архитектура КФС представлена на рисунке 1. Такой подход позволяет сформировать замкнутый контур управления, охватывающий все фазы рабочего цикла: черпанье, перенос груженого ковша, разгрузку в самосвал и возврат порожнего ковша в забой.

Физические объекты, с которыми взаимодействует система – экскаватор УГЭ-300 как объект управления, забой как среда разработки и самосвал как агент, с которым необходимо координировать действия. Экскаватор оснащён бортовыми датчиками, измеряющими текущие углы поворота звеньев и давления в гидроцилиндрах, а также модулем навигации, определяющим его координаты и ориентацию в пространстве карьера.

Ядро архитектуры системы – киберфизическая система, которая объединяет все вычислительные и управляющие компоненты. В её составе можно выделить три функциональных блока: сенсоры и цифровые двойники, блок управления и блок безопасности и связи.

Методология двунаправленной синхронизации цифровых двойников. Ключевым элементом предлагаемой методологии является принцип двунаправленной синхронизации цифровых двойников, обеспечивающий замкнутость контура управления. На состояние киберфизической системы в произвольный момент времени будет влиять общее состояние упорядоченной тройки цифровых двойников (1):

$$S(t) = \langle M_z(t), M_o(t), M_T(t) \rangle, \quad (1)$$

где $M_z(t)$ представляет текущее состояние цифрового двойника забоя (ЦДЗ-К), $M_o(t)$ – состояние цифрового двойника оборудования (ЦДО-УГЭ), а $M_T(t)$ – состояние цифрового двойника самосвала (ЦДС).

Под синхронизацией понимается достижение такого непротиворечивого состояния этой тройки, при котором пространственное положение ковша экскаватора, вычисленное на основе кинематической модели, соот-

ветствует фактической геометрии забоя и положению самосвала с заданной степенью точности.

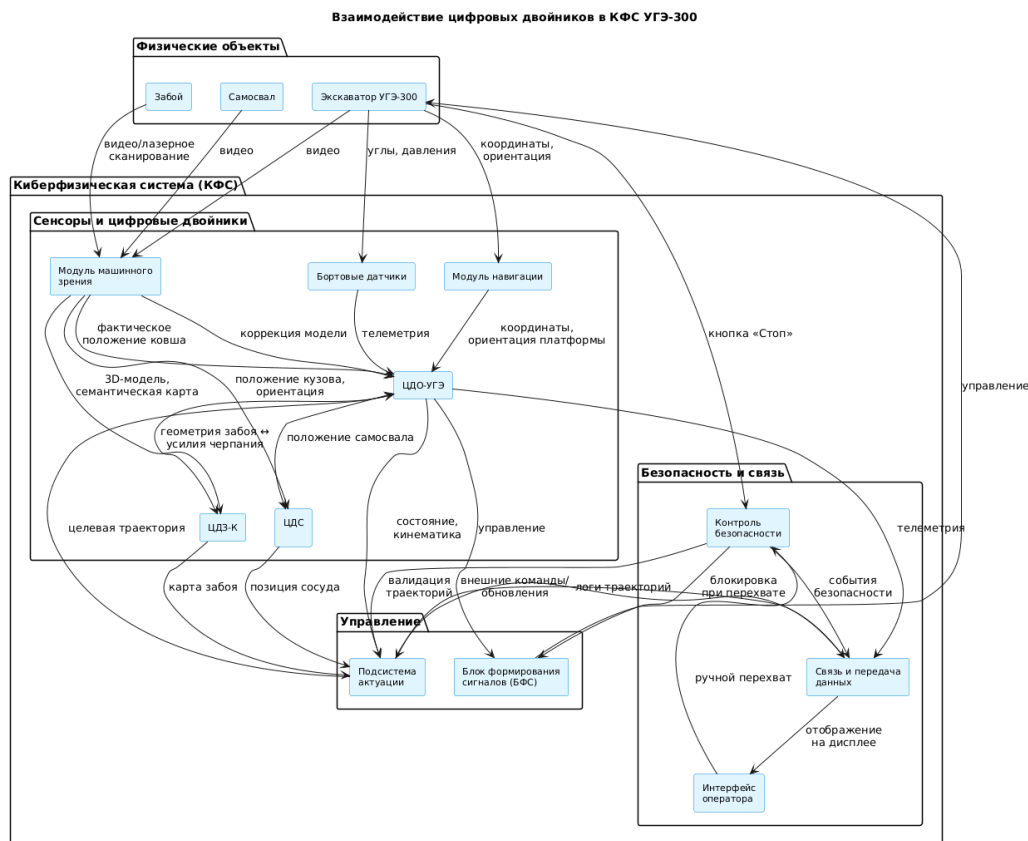


Рис. 1. Архитектурная схема киберфизической системы роботизации экскаватора

Применение машинного зрения. Основой для формирования и актуализации ЦДЗ-К служит метод стереозрения. Параллельно с построением карты глубины при помощи стереокамер, выполняется семантическая сегментация изображения с использованием сверточных нейронных сетей типа Encoder-Decoder, обученных на размеченных данных. Результатом сегментации является маска, где каждому пикселю изображения сопоставлен семантический класс. Наложение этой маски на трёхмерную поверхность позволяет получить семантическую карту забоя. Как показано в [2, 3, 4], такой подход обеспечивает высокую точность распознавания даже в условиях запылённости и плохой освещённости, характерных для горных работ.

Для калибровки ЦДО-УГЭ и обеспечения обратной связи по фактическому положению ковша используется метод обнаружения, реализованный как детектор на базе архитектуры Faster R-CNN, обученный на размеченных изображениях ковша экскаватора с выделением характерных точек. Для повышения точности определения положения используется комбинация 2D-детекции с данными карты глубины.

Для синхронизации с ЦДС модуль машинного зрения выполняет обнаружение самосвала и определение его положения и ориентации. Используется нейросетевой детектор, построенный на методе поиска характерных линий с использованием преобразования Хафа. Положение кузова в трёхмерном пространстве определяется через комбинацию данных детекции и карты глубины. Полученные данные передаются в ЦДС и используются

подсистемой актуации для планирования траектории ковша при разгрузке. На основе актуальных ЦДЗ-К и ЦДС подсистема актуации формирует оптимальную траекторию движения ковша, которая задаётся как последовательность целевых положений ковша в декартовой системе координат.

Таким образом, методология двунаправленной синхронизации, опирающаяся на комплексное применение методов машинного зрения – стереорекострукции, семантической сегментации, нейросетевого обнаружения объектов и определения их положения, – обеспечивает непрерывное уточнение цифровых моделей и замкнутость контура управления.

Принципы кибериммунитета в системе роботизации. Переход к автономному управлению требует встроенных механизмов защиты, гарантирующих безопасность персонала и оборудования. Концепция кибериммунитета подразумевает наличие у системы врождённой способности противостоять сбоям, некорректным данным и ошибочным действиям. В разрабатываемой КФС реализуется многоуровневая защита, включающая приоритет ручного управления с физической блокировкой автоматических команд, валидацию данных машинного зрения с переходом в безопасный режим при низкой достоверности распознавания, прогнозирование коллизий на основе актуальных цифровых двойников и непрерывную, что в совокупности создаёт необходимый уровень безопасности для практического внедрения.

Заключение и перспективы. Предложенная концепция закладывает теоретическую основу для создания нового поколения интеллектуальных горных машин, способных автономно выполнять технологические операции с высокой точностью и эффективностью. Дальнейшее развитие работы предполагает экспериментальную апробацию предложенных решений на реальном оборудовании и их адаптацию для группового взаимодействия машин в едином технологическом пространстве карьера.

Список литературы

1. Yang W., Tang C., Zhou G. et al. Current situation and development trend of intelligent unmanned autonomous excavators // Journal of China Coal Society. – 2025. – Vol. 50, No. S2. – P. 1251–1264.
2. Волкова Е.А., Дружинин А.В., Лагунова Ю.А., Полузадов В.Н. Определение массы породы в ковше экскаватора с применением нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11. – С. 103–111.
3. Волкова Е.А. Идентификация технологического состояния системы экскаватор-самосвал-карьер // Новые огнеупоры. – 2018. – № 4. – С. 17–18.
4. Volkova E., Druzhinin A., Nagatkin E., Poluzadov V. Analysis of the technological state of single-bucket cyclical excavators' identification system testing results // TRANS & MOTAUTO WORLD. – 2021. – Vol. 6, Iss. 1. – P. 3–5.
5. Zhang J., Liu Y., Wang H. Multi-Modal Working Environment Perception for Autonomous Excavation of Mining Electric Shovel Based on Parallel Neural Network // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2025. – Vol. 30, No. 5. – P. 3904–3914.

УДК 621.86/.87

СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В МЕХАНИЗМАХ ЭКСКАВАТОРА

И.В. Зырянов¹, проф., д.т.н., А.А. Иов¹, инж.

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

Разработана структурная математическая модель рабочего оборудования карьерного экскаватора, оснащенного упруго-демпфирующим устройством. Предложено все возможные конструктивные схемы установки демпферов представлять в виде передаточной функции в цепи механической обратной связи с обобщёнными параметрами инерции, жёсткости и вязкого трения, и определять эти параметры путем решения обратной задачи динамики по заданной форме переходного процесса усилия в подъёмном канате с учетом нелинейных свойств механизмов передачи усилия.

Ключевые слова: рабочее оборудование, упруго-демпфирующее устройство, структурные математические модели.

STRUCTURAL METHODS OF MODELING ELASTIC-DAMPING DEVICE IN EXCAVATOR MECHANISMS

Zyryanov I.V., Iov A.A.

A new approach to the description of elastic-damping devices in the working equipment of a quarry excavator is proposed. A structural model of a damping device with generalized parameters of inertia, stiffness, and viscous friction is determined. A structural mathematical model of the lifting mechanism of a quarry excavator with an elastic-damping device is obtained, which allows for the consideration of nonlinear characteristics of elastic elements and force transmission mechanisms.

Keywords: working equipment, elastic-damping device, structural mathematical models

Введение. Предлагаемые конструкции рабочего оборудования карьерных экскаваторов с упруго-демпфирующим устройством (УДУ) являются сложной механической системой, включающей в себя механизмы передачи усилия (перемещения) и упруго-вязкие элементы с нелинейными характеристиками [1]. Динамические свойства этих механизмов описываются математическими моделями, в которых жёсткость и вязкое трение УДУ приводят к обобщённым параметрам системы, с последующим её исследованием с помощью амплитудно-частотных характеристик. Применение данных моделей позволяет оценивать динамические свойства механизма при линейной взаимосвязи параметров, однако, наличие в предлагаемых схемах ограничителей перемещения (упоров) и рычажных механизмов с нелинейным коэффициентом передачи усилия приводит к необходимости анализировать множество частотных характеристик, чтобы определить параметры жёсткости и вязкого трения УДУ и его схему расположения в рабочем оборудовании, соответствующих заданному коэффициенту динамичности. С целью упрощения процедуры анализа и синтеза УДУ предлагается использовать методы структурного математического моделирования, в которых УДУ представляется в виде структуры из типовых механиче-

ских звеньев, что даёт возможность учитывать нелинейные свойства упругих элементов и механизмов передачи усилия.

Объектом исследования является механизм подъёма карьерного экскаватора с УДУ. Встраивание демпфирующего устройства предполагает внесение изменений в исходную конструкцию рабочего оборудования для передачи усилия на упругий элемент, что в свою очередь, приводит к перераспределению нагрузок между узлами механической системы и сообщает дополнительное перемещение подъёмному канату непосредственно или через рычажный механизм (рис. 1) [2,3].

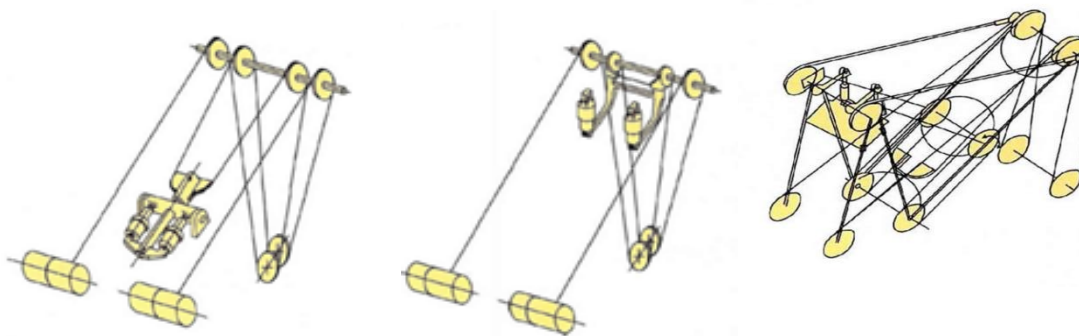


Рисунок 1. Схемы расположения упругодемпфирующего устройства в рабочем оборудовании карьерного экскаватора.

Подобный характер взаимодействия УДУ с механизмом позволяет, используя теорию механических цепей, представлять его в виде структурной модели с обобщенными параметрами инерции (m), жёсткости (c) и вязкого трения (b), входом которой является усилие со стороны подъёмного каната, а выходом – его дополнительное перемещение (рис. 2). Математическая модель УДУ описывается дифференциальным уравнением второго порядка, где x – перемещение, а F – внешнее силовое воздействие [4].

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F$$

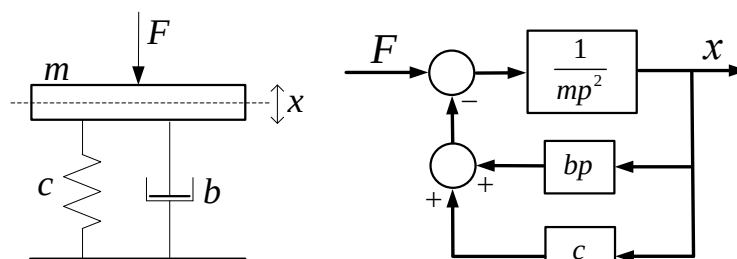


Рисунок 2. Расчётная (слева) и структурная (справа) схема упругодемпфирующего устройства.

Таким образом, известные конструкции рабочего оборудования с УДУ, реализующие указанный выше принцип, можно обобщить в виде структурной математической модели, в которой все возможные варианты технической реализации заменяются отрицательной механической обратной связью, добавляемой к исходной механической системе. С учётом этого, система дифференциальных уравнений движения механизма подъёма с УДУ принимает вид

$$\begin{cases} J_1 \omega_1 p = M_{\partial \varepsilon} - \frac{c_{12} + b_{12} p}{p} \Delta \omega_{1-3} - k' \omega_1 \\ J_2 \omega_2 p = \frac{c_{12} + b_{12} p}{p} \Delta \omega_{1-3} - M_c \\ J_3 \omega_3 p = \frac{k_f}{k_\omega} \left(\frac{c_{12} + b_{12} p}{p} \Delta \omega_{1-3} \right) - b_3 \omega_3 - \frac{c_3}{p} \omega_3 \end{cases}, \quad (1)$$

в которой: J_1 – момент инерции двигателя и редуктора; J_2 – момент инерции рабочего органа; c_{12} – жёсткость подъёмного каната; b_{12} – внутреннее трение в канате; J_3, c_3, b_3 – момент инерции, жёсткость и вязкое трение УДУ; $\Delta \omega = \omega_1 - \omega_2 - \omega_3$ – разница скоростей сосредоточенных масс; $M_{12} = \frac{c_{12} + b_{12} p}{p} \Delta \omega_{1-3}$ – упругий момент в канате; $M_{\text{вз.тр.}} = k' \omega_1$ – вязкое трение в подшипниках; k_f, k_ω – нелинейные коэффициенты передачи усилия и скорости; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Структурная математическая модель механизма подъёма с УДУ, составленная по уравнениям (1) представлена на рисунке 3.

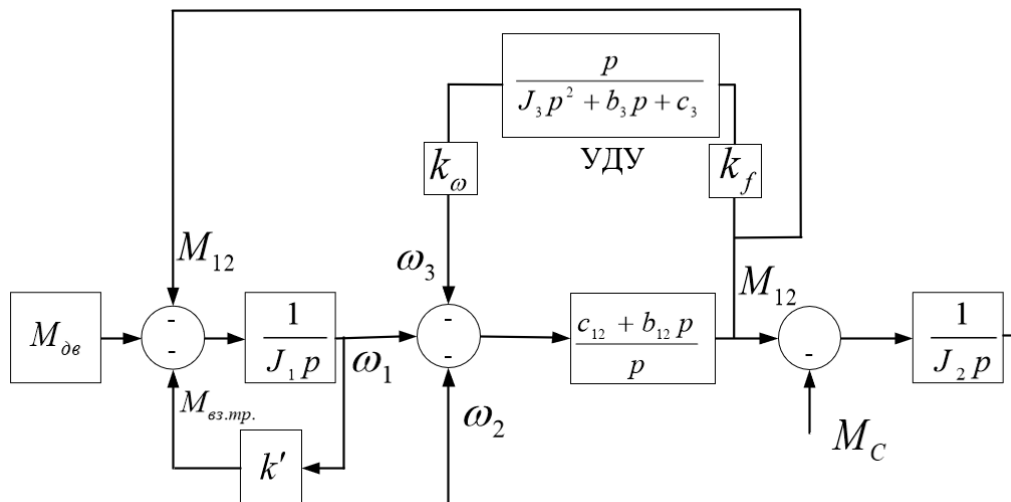


Рисунок 3. Структурная схема механизма подъёма с упругодемпфирующим устройством.

Применение такого подхода позволяет все предлагаемые конструктивные исполнения УДУ и схемы их включения в рабочее оборудование приводить к простым структурным моделям, в которых демпфирующее устройство представляется в виде передаточной функции в цепи механической обратной связи. Последнее позволяет вводить в модель коэффициенты, учитывающие нелинейные свойства механизмов передачи усилия (перемещения), определять действующую нагрузку на шток УДУ и величину деформации упругого элемента, оценивать уровень нагрузок в механизме в режимах пуска и стопорения. Параметры жёсткости и вязкого трения УДУ в структурных моделях механизмов определяются путем решения обратной задачи динамики по заданной форме переходного процесса усилия в подъёмном канате [5].

Вывод. Разработана структурная математическая модель рабочего оборудования карьерного экскаватора с упругодемпфирующими устройствами, в которой все возможные варианты технической реализации представляются в виде отрицательной механической обратной связи. Подобный подход позволяет определять параметры демпфера путем решения обратной задачи динамики по заданной форме переходного процесса усилия в подъёмном канате, рассчитывать величину нагрузки на штоке и деформацию упругого элемента, учитывать нелинейные свойства механизмов передачи усилия.

Список литературы.

1. Губенко А.А., Свиначук В.П. Обзор и анализ параметров конструкций упругодемпфирующих устройств // Научный вестник МГТУ. выпуск 1. — М.: 2011. С. 9-19.
2. Механизм подъема ковша экскаватора / Р.Ю. Подэрни, М.Х. Мухамедов [и др.]. Авт. свид. СССР 8П № 1720314 А1. Бюл. из. №26. 1991.
3. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора / Р.Ю. Подэрни, М.Х. Мухамедов [и др.]. Авт. свид. СССР SU № 1720317 А1 Бюл. из. №28. 1991.
4. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко, А. А. Засядко. Чит. гос. ун-т, Иркут, гос. ун-т путей сообщения. Иркутск.: Изд-во Иркут. гос. ун-та. 2008. 523 с.
5. Определение параметров упругодемпфирующих устройств в механизмах карьерных экскаваторов / И. А. Иов, Н. К. Кузнецов, Е. С. Долгих, А. А. Иов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 3(57). – С. 798-805. – DOI 10.21177/1998-4502-2023-15-3-798-805.

УДК 622.72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.П. Лян¹, канд. техн. наук

¹ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва, РФ

Предложен подход к созданию комплексных моделей вибрационных технологических машин, объединяющий в единой постановке упруго закрепленный рабочий орган, дебалансный вибровозбудитель ограниченной мощности и сыпучий обрабатываемый материал. Разработана плоская математическая модель: для описания динамики обрабатываемого сыпучего материала используется метод дискретных элементов; рабочий орган представлен твердым телом с кусочно-линейной аппроксимацией контактной границы (набором отрезков); вибровозбудитель включает электромеханическую модель асинхронного двигателя и динамику вращения дебаланса. Модель обеспечивает двустороннюю связь входящих в нее подсистем и позволяет получать кинематические, силовые и энергетические характеристики, которые могут быть использованы для повышения энергоэффективности и производительности вибрационных машин.

Ключевые слова: метод дискретных элементов, вибрационные машины, дебалансный вибровозбудитель, сыпучая среда

MODELING OF VIBRATORY PROCESSING MACHINES BASED ON THE DISCRETE ELEMENT METHOD

Lyan I.P.

An approach is proposed for developing comprehensive models of vibratory process machines that combine, within a single formulation, an elastically mounted working body, a limited-power unbalance vibration exciter, and a granular processed material. A planar (2D) mathematical model has been developed: the dynamics of the granular material is described using the discrete element method; the working body is modeled as a rigid body with a piecewise-linear approximation of its contact boundary (a set of line segments); and the vibration exciter incorporates an electromechanical model of an induction motor and the rotational dynamics of the unbalance. The model provides two-way coupling between the subsystems and makes it possible to obtain kinematic, force, and energy characteristics that can be used to improve the energy efficiency and productivity of vibratory machines.

Keywords: discrete element method, vibratory machines, unbalanced-mass vibration exciter, granular medium

Вибрационные технологические машины широко распространены в различных отраслях промышленности и часто используются для обработки различных сыпучих материалов. С точки зрения динамики вибрационную машину принято рассматривать как систему, включающую три взаимосвязанные подсистемы:

- рабочий орган (или группа рабочих органов) как механическая колебательная система, обычно упруго закрепленная относительно основания;
- вибровозбудитель ограниченной мощности, представляющий собой нелинейную электромеханическую подсистему;
- обрабатываемую сыпучую среду, являющуюся нелинейной и диссипативной нагрузкой на рабочий орган.

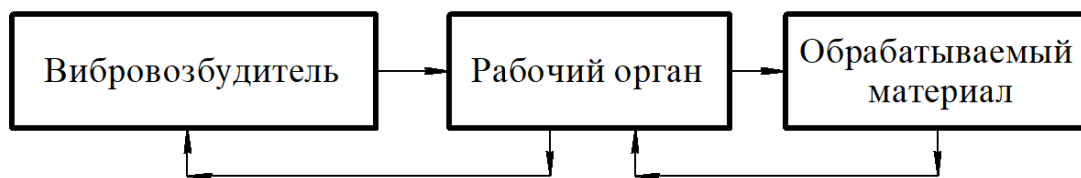


Рис. 1. Структурная схема вибрационной технологической машины

Наличие двусторонних связей между подсистемами является характерной особенностью динамики вибрационного оборудования.

Взаимодействие вибрационного привода ограниченной мощности с упруго закрепленным телом приводит к проявлению различных нелинейных эффектов, например, эффекта Зоммерфельда (застывание на резонансной частоте) и эффекта самосинхронизации нескольких дебалансных вибровозбудителей.

Параметры колебаний рабочего органа определяют условия контакта и характер движения обрабатываемого сыпучего материала (движение с отрывом/без отрыва, виброперемещение, виброкипение, разделение или смешивание слоев). В то же время характер движения обрабатываемого материала может изменять распределение контактных сил, действующих на рабочий орган; эффективную присоединенную массу и/или уровень диссипации, тем самым влияя и режим колебаний рабочего органа.

Кроме того, скорость вращения дебаланса зависит от механической нагрузки, приведенной к валу двигателя, которая, в свою очередь, определяется диссипацией энергии в обрабатываемом материале. Таким образом обрабатываемый материал и вибровозбудитель также имеют двустороннюю связь через рабочий орган вибромашины.

Классические модели вибромашин нередко редуцируют одну из подсистем: представляют сыпучую среду эквивалентной массой (или несколькими массами) связанными силами трения и демпфирования; производят моделирование поведения обрабатываемого материала при заданной кинематике рабочего органа. Подобные упрощения полезны для изолированного анализа возникающих эффектов, но часто оказываются неприменимыми при решении задач проектирования, где требуется оценка влияния гранулометрического состава, заполнения и режимов питания привода на производительность и энергопотребление технологического процесса.

В настоящее время благодаря развитию вычислительной техники метод дискретных элементов (DEM) стал распространенным инструментом для описания динамики сыпучей среды как совокупности взаимодействующих частиц [1]. DEM позволяет учитывать микроструктуру, множественные контакты, реологию, диссипацию энергии и перестройку структуры насыпи. Однако на практике в существующих DEM пакетах (Ansys Rocky, EDEM и др.) моделирование сыпучей среды часто строится при предписанной кинематике контактных поверхностей рабочих тел.

Двусторонняя связь между сыпучей средой и динамикой рабочего органа может быть реализована через использование сторонних пакетов или внешнего кода. К примеру, такие сценарии можно реализовать при сов-

местном использовании Ansys Rocky с Ansys Motion (двусторонняя связь DEM и многотельной динамики). Тем не менее, организация взаимодействия трех рассматриваемых подсистем представляется тяжело осуществимой в рамках предусмотренных пакетом средств.

Целью данной работы является создание модели вибрационной машины, объединяющей DEM-модель сыпучей среды; модель рабочего органа как упруго закрепленного тела; модель дебалансного вибровозбудителя на основе асинхронного электродвигателя. Результаты моделирования позволяют анализировать кинематику, силовые и энергетические показатели вибрационного оборудования, проводить численные эксперименты по сравнению различных режимов колебаний, включая оценку эффективности вибрационных процессов транспортирования, разделения, перемешивания.

Архитектура модели. Рассматривается плоская (двумерная) модель, которую можно представить как вертикальный срез реальной трехмерной системы вдоль технологической оси движения материала. Частицы обрабатываемого материала моделируются кругами, а их масса и момент инерции соотносятся с трехмерной интерпретацией, что позволяет сопоставлять расчетные массы и моменты инерции частиц с реальными. Рабочий орган представляет собой твердое тело, при этом его контактная граница дискретизируется набором частиц в виде отрезков. Таким образом, рабочий орган со сложной границей представляется как кластер, объединяющий несколько таких частиц. Контактные и внешние силы вычисляются на уровне отдельных частиц, затем приводятся к центру масс кластера для интегрирования уравнений его движения как твердого тела. Полученные координаты кластера (поступательные перемещения и угол поворота), распространяются на входящие в него частицы. Такой подход позволяет моделировать различную геометрию рабочего органа путем добавления большего числа частиц. К примеру, возможно моделирование сита грохота при помощи отрезков, установленных на некотором расстоянии друг от друга (рис. 2).

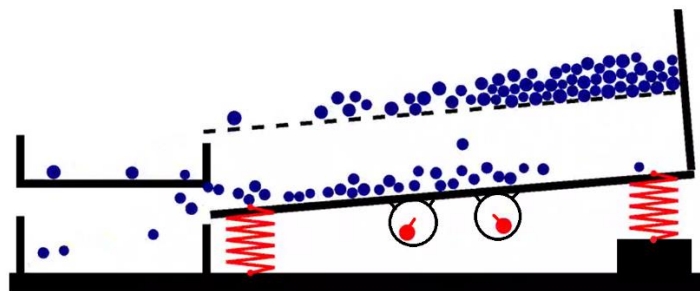


Рис. 2. Моделирование процесса грохочения

Упругий подвес рабочего органа в модели задается системой пружинно-демпферных связей между одной из частиц кластера рабочего органа и неподвижной частицей, представляющей основание. Каждая связь рассматривается как пара перпендикулярных линейных упруго демпфирующих элементов: нормального (в направлении сжатия-растяжения) и касательного (в направлении сдвига). Для каждого направления задаются неза-

висимые параметры жесткости и вязкого демпфирования, а также длина в ненагруженном состоянии.

Вибровозбудитель описывается как подсистема, включающая дебаланс и двигатель. Для описания динамики асинхронного электродвигателя используется Т-схема замещения. Так в модели на каждом шаге интегрирования учитывается связь между скоростью вращения, электромагнитным моментом и механической нагрузкой на валу двигателя, что позволяет оценивать активную и реактивную мощности, а также сравнивать режимы по потребляемой и полной электрической мощности. Дебаланс при вращении под действием момента двигателя создает инерционные силы, которые прикладываются к частице рабочего органа в точке крепления двигателя. Также при решении уравнений динамики вращения дебаланса учитывается и кинематика точки закрепления вибровозбудителя, что позволяет описывать такие нелинейные эффекты, как самосинхронизация нескольких вибровозбудителей.

Вывод. Разработана комплексная математическая модель вибрационной машины с учетом двусторонней связи между подсистемами "рабочий орган - вибровозбудитель - материал" [2]. Модель включает DEM-описание обрабатываемого материала, представление рабочего органа как кластера контактных примитивов с упруго установленного на неподвижном основании, а также электромеханическую модель дебалансного вибровозбудителя. Результаты моделирования позволяют проводить анализ кинематики, силовых и энергетические показателей вибрационного оборудования, проводить численные эксперименты по сравнению различных режимов колебаний, включая оценку эффективности вибрационных процессов транспортирования, разделения, перемешивания [3].

Список литературы

1. Cundall P.A., Strack O.D.L. A distinct element model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979. – Vol. 29. – № 1. – P. 47–65.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025692769 Российская Федерация. Программа для численного моделирования вибрационной машины с дебалансными вибровозбудителями при обработке сыпучей среды: заявл. 12.11.2025 : опубл. 24.11.2025 / И.П. Лян, Г.Я. Пановко; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им А.А. Благонравова Российской академии наук.
3. Лян, И.П. Численное Моделирование взаимодействия рабочего органа вибрационной машины с сыпучей средой // *Завалишинские чтения 25: сборник докладов XX Международной конференции по электромеханике и робототехнике*, Санкт-Петербург, 15–16 апреля 2025 года. – Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2025. – С. 114-118.

УДК 622.23.05:004.8

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СОРТИРОВКА: РАЗРАБОТКА ПРОСТОГО АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ СВЕТЛЫХ И ТЕМНЫХ КАМНЕЙ НА PYTHON

С.А. Майоров¹, М.А. Новгородов¹

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Представлен простой и эффективный алгоритм бинарной классификации камней на светлые и темные на основе методов цифровой обработки изображений. Алгоритм реализован на языке программирования Python с использованием библиотек OpenCV и NumPy. В основе лежит автоматическая пороговая бинаризация по методу Оцу, применяемая после преобразования изображения в градации серого и гауссова сглаживания. Предлагаемое решение ориентировано на системы компьютерного зрения в горнодобывающей и перерабатывающей отраслях, где оно демонстрирует низкие вычислительные требования и высокую точность при условии стабильного освещения. Такой подход позволяет минимизировать затраты на оборудование и облегчить внедрение в производственные процессы.

Ключевые слова: компьютерное зрение, обработка изображений, OpenCV, метод Оцу, бинаризация, сортировка сыпучих материалов, горнодобывающая промышленность, Python.

AUTOMATIC SORTING: DEVELOPMENT OF A SIMPLE ALGORITHM FOR LIGHT AND DARK STONE RECOGNITION IN PYTHON

S.A. Mayorov, M.A. Novgorodov

The article presents a simple and effective algorithm for binary classification of stones into light and dark categories based on digital image processing methods. The algorithm is implemented in Python using the OpenCV and NumPy libraries. It employs Otsu's automatic thresholding binarization following grayscale conversion and Gaussian smoothing. The proposed solution is suitable for computer vision systems in the mining and processing industries, characterized by low computational demands and high accuracy under stable lighting conditions. This approach minimizes equipment costs and facilitates integration into production workflows.

Keywords: computer vision, image processing, OpenCV, Otsu method, binarization, bulk material sorting, mining industry, Python.

В горнодобывающей и перерабатывающей промышленности одной из актуальных задач является автоматизация сортировки сыпучих материалов по оптическим признакам. Разделение камней на светлые (известняк, доломит, кварцит) и тёмные (базальт, гранит, рудные породы) фракции позволяет оптимизировать технологические процессы, повысить качество продукции и снизить затраты. Традиционные методы сортировки (ручная, механическая) имеют низкую производительность и зависят от человеческого фактора.

Современные системы компьютерного зрения, основанные на использовании камер и алгоритмов обработки изображений, предлагают значительные преимущества в плане скорости и точности. Однако многие из них требуют мощных вычислительных ресурсов, что делает их внедрение затруднительным для малых и средних предприятий. В этой связи цель настоящей работы заключается в разработке минималистичного алгоритма, который мог бы быть реализован на недорогом оборудовании, таком как веб-камера или промышленная камера в сочетании с одноплатным компьютером типа Raspberry Pi или обычным персональным компьютером. Такой подход не только снижает барьеры входа, но и демонстрирует,

как классические методы цифровой обработки могут решать реальные производственные задачи с минимальными вложениями [1].

Разработанный алгоритм опирается на принципы классической пороговой сегментации изображений и включает в себя следующие этапы.

Загрузка изображения и преобразование в градации серого. Исходное цветное изображение преобразуется в оттенки серого, что упрощает дальнейшую обработку и снижает объем вычислений.

Применение фильтра Гаусса для подавления шумов. Для повышения качества изображения применяется гауссово сглаживание, которое эффективно устраняет случайные шумы, вибраций конвейера или неидеального освещения. Параметры фильтра (размер ядра и стандартное отклонение) подбираются эмпирически, чтобы сохранить контуры объектов без чрезмерного размытия [2].

Автоматический расчет оптимального порога бинаризации методом Оцу. Метод Оцу, представляет собой статистический подход к выбору порогового значения, максимизирующего межклассовую дисперсию на гистограмме изображения. Это позволяет оптимально разделить пиксели на два класса — "полезные" (объекты) и "фоновые" — с учетом особенностей освещения и распределения яркостей. В отличие от фиксированных порогов, метод Оцу адаптируется к каждому изображению, что повышает надежность алгоритма [3].

Бинаризация и поиск внешних контуров объектов. После определения порога изображение бинаризуется, превращаясь в черно-белое представление. Затем с помощью функций библиотеки OpenCV выявляются внешние контуры, соответствующие отдельным камням на конвейере [4].

Классификация контуров. Для каждого выявленного контура вычисляется средняя яркость пикселей внутри маски. Если средняя яркость превышает 127 (половина шкалы от 0 до 255), объект классифицируется как "светлый"; в противном случае — как "темный".

Тестирование алгоритма было проведено на наборе из 80 изображений, включающем смесь фракций размером 20–50 мм под различными условиями освещения. Образцы были получены с использованием стандартной веб-камеры в лабораторных условиях [5]. Результаты показали:

- при равномерном дневном свете точность классификации достигала 92-96 %, что подтверждает эффективность метода в идеальных условиях.
- в присутствии теней и бликов точность снижалась до 83-87 %, без применения дополнительной предобработки, такой как коррекция освещения.

Эти показатели подчеркивают, что алгоритм хорошо справляется с базовыми задачами, но требует доработки для более сложных сред.

Несмотря на преимущества, метод имеет определенные ограничения, связанные в первую очередь с неравномерным освещением, наличием пыли и бликов, которые могут исказить гистограмму яркостей и снижать точность бинаризации. Кроме того, алгоритм предполагает монохроматическую классификацию и не учитывает цветовые нюансы, что может быть недостатком для материалов с близкими оттенками.

В перспективах развития целесообразно рассмотреть:

- адаптивную пороговую обработку, где порог рассчитывается локально для разных частей изображения;
- анализ в цветовом пространстве HSV (Hue-Saturation-Value), позволяющем учитывать не только яркость, но и цветовые характеристики для более точной классификации;
- интеграцию легких нейронных сетей, для обработки сложных сценариев, где классические методы недостаточны, что позволит расширить возможности без значительного увеличения вычислительных затрат.

Заключение.

Разработанный алгоритм убедительно демонстрирует, что классические методы компьютерного зрения, такие как пороговая бинаризация по Оцу, способны эффективно решать практические задачи сортировки сыпучих материалов при минимальных ресурсах. В будущем его можно дополнить нейронными сетями для распознавания более сложных характеристик, включая форму, текстуру. Реализация алгоритма занимает менее 100 строк кода, что делает его доступным для студентов и инженеров, желающих освоить основы обработки изображений. Он легко масштабируется и может послужить основой для создания промышленных прототипов в горнодобывающей отрасли.

Список литературы

1. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Э. Цифровая обработка изображений. / пер. с англ. П. А. Чочиа, Л. И. Рубанова. – М. : Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Брэдски Г., Кэлер А. Изучение OpenCV : библиотека компьютерного зрения на языке Python / пер. с англ. А. А. Слинкин. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 560 с.
3. Оцу Н. Метод выбора порога из гистограмм уровней серого // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Т. SMC-9, № 1. – С. 62–66. (рус. перевод в сб.: Методы автоматического анализа изображений / под ред. В. А. Сойфера. – М., 1980).
4. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений: учеб. пособие. – 2-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
5. Матвеев А. И., Жданова А. В. Практикум по цифровой обработке изображений в OpenCV : учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 128 с.

УДК 622.23.05:004.8

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ: ПРОГРАММА ДЛЯ ПОДСЧЕТА ОБЪЕМА ГОРНОЙ МАССЫ В ОТВАЛЕ ПО ЗАМЕРАМ ДРОНА

С.А. Майоров¹, Л.Д. Фролова¹

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Рассматривается использование беспилотника в качестве сбора данных для дальнейшего расчета объема горной массы в отвале. Построение цифровой модели на основании данных, полученных при съёмке с БПЛА. Рассмотрены два метода подсчёта объема горной массы.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), расчет объема, цифровая модель, компьютерное зрение.

GEOMETRIC CALCULATION: A PROGRAM FOR CALCULATING THE VOLUME OF ROCK MASS IN A DUMP USING DRONE MEASUREMENTS

S.A. Mayorov, L.D. Frolova

This article discusses the use of a drone as a data collection tool for further calculation of the volume of rock mass in a dump. The construction of a digital model based on data obtained from drone photography. Two methods for calculating the volume of rock mass are considered.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), volume calculation, digital model, computer vision.

Точный подсчёт объема горной массы в отвале важен, так как позволяет оценить расходы на её транспортировку, обеспечить безопасность персонала горнодобывающего комплекса. Раньше, чтобы замерить отвал, использовали методы тахеометрической съёмки и GNSS-приёмника в ручном режиме, в обоих методах персоналу приходилось обходить отвал, что не безопасно, подсчёт был неточен и замерялся неделями. Для замера объема горной массы используют БПЛА. Они делают сотни снимков определённого отвала, что позволяет с помощью специализированного ПО преобразовать изображения во множество точек, на которых зафиксированы каждая впадина и каждая неровность, что помогает создать цифровую модель [1]. На основании полученных данных можем произвести необходимые расчёты.

Для решения задачи используют БПЛА со встроенным GNSS-приёмником, чтобы обеспечить съёмку снимков с высокоточными координатами центров проекции. Результаты съёмки включают в себя изображения, набор данных о высоте, точных координатах, углах проекции, что позволяет ПО с высокой точностью провести автоматизированную последовательность обработки снимков, основанную на алгоритмах компьютерного зрения, такой процесс называется фотограмметрическим конвейером. Распространенное ПО в российской практике – Agisoft Metashape [2].

Процесс программной обработки включает в себя следующие этапы:

1. Импорт данных и подготовка;

2. Выравнивание снимков на основании алгоритма Structure from Motion;

Программа находит общие точки на разных снимках (например, угол камня, край лужи). Для этого используются специальные «узнаватели»- дескрипторы, самый известный из которых называется SIFT (Scale-Invariant Feature Transform). Они позволяют найти одну и ту же точку, даже если снимки сделаны с разных ракурсов и в разном масштабе. Далее программа оценивает положение камер и строит разреженное облако точек. Методом наименьших квадратов подбираются такие координаты камер и таких точек, чтобы лучи от всех камер сошлись в этих точках с минимальной ошибкой [3].

3. Построение плотного облака на основании алгоритма Multi-View Stereo;

Программа получает данные, где находилась камера для каждого пикселя, поэтому она может рассчитать, где на местности этот пиксель находится, и вычислить его трёхмерные координаты [4].

4. Построение цифровой модели рельефа;

Программа интерполирует плотное облако в цифровую модель рельефа-это регулярная сетка высот, где каждому пикселю присвоено значение высоты. Далее программа преобразует исходные снимки и объединяет их в единое изображение.

5. Экспорт результатов.

Начинается этап вычисления объема горной массы. Существует два основных геометрических подхода к расчету объема по данным БПЛА:

1. Метод сравнения цифровых моделей [5].

Объем вычисляется как интеграл разности высот между финальной поверхностью (отвал) и исходной поверхностью (основание) в каждой ячейке регулярной сетки:

$$V = \sum_{i=1}^n S_{\text{яч}} \cdot |Z_{\text{отвал}} - Z_{\text{осн}}|$$

2. Метод триангуляции относительно базовой плоскости.

Применяется, когда данные о первоначальном рельефе отсутствуют. В ПО строится TIN-поверхность (нерегулярная триангуляционная сеть) по облаку точек. Пользователь задает базовую плоскость: среднюю-для изолированных насыпей или по минимальной отметке-для штабелей, примыкающих к бортам.

Объем геометрического тела между TIN-поверхностью и плоскостью вычисляется путем разбиения пространства на призмы и пирамиды.

Заключение

Современные программные продукты позволяют полностью автоматизировать процесс вычисления кубатуры, выдавая результат в виде готового отчета с контролем сходимости по опорным точкам.

Список литературы

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. - М.: ЦНИИГАиК, 2002.-100 с.
2. Инструкция по производству маркшейдерских работ (РД 07-603-03). Серия 07. Выпуск 15.-М.: НТЦ по безопасности в промышленности, 2003.
3. Колесатова О. С., Красавин А. В. Использование БПЛА для съёмки объектов открытых горных работ // Журнал «Глобус: геология и бизнес».- 2020.-№10.
4. Лобанов А. Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов.- 7-е изд., перераб. и доп.- М.: Недра, 1984.-552 с.
5. Назаров А. С., Харченко С. В. Цифровые методы обработки информации в фотограмметрии. – М.: Недра, 2018.- 380 с.

УДК 622.23.05:004.8

РАЗРАБОТКА TELEGRAM-БОТА ДЛЯ ОПОВЕЩЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРА О ПРОСТОЕ ЭКСКАВАТОРА

С.А. Майоров, Р.Е. Костюнин

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Предложена концепция telegram-бота, которая решает проблему с простоем экскаватора, путем получения события простоя от системы телеметрии/диспетчеризации и отправки диспетчеру уведомления.

Ключевые слова: экскаватор, простой, диспетчеризация, телеметрия, Telegram-бот, уведомление.

DEVELOPMENT OF A TELEGRAM-BOT TO NOTIFY A DISPATCHER ABOUT EXCAVATOR DOWNTIME

S.A. Mayorov, R.E. Kostyunin

This article proposes a concept for a Telegram bot that solves the problem of excavator downtime by receiving downtime events from the telemetry/dispatching system and sending notifications to the dispatcher

Keywords: excavator, downtime, dispatching, telemetry, Telegram bot, notification.

Проблема контроля экскаватора на горных работах всегда связана с достоверностью и скоростью передачи информации. Повседневный голосовой обмен по радиосвязи часто зависит от инициативы машиниста, который может несвоевременно доложить о простое или скрыть реальную длительность остановки. Необходимо минимизировать человеческий фактор на этапе обнаружения проблемы, отказавшись от постоянного мониторинга интерфейса диспетчеризации, в пользу инструмента, который всегда под рукой и доступен диспетчеру – мобильный телефон.

В качестве платформы был выбран мессенджер Telegram благодаря удобным средствам разработки и наличию открытого API и возможности быстрой интеграции с внешними сервисами. Для разработки был выбран язык программирования Python и библиотека Aiogram. Данная библиотека была выбрана из-за того, что обладает асинхронностью, что позволяет боту

обрабатывать сотни уведомлений от различной техники одновременно, без очередей.

Основная задача разработки состоит в создании полноценного шлюза между телеметрией машины и сотрудником. Система работает по следующей логике: на сервере обрабатываются данные с датчиков экскаватора (например, датчик работы двигателя или GPS-трекер). Как только фиксируется простой длительностью более 10 минут в рабочее время, сервер системы телеметрии отправляет запрос на webhook сервиса бота, и после чего бот через Telegram API доставляет уведомление.

Важным аспектом бота является безопасность, чтобы посторонние лица не получили доступ к управлению, для этого используется система авторизации по белому списку, то есть бот проверяет уникальный идентификатор пользователя (user id) при входящем сообщении, если user id отсутствует в базе доверенных диспетчеров, то бот игнорирует команды.

Когда бот получает сигнал о простое, он отправляет диспетчеру сообщение, в нем содержится информация: бортовой номер экскаватора, текущие координаты (геолокация), время начала простоя и ФИО машиниста.

Для обеспечения обратной связи, простой отправки уведомления недостаточно, надо удостовериться, что диспетчер увидел проблему и поэтому к сообщению прикрепляется Inline-клавиатура (кнопки прямо под текстом). Для этого предусмотрены 2 основные кнопки (рис. 1):

1) “Принято в работу” – нажимая на эту кнопку, диспетчер подтверждает получение информации о проблеме, и бот отправляет обратно на сервер флаг, что уведомление прочитано, а в базе ставится отметка времени;

2) “Причина выяснена” – Нажимается после того, как диспетчер связался с машинистом по радиосвязи и установил обстоятельство простоя. Такое действие закрывает инцидент в базе, фиксируя, что управленческое решение принято.

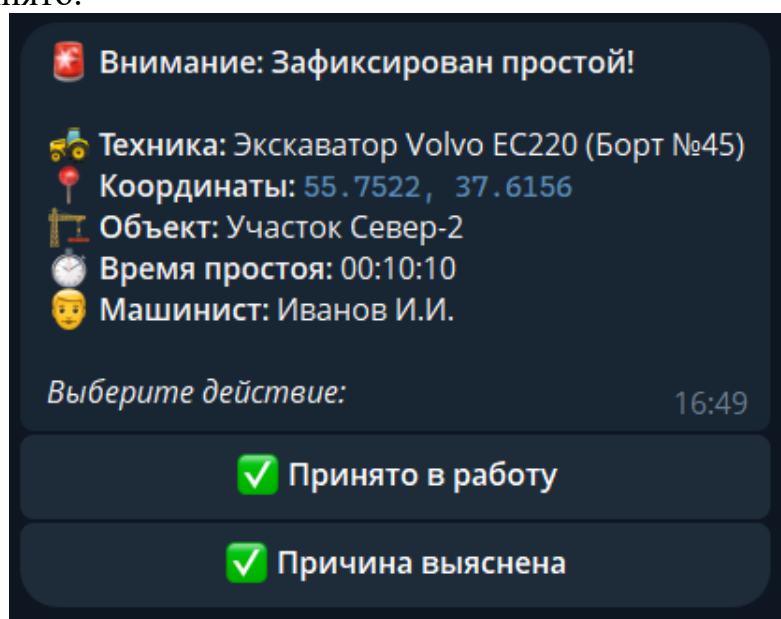


Рис. 1. Изображение работы кнопок

Такой подход позволяет обеспечить оперативную передачу информации о простое экскаватора от системы телеметрии к диспетчеру. Так как

используется API Telegram, это обеспечивает передачу данных в формате JSON, что позволяет обрабатывать и переводить всю полученную информацию в читаемый вид. Использование открытого API обеспечивает высокую масштабируемость системы, что даёт возможность в будущем легко расширить функционал бота, например, для отправки ежемесячных отчетов руководству или интеграция с другими системами предприятия без переработки архитектуры.

Заключение

В итоге получается система контроля, где для диспетчера исключается необходимость мониторинга и рутинного поиска простаивающей техники. Диспетчер получает уведомление о простое и выясняет причины, и фиксирует решение проблемы. Это позволяет принимать оперативно управленческие решения и создаёт цифровую историю инцидентов для дальнейшего анализа. Это решение достаточно просто интегрировать в существующую IT-инфраструктуру предприятия без приобретения дорогостоящего программного обеспечения.

Список литературы

1. Telegram Bot API documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://core.telegram.org/bots/api> (дата обращения: 17.02.2026).
2. Aiogram documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.aiogram.dev/en/v3.24.0/> (дата обращения: 17.02.2026).
3. Аннаев К., Аннабердиев А. «Технологии мониторинга и контроля в горных работах: инновационные подходы для повышения безопасности и эффективности» // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2025. – № 2-1. – С. 56–57.
4. Гирев Р. А. «Диспетчеризация работы горнотранспортного комплекса» // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. – № 62. – С. 215-217.

УДК 622.23.05

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГАЗООТСАСЫВАЮЩИХ ВЕНТИЛЯТОРОВ НА БАЗЕ ПРИРОДОПОДОБНЫХ СОРАЗМЕРНОСТЕЙ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ОЧИСНОЙ ЗАБОЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Е. С. Нурхожаев¹, В.Н. Макаров², д-р. техн. наук, проф.,

С. А. Попов², аспирант, Р.Г. Ахметов²

¹ АО «Костанайские минералы», г. Житикара, Республика Казахстан,

² ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

Классические аэродинамические схемы центробежных вентиляторов в настоящее время достигли своего теоретического предела по аэродинамической нагруженности, что делает актуальной задачу повышения их аэродинамических параметров.

Ключевые слова: профиль, лопатка, рабочее колесо, газоотсасывающий вентилятор, источник, циркуляция скорости, циркуляции ускорения.

THE USE OF GAS-SUCTION FANS BASED ON NATURE-LIKE STRUCTURES IN ORDER TO INCREASE THE LOAD ON THE BOTTOM FACE OF COAL MINES

E. S. Nurkhozhaev, V.N. Makarov, S. A. Popov, R.G. Akhmetov

The classical aerodynamic schemes of centrifugal fans have now reached their theoretical limit in terms of aerodynamic load, which makes the task of increasing their aerodynamic parameters urgent.

Keywords: profile, blade, impeller, exhaust fan, source, velocity circulation, acceleration circulation.

Введение. Применение комбинированной схемы проветривания с использованием газоотсасывающих вентиляторов типа УВЦГ за 20 лет позволило повысить нагрузку на очистной забой газообильных угольных шахт с 5–6 тыс. т в сутки до 30–35 тыс. т в сутки. Однако увеличение глубины выработок угольных шахт и интенсификация выделения метана требуют дальнейшего увеличения давления газоотсасывающих вентиляторов, ограниченного резким падением их экономичности, что обуславливает актуальность поиска новых путей повышения аэродинамической нагруженности при сохранении экономичности [1, 2].

Методология и методы исследований. Методология исследований базируется на комплексном подходе к анализу аэродинамических процессов взаимодействия воздушного потока с вращающимися профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора и с «машущим крылом» птицы в полете, на изучении механизма обеспечения плавности, безотрывного обтекания крыла в широком диапазоне изменения его формы и траектории полета птицы. В основу методов исследований положены фундаментальные закономерности течения сплошной среды с учетом неразрывности, взаимосвязи, скорости и ускорения воздушного потока с его диффузностью на основе аэродинамической аналогии.

Результаты исследований. За базу «механистического» природоподобия аэродинамического взаимодействия профилей лопаток рабочих ко-

лес газоотсасывающих вентиляторов и воздушного потока принята научная гипотеза Н. Е. Жуковского, согласно которой в точке схода патoka воздуха с профиля лопатки его скорость должна быть равна нулю. Однако при изменении траектории полета, т. е. аэродинамической нагруженности крыльев, природа дала птицам возможность изменять форму, размер, положение отдельных частей крыльев [3, 4].

Формулу, связывающую диффузорность потока воздуха в газоотсасывающем вентиляторе, аэродинамические и геометрические характеристики профиля лопаток его рабочего колеса и воздушного потока, а также интенсивность источника на поверхности лопаток получим в виде:

$$D = 1 - \frac{\partial(\bar{V} - \bar{q}(\bar{x}))}{\partial \bar{x}} = 1 + \frac{\partial \bar{y}(\bar{x})}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{q}(\bar{x})}{\partial \bar{x}}, \quad (1)$$

где $\bar{V} = \frac{V}{u}$ – приведённая скорость воздуха на профиле; u – скорость на конце

профиля, м/с; V – скорость воздуха на профиле, м/с; $\bar{q}(\bar{x}) = q(\bar{x})/Q$ – приведенный расход источника на поверхности профиля; Q – производительность вентилятора, м³/с; $q(\bar{x})$ – интенсивность (расход) источника на поверхности профиля, м³/с; $\bar{x} = x/b$, $\bar{y} = y/b$ – приведенные координаты профиля; b – длина хорды профиля, м; x , y – координаты профиля, м.

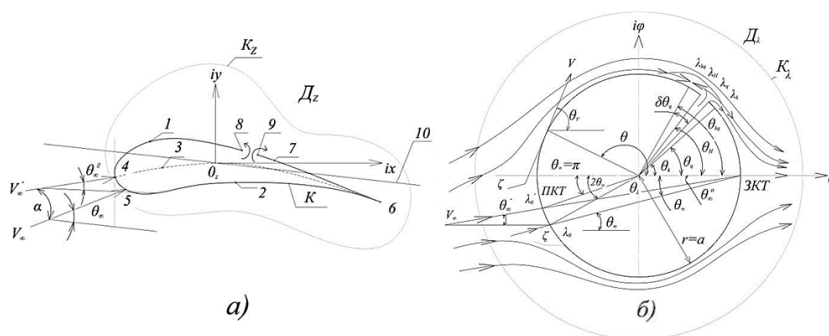


Рис. 1. Природоподобный профиль – а и его биголоморфное преобразование в Римановой плоскости D_λ

С учетом биголоморфного преобразования (см. рис. 1) формулу для определения аэродинамических параметров воздушного потока, обтекающего природоподобный профиль в Римановой плоскости получим в виде:

$$V(\theta) = -4V_\infty i e^{-(\theta_\infty - \frac{\theta_0}{2} + \frac{\theta_q}{2} + \theta)i} \frac{\sin(\theta - \theta_0) \sin(\theta - \theta_{kq})}{\sin(\theta - \theta_q)} \sin \theta, \quad (2)$$

где V_∞ – скорости набегающего потока с углом атаки α , м/с; θ_∞ – угол вектора скорости на бесконечности в областях D_z и D_λ с осями $O_z x$ и $O_\lambda \varphi$, рад; $\theta_0 = \pi + 2\theta_\infty + \theta_q - \theta_{kq}$ – полярный угол положения передней критической точки профиля лопатки (ПКТ) на цилиндре в Римановой плоскости $D_\lambda(\theta_{\text{ПКТ}})$, с учётом смещения от действия источника q , рад; θ_q – полярный угол положения точки центра канала λ_q источника q на Римановой плоскости D_λ ; θ – текущий угол положения точек $\lambda_q = r e^{i\theta}$ на цилиндре в Рима-

новой плоскости D_λ , рад; θ_{kq} – полярный угол положения точки полного торможения потока на цилиндре от действия источника $q(\lambda_{kq})$, в Римановой плоскости D_λ .

Коэффициент эффективности силового аэродинамического взаимодействия воздушного потока с профилями лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора от действия источника получим в виде:

$$K^y(\lambda_q) = \frac{\sin(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \sin(\theta_\infty - \theta_q)}{\cos(\theta_\infty - \theta_{kq}) - \cos(\theta_\infty - \theta_q)}. \quad (3)$$

Для верификации уточнённой формулы Н. Е. Жуковского по предложенной методике была спроектирована аэродинамическая схема Ц125–18Пс источником на тыльной и стоком на рабочей поверхностях хвостовой части профилей лопаток, на базе которой изготовлен и прошел испытания опытно-промышленный образец газоотсасывающего вентилятора УВЦГ-9П, характеристика которого представлена на рис. 2.

Рост коэффициента давления, т. е. аэродинамической нагруженности газоотсасывающего вентилятора УВЦГ-9П, составил не менее 30% по отношению к выпускаемому в настоящее время вентилятору УВЦГ9 при повышении КПД с 0,75 до 0,86.

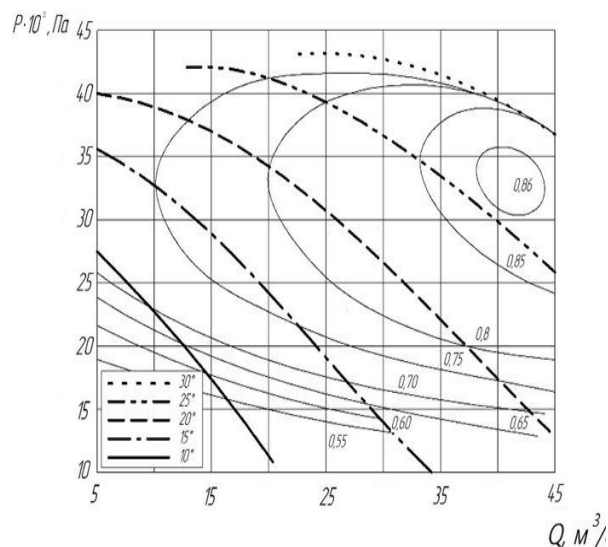


Рис. 2. Вид на лопатку рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора Ц125–18П
Аэродинамическая характеристика вентилятора

Выводы. Спроектированный и изготовленный на базе предложенного механистического подхода к природоподобной соразмерности газоотсасывающий вентилятор УВЦГ-9П подтвердил его высокую достоверность и эффективность. Рост коэффициента аэродинамической нагруженности с 0,96 до 1,25 составил 30%, при этом КПД увеличился с 0,75 до 0,86, что превышает показатели наиболее совершенных на настоящее время вентиляторов английской фирмы Keith Blacman Limited типа 95M.

Список литературы

1. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н., Ажмухамедов И.М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. №1(47). С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
3. Малашкина В. А. Определение режимов работы дегазационных установок угольных шахт с участками подземных газопроводов из композитных материалов // ГИАБ. 2018. Спец. вып. 19. С.1–12.
4. Fair R., Laar J.H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // South African Journal of Industrial Engineering November. 2021.Vol. 32. No. 3. P. 42–51. DOI: 10.7166/32-3-2616
5. Makarov N. V., Makarov V. N. Additive mathematical modeling and development of high-pressure adaptable local ventilation fans // Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 262(1). Art. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012045

УДК 66.047.544

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ РУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ ГОРНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Е. С. Нурхожаев¹, В.Н. Макаров², д-р. техн. наук, проф., С. А. Попов², аспирант,
Р.Г. Ахметов²**

¹ АО «Костанайские минералы», г. Житикара, Республика Казахстан,

² ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, РФ

Проведенные на шахтных печах АО «Костанайские минералы» экспериментальные исследования и компьютерный анализ аэродинамических процессов подтвердили гипотезу о преобладающем влиянии концентрации, медианного диаметра, дисперсии, температуры и влажности пыли, на эффективность пылеулавливания, существенное влияние на температуру и влажность рудной пыли в пневмосушиле параметров прямотока. В целях снижения концентрации пыли на выходе из печи, повышения эффективности пылеулавливающего оборудования предложено встраиваемое непосредственно в сушило устройство, работающее по принципу инерционно-гравитационной, термической сепарации. Для обеспечения оптимальных параметров рудной пыли на выходе из шахтной печи путем приведения уравнения стоксовского движения двухфазной среды к однопараметрической задаче по фактору релаксации пыли разработана математическая модель аэросепарации частиц пыли непосредственно в сушиле шахтной печи в функции от расхода, температуры теплоносителя и геометрических параметров аэросепаратора. Применение аэросепаратора, встроенного в сушило позволило повысить экологическую эффективность шахтной печи до 75 – 85 %, тем самым снизив не менее чем в 3 раза концентрацию аэрозоля на выходе из неё. Предложенная конструкция аэрационного сепаратора в настоящее время используется для повышения экологической эффективности ВШСП №9 цеха ДиСхр АО «Костанайские минералы».

Ключевые слова: Экологическая эффективность, аэросепарация, медианный диаметр, сушило, входной коллектор, сила Стокса, Архимеда, аэрозоль.

INCREASING THE EFFICIENCY OF DRYING ORE MATERIALS IN SHAFT FURNACES OF MINING AND METALLURGICAL ENTERPRISES

E. S. Nurkhozhaev, V.N. Makarov, S. A. Popov, R.G. Akhmetov

Experimental studies and computer analysis of aerodynamic processes carried out at the mine furnaces of Kostanay Minerals JSC confirmed the hypothesis of the predominant influence of the concentration, median diameter, dispersion, temperature and humidity of dust on the efficiency of dust collection, a significant influence on the temperature and humidity of ore dust in the pneumatic dryer of the parameters of the direct flow. In order to reduce the concentration of dust at the outlet of the dryer as a result of increasing the efficiency of dust-collecting equipment, a device built directly into it, operating on the principle of inertial-gravitational, thermal separation, is proposed. To ensure optimal parameters of ore dust at the outlet of the mine furnace by reducing the Stokes equation of motion of a two-phase medium to a one-parameter problem on the dust relaxation factor, a mathematical model of the aeroseparation of dust particles directly in the dryer of the mine furnace as a function of the flow rate, coolant temperature and geometric parameters of the aeroseparator has been developed. The use of an aeroseparator built into the dryer made it possible to increase the environmental efficiency of the shaft furnace to 75-85%, thereby reducing the concentration of aerosol at the outlet by at least 3 times. The proposed design of the aeration separator is currently being used to improve the environmental efficiency of the HSE No. 9 of the DiShr workshop of Kostanay Minerals JSC.

Keywords: Environmental efficiency, aeroseparations, median diameter, dryer, inlet collector, Stokes force, Archimedes, aerosol.

Введение. Непрерывный, оперативный контроль соблюдения экологического законодательства, как основная тенденция государственной политики в области повышения эффективности, как технологических процессов, так и предприятий в целом ставит перед бизнесом трудно-разрешенные задачи: снижать объем выпускаемой продукции в силу недостаточной эффективности пылегазоочистного оборудования, либо искать качественно новые экологически эффективные технологии.

Для обеспечения требуемой степени отчистки необходимо определить и контролировать диапазон оптимального гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки, время фильтрации. Расчёт оптимальных параметров рукавного фильтра и всего двухступенчатого газоочистного устройства шахтной вертикальной сушильной печи, оптимальных режимов дымососа, обеспечивающих требуемый диапазон разрежений, в том числе и в шахтном сушиле, как пыле источнике, позволяет на базе экспертных оценок и статистического анализа обеспечить экономическую эффективность не менее 1,5 руб./1000 м³ отчищаемого газа, в сравнении с электро-фильтрами.

Методология. Новизна исследования экологической эффективности ВШСП заключается в разработке аэрационного сепаратора, обеспечивающего оптимальную совокупность параметров пыли на выходе из печи, соответствующую её максимальной экологической эффективности, то есть минимальной концентрации пыли в аэрозоли [4].

Кроме того, дополнительно аэрационные процессы сушки рудных материалов в сепараторе должны приводить физические параметры частиц рудной пыли, указанные выше, до значений, обеспечивающих максимальную эффективность пылегазоочистного оборудования.

Результаты исследования. Проведенные в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы» экспериментальные исследования показали, что в про-

цессе компрессионного механического давления происходит дополнительное дробление взвешенных частиц исходной руды [5].

На рис. 4 представлена схема ВШСП, реализующая модифицированный метод аэрационной сепарации для повышения экологической эффективности, содержащая загрузочное устройство 1, верхнюю проточную 2, нижнюю противоточную 3 части сушила, устройство выгрузки 4, входной коллектор 5 в газоотводящие каналы 6, с горизонтальным входом 7 в зоне схождения проточной и противоточной частей сушила, выполненный в виде вертикального диффузорного канала 8.

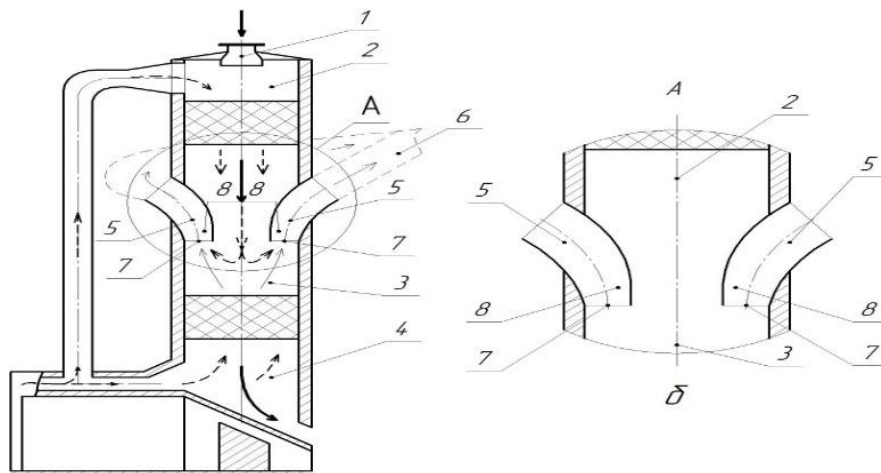


Рис. 1. Схема: а – ВШСП; б – устройства аэрационной сепарации пыли

Модифицированная математическая модель аэрационной сепарации в виде уравнения вертикального движения частицы пыли диаметром d_i в диффузорном канале входного коллектора газоотводящих каналов получена в виде:

$$\frac{m_i dV_{bi}}{dt} = 3\pi\mu d_i k \cdot \left[u(t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} + q\tau_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right] - \frac{\pi}{6} d_i^3 (\rho_i - \rho_r) q, \quad (1)$$

где V_{bi} – скорость i – ой частицы пыли по вертикальной оси сушила м/с; μ – динамическая вязкость теплоносителя, Па*с; k – коэффициент формы i – ой частицы пыли; $u(t) = \frac{Q_1 + Q_2}{S_k(h)}$ – скорость аэрозоля в диффузорном канале входного коллектора, м/с; $Q_1 + Q_2$ – расход теплоносителя прямотока и противотока соответственно м³/с; $S_k(h)$ – площадь диффузорного канала входного коллектора, м²; $h(t)$ – текущая высота диффузорного канала входного коллектора, м; $\tau_i = \frac{d_i^2 \cdot \rho_i}{18 \cdot \mu k}$ время релаксации i – ой частицы пыли, с; ρ_i, ρ_r плотность i – ой частицы пыли и теплоносителя соответственно кг/м³.

Минимальный диаметр аэрационно сепарируемых частиц пыли в функции от их положения в диффузорном канале входного коллектора с учетом (1) после преобразования получим в виде:

$$d_{mi}(h) = \sqrt{\frac{18\mu k}{\rho_{i(h)} - \rho_{r(h)}} \cdot \frac{q}{\left[u(h) \cdot e^{\frac{t}{\tau_i}} + q\tau_i(1 - e^{\frac{t}{\tau_i}}) \right]}}. \quad (2)$$

Заключение.

1. Экспериментальные исследования, проведенные в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы» и инженерный компьютерный анализ аэродинамических процессов в сушиле подтвердили гипотезу о преобладающем влиянии концентрации, медианного диаметра, дисперсии, температуры и влажности пыли, на качество пылеулавливания.

2. Сила Архимеда с учетом силы тяжести, действующая на рудную пыль в прямотоке, обуславливает снижение величины критерия Фруда и как результат существенный рост концентрации низкотемпературной влажной пыли из прямотока по отношению к концентрации высокотемпературной сухой пыли из противотока, на выходе из печи, что существенно снижает эффективность пылеулавливающего оборудования.

3. На базе принципа инерционно-гравитационной, термической аэросепарации предложена конструкция сепаратора, интегрированного в сушило печи и обеспечивающего эффективность печи 75 – 80 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kornilov G., Gazizova O., Bunin A., Bulanov, M., Karyakin AL. Improving the quality of voltage in the conditions of the oxygen-converter shop of metallurgical production (2019) Proceedings - ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, article №8949928, DOI:10.1109/ICOECS46375.2019.8949928.
2. Davydov S.Y., Valiev N. G., Tauger V.M. Effect of the Flow of Transported Bulk Material on Design Features of a Belt Conveyor (2019) Refractories and Industrial Ceramics, 60 (1), pp. 10-13. DOI: 10.1007/s11148-019-00301-5.
3. Lyaptsev, S.A. Classification of granular material in an impact with a separation surface/ Lyaptsev S.A., Davydov S.Y./Refractories and Industrial Ceramics. –2015.–Vol.55, № 6.–pp.570–572.
4. Кычкин А.В., Николаев А.В. Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей. Мехатроника, автоматизация, управление. 2021;22(3):115-123. <https://doi.org/10.17587/mau.22.115-123>.
5. Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // South African Journal of Industrial Engineering November. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42—51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

УДК 531.781.2.087.92

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОКАЗАНИЙ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТЕНЗОРОЗЕТКИ

В.В. Макарова^{1,2}, к.т.н., доцент, Ю.А. Лагунова^{1,2}, проф., д.т.н.,
В.С. Великанов^{1,2}, проф., д.т.н.

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург

Задачами тензометрических испытаний являются определение и фиксация напряжений, возникающих в металлоконструкциях, узлах и деталях. Для измерения напряжений применяются трехэлементные прямоугольные тензорозетки в тех случаях, когда хотя бы приблизительно известно направление главных напряжений на поверхности детали. В статье рассмотрены возможности программы для ЭВМ «Обработка показаний трехэлементной прямоугольной тензорозетки».

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, тензометрия, трехэлементная прямоугольная тензорозетка, программа для ЭВМ.*

CAPABILITIES OF THE SOFTWARE MODULE FOR PROCESSING READINGS OF A THREE-ELEMENT RECTANGULAR STRAIN GAUGE

V. V. Makarova, Yu. A. Lagunova, V. S. Velikanov

The objectives of strain gauge tests are to determine and record stresses arising in metal structures, assemblies and parts. To measure stresses, three-element rectangular strain gauges are used in cases where the direction of the main stresses on the surface of the part is at least approximately known. The article discusses the capabilities of the computer program "Processing the readings of a three-element rectangular strain gauge."

Keywords: *stress-strain state, strain gauge, three-element rectangular tensor grid, a computer program.*

Современные тенденции в развитии горнодобывающей отрасли диктуют необходимость постоянного совершенствования горных машин.

С целью исследования напряженно-деформированного состояния применяется тензометрический метод, который заключается в измерении линейных деформаций, возникающих в металлоконструкциях под воздействием внешних нагрузок [1]. Эти измерения, преобразуемые в величины напряжений, позволяют выявлять зоны концентрации напряжений, где может начаться образование трещин, а также позволяют прогнозировать срок службы конструкции с учетом усталостного износа.

Для определения механического напряжения, вызванного деформацией, применяются различные типы тензорезисторов, в том числе и трехэлементные тензорозетки [2]. Датчики предназначены для измерения деформаций деталей машин и конструкций или для использования в качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей. Датчик представляет трехэлементную прямоугольную розетку, в которой тензорезисторы расположены под углами 45° друг к другу (рис. 1) [1, 2].

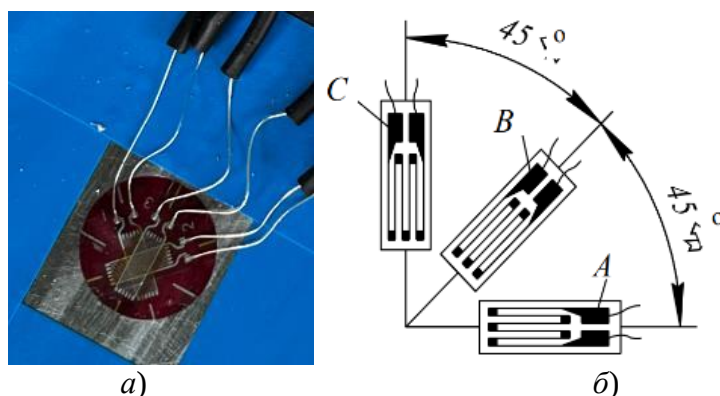


Рис. 1. Датчики и их расположение для проведения исследований
 а – внешний вид тензорезистора; б - прямоугольная трехэлементная тензорозетка

Трехэлементные прямоугольные розетки используют в тех случаях, когда хотя бы приблизительно известно направление главных напряжений на поверхности детали. Датчики *A* и *C* ориентируют по этим направлениям. Для прямоугольной трехэлементной розетки в соответствии с рис. 1 угловые направления датчиков имеют следующие значения $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\gamma = 90^\circ$.

Обработка показаний трехэлементной тензорозетки [2].

Первым этапом по результатам анализа данных определяются максимальные значения деформации по каждому датчику (для каждого канала) (табл. 1, ст. 3). Также записываем значения деформаций, соответствующих показанию времени 0 секунд (табл. 1, ст. 4). От полученных максимальных значений вычитаем значения деформации, соответствующих показанию времени 0 секунд. Значения деформаций, используемые для дальнейших расчетов, представлены в таблице 1, столбец 5.

Таблица 1 – Показания деформации по каждой точке, мВ

Точка	Угол	Максимальное значение деформации, ε_{max}	Значения деформации, соответствующих показанию времени 0 с., $\varepsilon(0)$	$\varepsilon_{max} - \varepsilon(0)$
1	ε_0	0,001263022	0,00104526	0,000218
	ε_{45}	0,000391972	0,000217762	0,000174
	ε_{90}	0,000130657	0,000043552	0,000087
2	ε_0	0,00052263	0,00034842	0,000174
	ε_{45}	0,001132365	0,001088812	0,000044
	ε_{90}	0,001698547	0,001611442	0,000087

Далее определяется направление главных напряжений для каждой точки по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \quad (1)$$

Далее определяются значения угла $\operatorname{tg} 2\varphi$, на который будет отличаться направление главных напряжений от первоначального направления осей датчиков.

Анализатор трёхэлементной тензорозетки

Параметры материала

Модуль упругости E (МПа): 210000.0 Коэффициент Пуассона μ : 0.27

Ввод данных деформации (двойной клик для редактирования)

Точка	Угол θ (°)	Макс. деформация (мВ)	Нач. деформация (мВ)	Разница $\epsilon_{\max} - \epsilon(0)$ (мВ)
1	0	0.001263022	0.00104526	0.000218
1	45	0.000391972	0.000217762	0.000174
1	90	0.000130657	0.000043552	0.000087
2	0	0.00052263	0.00034842	0.000174
2	45	0.001132365	0.001088812	0.000044
2	90	0.001698547	0.001611442	0.000087

+ Добавить точку Удалить точку Очистить все Импорт CSV Экспорт CSV

Выполнить расчет

Результаты расчета

Точка	Угол главных	Главная деформ	Главная деформация	Главное напряжен	Главное напряжен	Макс. касательное на
1	9.22	0.00022130	0.00008357	55.237	32.464	11.3867
2	58.28	0.00022804	0.00003327	53.690	21.483	16.1032

Рис.2. Интерфейс программного модуля

Следующим этапом определяются главные относительные деформации для каждой точки по формулам:

$$\epsilon_{\max} = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_{90})^2} \quad (2)$$

$$\epsilon_{\min} = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_{90})^2} \quad (3)$$

Определяем главные напряжения для каждой точки по формулам:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_{\max} + \mu \cdot \epsilon_{\min}) \quad (4)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_{\min} + \mu \cdot \epsilon_{\max}) \quad (5)$$

где E – модуль упругости для стали 210000 МПа; μ – коэффициент Пуассона, применяя к грунтам $\mu = 0,27$ для крупнообломочных грунтов.

Последним этапом вычисляем максимальные касательные напряжения для каждой точки по формуле:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (6)$$

Для автоматизации процесса обработки показаний результатов напряженно-деформированного состояния с применением трехэлементной прямоугольной тензорозетки разработан программный модуль, позволяющий на основе значений амплитуды сигнала, полученных при фиксации мгновенных значений с тензодатчиков в подпрограмме «Многоканальный осциллограф» программного обеспечения ZETLAB TENSO, определить главные и касательные напряжения для каждой точки исследования (рис. 2) [3]. Программа позволяет оценить напряженное состояние на по-

верхности детали с применением показаний трехэлементной прямоугольной тензорозетки, когда приблизительно известно направление главных напряжений. Язык программирования: Python; Тип ЭВМ: IBM PC-совместимый ПК; ОС: Windows 10 и выше; Объем программы для ЭВМ: 8 МБ. Программа может быть использована при освоении обучающимися следующих дисциплин – «Основы тензометрии», «Основы научных исследований», выполнении выпускных квалификационных и научно-исследовательских работ, а также может быть полезной при проведении научно-исследовательских работ по обследованию металлоконструкций горных машин и оборудования.

Список литературы

1. Макарова В. В. Повышение эффективности функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора в условиях ПАО «Ураласбест» : специальность 2.8.8 «Гео-технология, горные машины» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Макарова Валерия Викторовна, 2024. – 197 с.
2. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026611419 Российская Федерация. Обработка показаний трехэлементной прямоугольной тензорозетки : заявл. 24.12.2025 : опубл. 20.01.2026 / С. В. Ситдикова, В. С. Великанов, Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный горный университет".

УДК 622.834.1:004.8

К МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПОРОДНОГО БЛОКА ПО КОЗЫРЬКУ КРЕПИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Ж.Нокина, доц., доктор PhD, **К. Бейсембаев**, проф., д.т.н., **Н. Малыбаев**, доц., к.т.н.
Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда,
Казахстан

Для устойчивых пород обрушение кровли происходит в 2 этапа: над линией забоя под действием изгибающих напряжений образуется поперечная трещина, а затем, смещаясь, блок породы, имеющий консоль за козырьком, скользит вниз, наклоняя его. Механизм моделирования движения блока предложенный авторами, корректируется ИИ GPT, что позволяет уточнить закономерности нагружения секции крепи горным давлением и рассмотреть особенности динамического смещения секции блока.

Ключевые слова: динамика, смещение, скольжение, блок, трещина, секция крепи

TO WARDS A MODEL OF ROCK BLOCK MOVEMENT ALONG A SUPPORT CANOPY BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Zh. Nokina, K.M. Beisembayev, N.S. Malybayev

For stable rock, roof collapse occurs in two stages: above the working face, a transverse crack forms under the action of bending stresses, and then, shifting, the rock block, which has a cantilever behind the cap, slides downward, tilting it. The block motion modeling mechanism proposed by the authors is adjusted by the GPT AI, which allows us to clarify the patterns of rock pressure loading of the support section and examine the characteristics of the section's dynamic displacement.

Keywords: dynamics, displacement, sliding, block, crack, support section

Adams имеет встроенную систему ввода, дифференциальных уравнений движения в проект, без участия проектировщика. Они определяются типом шарниров, инерциальными характеристиками, возможными движениями механизма и налагаемыми ограничениями. Рассмотрена задача движения, отделившегося блока породы от кровли, на смоделированных неровностях, через которые он нагружает и скользит по козырьку секции крепи за счет привязки в этих зонах поступательных шарниров. Козырек может поворачиваться в боковых шарнирах, связывающих его с перекрытием секции, а оно, в свою очередь, связано с основанием четырехзвенным механизмом и гидростойкой. Перекрытие и козырек проседают под действием породы и одновременно поворачиваются. Блок породы через неровности кинематически связан с козырьком тремя поступательными шарнирами, так что может скользить вдоль козырька при его наклоне в сторону выработанного пространства. Положение этих шарнирных связей произвольное из-за случайного расположения неровности, но выбирается из условия самого опасного влияния на конструкцию козырька. Три точки связи выбраны исходя из условия равновесия блока на поверхности (две слева и одна справа от шарнира козырька или наоборот). При этом реакции в этих зонах допустимы только сжимающие, и появление отрицательного значения является условием опрокидывания блока. Этот фактор ограничивает область существования решения. Оно уточнено в результате диалога при вводе особенностей задачи в ИИ GPT за счет вводимых пояснений к

вопросам, поставленным GPT, например, один из них: три жёстких поступательных сустава (призматика), прикрепленных» в трёх точках между козырьком и блоком породы, — это не контакт, а жёсткие кинематические связи. Они фиксируют относительное движение в заданном прямолинейном движении, без размыкания контакта. Они не моделируют контактную площадку и распределение давления по поверхности. Стоит учитывать упругость соединений. Добавьте реальные параметры масс, моментов инерции, учитывайте демпфирование в шарнирах, если нужно.

Авторы под термином контакт понимают имитацию кинематической связи объектов в выбранных зонах, для определения скорости, ускорения и сил реакций объектов, для одного из вариантов расположения опорных зон на козырьке. При наличии отрицательной реакций, моделирование прерываем и переходим на модель двухточечного контактирования. Реакции же под опорами фиксируются виртуальными датчиками, устанавливаемыми Adams. Упругость породы учитывается – блок к которому крепиться жесткая поступательная связь имеет свой модуль деформации. Ваше же предложение исходит из большей способности к демпфированию «более упругого» выступа неровности, что может повлиять на параметры колебательного процесса при движении блока и будет учтено в специальном теоретическом анализе процесса внезапного повышения нагрузки на секцию. В Adams мы получили и реакции сил в рычагах четырехзвенника, на сколько это верно, (рис. 1)?

ИИ GPT в ответ на многие введенные пояснения:

- Скорости, ускорения при заданной жёсткой кинематике определяются корректно: Lagrange мультипликаторы в Adams дадут силы/моменты, необходимые для поддержания этих связей при движении.

- Если вы используете три поступательных призматика, то жёстко навязываете контакт в трёх точках и «нормальная реакция под ползуном» — это просто значение силы реакции; призматические суставы не допускают размыкания – значит, отрицательные реакции будут неправдоподобны;

- Реакции рычагов в целом соответствуют динамике жёсткой модели. Они правильны для вашей кинематической идеализации, но не обязательно физически точны при реальных упругих контактах, поэтому рекомендую:

- Замените жёсткий призматик на одностороннюю силовую связь (push only spring/damper или контакт), чтобы позволить размыкание.

Авторы: Контакт с породой из-за нестабильности показателей (микротрещины, включения глины или наоборот очень жестких руд, развития хрупкого разрушения) является случайной величиной. Случаен и разброс неровностей блока по площади козырька. Выбор контактов по краям козырька в забойной и завальной части вызовет максимальные напряжения изгиба в козырьке при этом такие контакты составляет до 30 % от возможных. Модель действует и для произвольно расположенных контактов, если призматика прикреплены к неровностям блока секции и двигаются с ним. Получены графически закономерности от размеров блока, его положения на перекрытии или козырьке (рис.1). Критерий истины — это непосредственно шахтные замеры этих параметров. Корректировка программы

Адамс производится через 2-3 цикла продвижения забоя, после чего программа обновляется.

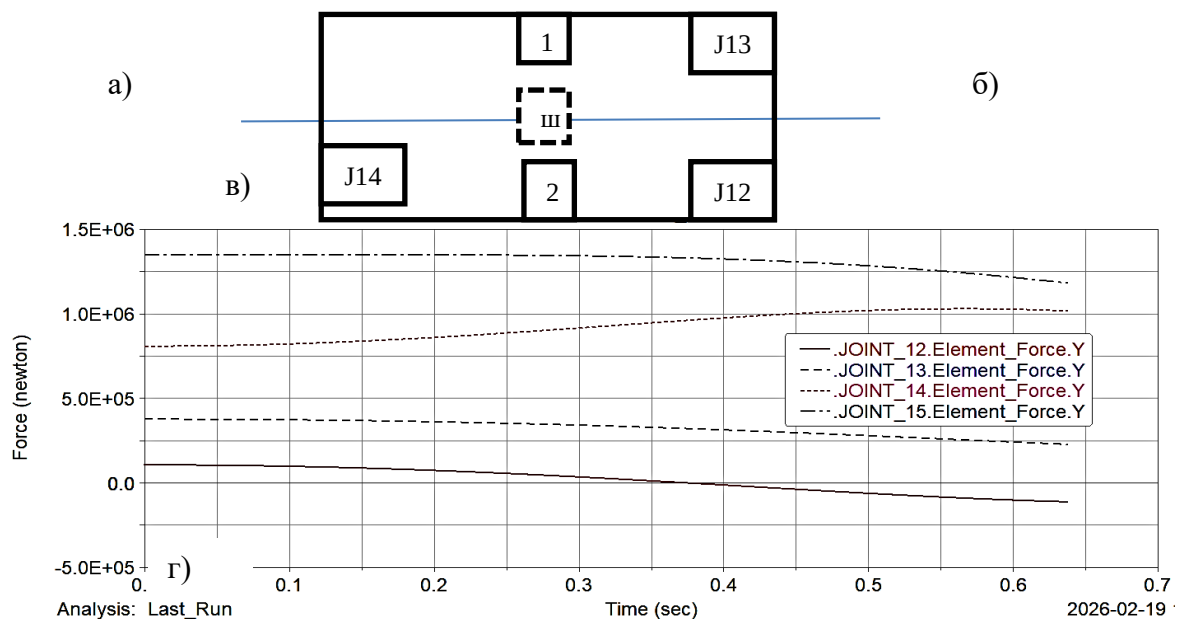
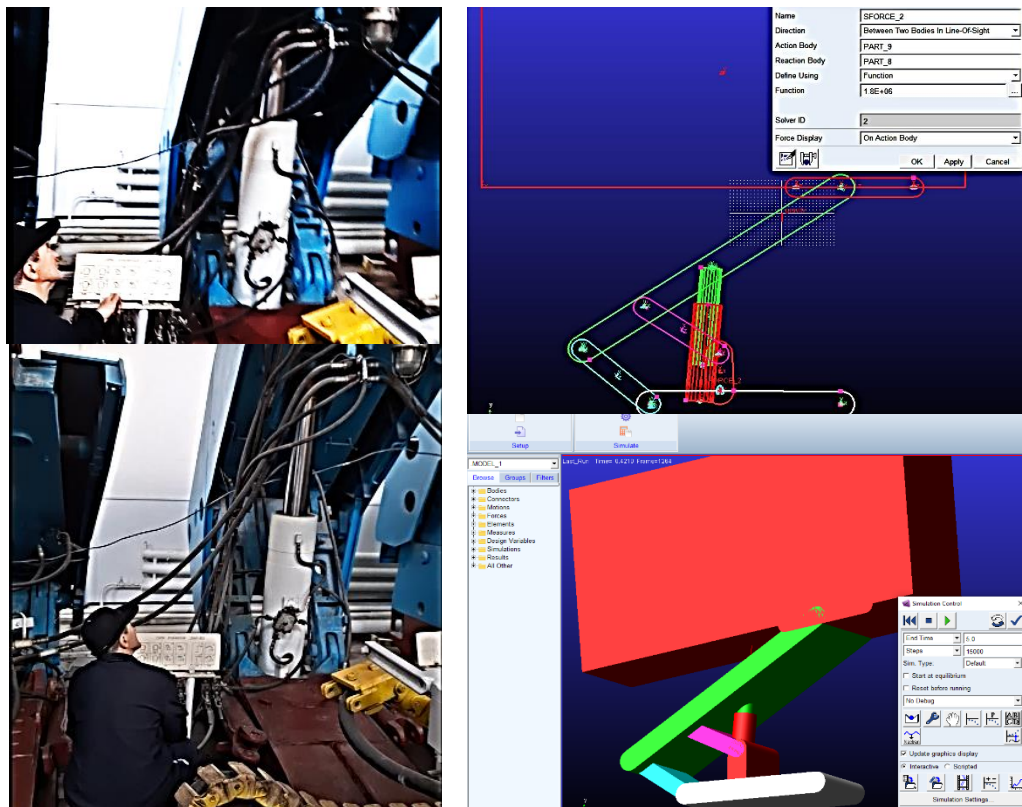


Рис. 1 Лабораторные и модельные эксперименты особенностей использования динамического моделирования горных машин: а) оборудование машинала КарТУ и исследование секций типа ОКП – 70, б) их моделирование, в) схема расположения контактов в численном эксперименте, г) графики давлений в точках контакта при смещении

ИИ GPT: ваш подход — использовать Adams для выявления закономерностей и калибровать модель по реальным замерам — полностью обоснован при высокой стохастичности контактных зон. Ниже — практическая методика и рекомендации по работе с неопределённостями и датчиками, чтобы получать полезные, проверяемые результаты: цель: качественный и количественный прогноз распределение реакций с доверитель-

ными интервалами в рычагах крепи; для учета стохастичности контактов представляйте параметры контакта как случайные величины (распределения: логнормал/нормал с отсечкой $>0/\beta$ и т.п.) с параметрами, взятыми из литературы или экспериментов; запускайте многореализационные расчёты (Monte Carlo) по выборке параметров, чтобы получить статистику реакций (среднее, дисперсия, квантиль 95% и т.д.); при больших вычислительных процессах (частых сменах модели) автоматизируйте его: скрипт (Python + Adams API) для генерации набора параметров, прогонки, сбора выходов и сравнения с датчиками.

Модель движения обрушенного блока породы вдоль козырька крепи, (методика обрушения получена ранее [1]), позволит учесть и возможности возникновения колебательных процессов при блочном обрушении кровли. Актуальность этого подчеркивается исследованиями других авторов, о возрастании давления на забой скачком до 100 раз, которые ранее объяснялись бифуркационными процессами. Внедрении программы для управления в шахтах улучшит систему «Обратная связь» прогнозирования состояния забоя в каждом цикле выемки. Поэтому теоретические исследования должны сорчестаться с шахтными, а также в лабораторных условиях с реальными образцами горной техники. Для пакета Adams возможности его моделей тестируются при запуске аналогичных программных моделей и реальных образцов техники при соответствующих параметрах привода, что существенно повышает надежность результатов.

Список литературы

1. Акижанова, Ж.Т., К методике расчета горного давления у короткого забоя / Ж.Т. Акижанова, Г.С. Жетесова, К.М. Бейсембаев, Г.Д. Буялич, Ж.Н. Нокина// Уголь.- 2023, № 7. – С. 50 - 56 <https://cyberleninka.ru/article/n/k-metodike-rascheta-gornogo-davleniya-u-korotkogo-zaboya>.

УДК 621.791; 621.7; 621.7:669.056.9; 621.7; 669

ВЛИЯНИЕ ВИДА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОТВОДА В АНОДНОМ УЗЛЕ ПЛАЗМОТРОНА

Р. А.Окулов^{1,2}, канд. техн. наук, Е.С.Коновалова², К. С.Коновалов², П. Н.Синицин²

¹ФГБУН «Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина
Уральского отделения РАН», г. Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

Исследовано влияние вида плазмообразующего газа (метан, воздух, аргон) на эффективность теплоотвода в анодном узле плазмотрона МАК-6,5. Методом компьютерного моделирования и натурного эксперимента установлено, что максимальная тепловая нагрузка на систему охлаждения наблюдается при использовании метана, минимальная — при использовании аргона. Показано, что эффективность теплоотвода определяется теплофизическими свойствами и химической активностью газа. Результаты работы имеют практическую ценность для оптимизации работы плазмотронного оборудования.

Ключевые слова: плазмотрон, теплоотвод, теплопередача, анодный узел, плазмообразующий газ, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, кислород, азот, эффективность охлаждения.

INFLUENCE OF PLASMA-FORMING GAS TYPE ON HEAT RESOLVER EFFICIENCY IN THE ANODE UNIT OF A PLASMA TORCH

R.A.Okulov, Ye.S.Konovalova, K.S.Konovalov, P.N.Sinitsin

The influence of the plasma-forming gas type (methane, air, argon) on the heat removal efficiency in the anode unit of a MAK-6.5 plasma torch was studied. Computer modeling and a full-scale experiment revealed that the maximum thermal load on the cooling system is observed when using methane, while the minimum is observed when using argon. It was shown that heat removal efficiency is determined by the thermophysical properties and chemical activity of the gas. The results of this study have practical value for optimizing the operation of plasma torch equipment.

Keywords: plasma torch, heat sink, heat transfer, anode unit, plasma-forming gas, computer modeling, finite element method, oxygen, nitrogen, cooling efficiency.

Введение. Аддитивные технологии становятся важным инструментом для создания высокоэффективных установок, где ключевым аспектом является снижение потребности в охлаждении (теплосъеме). Приоритетом в новых разработках становится создание конструкций, активно снижающих генерируемые тепловые потоки и обеспечивающих их эффективный отвод. Аддитивные технологии, плазменная обработка и новые материалы являются основными инструментами для достижения этой цели.

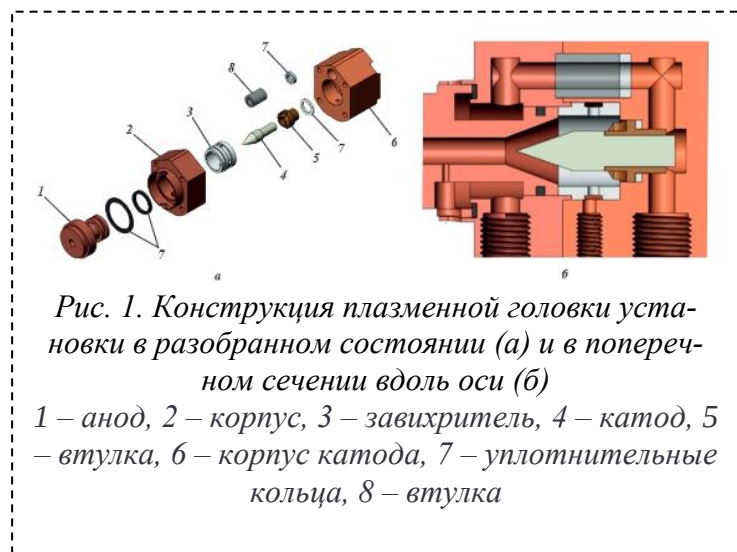
Плазменный метод получения порошков широко применяется в сварке, наплавке, пайке, резке и нанесении покрытий.

Преимущества плазмотронов делают их незаменимыми: достижение экстремально высоких температур, недоступных традиционным методам, простота управления, регулировки мощности, запуска/остановки, высокая надежность и компактность.

Одним из основных факторов, который определяет эффективность работы, является плазмообразующий газ, применяемый для создания плазмы. Оптимальные характеристики газа важны для управления процессом, ми-

нимизации потерь и достижения желаемых характеристик плазмы и получаемых материалов.

Высокие температуры плазмы, большие плотности энергии и скорости истечения создают экстремальные тепловые нагрузки на стенки дуговой камеры плазмотрона. Это ставит эффективный теплоотвод в разряд



критически важных задач, так как недостаточное охлаждение ведет к сокращению ресурса катода, анода и сопла и выходу установки из строя. Следовательно, прогресс в повышении КПД плазмотронов неразрывно связан с углубленным изучением теплопередачи от дуги к стенкам и от стенок к охлаждающей среде.

Цель – исследование влияния характеристики плазмообразующего газа на эффективность процессов теплопередачи от анода к жидкости.

Методика исследований. В работе выбрана конструкция плазмотрона МАК-6,5 – это плазменная установка косвенного действия, которая имеет источник питания мощностью 6,5 кВт. Конструкция выбрана исходя из простоты изготовления и обслуживания. В рамках исследования была разработана трехмерная компьютерная модель лабораторной плазменной установки МАК-6,5, физический прототип которой создан в Институте металлургии имени академика Н. А. Ватолина Уральского отделения РАН. Установка предназначена для решения технологических задач, включая получение металлических порошков, нанесение функциональных покрытий и модификацию поверхности материалов. Конструкция плазменной головки установки в разобранном состоянии (а) и в поперечном сечении вдоль оси (б) представлена на рис. 1, а ее детальное описание можно найти в работе [1, 2].

Поставленная цель достигнута путем проведения компьютерного эксперимента с последующей верификацией при проведении натурных экспериментов. Компьютерный эксперимент выполнен при помощи метода конечных элементов, зарекомендовавшего себя в производственной практике при решении подобных задач [3, 4]. Расчеты были выполнены с использованием программного комплекса *Flow Simulation*, входящего в состав системы автоматизированного проектирования *SolidWorks* (версия 2023 года, www.solidworks.com).

Рассмотрены следующие варианты плазмообразующего газа: метан ГОСТ 5542-87 (техн./высш.), воздух, аргон ГОСТ 10157-79 (техн./высш.). Выбор данных сред обусловлен необходимостью исследования влияния различных химических атмосфер – восстановительной (метан), окисли-

тельной (воздух) и нейтральной (аргон) соответственно – на процесс плазменного синтеза и на характеристики процесса теплоотвода.

Объемный расход плазмообразующего газа составлял 2,5 л/мин.

Для охлаждения применялась техническая вода с граничными параметрами на входе: температура 293 К, давление 101325 Па. Объемный расход охлаждающей воды составлял 2 м³/ч.

Материал элементов конструкции плазменной головки: анода – медь М1 по ГОСТу 859-2014; корпуса – литая легированная сталь по ГОСТу 4543-2016.

Время работы плазматрона 10 минут. Плазменный поток направлен в воздушное пространство вертикально вниз.

При расчете использовались следующие фундаментальные законы теплопередачи: закон сохранения массы и уравнения Навье-Стокса, законы Фурье, Ньютона-Рихмана, Стефана-Больцмана. Допущения при проведении компьютерного эксперимента: процесс адиабатический; течение установившееся; массовый расход постоянен; влияние гравитации пренебрежимо мало.

Результаты и их обсуждение. Проведенный эксперимент позволил получить количественные данные о тепловой нагрузке на систему охлаждения плазматрона при использовании различных плазмообразующих газов. Результаты измерений температуры воды на выходе из системы охлаждения показывают, что при использовании метана температура на выходе из системы охлаждения анодного узла равняется 308,86 К, для воздуха – 306,13 К, для аргона – 301,28 К.

Рост температуры охлаждающей воды коррелирует с теплосодержанием и химической активностью плазмообразующего газа. Метан (восстановительная среда) обладает высокой энтальпией и участвует в эндотермических реакциях, создавая максимальную тепловую нагрузку на систему охлаждения плазматрона. Воздух (окислительная среда) занимает промежуточное положение из-за затрат энергии на диссоциацию молекул. Аргон (нейтральная среда), будучи химически инертным и имея низкое теплосодержание, обеспечивает наименьший нагрев.

В рамках верификации компьютерной модели плазменной установки МАК-6,5 был проведен натурный эксперимент по измерению температуры воды на выходе из системы охлаждения. В эксперименте качестве плазмообразующего газа был также применен технический аргон по ГОСТ 10157-2016. Температура контролировалась бесконтактным методом с помощью поверенного инфракрасного пирометра Testo 835-N1. Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.624-2006.

Сопоставление данных, полученных для сравнения значений компьютерного и натурального экспериментов по температуре воды на выходе при использовании плазмообразующего газа – аргона, показывают удовлетворительное соответствие между результатами компьютерного моделирования и натурального эксперимента. Среднее значение температуры корпуса, полученное численными методами, составляет 301,2 К, в то время как в натурном эксперименте зафиксировано значение 312,8 К. Таким образом,

расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 3,7 %, что свидетельствует о высокой адекватности применяемой математической модели.

Вывод. Определено, что важными для эффективного теплосъема являются высокая теплопроводность и удельная теплоемкость плазмообразующего газа. Для максимальной эффективности работы системы охлаждения рекомендован аргон. Полученные результаты имеют практическую ценность для разработчиков и потребителей плазмотронного оборудования с целью оптимизации энергозатрат и увеличения ресурса работы.

Благодарность за финансовую поддержку работы. Работа выполнена в рамках НИОКР по теме «Развитие научных основ разработки новых многокомпонентных сплавов, композитов и покрытий, их получения из металлических расплавов, субмикронных порошков и техногенного сырья интенсивными термическими методами» (тема 25-2 регистрационный номер темы в НИОКТР 125021202040-3).

Список литературы

1. Окулов Р. А., Крашанинин В. А., Гельчинский Б. Р., Ремпель А. А. Влияние формы внутреннего канала анодного узла на скорость плазменного потока // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2024. – Т. 166, № 1. – С. 58–73. DOI: 10.26907/2541-7746.2024.1.58-73.
2. Okulov R., Krashaninin V., Gelchinskiy B., Rempel A. Effect of Gravity on the Motion of Titanium Powder Particles in a Plasma Flow // Russian Metallurgy (Metally). – 2023. – Vol. 2023, No. 5. – P. 559–564. DOI: 10.1134/S0036029523050087.
3. Okulov R. A., Buzolin N. D., Akhmetshin S. M., Gel'chinskii B. R. Modeling and Experimental Investigation of the Effect of the Shape of the Internal Plasma Channel in a Plasma Installation with and without an Insert on the Parameters of a Jet // Russian Metallurgy (Metally). – 2024. – No. 4. – P. 870–875. DOI: 10.1134/S0036029524701763.
4. Окулов Р. А., Ахметшин С. М., Гельчинский Б. Р., Ремпель А. А. Траектория движения частиц титанового порошка различной фракции в плазменном потоке // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 47–54. DOI: 10.17073/1997-308X-2023-3-47-54.

УДК 622.023.65, 62-932.4, 621.92

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ "ВИБРАЦИОННАЯ МАШИНА – ГРАНУЛИРОВАННАЯ СРЕДА"

Г. Я. Пановко¹, д-р техн. наук, проф., А. Е. Шохин¹, канд. техн. наук

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Моделируется процесс вибрационной обработки сухого гранулированного материала на наклонном лотке при возбуждении колебаний двумя самосинхронизирующимися дебалансными мотор-вибраторами вблизи резонансных частот. Показано влияние режимов движения материала и его массы на колебания лотка и скорость транспортирования материала.

Ключевые слова: вибрационная обработка, дебалансный вибровозбудитель, самосинхронизация, гранулированный материал, моделирование.

DYNAMICS OF THE "VIBRATING MACHINE - GRANULAR MEDIUM" SYSTEM G.Y. Panovko, A.E. Shokhin

The process of vibrational processing of granular material on an inclined tray is considered when vibrations are excited by two self-synchronizing unbalance motor-vibrators near resonant frequencies. The influence of the material movement modes and its mass on the tray vibrations and the material transportation velocity is shown.

Keywords: vibration processing, unbalanced vibration exciter, self-synchronization, granular material, simulation.

Одной из проблем при разработке и создании вибрационных технологических машин и агрегатов с самосинхронизирующимися вибровозбудителями является обеспечение заданного движения материала под действием вибрации. Анализ известных работ показывает, что в практическом большинстве исследований и при проектировании анализ динамики технологического агрегата и обрабатываемого материала проводится независимо друг от друга, то есть без учета их взаимного влияния [1]. Однако такой подход может приводить к существенным различиям в прогнозируемых и реализуемых режимах движения технологического агрегата и обрабатываемого материала. Известно сравнительно немного работ, в которых учитывается контактное взаимодействие технологического агрегата с материалом [2, 3]. Для многих технологических процессов представляет интерес возможность получение оценок влияния материала не только на возбуждаемые колебания технологического агрегата, но и на показатели эффективности процесса вибрационной обработки материала, в частности, скорость вибротранспортирования. В настоящей работе рассматривается задача получения расчетным путем оценок влияния материала, как на колебания технологического агрегата и самосинхронизацию вибровозбудителей, так и на скорость вибротранспортирования и сравнение полученных результатов с экспериментами.

Рассматриваемая модель вибрационного технологического агрегата с материалом состоит из рабочего органа (лотка) 1, закрепленного через упругие элементы 3 на неподвижном основании (рис. 1). Колебания лотка возбуждаются практически одинаковыми самосинхронизирующимися мо-

тор-вибраторами 2 асинхронного типа, вращающимися во встречных направлениях.

На лотке находится материал, моделируемый системой упруго связанных тел: нижнего тела 4, моделирующего слой материала, контактирующий с лотком, и верхнего тела 5, моделирующего остальную часть материала. Взаимодействие материала с лотком учитывается нормальной силой R_c и силой сухого трения F_c . При их совместном движении $R_c > 0$. При $R_c = 0$ контакт между материалом и лотком нарушается. В фазе свободного полета материал и лоток двигаются независимо друг от друга и соответственно силы их взаимодействия R_c и F_c равны нулю. Окончание фазы свободного полета определяется условием столкновения материала с лотком. В момент контакта взаимодействие материала с лотком моделируется косым ударом, в результате которого происходит мгновенное изменение скоростей материала и движущихся элементов агрегата – лотка и мотор-вибраторов.

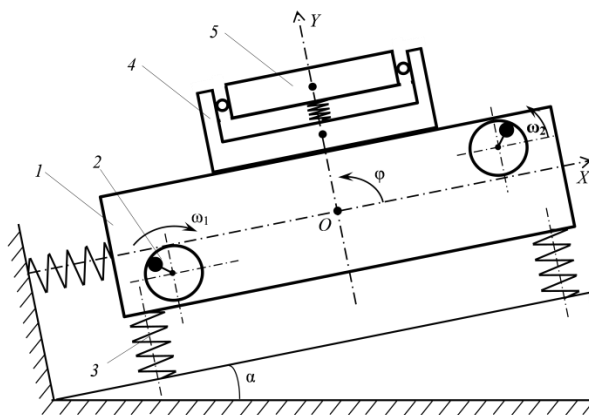


Рис. 1. Расчетная схема вибрационного технологического агрегата

Анализ результатов моделирования.

При анализе результатов основное внимание уделяется диапазонам частот вращения вибровозбудителей, в которых реализуется их синхронно-противофазное вращение с взаимной фазой $\Delta\varphi \approx \pi$. Моделирование проводилось численно при значениях параметров системы, соответствующих параметрам лабораторного макета [4].

Расчеты проводились для различных соотношений масс материала и лотка $\mu_w \in [0; 0,2]$ и амплитуд возмущающих сил, варьируемых путем изменения дисбаланса мотор-вибраторов $D = \lambda D_0$, D_0 – выбранное опорное значение дисбаланса. Влияние варьируемых параметров на колебания лотка и самосинхронизацию вибровозбудителей оценивалось по среднеквадратичным значениям (СКЗ) амплитуд $\tilde{A}$ колебаний лотка и взаимной фазе $\Delta\varphi$. Оценка изменения скорости транспортирования проводилась по ее среднему значению $\langle \dot{x}_1 \rangle$. Результаты, полученные для рассматриваемой в работе модели (далее – модель I) сравнивались с результатами для модели, в которой пренебрегается влиянием материала на колебания лотка (далее – модель II). Отметим, что, представленные результаты для модели II, не зависят от массы материала и на рис. 2 и рис. 3 соответствуют обозначению

$\mu_w = 0$. На рис. 2 можно выделить два диапазона частот, в которых устанавливается вращение вибровозбудителей близкое к синхронно-противофазному с $\Delta\varphi \approx \pi$: межрезонансный ($19,8 \text{ Гц} < f < 30,7 \text{ Гц}$) и зарезонансный ($f > 35 \text{ Гц}$). При переходе через границы этих диапазонов наблюдается резкая смена фазы $\Delta\varphi$, которая устанавливается вблизи значения $\Delta\varphi = 0$. Это приводит также к смене формы колебаний лотка, при которой лоток совершает колебания преимущественно в направлении оси OX , а колебания в направлении оси OY практически исчезают. Возникающее при этом движение материала происходит без отрыва от поверхности лотка (без соударений).

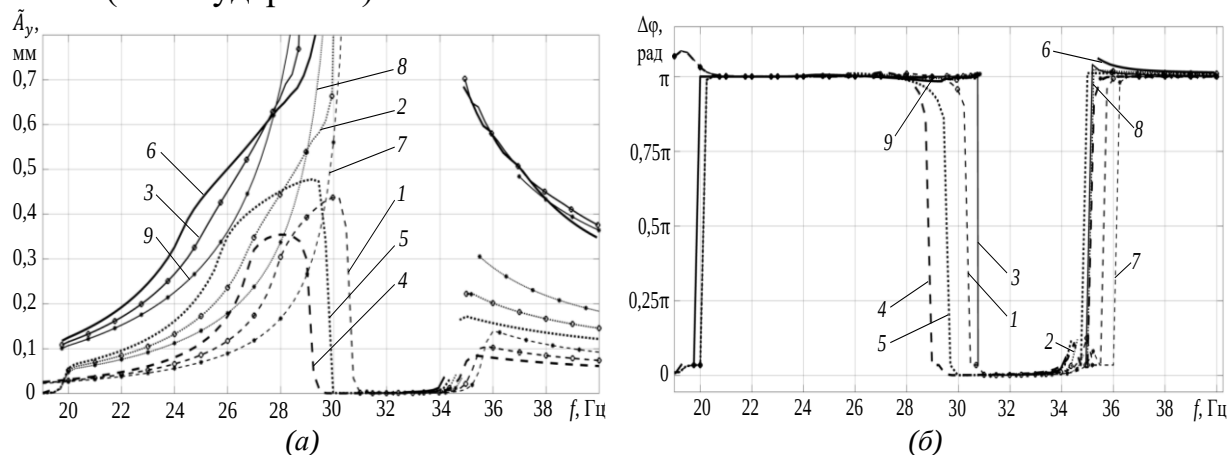


Рис 2. СКЗ амплитуды колебаний лотка $\tilde{A}_y$ в направлении OY (а) и взаимная фаза $\Delta\varphi$ вращения вибровозбудителей (б) в зависимости от частоты возбуждения f ; 1 – $\mu_w=0.1, \lambda=0.25$; 2 – $\mu_w=0.1, \lambda=0.5$; 3 – $\mu_w=0.1, \lambda=1$; 4 – $\mu_w=0.2, \lambda=0.25$; 5 – $\mu_w=0.2, \lambda=0.5$; 6 – $\mu_w=0.2, \lambda=1$; 7 – $\mu_w=0, \lambda=0.25$; 8 – $\mu_w=0, \lambda=0.5$; 9 – $\mu_w=0, \lambda=1$.

Увеличение массы материала, также как и уменьшение вынуждающих сил, приводит к увеличению отклонения взаимной фазы от значения $\Delta\varphi = \pi$ и изменению амплитуд колебаний лотка $\tilde{A}_y$. Установленный характер изменения амплитуд колебаний лотка хорошо согласуется с экспериментальными данными [4].

В межрезонансном диапазоне частот при приближении частоты возбуждения к его верхней границе наблюдается резкий рост средней скорости транспортирования (рис. 3а), обусловленного значительным ростом амплитуд колебаний лотка и, как следствие, увеличением скоростей отрыва материала от поверхности лотка, которые приводят к увеличению длительности фаз свободного полета материала. Вблизи верхней границы межрезонансного диапазона частот, при одной и той же частоте и амплитуде возбуждения, с увеличением массы материала скорость транспортирования уменьшается. Однако, по мере удаления от этой границы влево данная зависимость изменяется на противоположную, что связано с соответствующими изменениями амплитуд колебаний лотка (рис. 2а). В зарезонансном диапазоне частот (рис. 3б) скорость транспортирования материала уменьшается при увеличении его массы. При этом с увеличением возмущающих сил ее чувствительность к изменению массы материала снижается.

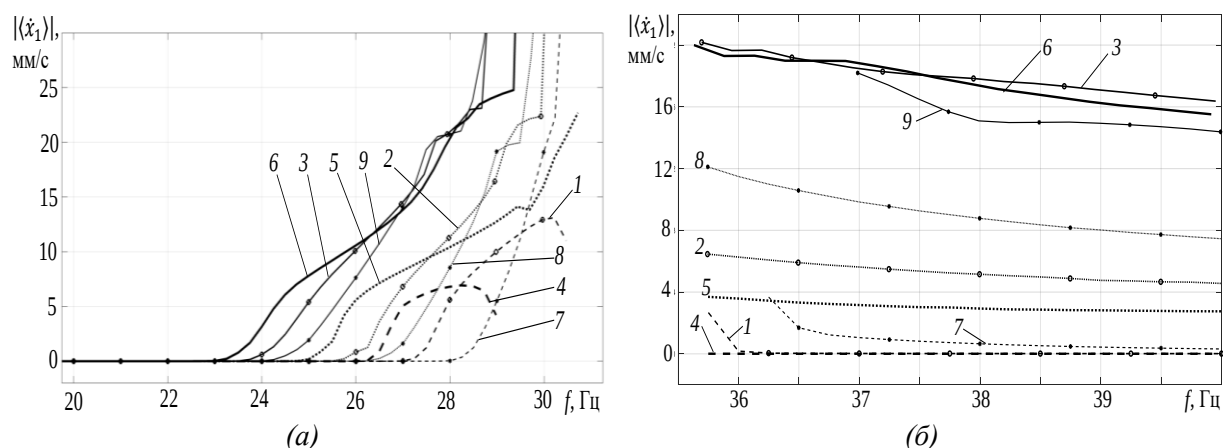


Рис. 3. Абсолютные значения средней скорости транспортирования материала: (а) – в межрезонансном диапазоне частот, (б) – в зарезонансном диапазоне частот; 1 – $\mu_w=0.1$, $\lambda=0.25$; 2 – $\mu_w=0.1$, $\lambda=0.5$; 3 – $\mu_w=0.1$, $\lambda=1$; 4 – $\mu_w=0.2$, $\lambda=0.25$; 5 – $\mu_w=0.2$, $\lambda=0.5$; 6 – $\mu_w=0.2$, $\lambda=1$; 7 – $\mu_w=0$, $\lambda=0.25$; 8 – $\mu_w=0$, $\lambda=0.5$; 9 – $\mu_w=0$, $\lambda=1$.

Выводы. Выполненный анализ показал, что учет взаимодействия материала с лотком в модели технологического агрегата оказывает значительное влияние на результаты оценки, как возбуждаемых колебаний лотка, так и скорости транспортирования материала. Полученные результаты свидетельствуют о чувствительности параметров движения технологического агрегата и обрабатываемого материала к изменению свойств материала и о важности учета взаимного влияния движений материала и лотка при разработке вибрационных технологических агрегатов.

Финансовая поддержка. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского Научного Фонда, проект № 24-19-00333, <https://rscf.ru/project/24-19-00333>.

Список литературы

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Издательский дом «Руда и металлы», 2013. 640 с.
2. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.
3. Нагаев Р.Ф., Карагулов Р.Р. Динамика вибрационной машины с учетом влияния обрабатываемого материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 1. С. 48-51.
4. Panovko G., Shokhin A. Experimental Analysis of Dynamics of a Nonlinear Oscillatory System with Self-Synchronizing Vibration Exciters when Interacting with Bulk Material // J. Mach. Manuf. Reliab. 2024. № 53. p. 479–488. <https://doi.org/10.1134/S1052618824700936>

УДК 622.232

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЗУБА КОВША КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ЭКВИВА- ЛЕНТНОМ НАГРУЖЕНИИ

А.А. Пецык¹, старший преподаватель, А.П. Харченко¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС», Москва

Выполнено численное моделирование напряжённно-деформированного состояния зуба ковша карьерного экскаватора Komatsu PC2000 при действии эквивалентной нагрузки от горной породы. Расчёт проведён методом конечных элементов с использованием программной среды Autodesk Fusion 360. В качестве нагрузки принята сосредоточенная сила, приложенная к режущей части зуба, имитирующая сопротивление породы в процессе копания. Получены поля эквивалентных напряжений по Мизесу и распределение коэффициента запаса прочности. Проведена оценка работоспособности конструкции и определены зоны концентрации напряжений, для дальнейшей оптимизации геометрии рабочего инструмента.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, зуб ковша, конечно-элементный анализ, напряжённное состояние, Fusion 360, эквивалентная нагрузка.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE STRENGTH OF A MINING EXCAVATOR BUCKET TOOTH UNDER STATIC EQUIVALENT LOADING

A.A. Petsyk, A.P. Kharchenko

This paper presents a numerical simulation of the stress-strain state of a bucket tooth from a Komatsu PC2000 mining excavator under an equivalent rock load. A finite element analysis was conducted in Autodesk Fusion 360, applying a concentrated force to the tooth's cutting edge to simulate digging resistance. The obtained von Mises stress fields and safety factor distribution were analyzed to assess structural performance and identify stress concentration zones for future tool geometry optimization.

Keywords: mining excavator, bucket tooth, finite element analysis, stress state, Fusion 360, equivalent load.

Рабочее оборудование карьерных экскаваторов функционирует в условиях силовых воздействий, обусловленных взаимодействием с горной массой. Наиболее нагруженными элементами ковша являются зубья. Разрушения и интенсивный износ зубьев приводят к снижению производительности и увеличению простоев, что объясняет актуальность исследований, направленных на оценку их прочности и долговечности.

Современные методы численного анализа, основанные на методе конечных элементов, позволяют исследовать напряжённно-деформированное состояние конструкций на этапе проектирования и модернизации [1, 2]. Применение методов эффективно для элементов рабочего инструмента горных машин, где проведение натурных экспериментов затруднено.

Целью данной работы является определение напряжённного состояния зуба ковша экскаватора Komatsu PC2000 при эквивалентной нагрузке (от г.п.) и оценка запаса прочности в условиях статического нагружения.

Объектом исследования является зуб ковша карьерного экскаватора Komatsu PC2000 (рис. 1), относящегося к классу тяжёлых гидравлических экскаваторов. Геометрическая модель зуба построена на основе трёхмерной CAD-модели и включает рабочую часть зуба и посадочную зону, взаимодействующую с адаптером ковша.

При моделировании рассматривался один зуб без учёта влияния соседних зубьев и элементов ковша. Такой подход широко используется в инженерной практике и позволяет сосредоточиться на анализе локального напряжённого состояния наиболее нагруженного элемента [3].

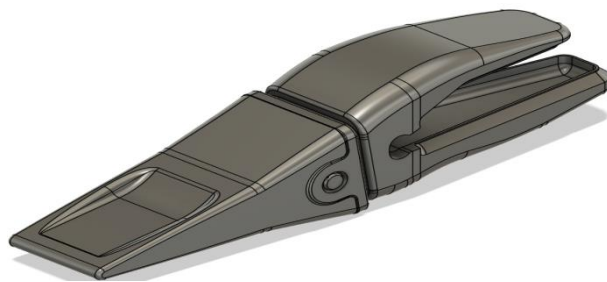


Рисунок 1 – Геометрическая модель зуба ковша экскаватора Komatsu PC2000

Принятые допущения: для упрощения расчётов и обеспечения корректности численного анализа были приняты следующие допущения: материал зуба является однородным и изотропным; пластические деформации и износ не учитываются; взаимодействие с горной породой заменено эквивалентной стат. нагрузкой. **В качестве материала** зуба принята износостойкая конструкционная сталь, применяемая для изготовления сменных элементов ковшей карьерных экскаваторов. Механические характеристики материала [4, 5]: модуль упругости $E=200\text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона $\nu=0,3$; предел текучести $\sigma_T=1000\text{ МПа}$.

Постановка задачи: численное моделирование выполнено методом конечных элементов в программной среде Autodesk Fusion 360, которая применяется для инженерных расчётов и анализа прочности машиностроительных конструкций [6]. Закрепление модели выполнено по внутренней посадочной поверхности зуба, контактирующей с адаптером ковша. Закрепление имитирует реальное соединение зуба с ковшом.

Нагрузка от горной породы заменена эквивалентной сосредоточенной силой, прил. к режущей части зуба. Величина силы принята равной 70 кН, что соответствует доле усилия копания, приходящейся на один зуб ковша экскаватора [7]. Сила приложена под углом -105° к горизонтальной оси, что отражает направление сопротивления породы при копании (рис. 2).



Рисунок 2 – Схема задания нагрузки и граничных условий

Конечно-элементная модель: модель была дискретизирована на тетраэдральные конечные элементы. Для повышения точности расчёта вы-

полнено локальное сгущение сетки в зонах ожидаемых концентраций напряжений, прежде всего в области корня зуба и на переходных радиусах. Анализ показал, что плотность сетки обеспечивает устойчивость результатов и позволяет корректно оценить распределение напряжений.

Результаты численного моделирования: в результате расчёта получены поля эквивалентных напряжений по Мизесу и распределение коэффициента запаса прочности. Максимальные эквивалентные напряжения составили порядка 705 МПа и локализуются в зоне перехода от рабочей части зуба к посадочной области (рис. 3). Данное расположение зон напряжений соответствует характеру работы зуба при изгибе и подтверждается результатами аналогичных исследований [3, 7].

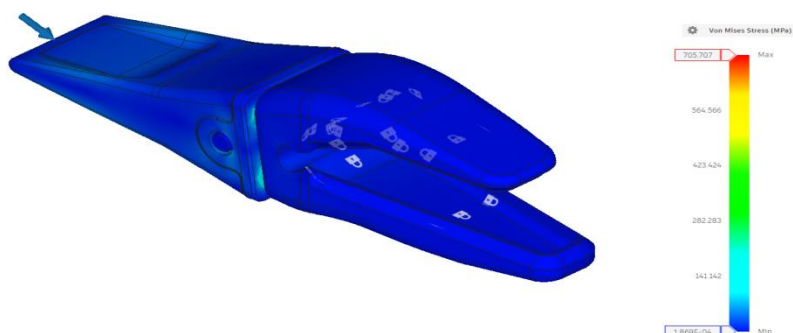


Рисунок 3 – Поле эквивалентных напряжений (по Мизесу) в зубе ковша

Анализ коэффициента запаса прочности показал, что в основной части объёма зуба его значение превышает целевой уровень. Минимальный коэффициент запаса равен 1,25, что свидетельствует о работоспособности конструкции при заданных условиях нагружения, однако указывает на наличие зон, потенциально подверженных усталостному повреждению.

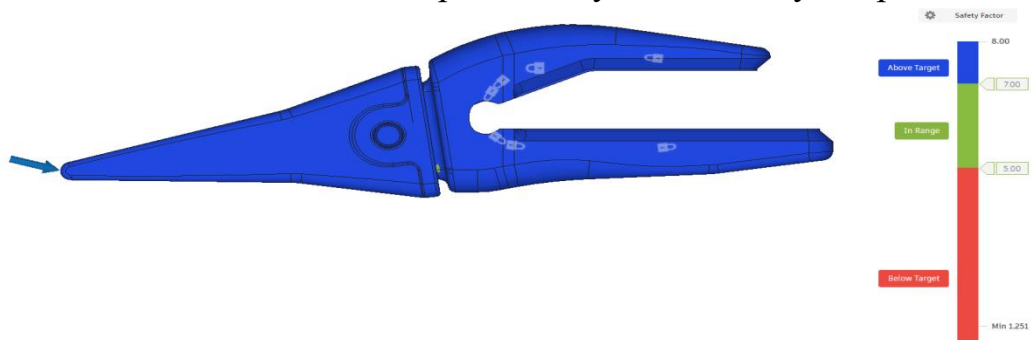


Рисунок 4 – Распределение коэффициента запаса прочности

Выводы: полученные результаты показывают, что геометрические особенности конструкции зуба, такие как резкие переходы сечений и малые радиусы скругления, оказывают влияние на уровень напряжений. Это подтверждает целесообразность применения методов топологической и генеративной оптимизации для снижения напряжений. Выполнено численное моделирование напряжённого состояния зуба ковша экскаватора Komatsu PC2000 методом конечных элементов. Установлено, что максимальное эквивалентное напряжение достигает значений порядка 705 МПа и локализуется в зоне корня зуба. Минимальный коэффициент запаса прочности составляет 1,25, что свидетельствует о работоспособности конструкции при заданной эквивалентной нагрузке. Полученные результаты

могут быть использованы в дальнейшем для проведения генеративной оптимизации геометрии зуба с целью повышения его ресурса

Список литературы

1. Проведение параметрической оптимизации стрелы гидравлического экскаватора / Н.Г. Веревошкин, А. А. Пецык, Е. Д. Кучеренко, Д. А. Адигамов // Уголь. – 2025. – № 2(1190). – С. 88-92. – DOI 10.18796/0041-5790-2025-2-88-92. – EDN XEYGBE. Bathe K. J. Finite Element Procedures. — Prentice Hall, 2014.
2. Губанов С. Г., Пецык А. А. Моделирование напряжений и зон контактов дисковых шарошек с породой при проходке в смешанных грунтах // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 02–03 апреля 2020 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2020. – С. 40-43. – EDN ZFUL TJ.
3. Применение механических и гидравлических экскаваторов при отработке безугольных зон на разрезах Кузбасса / Л. И. Кантович, А. А. Хорешок, М. А. Тюленев, Д. А. Кузиев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S1. – С. 296-306. – EDN YSHJLX.
4. Влияние удельного сопротивления породы копанию на производительность компактного роторного экскаватора / А. М. Керопян, Д. А. Кузиев, Д. Г. Ляпин, Д. Пихторинский // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 12–13 апреля 2018 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2018. – С. 63-67. – EDN UQPURQ.
5. Побегайло П. А., Фирсов Г. И., Кривенко А. Е. О современном состоянии расчётов рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов с применением метода конечных элементов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 12–13 апреля 2018 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2018. – С. 264-267. – EDN XPGZBR.
6. Перекутнев В. Е., Зотов В. В. Моделирование приводных шкивов подъемных установок с резинотросовыми канатами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 6. – С. 105-114. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-6-0-105-114. – EDN DZDMZG.
7. Суан Х. Н., Новикова А. Д., Мнацаканян В. У. Повышение ресурса горного оборудования за счет применения защитных покрытий // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 185-189. – DOI 10.26160/2658-3305-2023-19-185-189. – EDN ILWCPQ.
8. Komatsu Ltd. Hydraulic excavator PC2000–11. Specifications and application handbook. Tokyo: Komatsu Ltd., 2019.
9. Callister W.D., Rethwisch D.G. Materials science and engineering: an introduction. 9th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020
10. Budynas R.G., Nisbett J.K. Shigley’s mechanical engineering design. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

УДК 621.512

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАПАНОВ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

О.В. Сокерина, ст. преп.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Представлен комплексный анализ математических моделей и конечно-элементных подходов к исследованию пластинчатых (прямоточных) клапанов поршневых компрессоров. Рассмотрены конструктивные решения, направленные на повышение долговечности и экономичности запорных органов. Выполнен обзор современных подходов к моделированию: от аналитических моделей поперечных колебаний пластин до связанных CFD/FEM расчетов с учетом контактного взаимодействия. Особое внимание уделено статистическим методам оценки надежности, анализу ударно-усталостных характеристик материалов и влиянию технологических факторов на долговечность клапанов. Рассмотрены вопросы оптимизации конструкции с использованием многокритериальных алгоритмов.

Ключевые слова: поршневой компрессор, прямоточный клапан, математическая модель, метод конечных элементов (МКЭ, FEM), надежность, оптимизация.

MATHEMATICAL MODELING OF RECIPROCATING COMPRESSOR VALVES

O.V. Sokerina

This paper presents a comprehensive analysis of mathematical models and finite element approaches applied to the study of plate-type (direct-flow) valves in reciprocating compressors. Design solutions aimed at improving the durability and efficiency of sealing elements are reviewed. A survey of modern modeling techniques is carried out, ranging from analytical models of transverse plate vibrations to coupled CFD/FEM simulations incorporating contact interaction. Special attention is paid to statistical methods of reliability assessment, analysis of impact-fatigue characteristics of materials, and the influence of technological factors on valve durability. Issues of design optimization using multi-criteria algorithms are also considered.

Keywords: reciprocating compressor, direct-flow valve, mathematical model, finite element method (FEM), reliability, optimization.

Пластинчатые (прямоточные) клапаны являются критически важными элементами поршневых компрессоров, определяющими их энергетическую эффективность и надежность. По данным практики, отказы клапанных узлов составляют значительную долю всех отказов компрессорного оборудования [1-3]. Циклическое ударное взаимодействие между пластиной клапана и седлом является основной причиной отказов клапанов вследствие усталости. Для описания работы клапана были предложены различные математические и численные модели.

Наиболее полная аналитическая модель поперечных колебаний пластины прямоточного клапана разработана И.К. Прилуцким [4]. В отличие от традиционных подходов, сводящих пластину к невесомой балке с точечной массой, данная модель учитывает распределенный характер инерционных и газодинамических нагрузок.

Дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее поперечные колебания пластины шириной b и единицей массы пластины m , имеет вид:

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = [p(x, t) - p_0(t)]b$$

где $y(x, t)$ – прогиб пластины в сечении с координатой x в момент времени t ; E – модуль упругости материала; J – момент инерции сечения пластины; $p(x, t)$ и $p_0(t)$ – давление газа с разных сторон пластины.

Для замыкания уравнения необходима модель газодинамического течения в каналах седла и щели между пластиной и седлом. Течение газа описывается уравнениями неразрывности и Эйлера.

Сравнение экспериментальных методов с конечно-элементным расчетом собственных частот язычковых клапанов герметичных компрессоров подтверждает достоверность последних при исследовании динамики клапанных пластин их верификацией с экспериментальными данными. Согласно результатам ряда авторов [5-7], расхождение между рассчитанными и измеренными значениями собственных частот лежит в пределах 5–10 %, что свидетельствует о приемлемой точности моделирования для инженерных задач. Конечно-элементная формулировка для модального анализа приводит к решению обобщенной проблемы собственных значений:

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = 0$$

где $[K]$ – матрица жесткости, $[M]$ – матрица масс, ω – собственная частота, $\{\varphi\}$ – форма колебаний.

Наиболее современным подходом к моделированию клапанов является связанный анализ взаимодействия жидкости и конструкции (Fluid-Structure Interaction, FSI). В работе Zhao B. [5] представлена трехмерная CFD-модель двухступенчатого поршневого компрессора с методом отображения сетки (mesh mapping method) для независимого движения каждой клапанной пластины.

В работе Raju S.M. [6] описано применение двухстороннего связанного FSI-моделирования (ANSYS Mechanical + FLUENT) для изучения флаттера клапана в компрессоре с изменяемой степенью сжатия. Подчеркивается, что традиционный анализ течения без учета взаимодействия может давать неполные результаты. Двухстороннее взаимодействие на каждом временном шаге позволяет получить более реалистичную картину течения и исследовать флаттер клапана.

В работе Castrillo P. [7] представлен комплексный численный анализ для изучения внешних сил и внутренних напряжений в клапане с фокусом на ударное взаимодействие. Предложенный подход использует синергию CFD-кода для моделирования FSI и CSD-кода (Computational Solid Dynamics) в FreeFEM++ для анализа внутренних напряжений и ударных сил. Сравнительный анализ различных подходов к моделированию динамики клапанов малых поршневых компрессоров показывает, что связывание динамики клапана и нестационарного течения с их одновременным решением даёт наиболее достоверные результаты. Экспериментальные данные (p-V диаграмма, перемещение клапана, пульсации давления) использовались для оценки точности подхода. Результаты показали, что модель с одной степенью свободы может быть достаточной для предвари-

тельных оценок, но для точного прогнозирования напряженно-деформированного состояния необходим конечно-элементный анализ.

В работе Rahimdel M.J. и Ghodrati B. [8] выполнен анализ надежности системы подачи сжатого воздуха в подземных рудниках с использованием марковского моделирования. Результаты показали, что вероятность безотказной работы системы в течение одного месяца составляет 92,32%, а срок службы системы — примерно 33 месяца при работе хотя бы одного главного компрессора.

Исследованию усталостных характеристик материалов клапанов посвящено значительное количество работ. Dusil R. [9] представил краткий обзор неисправностей клапанов компрессора и обобщил возможные причины отказов. В работе приведены данные об усталости при обратной и пульсирующей изгибающей нагрузке, включая диаграммы Гудмана, позволяющие определить максимальное напряжение изгиба для режима пульсирующей нагрузки.

Altunlu A.C. с соавторами [10] исследовали ударно-усталостные характеристики лепестков клапанов герметичных поршневых компрессоров. Была разработана и изготовлена уникальная автоматизированная система испытаний, позволяющая проводить испытания при заданных скоростях удара и различных рабочих температурах. Основной принцип системы — создание пульсирующего потока воздуха через высокочастотный электромагнитный клапан. Tofique M.W. [11] выполнил серию исследований ударной усталости сталей для клапанов Flap-X и SS 716. Испытания проводились на специально изготовленной установке с частотой 315 Гц и длительностью импульса 2,2 мс по методу лестниц в соответствии со стандартом SS-ISO 12107:2012. Результаты показали, что ударная усталостная прочность марки Flap-X выше по сравнению с SS 716, что позволяет разрабатывать более тонкие клапаны, снижающие шум. Кроме того, исследовано движение пластины клапана для трех различных конструкций всасывающих лепестковых клапанов с использованием лазерного датчика с частотой 10000 кадров/с, что позволило измерить подъем клапана, скорость клапана, скорость удара и частоту вибраций.

Zhang D [12] разработал систему для анализа и оценки ударно-усталостной долговечности створок клапанов, включающую систему стимулирования, сбора данных и обнаружения усталости. Для анализа звукового сигнала применялись быстрое преобразование Фурье (FFT) и вейвлет-пакетное преобразование (WPT), которые эффективно обнаруживали повреждения.

Song W. с соавторами [13] исследовали характеристики очень высокой циклической усталости (VNCF) нержавеющей стали для пластин клапанов. Результаты показали, что результаты усталостной долговечности, полученные методом статического напряжения, превосходят результаты, полученные методом динамического напряжения с узкой полосой рассеяния.

Современные исследования направлены на оптимизацию клапанов. В работе Silva E. [14] представлена процедура оптимизации язычковых клапанов на основе термодинамических критериев и критериев усталостной

прочности при изгибе. Термодинамическое состояние газа моделируется с использованием сосредоточенной модели (lumped simulation model), а напряжения при изгибе предсказываются с помощью балочной модели, дискретизированной методом конечных элементов. Оптимизация выполняется с использованием многокритериального генетического алгоритма, что позволяет найти оптимальную конструкцию клапана с точки зрения термодинамической эффективности и надежности.

Wang Y. [15] предложил оптимизацию параметров всасывающего клапана в системе регулирования производительности. Оптимальным сочетанием параметров оказался ход клапана 2,7 мм при жесткости пружины 2100 Н/м, что обеспечивает минимальные потери сопротивления в пределах допустимого динамического движения клапана. Жесткость пружины сброса 20 кН/м выбрана как оптимальная для снижения скорости воздействия тарелки на седло.

Заключение

Рассмотренные математические модели и конечно-элементные подходы позволяют количественно оценить эффективность решений. Общий недостаток предложенных моделей – они не учитывают комплексное влияние режима работы компрессора, материала пластины и конструкции клапана. Данные недостатки моделей, в первом приближении, были устранены в упрощенной модели работы клапана [16].

Список литературы

1. Клименко Н.П., Кулиш О.В., Болдецкая А.М., Непряхин Е.Д. Прогнозирование надежности судовых поршневых компрессоров // Морские технологии: проблемы и решения. 2018. С. 121–128.
2. Сеидахмедов Н.С. Исследования основных эксплуатационных характеристик работы клапанов поршневых компрессоров // Sciences of Europe. 2021. № 79-1 (79). С. 52–55.
3. Han L., Jiang K., Wang Q., Wang X., Zhou Y. Quantitative evaluation on valve leakage of reciprocating compressor using system characteristic diagnosis method // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. P. 1946–1966.
4. Прилуцкий И.К., Григорьев А.Ю., Сегеда В.А. Математическое моделирование поперечных колебаний пластины прямооточного клапана // Вестник Международной академии холода. 2004. № 3. С. 20–23.
5. Zhao B., Jia X., Sun S., Wen J., Peng X. FSI model of valve motion and pressure pulsation for investigating thermodynamic process and internal flow inside a reciprocating compressor // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 131. P. 998–1007.
6. Raju S.M. 2-Way Coupled FSI Simulation for Reciprocating Compressor Reed Valve // NAFEMS World Congress 2019. Quebec, Canada, 2019. Paper NWC_19_3.
7. Castrillo P., Schillaci E., Rigola J. Simulation of fluid-structure interaction and impact force on a reed valve // 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), ECCOMAS Congress 2020. 2021. P. 1–12.
8. Rahimdel M.J., Ghodrati B. Reliability analysis of the compressed air supplying system in underground mines // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. 6836.
9. Dusil R. Mechanical Properties of Valve Steels for Hermetic Compressors // International Compressor Engineering Conference. 1990. Paper 696.
10. Altunlu A.C., Lazoglu I., Oguz E., Kara S. Impact Fatigue Characteristics of Valve Leaves For Small Hermetic Reciprocating Compressors // International Compressor Engineering Conference. 2010. Paper 1994.

11. Tofique M.W., Löf A., Millward C. Experimental analysis of reed valve movement for different reed valve designs tested in an impact fatigue test system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012020.
12. Zhang D., Xu M., Gu J-P., Huang Y-J., Shen X. Analysis of Impact Fatigue Life for Valve Leaves in Small Hermetic Reciprocating Compressors // TELKOMNIKA. 2013. Vol. 11, No. 12. P. 7548–7554.
13. Song W., Xu J., Yang O., Hub Y., Qian G. Very-high-cycle fatigue responses of stainless steel for compressor valve plates // 2nd Mediterranean Conference on Fracture and Structural Integrity. 2022. Procedia Structural Integrity. Vol. 41. P. 486–491.
14. Silva E., Fancello E.A., Deschamps C.J. Application of a multi-objective genetic optimization algorithm for the thermodynamic optimization of reed valves // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2023. Vol. 45, Article 83. 15 p.
15. Wang Y., Zhang J., Jiang Z., Zhou C., Liu W. Investigation on thermodynamic state and valve dynamics of reciprocating compressors with capacity regulation system and parameter optimization // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2019. Vol. 13, Issue 1. P. 923–937.
16. Хазин М.Л., Волегов С.А., Сокерина О.В. Выбор материала для пластин клапана поршневого компрессора // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 12-2. С. 112–124.

УДК 622::621.311.004.18(571.56)

НАРАЩИВАЕМЫЕ БАШЕННЫЕ ПОДЪЕМНИКИ, ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА

В.И. Точилин, зам. главного конструктора
АО «Спецтехномаш», г. Красноярск, РФ

Показана область применения наращиваемых башенных подъемников (НБП) - открытые горные работы. Приведена конструктивная схема НБП, указаны элементы конструкции, принцип наращивания и самоопускания НБП. Приведен порядок работы механизмов НБП при доставке горной массы на поверхность. Приведены формулы расчета циклов вертикального и горизонтального перемещения транспортных сосудов и их взаимозависимость.

Ключевые слова: наращиваемый башенный подъемник, НБП. формулы расчета циклов горизонтального и вертикального перемещения транспортных сосудов

EXTENDABLE TOWER HOISTS, DESIGN FEATURES AND HOIST MECHANISM CALCULATION

V.I. Tochilin

This article describes the application of extendable tower hoists (ETH) in open-pit mining. A structural diagram of the ETH is provided, along with its design elements and the principle of extending and lowering the ETH. The operating procedure of the ETH mechanisms during rock delivery to the surface is described. Formulas for calculating the vertical and horizontal movement cycles of transport vessels and their interdependencies are provided.

Keywords: extendable tower hoist, ETH, formulas for calculating the horizontal and vertical movement cycles of transport vessels

Наращиваемые башенные подъемники (НБП) предназначены для использования в качестве внутрикарьерного транспорта для перемещения в пространстве карьера горной массы, оборудования грузов и людей.

Впервые НБП были предложены автором данной статьи для доработки подкарьерных запасов трубки «Интернациональная» [1], институты горного дела УрО РАН и «ЯкутНИПроАлмаз» относят НБП к перспективному оборудованию для отработки небольших алмазородных месторождений [2]. НБП включены в состав специальных видов транспорта, ГОСТ Р 58148-2018 «Разработка алмазородных месторождений открытым способом в криолитозоне. Требования к проектированию».

Как показано на конструктивной схеме НБП, приведенной на рис., в состав подъемника входят следующие элементы: транспортный мост 1, установленный на нем самоходный вагон 2 со сменным транспортным сосудом (ТС) 3, башня 4, с встроенным в нее клетьевым (скиповым) подъемником 5, секций наращивания 6, портала 7, основания башни 8.

Наращивание башни и самоопускание НБП по мере углубки карьера производиться известными способами путем встраивания в башню дополнительных секций башни 4 и попеременного опирания НБП на подошву карьера через портал 5 или основание башни 6, устанавливаемое в предварительно выполненный зумпф глубиной равной шагу опускания НБП.

Доставка горной массы на дневную поверхность (верхнюю площадку уступа при использовании НБП для доработки карьера) производится следующим способом. В забое на площадке уступа выемочно-погрузочным оборудованием производится безвзрывная выемка горной массы, доставка ее к НБП и погрузка ее в ТС и устанавливается ТС в клеть (в данной статье скиповый вариант не рассматривается), производится подъем клетки до верхнего обменного пункта. Где груженный ТС устанавливается на транспортный мост, а порожний ТС устанавливается в клеть.

Далее идет перемещение самоходного вагона по транспортному мосту, разгрузка ТС (варианты опрокидывание, донная разгрузка), возврат самоходного вагона с ТС на обменный пункт. Одновременно выполняется цикл подъема горной массы: порожний ТС опускается в клеть на нижний обменный пункт (пункт загрузки ТС в клеть), производится обмен ТС, груженный ТС поднимается до верхнего обменного пункта.

Схема доставки горной массы состоит из двух конструктивно независимых элементов, оснащенных собственными устройствами и механизмами: горизонтального перемещения самоходного вагона по транспортному мосту постоянной длины L и вертикального подъема, высота подъема H_i которого периодически циклично увеличивается с заданным шагом до максимальной глубины карьера $H_{\max}$.

Автором ранее выполнены расчеты оборудования НБП для горизонтального перемещения [3], время цикла горизонтального перемещения ТС:

$$t_{\text{гц}} = 4\sqrt{\frac{L}{a}} + 2t_{\text{по}} \quad (1)$$

где L -расстояние перемещения по транспортному мосту, a -ускорение разгона (торможения) самоходного вагона, t_{no} – время пауз при обмене и разгрузке ТС.

При расстоянии транспортирования $L=100$ м, движении по двухпериодной схеме (разгон-торможение) расчетами показана возможность перемещения по транспортному мосту (при грузоподъемности ТС 4 и 6,3 тс), соответственно от 550 до 707 тыс.м³ и 872 до 1114 тыс.м³ горной массы в год. При этом длительность цикла перемещения при изменении ускорений в интервале от 1,0 до 2,2 м/с², времени обмена ТС 10 с, составила соответственно от 60 до 47 с. При увеличении ускорений расчетная мощность возрастала в диапазоне от 134,7 кВт до 413,1 кВт. При этом до 95% мощности привода расходовалось на разгон и торможение [3].

Рассмотрим работу механизма вертикального подъема НБП. В качестве подъемного механизма принимаем однососудную систему подъема. Это наиболее энергоемкая система. При этом это наиболее простая конструкция легко управляемая и маневренная [4]. Выбор обусловлен сравнительно небольшой максимальной высотой подъема до 150 м, необходимость последовательно изменения высоты подъема с шагом 3-5 м при отработке каждого последующего горизонта при соответствующем наращивании башни подъемника вниз (рис.1), требованием к мобильности НБП, соответственным ограничением сечения башни размерами 3,5х3,5(4,0) м железнодорожным и автомобильным транспортными габаритами.

Рассмотрим кинетические режимы работы подъемной системы НБП. Работа клетьевого подъемника с неопрокидными клетями не предусматривает особых ограничений скоростей и ускорений на отдельных участках. Режимы перемещения имеют три (два) периода: период пуска (разгона) системы a_1 (a_3), период установившегося (равномерного) движения t_2 с постоянной скоростью v_{max} (при отсутствии режима движения с постоянной скоростью режим двухпериодный), период останова (замедления) t_3 . Реальные плавные изменения ускорений на концевые участки периода пуска и останова несущественны и их допускается не учитывать при расчетах [4].

При рассмотрении режимов кинематики подъемного механизма НБП будем исходить из следующих условий и допущений: время разгона и торможения и величины ускорений принимаем одинаковыми: $t_1 = t_3 = t$, $a_1 = a_3 = a$, соответственно, максимальная скорость подъема $v_{max}=at$.

Полное время подъема T с i -того уступа до верхнего обменного пункта НБП определяется по формуле [4]:

$$T = \frac{H_{io}}{v_{max}} + \frac{v_{max}\varepsilon_a}{2} \quad (1)$$

где ε_a - бином ускорений определяется в соответствии с формулой [4]:

$$\varepsilon_a = 2 \left(\frac{\xi_1 - \mu_1}{a_1} + \frac{\xi_3 - \mu_3}{a_3} \right) \quad (2)$$

$H_{io} = H_i + h_k$ высота подъема с i -того горизонта, плюс конструктивная высота транспортного моста над верхней площадкой карьера (уступа).

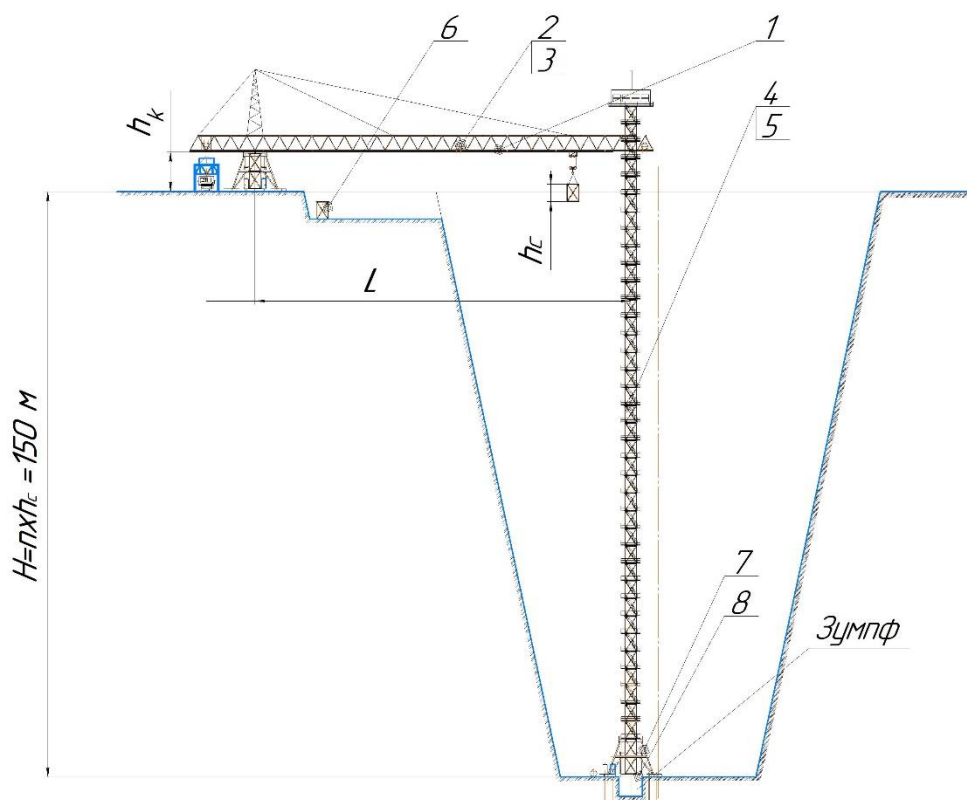


Рис. Наращиваемый башенный подъемник: 1-транспортный мост; 2-самоходный вагон; 3-транспортный сосуд; 4-башня; 5- встроенный клетевой (скиповый) подъемник, 6- секции наращивания башни, 7- портал; 8-основание башни

Учитывая рекомендации [4], примем характеристические коэффициенты режимов разгона и останова:

$\xi_1 = \xi_3 = \text{const} = 1$, при постоянных ускорениях ($a_1 = a_3 = \text{const}$) $\mu_1 = 1/2$; соответственно при замене $t_1 = t_3 = t$ и $a_1 = a_3 = a$ формула (1) примет вид:

$$\varepsilon_a = 2 \left(\frac{1 - \frac{1}{2}}{a} + \frac{1 - \frac{1}{2}}{a} \right) = \frac{2}{a} \quad (3)$$

Формула (1) примет вид:

$$T = \frac{H_{io}}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} \quad (4)$$

Принимая условие, равенства времен подъема и опускания клетки; равенства времён паузы обмена t_{no} при обмене ТС на верхнем и нижнем пунктах обмена и разгрузки (обмене) ТС на транспортном мосту, формула общего времени цикла вертикального перемещения ТС с i -того горизонта примет вид:

$$T_{ци} = 2 \left(\frac{H_{io}}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} + 2t_{no} \right) \quad (5)$$

Из приведенных формул расчета времени циклов вертикального $T_{ци}$ и горизонтального перемещений $t_{гн}$, можно сделать следующий вывод: режимы работы механизмов вертикального и горизонтального перемещений НБП должны рассчитываться исходя обеспечения условия минимального времени ожидания обмена ТС на верхнем обменном пункте. Оптимально время ожидания должно отсутствовать, быть равно нулю, $T_{ци} = t_{гн}$.

Список литературы

1. Точилин В.И. Оработка подкарьерных запасов трубы «Интернациональная» с использованием аэрогеотехнологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. - №5. - С. 197-200.
2. Яковлев В.Л., Зырянов И.В., Журавлев А.Г., Черепанов В.А. Особенности современного подхода к выбору технологического транспорта для алмазородных карьеров Якутии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. -№6. – С.109-119.
3. Точилин В.И. Нарастиваемые башенные подъемники, выбор оборудования для горизонтального транспортирования горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5–2. – С. 101–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_101.
4. Гришко А.П. Г 82 Стационарные машины. — Том 1. Рудничные подъемные установки: Учебник для вузов. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008.— 477 с.; ил.

УДК 622.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ БЛОКА КРОВЛИ

Г.Д. Буялич¹, профессор, д. т. н., К.Г. Буялич¹, доцент, к. т. н., В.Ю. Умрихина¹, асп.

¹ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени
Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, РФ

Кратко рассмотрены результаты математического моделирования динамических явлений при вторичных осадках кровли в очистных забоях угольных шахт и показано применение методов информационного моделирования для анализа динамических колебаний блока кровли.

Ключевые слова: кровля, динамические колебания.

APPLICATION OF INFORMATION MODELING METHODS FOR ANALYZING DYNAMIC OSCILLATIONS OF A ROOF BLOCK

G.D. Buyalich, K.G. Buyalich, V.Yu. Umrikhina

The article briefly discusses the results of mathematical modeling of dynamic-ray phenomena in second-ary sediments roof in clearing faces of coal mines and shows the application of information modeling methods for analyzing dynamic fluctuations of the roof block.

Keywords: roof, dynamic fluctuations.

В России имеются угольные предприятия, которые работают в условиях труднообрушаемых кровель.

Изучение вопроса, касающегося процесса хрупкого разрушения пород, который может сопровождаться динамическими проявлениями горного давления, при отработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях с труднообрушаемыми кровлями, очень актуально.

Работа в таких условиях относится к особо сложным и при увеличении объемов добычи, с одной стороны сопровождается развитием горнодобывающих предприятий, но и одновременно ведет к ряду проблем, таких как зависание основной кровли на больших площадях с последующим хрупким обрушением вышележащих пород, а также динамическое воздействие внешней нагрузки на металлоконструкцию крепи. Как следствие, возникает острая необходимость оперативного решения проблем обеспечения безопасности, что порой требует нестандартных подходов для их решения.

В настоящее время численное моделирование является одним из наиболее распространенных инструментов, использующихся для решения данной проблемы.

Ранее была предпринята попытка описать процесс динамического воздействия блока кровли на крепь сразу после хрупкого разрушения пород математически с применением неоднородного дифференциального уравнения четвертого порядка [1-4], а в работах [5-14] произведены расчеты и получены результаты численного решения данного уравнения. Реакция крепи была представлена в виде сосредоточенной силы или распределенной трапецевидной нагрузки.

В работах [15-19] были сделаны начальные подходы к исследованию динамических колебаний кровли методом конечных элементов.

Вторым шагом стало описание состояние непосредственной кровли при вторичных осадках методом конечных элементов и построение модели. Полученное деформированное и напряженное состояния модели непосредственной кровли в момент перед хрупким разрушением представлено на рис. 1.



Рисунок 1 – (а) Деформированное состояние непосредственной кровли, (б) Напряженное состояние перед хрупким разрушением

Результаты деформированного и напряженного состояния модели непосредственной кровли после её хрупкого разрушения представленные на рис. 2.



Рисунок 2 – (а) Деформированное состояние в момент после хрупкого разрушения, (б) Напряженное состояние в момент после хрупкого разрушения

Процесс деформирования и напряжения в максимальной точке изображены на рисунке 3, из которого видно, что на крепь очистной выработки со стороны кровли действует сила, которая носит колебательный характер.



Рисунок 3 – (а) Фрагмент процесса деформирования в точке тах, (б) процесс изменения напряжения в точке тах

Основываясь на полученных данных можно сделать вывод, что параметры колебания блока кровли (амплитуда A , скорость V , напряжения σ) варьируются в пределах $Z = 0,0003$ м, $\sigma = 1552900$ Па, $V = 0,0003$ м/с, и зависят от следующих параметров:

- физико-механических свойств и размеров блока кровли;
- силовых и геометрических параметров крепи.

Таким образом, дальнейший анализ динамических колебаний блока кровли, в зависимости от различных силовых и геометрических параметров крепи, а также физико-механических свойств и размеров блока кровли позволит выявить характер колебаний с целью уменьшения динамического воздействия на крепь, а также повышения надёжности и работоспособности крепи, способствующей повышению безопасности в угольных шахтах.

Список литературы

1. Пак, Г.А. Шаг обрушения основной кровли и прогноз газовыделения на шахтах Карагандинского бассейна / Г.А. Пак, В. Н. Долгоносков // Уголь. 2015. № 4. С. 76-79.
2. Коровкин, Ю.А. Механизированные крепи очистных забоев / Под ред. Ю.Л. Худина. – М: Недра, 1990. – 413 с.
3. Буялич, Г.Д. Экспериментально-теоретическая оценка и обоснование параметров механизированных крепей для сложных горно-геологических условий пологих угольных пластов / Г.Д. Буялич // Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук – Кемерово, 2004. – 500 с.
4. Фофанов, А.А. К вопросу о частотах колебаний пород основной кровли при вторичных обрушениях / А.А. Фофанов, В.В. Дырдин // Вестник КузГТУ, 2012, № 3. С. 9-12.
5. Буялич, Г.Д. О форме динамических колебаний блока кровли при реакции крепи в виде сосредоточенной силы / Г.Д. Буялич, К.Г. Буялич, В.Ю. Умрихина // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция. 2014. 133-134.
6. Буялич, Г.Д. Моделирование динамических колебаний блока кровли / Г.Д. Буялич, К.Г. Буялич, В.Ю. Умрихина // Сборник статей участников VII Международной научно-практической конференции: в 4 частях. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; Великотырновский университет им. Святых Кирилла и Мефодия; Филиал КузГТУ в г. Белово; Высшая школа агробизнеса и развития регионов, Пловдив. 2014. С. 115-119.
7. Буялич Г.Д., Буялич К.Г., Умрихина В.Ю. Численное моделирование динамических колебаний кровли при ее обрушении / Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 11–12 дек. 2014 г. / Юрг. технолог. ин-т. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2014. – С. 199–202. – ISBN 978-5-4387-0514-7.
8. Буялич, Г.Д. О динамических колебаниях блока кровли при реакции крепи в виде распределенной нагрузки / Г.Д. Буялич, К.Г. Буялич, В.Ю. Умрихина // В сборнике: Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции, научное электронное издание. Институт угля СО РАН. 2014. С. 108-110.
9. Buyalich, G.D. Calculation of fluctuations in secondary roof collapses / G.D. Buyalich, K.G. Buyalich, V.Y. Umrikhina // В сборнике: MINER'S WEEK - 2015 REPORTS OF THE XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM. 2015. С. 520-525.
10. Буялич Г.Д., Умрихина В.Ю. Определение характера и величины воздействия колебаний кровли на крепь / Инновационные технологии и экономика в машиностроении:

- сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 21–23 мая 2015 г. / Юрг. технолог. ин-т. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. – С. 441–444.
11. Буялич Г.Д., Буялич К.Г., Умрихина В.Ю. Оценка динамических колебаний кровли / Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. VIII Между-нар. науч.-практ. конф., Белово, 5–6 марта 2015 г. В 5 ч. Ч. 1 /Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово, Велико Тырново: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», 2015. – С. 276–279. – ISBN 978-5-906805-55-3.
12. Buyalich, G.D. Study of falling roof vibrations in a production face at roof support resistance in the form of concentrated force / G.D. Buyalich, K.G. Buyalich, V.Y. Umrikhina // В сборнике: Innovative Technologies in Engineering VII International Scientific Practical Conference. Conference Proceedings. National Research Tomsk Polytechnic University. 2016. С. 12120.
13. Буялич Г.Д., Буялич К.Г., Умрихина В.Ю. Расчет колебаний кровли при вторичных осадках / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 6. – С. 115–121.
14. Буялич, Г.Д. Исследование колебаний обрушающейся кровли в очистном забое при сопротивлении крепи в виде сосредоточенной силы / Г.Д. Буялич, К.Г. Буялич, В.Ю. Умрихина // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. Юргинский технологический институт Томского политехнического университета. 2016. С. 448-452.
15. Иванов, Д.В. Введение в Ansys Workbench / Д.В. Иванов, А.В. Доль // Учеб. - метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с: ил.
16. Бруяка, В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / В.А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова, Н. А. Глазунова, И. Е.Адеянов // Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с: ил.
17. Буялич Г.Д., Буялич К.Г., Умрихина В.Ю. Математическое моделирование динамических явлений при обрушении кровли / Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы II межрегиональной науч.-практ. конф., Севастополь, 13–17 сент. 2016 г. / Севастопольский государственный университет. – Севастополь, 2016. – С. 73–74.
18. Умрихина, В.Ю. Методика построения модели для исследования динамических колебаний кровли методом конечных элементов / В.Ю. Умрихина, Г.Д. Буялич // В сборнике: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая" Конференция проходит при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Ответственный редактор Костюк Светлана Георгиевна. 2017. С. 14010.
19. Умрихина, В.Ю. Построения модели для исследования динамических колебаний кровли методом конечных элементов / В.Ю. Умрихина, Г.Д. Буялич // В сборнике: Современные тенденции и инновации в науке и производстве материалы VI Международной научно-практической конференции. 2017. С. 72-74.

УДК: 621.879.48

ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ РОТОРА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Я.Л. Либерман¹, канд.техн. наук, доцент, О.А. Лукашук¹, канд.техн. наук, доцент,
Маалаоуи Хамед¹², инженер-исследователь, Тунис

¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Рассматриваются цифровые компоненты системы управления перемещениями ротора карьерного экскаватора, обеспечивающие точное позиционирование рабочих элементов. Основное внимание уделяется разработке и исследованию ключевых элементов системы: реверсивного счётчика импульсов, линейного интерполятора, блока синхронизации и блока определения направления движения. Описывается принцип работы каждого компонента, включая механизмы накопления и вычитания импульсов, синхронизации сигналов и определения направления перемещения. Разработанные компоненты обеспечат точное позиционирование рабочих элементов экскаватора.

Ключевые слова: роторный экскаватор, реверсивный счетчик импульсов, блок синхронизации, программное управление, позиционирование.

DIGITAL ELEMENTS OF THE CONTROL SYSTEM FOR ROTOR MOVEMENTS OF A QUARRY EXCAVATOR

Ya. L. Liberman, O. A. Lukashuk, Maalaoui Hamed

The article examines digital components of the control system for rotor movements of a quarry excavator, which ensure precise positioning of working elements. The main focus is on the development and research of key system elements: a reversible pulse counter, linear interpolator, synchronization block, and motion direction detection block. The operating principle of each component is described, including mechanisms for pulse accumulation and subtraction, signal synchronization, and direction detection. The developed components will ensure precise positioning of the excavator's working elements.

Keywords: rotary excavator, reversible pulse counter, synchronization block, program control, positioning.

В современном мире высокотехнологичной автоматизации в горнодобывающей промышленности мы видим, что в современных системах управления необходимы очень надежные цифровые компоненты, которые, в свою очередь, обеспечивают точное позиционирование рабочих частей и плавное движение деталей машины [1-2]. В открытой добыче полезных ископаемых роторные экскаваторы являются сложными многокоординатными системами, которые требуют другого подхода к управлению [3]. Эффективные алгоритмы и аппаратные решения для компонентов цифровой системы управления приведут к повышению производительности и надежности экскаваторов [4-5].

Для разработанной системы управления перемещениями ротора карьерного экскаватора [6] рассмотрим основные цифровые элементы, которые играют ключевую роль в процессе преобразования и синхронизации управляющих сигналов.

Реверсивный счетчик импульсов (РСИ) — это, по нашему определению, ключевой элемент системы управления, который выполняет функцию

накопления и вычитания импульсов в соответствии с направлением требуемого движения ротора (рис. 1).

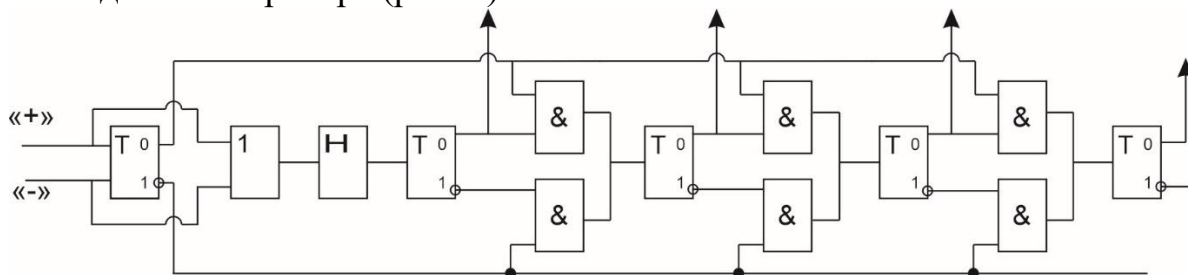


Рис. 1. Схема РСИ (реверсивного счетчика импульсов)

Здесь «0» и «1» обозначают исходное состояние триггеров, работающих по «положительной» логике (срабатывают на передний фронт входного импульса).

Принцип работы РСИ следующий: при приходе первого импульса на вход «+», на нижний вход - единица и нижние элементы «И» готовы пропускать «единицы». Счетчик работает на суммирование и далее на его выходах (обозначенных стрелками) при приходе каждого импульса на «+» двоичное число возрастает на двоичную единицу. Если первичный импульс поступает на вход «-», то Т-триггер переключается, теперь «единица» вверху и готов пропускать «единицы» верхние элементы «И». Счетчик работает на вычитание (при проходе импульсов на «-», на выходах со стрелками двоичное число уменьшается).

Элемент задержки стоит для того, чтобы перед счетом дать счетчику время прийти в нужное для счета состояние.

Если на входе «+» или «-» счетчика одновременно поступят входные импульсы, то произойдет ошибка. Чтобы этого не произошло, на входе счетчика стоит блок синхронизации БС (рис. 2):

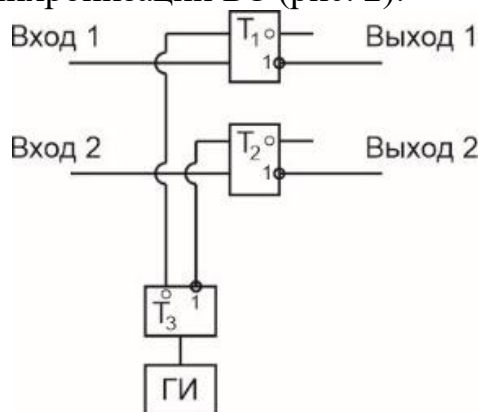


Рис. 2. Блок синхронизации:

ГИ – высокочастотный генератор импульсов; T₁, T₂ – RS-триггеры; T₃ – Т-триггер

Принцип работы блока синхронизации следующий. T₃ дает на своих выходах «единицу» попеременно. В результате T₁ и T₂ попеременно приходят в состояние «1». Если на «вх₁» и «вх₂» импульсы придут одновременно, то они T₁ и T₂ «воздействуют» одновременно так, чтобы на их «вых₁» и «вых₂» были «нули». Но «единицы» на «вых₁» или «вых₂» могут появляться только попеременно, т.к. T₃ на своих выходах дает единицы попеременно.

но. Поэтому при одновременном поступлении импульсов на «ВХ₁» и «ВХ₂», БС разводит их во времени.

Блок определения направления перемещения БОНП показан на рис. 3 (шкала датчика импульсов изображена условно).

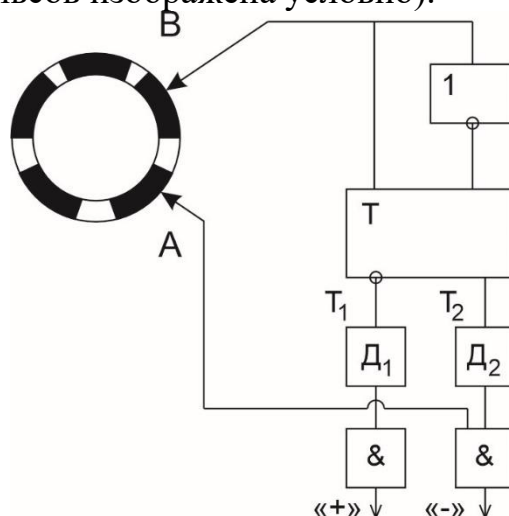


Рис. 3. Блок определения направления перемещения

Съемник импульсов А установлен на «кромке» импульса. Съемник В — на середине. Получается, что с одного съемника импульс снимается с опережением, с другого — с задержкой (с опозданием). Временные диаграммы БОНП приведены на рис. 4. Логическая схема блока, которая используется для анализа этого порядка, генерирует сигнал направления движения, который, в свою очередь, используется для корректировки управляющих действий.

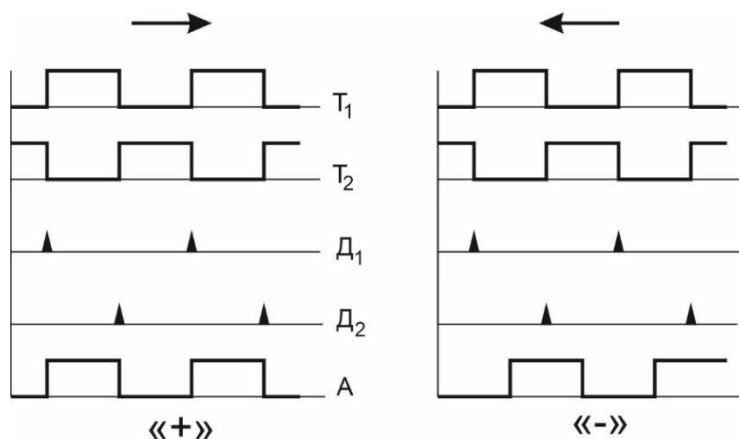


Рис. 4. Временные диаграммы БОНП

Пример, иллюстрирующий принцип работы линейного интерполятора (преобразователя кода в импульсы), представлен на рис. 5.

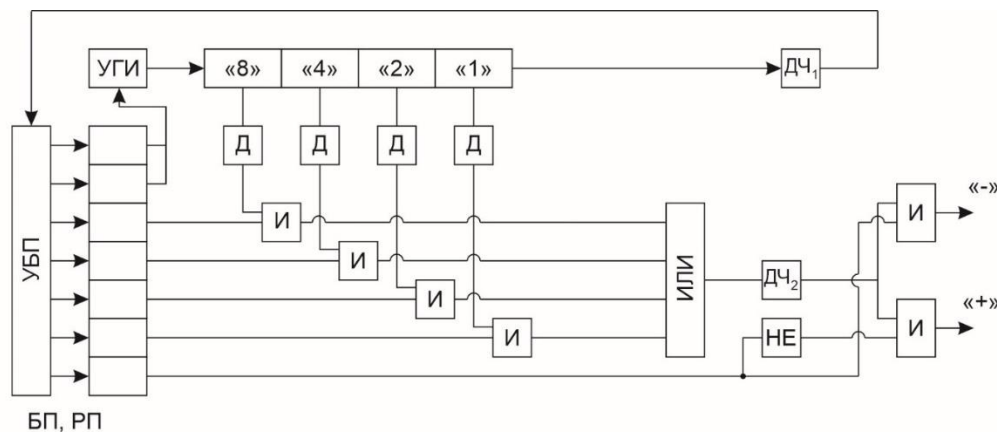


Рис. 5. Принцип работы линейного интерполятора

УВП – устройство ввода программы в двоичном коде; УГИ – управляемый генератор импульсов; БП, РП – буферная память, рабочая память; Д – дифференцирующая цепь; ДЧ – делитель частоты; И – логический элемент «И»; ИЛИ – логический элемент «ИЛИ»; НЕ – нелогический элемент «НЕ»

Разработанные компоненты системы, включая линейный интерполятор, реверсивный счетчик импульсов, блок синхронизации и блок определения направления движения, демонстрируют высокую эффективность в обеспечении точного позиционирования рабочих элементов экскаватора. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшей модернизации существующих систем управления карьерными экскаваторами и разработки новых поколений подобных машин. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются оптимизация алгоритмов работы цифровых компонентов и повышение их устойчивости к внешним воздействиям.

Список литературы:

1. R. B. Sepe and J. H. Lang, "Real-time observer-based (adaptive) control of a permanent-magnet synchronous motor without mechanical sensors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 6, pp. 1345-1352, Nov.-Dec. 1992, doi: 10.1109/28.175287.
2. Salcudean, S. E., Tafazoli, S., Lawrence, P. D., & Chau, I. (1997). Impedance control of a teleoperated mini excavator. Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics, 19-25. <https://doi.org/10.1109/ICAR.1997.620156>.
3. Koivo, A. J., Thoma, M., Kocaoglan, E., & Andrade-Cetto, J. (1996). Modeling and control of excavator dynamics during digging operation. Journal of Aerospace Engineering, 9(1), 10-18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(1996\)9:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(1996)9:1(10)).
4. Feng, H., Yin, C., Weng, W., Ma, W., Zhou, J., Jia, W., & Zhang, Z. L. (2017). Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller. Mechanical Systems and Signal Processing, 105, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.12.014>.
5. Zhang, Q., Zhao, J., Shen, X., Xiong, G., Wang, F.-Y., & Zheng, N. (2020). Intelligent control of excavator based on parallel system. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 100, 351-364. <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01196-4>.
6. Либерман Я.Л., Лукашук О.А., Маалаоуи Х., Давыдова В.В. Система управления перемещениями ротора карьерного роторного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 6 (176). С. 65-72. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-65-72, EDN: VOZXMI.

УДК: 621.879.48

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СТРУКТУРЫ СОПРЯЖЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ «СПАСАТЕЛЬНЫЙ РОБОТ – ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ УГЛЕПОРОДНЫЙ ГРУНТ» НА ОСНОВЕ MATLAB-EDEM-RECURDYN-PARTICLEWORKS

Чжэн Дундун¹ аспирант (Китай), Ю.А. Лагунова^{1,2}, д-р техн. наук, проф.

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

Водонасыщенный углепородный грунт в пост-аварийных шахтах создаёт серьёзные вызовы для оценки проходимости спасательных роботов. Предложена структура физического сопряженного моделирования на основе MATLAB, EDEM, RecurDyn и Particleworks. MATLAB выступает главной управляющей программой, обеспечивая обмен данными и временную синхронизацию между модулями. EDEM моделирует частицы угля и породы методом дискретных элементов, Particleworks – поведение воды методом сглаженных частиц (SPH), RecurDyn – динамику ходового механизма робота. Структура позволяет точно воспроизводить контактное взаимодействие в системе «робот – грунт» и служит основой для оптимизации ходовых систем.

Ключевые слова: спасательный робот; водонасыщенный углепородный грунт; физическое сопряжение; EDEM; RecurDyn; Particleworks; MATLAB.

CONSTRUCTION OF A COMPLEX STRUCTURE OF COUPLED MODELING FOR THE SYSTEM "RESCUE ROBOT - WATER-SATURATED CARBONACEOUS SOIL" BASED ON MATLAB-EDEM-RECURDYN-PARTICLEWORKS

Zheng Dongdong, Yu. A Lagunova

Water-saturated coal-rock ground in post-disaster mines poses significant challenges for evaluating the maneuverability of rescue robots. This paper proposes a multi-physics coupled simulation framework based on MATLAB, EDEM, RecurDyn, and Particleworks. MATLAB serves as the master control program, managing data exchange and time synchronization. EDEM simulates coal-rock particles using the discrete element method, Particleworks models water behavior with smoothed particle hydrodynamics (SPH), and RecurDyn handles the multi-body dynamics of the robot's locomotion mechanism. The framework accurately reproduces contact interaction in the robot-ground system and provides a basis for optimizing locomotion systems.

Keywords: rescue robot; water-saturated coal-rock ground; multi-physics coupling; EDEM; RecurDyn; Particleworks; MATLAB.

Аварии на шахтах, особенно такие как водная стихия и взрывы газа, часто приводят к сложным и изменчивым условиям под землей, а также к тяжелой обстановке на поверхности, что создает серьезную угрозу для жизни заблокированных людей и эффективности действий спасателей[1]. Спасательные роботы, выступая в качестве важного оборудования, которое помогает или даже заменяет человека при выполнении задач в опасных зонах, их устойчивость и проходимость в условиях сложного рельефа являются ключевыми показателями эффективности[2]. Особенно на водонасыщенных углепородных грунтах, где ходовые механизмы робота контактируют с рыхлой, влажной и неоднородной средой, их контактно-механические характеристики существенно влияют на маневренность, энергопотребление и даже на успешность выполнения задачи.

Традиционные методы проектирования и оценки характеристик ходовых механизмов роботов часто опираются на упрощенные модели или натурные эксперименты, которые не позволяют в полной мере учесть сложные эффекты физического взаимодействия, а также характеризуются высокой стоимостью и длительностью проведения испытаний. С развитием технологий компьютерного моделирования многодисциплинарное совместное моделирование открывает новые пути для решения подобных задач. Целью данной статьи является создание основы для комплексного подхода к моделированию, интегрирующего MATLAB в качестве главной управляющей программы с программными комплексами EDEM, RecurDyn и Particleworks. Разрабатываемая структура призвана обеспечить более точное моделирование поведения спасательных роботов при движении по водонасыщенному углепородному грунту и предоставить теоретическую базу для оптимизации конструкции их ходовых механизмов.

1. Структура сопряженного моделирования

Предлагаемая структура использует MATLAB в качестве центральной управляющей программы, координирующей работу трёх специализированных пакетов (рис. 1). Такой подход обеспечивает интеграцию дискретно-элементного, гидродинамического и многодисциплинарного моделирования.

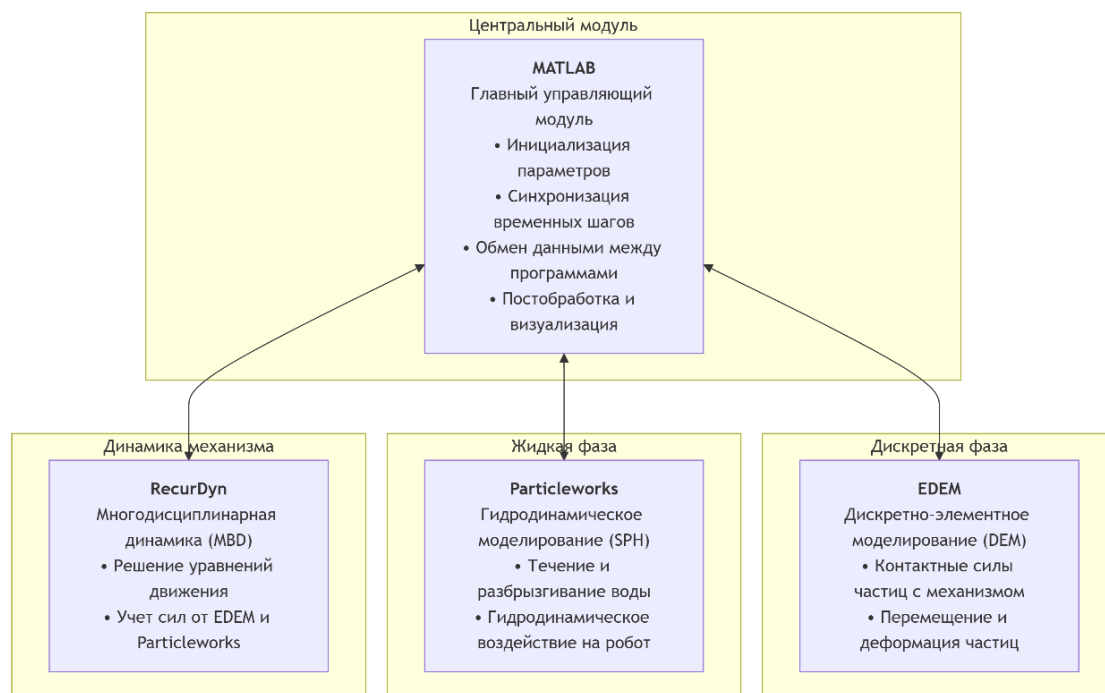


Рис. 1 Архитектура совместного моделирования EDEM-Particleworks-RecurDyn в MATLAB

Функциональное назначение программных модулей

MATLAB: главный управляющий модуль; отвечает за инициализацию параметров, синхронизацию временных шагов, обмен данными между программами, а также за постобработку и визуализацию результатов.

EDEM (DEM): моделирование дискретной фазы – частиц угля и породы, рассчитывает контактные силы между частицами и ходовым меха-

низмом, а также их перемещение и деформацию.

Particleworks (SPH): моделирование жидкой фазы – поверхностных вод, воспроизводит течение, разбрызгивание и гидродинамическое воздействие на робота.

RecurDyn (MBD): моделирование динамики ходового механизма (гусеничного, колёсного или шагающего типа), решает уравнения движения под действием сил от EDEM и Particleworks.

Алгоритм итерационного взаимодействия

На каждом временном шаге моделирование выполняется в следующем порядке:

- 1) RecurDyn передаёт в EDEM и Particleworks текущее положение и скорость ходового механизма;
- 2) EDEM вычисляет контактные силы, возникающие при взаимодействии робота с частицами грунта, и передаёт их в RecurDyn;
- 3) Particleworks вычисляет гидродинамические силы, действующие на робота со стороны воды, и передаёт их в RecurDyn;
- 4) Particleworks и EDEM обмениваются данными о движении воды и частиц для учёта двухстороннего влияния (фильтрация, перемешивание);
- 5) RecurDyn, получив суммарные внешние силы, интегрирует уравнения движения и определяет новое положение механизма;
- 6) MATLAB считывает ключевые параметры (силы, координаты, скорость) от всех трёх пакетов, сохраняет их и при необходимости корректирует управляющие сигналы (например, изменяет крутящий момент двигателя).

Цикл повторяется для следующего шага по времени.

Постобработка и анализ.

По окончании расчёта MATLAB собирает данные от всех модулей и выполняет их совместную обработку: строит траектории движения, графики скоростей и энергопотребления, распределение нагрузок на грунт, картину течения воды и перемещения частиц. Визуализация осуществляется средствами MATLAB.

Ожидаемые результаты и перспективы.

Разработанная структура позволит:

достоверно моделировать движение спасательного робота по водонасыщенному грунту с учётом буксования, сопротивления воды и разбрызгивания;

оценивать влияние конструктивных параметров (ширина гусениц, форма грунтозацепов, тип движителя) на проходимость, силу тяги и энергопотребление;

оптимизировать конструкцию ходовых механизмов и алгоритмы управления для повышения адаптивности к сложным условиям;

сократить затраты на натурные испытания за счёт предварительной виртуальной отработки.

Дальнейшие направления исследований включают повышение вычислительной эффективности (параллельные вычисления), совершенствование моделей материалов (учёт когезии, неньютоновских свойств воды) и инте-

грацию алгоритмов машинного обучения для адаптивного управления движением по данным сенсоров.

Заключение

Предложена комплексная структура сопряженного моделирования системы «спасательный робот – водонасыщенный углепородный грунт» на основе MATLAB, EDEM, RecurDyn и Particleworks. Благодаря координации через MATLAB достигается эффективное объединение методов дискретных элементов, гидродинамики сглаженных частиц и многодисциплинарной динамики. Это создаёт теоретическую и техническую базу для углублённого изучения взаимодействия робота с грунтом и оптимизации ходовых механизмов, что повышает их проходимость в пост-аварийных условиях.

Список литературы

1. Quansheng, J., Shaoqian, X., Xuyang, S., Rongjun, S., Lei, W., Xiao, L., & Zhongbei, L. Динамика состава газа и теплового поведения после взрывов: экспериментальное исследование при различных начальных концентрациях. Case Studies in Thermal Engineering, 59, 104564. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104564>
2. Pillai, Branesh M., et al. Проблемы, с которыми сталкиваются начинающие разработчики спасательных роботов для работы на пересеченной местности: обзор систем управления движением. Журнал науки и техники управления, 2019. (2019): 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/2135914>.
3. Mamat, Normaisharah, et al. Многофизическое и параллельное кинематическое моделирование 3-степенного MEMS-зеркала." MATEC Web of Conferences 32.(2015): 01004. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20153201004>.

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И КОНСТРУИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

***Что, и где, и как построить,
Да и нужно ль в это лезть,
Сколько это будет стоить –
Мы узнаем только здесь!
Чтоб российский обыватель –
А не западный делец –
Был у нас изобретатель
И единственный творец.***

Доц. П.А. Жиганов

УДК 622.72

ПРИМЕНЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, УКРЕПЛЕННЫХ ОКСИДАМИ И КАРБИДАМИ

Д.А. Цевменко ¹, В.Е. Адас ¹

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Представлен анализ современных технологий получения алюминиевых композиционных материалов (АКМ), армированных оксидными и карбидными фазами, и их применения в машиностроении. Рассмотрены методы порошковой металлургии, литейные и аддитивные технологии, механизмы упрочнения и сравнительные характеристики композитов систем Al–SiC, Al–TiC и Al–Al₂O₃. Показаны преимущества данных материалов по прочности, твёрдости и износостойкости по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами. Обоснованы перспективы внедрения алюмоматричных композитов в условиях импортозамещения и развития отечественного машиностроения.

Ключевые слова: алюминиевые композиты, Al₂O₃, SiC, TiC, порошковая металлургия, армирование, машиностроение.

HYDRAULIC DRIVE IN ENGINEERING APPLICATIONS OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH OXIDES AND CARBIDES

Tsevmenko D.A., Adas V.E.

The paper presents an analysis of modern technologies for producing aluminum matrix composites reinforced with oxide and carbide phases and their application in mechanical engineering. Powder metallurgy, casting and additive technologies are considered, as well as strengthening mechanisms and comparative characteristics of Al–SiC, Al–TiC and Al–Al₂O₃ systems. The advantages of these materials in strength, hardness and wear resistance compared to conventional aluminum alloys are demonstrated. Prospects for the implementation of aluminum matrix composites in the context of import substitution and development of domestic mechanical engineering are substantiated.

Keywords: aluminum matrix composites, Al₂O₃, SiC, TiC, powder metallurgy, reinforcement, mechanical engineering.

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к конструкционным материалам, особенно в условиях необходимости снижения массы изделий при сохранении высокой прочности и износостойкости. Перспективным направлением являются алюминиевые композиционные материалы (АКМ), армированные оксидными и карбидными частицами.

Наиболее распространёнными армирующими фазами являются Al₂O₃, SiC и TiC. Введение 5–20 % армирующих частиц обеспечивает рост прочности до 40–70 %, увеличение модуля упругости на 25–40 % и повышение износостойкости в 2–5 раз по сравнению с неармированным алюминием.

Структурные особенности распределения армирующих частиц в алюминиевой матрице представлены на рисунке 1. Видно, что равномерное распределение дисперсных фаз способствует формированию мелкозернистой структуры и снижению концентрации локальных напряжений. Отсутствие выраженной агломерации частиц обеспечивает эффективную передачу нагрузки от матрицы к упрочняющей фазе и повышение эксплуатационных характеристик материала [1].

Наиболее эффективной технологией получения АКМ является порошковая металлургия, включающая смешение порошков, холодное прессование и спекание при температурах 550–620 °С. Метод обеспечивает равномерное распределение частиц и высокую плотность материала [2].

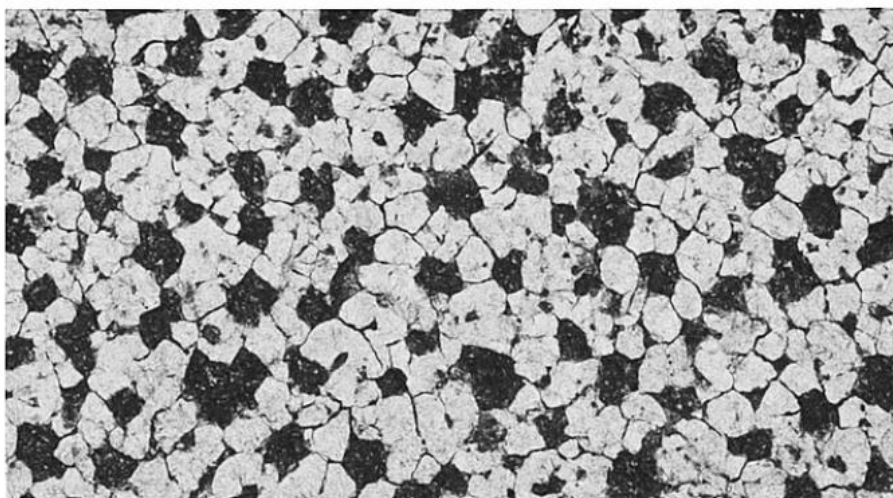


Рис. 1. – Микроструктура алюминиевого композита.

Повышение температуры спекания до оптимального диапазона способствует увеличению прочности изгиба композита Al–TiC, то подтверждается экспериментальными данными (рис. 2), [3].

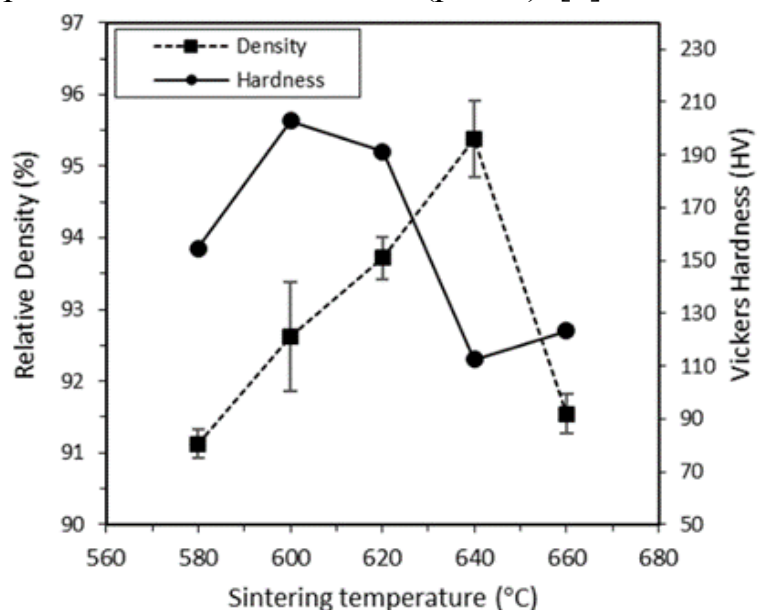


Рис. 2. Зависимость прочности изгиба от температуры спекания для композита Al–TiC (8 % масс.) при различных временах выдержки.

Влияние содержания армирующих частиц на механические свойства показано на примере системы Al–SiC: при увеличении доли SiC возрастает предел прочности, однако снижается относительное удлинение материала (рис 3), [3].

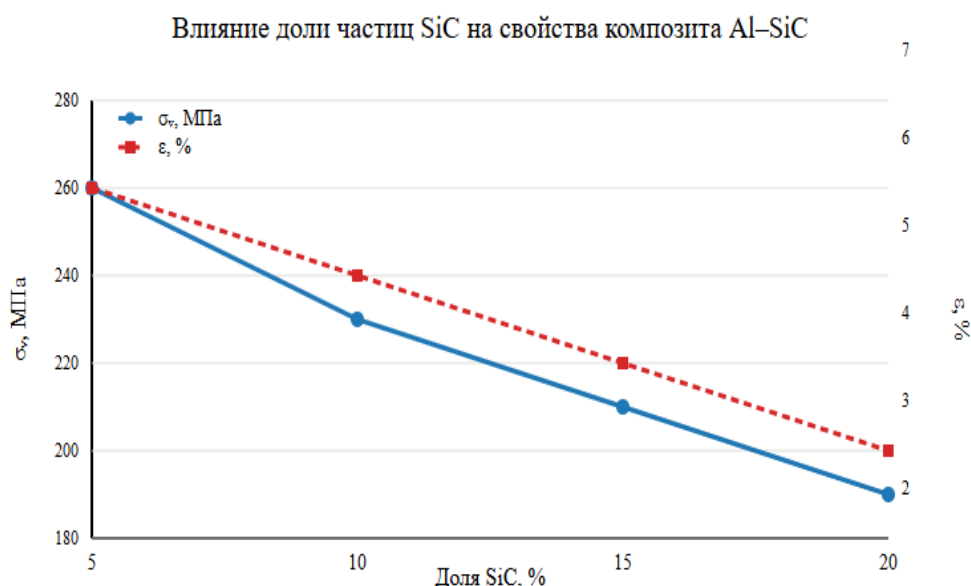


Рис. 3. Влияние доли частиц SiC на предел прочности и относительное удлинение композита Al-SiC.

Основными механизмами упрочнения являются механизм Орована, барьерный эффект частиц и термомеханическое упрочнение вследствие различий коэффициентов теплового расширения матрицы и армирующей фазы [4]. Структура и свойства границы раздела «матрица-армирующий элемент» играют ключевую роль в реализации этих механизмов. Прочная адгезионная связь между компонентами обеспечивает эффективную передачу нагрузки от пластичной матрицы к высокопрочным частицам или волокнам, что позволяет реализовать потенциал композита в полном объеме. Нарушение же этой связи может привести к преждевременному зарождению трещин и разрушению материала под нагрузкой [5].

Алюмоматричные композиты применяются в авиационной, автомобильной и энергетической промышленности - в поршнях, гильзах цилиндров, тормозных дисках, элементах редукторов и теплообменников. Использование АКМ позволяет снизить массу изделий и увеличить их ресурс.

Дополнительным преимуществом алюмоматричных композитов является их высокая термическая стабильность и сопротивляемость усталостному разрушению, что особенно важно для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок и повышенных температур. За счёт оптимального подбора типа и объёма армирующей фазы возможно целенаправленное регулирование комплекса свойств материала в зависимости от условий эксплуатации. Это позволяет проектировать детали с заранее заданными характеристиками прочности, жёсткости и износостойкости [6].

Развитие аддитивных технологий открывает новые возможности для изготовления сложнопрофильных изделий из АКМ с минимальными потерями материала и снижением производственных затрат. В условиях импортозамещения особую актуальность приобретает создание отечественной сырьевой базы армирующих порошков и совершенствование технологических процессов их переработки.

Вывод. Таким образом, алюминиевые композиционные материалы, армированные оксидами и карбидами, обладают высоким потенциалом для внедрения в отечественное машиностроение при условии совершенствования технологий их получения и обеспечения стабильного качества порошковых материалов.

Список литературы

1. Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Непрерывные волокна оксида алюминия (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. №4. С. 30–34.
2. Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // Литейное производство. 2008. № 8. С. 3-9.
3. Хамза М., Мондал С. Влияние армирования керамическими микрочастицами на структуру и свойства композитов с алюминиевой матрицей // МиТОМ. 2022. № 3. С. 30 - 33.
4. Шавнев А.А., Березовский В.В., Курганова Ю.А. Особенности применения конструкционного металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава, армированного частицами SiC. Ч. 2 (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 3(15). С. 11-17.
5. Mortensen A., Llorca J. Metal matrix composites // Annual Review of Materials Research. 2010. Vol. 40. No. 1. P. 243-270.
6. Prusov E., Deev V., Rakhuba E. Aluminum matrix insitu composites reinforced with Mg₂Si and Al₃Ti // Materials Today: Proceedings. 2019. P. 386-391

621.744.3

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОМ ФОТОПОЛИМЕРНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

В.Е. Адас¹, М.Л. Хазин¹, д-р техн. наук, проф.

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Разработана комплексная технология изготовления высокоточных литейных моделей методом фотополимерной 3D-печати для последующего получения изделий литъём в гипсовые формы. Проведён анализ современных методов аддитивного производства и их применимости в литейных процессах. Выполнена адаптация технологии для изготовления детали «Крышка» из алюминиевого сплава Д16. Рассмотрены этапы технологического маршрута: подготовка цифровой модели, 3D-печать на фотополимерном принтере с использованием низкоточной смолы, изготовление гипсовой формы, выжигание модели, подготовка расплава и заливка металла, финишная механическая обработка и контроль качества. Предложены технические решения для обеспечения направленного затвердевания сплава Д16, склонного к образованию горячих трещин, включая расчёт литниково-питающей системы и оптимизацию режимов прокали формы.

Ключевые слова: фотополимерная 3D-печать, литъё по выжигаемым моделям, гипсовые формы, алюминиевый сплав, литниковая система, аддитивные технологии.

FABRICATION OF CASTING PATTERNS USING PHOTOPOLYMER 3D PRINTING

V.E. Adas, M.L. Khazin

A comprehensive technology for manufacturing high-precision casting patterns using photopolymer 3D printing has been developed for subsequent production of parts by casting into plaster molds. An analysis of modern additive manufacturing methods and their applicability in foundry processes was conducted. The technology was adapted for the fabrication of a "Cover" part made from D16 aluminum alloy. The stages of the technological route are examined: preparation of the digital model, 3D printing on a photo-polymer printer using low-ash resin, plaster mold fabrication, pattern burnout, melt preparation and metal pouring, finishing machining, and quality control. Technical solutions are proposed to ensure directional solidification of the D16 alloy, which is prone to hot cracking, including the design of the gating and feeding system and optimization of the mold calcination regimes.

Keywords: photo-polymer 3D printing, investment casting, plaster molds, aluminum alloy, gating system, additive technologies.

Современное литейное производство характеризуется постоянным поиском методов, позволяющих сократить сроки подготовки производства, повысить точность и качество отливок, а также расширить номенклатуру изделий со сложной геометрией. Традиционные способы изготовления литейной оснастки, основанные на механической обработке металлов, отличаются высокой трудоёмкостью, длительными циклами и ограничениями по геометрической сложности.

Внедрение аддитивных технологий, в частности фотополимерной 3D-печати, открывает новые возможности для создания мастер-моделей сложной конфигурации с высокой точностью и минимальной шероховатостью поверхности. Особый интерес представляет комбинирование фотополимерной 3D-печати с классическими литейными процессами, такими как

литьё по выплавляемым (выжигаемым) моделям в гипсовые формы. Данный гибридный подход позволяет реализовать принципы цифрового производства, обеспечивая короткие сроки изготовления, гибкость и высокое качество конечной продукции [1].

Технология изготовления литейной модели методом фотополимерной 3D-печати. Для изготовления литейной модели использован 3D-принтер Anycubic Photon Mono M7 Pro, работающий по технологии LCD с монохромной матрицей. Материал модели – специализированная фотополимерная смола HARS Labs Dental, изначально разработанная для стоматологического применения, но обладающая ключевыми для литья свойствами: сверхнизкая зольность менее 0,01 %, обеспечивающая чистоту полости формы после выжигания; высокая точность и гладкость поверхности; предсказуемое и полное выгорание в заданном температурном диапазоне. Объектом исследования выбрана деталь «Крышка», характеризующаяся наличием фланцевого основания, цилиндрической средней части с внутренней ступенью и тонкостенного верхнего обода. Материал отливки – алюминиевый сплав Д16, обладающий высокой удельной прочностью, но сложный в литье из-за широкого интервала кристаллизации и склонности к горячим трещинам.

Подготовка цифровой модели выполнялась в CAD-системе «Компас 3D» с обязательным учётом коэффициента суммарной усадки, который для данной детали составляет 1,98%. После завершения моделирования геометрия экспортируется в формат STL и импортируется в программу «Anycubic», где производится настройка параметров печати: толщина слоя устанавливается 0,05 мм, время экспозиции основного слоя составляет 2 с, время экспозиции первого слоя 28 с, скорость подъёма платформы 70 мм/мин. Время изготовления модели составляет 1 час 18 минут и расход материала - 34 грамма. По завершении печати выполняется постобработка, включающая промывку модели в изопропиловом спирте в течение 5 минут для удаления остатков неотверждённой смолы, аккуратное удаление поддерживающих структур и финальное отверждение в УФ-камере в течение 5 минут для достижения полной полимеризации материала [2]. Изготовленное изделие представлено на рис. 1.



Рис. 1. Деталь «Крышка»

Проектирование литниково-питающей системы для сплава Д16. Сплав Д16 относится к группе деформируемых алюминиевых сплавов и характеризуется пониженными литейными свойствами. Для получения качественной отливки без усадочных дефектов и горячих трещин необходимо обеспечить направленное затвердевание и непрерывное питание массивных узлов. Расчёт литниковой системы выполнен по классической методике для цветных сплавов. Площадь минимального сечения стояка определена из условия, что масса металла, проходящего через стояк составляет 0,39 кг с учётом массы отливки и литниковой системы. Расчётное значение диаметра стояка составило 8,7 мм. Для выполнения условия направленного затвердевания, при котором модуль стояка должен превышать модуль отливки, диаметр стояка увеличен до 12 мм. Приняты следующие параметры литниковой системы: стояк диаметром 12 мм и высотой 50 мм; 3 питателя круглого сечения размером 6x25 мм.

Изготовление гипсовой формы и выжигание модели [3]. Модель покрывается тонким слоем антиадгезионного состава на основе коллоидального диоксида кремния для предотвращения прилипания гипса и облегчения выжигания. Готовится огнеупорная гипсовая суспензия на основе литейного гипса марки ГЛ с добавками мелкодисперсного кварцевого песка (соотношение порошка и воды 100:35). Замес производится в вакуумной камере для удаления воздуха. Модель помещается в центре опоки и суспензия заливается тонкой струёй, затем опока помещена в вакуумную установку на 3 минуты для окончательного удаления пузырьков. Твердение формы происходит при комнатной температуре в течение 8 часов (рис. 2)

Процесс термического удаления модели и прокаливания гипсовой формы (рис 3) проводится в муфельной печи с программируемым контроллером в 3 стадии, представленные в таблице 1

Таблица 1 – Процесс термического удаления модели

Стадия	Температурный интервал	Скорость нагрева	Выдержка	Назначение
1	20–300 °С	1,5 °С/мин	1 час	Плавление и стекание смолы
2	300–550 °С	4 °С/мин	6 часов	Окислительное выгорание кокса
3	550–750 °С	6 °С/мин	4 часа	Прокалка формы, удаление влаги



Рис. 2. Опока с суспензией



Рис. 3. Прокаливание гипсовой формы

Плавку сплава Д16 проводили в графитовом тигле под слоем покровного флюса, представляющего собой смесь хлоридов и фторидов натрия и калия для защиты от окисления. Температура плавки поддерживается в интервале 750–780 °С. Подготовленную гипсовую форму, предварительно прогревали до 500 °С, извлекали из печи и устанавливали на заливочный поддон. Заливка металла (рис. 4) осуществлялась непрерывной струёй в максимально короткое время для предотвращения потерь температуры. После охлаждения формы, выбивки и очистки получается отливка (рис 5), соответствующая заданной геометрии.



Рис. 4. Заливка металла



Рис. 5. Отливка

По завершению литейных операций литниковую систему отделяли от отливки ленточной пилой, места среза зачищали для удаления заусенцев и подготовки поверхности к дальнейшей обработке. Для достижения требуемых механических свойств сплава Д16 отливка подвергается термическому упрочнению, включающему нагрев до температуры 500 °С с последующим охлаждением и естественному старению в течение 96 часов. На обрабатывающем центре с числовым программным управлением выполнялась механическая обработка детали: фрезерование наружных поверхностей для придания точных габаритных размеров и расточка внутренних диамет-

ров для получения посадочных отверстий с требуемой точностью [4]. Контроль качества готовой детали осуществлялся в строгом соответствии с требованиями чертежа. Геометрические параметры проверялись на координатно-измерительной машине, подтверждающей соответствие всех размеров. Измерение шероховатости поверхности профилометром показывает достижение значения $Ra\ 1,6$ на ответственных поверхностях, что соответствует техническим требованиям. Для выявления возможных поверхностных дефектов применялась капиллярная дефектоскопия по второму классу чувствительности, результаты которой подтверждают отсутствие трещин, пор и других недопустимых дефектов в материале отливки.

Вывод. Применение фотополимерной 3D-печати для изготовления литейных моделей обеспечивает существенное сокращение времени подготовки производства и повышение точности получаемых отливок. Результаты металлографического анализа и контроля геометрии подтвердили отсутствие усадочных дефектов и горячих трещин.

Список литературы

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров. - М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.
2. Селезнев, В. А. Технология изготовления мастер-моделей для литейного производства на основе компьютерного объемного моделирования и прототипирования / В. А. Селезнев, А. А. Медведев // Новые материалы и технологии в машиностроении. - 2012. - № 16. - С. 93-96.
3. Куватова, А. М. Современные технологии быстрого прототипирования в литейном производстве / А. М. Куватова // Современные тенденции развития науки и образования: сб. тр. Международ. (заоч.) науч.-практ. конф. - Науч.-издат. центр «Мир науки», 2016. - С. 126-132.
4. Кравцов А.Г., Серегин А.А., Сердюк А.И. Современные многофункциональные и многоцелевые металлорежущие станки с ЧПУ и обеспечение точности и стабильности реализации на них технологических процессов. Оренбург: ОГУ, 2017. 113 с.

УДК 621.9.025.7

ВЫБОР ПРИБОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН

А.Д. Халимоненко¹, к.т.н., доцент, А.А. Голова¹, студент, Ю.Д. Сопина¹, студент

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Рассмотрены особенности выбора приборной базы для акустико-эмиссионного контроля работоспособности керамических режущих пластин. Определены ключевые требования к оборудованию: частотный и динамический диапазон, чувствительность, скорость оцифровки. Предложено использование комбинации резонансных и широкополосных датчиков для повышения информативности контроля. Особое внимание уделено методике измерений и обработке данных.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, керамические режущие пластины, неразрушающий контроль, приборная база, диагностика, датчик.

SELECTION OF INSTRUMENTATION FOR IMPLEMENTING ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF CERAMIC CUTTING INSERTS' OPERATIONAL PERFORMANCE

A.D. Khalimonenko, A.A. Golova, Y.D. Sopina

The article discusses the features of selecting instrumentation for acoustic emission monitoring of ceramic cutting inserts' operational performance. Key requirements for the equipment are defined, including frequency and dynamic ranges, sensitivity, and digitization rate. The use of a combination of resonant and broadband sensors is proposed to enhance the monitoring effectiveness. Particular attention is paid to the measurement methodology and data processing.

Keywords: acoustic emission, ceramic cutting inserts, non-destructive testing, instrumentation, diagnostics, sensor.

В современном машиностроении одним из наиболее перспективных материалов для изготовления режущих пластин является керамика. За счет высокой твердости, износостойкости, термостойкости керамические пластины применяются при обработке труднообрабатываемых материалов, например, жаропрочных сплавов, закаленной стали, чугунов [2]. Обработка таких материалов производится на высоких скоростях резания, где твердосплавные инструменты быстро выходят из строя.

Керамика обладает существенным недостатком – высокой хрупкостью, что делает ее особенно чувствительной к динамическим и термическим перегрузкам, что приводит к образованию микротрещин, сколов или внезапному разрушению режущей кромки. Износ керамики часто носит непредсказуемый характер, что затрудняет планирование замены инструмента по времени использования. В таких условиях важен оперативный контроль работоспособности керамических режущих пластин непосредственно в ходе обработки. Отличным вариантом для решения данной проблемы может стать неразрушающий контроль различных микроструктурных характеристик режущих пластин [3]. К такому виду диагностики относится акустико-эмиссионный контроль, который является наиболее перспективным на сегодняшнее время.

Акустический эмиссионный (АЭ) контроль является пассивным неразрушающим методом диагностики. Данный метод основан на регистрации упругих волн, возникающих при локальных быстропротекающих процессах, например, образование (развитие) микротрещин, пластической деформации и других необратимых процессов изменения структуры.

Метод АЭ отличается высокой чувствительностью к различным структурным изменениям, охватывая широкий спектр рабочих частот от 10 до 1000 кГц [1]. АЭ контроль предполагает обнаружение развивающихся дефектов, которые относятся к опасным. Отличительной особенностью такого контроля является возможность получения информации о состоянии контролируемого объекта в реальном времени.

Относительно процесса резания керамическими пластинами можно выделить такие источники АЭ как образование и развитие микротрещин в объеме керамики под действием термомеханических нагрузок, сколы и выкрашивания на кромке керамической пластины, фрикционные процессы в зоне контакта инструмента с заготовкой, тепловые удары при циклическом нагреве и охлаждении.

Режущая керамика обладает рядом особенностей, которые отличают ее от других достаточно хрупких материалов, что влияет на генерацию, распространение и регистрацию АЭ сигналов. К таким особенностям относятся высокую скорость распространения упругих волн в материале режущей пластины, что вызвано высоким модулем упругости и низкой плотностью по сравнению, например, с металлами. Это означает, что АЭ сигналы, возникающие в зоне резания, достигают датчиков за микросекунды. Данная особенность позволяет быстро локализовать источник и снизить вероятность наложения сигналов от разных событий, но в связи с этим необходима аппаратура с высоким временным разрешением и синхронизация каналов с точностью до наносекунд.

Хрупкий характер разрушения керамики обеспечивает высокую информативность АЭ сигналов. Возникновение различных дефектов в керамике представляет собой дискретное, энергетически насыщенное событие, которое порождает четкие АЭ импульсы. Эта зависимость позволяет использовать в диагностике частотный анализ.

Пластины из керамического материала отличаются отсутствием пластической деформации. Основным источником акустической эмиссии является именно процесс разрушения пластины при ее эксплуатации, что упрощает интерпретацию полученного сигнала.

При составлении приборной базы для проведения АЭ контроля работоспособности керамической пластины необходимо учитывать эксплуатационные особенности данного инструмента, что автоматически предъявляет к оборудованию повышенные требования.

Для того, чтобы выбрать наиболее подходящее оборудование для проведения АЭ анализа режущих пластин, важно учитывать такие характеристики, как частотный диапазон, чувствительность и коэффициент усиления, динамический диапазон, скорость оцифровки, тип используемых датчиков, программное обеспечение.

Керамика – это, в первую очередь, высокотвёрдый материал, отличающийся малым размером зерна (от 1 до 50 мкм), поэтому частоты АЭ сигналов, генерируемых при исследовании пластин, будут находиться в диапазоне от 100 кГц до 1,5-2 МГц. Поэтому при выборе оборудования предпочтительная верхняя граница прибора – не менее 1 МГц, а для детектирования начальных стадий повреждения – до 2-3 МГц.

Так как предполагается, что собственный шум качественной работоспособной системы находится в пределах от 25 до 30 дБ, пороговое значение датчиков прибора должно быть не более 40 дБ для регистрации начальных дефектных преобразований. При этом цепь усиления необходимо подбирать так, чтобы система имела малый собственный шум и регулируемый коэффициент усиления до 60-80 дБ. Для регистрации слабых микрособытий и сильных скачков при микроразрушениях без искажений динамический диапазон АЦП прибора не менее 16 бит.

Ранее был определён практический диапазон частоты сигнала АЭ для керамики 100 кГц – 2 МГц, то верхняя граница f_{max} будет равна 2 МГц. Учтём также коэффициент запаса, который обычно выбирается из диапазона 2,5-10 для корректного представления результатов исследования в цифровом виде.

Оптимальное значение частоты дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова-Найквиста в данном случае будет равно $f_s \geq 2 \cdot 5 \text{ МГц} \rightarrow f_s \geq 10 \text{ МГц}$. Такое значение обеспечивает достаточную детализацию сигнала, сохраняя основные особенности формы волны, не занимая при этом много времени на его обработку.

Используемые датчики в свою очередь должны отвечать таким критериям, как малогабаритность, широкополосность, высокочастотная резонансность. Наилучшим вариантом будет использование в ходе исследования и резонансного, и широкополосного датчика, что позволит получить наиболее детальное представление о поведении керамического инструмента в ходе эксплуатации.

Для систематизации данных и сокращения ошибок, возникающих вследствие человеческого фактора, рекомендуется использовать программное обеспечение, построенное на спектральном (FFT) и вейвлет-анализе для классификации типов источников АЭ, а также способное выполнять группировку параметров АЭ, соответствующих разным механизмам разрушения образцов.

Для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов важно создать необходимые условия проведения измерений. Одним из главных критериев в данном случае будет контроль шумовой обстановки – проводить испытания допускается в акустически изолированном помещении, сам образец изолируется от вибраций стенда при помощи демпфирующих прокладок.

Перед закреплением датчика на исследуемой пластине подготавливают контактные поверхности, на поверхность датчика наносят специальную пасту, а после на месте нанесения закрепляют исследуемый образец. Перед

каждым экспериментом производится калибровка и верификация датчиков для проверки чувствительности и целостности измерительного тракта.

АЭ контроль керамических пластин производится неоднократно: в первую очередь – перед началом эксплуатации с целью выявления дефектов в образце, и далее – перед каждой сменой рабочей грани для оценки состояния режущей пластины.

Подводя итоги, можно сказать, что АЭ метод контроля является эффективным при мониторинге работоспособности керамических режущих пластин за счет высокой чувствительности к зарождающимся микроразрушениям. Однако для успешной реализации данного метода диагностики необходимо тщательно подобрать приборную базу с учетом особенностей керамики. Наиболее рациональным подходом является использование резонансных и широкополосных датчиков с применением современного программного обеспечения, что позволит автоматизировать процесс классификации типов повреждения пластин и перейти к предиктивному обслуживанию инструмента в условиях реального производства.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования = Technical diagnostics. Acoustic-emission diagnostics. General requirements : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 144 июня 2007 г. № 134-ст : введен впервые : дата введения 2007-10-01 / разработан ИЯР РНЦ «КИ», Самарским филиалом ОАО «Оргэнерго-нефть», ФГУП «ОКБМ им. Африкантова». – Москва : Стандартинформ, 2007. – IV, 11 с. ; 29 см. – Текст : непосредственный.
2. Дин Кай Цзянь Исследование влияния комбинированной упрочняющей обработки на интенсивность изнашивания режущей керамики // Интерактивная наука. 2022. №11 (76)-с. 29-32
3. Максarov В.В. Влияние структурных параметров режущей керамики на качество обработки при селективном формировании инструментального оснащения / Максarov В.В., Халимоненко А.Д., Горшков И.В. // Металлообработка. 2020. № 1(115)-с. 54-62

УДК 621.914

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

А.А. Дзюба¹, студент, Е.Г. Злотников¹, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург

В статье рассматривается применение высокоскоростной обработки (ВСО) для повышения эффективности производства деталей горного и нефтегазового оборудования из алюминиевого сплава АМг6. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса торцевого фрезерования на станке DMU 65 monoBLOCK. На основе полученных данных произведен расчет и сравнительный анализ теоретических и фактических сил резания. Установлено, что при увеличении скорости резания выше 1650 м/мин наблюдается отчетливое снижение силовых нагрузок, что подтверждает переход в зону ВСО и позволяет рекомендовать данные режимы для внедрения в машиностроительное производство.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, торцевое фрезерование, алюминиевый сплав АМг6, сила резания, режимы резания.

EXPERIMENTAL STUDY OF CUTTING FORCES DURING HIGH-SPEED MILLING OF AMg6 ALUMINUM ALLOY

A.A. Dzyuba, E.G. Zlotnikov

This article discusses the application of high-speed machining (HSM) to improve the production efficiency of mining and oil-and-gas equipment parts made of AMg6 aluminum alloy. The paper presents the results of an experimental study of the face milling process using a DMU 65 monoBLOCK machine tool. Based on the obtained data, a calculation and comparative analysis of theoretical and actual cutting forces were carried out. It was found that when the cutting speed exceeds 1650 m/min, a distinct reduction in cutting loads is observed. This confirms the transition into the HSM zone and allows recommending these cutting parameters for implementation in mechanical engineering production.

Keywords: high-speed machining, face milling, AMg6 aluminum alloy, cutting force, cutting parameters.

Алюминиевый деформируемый сплав АМг6 обладает рядом свойств, таких как коррозионная стойкость, отличная свариваемость и устойчивость к циклическим нагрузкам. По данным показателей данный сплав нашел широкое применение в горной и нефтегазовой промышленности. Материал используется для изготовления элементов аппаратуры сжиженного природного газа, корпусов насосов, фланцев и т.д.

Современный этап развития промышленного производства характеризуется высокой скоростью внедрения новых технологий и ужесточением требований к эффективности, качеству и экономической оправданности технологических процессов. В условиях постоянного изменения рыночных условий предприятиям необходимо оперативно адаптировать производственные системы, внедрять инновационные методики и совершенствовать существующие технологии для обеспечения конкурентоспособности и устойчивого развития.

Высокоскоростная обработка (ВСО), в частности высокоскоростное фрезерование является одним из перспективных направлений развития ме-

таллообработывающей промышленности. ВСО не в полной мере изучена и не имеет достаточной справочной информации. В научной литературе приводятся данные, что ВСО – это обработка со скоростью резания, превышающая традиционный диапазон скоростей резания в 3...10 раз в зависимости от материала [1]. Для определения достижения высокоскоростной обработки можно опираться на косвенные признаки, а именно процессы, которые не наблюдаются при традиционном резании (снижение температуры инструмента, сил резания, изменение вида стружки и т.д.) [2].

Таким образом, определение диапазона скоростей высокоскоростной обработки сплава АМгб может помочь достичь более высокой производительности при обработке деталей.

Авторами было проведено экспериментальное исследование процесса обработки. В качестве станочного оборудования использовался обрабатывающий центр с ЧПУ модели DMG MORI DMU 65 monoBLOCK. В качестве инструмента использовалась торцевая фреза Boehlerit BF90 LD10.050 Z05 диаметром 50 мм с пятью сменными твердосплавными пластинами Boehlerit LDHX 100404 FR MN. В качестве вспомогательного инструмента была использована оправка HSK-A63 по DIN 69893-1, точность биения 0,003 мм, класс балансировки G2.5 при 25000 об/мин. В качестве заготовок использовались плиты с размерами 125×40×40 мм.

В рамках исследования был проведен ряд экспериментов. Скорость резания варьировалась от 650 м/мин (традиционное фрезерование) до 2350 м/мин, глубина резания варьировалась от 0,5 мм до 1,5 мм при фиксированной подаче на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб и постоянной ширине фрезерования равной 40 мм. При проведении опытов измерялась мощность с помощью индикатора мощности главного привода станка, а также шероховатость поверхности после каждого прохода.

Для расчета силы резания P_z на каждом рабочем ходу инструмента воспользуемся эмпирической формулой

$$N_{\text{РХ}} = N_{\text{ХХ}} + N_{\text{РЕЗ}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{РХ}}$ – мощность рабочего хода инструмента, Вт; $N_{\text{ХХ}}$ – мощность холостого хода инструмента, Вт; $N_{\text{РЕЗ}}$ – мощность резания, Вт,

$$N_{\text{РЕЗ}} = P_z V. \quad (2)$$

Следовательно, силу резания можно определить как

$$P_z = \frac{N_{\text{РХ}} - N_{\text{ХХ}}}{V}. \quad (3)$$

Теоретическую силу резания можно рассчитать согласно справочным данным [3].

Полученные значения теоретической и фактической силы резания для сплава АМгб приведены в таблице 1. График сравнения теоретической и фактической силы резания приведен на рисунке 1.

Как можно заметить, фактическая сила резания и теоретическая сила резания сильно отличаются, это связано с большими допущениями и упрощениями при подборе степенных коэффициентов в справочной литературе.

Таблица 1

Значения теоретической и фактической силы резания для АМгб

V , м/мин	t , мм	N_{XX} , %	N_{PX} , %	N_{XX} , Вт	N_{PX} , Вт	N_{PEZ} , Вт	P_z , Н	$P_{теор}$
650	1,5	0	11	0	1760	1760	146,2	279,1
650	1	0	8	0	1280	1280	106,3	186,1
650	0,5	0	4	0	640	640	53,2	93,0
1300	1,5	3	24	480	3840	3360	139,6	243,0
1300	1	3	17	480	2720	2240	93,0	162,0
1300	0,5	3	10	480	1600	1120	46,5	81,0
1650	1,5	4	30	640	4800	4160	136,1	231,7
1650	1	4	22	640	3520	2880	94,3	154,4
1650	0,5	4	12	640	1920	1280	41,9	77,2
2000	1,5	6	35	960	5600	4640	125,3	222,9
2000	1	6	26	960	4160	3200	86,4	148,6
2000	0,5	6	15	960	2400	1440	38,9	74,3
2350	1,5	7	37	1120	5920	4800	110,3	215,9
2350	1	7	27	1120	4320	3200	73,5	143,9
2350	0,5	7	15	1120	2400	1280	29,4	72,0

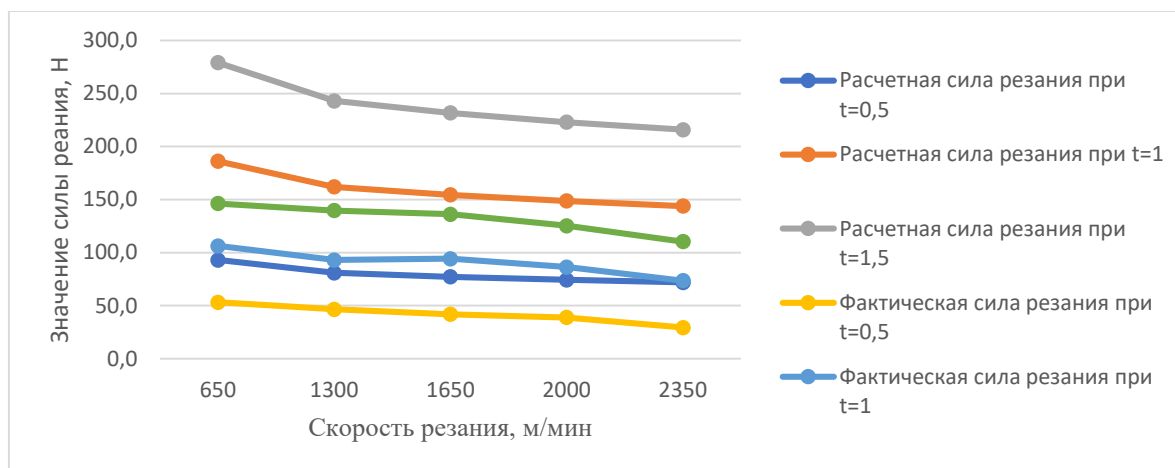


Рисунок 1 – Зависимость значения силы резания от скорости резания сплава АМгб

Наглядно наблюдается отчетливое снижение сил резания при увеличении скорости резания свыше 1650 м/мин, что свидетельствует о достижении диапазона высокоскоростной обработки. Так как при высокоскоростной обработке после прохождения определенного порога скорости резания рост температур в зоне контакта приводит к локальному термическому разупрочнению срезаемого слоя, что значительно облегчает процесс стружкообразования и снижает сопротивление материала.

Исходя из полученных результатов, следуют выводы:

- в ходе проведения экспериментальных исследований подтверждено, что для алюминиевого сплава АМгб переход в зону высокоскоростной обработки сопровождается характерным снижением сил резания;
- установлено, что наиболее выраженное падение силовых нагрузок на режущий инструмент наблюдается при скоростях резания свыше 1650 м/мин (наилучшие показатели зафиксированы в диапазоне 2000–2350 м/мин);
- значительное расхождение между фактическими и теоретическими значениями сил резания указывает на необходимость корректировки клас-

сических справочных эмпирических коэффициентов;

- применение выявленных рациональных режимов фрезерования позволяет существенно повысить производительность механической обработки тонкостенных и сложнопрофильных деталей горно-шахтного и нефтегазового оборудования.

Список литературы

1. Адмакин М. А., Адмакина О. Н., Тимофеев Д. Ю., Халимоненко А. Д. Деформационные процессы при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов // Цветные металлы. — 2025. — № 3. — С. 75–80. — DOI: 10.17580/tsm.2025.03.11.
2. Халимоненко А. Д., Шмакова Ю. Р., Адмакина О. Н., Куфаев В. Г. Особенности высокоскоростного торцевого фрезерования деформируемых алюминиевых сплавов // Цветные металлы. — 2024. — № 6. — С. 81–88. — DOI: 10.17580/tsm.2024.06.10.
3. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х тт: справочник / В. И. Аверченков, А. В. Аверченков, Б. М. Базров [и др.]; под редакцией А. С. Васильева, А. А. Кутина. — 7-е изд. испр. — Москва: Машиностроение, 2023. — 1574 с. — ISBN 978-5-907523-26-5.

УДК621.941.08

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ АВТОКОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Д.Ю. Ершов¹, канд. техн. наук, К.В. Курыленко¹, студент

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

В статье анализируется влияние автоколебательных процессов, возникающих при механической обработке материалов, на эксплуатационные характеристики режущего инструмента и параметры обрабатываемой поверхности. Экспериментально установлено, что связь между стойкостью инструмента и амплитудой автоколебаний имеет экстремальный характер. Это обусловлено сочетанием положительного эффекта, связанного с облегчением пластической деформации, и негативного воздействия циклических усталостных нагрузок. Представлены результаты исследований, на основе которых разработаны математические модели, описывающие влияние амплитудно-частотных характеристик автоколебаний на стойкость инструмента, волнистость и шероховатость поверхности.

Ключевые слова: автоколебания, вибрации при резании, стойкость инструмента, качество поверхности, шероховатость, волнистость, механическая обработка, управление колебаниями, жёсткость технологической системы, демпфирование.

MANAGING THE INTENSITY OF SELF-OSCILLATIONS TO IMPROVE THE EFFICIENCY AND QUALITY OF MECHANICAL PROCESSING

D.Yu. Yershov, K.V. Kurylenko

This article analyzes the impact of self-oscillatory processes that occur during the mechanical processing of materials on the operational characteristics of cutting tools and the parameters of the processed surface. It has been experimentally established that the relationship between tool durability and the amplitude of self-oscillations is of an extreme nature. This is due to a combination of the positive effect related to the facilitation of plastic deformation and the negative impact of cyclic fatigue loads. The results of the research are presented, based on which mathematical models have been developed to describe the influence of the amplitude-frequency characteristics of self-oscillations on tool durability, waviness, and surface roughness.

Keywords: self-oscillations, cutting vibrations, tool durability, surface quality, roughness, waviness, mechanical processing, vibration management, stiffness of the technological system, damping.

Введение

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к производительности и качеству процессов механической обработки [2]. Одним из перспективных направлений интенсификации технологических операций является целенаправленное управление автоколебаниями, самопроизвольно возникающими в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД). Такие колебания обладают двояким влиянием: с одной стороны, они могут способствовать улучшению условий резания, с другой – выступать причиной ускоренного износа инструмента и ухудшения качества поверхности. Поэтому детальное исследование закономерностей возникновения автоколебаний и разработка методов управле-

ния их интенсивностью представляют значительный научный и практический интерес [1].

Взаимосвязь стойкости инструмента и параметров автоколебаний.

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают наличие немонотонной (экстремальной) зависимости стойкости режущего инструмента T от амплитуды возникающих автоколебаний A [2]. Эту зависимость с высокой точностью можно описать эмпирическим уравнением вида:

$$T = QA^m e^{-nA} \quad (1)$$

где Q , m , n — постоянные коэффициенты, определяемые свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, а также режимами резания.

Такая форма зависимости физически объясняется конкуренцией двух основных факторов. На начальном этапе, при умеренной амплитуде, колебания способствуют облегчению пластического деформирования материала в зоне резания, снижению сил резания и адгезионного взаимодействия, что в итоге уменьшает скорость изнашивания инструмента. Однако при превышении определённого критического уровня амплитуды начинает доминировать фактор усталостного разрушения материала инструмента из-за циклического знакопеременного нагружения, что ведёт к резкому падению его стойкости.

Совместное влияние амплитуды и частоты колебаний

Для всесторонней оценки влияния колебаний на процесс резания были проведены двухфакторные эксперименты с варьированием как амплитуды A , так и частоты f автоколебаний. Для случая фрезерования титанового сплава BT20 концевой фрезой из твёрдого сплава BK8 была получена следующая регрессионная модель зависимости стойкости инструмента:

$$T = 62,5 - 63,7x_1 - 3x_2 + 22,1x_1x_2 \quad (2)$$

где x_1 , x_2 — кодированные коэффициенты амплитуды (мкм) и частоты (Гц):

$$x_1 = \frac{A_{\text{мкм}} - 60_{\text{мкм}}}{45,5_{\text{мкм}}} \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{f_{\text{Гц}} - 600_{\text{Гц}}}{200_{\text{Гц}}} \quad (4)$$

Анализ коэффициентов модели ясно показывает, что амплитуда колебаний оказывает существенно более сильное влияние на стойкость (коэффициент — 63,7), чем их частота (коэффициент — 3). При этом обнаружен эффект взаимодействия факторов x_1 и x_2 , указывающий на сложный, неаддитивный характер их совместного воздействия.

Оптимизация обработки в различных частотных диапазонах.

Эффект влияния вибраций на обрабатываемость материала сильно зависит от частотного диапазона (рис. 1).

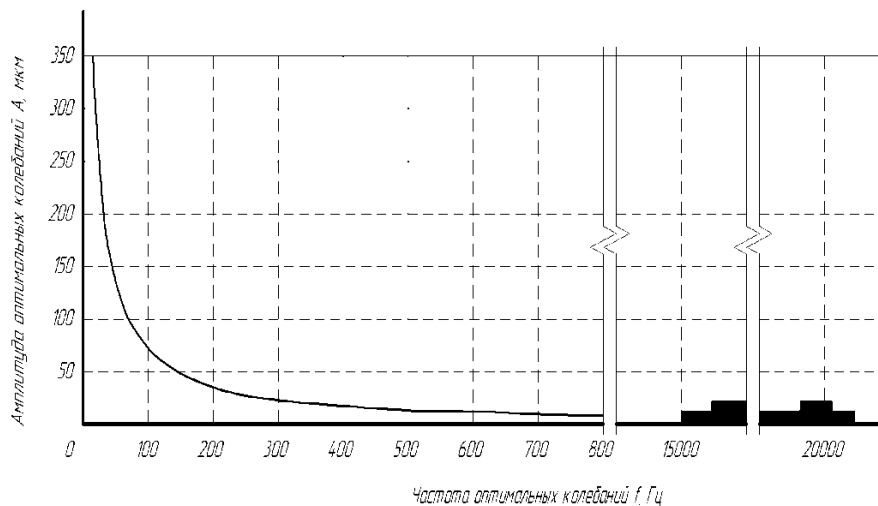


Рис.1. Зависимость амплитуды оптимальных колебаний от их частоты

Низкочастотный диапазон (30–150 Гц): Колебания способствуют дроблению и лёгкому отводу стружки, улучшению подачи смазочно-охлаждающей жидкости. Оптимальные амплитуды составляют 50–150 мкм.

Диапазон типичных автоколебаний (150–1000 Гц): эта зона наиболее актуальна для управления стойкостью инструмента. Оптимальные амплитуды лежат в диапазоне 8–20 мкм.

Ультразвуковой диапазон (15–30 кГц): Колебания с малой амплитудой (1–5 мкм) воздействуют на дислокационный механизм деформации, уменьшая усадку стружки и подавляя образование нароста.

Влияние автоколебаний на качество обработанной поверхности

Интенсивность автоколебаний является определяющим фактором для формирования микрорельефа поверхности [3]. Исследования при фрезеровании позволили получить модели зависимости волнистости H_w и шероховатости R_a от параметров колебаний:

$$H_w = 23,5 + 15,5x_1 - 3,2x_2 \quad (5)$$

$$R_a = 1,4 + 0,6x_1 - 0,06x_2 \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) следует, что амплитуда оказывает доминирующее влияние: на волнистость — примерно в 5 раз сильнее влияния частоты автоколебаний, на шероховатость — в 10 раз. Рост амплитуды приводит к увеличению H_w и R_a , тогда как увеличение частоты, наоборот, способствует их снижению.

Факторы управления интенсивностью автоколебаний и методы её регулирования

На основе анализа динамики системы СПИД определены ключевые управляющие факторы, ранжированные по степени влияния:

- 1) фазовый сдвиг между изменением силы резания и толщины среза;
- 2) обобщённый коэффициент демпфирования системы;
- 3) суммарная жёсткость технологической системы;
- 4) ширина и толщина срезаемого слоя;
- 5) передний угол режущего инструмента.

На практике регулирование интенсивности автоколебаний для конкретной технологической операции может осуществляться следующими методами:

- повышение жёсткости системы – усиление конструкции оправок, применение дополнительных опор, использование более жёстких инструментов и оснастки;
- введение демпфирования – установка виброгасителей пассивного или активного типа для поглощения энергии колебаний;
- оптимизация геометрии и режимов резания – корректировка переднего угла, ширины и толщины среза в допустимых для производительности пределах.
- применение адаптивных систем – использование внешних вибраторов с управляемой фазой или подача модулированных токов в зону резания для активного гашения нежелательных колебаний.

Заключение

Управление интенсивностью автоколебаний представляет собой действенный инструмент для одновременного повышения производительности механической обработки, стойкости режущего инструмента и качества формируемой поверхности. Несмотря на сложность разработки универсальных методик, обусловленную многофакторностью и нелинейностью процессов в системе СПИД, целенаправленное воздействие на ключевые параметры колебаний открывает значительные технологические резервы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание адаптивных систем управления, интегрированных в современные станки с ЧПУ, что позволит реализовать потенциал данного метода в условиях автоматизированного и роботизированного производства.

Список литературы

1. Васин С. А., Шевченко С. Н., Ерзин О. А., Пантюхина Е. В. Механизм возникновения автоколебаний в технологических системах обработки резанием // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2024. — Т. 26, № 3. — С. 5–9. — DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-3-5-9.
2. Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С. Аналитическое исследование характеристик стойкости инструмента и автоколебаний при токарной обработке шкивов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. — 2024. — Т. 22, № 1. — С. 61–75. — DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-61-75.
3. Горбенко И. Д., Шагниева О. Б. Математическое моделирование процессов управления автоколебаниями при сверлении // *Системный анализ в проектировании и управлении*. — 2021. — С. 439–446. — DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-399.

УДК 620.194.4

**К ВОПРОСУ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ЯЗВЕННОЙ КОРРОЗИИ
УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ****В.И. Болобов¹**, д-р техн. наук, проф., **Г.Г. Попов¹**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
И.В. Жуйков¹, аспирант¹ Санкт-Петербургский горный университет имени Императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, РФ

Исходя из предпосылки, что для разрушения труб промысловых нефтепроводов в результате язвенной коррозии требуется одновременное выполнение таких условий, как наличие в водонефтяной эмульсии хлор-иона, обогащение эмульсии кислородом, нахождение металла стенки трубы в напряженном состоянии, периодическое удаление продуктов коррозии в результате абразивного воздействия твердых частиц была разработана соответствующая методика коррозионных испытаний и исследована кинетика язвенной коррозии 4-х марок углеродистых сталей, используемых в качестве материалов промысловых нефтепроводов. Из сравнения полученных кинетических параметров делается вывод, что значения k_0 и k (скорость язвенной коррозии в ненапряженном состоянии и при заданном уровне растягивающих напряжений σ_p соответственно) при $\sigma_p=0,7\sigma_T$ для стали 09Г2С ($k_0 = 2,37$ и $k_{0,7\sigma_T} = 10,51$ мм/год) существенно ниже значений аналогичных параметров сталей Ст3, 08пс, 20кп ($k_0 = 3,33 - 4,12$ мм/год, $k = 12,00 - 14,45$ мм/год). Отличаются также (до 1,5 раз) и значения механохимических коэффициентов K_σ : 0,039 мм/(год МПа) для стали 09Г2С по сравнению с 0,045 – 0,059 мм/(год МПа) для углеродистых сталей Ст3, 08пс, 20кп. Установленные скорости язвенной коррозии оказались близкими к тем, что наблюдаются на практике эксплуатации промысловых нефтепроводов.

Ключевые слова: промысловые нефтепроводы, трубные стали, скорость язвенной коррозии, механохимический коэффициент.

**TO THE QUESTION OF THE PITTING CORROSION KINETICS
OF THE CARBON STEELS****V.I. Bolobov, G.G. Popov, I.V. Zhuykov**

Based on the premise that the destruction of industrial oil pipeline pipes as a result of pitting corrosion requires the simultaneous fulfillment of such conditions as the presence of chlorine ion in the water-oil emulsion, enrichment of the emulsion with oxygen, the presence of the metal of the pipe wall in a stressed state, and the periodic removal of corrosion products as a result of the abrasive action of solid particles, a corresponding corrosion test technique was developed and the kinetics of pitting corrosion of 4 grades of carbon steels used as materials for industrial oil pipelines was studied. From a comparison of the obtained kinetic parameters, it is concluded that the values of k_0 and k (the rate of pitting corrosion in an unstressed state and at a given stress level σ_p , respectively) at $\sigma_p=0.7\sigma_T$ for steel 09G2S ($k_0 = 2.37$ and $k_{0.7\sigma_T} = 10.51$ mm/year) are significantly lower than the values of similar parameters of steels St3, 08ps, 20 ($k_0 = 3.33 - 4.12$ mm/year, k at $\sigma_p=0.7\sigma_T = 12.00 - 14.45$ mm/year). The mechanochemical coefficients K_σ also differ (up to 1.5 times): 0.039 mm/(year MPa) for 09G2S steel compared to 0.045 – 0.059 mm/(year MPa) for carbon steels St3, 08ps and 20kp. The established pitting corrosion rates turned out to be close to those observed in the practice of operating industrial oil pipelines.

Keywords: oilfield pipelines, pipe carbon steels, pitting corrosion rate, mechanochemical coefficient

В большинстве случаев рабочей средой промысловых нефтепроводов является неочищенная сырая нефть, представляющая собой водонефтяную

эмульсию, содержащую минерализованную пластовую воду с высоким содержанием коррозионно-активных элементов, таких как ионы хлора Cl^- , и механические примеси (песок, глина и т.д.). В результате присутствия в рабочей среде анионов-активаторов хлора внутренняя поверхность стенки трубы из углеродистых сталей, как основных материалов промышленных трубопроводов, подвергается не только общей, но и локальной (язвенной) коррозии, представляющей наибольшую опасность при эксплуатации промышленных нефтепроводов, как потенциальный источник появления сквозных поражений (свищей).

К условиям эксплуатации промышленных нефтепроводов относят: концентрацию агрессивных элементов в составе перекачиваемой среды, температуру водонефтяной эмульсии, содержание кислорода в среде, а также уровень напряженно-деформированного состояния металла нефтепровода [1]. Последний параметр заслуживает особого внимания в контексте язвенной коррозии промышленных нефтепроводов, поскольку зачастую участки одного нефтепровода, выполненные из одинакового материала, перекачивающие одну и ту же среду с одинаковой температурой демонстрируют существенно отличающиеся по глубине язвенные поражения [2]. Такая избирательность язвенной коррозии может быть связана, по мнению авторов, с эффектом влияния механических напряжений в металле на скорость роста в нем язвы, наиболее явно проявляемом на участках трубопровода, отличающихся повышенным уровнем напряженного состояния. Такой эффект, под именем механохимического, исследован в ряде работ, например [3], для общей коррозии конструкций, в том числе и трубопроводов. В то же время, сведения о его влиянии на скорость язвенной коррозии трубопроводов, как и о кинетических параметрах процесса самой язвенной коррозии трубных сталей, практически отсутствуют.

В соответствии с запатентованной методикой [4] объектом исследования являлись образцы в виде пластин $150 \times 15 \times 3$ мм, вырезанные из проката углеродистых сталей 20кп, 08пс, Ст3 и 09Г2С, как материалов труб промышленных нефтепроводов, после шлифовки и полировки.

На поверхности одной из широких сторон каждой пластины на расстоянии 20 мм, 35 мм, 50 мм и 75 мм от ее конца выделялись 4 рабочие зоны измерений шириной 2 мм для формирования на них заданных растягивающих напряжений σ_{pi} . Поверхность пластин рядом с указанными зонами покрывалась лаком, защищающим металл от коррозионного воздействия среды, что позволяло при проведении дальнейших оптических измерений использовать точки на защищенной поверхности металла в качестве реперных.

Исходя из прочностных характеристик испытываемой стали (значения предела текучести σ_T), образец, с использованием индикатора часового типа, изгибался в трубчине до заданной стрелы прогиба h

$$h = \frac{\sigma_p \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot b}, \quad (1)$$

где L – расстояние между опорами (120 мм); b – толщина образца (3 мм); E – модуль Юнга (200 ГПа), при которой металл приповерхностного слоя в

центральной наиболее выпуклой зоне № 4 образца находился под действием растягивающего напряжения $\sigma_{p4} = 0,7\sigma_T$ соответствующей стали, как максимального, имеющего место в промысловых нефтепроводах. Исходя из существующего линейного распределения напряжений по длине образца, напряжения σ_{p1} , σ_{p2} , σ_{p3} в зонах №№ 1, 2, 3 составляли 0,06; 0,24; 0,42 от σ_T использованной стали.

Находящиеся в напряженном состоянии образцы вместе со струбцинами в боковом положении погружались в емкость с коррозионной средой – 3,5 % водным раствором NaCl, как модельной средой, используемой для имитации минерализованной водонефтяной эмульсии [5], где выдерживались заданное время. На всем протяжении испытаний между образцами в районе их рабочих зон подавался воздух, что имитировало насыщение им водонефтяной эмульсии, контактирующей с корродируемым металлом трубы.

Для имитации процесса удаления продуктов коррозии абразивными частицами в трубопроводах образцы вместе со струбцинами через каждые 2,5 часа извлекались из емкости, обрабатывались ластиком и снова помещались в агрессивную среду.

Далее образец устанавливался на столик металлографического микроскопа, где, с помощью тонкой фокусировки, определялась глубина h_i 5-и наиболее крупных коррозионных язв (рисунок 1), образовавшихся на поверхности каждой рабочей зоны образца, как разница между фокусным расстоянием до дна язвы и находящейся рядом реперной точки, защищенной во время испытаний лаком.

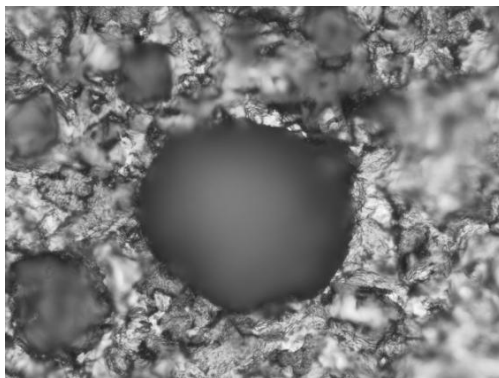


Рисунок 1 - Типичный вид язв, образующихся в процессе коррозионного разрушения образцов сталей

Затем поверхность рядом с рабочими зонами опять покрывалась защитным лаком, образец в струбцине изгибался до первоначальной стрелы прогиба, т.е. до достижения тех же величин σ_{p1} , σ_{p2} , σ_{p3} , σ_{p4} , и повторно вместе со струбциной помещался в емкость для последующего воздействия среды. По истечении заданного времени воздействия t_i процедура обработки образца повторялась с замером глубин h_i тех же язв. И так до суммарного воздействия среды t_{Σ} в 40 часов.

Для каждой временной экспозиции t_i сталей для каждой рабочей зоны образца с заданным уровнем растягивающих напряжений σ_{pi} рассчитывалось среднее значение глубины h_{cp} 5-и указанных язв, находящихся в соот-

ветствующей зоне. Строились зависимости h_{cp} от времени t_i , экспериментальные точки которых, как показали результаты регрессионного анализа, удовлетворительно аппроксимировались линейными функциями (1)

$$h_{cp} = k_i \cdot t_i. \quad (1)$$

Устанавливались значения коэффициента k_i уравнений (1), которые принимались за скорость язвенной коррозии соответствующей стали при данном растягивающем напряжении σ_{pi} .

Для каждой стали строилась зависимость $k_i = f(\sigma_{pi})$ с аппроксимацией экспериментальных точек уравнением

$$k_i = k_0 + K_\sigma \sigma_{pi}, \quad (2)$$

значение k_0 в котором, соответствующее $\sigma_{pi} = 0$, принималось за скорость язвенной коррозии стали в ненапряженном состоянии, а K_σ – за её механохимический коэффициент.

В таблице приведены установленные значения k_i , k_0 , K_σ уравнений (1), (2). В скобках в таблице значения указанных параметров пересчитаны на обычно используемую в практике размерность мм/год.

Таблица – Кинетические параметры процесса

Марка стали	σ_{pi} , МПа	k_i , мкм/ч (мм/год)	k_0 , мкм/ч (мм/год)	K_σ , мкм/(ч·МПа) (мм/(год·МПа))
Ст3	18,8	0,56 (4,91)	0,47 (4,12)	0,0054 (0,047)
	75,1	0,88 (7,71)		
	131,5	1,20 (10,51)		
	219,1	1,65 (14,45)		
08пс	12,5	0,48 (4,20)	0,40 (3,50)	0,0067 (0,059)
	49,9	0,74 (6,48)		
	87,4	0,99 (8,67)		
	145,6	1,37 (12,00)		
20кп	17,1	0,46 (4,03)	0,38 (3,33)	0,0051 (0,045)
	68,4	0,75 (6,57)		
	119,7	1,00 (8,76)		
	199,5	1,40 (12,26)		
09Г2С	18,0	0,35 (3,07)	0,27 (2,37)	0,0044 (0,039)
	72,0	0,59 (5,17)		
	126,0	0,81 (7,10)		
	210,0	1,20 (10,51)		

Вывод. Из сравнения кинетических параметров таблицы, можно заключить, что для низколегированной стали 09Г2С значения скорости язвенной коррозии ненапряженной конструкции k_0 и напряженной до максимальных растягивающих напряжений при $\sigma_p = 0,7\sigma_T$, (2,37 и 10,51 мм/год), существенно ниже значений аналогичных параметров для углеродистых сталей Ст3, 08пс, 20кп ($k_0 = 3,33 - 4,12$ мм/год, $k_4 = 12,00 - 14,45$ мм/год). Отличаются также (до 1,5 раз) и значения механохимических коэффициентов K_σ : 0,039 мм/(год МПа) для стали 09Г2С по сравнению с (0,045 – 0,059) мм/(год МПа) для углеродистых сталей Ст3, 08пс, 20кп. Все это подтверждает общепринятое мнение о предпочтительном использовании низколегированных сталей по сравнению с углеродистыми в промысловых нефте-

проводах, работающих в условиях, способствующих возникновению язвенной коррозии.

Надо отметить, что установленные скорости язвенной коррозии трубных сталей в напряженном состоянии (k_i до 14,45 мм/год) коррелируют с теми, которые могут быть оценены, исходя из сроков разрушения стенок труб толщиной промысловых нефтепроводов в результате их сквозного язвенного поражения: например, 11 мм/год для стали 25ГЮ (при толщине 5,5 мм за 0,5 года) [6].

Список литературы

1. Samusawa I., Izumi D., Shimamura J. Influence of external tensile stress on corrosion and trench formation of low alloy steel in a low H₂S contentsour corrosion environment // Materials and corrosion. 2021, 1-9. DOI: 10.1002/maco.202012174;
2. Гостинин И.А. Зависимость срока службы трубопроводов от коэффициента условий работы // Эксплуатация и ремонт трубопроводов. 2014. №9. С.78-81;
3. Гутман Э. М. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа / Э.М. Гутман, Р.С. Зайнуллин, А.Т. Шаталов [и др.]. – М.: Недра, 1984. – 75 с;
4. Патент № 2848683 Российская Федерация, МПК МПК G01N 17/00 (2006.01) Способ оценки стойкости трубопроводных углеродистых сталей к язвенной коррозии под напряжением: № 2025107759 : заявл. 31.03.2025: опубл. 21.10.2025/ Болобов В. И., Жуйков И. В., Попов Г. Г.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 15 с.;
5. ASTM G44-99(2013), Standard Practice for Exposure of Metals and Alloys by Alternate Immersion in Neutral 3.5 % Sodium Chloride Solution, ASTM International, West;
6. Петров С.С., Васин Р.А., Князева Ж.В., Андриянов Д.И., Сургаева Е.С. // Коррозионное разрушение металла нефтегазопроводных труб в процессе эксплуатации и при лабораторных испытаниях // Нефтегазовое дело. 2020 Т.18. №4. С. 102-112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-102-112.

УДК 621

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОТОТИПИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, **Д. С. Жарких¹**, инженер, аспирант,
Д. О. Киселица¹, инженер, аспирант, **Д. В. Огренич¹**, инженер, аспирант
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР, РФ

В статье проведен анализ современных подходов к применению аддитивных технологий (АТ) в процессе прототипирования изделий авиационного машиностроения. Рассмотрены ключевые преимущества технологии селективного лазерного сплавления (SLM), стереолитографии (SLA) и послойного наплавления (FDM) при создании функциональных, геометрически сложных и демонстрационных прототипов. Особое внимание уделено вопросам прототипирования узлов и деталей авиационных двигателей, включая изготовление опытных образцов для газодинамических и прочностных испытаний. Сделан вывод о ключевой роли аддитивного прототипирования в сокращении сроков и стоимости опытно-конструкторских работ в авиационной отрасли.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прототипирование, авиастроение, авиационный двигатель, САПР, 3D-печать, экономичность.

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE PROTOTYPING OF AIRCRAFT ENGINEERING PRODUCTS

A. N. Mikhailov, D. S. Zharkikh, D. O. Kiselitsa, D. V. Ogrenich

The article analyzes modern approaches to the application of additive technologies (AT) in the process of prototyping aircraft engine components. It discusses the key advantages of selective laser melting (SLM), stereolithography (SLA), and fused deposition modeling (FDM) technologies for creating functional, geometrically complex, and demonstration prototypes. Special attention is given to the prototyping of aircraft engine components and parts, including the production of prototypes for gas-dynamic and strength tests. The article provides data on the growth of the additive manufacturing market in the CIS countries and a comparative analysis of materials for prototyping. The article concludes that additive prototyping plays a key role in reducing the time and cost of research and development in the aviation industry.

Keywords: additive technologies, prototyping, aircraft engineering, aircraft engine, CAD, 3D printing, cost-effectiveness.

Введение. Современное авиационное машиностроение характеризуется постоянным ужесточением требований к массо-габаритным, прочностным и аэродинамическим характеристикам летательных аппаратов. В этих условиях традиционные методы изготовления опытных образцов (механообработка, литье) зачастую становятся «узким местом» конструкторско-технологической подготовки производства, отличаясь высокой стоимостью и длительными сроками реализации, инструментом для быстрого прототипирования [1].

Цель – систематизация и анализ опыта применения АТ для прототипирования сложных деталей и элементов авиационной техники, с выделением специфики создания прототипов силовых установок.

Достижение поставленных целей направлено на повышение эффективности конструкторско-технологической подготовки производства лопа-

ток турбины ГТД, сокращение сроков доводки опытных образцов и снижение технологических рисков на этапе ОКР.

1. Классификация и выбор аддитивных технологий для авиационного прототипирования

В авиационном машиностроении прототипирование решает широкий спектр задач, и для каждой из них применяются наиболее релевантные методы АТ (таблица 1).

Таблица 1 – Методы АТ.

Метод	Принцип работы	Материалы	Тип прототипа	Пример применения
SLM/ SLS	Селективное лазерное сплавление/спекание	Металлические порошки (Ti-6Al-4V, Inconel 718, AlSi10Mg, жаропрочные стали)	Функциональный, для испытаний	Лопатки турбин, кронштейны, теплообменники, элементы механизации крыла
FDM	Послойное наплавление	Полимерные нити (ABS, PLA, PC, PEEK, ULTEM)	Концептуальный, геометрический, мастер-модели	Крупногабаритные макеты узлов планера, обтекатели, корпуса приборов, оснастка для сборки
SLA/ DLP	Стереолитография	Фотополимерные смолы (стандартные, инженерные, литевые)	Высокодетализированный, визуальный, точные мастер-модели	Модели для литья по выплавляемым моделям, интерьер салона, детализированные макеты сложных агрегатов
PolyJet MJP	Струйная печать фотополимером	Многоцветные и многоматериальные фотополимер	Демонстрационные, анатомические, цветные	Полноцветные макеты для презентаций, имитация узлов с разными материалами,

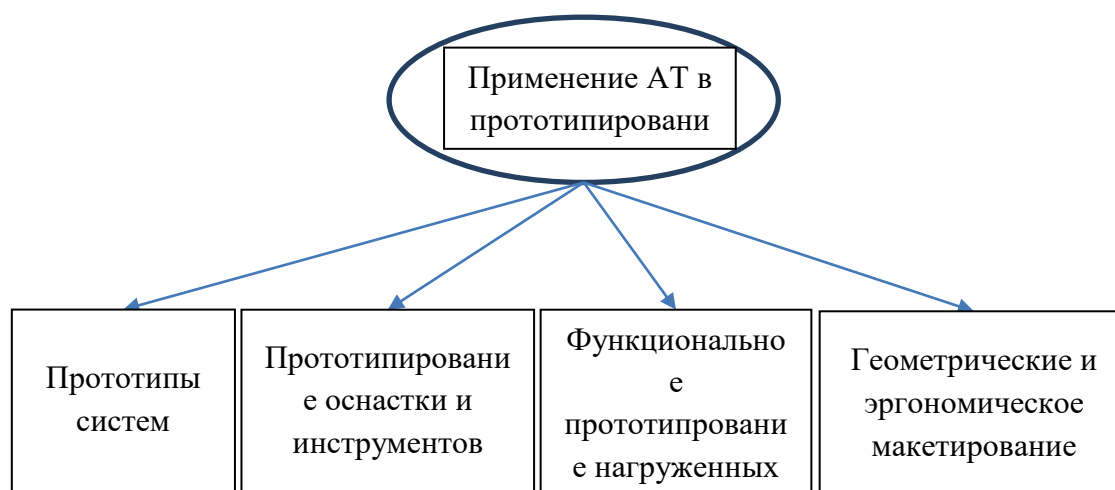


Рис. 1 Области применения аддитивных технологий прототипирования в авиационном машиностроении

Геометрическое и эргономическое макетирование: Технологии FDM и SLA активно используются для создания крупногабаритных (секционированных) макетов самолета в натуральную величину для оценки компоновки, проведения инженерно-эргономических экспертиз кабины экипажа и

пассажира салона. Например, в ОАК (Объединенная Авиастроительная Корпорация) при разработке нового борта практикуется создание FDM-макетов панелей интерьера для оценки эргономики и дизайна.

Функциональное прототипирование нагруженных конструкций: Метод SLM применяется для изготовления прототипов высоконагруженных кронштейнов, элементов механизации крыла (закрылки, предкрылки), деталей шасси. Эти прототипы подвергаются статическим и циклическим испытаниям для валидации расчетных моделей прочности. Исследования, проведенные в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, показывают, что SLM-прототипы из титанового сплава Ti-6Al-4V успешно выдерживают нагрузки, близкие к предельным для такой конструкции [2].

Прототипирование оснастки и инструмента: АТ позволяют быстро изготавливать прототипы технологической оснастки – сварочные, сборочные и контрольно-проверочные приспособления. Это значительно ускоряет процесс сборки опытных образцов. Использование FDM-печати для создания контрольно-установочных шаблонов из ABS-пластика позволяет сократить время их производства с нескольких недель до нескольких дней.

Прототипы систем: Создание корпусов и деталей для прототипов бортовых систем (гидравлики, топливной системы, системы кондиционирования) для отработки их функционирования и компоновки в условиях, близких к реальным.

2. Прототипирование узлов и деталей авиационных двигателей

Прототипирование двигателей является одним из наиболее сложных и ответственных направлений, где преимущества АТ раскрываются в полной мере. АТ позволяют в кратчайшие сроки изготавливать детали сложнейшей формы, которые невозможно или экономически нецелесообразно производить иными методами.

Общее применение АТ в прототипировании деталей двигателей охватывает все его основные модули:

Прототипы узлов воздушного тракта: Лопатки вентилятора, компрессора и турбины, обечайки, спрямляющие аппараты. Изготовление прототипов лопаток по технологии SLM позволяет не только точно воспроизвести их аэродинамическую форму, но и экспериментально отработать системы внутреннего охлаждения, включая извилистые каналы и турбулизаторы, которые фрезерованием создать невозможно. В ПАО «ОДК-Сатурн» (Россия) успешно применяют SLM для прототипирования рабочих лопаток турбины из жаропрочного никелевого сплава.

Прототипы элементов камеры сгорания: фронтальные устройства, форсунки, жаровые трубы. АТ позволяют создавать прототипы с комбинированными системами подвода топлива и воздуха (так называемые «двойные» форсунки), что критически важно для отработки эффективности и экологичности процесса горения.

Прототипирование корпусных деталей: Прототипы корпусов подшипников, опор силовых элементов, корпусов агрегатов. Эти детали часто имеют сложные внутренние полости и каналы подвода масла, которые легко интегрируются в SLM-прототип.

FDM-технология востребована для следующих типов прототипов.

Крупногабаритные макеты планера и узлов: Возможность сегментированной печати позволяет создавать прототипы обтекателей, панелей фюзеляжа, элементов крыла размером несколько метров. На предприятии "КнААЗ" (Комсомольск-на-Амуре) успешно применяется FDM для создания натурных макетов носовых обтекателей истребителей Су-57 для оценки монтажа радиоэлектронного оборудования [2].

Прототипы корпусов бортовой аппаратуры: Корпуса блоков управления, приборные панели, кожухи систем мониторинга. Эти прототипы позволяют проверить эргономику размещения, удобство обслуживания и ремонтпригодность.

Концептуальные и демонстрационные модели: Быстрое создание наглядных макетов для технических презентаций и защит проектов.

Прототипы технологической оснастки: Сборочные кондукторы, установочные шаблоны, захваты для роботов-манипуляторов. FDM-оснастка обладает достаточной прочностью для ограниченного применения в производственном цикле при значительном сокращении времени и стоимости изготовления [3].

3. Экономическая эффективность прототипирования

Экономическая целесообразность внедрения аддитивных технологий при прототипировании лопаток турбины ГТД должна рассматриваться не только с позиции прямых затрат на изготовление единицы изделия, но и в контексте всего жизненного цикла опытно-конструкторских работ (ОКР), включая этапы проектирования, доводки, испытаний и подготовки серийного производства.

При традиционном литье по выплавляемым моделям структура затрат включает: разработку и изготовление литейной оснастки; изготовление керамических форм и стержней; литейные операции; термообработку; значительный объем механообработки; контроль (рентгенография, КИМ, металлография).

При аддитивном прототипировании методом SLM структура затрат трансформируется:

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{м.п.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{э}} + C_{\text{всп}} + C_{\text{т.з.}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{м.п.}}$ – стоимость металлического порошка; $C_{\text{ам}}$ – амортизация оборудования и машинное время; $C_{\text{э}}$ – энергопотребление лазерной установки; $C_{\text{всп}}$ – термообработка, удаление поддержек, финишная механообработка; $C_{\text{т.з.}}$ – трудовые затраты оператора и инженера технолога.

Ключевым экономическим преимуществом является отсутствие дорогостоящей литейной оснастки, стоимость которой для лопатки турбины может достигать 1–3 млн руб. при изготовлении пресс-форм и керамических стержней сложной конфигурации [4].

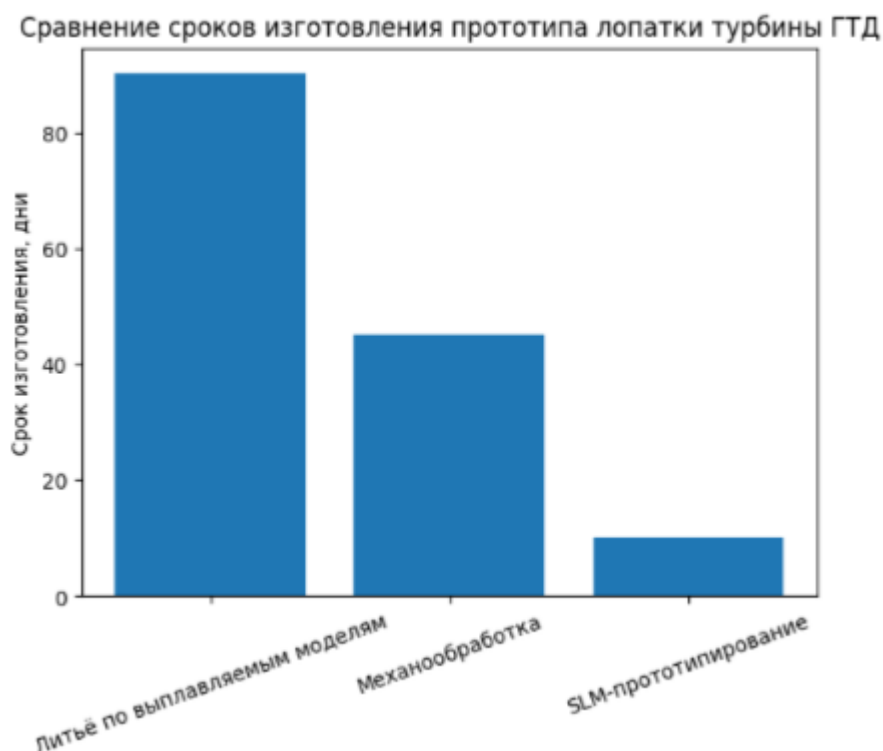


Рис. 2 Сравнение сроков изготовления прототипа лопатки турбины авиационного ГТД

График демонстрирует сокращение цикла изготовления прототипа при использовании SLM более чем в 4–9 раз.

Сокращение сроков связано с исключением следующих стадий:

- проектирование и изготовление литейной оснастки;
- изготовление керамических форм;
- многоступенчатый цикл литья.

Сокращение цикла изготовления с 60–90 дней до 7–10 дней, имеет мультипликативный эффект:

1. Уменьшение продолжительности НИОКР.
2. Снижение затрат на инженерный персонал.
3. Быстрое выявление конструктивных недостатков.
4. Ускорение перехода к стендовым испытаниям.

Если принять среднюю стоимость одного дня ОКР двигателя условно 500–800 тыс. руб., то сокращение цикла на 50 дней может дать косвенный экономический эффект до 25–40 млн руб. на этапе доводки одной ступени турбины [5].

4. Тепловой анализ прототипа лопатки турбины

Лопатки турбины подвергаются крайне высоким тепловым нагрузкам. Температура газа перед установкой турбины у современных газотурбинных двигателей достигает 1600–1800 К, что значительно выше максимальной температуры эксплуатируемых жаропрочных сплавов. Именно поэтому одной из главных задач, обеспечивающих надежность лопатки, является создание эффективной системы охлаждения.

На стадии изготовления прототипов особенно важно не только точно воспроизвести внешний аэродинамический профиль лопасти, но и обеспечить возможность экспериментальной проверки эффективности внутрен-

них систем охлаждения. Аддитивные технологии, и в первую очередь SLM позволяют создавать прототипы с внутренними полостями любой сложности, с извилистыми каналами, с установленными турбулизаторами [1; 6].

Тепловое состояние лопатки согласно закону теплоотдачи [4]:

$$q = h(T_g - T_s) \quad (2)$$

где h – коэффициент теплоотдачи; T_g – температура газа; T_s – температура поверхности лопатки.

Помимо теплового нагружения, лопатка турбины испытывает значительные механические нагрузки, основная из которых — центробежная сила, возникающая при вращении ротора. При частотах вращения 10 000–15 000 об/мин центробежные напряжения становятся определяющим фактором прочности, особенно в замковой части лопатки.

Масса лопатки определяется зависимостью [4]:

$$m = \rho \cdot V, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала; V – объём детали.

Следовательно, уменьшение объёма материала при сохранении прочности снижает массу изделия.

Центробежная сила определяется [4]:

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot r, \quad (4)$$

где m – масса лопатки; ω – угловая скорость; r – радиус окружности от оси вращения до центра масс.

Из формулы видно, что сила пропорциональна массе. Даже снижение массы на 10-15 % приводит к такому же снижению центробежной нагрузки, что уменьшает напряжения в корневой части и повышает долговечность [5; 6].

Выводы. Применение аддитивных технологий (АТ) при прототипировании лопаток турбины авиационного ГТД позволяет уменьшить сроки изготовления прототипов до 7 – 10 суток. Метод SLM обеспечивает изготовления сложных внутренних каналов охлаждения и топологически оптимизированных форм, как итог – снижение рабочей температуры и уменьшение массы лопаток. Экономическая эффективность проявляется при производстве единичных и малых партий за счёт сокращения затрат на литейную оснастку.

Список литературы

1. Толочко Н.К., Нукашев С.О., Романюк Н.Н., Мендалиева С.И. Аддитивные технологии в производстве и ремонте машин: учебное пособие. – Нур-Султан: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2022. – 184 с.
2. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей новейшего авиадвигателя ПД-8 [Электронный ресурс] – М.: 2022. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/aP9cyZ8FKAFKbOIX>
3. 3D-принтер. Авиадвигатель из порошка. ОДК. Канал об авиационном двигателестроении [Электронный ресурс] – М.: 2022. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/ZACcY31zwQ4vXN6j>
4. Фигонеев Д. Ю., Решетникова О. П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // Вестник СГТУ. 2020. №3 (86). с. 63-70.
5. Сухочев Г. А., Коденцев С. Н. Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий: учебное пособие [Электронный ре-

курс] ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2020. – 133 с.

6. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: Пособие для инженеров / М.А. Зленко. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

УДК620.1

ТРУДНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Н.А. Новикова¹, Я.В. Зырянова¹

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Сегодня метрология играет ключевую роль в обеспечении единства измерений и поддержки технического прогресса. Метрологическое обеспечение имеет существенное значение в повышении качества выпускаемой продукции машиностроительными предприятиями и включает широкий спектр мероприятий, направленных на обеспечение точности и правильности измерений, используемых в процессе проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта машиностроительной продукции. Но введенные санкционные ограничения значительно повлияли на состояние метрологии в России, вызвав ряд специфических проблем и трудностей.

Ключевые слова: метрология, метрологическое обеспечение, единство измерений, качество, импортозамещение, санкции.

FOR ENGINEERING CHALLENGES IN METROLOGICAL SUPPORT COMPANIES UNDER ECONOMIC CONSTRAINTS

N.A. Novikova, Ya.V. Zyryanova

Today, metrology plays a key role in ensuring the uniformity of measurements and supporting technical progress. Metrological support is essential for improving the quality of manufactured products by engineering companies and encompasses a wide range of measures aimed at ensuring the accuracy and precision of measurements used in the design, manufacture, operation, and repair of engineering products. However, the imposed sanctions have significantly impacted the state of metrology in Russia, causing a number of specific problems and difficulties.

Keywords: metrology, metrological support, uniformity of measurements, quality, import substitution, sanctions.

Темпы развития мировой экономики во многом определяет международная торговля. Международным, региональным и национальным организациям приходится все в большей мере координировать свои задачи и действия. Устранение барьеров в торговле является не только экономической, но и одной из центральных политических задач. Технические барьеры в торговле обусловлены различными законодательными требованиями к товарам, изготовленным в разных странах; различиями в процедурах испытаний и сертификации, когда результаты таких процедур страны-изготовителя не признаются в стране-потребителя продукции.

Для этого необходимо, чтобы производители и таможенники знали требования всех стран, в которые они экспортируют. Требуется координация всей деятельности метрологических служб с целью повышения эффективности сотрудничества стран.

Цель исследования: обзор нормативно-правовых актов РФ в области

метрологии, обозначение проблем в условиях санкций.

Задачи исследования: определение перечня законодательных актов, используемых в метрологии на территории РФ, краткое описание сути и определение важности применения, а также описание проблематики в текущем моменте времени.

Метрологическая деятельность в России регулируется рядом законов и нормативных актов, определяющие правила и порядок осуществления метрологической деятельности и включают:

1. Закон № 102-ФЗ “Об обеспечении единства измерений”. Этот закон определяет правовые основы обеспечения единства измерений в Российской Федерации.

2. Постановление Правительства РФ от 29.06.2021 № 1053 (ред. от 16 августа 2025г. «Об утверждении Положения о федеральном государственном метрологическом контроле (надзоре) и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». Документ утверждает положение о порядке осуществления государственного надзора за выполнением обязательных требований к средствам измерений и проведению мероприятий по контролю их соответствия установленным нормам. [4].

3. Постановление Правительства РФ от 20 апреля 2010 г. №250 с изменениями 6 октября 2021 “О перечне средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии”. Это постановление указывает на специальный перечень средств измерений, которым необходима особая форма поверки [5].

Цель специального регулирования – гарантировать высокое качество и точность измерений, особенно в критически важных отраслях, таких как медицина, промышленность, оборона и охрана окружающей среды.

4. Государственные стандарты (ГОСТы) и отраслевые стандарты (ОСТы) являются важными источниками регламентации в области метрологии. Они устанавливают общие технические условия и характеристики средств измерений, способы оценки их точности и методики поверки.

5. Решения Федеральной антимонопольной службы (ФАС). Федеральная антимонопольная служба принимает участие в формировании правовых основ метрологии путем принятия решений относительно допуска зарубежных средств измерений на рынок России. Она также следит за соблюдением конкуренции на рынке метрологических услуг.

В связи с введением санкций Россия активно взаимодействует со странами Азии, а именно Китаем и Индией, и возникает вопрос: а в этих странах аналогично организовано функционирование метрологической системы? Безусловно, общая концепция метрологии одинакова, но в Китае применяется своя система стандартов GB/T, отличная от западных стандартов и стандартов России. За поверку отвечает Китайская академия метрологии (CAFM). Основное внимание уделяется массовому производству и экспорту, поэтому китайские специалисты стараются соблюдать высокую

скорость обработки запросов и низкие цены на услуги [6, 7].

Особенность китайского подхода заключается в сильной ориентации на производительность и экспортную политику. Качество поверки нередко страдает в угоду скорости и дешевизне [8].

Ещё одним важным фактором китайской поверки является наличие огромного количества мелких предприятий и частных мастерских, занимающихся ремонтом и обслуживанием средств измерений. Такой подход приводит к недостаточной координации усилий и низкому уровню квалификации исполнителей [8].

В Индии тоже существует процедура поверки средств измерений, известная как *verification*. Индийская метрологическая система организована следующим образом: центральным органом, ответственным за организацию и осуществление поверочной деятельности, является Национальный институт стандартов и технологий (CSIR-NPL). Он служит основным хранилищем национальных эталонов и организует проверку средств измерений на территории страны. Основная цель поверки - убедиться в правильности работы средств измерений и соблюдении ими заявленных производителем характеристик [7, 9].

Особенностью индийской метрологии является то, что Индийские стандарты базируются на международной системе единиц (СИ), принятой большинством стран мира. Система учёта и управления средствами измерений организована по территориальному принципу, при этом каждое предприятие обязано проводить поверку приборов самостоятельно либо привлекать аккредитованные организации [7].

Также проследить специфику индуистской культуры можно в особом внимании к деталям и процедуре исполнения. Индусы традиционно уделяют много времени процессу, соблюдая ритуальность действий, что отражается и на процедуре поверки. И ещё одной отличительной чертой индийского подхода является тесная связь поверки с религиозными традициями. Иногда поверочные мероприятия сопровождаются символическими действиями, направленными на привлечение удачи и благословения богов [7, 10, 11].

Практика взаимодействия со странами Азии в условиях введённых санкций, определила множество проблем отрасли в России, а именно:

1. Обеспечение совместимости и сопоставимости результатов измерений в разных странах и регионах становится всё более сложной задачей.
2. Существование законодательных и нормативных барьеров - отсутствие единых международных стандартов и нормативных документов затрудняет обмен информацией и сотрудничество между странами.
3. Замедление технологического прогресса - ограниченный доступ к современным зарубежным приборам и оборудованию тормозит модернизацию производственных процессов и научно-технические исследования, а доступ к имеющемуся оборудованию из стран Азии делает практически невозможным его применение на предприятиях машиностроения России.
4. Недостаточная подготовка специалистов, отсутствие опыта в области метрологии в работе с иностранным оборудованием и документаци-

ей, снижает качество выполняемых работ и повышает риски ошибок, включая невозможность корректного перевода имеющихся инструкций.

5. Низкий уровень осведомленности населения о значении метрологии и важности точных измерений негативно влияет на общественное восприятие профессии.

Решение обнаруженных трудностей требует комплексного подхода:

- импортозамещение ключевых компонентов и узлов, при этом важно помнить, что многие отечественные компании ориентировались на зарубежные технологии, пренебрегая собственными разработками;
- поддержку отечественного производителя высокотехнологичного оборудования;
- совершенствование системы аккредитации и поверки средств измерений;
- расширение межотраслевого сотрудничества и взаимодействие между предприятиями и организациями;
- формирование единых, международных стандартов обеспечения единства измерений.

Подводя итоги, отметим, что метрология в России регулируется множеством взаимосвязанных нормативных актов и документов, направленных на обеспечение высокой точности измерений, защиту прав потребителей и стимулирование экономического роста за счёт создания благоприятных условий для внедрения научных и технических достижений. Перед российскими специалистами стоят серьёзные и сложные задачи по минимизации последствий санкций, улучшению качества измерений, повышению энергоэффективности и снижению материалоёмкости продукции.

Сейчас государство активно развивает программы импортозамещения, стремится поддержать отечественных производителей, выделяя гранты, содействуя маркетингу и популяризации. Но, несмотря на предпринимаемые меры, значительная часть крупных предприятий продолжает выбирать продукцию китайских и индийских разработчиков.

Список литературы

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) / Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). - International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2019.
2. Федеральный закон : Федеральный закон № 102-ФЗ “Об обеспечении единства измерений”. - Принят Государственной Думой Федерального Собрания Российской Федерации 18 июня 2008 г.; Одобрен Советом Федерации Федерального Собрания Российской Федерации 25 июня 2008 г. - Доступ из справ.-правовой системы “Консультант Плюс” (дата обращения: 27 сентября 2025).
3. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.gost.ru (дата обращения: 08.11.2025).
4. Постановление Правительства РФ от 29.06.2021 № 1053 (ред. от 16.08.2025) “Об утверждении Положения о федеральном государственном метрологическом контроле (надзоре) и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации”. – Доступ из справ.-правовой системы “Консультант Плюс” (дата обращения: 28 сентября 2025).

5. Постановление Правительства РФ от 20.04.2010 № 250 (ред. от 06.10.2021) “О перечне средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии”. - Доступ из справ.-правовой системы “Консультант Плюс” (дата обращения: 27 сентября 2025).
6. National Institute of Metrology China (CAFM) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://en.nim.ac.cn> (дата обращения: 01.12.2025).
7. Metrology in India and China: A Comparative Study // Journal of Measurement Science. - 2022. - Vol. 12, No. 3. - Pp. 157-172. - URL: <https://msc-conf.com/history-of-metrology/> (дата обращения: 13.11.2025).
8. Heinrichs, J.F., Zou, Q. China's Role in Global Metrology Development: From Domestic Reforms to International Collaboration // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - Vol. 1851. - Art. no. 012012.
9. CSIR - National Institute For Interdisciplinary Science and Technology [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.niist.res.in> (дата обращения: 01.12.2025).
10. Perry, M., Khatri, Y. International Harmonisation of Metrological Standards: Challenges and Opportunities // Measurement. - 2019. - Vol. 133. - Pp. 446-453.
11. Singh K.S., Chaudhary S.K. Challenges in Implementing Effective Metrological Infrastructure in Developing Countries // International Journal of Metrology. - 2020. - Vol. 4, Iss. 2. - Pp. 155-168. - URL: <https://www.sciencegate.app/keyword/507866> (дата обращения: 24.11.2025).

УДК 67.05

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В МАШИНОСТРОЕНИИ НА ПРИМЕРЕ ВНЕДРЕНИЯ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ (PEEK CF и ESD)**

И. М. Прокофьев¹, студент, **В. П. Захарова¹**, канд. техн. наук

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Обозначено развитие аддитивных технологий на момент 2026 года. Определён ряд преимуществ технологии 3D-печати. Проанализированы характеристики новейших высокоэффективных материалов (PEEK CF и ESD). Сделан вывод о благоприятных долгосрочных перспективах использования аддитивных технологий в машиностроении.

Ключевые слова: высокоэффективные материалы, композиты, 3D-печать, аддитивные технологии.

**PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ADDITIONAL TECHNOLOGIES
IN MECHANICAL ENGINEERING USING THE EXAMPLE OF THE
INTRODUCTION OF HIGH-PERFORMANCE MATERIALS (PEEK CF AND ESD)**

I. M. Prokofiev, V.P. Zaharova

The development of additive technologies through 2026 is outlined. A number of advantages of 3D printing technology are identified. The characteristics of the latest high-performance materials (PEEK CF and ESD) are analyzed. A conclusion is drawn regarding the favorable long-term prospects for the use of additive technologies in mechanical engineering.

Keywords: high-performance materials, composites, 3D printing, additive technologies.

Машиностроение и материаловедение – тесно связанные между собой инженерные области, обеспечивающие создание различных изделий на основе изучения структуры, свойств и технологий обработки материалов. Важнейшими параметрами материалов на протяжении всей истории данных отраслей являются механические характеристики (прочность, твёрдость, пластичность, вязкость), физические свойства (плотность, теплопроводность, термостойкость), а также технологичность (свариваемость, обрабатываемость резанием).

В современном мире регулярно создаются материалы с заранее заданными свойствами путём управления их структурой и химическим составом. Среди них можно выделить нанокompозитные материалы на основе керамики и различных полимеров [1].

Однако большие временные и финансовые затраты на внедрение таких материалов в производственный процесс до сих пор остаются одной из главных проблем материаловедения и машиностроения в целом. Для ускоренного производства продукции повсеместно применяется оборудование с ЧПУ, обладающее очевидными преимуществами перед универсальными станками, но длительный процесс подбора инструмента и режимов резания для новых материалов, сопровождающийся также предварительными испытаниями, нивелирует их.

Таким образом, решением этих проблем будет метод производства, позволяющий использовать современные материалы без необходимости длительных подготовок, описанных выше. Одним из таких методов является аддитивный метод.

Такой метод производства используется во многих отраслях, начиная с медицины и заканчивая архитектурой и строительством. Однако для машиностроения он особенно важен, так как позволяет работать с новейшими материалами.

В 2026 году производство с широким ассортиментом продукции и малыми объёмами выпуска станет новой нормой для обрабатывающей промышленности. Отраслевая статистика показывает увеличение спроса на готовые изделия мелких серий, в частности, на запасные части, кронштейны и корпуса. Например, для сложных деталей с годовым объёмом производства в несколько тысяч штук 3D-печать оказалась более экономически выгодной, чем литьё под давлением. Также уменьшилось время на подготовку производства на 20 % [2].

Помимо вышеперечисленных преимуществ, в рамках аддитивного производства за последний год резко вырос уровень внедрения высокоэффективных термопластов, способных в скором времени стать основой для большинства изделий.

Одним из таких является армированный композит РЕЕК CF. Некоторые виды композита, их основные преимущества и области применения перечислены в таблице 1. Также стоит отметить, что такие материалы совместимы с различными процессами, такими как литьё под давлением и экструзией.

Таблица 1 – Краткая характеристика различных видов армированного композита РЕЕК CF (составлено авторами на основе [3])

Вид композита	Основные преимущества	Область применения
Самосмазывающийся композит РЕЕК CF10 PTFE	1) Повышенная износостойкость 2) Высокая химическая и коррозионная стойкость 3) Эксплуатация при температуре 250-300 °С 4) Сравнительная легкость	Высоконагруженные подшипники, уплотнения и зубчатые передачи в аэрокосмической, автомобильной и суровой промышленности.
Соединения РЕЕК-PTFE-CF	1) Предел прочности 150-200 МПа 2) Прочность на изгиб 200-250 МПа 3) Ударная вязкость от 8 до 12 кДж/м ² 4) Твёрдость по Роквеллу 100-120	Разделительные захваты принтера
Гранулированное проводящее инженерное пластиковое сырьё РЕЕК CF30	1) Ударную вязкость: 8–15 кДж/м ² 2) Предел прочности 180-240 МПа 3) Прочность на изгиб 240–350 МПа 4) Плотность в диапазоне 1,40–1,50 г/см ³	Экранирующие компоненты электронных устройств и антистатические изделия

Отдельного внимания заслуживают и ESD-материалы, обладающие высоким поверхностным сопротивлением (около 10^7 Ом), что позволяет использовать их для изготовления схем и датчиков чувствительной электроники, используемых в автомобильной, аэрокосмической промышленности, а также в военной отрасли, например, для изготовления дронов. Среди явных преимуществ использования данного материала можно отметить лёгкость и эргономичность получаемых конструкций, а также экономию затрат на производство [4].

Вывод. Анализ современных материалов для 3D-печати показал, что данный метод производства на сегодняшний день крайне быстро развивается. Материалы, используемые для изготовления изделий таким методом, практически не уступают материалам, применяемым в классической обработке резанием. Таким образом, можно сделать вывод о долгосрочных перспективах развития аддитивных технологий в машиностроительной отрасли.

Список литературы

1. Михайлов М. Д. Современные проблемы материаловедения. Нанокompозитные материалы: учеб. пособие / М. Д. Михайлов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 208.
2. Exploring the Latest FDM 3D Printing Advancements 2026 // Flachforge URL: <https://www.flashforge.com/> (дата обращения: 10.02.2026)
3. PEEK CF: Преобразование отраслей с помощью совершенства // CFcarbon URL: <https://www.carbonele.com/ru/products/cf-series/peek-cf-series/page/2/> (дата обращения 05.02.2026)
4. ESD-Safe 3D Printing | Electrostatic Discharge Protection // Stratasys URL: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/guide-to-3d-printing-esd-safe-materials/> (дата обращения 10.02.2026)

УДК 620.193.2

СРАВНИТЕЛЬНАЯ СТОЙКОСТЬ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ 09Г2С И 20 К ВОДОРОДНОМУ ОХРУПЧИВАНИЮ

В.И. Болобов¹, д-р техн. наук, проф., **Г.Г. Попов**¹, канд. техн. наук,

Г.А. Тигранян¹, аспирант

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, РФ

Приведены результаты экспериментальной оценки склонности трубных сталей 09Г2С и 20 к водородному охрупчиванию. Наводороживание образцов проводили электролитически в растворе H_2SO_4 с добавкой тиомочевины при плотности тока 200 мА/см². Содержание диффузионно-связанного водорода определяли методом анодного послойного растворения с регистрацией объема выделившегося газа. Установлено, что максимальная концентрация водорода составила 53 см³_{H₂}/100 г_{Me} для стали 09Г2С и 95 см³_{H₂}/100 г_{Me} для стали 20, что указывает на преимущество стали 09Г2С при эксплуатации в условиях возможного наводороживания.

Ключевые слова: трубопроводная сталь, электролитическое наводороживание, анодное растворение, молекулярный водород

COMPARATIVE RESISTANCE OF PIPELINE STEELS 09G2S AND 20 TO HYDROGEN EMBRITTLEMENT

V.I. Bolobov, G.G. Popov, G.A. Tigranyan

The results of an experimental assessment of the susceptibility of pipe steels 09G2S and 20 to hydrogen embrittlement are presented. Hydrogen charging of the samples was carried out electrolytically in an H_2SO_4 solution with the addition of thiourea at a current density of 200 mA/cm². The content of diffusion-bonded hydrogen was determined by the method of anodic layer-by-layer dissolution with recording of the volume of released gas. It was found that the maximum hydrogen concentration was 53 cm³_{H₂}/100 g_{Me} for steel 09G2S and 95 cm³_{H₂}/100 g_{Me} for steel 20, which indicates the advantage of steel 09G2S when operating under conditions of possible hydrogen charging.

Keywords: pipeline steel, electrolytic hydrogen charging, anodic dissolution, molecular hydrogen

Представлены результаты экспериментов по электролитическому наводороживанию и анодному растворению образцов в виде пластин 30×17×3 мм низкоуглеродистых трубных сталей 09Г2С, характеризующейся равноосной феррито-перлитной структурой, и 20, имеющей полосчатую микроструктуру с чередующимися слоями полигонального феррита и перлита. Поверхность пластин, за исключением рабочей зоны площадью ~ 3 см², покрывали лаком, стойким в серноокислой среде. Процесс наводороживания осуществляли в 0,1 н. растворе H_2SO_4 с добавкой 1,5 % тиомочевины в качестве промотора, при плотности тока 200 мА/см² в течение 1 ч. После наводороживания образцы промывали, высушивали и выдерживали на воздухе при комнатной температуре 30 суток, как времени, достаточно для выделения всего диффузионно-подвижного водорода, содержащегося в металле пластин. С использованием металлографического анализа поперечных шлифов образцов исследовали изменения в структуре сталей, происходящие в результате наводороживания.

Остаточное содержание диффузионно-связанного водорода в приповерхностном слое определяли методом анодного послойного растворения. Наводороженную пластину устанавливали рабочей зоной вверх в электролитическую ячейку с 10%-м раствором NaCl и 2% сегнетовой соли, подключали к положительному полюсу источника, обеспечивая анодную плотность тока 200 мА/см^2 в течение 6 ч. Водород, выделяющийся при растворении слоя металла, собирали в микробюретку. По изменению объема (рис.1) выделившегося водорода и толщины растворённого слоя металла во времени устанавливали распределение концентрации водорода по толщине образцов, которое сравнивали с изменением микроструктуры их металла.

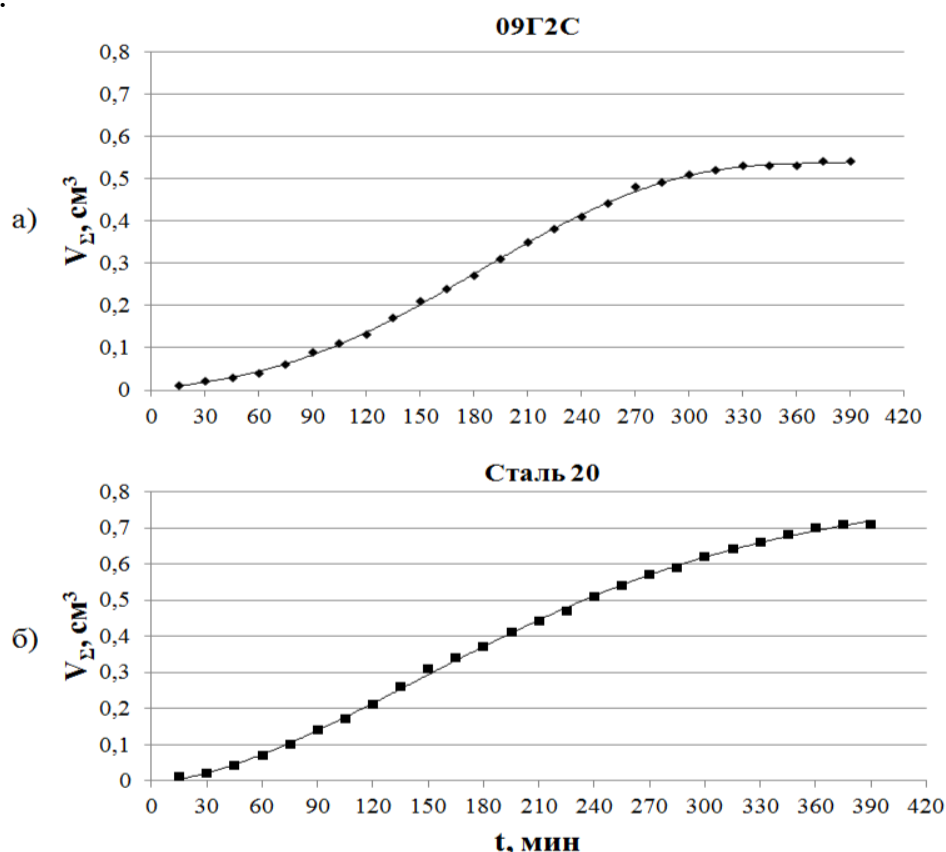


Рис. 1. Изменение объема выделившегося водорода с течением времени для сталей 09Г2С (а) и 20 (б)

Максимальные значения концентрации диффузионно-связанного водорода в сталях оказались равными $53 \text{ см}^3_{\text{H}_2}/100 \text{ г}_{\text{Ме}}$ для 09Г2С и $95 \text{ см}^3_{\text{H}_2}/100 \text{ г}_{\text{Ме}}$ для стали 20. Как показали результаты металлографического анализа, наличие диффузионно-связанного водорода сопровождается появлением в стали 09Г2С микротрещин, а в стали 20 – расширением перлитных полос.

Вывод: Низколегированная сталь 09Г2С, как характеризующаяся меньшей накопительной способностью к диффузионно-связанному водороду и, как следствие, к водородному охрупчиванию, является более предпочтительным материалом для трубопроводов, транспортирующих компримированный водород.

УДК 621.91

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОТВЕРСТИЙ РАСТОЧНЫМИ ОПРАВКАМИ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

М.А. Адмакин¹, к.т.н., доцент; А.Д. Халимоненко¹, к.т.н., доцент;

А.А. Голова¹, студент; Ю.Д. Сопина¹, студент

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Работа посвящена исследованию обеспечения точности при чистовой обработке отверстий расточными оправками с большим вылетом в крупногабаритных заготовках деталей машин. Для решения обозначенной проблемы была разработана математическая модель, учитывающая возможные погрешности от всех действующих при резании сил, включая прогиб расточной оправки от силы тяжести. В работе выведена формула для расчета суммарного прогиба инструмента в случае горизонтально расположенной расточной оправки, позволяющая определить максимальное смещение вершины резца при горизонтальном растачивании и оценить возможность получения брака при чистовой обработке отверстий в крупногабаритных заготовках деталей машин.

Ключевые слова: растачивание отверстий; расточная оправка; погрешность обработки; технология производства; сила резания; сила тяжести; точность; вылет инструмента; прогиб инструмента

ENSURING THE ACCURACY OF THE HOLES WITH LONG BORING BARS

M.A. Admakin, A.D. Khalimonenko, A.A. Golova, Yu.D. Sopina

The work is devoted to the study of the possibility of ensuring accuracy in the finishing of holes with large-span boring bars in large blanks of machine parts. To solve this problem, a mathematical model was developed that takes into account possible errors from all forces acting during cutting, including deflection of the boring bar due to gravity. The paper provides a formula for calculating the total deflection of the tool in the case of a horizontally positioned boring bar, which makes it possible to determine the maximum displacement of the tip of the cutter during horizontal boring and to evaluate the possibility of defective holes in large blanks of machine parts.

Keywords: boring holes; boring bar; machining error; mechanical processing technology; cutting force; gravity force; precision machining; boring bar length; tool deflection

Для обеспечения максимальной надежности горных машин особое внимание следует уделять качеству процесса их изготовления. Качество изготовления деталей горных машин требует рационального выбора и обоснования технологии их изготовления с учетом улучшения характеристик с точки зрения обеспечения точности и повышения производительности. Целью работы является учет всех факторов, влияющих на точность обработки при выполнении операции растачивания отверстий, включая силу тяжести расточной оправки, расчет предварительной размерной настройки инструмента, исключая пробные проходы. А также разработка рекомендаций по технологии растачивания, исключая или значительно снижающих вероятность получения брака при чистовом растачивании глубоких отверстий в крупногабаритных деталях горных машин.

Обеспечение геометрической точности и качества поверхности при растачивании глубоких отверстий в корпусных деталях горных машин ин-

струментами с большим вылетом является на сегодняшний день достаточно актуальной задачей. Анализ литературных источников [1-3] показал, что проблемы соблюдения точности решаются либо регулированием жесткости системы СПИД, либо регулированием силы резания. Следует отметить, что эти способы не являются эффективными с точки зрения экономики производства, так как их использование снижает производительность обработки. Еще одним фактором, уменьшающим точность обработки, являются колебания, возникающие при резании, которые обычно предлагается снижать с помощью виброгасящих элементов, что повышает себестоимость производства из-за увеличения стоимости самого режущего инструмента [1-3].

Рассмотрим физическую модель, учитывающую все силы, действующие на вершину расточного резца, установленного в оправке, которые оказывают влияние на точность конечного размера растачиваемого отверстия. На вершину резца действуют следующие силы [4, 5]: P_y - радиальная составляющая силы резания, влияющая на точность обработки, ΔP_y - колебание силы резания из-за нестабильности условий резания, $F_{тяж.}$ - сила тяжести оправки (борштанги с резцом), действующая как распределенная нагрузка q . Рассмотрим каждую из составляющих силы резания и прогибы борштанги из-за них, влияющих на точность обработки растачиваемого отверстия. Сила P_y может рассчитываться либо как самостоятельная величина, либо как часть нагрузки от модуля главной составляющей силы резания P_z . Прогиб от нее ведет к появлению двух независимых величин прогиба самой борштанги u_{Py} и прогиба в контактном соединении $u_{опр.}$ из-за перекоса двух сопрягаемых элементов вспомогательного инструмента. Из-за наличия силы ΔP_y , которая составляет примерно 10% от P_y , появляется прогиб $u_{\Delta Py}$. Следует отметить, что колебания силы рассматриваются только со знаком плюс 5%, так как это увеличивает прогиб, а уменьшение прогиба не рассматривается. С учетом силы, вызванной наличием автоколебаний P_a , можно получить величину максимального прогиба оправки A_{py} . В таком случае общий вид математической модели, описывающей погрешность обработки, с учетом всех составляющих будет представлен формулой:

$$u_{\Sigma} = u_{Py} + u_{\Delta Py} + u_{опр.} + u_{F_{тяж.}} + A_{py}, \quad (1)$$

где u_{Σ} - суммарный прогиб вершины резца в радиальном направлении; u_{Py} - стрела прогиба (упругая деформация) оправки в плоскости режущей кромки; $u_{\Delta Py}$ - отклонение от колебаний ($u_{\Delta Py} \approx 10\%$ от u_{Py}); $u_{опр.}$ - перемещения в соединениях модулей оправки, которые вызывают перемещения в точке приложения силы резания P_y ; $u_{F_{тяж.}}$ - отклонение, связанное с влиянием силы тяжести на оправку; A_{py} - отклонение, вызванное автоколебаниями системы.

Произведем расчет каждой из составляющих прогиба, рассмотрев расточную оправку как консольную балку. Величину u_{Py} определим по формуле:

$$y_{Py} = \frac{P_y l^3}{3EI}, \quad (2)$$

где: P_y - радиальная составляющая силы резания, Н; l - вылет расточной оправки (борштанги), мм; E - модуль упругости материала державки резца, Па; I - момент инерции сечения державки, мм⁴.

Значение перемещения вершины резца, вызванное колебаниями силы резания вычислим по формуле:

$$y_{\Delta Py} = 0,05 \frac{P_y l^3}{3EI}, \quad (3)$$

Прогиб вершины резца $y_{opr.}$, обусловленный контактной деформацией инструментального блока (сочетание вспомогательного и режущего инструмента) рассчитываем по формуле [4, 5]:

$$y_{opr.} = \Sigma P_y \theta_i l_i^2, \quad (4)$$

где θ_i – коэффициент контактной податливости соединения i , (Н·м)⁻¹·10⁻⁵, l_i – вылет оправки в соединении i , м.

Так как балка представляет консоль со свободным концом, расчет прогиба выполняется для распределенной нагрузки. Сила тяжести действует только в случае горизонтально расположенной борштанги. В этом случае формула $y_{F_{тяж}}$ будет выглядеть следующим образом:

$$y_{F_{тяж}} = \frac{ql^4}{8EI}, \quad (5)$$

где q – распределенная нагрузка ($q = mg / l$), Н/м, E - модуль упругости материала державки резца ($E = 210$ ГПа, то есть $E = 210 \cdot 10^3$ Н/мм²), I - момент инерции сечения державки, м⁴.

Колебания вершины резца в оправке из-за наличия автоколебаний в станке и инструментальной системе повышаются при увеличении вылета инструмента. Величину A_{py} при упрощенном подходе допускается не учитывать. Таким образом, исключив расчет влияния автоколебаний на процесс резания, можно получить суммарный прогиб вершины резца в радиальном направлении, что соответствует двойной погрешности диаметра обработки. Формула для расчёта суммарного прогиба в случае горизонтально расположенной расточной оправки будет выглядеть следующим образом:

$$y_{\Sigma} = \frac{P_y l^3}{3EI} + 0,05 \frac{P_y l^3}{3EI} + \Sigma P_y \theta_i l_i^2 + \frac{ql^4}{8EI}. \quad (6)$$

В этой формуле все геометрические составляющие известны из конструкции вспомогательного инструмента, вылета резца или из табличных данных для конкретного вида соединения. Силу P_y можно определить по эмпирической зависимости [4, 5]:

$$P_y = 10C_{py} t^x S^y V^n k_p, \quad (7)$$

где C_{py} - коэффициент, учитывающий некоторые конкретные условия резания (обрабатываемый материал, инструментальный материал, геометрию инструмента, условие смазки и т. д.); t , S , V - режимы резания (глубина резания, подача и скорость резания); x , y , n - показатели степени, характеризующие закон изменения составляющих силы резания в зависимости от

изменения t , S , V ; k_p - поправочный коэффициент, для точения и растачивания $k_p = 1,9$.

Расчет прогибов оправки по предложенной модели показал, что при горизонтальной схеме обработки прогиб от силы тяжести превышает прогиб от силы P_y , причем сила тяжести оказывает различное влияние на размерную точность в зависимости от того, где находится участок обработки растачиваемого отверстия. В нижней точке обработки сила тяжести увеличивает диаметр обработки, в верхней точке отверстия наоборот его уменьшает. При растачивании отверстий на станке вертикальной компоновки из расчетов исключается составляющая прогиба от силы тяжести и, соответственно, уменьшился перекос оправки из-за отсутствия влияния силы тяжести, поэтому форма отверстия будет искажаться меньше.

Выводы по работе

- рассмотрено влияние силы тяжести и естественное колебание силы резания на погрешности формы и размеров обрабатываемого отверстия;
- необходимо учитывать силу тяжести для обеспечения точности обработки отверстий при использовании расточного инструмента с большим вылетом и массой;
- форма обрабатываемого отверстия меньше искажается при работе на станках вертикальной компоновки.

Список литературы

1. Nikolov S., Dimitrova R., Dimitrov L. Mathematical Model of Displacements in Tools Used in Boring Operations on Machining Centers. Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020. 2020. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240838.
2. Kępczak N., Bechciński G., Rosik R. Operating Properties of Deep Hole Boring Tools with Modified Design. Materials. 2024. Vol. 17(7). 1551. DOI: 10.3390/ma17071551
3. Ghongade H.P. Investigation of vibration in boring operation to improve Machining process to get required surface finish. Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 62. pp. 5392-5395. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.561
4. Ящерицын П.И. Теория резания / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. - Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
5. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2007 - 419 с.

УДК 621.01

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ОРЕБРЕНИЯ МЕДНЫХ ТРУБ ДЛЯ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ

А.Н. Михайлов¹, С.Б. Котляров¹, В.Б. Котляров¹, Б.С. Котляров¹

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

В статье приведен порядок расчета параметров технологического процесса изготовления оребренных труб из меди МЗ для маслоохладителей тепловозов ТГМ и ТГ. Процесс реализуется на базе токарно-винторезного станка по разработанной ранее структурной схеме и предназначен для применения в мелкосерийном производстве, где отсутствует прокатное оборудование.

Ключевые слова: накатка, оребренная труба, расчет параметров, накатная головка, накатной ролик, размеры элементов, силы давления.

METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF THE STRUCTURAL SCHEME OF FINS FOR COPPER PIPES FOR OIL COOLERS

A.N. Mihailov, S.B. Kotliarov, V.B. Kotliarov, B.S. Kotlyarov

The article describes the procedure for calculating the parameters of the technological process for manufacturing finned pipes made of M3 copper for oil coolers of TGM and TG locomotives. The process is implemented on the basis of a lathe-screw machine according to the previously developed structural scheme and is intended for use in small-scale production, where there is no rolling equipment.

Keywords: rolling, finned pipe, parameter calculation, rolling head, rolling roller, element dimensions, pressure forces.

Многие предприятия, выполняющие работы по ремонту агрегатов и узлов для тепловозов сталкиваются с необходимостью замены оребренных труб из меди МЗ для маслоохладителей. Массовое производство таких труб в стране отсутствует, заказы на предприятиях с прокатным оборудованием для изготовления мелких партий высокочрезвычайно затратны.

Авторами предложен способ и конструктивное решение реализации технологии 3-х роликовой винтовой накатки оребрения медных труб с разработкой необходимой оснастки на базе токарно-винторезного станка.

Разработаны методики расчета штучной заготовки [1] по длине трубы, по наружному и внутреннему диаметру для оребренной трубы с заданными размерами: длины трубы ($L=1250$ мм); наружного диаметра ребер ($D_{\text{нр}}=24$ мм); диаметра трубы по впадинам ($D_{\text{вп}} = 17$ мм); шага ребер на трубе ($T=4$ мм); толщины ребер по среднему диаметру витка ($S=1,8$ мм).

На рис. 1 приведено фото установки для 3-х роликовой накатки медных труб для маслоохладителей тепловозов. Базой служит токарно-винторезный станок мод 1М63, на направляющих станины установлен и закреплен корпус, содержащий саму накатную головку, детали передачи движений, в задней бабке устанавливается дорн во вращающемся патроне. Главное движение обеспечивается шпинделем станка и передается на каждый накатной ролик головки через карданные валы.

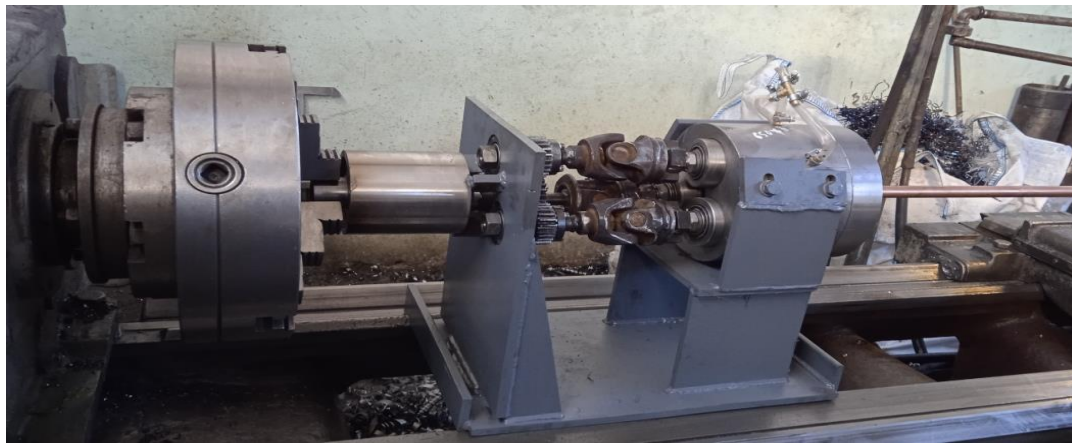


Рисунок 1. Устройство для оребрения труб на базе станка 1М63.

Установка предназначена для оребрения медных труб из штучных мерных заготовок. Заготовки рассчитываются предварительно в заданный размер по заданным размерам готовой детали.

На рис. 2 приведены эскизы заготовки и готовой оребренной трубы для маслоохладителей, где указано, что готовая труба после накатки имеет длину на 7% больше, чем длина заготовки трубы до накатки.

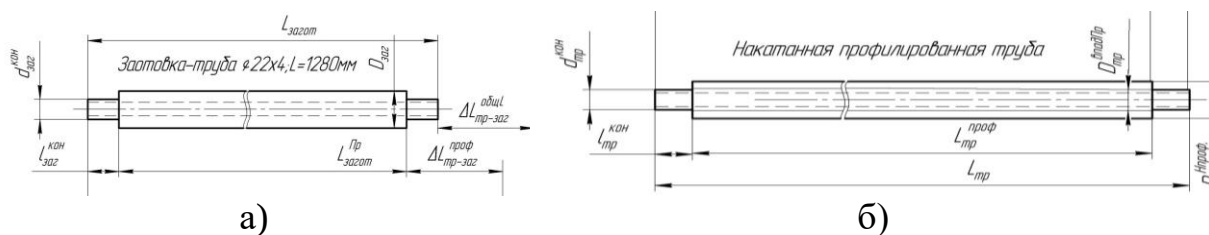


Рисунок 2. Эскизы: а) заготовки; б) оребренной трубы.

Расчет длины и диаметров трубы-заготовки выполняется из условия равенства объемов металла до накатки и после накатки ребе на трубе.

Исходным элементов для расчета заготовки являются параметры профиля ребер и шаг накатки, который можно представить в виде:

$$t_{\text{Факт}}^{\text{проф}} = t_p^{\text{проф}} + \Delta t_p^{\text{проф}}, \quad (1)$$

где $t_p^{\text{проф}}$ - расчетный шаг, а $\Delta t_p^{\text{проф}}$ - добавленная часть, которая возникает при пересчете толщины ребер и шага накатки в нормальной плоскости, и в осевой плоскости трубы.

В выражении (1) добавленная часть также может быть представлена суммой двух чисел в виде,

$$\Delta t_p^{\text{проф}} = \Delta s_{T\phi}^{\text{ВПр}} + \Delta s_{T\phi}^{\text{Вп}}, \quad (2)$$

где $\Delta s_{T\phi}^{\text{ВПр}}$ - часть прироста шага за счет изменения ширины витка в осевом сечении, а $\Delta s_{T\phi}^{\text{Вп}}$ - часть прироста за счет увеличения осевого размера впадины между витками.

На рис. 3 приведены схемы перераспределения материала кольцевого объема заготовки в материал ребер трубы.

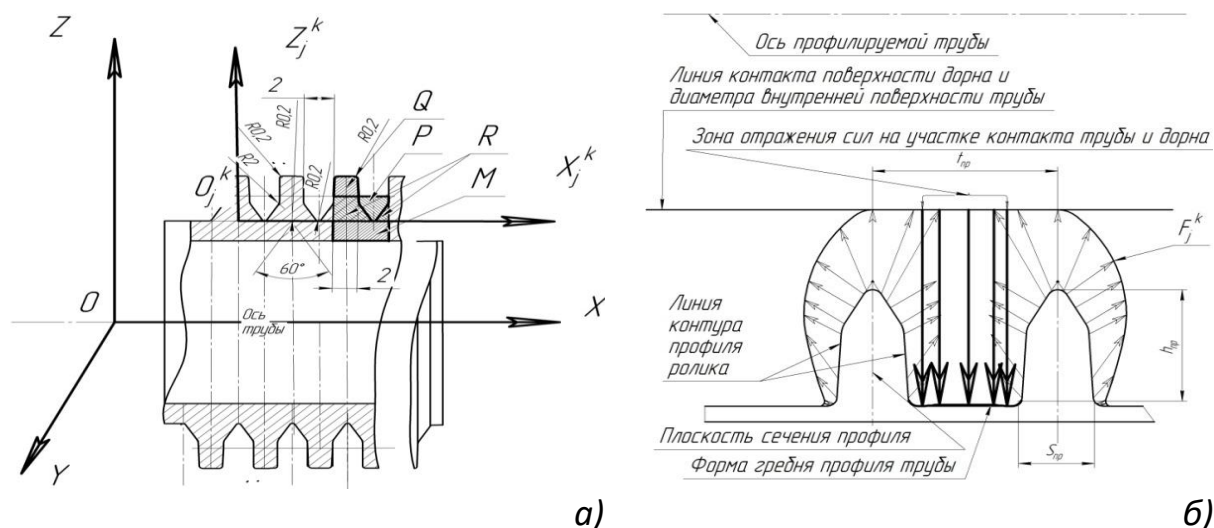


Рисунок 3. Эскиз перемещения материала заготовки при накатке ребер.
 а) кольцевой объем заготовки (заштрихованная часть в сечении кольца);
 б) силовое воздействие при перемещении роликами материала в ребра.

Безотходное оребрение труб возможно при соблюдении условия:

$$V_{\text{кольц}}^{\text{проф}} = V_Q + V_R + V_M = V_{\text{кольц}}^{\text{заг}}, \quad (3)$$

где в левой части выражения (3) полный объем материала кольцевого участка на шаге профиля, включающий отдельные кольцевые участки; V_Q – объем материала в кольце, вытесненном из материала трубы-заготовки в материал ребер; V_R – объем материала сформированного профиля, который остался в пределах наружного диаметра кольца трубы заготовки; V_M – объем материала профиля, можно записать ($V_M = V_{\text{осн}}$), который после формирования профиля остался и практически не изменил своего положения в основании внутреннего диаметра заготовки трубы.

В процессе накатки осуществляется силовое воздействие со стороны накатных роликов из стали 38ХС (твердость 52-56 HRC и модуль упругости $E=21$ - ГПа) диаметром 90 мм на медную трубу.

Геометрия контактной зоны характеризуется диаметром и шириной пятна контакта в зоне взаимодействия ролика и трубы.

Для плоской контактной зоны накатки цилиндрическими роликами расчет усилия накатки F можно выполнять исходя из условия:

$$F = R \cdot L \cdot \sigma_m \quad (4)$$

где R – радиус ролика $= D/2 = 45$ мм; L – ширина накатки (зависит от оборудования, обычно 10–30 мм, примем $L=20$ мм для расчёта); σ_T – предел текучести материала (обрабатываемого изделия), например для стали $\sigma_T = 400$ МПа.

$F = 45 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 400 \text{ МПа} = 45 \times 10^{-3} \text{ м} \times 20 \times 10^{-3} \text{ м} \times 400 \times 10^6 \text{ Па} = 36000 \text{ Н} \approx 36 \text{ кН}$ (Максимальная сила накатки (4) для заданных условий ~ 36 кН).

Частота вращения роликов: зависит от типа накатки, до 500 об/мин.

Скорость подачи трубы зависящая при винтовой накатке, 0,1–1 м/мин.

Давление контактного пятна рассчитывается с помощью формулы Герца для цилиндрического контакта в зависимости от материала и силы.

При накатке ребер используется смазка и охлаждение по технологии для снижения трения и износа (масло индустриальное И-20).

Более подробно некоторые расчеты приведены в опубликованных ранее работах и в докладах на научно-технических конференциях

Список литературы

1. Михайлов А.Н. Некоторые особенности технологического обеспечения при оребрении медных труб маслоохладителей / Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – 439 с. ISBN: 978-5-9967-0446-0
2. Михайлов А.Н. Методика расчета кинематико-динамического взаимодействия элементов технологического обеспечения накатки оребрения медных труб маслоохладителей / Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – Вып. 3 (82). – С. 34-43. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
3. Материаловедение в машиностроении. В 2 ч. Часть 1: учебник для вузов/ А.М. Адаскин, Ю.Е. Седов, А.К. Онегина, В.Н. Климов — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2022 — 258с.
4. Михайлов А.Н. Синтез структурных схем фот-воздействий при формообразовании и формировании поверхностных свойств труб маслоохладителей / Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. // Машиностроительные технологические системы: материалы международной научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2025. – 578 с. ISBN 978-5-7890-2310-5

УДК 621.01

ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ ПОСАДОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ НА РЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

А.Н. Михайлов¹, В.Б. Котляров¹, С.Б. Котляров¹, Б.С. Котляров¹
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

В статье рассмотрены варианты обработки зубчатых колес для КПП без разрыва потока передаваемой мощности при переключении передач. Особое внимание уделено обработке зубчатых колес с эксцентриситетом базовых отверстий относительно осей делительных диаметров колес на предприятиях с единичным характером производства, не имеющих зубообрабатывающего оборудования, но имеющих в наличии лазерные установки раскроя листового материала и станки для электроэрозионной обработки.

Ключевые слова: зубчатое колесо, лазерная резка, нарезание зубьев, черновая операция, чистовая обработка, термообработка колес, блок-вал зубчатых колес.

PROCESSING GEAR WHEELS WITH EXCENTRICITY OF PLACEMENT HOLES AT REPAIR ENTERPRISES

A.N. Mihailov, V.B. Kotliarov, S.B. Kotliarov, B.S. Kotlyarov

The article discusses options for processing gear wheels for gearboxes without interrupting the flow of transmitted power during gear shifting. Special attention is paid to the processing of gears with eccentricity of the base holes relative to the axes of the dividing diameters of the wheels at enterprises with a single-type production, which do not have gear-cutting equipment, but have laser cutting machines for sheet material and machines for electro-erosion processing.

Keywords: gear, laser cutting, cutting of teeth, rough operation, finishing, heat treatment of wheels, block shaft of gears

В перспективных механических коробках переключения передач [1] (МКПП), работающих без разрыва потока передаваемой мощности в момент переключения передач, применяются зубчатые колеса в качестве ведущей шестерни, и ведомого звена в виде блок-вала колес.

Блок-вал колес может изготавливаться как в монолитном исполнении, так и в сборочном. В исполнении по сборочному варианту в зависимости от количества передач в МКПП на валу блок-вала колес размещают 2-3 зубчатых колеса, имеющих эксцентриситет по расположению оси посадочного отверстия относительно осей делительных диаметров зубчатых колес. При этом величина эксцентриситета определяется числом зубьев каждого зубчатого венца колеса блок-вала, и смещение осей ориентировано как по направлению смещения осей при переключении, так и по угловому расположению колес на валу [2].

Для изготовления зубчатых колес на предприятиях единичного типа производства могут использоваться различные технологические подходы.

Для ремонтных предприятий с единичным типом производства и при отсутствии зуборезных станков требуется разработка альтернативных технологий изготовления и восстановления зубчатых колес.

При классических методах обработки [3] зубчатые колеса получают фрезерованием профильных зубьев на зуборезных станках с использованием дисковых фрез или копировальных фрезерных головок. Для обработки сложных профилей и эксцентричных посадочных отверстий требуется дорогостоящее наладочное оборудование и точные приспособления.

Другие способы – шлифование зубьев после черновой обработки, протягивание, шевингование, полирование – также требуют наличия узкоспециализированных станков [3, 4].

На рис. 1 приведен пример трехвенцового блок-вала колес МКПП, работающей без разрыва потока передаваемой мощности (ППМ).

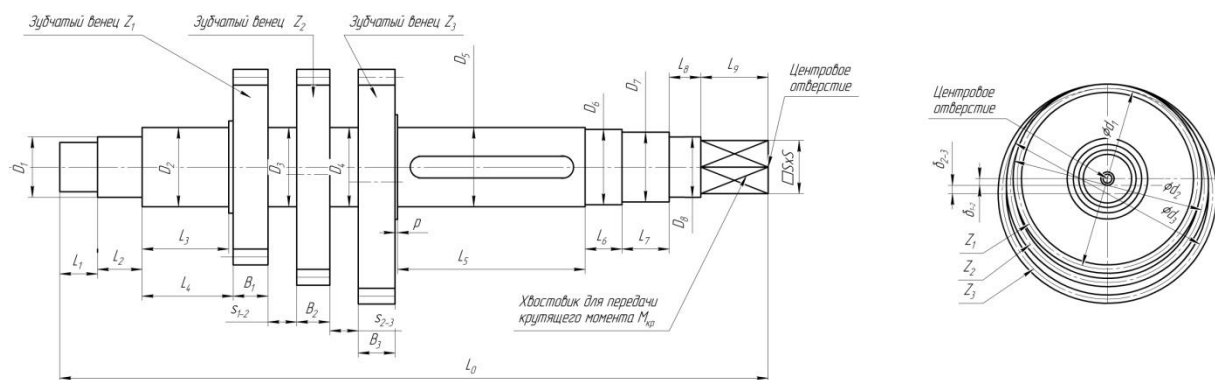


Рисунок 1. Трехвенцовый блок-вал колес МКПП без разрыва ППМ.

Для предприятий с единичным выпуском зубчатых колес и ремонтом МКПП оптимальным может быть использование лазерной резки для черновой обработки зубчатого профиля на листовом заготовочном материале, а также электроэрозионной обработки для точной финишной обработки зубьев и посадочных отверстий с эксцентриситетом.

На рис. 2 представлена схема обработки зубчатого профиля по программе на лазерном станке. Профиль зубьев колеса и отверстие для установки на вал с эксцентриситетом на величину «е» относительно оси делительного диаметра выполняется без переустановки.

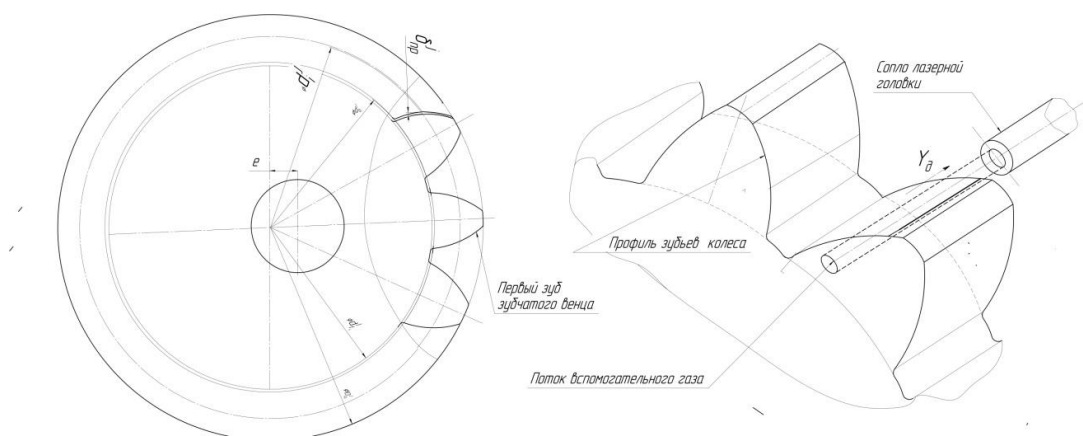


Рисунок 2. Схема формирования зубчатого профиля на лазерном станке.

Опорной базой является боковая поверхность зубчатого колеса, а базовым элементом для фиксации углового положения в дальнейших операциях будет служить поверхность шпоночного паза, формируемого одновременно с исполнением отверстия для установки на вал.

При изготовлении зубчатых колес достаточно ощутимой толщины, например, больше 4-5 мм, поверхность реза имеет шероховатость выше нормируемых значений для зубчатых колес. В связи с этим операция формирования зубчатого профиля и отверстия на лазерном станке может приниматься в качестве черновой обработки.

Точность позиционирования деталей для лазерных станков, например TRUMATIC различных модификаций обеспечивает величину $\pm 0,1$ мм, а повторяемость $\pm 0,03$ мм.

Некоторые виды шероховатости поверхности после лазерной резки:

- резко очерченные и глубокие вертикальные линии — свидетельствуют о значительной шероховатости и низком качестве резки;
- мелкие вертикальные узоры — указывают на низкую степень шероховатости и высокое качество резки;
- рифлёная поверхность реза — характеризуется наличием волнистых или зубчатых неровностей вдоль края обработанного материала.

На шероховатость поверхности при лазерной резке металла влияют, например: мощность лазера; скорость резки; тип разрезаемого материала (различные материалы имеют разные свойства, такие как температура плавления, теплопроводность и твёрдость); качество оборудования (старые и плохо настроенные машины имеют менее ровный рез).

Для контроля шероховатости поверхности используют, например:

- визуальный осмотр (простейший, но не всегда достоверный метод);
- тактильные методы (специализированные инструменты, для оценки шероховатости на ощупь);
- профилометра (позволяет измерять микроскопическую шероховатость с высокой точностью).

Для минимизации шероховатости поверхности рекомендуется:

- оптимизировать параметры резки — мощность, скорость, фокусировка и давление газа должны соответствовать толщине и типу материала;
- выбирать правильный вспомогательный газ;
- предварительно нагревать материал — снижает температурный градиент;
- использовать систему управления фокусом;
- обрабатывать кромки после резки — шлифовка, полировка, удаление заусенцев улучшают внешний вид и функциональность деталей.

Современные системы лазерной резки способны оптимизировать параметры в реальном времени, чтобы поддерживать стабильное качество поверхности при изменении толщины и состава материала.

Для чистовой обработки зубчатого профиля при отсутствии шевинговальных и шлифовальных станков для зубчатых колес можно применить станок с ЧПУ для электроэрозионной обработки деталей.

Современные электроэрозионные станки обеспечивают точность размеров $\pm 2-5$ мкм — при чистовой обработке; $\pm 0,5-1$ мкм — при использовании специальных прецизионных режимов.

На точность влияют:

- погрешность базирования заготовки на рабочем столе;

- отклонения при позиционировании исполнительных органов станка;
- непрямолинейность перемещения исполнительных органов;
- погрешности при изготовлении базовых деталей станка;
- величины упругих деформаций (жёсткость) системы;
- колебания температуры окружающей среды в процессе обработки;
- износ электрода-инструмента.

Шероховатость поверхности при электроэрозионной обработке зависит от режима обработки:

- максимальная скорость реза — шероховатость до $Ra \leq 2,5$ мкм.
- средняя скорость реза — шероховатость до $Ra \leq 1,2$ мкм.
- микротоки — шероховатость до $Ra \leq 1$ мкм. Этот режим применяется для получения поверхностей, близких к зеркальным.

Таким образом, использование лазерной черновой резки и электроэрозионной финишной обработки открывает новые возможности для производства и восстановления зубчатых колес с эксцентрично расположенными центральными отверстиями на ремонтных предприятиях с ограниченным оборудованием и малосерийным типом производства.

Список литературы

1. Михайлов А. Н. Схема механической зубчатой КПП с переключением передач без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 230-234. ISSN 2079-2670.
2. Михайлов А.Н. Технологическое обеспечение изменения ГМТ оси вращения колес при переключении передач в КПП без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б., Котляров Б. С. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – Вып. 4 (83). – С. 25-35. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
3. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
4. Антонюк В.Е., Русецкий В.М. “Новые технологии финишной обработки зубчатых колес” // Вестник машиностроения. - 2021. - № 2.

РЕМОНТ, СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

***Чтобы о́жил экскаватор,
Чтоб дробилка ожила́,
Должен мастер-реставратор
В их наведаться тела!
Чтоб они служили долго,
Без напряжения и возни –
Новых свойств и технологий
Добавляют в них НИИ.***

Доц. П.А. Жиганов

УДК 622.799

ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА БУРОВЫХ СТАНКОВ

И.С. Воробьев¹, инженер-конструктор

¹АО «Копейский машзавод», г. Копейск, Челябинская область

При создании отечественной промышленностью буровых станков как высокотехнологичного оборудования с автоматизированными комплексами управления должны оснащаться современными системами мониторинга, обеспечивающими предиктивную диагностику состояния и организацию эффективного обслуживания и ремонта оборудования. Предиктивная диагностика высокотехнологичного оборудования обуславливает необходимость обеспечения коммуникационного взаимодействия различных элементов оборудования с системой мониторинга и прогнозирования характеристик его надежности на определенный плановый период эксплуатации в соответствии с производственной программой.

Ключевые слова: *Предиктивная диагностика, мониторинг технического состояния, ремонт оборудования.*

PREDICTIVE DIAGNOSTICS OF DRILLING RIGS

I.S. Vorobyov

When the domestic industry creates drilling rigs as high-tech equipment with automated control systems, they must be equipped with modern monitoring systems that provide predictive diagnostics of the condition and the organization of effective maintenance and repair of equipment. Predictive diagnostics of high-tech equipment makes it necessary to ensure the communication interaction of various elements of the equipment with a system for monitoring and predicting the characteristics of its reliability for a certain planned period of operation in accordance with the production program.

Keywords: *Predictive diagnostics, technical condition monitoring, equipment repair.*

В современном горном предприятии процессы буровых работ требуют постоянного совершенствования технологических процессов, направленных на повышение эффективности и надежности буровых станков. Одним из перспективных инструментов достижения данной цели является внедрение предиктивной диагностики – метода, основанного на постоянном мониторинге состояния оборудования и прогнозировании возможных отказов. Эта технология позволяет оперативно выявлять потенциально опасные ситуации и проводить профилактические мероприятия, сокращая простой оборудования и повышая экономическую отдачу от буровых работ /1/.

Цель – изучить современные методы предиктивной диагностики буровых станков и оценить их влияние на улучшение технико-экономических показателей бурения. Задачи включают:

- изучение существующих методов диагностики и прогнозирования технического состояния буровых станков;
- анализ опыта внедрения предиктивной диагностики в России;
- определение экономических эффектов от использования предиктивной диагностики;
- обобщение полученных данных и выработка практических рекомендаций.

Методы диагностики и прогнозирования технического состояния буровых станков:

Традиционные методы диагностики. До появления предиктивной аналитики основными методами диагностики были регулярные осмотры и проверки оборудования, проводившиеся вручную специалистами. Однако эти методы имели существенные недостатки: низкая оперативность обнаружения неисправностей, невозможность точного прогнозирования сроков замены комплектующих и высокий риск внезапных отказов оборудования /2-4/.

Преимущества предиктивной диагностики. Предиктивная диагностика основана на постоянном мониторинге параметров работы оборудования через систему датчиков и обработке собранных данных с применением методов искусственного интеллекта. К основным преимуществам относятся: раннее выявление признаков износа и повреждения оборудования; возможность проведения профилактических мероприятий до наступления отказа; оптимизация расходов на техническое обслуживание и ремонт; увеличение продолжительности межремонтных циклов; минимизация риска аварий и травматизма персонала /5-6/.

Принципы построения предиктивной модели. Для разработки предиктивной модели используется следующая последовательность действий /7-8/:

- 1) сбор исходных данных о функционировании оборудования (температура, нагрузка, вибрация);
- 2) построение математической модели поведения оборудования под нагрузкой;
- 3) создание базы знаний на основе накопленного опыта эксплуатации аналогичных объектов;
- 4) постоянный мониторинг текущих значений параметров и сравнение их с эталонными показателями;
- 5) прогнозирование вероятности отказа оборудования и определение момента необходимости профилактики.

Опыт внедрения предиктивной диагностики в России.

Пример АО «Кольская ГМК» («Норникель»). В 2023 году совместно с технологической группой «Рексофт» запустила проект «Предиктивная диагностика и контроль эксплуатации техники СДО» (самоходного дизельного оборудования). Система использует комплексную телеметрию от агрегатов и узлов, анализ масел и рабочих жидкостей, а также ретроспективные данные о причинах поломок. Алгоритмы ИИ обрабатывают данные телеметрии и строят предиктивные модели отказов узлов и агрегатов.

Восточная горнорудная компания (ВГК). Внедряла сервис предиктивной диагностики G-Lab от «Газпромнефть-СМ». Сервис на основе ИИ анализирует состояние работающего масла и прогнозирует техническое состояние оборудования. Это позволяет определять износ агрегатов техники без остановки производственного процесса. Пробы масла берутся мобильным комплексом прямо на месте работы техники (например, на Солнцевском угольном разрезе).

Пример АО «СУЭК». Система VG Diagnostics компании АО «ВИСТ Групп» внедрена на двух предприятиях АО «СУЭК»: Восточно-Бейском и Тугнуйском угольных разрезах. В результате получено снижение количества аварий, вызванных поломками техники и снижение затрат на ремонт узлов и агрегатов за счет раннего выявления возникновения дефектов.

Экономические аспекты предиктивной диагностики.

Снижение аварийности и простоев. Использование предиктивной диагностики позволяет снизить аварийность на 40–60%. Это достигается благодаря раннему обнаружению критических отклонений и проведению профилактических мер до наступления аварийной ситуации. Также увеличивается межремонтный интервал на 20–30%, что приводит к существенной экономии ресурсов.

Сокращение затрат на ремонт. Переход от планово-предупредительного ремонта к предиктивному техническому обслуживанию позволяет экономить значительные средства. Ремонт производится только тогда, когда алгоритм прогнозирует возможный отказ, что исключает проведение ненужных проверок и замен.

Перспективы развития и вызовы внедрения предиктивной диагностики /9/.

Технологические перспективы. Развитие технологий искусственного интеллекта и интернета вещей позволит создать полностью интегрированные системы мониторинга и диагностики буровых станков. Появляются цифровые двойники оборудования, позволяющие моделировать его поведение в разных условиях и прогнозировать износ компонентов.

Вызовы внедрения. Несмотря на очевидную пользу, внедрение предиктивной диагностики сталкивается со следующими вызовами: высокие первоначальные инвестиции в инфраструктуру и программное обеспечение; необходимость подготовки квалифицированного персонала для работы с новыми технологиями; сложность интеграции разнородных информационных систем и стандартов передачи данных.

Выводы. Предиктивная диагностика буровых станков является перспективным инструментом повышения эффективности и безопасности буровых работ. Её внедрение позволяет существенно снизить аварийность, продлить срок службы оборудования и сэкономить ресурсы. Несмотря на некоторые трудности, связанные с внедрением новой технологии, экономические выгоды оправдывают вложенные средства. Дальнейшее развитие технологий искусственного интеллекта и интернет-вещей откроют дополнительные возможности для оптимизации процессов бурения и повышения общей рентабельности деятельности компаний.

Список литературы

1. [Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Tekhnosfera. \(2016\)](#)
2. [Использование искусственного интеллекта для оптимизации бурения и снижения затрат. <https://r-oil.ru/ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-dlya-optimizatsii-protssesa-bureniya-i-snizheniya-zatrat/>](https://r-oil.ru/ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-dlya-optimizatsii-protssesa-bureniya-i-snizheniya-zatrat/)

3. Интеллектуальные системы мониторинга буровых установок.
<https://rosstip.ru/news/9547-intellektualnye-sistemy-monitoringa-burovykh-ustanovok-sovremennye-resheniya-i-prakticheskaya-effektivnost>
4. Влияние искусственного интеллекта на оптимизацию бурения и снижение затрат нефтегазовой добычи. <https://r-oil.ru/vliyanie-iskusstvennogo-intellekta-na-optimizatsiyu-bureniya-i-snizhenie-zatrat-v-neftegazovoy-dobyche/>
5. Nabors и Corva вводят в эксплуатацию автоматизированное цифровое решение Predictive Drilling. <https://neftegaz.ru/news/drill/793375-nabors-i-corva-vvodyat-v-ekspluatatsiyu-avtomatizirovannoe-tsifrovoe-reshenie-predictive-drilling/>
6. Эффективность методов сравнительной оценки функционирования буровых станков.
<https://science-education.ru/en/article/view?id=7924> (2026)
7. Цифровизация в ремонте бурового оборудования. <https://rosstip.ru/news/9299-tsifrovizatsiya-v-remonte-burovogo-oborudovaniya-kak-prediktivnaya-analitika-snizhaet-prostoi-i-raskhody> (2026)
8. Современные методы диагностики датчиков бурового оборудования.
<https://rosstip.ru/news/8387-sovremennye-metody-diagnostiki-datchikov-burovogo-oborudovaniya-ot-vibroanaliza-do-prediktivnoj-analitiki> (2026)
9. Предиктивная аналитика в промышленности.
<https://techforward.ru/news/prediktivnaya-analitika-v-promyshlennosti> (2026)

УДК 621.879.323

РЕМОНТНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭКСКАВАТОРАМ-ДРАГЛАЙНАМ В СЛУЧАЕ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЦАПФЫ

В.С. Ефремов¹, аспирант,

Научный руководитель: **К.А. Ананьев¹**, к.т.н, доцент

¹ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени
Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Россия

В статье рассматривается трудоемкость технологических процессов при постановке экскаваторов ЭШ-10.70А в ремонтное положение в случае выхода из строя узла опорно-поворотного устройства, в том числе центральной цапфы. Рассмотрены схема и технологическая карта на установку экскаватора в ремонтное положение. Представлена таблица трудоемкости выполнения капитального ремонта экскаваторов ЭШ-10.70А (ЭШ 13.50) и ЭШ-11.70, а также приведено общегодовое время работ по ремонту и замене опорно-поворотного устройства, в том числе центральной цапфы.

Ключевые слова: опорно-поворотное устройство (ОПУ), экскаваторы-драглайны, нормы времени на капитальный ремонт, схема ремонтного положения, технологическая карта, центральная цапфа.

REPAIR WORK ON DRAGLINE EXCAVATORS IN THE EVENT OF CENTRAL JUNCTION FAILURE

V.S. Efremov, K.A. Ananyev

This article examines the labor intensity of the processes involved in setting up ESh-10.70A excavators for repair in the event of a slewing ring failure, including the center journal. A diagram of the excavator's repair position and a process chart for setting the excavator in the repair position are presented. A labor intensity table for performing major repairs on ESh-10.70A (ESh 13.50) and ESh-11.70 excavators is presented, along with the total annual time required for repairing and replacing the slewing ring, including the center journal.

Keywords: slewing bearing device (SBD), dragline excavators, time standards for major repairs, diagram of the excavator repair position, process chart for installing, central trunnion.

При наличии в опорно-поворотном устройстве (ОПУ) центральной цапфы ей передаются функции восприятия горизонтальных усилий и моментов, а также сил, отрывающих платформу от опорного круга [1]. Выход из строя этого узла повлечет необходимость срочной его замены.

Демонтаж и разборка механизмов и устройств экскаватора – самый трудоемкий (до 41 % общей трудоемкости) и технически насыщенный процесс из всего технологического процесса ремонта [2].

Используя упрощенные оценочные критерии при характеристике процесса ремонта (средняя, высокая, наивысшая), в сравнение с другими процессами, можно дать следующие оценки: Трудоемкость – наивысшая. Потребность в средствах диагностики – высокая. Технологическая оснащенность – наивысшая (значительно выше, чем при монтаже). Требования к технике безопасности – высокие (наибольший риск нарушений по безопасности труда: работа на значительной высоте, многоэтажность зон демонтажа, сложность строповки и центровки крупногабаритных узлов, ограниченность рабочего пространства; сочетание вынужденных газорезательных работ со слесарно-демонтажными; одновременное нахождение

слесарей-ремонтников более трех в одной зоне). Требования к ремонтной площадке – высокие (выше, чем при ремонте экскаваторов-мехлопат). Квалификация ремонтного персонала – выше средней, что определяет и уровень подготовки специалистов по управлению ремонтом.

Схема ремонтного положения экскаватора ЭШ 10.70А приведена на рисунке 1.

Технологическая карта на установку экскаватора ЭШ 10.70А в ремонтное положение (рисунок 1) как типового представителя экскаваторов с механическим и гидравлическим приводом шагания представлена ниже.

1. Установить экскаватор на ремонтной площадке в исходное положение.

2. Уложить ковш на грунт справа от стрелы и отсоединить его от упряжи.

3. Отсоединить подъемные и тяговые канаты от коушей упряжи.

4. С помощью механизма установки барабанов отключить левый подъемный барабан главной лебедки. Распустить канат вспомогательной лебедки и соединить его с подъемным канатом. Обеспечив натяжение канатов, смотать канат с барабана и отсоединить конец каната от вспомогательной лебедки. Включить подъемный барабан на разматывание и через люк в поворотной платформе смотать канат на специальный приводной барабан. То же проделать с левым барабаном (правый отключить). Раскрепить концы канатов.

5. Включить тяговые барабаны на разматывание и поочередно смотать канаты на специальные приводные барабаны (радиус перегиба каната должен быть не менее $12d$, где d – диаметр в мм). Раскрепить концы канатов.

6. Снять нижний колпак блоков наводки.

7. Отвернуть гайку нижней цапфы обоймы и снять упорный подшипник.

8. Застропить поочередно блоки наводки, раскрепить подшипник и с помощью вспомогательной лебедки грузоподъемностью 5 т или крана снять их.

9. Снять хомут центральной цапфы.

10. Установить по углам поворотной платформы подставки 1 и 4/

11. Отсоединить захваты от поворотной платформы и, поддерживая их мостовым краном, опустить на грунт. 12. Подложить под каждую лыжу деревянные брусья высотой ~250 мм. 13. Перевести мостовой кран в крайнее заднее положение и подвесить груз массой 8 т.

14. Включить механизм шагания, лыжи перевести в переднее положение III, произвести подъем экскаватора и с помощью бульдозера установить под поворотную платформу передние подставки 4. Перевести лыжи в положение IV. Произвести подъем. Под контргруз поворотной платформы таким же образом подвести задние подставки 1.

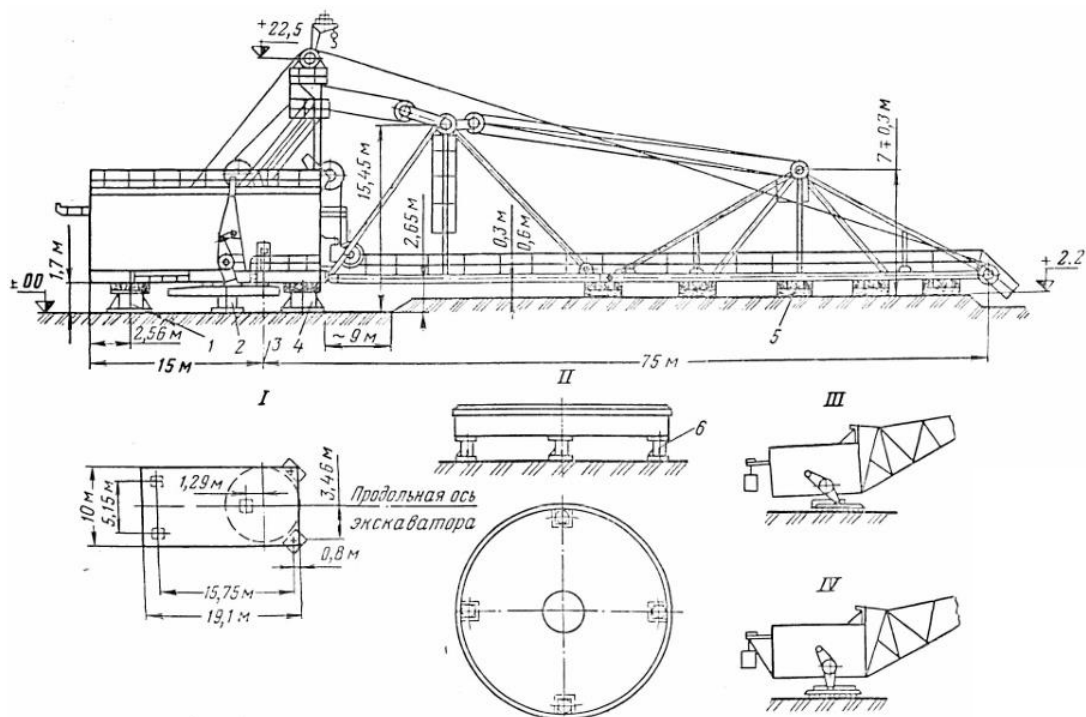


Рисунок 1. Схема ремонтного положения экскаватора ЭШ 10 70А

1, 2, 4, 6 – подставки; 3 – ось центральной цапфы; 5 – шпальная клетка;
 I – положение подставок под поворотной платформой в плане; II – положение базы на подставках; III и IV – положения экскаватора на разных этапах подъема

15. Выложить под лыжи еще ряд брусьев и произвести подъем (см. положение III). Выложить ряд шпал между поворотной платформой и передними подставками. Перевести лыжи в положение IV и произвести подъем. Выложить ряд шпал между задними подставками и поворотной платформой.

16. Повторяя положения III и IV, произвести окончательный подъем поворотной платформы высоту 480 – 520 мм. Подложить дополнительный ряд шпал между поворотной платформой и подставками. Местные зазоры выбрать металлическими прокладками. Подвести среднюю подставку 2.

17. Перевести стрелу на полиспадную подвеску, натянуть стреловой лебедкой канаты полиспаста, чтобы серьги можно было свободно снять с оси; раскрепить и снять хомуты; с помощью консольного крана поочередно высвободить один конец средней серьги от оси (другой конец серьги закреплен на передней оси); включить стреловую лебедку и осторожно опустить стрелу на опоры в виде шпал (9 опор). Шпалы должны быть установлены под каждый стыковой узел нижнего пояса стрелы. С помощью шпал обеспечить надежную опору конструкции стрелы на подставки.

18. Отсоединить механизм возврата лыж от ноги шагания и снять канаты.

19. Раскрепить и снять полукрышки крепления шаровой опоры ноги с лыж. Включить механизм шагания и вывести шаровые опоры из подпятников лыж.

20. Застропить и с помощью бульдозера поочередно переместить лыжи на отведенное для ремонта место. Масса лыжи 9880 кг.

21. Экскаватор обесточить. Мостовой кран и вспомогательную лебедку перевести на вспомогательное электроснабжение.

22. Раскрепить центральную цапфу, застропить за два рым-болта М36 и удерживать ее мостовым краном до окончания демонтажа базы. Масса цапфы 2217 кг.

23. Застропить и с помощью бульдозера переместить базу из-под поворотной платформы в сторону.

В таблице 1 приведена трудоемкость выполнения капитального ремонта экскаваторов ЭШ-10.70А (ЭШ 13.50) и ЭШ-11.70 с расшифровкой по узлам и сборочным единицам.

Таблица 1

**Нормы времени на капитальный ремонт экскаваторов
ЭШ-10.70А (ЭШ-13.50) и ЭШ-11/70**

Содержание ремонта	Трудоем- кость, чел.-ч
Подготовительные работы. Подготовить ремонтную площадку. Установить экскаватор в ремонтное положение. Очистить наружную поверхность. Отсоединить ковш с упряжью. Распасовать и смотать канат	414,5
Центральная цапфа. Снять, разобрать, промыть. Восстановить шейки центральной цапфы и центрального стакана. Заменить дефектные втулки, хомуты. Собрать, покрасить, установить и отрегулировать зазоры	63,1
Опорная рама. Поднять и установить на подставки, очистить, промыть. Восстановить заклепочные соединения. Заварить трещины верхнего листа и наружного пояса с частичной заменой перегородок, сварных швов секций опорной рамы. Установить ребра жесткости к деформированным перегородкам. Заменить дефектные стыковые накладки, листы участков козырька и наружного пояса	926,9
В целом по экскаватору. Подвести базу, установить центральную цапфу, опустить поворотную платформу. Запасовать канаты. Смазать все механизмы, заправить жидкой смазкой. Установить лыжи, подсоединить ковш. Покрасить, восстановить надписи. Отрегулировать и испытать все механизмы экскаватора вхолостую и под нагрузкой	720,8

Данные таблицы свидетельствуют о том, что работы по ремонту и замене опорно-поворотного устройства, в том числе центральной цапфы составляют 30 % от общегодового времени /3/.

Список литературы

1. Подэрни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых горных работ / Р.Ю. Подэрни. – Москва: Недра, 1985. – 544 с.
2. Бубновский Б. И., Ефимов В. Н., Морозов В. И. - Ремонт шагающих экскаваторов: Справочник. — М.: Недра, 1991. — 347 с.
3. Лагунова Ю.А., Вяткин А.В., Ищенко Б.М. Опыт эксплуатации опорной базы шагающих драглайнов // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 1. С. 7-10.

УДК 621.643.3

ОПЫТ ЗАРУБЕЖНЫХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ОБСЛУЖИВАНИИ РУКАВОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

К.А. Ананьев¹, - канд. техн. наук, доцент, **О.В. Долбня¹**, - ассистент,
С.А. Гордин¹- ассистент

¹ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический
университет им. Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово, РФ

В работе проанализированы зарубежные практики применения различных ремонтных комплексов, показано, что такие комплексы обеспечивают оперативный ремонт оборудования на месте эксплуатации, снижая время простоев и затраты. Особое внимание уделяется превентивному техническому обслуживанию, применению качественных материалов и внедрению цифровых систем учета и управления запасами.

Ключевые слова: мобильные ремонтные комплексы, рукава высокого давления, техническое обслуживание, надежность оборудования.

EXPERIENCE OF FOREIGN MINING ENTERPRISES IN THE MAINTENANCE OF HIGH-PRESSURE HOSES

K.A. Ananyev, O.V. Dolbnya, S.A. Gordin

The paper analyzes international practices in the use of various repair complexes and demonstrates that such systems enable prompt on-site equipment repair, reducing downtime and operating costs. Particular attention is paid to preventive maintenance, the use of high-quality materials, and the implementation of digital inventory tracking and management systems.

Keywords: mobile repair complexes, high-pressure hoses, maintenance, equipment reliability.

На надежность мобильной горной техники влияют как технологические факторы, так и организационные факторы. Если технологическими факторами управлять практически невозможно, то организационные факторы как раз могут и должны стать рычагом управления уровнем надежности оборудования на предприятии. В ряде работ [1, 2] установлено, что значительная часть простоев техники связана с отказом РВД. В данной работе проведен обзор мирового опыта по снижению времени простоев по причине отказов РВД.

Мобильные ремонтные комплексы. Комплексы можно разделить на мобильные ремонтные комплексы на колесах и передвижные ремонтные комплексы.

Первая категория представляет собой специально оборудованные автомобили или прицепы, вторая – контейнеры, которые можно перевозить с одного места на другое при перемещении фронта ведения работ.

Примером мобильных ремонтных комплексов на колесах служат решения ВОА Hydraulics, применяемые в Австралии, Новой Зеландии [3]. ВОА Hydraulics разработали ВОАpod – мобильную вездеходную установку-прицеп для изготовления РВД на месте эксплуатации оборудования (рисунок 1). Компания использует гидравлическую систему управления шлангами ВОА для учета запасов внутри прицепа. В прицепе размещен большой шкаф для деталей со сканируемыми штрих-кодами, что позволяет заказывать запасные части через приложение ВОАhub одним нажатием кнопки.

Передвижной цех по ремонту и техническому обслуживанию шлангов оснащен европейским высокоточным обжимным и режущим оборудованием, подходящим для любых условий эксплуатации. В комплект также входит широкий ассортимент качественных шлангов и фитингов, что делает его универсальным мобильным пунктом ремонта шлангов. Для автономности работы на крыше прицепа установлены солнечные батареи.



Рис.1. Мобильная установка для ремонта и обслуживания гидравлического оборудования ВОАрод

Подобные решения, созданные на различных платформах, есть и у других производителей. На рисунке 2 показано решение BASIN UPFITTING на базе фургона [4].



Рис.2. Мобильная установка для ремонта, и производства гидравлических рукавов BASIN UPFITTING и Hydroscand

Мобильная мастерская для ремонта и производства гидравлических рукавов имеется и у Hydroscand. Данные комплексы представлены не только за рубежом, но и в России. Hydroscand также предлагает систему менеджмента РВД TrackingCode, она позволяет полностью контролировать РВД – от установки до осмотра, замены и документирования.

Также компания Allswage производит мобильные мастерские на базе пикапа [5]. У пикапа небольшая вместимость, однако его цель – сервис удаленных и находящихся в труднодоступных местах объектов. У Allswage есть решения мобильных мастерских на базе прицепов и фургон-ов похожие на уже рассмотренные решения.

Передвижные ремонтные комплексы. Передвижные ремонтные комплексы представляют собой контейнеры. Они отличаются от мобильных систем большими размерами, где может храниться РВД широкой номен-

клатуры. При необходимости контейнеры могут быть перевезены в другое место ближе к месту эксплуатации обслуживаемого оборудования. На рисунке 3 показан контейнер, оснащенный шлангами, фитингами и инструментами Danfoss [6].



Рис.3. Мастерская по сборке РВД Danfoss

Мобильные мастерские Danfoss по сборке шлангов на месте эксплуатации представляют собой полностью оборудованные 20-футовые или 40-футовые контейнеры, укомплектованные необходимыми шлангами, фитингами и инструментами Danfoss, соответствующими потребностям рабочей площадки. Эти мастерские позволяют осуществлять сборку и ремонт шлангов на месте круглосуточно, семь дней в неделю, минимизируя время простоя оборудования и связанные с этим затраты.

Мобильные ремонтные мастерские Motion Fluid Power Solutions (FPS) обеспечивают оперативный ремонт и замену шлангов на месте, минимизируя время простоя и гарантируя непрерывность работы для клиентов из горнодобывающей отрасли [7].

Аналогичные решения предлагает WesTrac, успешно реализованные в компании Bengalla Mining Company (Австралия), DJ и JA Brooker, Thiess [8]. При большом объеме обслуживаемой техники WesTrac монтирует сборные модули складских и рабочих помещений из контейнеров (рисунок 4).

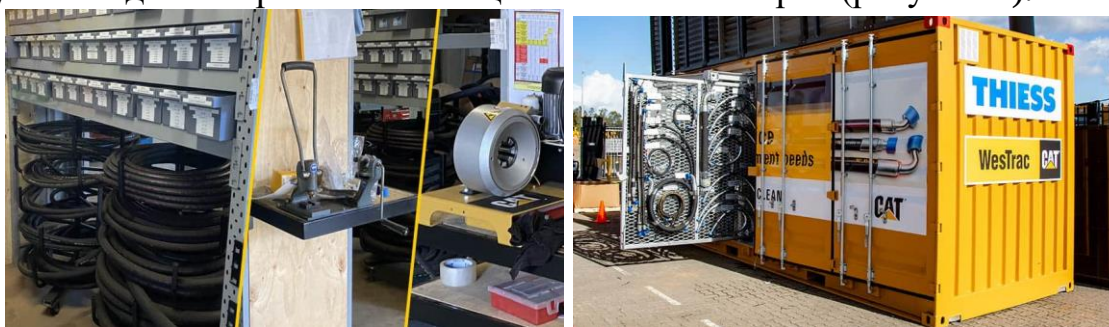


Рис.4. Решение WesTrac

Также WesTrac предлагает доступ к гидравлической информационной системе Cat (HIS) для идентификации и заказа запчастей. HIS действует как поисковая система для гидравлических шлангов, помогая планировать ресурсы, необходимые для заказа и производства шлангов по требованию.

Вывод. Анализ зарубежных практик по повышению надежности РВД показал, что для быстрого восстановления работоспособности оборудования при отказе РВД применяют мобильные ремонтные комплексы либо самоходные, либо на базе контейнеров, в совокупности с цифровым управ-

лением запасами (например, через мобильные приложения) и документацией РВД с маркировкой штрих-кодами, QR-кодами и др.

Список литературы

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ГРУПП ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Россия, Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Горная книга», 2021. № 7. С. 96–112.
2. Исследование характера эксплуатационных отказов рукавов высокого давления на эффективность работы машин фирмы Джон Дир в условиях Вологодской области // Лесной вестник / Forestry bulletin. Россия, Мытищи: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана», 2010. № 5. С. 90–94.
3. Hydraulic Hose Repair | BOA Hydraulics [Электронный ресурс]. – URL: <https://boahydraulics.com/> (дата обращения: 19.02.2026).
4. Upfitting B. Building a Mobile Hose Repair Van [Электронный ресурс] // Basin Upfitting. 2025. URL: <https://www.basinupfitting.com/post/building-a-mobile-hose-repair-van> (дата обращения: 20.02.2026).
5. Spencer J. Allswage Mobile Hose Repair Truck / J. Spencer. – 2024.
6. Выездной цех по сборке шлангов | Danfoss [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.danfoss.com/en/campaigns/dps/on-site-hose-assembly-workshop/#tab-overview> (дата обращения: 20.02.2026).
7. Lloyd J. Hydraulic repairs on demand / J. Lloyd. – 2026.
8. Chris.gander@westrac.com.au. WesTrac's on-site hose solution sets Glencore up for the future / chris.gander@westrac.com.au. – 2025.

УДК 622.002.05

РЕГЛАМЕНТАЦИЯ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Л.И. Андреева¹, гл. науч. сотр. д.т.н., Т.И. Красникова², науч. сотр., к.т.н.

¹Челябинский филиал Института горного дела УрО РАН, г. Челябинск, РФ

²ООО «Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства (ООО «НИИОГР»)), г. Челябинск, РФ

В статье рассмотрены подходы к регламентации системы организации и технологии ремонтного обслуживания ГТО, применение которых позволит сократить время обслуживания и ремонта горных машин и оборудования, снизить трудозатраты, обеспечить безопасные условия труда персонала и произвести ремонт по приемлемой стоимости.

Ключевые слова: регламентация, система организации и технологии ремонтного обслуживания, регламент, проект организации работ (ПОР), производственные площади, ремонтный персонал

REGULATION OF THE SYSTEM OF ORGANIZATION AND TECHNOLOGY OF REPAIR MAINTENANCE

L.I. Andreeva, T.I. Krasnikova

The article examines approaches to regulating the system of organization and technology of repair and maintenance of mining equipment, the application of which will reduce the time of maintenance and repair of mining machines and equipment, reduce labor costs, ensure safe working conditions for personnel and carry out repairs at an affordable cost.

Keywords: regulations, system of organization and technology of repair maintenance, regulations, work organization project (WOP), production areas, repair personnel

Регламентация организации и технологии ремонтного обслуживания обусловлена необходимостью формирования эффективной производственной деятельности ремонтных участков горнодобывающего предприятия (ГДП), основанной на стандартизации ремонтных работ и обеспечении работоспособности техники в заданном режиме /1-3/.

Одним из значимых этапов в процессе регламентации системы организации и технологии ремонтного обслуживания является комплектация состояния ремонтных мощностей, который включает в себя ряд следующих задач:

- определение состояния и возможностей ремонтных мощностей;
- разработка регламента размещения и перемещения узлов, агрегатов для производства ремонта ГТО в ремонтных зонах;
- разработка и согласование Положения о ремонтном фонде (оборотный и обменный фонды);
- разработка и согласование компоновки ремонтной зоны (коммуникации, станки, ГПМ, бытовки, места хранения инструмента, средства пожаротушения и т.д.).

Решение задач по определению состояния и возможностей ремонтных мощностей позволяет определить резервы ремонтных площадей (рис.1).

ПЛАНИРУЕТСЯ РЕОРГАНИЗОВАТЬ	ПЛАНИРУЕТСЯ ОРГАНИЗОВАТЬ
УЧАСТОК МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ Нерациональное размещение и перемещение изготавливаемых и ремонтируемых узлов и деталей по участкам	
УЧАСТОК ПО РЕМОНТУ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРОВ И НАСОСОВ Проходы для персонала находятся в непосредственной близости от узлов и деталей, что не соответствует мерам безопасности и нормам технологического проектирования в части размещения проходов в ремонтной зоне (фото №6)	
 Фото №6	Совершенствовать логистику технологического процесса (приемка в ремонт – ремонт – готовая продукция) (фото №3)  Фото №1

Рис. 1 Состояние и возможности ремонтных площадей ЦР и ТО МО

Решение задач по разработке регламента размещения и перемещения узлов, агрегатов для производства ремонта ГТО в ремонтных зонах позволит разместить логистические потоки ремонтируемых и изготавливаемых узлов горной техники и оборудования, контролировать последовательность технологического процесса, учитывать время его выполнения и обеспечить соответствие мерам безопасности и нормам технологического проектирования.

Разработка и согласование компоновки ремонтной зоны (коммуникации, станки, ГПМ, бытовки, места хранения инструмента, средства пожаротушения и т.д.) позволят организовать эффективное планирование и контроль материальных и информационных потоков, а так же соответствующие меры безопасности при работе и перемещении персонала по участку, цеху (рис. 2).

Для реализации поставленных задач требуется разработка Проекта организации работ (ПОР) – документа, регламентирующего организацию и технологию ремонтного обслуживания всех видов основного технологического оборудования.

В состав Проекта организации работ входит компоновка ремонтной зоны, описание производимых работ, регламентация процессов организации и технологии ремонтного обслуживания горной техники и оборудования, взаимодействие подразделений, зоны ответственности участников процесса, техническая и технологическая документация на ремонтируемые детали, узлы и агрегаты, рекомендации по использованию технологиче-

ских стандартов (карт) с учетом мер безопасности при проведении ремонтных работ.

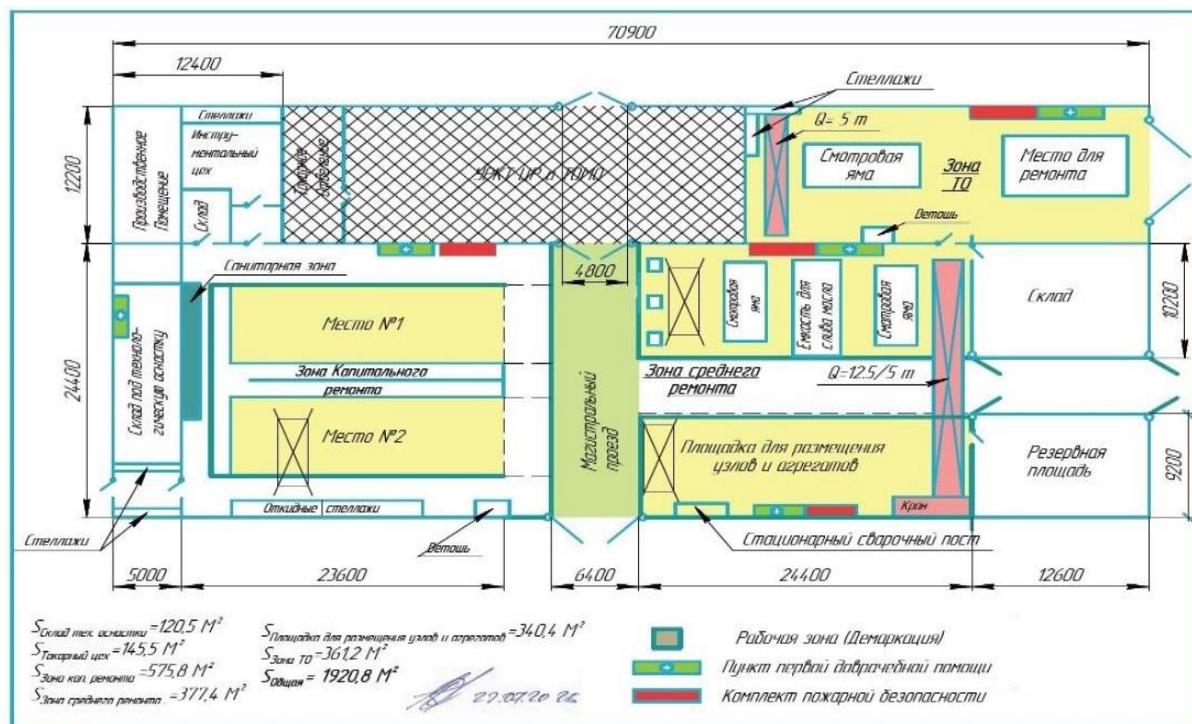


Рис. 2 Компоновка ремонтных площадей участка ТБУ

Изучение и проработка нормативных документов (Положений о ППР; Руководящих документов (РД) в сфере безопасности; норм технологического проектирования в черной металлургии, цветной металлургии, угольной промышленности, строительной индустрии; Руководств на ремонты горной техники и т.д.), позволило предложить предприятию Проект организации работ регламентации процессов организации и технологии ремонтного обслуживания ГТО (рис.3).

Ключевыми задачами оперативного управления процессом организации и технологии ремонтного обслуживания ГТО обозначены:

- систематический контроль хода выполнения работ;
- передача по каналам связи оперативной информации, ее обработка;
- анализ отклонений от исходного плана, корректировка;
- составление оперативно календарных план-графиков, разработка организационных и технико-технологических мероприятий.

Совместно с руководителем участка одного из предприятий разработан Проект организации работ на участке ремонта тракторно-бульдозерной техники (ТБУ) представлен на рисунке 4.

Для ремонтных участков предприятия разработаны рекомендации по комплектации ремонтных зон участка, по рациональной расстановки персонала по рабочим местам с учетом совмещения профессий, переданы необходимые формы эксплуатационной документации, рекомендации по применению технологических и организационных регламентов, с учетом возможностей повышения безопасности труда ремонтного персонала.

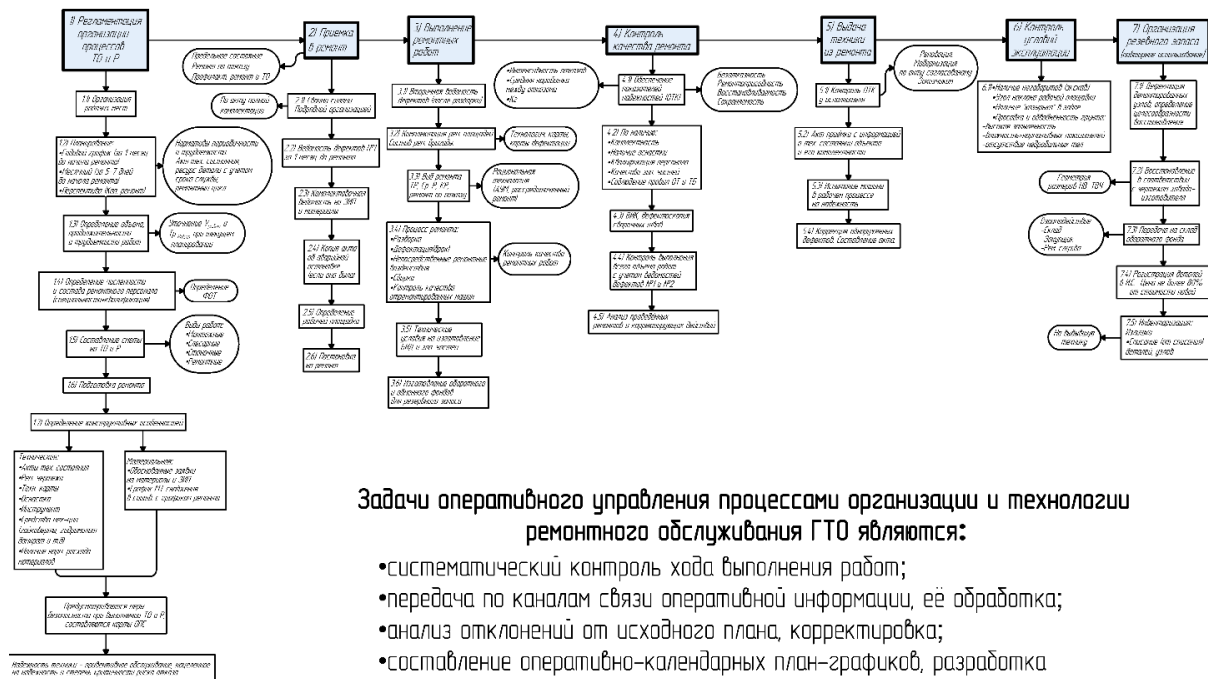


Рис.3 Регламентация процессов организации и технологии ремонтного обслуживания ГТО (ППР, ГОСТ 24.002-2015) по нормативам (черная металлургия, цветные металлы, угольная промышленность, строительная промышленность)

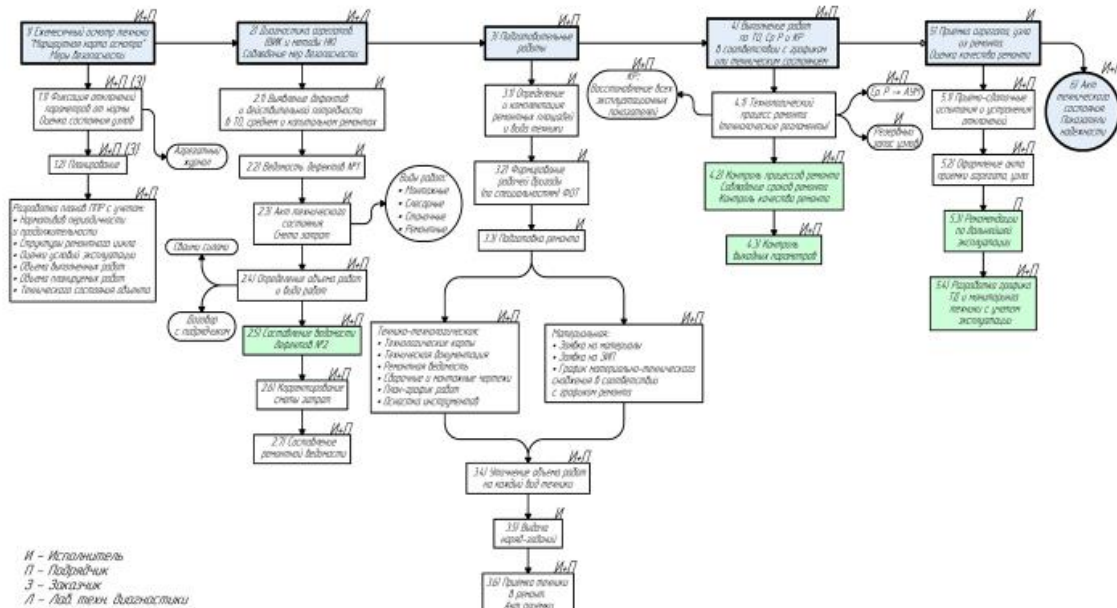


Рис.4 Регламентация процессов организации и технологии ремонтного обслуживания ТБУ

Таким образом, разработка Проект организации работ позволит предприятиям рационально делать расстановку оборудования и станков, экономить время на перемещении персонала и целесообразно расходовать ресурсы.

Список литературы

1. Андреева Л.И. Методология формирования технического сервиса горнотранспортного оборудования на угледобывающем предприятии: дис. докт. техн. наук. / Л.И. Андреева - Екатеринбург, 2004. 297 с.
2. Андреева Л.И., Красникова Т.И. Рекомендации по совершенствованию технологии

ремонтного обслуживания горной техники // Сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека». – 2022. – С.292

З. Сушко А.Е., Быков Д.В., Лагунова Ю.А. Комплексная оценка технического состояния технологического оборудования / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2025. С. 413-417.

УДК 621.271.022

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

В. С. Великанов¹,

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

По статистическим данным парк грузоподъемных машин значительно постарел и к настоящему времени около 80 % грузоподъемных машин выработали нормативный срок службы. Число аварий и несчастных случаев при эксплуатации грузоподъемных машин носит достаточно устойчивый характер, а в ряде случаев и возрастает. В каждом из элементов конструкции ГПМ проявляются свои определенные виды дефектов. При этом, чем сложнее конструкция, тем большее количество различных видов дефектов в ней возникает. Представлены результаты систематизации данных по дефектам мостовых угольных перегружателей и козловых кранов, полученных в ходе технического диагностирования. Описаны часто встречающиеся в практике обследований дефекты и повреждения, отмечены вероятные причины их возникновения.

Ключевые слова: конструкция, перегружатель, дефект, диагностика.

ANALYSIS THE RESULTS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS BRIDGE LOADERS

V. S. Velikanov

According to statistics, the lifting equipment fleet has aged significantly, with approximately 80 % of lifting equipment having reached the end of its service life. The number of accidents and incidents during the operation of lifting equipment remains fairly stable, and in some cases, is even increasing. Each element of the lifting equipment's design exhibits specific types of defects. Moreover, the more complex the design, the greater the number of different defects it encounters. This paper presents the results of systematizing data on defects in overhead coal handlers and gantry cranes, obtained during technical diagnostics. The most frequently encountered defects and damages are described, along with the most likely causes of their occurrence.

Keywords: design, loader, defect, diagnostics

В «Программе развития угольной отрасли на период до 2035 г.» декларируется, что объемы добычи угля достигнут 668 млн. т в 2035 году. Открытым способом на момент окончания программы планируется осуществлять добычу на уровне 80–83 % или 390–554 млн. т, при среднегодовой мощности разреза 4 млн. т [1]. По состоянию на январь 2024 добычу угля в РФ осуществляли 179 угольных предприятия, в том числе 52 шахты и 127 разрезов [1], вместе с тем половина коксующегося угля (42,3 млн. т в

2020 г.) добывается подземным способом, часто в сложных горно-геологических условиях [1-9].

В силу технологических особенностей работ на угольных складах широко используются угольные перегружатели.

В отчете экспертной организации MRFR объем рынка козловых кранов на рельсовом ходу оценивался в 29,20 млрд. долл. в 2024 году, предполагается, что динамика рынка выйдет на отметку с 30,63 млрд. долл. в 2025 году до 47,20 млрд. долл. к 2034 году (рис.) [9].

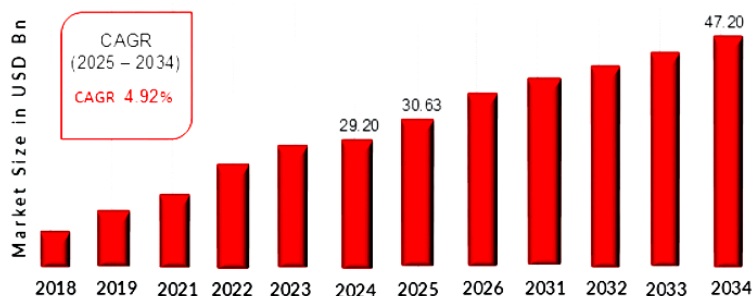
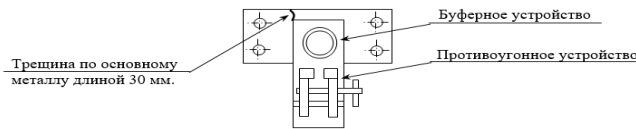
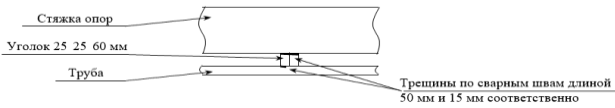


Рис. Динамика рынка козловых кранов [9]

По данным Ростехнадзора России парк грузоподъемных машин (ГПМ) значительно постарел и к настоящему времени около 80 % ГПМ выработали нормативный срок службы. В каждом из элементов конструкции ГПМ возникают свои определенные виды дефектов. При этом, чем сложнее конструкция, тем большее количество различных видов дефектов в ней возникает (табл.).

Таблица. Некоторые виды дефектов кранов и перегружателей (данные представлены ООО «СпецРемНаладка»)

Наименование узла элемента	Описание дефекта	Фото/эскиз дефекта	Количество дефектов на 20 кранов
Стойка с ведущей ходовой тележкой	Трещины длиной до 50 мм по сварным швам крепления трех боковых ребер (обе стороны тележки) жесткости к фланцу соединения тележки со стойкой опоры крана.		12
Стяжка жестких опор.	Деформация выше допуска вертикального и горизонтального соединительных листов стяжки опор, опорного элемента на случай поломки колес и осей ходовых колес, около ведущей ходовой тележки.		4

	Опорный элемент – П-образный профиль 60 х 70 мм длиной 400 мм, толщиной 8 мм., вертикальный лист 480 х 460 толщиной 6 мм, горизонтальный лист 400 х 150 толщиной 6 мм. См. разрез А – А		
Механизм передвижения крана	Трещина по основному металлу длиной 30мм и деформация 30мм узла крепления противоугонного и буферного устройств, вследствие движения крана с установленным в рабочее положение захватом. Толщина листа $\delta = 16$ мм.	 Трещина по основному металлу длиной 30 мм. Буферное устройство Противоугонное устройство	6
Стяжка первой и второй опор.	Трещины по сварным швам общей длиной 65мм на стыке крепления кронштейна (уголка), крепящего трубу с кабелями токоподвода к механизму передвижения крана со стороны консоли, на стяжке соединяющей первую и вторую опоры.	 Стяжка опор Уголок 25 25 60 мм Труба Трещины по сварным швам длиной 50 мм и 15 мм соответственно	9

Обработаны результаты обследования козловых кранов и мостовых перегружателей в результате чего определено, что в обследованных ГПМ около 60–70 % дефектов составляют дефекты металлоконструкций и механизмов.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р «Об утверждении программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года».
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году», подготовлен ФГБУ «ВИМС». Составление и общая редакция: А. П. Данилов, Л.А. Дорожкина, О. Н. Ефанова и др., при участии А. А. Фатеевой. – Москва. – 2021. – 572 с.

3. Великанов В. С., Овчинникова В. А., Гришин И. А. Роботизированные самоходные гусеничные машины в добыче полезных ископаемых открыто-подземным способом. Горная промышленность. 2023;(2):76–82. DOI: 10.30686/1609–9192-2023-2-76-82.
4. Исследование процесса перекосного нагружения угольных перегружателей с целью повышения эффективности эксплуатации / В. С. Великанов, И. А. Гришин, М. Д. Лукашук, О. А. Лукашук // Уголь. – 2025. – № 11(1199). – С. 108–112. – DOI 10.18796/0041-5790-2025-11-108-112. – EDN NDRLHP.
5. Электронный ресурс: <https://minenergo.gov.ru/industries/coal/about>
6. Agaguena, A., Chishegorov, D., Ivanov, S.L., Mikhailov, A. (2021). Influence of the main operational factors on the working capacity of a mining hydraulic excavator. E3S Web of Conferences, 326, Article 00007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132600007>
7. Ivanova, P., Ivanov, S.L., Mikhailov, A., Shishlyannikov, D.I. (2021). Extraction mechanization of soft soils. Journal of Applied Engineering Science, 19(3). <https://doi.org/10.5937/jaes0-31904>
8. Iakupov, D., Motyakov, N., Ivanova, P., Ivanov, S. (2022). Working parts of means of minerals excavation. AIP Conference Proceedings, 2456, Article 030012. <https://doi.org/10.1063/5.0074835>
9. Крицкий Д.Ю., Федоров А. В., Андреева Л. И. Комплексная оценка факторов, оказывающих существенное влияние на техническое состояние драглайнов // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3 (179). С. 41–47. DOI: 10.26730/1816–4528-2025-3-41-47.

УДК 622.232.72:62-192

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ПРИЧИН ОТКАЗОВ ПОГРУЗОЧНОЙ ТЕХНИКИ CATERPILLAR

А.С. Герасимов¹, магистрант, И.В. Телиман¹, асс.-профессор, к.т.н., И.И. Ерахтина¹,
асс.-профессор, к.п.н.

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
г. Караганда, Казахстан

В статье представлен технический анализ отказов погрузочной техники Caterpillar, позволил выявить закономерности в распределении дефектов тяжелых колесных погрузчиков Caterpillar, эксплуатируемых в горнодобывающем секторе Республики Казахстан. На основе дефектовочных актов и отчетов технической экспертизы выявлены ключевые факторы, детерминирующие эксплуатационную надежность оборудования. Особое внимание уделено трибологическому износу сопряжений рамных конструкций и гидравлических приводов.

Ключевые слова: Caterpillar, техническое обслуживание, эксплуатационная надежность, износ проушин.

ANALYSIS OF OPERATIONAL RELIABILITY AND CAUSES OF FAILURES OF CATERPILLAR LOADING EQUIPMENT

A.S. Gerassimov, I.V. Teliman, I.I. Erahtina

The article presents a technical analysis of Caterpillar loading equipment failures, which revealed patterns in the distribution of defects in Caterpillar heavy wheel loaders operated in the mining sector of the Republic of Kazakhstan. Based on defect reports and technical expertise reports, key factors determining the operational reliability of the equipment have been identified. Particular attention was paid to the tribological wear of frame structures and hydraulic drives.

Keywords: Caterpillar, maintenance, operational reliability, wear of lugs.

Эффективность функционирования горнодобывающих предприятий в значительной степени коррелирует с коэффициентом технической готовности ($K_{ТГ}$) парка погрузочно-доставочных машин. Колесные погрузчики тяжелого класса Caterpillar (980L), подвергаются воздействию экстремальных динамических нагрузок и абразивных сред, что в условиях резко континентального климата Казахстана приводит к ускоренной деградации узлов и агрегатов [1].

Традиционные подходы к ТОиР, базирующиеся на жестких регламентах наработки (моточасах), зачастую не учитывают реальное стохастическое состояние техники [2]. В рамках исследовательской работы произведен анализ отказов погрузочной техники Caterpillar, позволил выявить закономерности в распределении дефектов. Детальная инспекция обнаружила критический износ рамных конструкций и рабочих органов.

В качестве рассматриваемого объекта исследования выбраны рамы от колесного погрузчика Caterpillar 980L на основе актов технической экспертизы № 1 и № 2 от 2025 года [3, 4].

Наиболее выраженным «узким местом» является износ внешнего диаметра пальца, внутренних диаметров проушин крепления гидроцилиндров подъема стрелы передней полурамы (Рисунок 1), проушины крепле-

ния рулевых цилиндров (Рисунки 3-4). Отклонения от номинальных размеров достигают критических величин, требующих восстановительной наплавки и расточки.



Рис. 1 Износ внутренних диаметров проушин крепления гидроцилиндров подъема стрелы рамы № 1 и № 2



Рис. 2 Пальцы крепления гидроцилиндров подъема стрелы к раме №1 и №2

На Рисунке 2 представлен общий вид пальцев крепления наклона, инспекцией выявлены характерные признаки адгезионного износа, включая локальное разрушение хромированного покрытия и износ наружного диаметра пальца крепления гидроцилиндров подъёма стрелы к раме. Наблюдаемые повреждения свидетельствуют о длительной эксплуатации сопряжения в условиях недостаточного смазывания и повышенных контактных напряжений, что приводит к частичному разрушению защитного хромового слоя и развитию процессов схватывания контактирующих поверхностей [5].

Демонтаж двух пальцев рамы № 1 и одного пальца рамы № 2 методом прессования оказался невозможен даже при приложении давления свыше 70 000 кПа, что указывает на наличие выраженного адгезионного схватывания и пластической деформации сопрягаемых элементов. В связи с этим демонтаж был выполнен термическим методом (выжиганием), что дополнительно подтверждает высокую степень износа и потерю эксплуатационной пригодности рассматриваемых компонентов.

На Рисунке 5 представлены повреждения пальцев крепления рулевых цилиндров, включающие износ хромового покрытия, характерные следы адгезионного износа и очаги коррозионного поражения поверхности. Разрушение хромированного слоя привело к снижению защитных и анти-

фрикционных свойств поверхности, что способствовало развитию процессов схватывания в зоне контакта сопряжённых деталей.

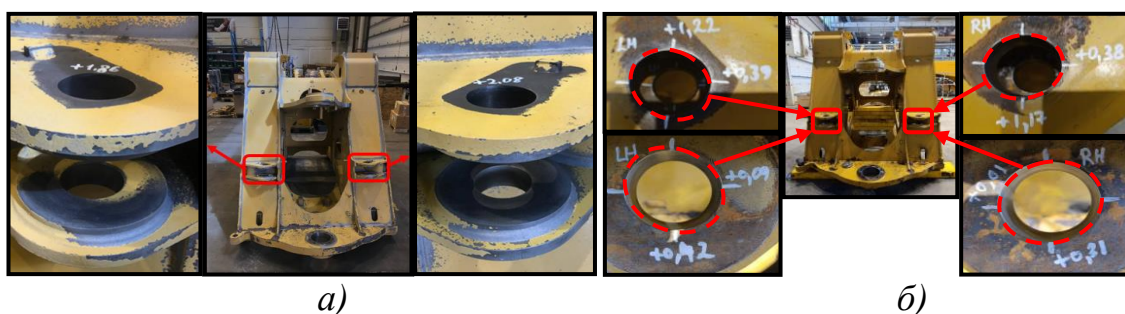


Рис. 3 Износ внутренних диаметров проушин крепления рулевых гидроцилиндров передней рамы №1 и №2

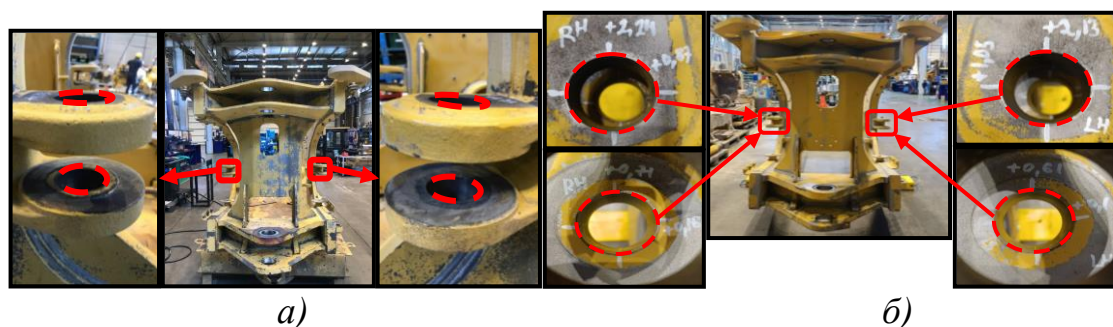


Рис. 4 Износ внутренних диаметров проушин крепления рулевых гидроцилиндров задней рамы №1 и №2



Рис. 5 Пальцы крепления рулевых цилиндров к раме №1 и №2

Наличие коррозионных повреждений указывает на воздействие неблагоприятных эксплуатационных факторов, таких как повышенная влажность, загрязнение и недостаточная эффективность смазывания. Совокупность указанных дефектов свидетельствует о прогрессирующем износе соединения, снижении его эксплуатационной надёжности и необходимости своевременной замены или восстановления повреждённых элементов.

На основе проведенного анализа актов исследований можно выделить три группы факторов, определяющих надёжность погрузочной техники Caterpillar.

- Геолого-климатические факторы: Высокая концентрация абразивной пыли в карьерах и шахтах Казахстана приводит к попаданию частиц в шарнирные сопряжения. При недостаточном давлении в системе автоматической смазки абразив выступает в роли притира, ускоряя износ пальцев и втулок (Рисунок 2).

- Режимы нагружения: Работа с горной массой высокой плотности создает пиковые напряжения в узлах крепления ковша и стрелы. Усталостные явления в металле рам проявляются в виде микротрещин и деформаций проушин.

- Технологические факторы обслуживания: Задержки в проведении промежуточных инспекций (ТА1/ТА2) приводят к тому, что начальный износ (+0,1 мм) быстро переходит в стадию прогрессирующего разрушения (+1,0 мм и выше), требующего дорогостоящего восстановления в условиях цеха [6].

Вывод. Анализ актов технической экспертизы погрузочной техники Caterpillar подтверждает, что основным «узким местом», лимитирующим ресурс до капитального ремонта, является механический износ посадочных мест рамных конструкций. Данный вид износа является не только следствием естественной эксплуатации, но и результатом совокупного влияния агрессивной внешней среды, интенсивных нагрузок и недостатков в системе технического обслуживания.

Комплексный учет и минимизация воздействия вышеперечисленных факторов являются ключевыми задачами для повышения ресурса и надежности погрузочной техники Caterpillar.

Список литературы:

1. Азбаев, И. А. Диагностика ДВС, состояние и перспективы развития в инженерной службе ТОО «Борусан Макина Казахстан» / И. А. Азбаев, И. В. Телиман, П. Г. Безкоровайный // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромышленного оборудования: Материалы XI Международной научно-практической конференции, Пермь, 11–13 ноября 2025 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2025. – С. 39-48.
2. Жилинков А.А., Макарова В.В., Лагунова Ю.А., Калянов А.Е. Методические основы для исследований процессов деформации элементов несущей системы карьерного самосвала / В сборнике: Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. - С. 54-58.
3. Акт №1 технической экспертизы по колесному погрузчику Caterpillar 980L от 2025 года.
4. Акт №2 технической экспертизы по колесному погрузчику Caterpillar 980L от 2025 года.
5. Borusan Cat. Certified Rebuild Programs. URL: <https://www.borusancat.com/en/service/rebuild>
6. Caterpillar. Large Wheel Loaders: 980L Specalog (AENQ7895-02).

УДК 622.23.08

ЦИФРОВИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА КНР

И.В. Дрягина¹, студ., А.П. Комиссаров, проф., д.т.н.

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

Рассмотрена проблема снижения эксплуатационной надежности горнодобывающего оборудования китайского производства. На примере буровых установок Siton, эксплуатируемых на золотодобывающем предприятии Магаданской области, проанализированы основные недостатки техники производства КНР по сравнению с европейскими аналогами. Предложено решение о внедрении системы предиктивного обслуживания на основе непрерывного мониторинга технического состояния.

Ключевые слова: цифровизация, планово-предупредительные ремонты, предиктивная система, импортозамещение, китайское оборудование, Siton

DIGITALIZATION OF THE MAINTENANCE SYSTEM AND IMPLEMENTATION OF A PREDICTIVE SYSTEM FOR EQUIPMENT MANUFACTURED IN CHINA

I.V. Dryagina

The problem of reducing the operational reliability of Chinese mining equipment is considered. Using the example of Siton drilling rigs operated at a gold mining enterprise in the Magadan region, the main disadvantages of Chinese production technology compared with European counterparts are analyzed. A decision has been proposed to implement a predictive maintenance system based on technical condition monitoring.

Keywords: digitalization, scheduled preventive maintenance, predictive system, import substitution, Chinese equipment, Siton, SPM

Опыт эксплуатации оборудования производства КНР демонстрирует существенный разрыв в безотказности и надежности между европейским и азиатским оборудованием [1]. По данным золотодобывающего предприятия (Магаданская область), средний срок службы оборудования производства КНР до капитального ремонта составляет 2 года, в то время как аналогичная техника Atlas Copco или Sandvik эксплуатируется 3,5-4 года без необходимости капитального вмешательства [2]. Это создает критические риски для непрерывности производственного процесса и экономической эффективности предприятий.

Китайские производители горнодобывающей техники (Siton, Fambition, XCMG, Sany) активно занимают освободившуюся нишу, предлагая оборудование по цене на 30-40 % ниже европейских аналогов. Однако снижение стоимости достигается за счет использования более дешевых материалов и комплектующих, что напрямую влияет на их эксплуатационную надежность [1]. Поэтому возникает необходимость анализа проблем эксплуатации китайских буровых установок и разработка системы цифрового мониторинга для перехода к предиктивному обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

За период эксплуатации 2023-2025 гг. золотодобывающим предприятием Магаданской области был проведен сравнительный анализ конструктивных особенностей, который позволил выделить ключевые проблемные

стороны техники азиатского производства (*в сравнении с техникой европейских производителей*):

1. *Гидравлическая система* – наиболее уязвимый узел. Имеют большие допуски (в сравнении с европейскими брендами), что приводит к утечкам, перегреву и быстрому износу [6]. Годовые (суммарные) простои по причине ремонта гидравлической системы и замены РВД оборудования КНР на 32 % выше, чем простои оборудования Epiroc.

2. *Система смазки и охлаждения* – китайская техника оснащается упрощенными системами фильтрации масла. Если европейские установки используют трехступенчатую фильтрацию с тонкостью очистки до 3 микрон, то у китайских производителей часто установлены простые фильтры 10-25 микрон. Это приводит к ускоренному абразивному износу прецизионных пар.

3. *Качество металла* – использование более дешевых сталей с меньшим содержанием легирующих элементов приводит к повышенной склонности к усталостному разрушению в условиях высоких нагрузок [1].

Например, одна из главных проблем подземных доставочных машин бренда Fambition – усталостное разрушение рамы (наблюдаются на второй год работы оборудования) [2].

Планово-предупредительная система ремонта (ППР), разработанная в СССР, основывается на выполнении регламентных работ через фиксированные промежутки времени или наработки (*рассчитанные статистические*) [3]. Например, замена масла каждые 1000 моточасов, ревизия гидронасоса каждые 2000 часов.

Однако в современных реалиях этот подход является устаревшим и не учитывает сложность современного оборудования и фактические условия эксплуатации.

Предиктивное обслуживание (*Predictive Maintenance*) – современная стратегия технического обслуживания, основанная на непрерывном мониторинге фактического состояния оборудования и прогнозировании момента возникновения отказа [4]. Ремонт выполняется не по установленной наработке, а тогда, когда система диагностики обнаруживает признаки деградации узла.

Мониторинг осуществляется при помощи диагностических параметров – вибрация, температура, анализ масла и т.д.

В случае с вынужденным импортозамещением и переходом на эксплуатацию оборудования производства КНР такая система становится наиболее актуальной в связи с непредсказуемостью отказов техники КНР.

Таким образом, переход на новую систему обслуживания оборудования особенно актуален в связи с тем, что позволит компенсировать конструктивные недостатки за счет более раннего обнаружения проблем.

Исследование проводилось на базе золотодобывающего предприятия, расположенного в Магаданской области. По состоянию на февраль 2026 г., переход на оборудования производства КНР осуществлен на 70 %.

На текущий момент, эксплуатирующий парк составляет 12 буровых установок брендов Siton и Huatai.

За период 2023-2025 гг. проведен анализ агрегатных журналов (учет отказов оборудования). Выявлено, что 57 % всех незапланированных остановок связаны с поломками гидравлической системы (загрязнение масла, разрушение уплотнений, перегрев гидравлики) [2].

Для повышения надежности работы оборудования было принято решение о внедрении системы непрерывного мониторинга технического состояния. Основная задача: установить на СБУ датчики, которые непрерывно отслеживают состояние техники и дают знать о появлении возможной проблемы [5]:

- *Датчики давления* - измеряют, не падает ли давление в гидросистеме (признак утечки или износа насоса);
- *Датчики температуры* контролируют перегрев узлов;
- *Датчики вибрации* фиксируют нарастание вибрации (признак разбалансировки или износа подшипников);
- *Датчики чистоты масла* определяют степень загрязнения рабочей жидкости.

Данные с датчиков передаются в компьютерную систему, которая анализирует их и предупреждает о приближающихся проблемах за несколько дней до поломки.

Специалисты проанализировали все случаи поломок за указанный период и сопоставили их с изменениями параметров, которые происходили перед отказом. Например, перед выходом из строя гидронасоса за 2-3 дня начинала расти вибрация и температура. Эти закономерности «обучили» компьютерную программу распознавать приближающиеся поломки.

Когда датчики фиксируют отклонение параметров от нормы, программа анализирует ситуацию и, если обнаруживает признаки надвигающейся поломки, отправляет предупреждение механикам.

Внедрение мониторинга показало следующие результаты:

- раннее предупреждение: из 48 случаев поломок система заранее предупредила о 33 (68 %). В среднем за 2-3 дня до отказа механики уже знали о проблеме [2];
- незапланированные остановки сократились на 56 % (сокращение аварийных простоев и возможность провести ремонт в удобное время) [2];
- прогнозируемый срок службы установки вырос с 1,5 до 2,3 года – прирост на 53 %. Это меньше европейских 4-5 лет, но уже существенный прогресс.

Вывод. Переход на систему предиктивного планирования ремонтов в рамках данного предприятия показал положительную динамику в увеличении срока службы оборудования и снижении аварийных (внеплановых) простоев, увеличении возможности планирования ремонтов без остановки производства.

Дальнейшее развитие направления предполагает масштабирование системы на весь парк оборудования предприятия, включая погрузочно-доставочные машины, самосвалы и другую технику. Накопление статистических данных позволит повысить точность прогнозирования и создать ба-

зу знаний по типовым неисправностям китайского оборудования в условиях Крайнего Севера.

Список литературы

1. Литвинова А.А. Проблемы импортозамещения в горнодобывающей промышленности России в условиях санкций // Горная промышленность. 2023. № 2.
2. Производственный отчет ООО «Омолонская золоторудная компания». Магадан, 2023, 2024, 2025
3. Положение о планово-предупредительном ремонте оборудования и транспортных средств. М.: Машиностроение, 1983
4. Mobley R.K. An Introduction to Predictive Maintenance. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002.
5. Быков Д. В., Лагунова Ю. А., Сушко А. Е. Применение автоматизированных экспертных систем оценки технического состояния оборудования на предприятиях горнодобывающей отрасли // Горное оборудование и электромеханика. – 2025. – № 6(182). – С. 16-22. – DOI 10.26730/1816-4528-2025-6-16-22.

УДК 621.89:622

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ СИСТЕМ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЖИДКОСТНОЙ СМАЗКИ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Е.С. Иванова¹, С.Л. Иванов¹, д-р техн. наук, проф.

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, РФ

В статье рассмотрены ключевые аспекты проектирования и эксплуатации централизованных систем смазывания в горном и горно-обогательном оборудовании. Проведена классификация систем по типу лубриканта (консистентные и жидкие смазки) с указанием сфер применения. Проанализированы недостатки традиционных методов очистки масла в циркуляционных системах: низкая эффективность сепарации, неравномерная циркуляция, высокие затраты на избыточный объем масла и металлоемкость конструкций. Предложено инновационное решение – резервуар-отстойник с лабиринтным каналом, обеспечивающий ламинарный режим сепарации воды, воздуха и механических примесей. Показано, что внедрение новой конструкции позволит снизить износ узлов, уменьшить объем резервуара и расход масла. Обоснована актуальность дальнейших исследований в области оптимизации систем смазывания для повышения надежности и экономичности горного оборудования.

Ключевые слова: горные машины, горно-обогательное оборудование, смазочный материал, система смазывания, отказ, загрязнение, очистка, масляная емкость.

ON THE USE OF CIRCULATION LIQUID GREASE SYSTEMS FOR MINING MACHINES AND EQUIPMENT

E.S. Ivanova, S.L. Ivanov

The article discusses the key aspects of the design and operation of centralized lubrication systems in mining and processing equipment. The classification of systems by type of lubricant (greases and liquid lubricants) is carried out, indicating the areas of application. The disadvantages of traditional oil purification methods in circulation systems are analyzed: low separation efficiency, uneven circulation, high costs of excessive oil volume and metal consumption of structures. An innovative solution has been proposed – a settling tank with a labyrinth channel, providing a laminar separation of water, air and mechanical impurities. It is

shown that the introduction of a new design will reduce wear on components, reduce tank volume and oil consumption. The relevance of further research in the field of optimizing lubrication systems to improve the reliability and efficiency of mining equipment is substantiated.

Keywords: *mining machinery, mining and processing equipment, lubricant, lubrication system, failure, pollution, cleaning, oil tank.*

Введение. Надежная работа машин во многом определяется условиями функционирования их узлов, передающих крутящие моменты и усилия. Эффективность работы таких узлов определяется условиями их смазывания, которое осуществляется жидкими или консистентными смазками [1]. Современные тенденции организации процесса смазывания узлов горных и горно-обогачительных машин сводятся к применению централизованной системы смазывания (ЦСС). Эти системы обеспечивают точное дозирование смазочных материалов, поддерживают их рациональный уровень, а также способствуют увеличению срока службы оборудования [2]. Централизованными системами смазывания комплектуются основное и вспомогательное оборудование шахт и рудников, карьеров и обогачительных фабрик, и от их безотказной работы критически зависит надежность функционирования горного и горно-обогачительного оборудования.

Классификация централизованных систем смазывания по типу лубриканта. Все централизованные системы смазывания по типу лубриканта делятся на две большие группы: системы с консистентной смазкой и системы с жидкой смазкой.

Первая группа широко применяется в мобильных и стационарных горных машинах, таких как экскаваторы, грохоты, конвейеры, буровые машины, карьерные самосвалы, дробилки, сепараторы, классификаторы, скрубберы, погрузочные и штабелечные машины для смазывания осей, подшипников и направляющих. Вторая группа – в подшипниках скольжения, трансмиссиях и редукторах шахтных подземных установок, конусных дробилок, шаровых мельниц, экскаваторов, автотранспортных машин, буровых станков, погрузчиков, конвейеров и шахтных подъемных машин.

При длительном использовании и под воздействием определенных внешних причин показатели качества смазки могут изменяться [3-5]. Уменьшение вязкости масла наблюдается при деструкции вязкостной присадки и при доливе масла с низкой вязкостью. Увеличение вязкости происходит при окислении и загрязнении масла, при доливе масла с высокой вязкостью, а также при попадании воды. Долив масла с низкой плотностью приводит к понижению плотности общего объема масла. Повышение плотности происходит при загрязнении масла пылью, при доливе масла с высокой плотностью и при попадании воды. Электрическая емкость масла повышается при попадании воды. Продукты износа могут появляться при обкатке узлов трения, при использовании некачественного масла, при коррозии деталей машины и попадании пыли [6].

Проблемы эффективности сепарации масла в циркуляционных системах горного оборудования и перспективы модернизации. Для очистки масла и удаления из него примесей (воды, воздуха, продуктов износа) для

стационарного горного и горно-обогачительного оборудования применяются масляные емкости циркуляционных систем жидкой смазки.

В системах циркуляционной смазки традиционно используют прямоугольные баки, рассчитанные на получасовое пребывание в них масла. Предполагается, что за это время силы Архимеда и гравитации удалят из масла воду и воздух. Однако на практике такая конструкция работает недостаточно эффективно. Циркуляция масла происходит неравномерно: максимально быстро масло движется в центральной части объема потока и у всасывающего насоса, остальная же часть объема – более 50 % – практически не участвует в циркуляции. Это связано с формированием турбулентных вихрей вблизи насоса и ламинарных зон у стенок бака. Вследствие такого распределения скоростей процесс гравитационной сепарации нарушается: пузырьки воздуха и капли воды не успевают подняться к поверхности в застойных областях¹.

В результате реальное время удержания масла сокращается втрое – до 10 минут. Чтобы компенсировать этот недостаток, приходится увеличивать размеры баков и закупать избыточный объем масла, что экономически невыгодно. При этом даже увеличенные объемы не гарантируют должного качества очистки, поскольку основная проблема – неравномерная циркуляция – остается нерешенной. В долгосрочной перспективе это приводит к ускоренному износу оборудования из-за присутствия в масле воды, воздуха и механических примесей, что повышает риск внеплановых остановок и дорогостоящих ремонтов.

Для улучшения качества сепарации в стандартных баках циркуляционных систем смазывания допускается использование дополнительных емкостей, предназначенных для отстоя масла. Еще один альтернативный способ решения указанной проблемы – монтаж гравитационных сепараторов воздушных пузырьков. Такие сепараторы изготавливаются из цветного металла или коррозионно-стойкой стали. Также они могут выполняться в виде гофрированных листов, размещающихся горизонтально, либо в форме наклонных решетчатых пакетов. Помимо этого возможна установка несколько вертикально ориентированных перфорированных гофрированных перегородок из аналогичного материала. Однако все перечисленные решения приводят к росту металлоемкости баков, что, в свою очередь, повышает их себестоимость.

Перспективный путь устранения вышеперечисленных недостатков применяемых масляных емкостей циркуляционных систем смазывания в горном и горно-обогательном оборудовании заключается в усовершенствовании их конструкции. Новая конструкция позволит увеличить путь прохождения смазки в ламинарном режиме по лабиринтному каналу резервуара-отстойника для сепарации воды, воздуха и механических примесей, также обеспечит повторное использование очищенного масла в системе циркуляционной смазки ресурсопределяющих узлов горных и горно-

¹ Патент № 2024101958 РФ. Гидравлический масляный бак / С.П. Подхалюзин, А.И. Ондриков, М.С. Селезнев. Оpubл. 26.06.2024. Бюл. № 18.

обогащительных машин. Такое решение приведет к снижению интенсивности изнашивания подшипников скольжения и элементов привода, уменьшению объема резервуара-отстойника и расхода циркуляционного масла.

Таким образом, исследование и разработка новых методов очистки циркуляционной смазки горных и горно-обогащительных машин являются актуальной и практически значимой задачей, способствующей повышению долговечности и эффективности горнотехнического оборудования, а также оптимизации производственных процессов в горнодобывающей отрасли. Исследование и разработка новых методов очистки циркуляционной смазки горных и горно-обогащительных машин являются задачами будущих исследований авторов.

Выводы. Проведенное исследование систем смазывания горного и горно-обогащительного оборудования позволило сделать следующие выводы. Централизованные системы смазывания являются ключевым элементом обеспечения надежности работы горного оборудования, однако требуют постоянного контроля и обслуживания. Основными причинами снижения эффективности работы систем смазывания являются механические повреждения, износ компонентов и негерметичность системы. Существующие методы очистки смазочных материалов требуют совершенствования, особенно в части повышения эффективности сепарации механических примесей и воды. Разработка новых конструкций масляных емкостей с улучшенными характеристиками очистки может существенно повысить эффективность работы систем смазывания. Внедрение предложенных решений позволит снизить интенсивность износа подшипников, уменьшить объем резервуаров-отстойников, сократить расход циркуляционного масла, повысить общую эффективность работы горнотехнического оборудования. Дальнейшие исследования в этом направлении будут способствовать повышению надежности и эффективности работы горнодобывающей отрасли.

Список литературы

1. Иванов С. Л., Дудко П. П., Дмитриев Г. Ю., Подхалюзин С. П. Автоматические централизованные системы смазки. Опыт применения, проблемы и перспективы использования // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 22–26.
2. Баранов А. В., Вагнер В. А., Тарасевич С. В. Повышение эффективности смазочных сред // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 12. – С. 24–25. – EDN IJWUJL.
3. Ярмович Я. В. Обоснование ресурса смазочного материала дробильно-размольного оборудования // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 4(50). – С. 43–47. – EDN WZQQAP.
4. Лагунова Ю.А., Суслина Е.С. Анализ работы системы смазки в дробильно-размольном оборудовании // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 9. С. 34–39.
5. Лагунова Ю.А., Суслина Е.С. Повышение эффективности работы дробильно-размольного оборудования с применением гидропривода // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. 2010. № 18 (172). С. 193–201.
6. Нигматуллин Р. Г., Пелецкий С. С., Хафизова А. Г., Костенков Д. М., Нигматуллин И. Р. Методика экспресс-анализа работоспособности смазочных материалов // Мир измерений. – 2011. – № 7. – С. 35–38. – EDN KPEJND.

УДК 621.896: 331.108.45

О НЕОБХОДИМОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА, ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СМАЗКИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.О. Колпаков¹, М.С. Селезнев¹, С.П. Подхалюзин¹

¹ ООО «ТЕХПАРТНЕР», г. Санкт-Петербург, РФ

Представлены результаты анализа влияния человеческого фактора на эффективность эксплуатации автоматических централизованных систем смазки (АЦСС) горного оборудования. Рассмотрены современные АЦСС, как конструктивно сложные комплексы, включающие насосные станции, автоматические дозирующие устройства, системы мониторинга и программируемые логические контроллеры. На основе статистических данных и технического аудита установлена прямая корреляция между квалификацией персонала и работоспособностью АЦСС. Обоснована необходимость разработки программ повышения квалификации для обслуживающего персонала.

Ключевые слова: автоматическая централизованная система смазки, АЦСС, циркуляционные масляные системы, человеческий фактор, квалификация персонала, техническое обслуживание, промышленное оборудование, электрический карьерный экскаватор.

ON THE NEED TO IMPROVE THE QUALIFICATIONS OF PERSONNEL SERVICING AUTOMATIC CENTRALIZED LUBRICATION SYSTEMS OF MINING EQUIPMENT

V.O. Kolpakov, M.S. Seleznev, S.P. Podkhalyuzin

The results of the analysis of the human factor influence on the operational efficiency of automatic centralized lubrication systems (ACLS) of industrial equipment are presented. It is shown that modern ACLS are complex mechatronic systems including pumping stations, precision metering devices, monitoring systems and programmable logic controllers. Based on statistical data and technical audit, a direct correlation has been established between personnel qualifications and ACLS performance. The necessity of developing advanced training programs for maintenance personnel is substantiated.

Keywords: automatic centralized lubrication system, ACLS, circulating oil systems, human factor, personnel qualifications, technical maintenance, industrial equipment, electric mining excavator.

Современное горное оборудование характеризуется высокой стоимостью, энергоемкостью и высокими требованиями к надежности. Потери, возникающие в процессе высокой интенсивности изнашивания механических компонентов в развитых странах, оцениваются в 1,3–1,6 % от ВВП (согласно исследованиям, проведенным компанией SKF) [1,3]. Применение автоматических централизованных систем смазки (АЦСС) позволяет снизить эксплуатационные затраты 25 %, сократить расход смазочных материалов до 30 % и значительно снизить интенсивность расходования ресурса узлов, реализованных парами трения [2, 4]. Эффект достигается посредством исключения человеческого фактора из процесса смазывания, возможностью настройки и регулировки объемов подаваемого смазочного материала в зависимости от условий эксплуатации и возможностью мониторинга состояния системы в режиме реального времени. Однако потенци-

альные преимущества АЦСС реализуются лишь при условии их квалифицированной проектировки, монтаже, наладке и техническом обслуживании.

Конструктивная сложность и развитие циркуляционных масляных систем. Современные тенденции развития промышленного оборудования предъявляют повышенные требования к надежности и к функциональным возможностям систем смазки, что находит отражение в конструктивной эволюции систем АЦСС, в том числе и циркуляционных масляных систем. Циркуляционные масляные системы представляют собой один из наиболее технологически сложных классов АЦСС. Они предназначены не только для подачи смазочного материала, но и для охлаждения узлов, а также эффективного удаления загрязнений, воды и воздуха из масла [3, 5]. Анализ эволюции данных систем демонстрирует устойчивую тенденцию к усложнению конструкции с сохранением унификации и расширению функциональных возможностей.

Диапазон производительности современных систем варьируется от 1 до 3000 л/мин, что позволяет обслуживать как небольшие редукторы, так и крупные агрегаты (бумагоделательные машины, прессовое оборудование, прокатные станы, размольное оборудование). Конструктивное исполнение претерпело значительные изменения: от стационарных решений к модульным, легко комбинируемым конфигурациям, что упрощает адаптацию под конкретные технологические задачи.

Важнейшим направлением развития циркуляционных систем стала интеграция круглых баков кондиционирования масла, которые позволили исключить застойные зоны и нерабочие объемы жидкостного смазочного материала. Кондиционирование масла стало неотъемлемой частью современных систем, обеспечивая многоступенчатую фильтрацию для удаления механических частиц, охлаждение или подогрев масла для поддержания оптимальной температуры, а также деаэрацию и сепарацию воды.

Наряду с конструктивными усовершенствованиями основных гидравлических элементов, качественный скачок в развитии систем смазки обеспечила эволюция систем управления, базирующаяся на внедрении программируемых логических контроллеров [6]. На смену релейным схемам пришли специализированные контроллеры: для малых установок с 8/4 входами/выходами и возможностью расширения до 24/16, причем модификации с текстовым дисплеем выводят сообщения на русском языке («Следующее смазывание через XX мин»), что улучшает эргономику, но требует защиты от несанкционированного доступа. Тогда как крупные установки оснащаются контроллерами с расширениями до 1024 входов/выходов с возможностью интеграции в АСУ ТП предприятия. Современные электрошкафы комплектуются блоками питания, защитными устройствами, нагревателями с термостатами для работы при низких температурах, а диагностика осуществляется через светодиодные индикаторы или текстовые дисплеи. Программирование и обновление ПО выполняется через съемные карты памяти, что существенно упрощает программную модернизацию оборудования.

Специализированные системы смазки. Помимо циркуляционных систем, горная промышленность использует специализированные решения для реализации во всем цикле добычи, транспортирования и переработки полезного ископаемого:

- системы «масло-воздух» применяются для высокоскоростных подшипников и направляющих (прокатные станы, правильные машины), обеспечивая тонкое дозирование смазки в потоке сжатого воздуха;

- двухлинейные системы используются для разветвленных сетей с большим количеством точек смазки (до нескольких сотен), обеспечивают независимую работу распределителей и высокое давление (до 20 МПа), что дает возможность использовать трубопроводы малого диаметра и снижать затраты на монтаж;

- системы смазки цепей реализуются по различным технологиям: форсуночное распыление (для высокоскоростных цепей), контактное смазывание через смазочные звездочки (для тяжелых цепей), инжекторные системы с точным дозированием.

Человеческий фактор как основная причина снижения эффективности АЦСС. Наряду с развитием технологий и повышением конструктивной сложности автоматических централизованных систем смазки, неизбежно возникла проблема необходимости повышения уровня квалификации персонала, участвующего в пусконаладке, настройке и техническом обслуживании систем для поддержания работоспособного состояния оборудования.

Технический аудит, проведенный на горнодобывающих предприятиях, выявил ряд системных ошибок персонала, связанных с недостаточной осведомленностью и уровнем квалификацией:

Персонал, привыкший к простым системам с визуальным контролем, не понимает в полной мере принципов работы гидравлических регулирующих устройств, ограничителей потока и распределителей. Расчеты фактических, реализуемых на горных машинах объемов подачи на примере электрических карьерных экскаваторов показали многократное превышение (до 17 раз) над нормативами, рекомендуемыми заводом-изготовителем (таблица 1), что ведет к перерасходу смазочного материала и отсутствию экономического эффекта от автоматизации.

Отсутствие навыков работы с контроллерами и панелями оператора, приводит к невозможности корректной настройки параметров (время паузы, время контроля насоса, время заправки), диагностики неисправностей и разграничения прав доступа. Персонал не умеет интерпретировать сообщения на дисплеях, (проводить связь между объемами подаваемого смазочного материала и параметрами настройки) и работать с устройствами для обновления программного обеспечения.

При выходе из строя элементов систем (насосов, распределителей, фильтров) персонал зачастую устанавливает доступные аналоги, не учитывая их гидравлические характеристики, что приводит к разбалансировке системы и преждевременным отказам.

Не учитываются требования к вязкости, классам NLGI, прокачиваемости при низких температурах. Для улучшения прокачиваемости зимой нередко практикуется разбавление смазок посторонними жидкостями, что вызывает потерю триботехнических свойств и засорение системы.

Таблица 1 – Отклонения фактических объемов подачи смазки от нормативных

Точка смазывания	Кратность превышения
Подшипники головных блоков	7,5
Напорная ось	17
Ролики опорного узла	2,7

Ключевым подтверждением значимости квалифицированного обслуживания являются результаты восстановления работоспособности АЦСС на одном из объектов силами привлеченных специалистов. Суммарная длительность простоев, связанных с отказами пар трения, до проведения ремонтных мероприятий составляла 52,5 %. После ввода в эксплуатацию оборудования с восстановленной и квалифицированно настроенной системой смазки за сопоставимый период аналогичные простои сократились до 4,3 % (рис. 1).

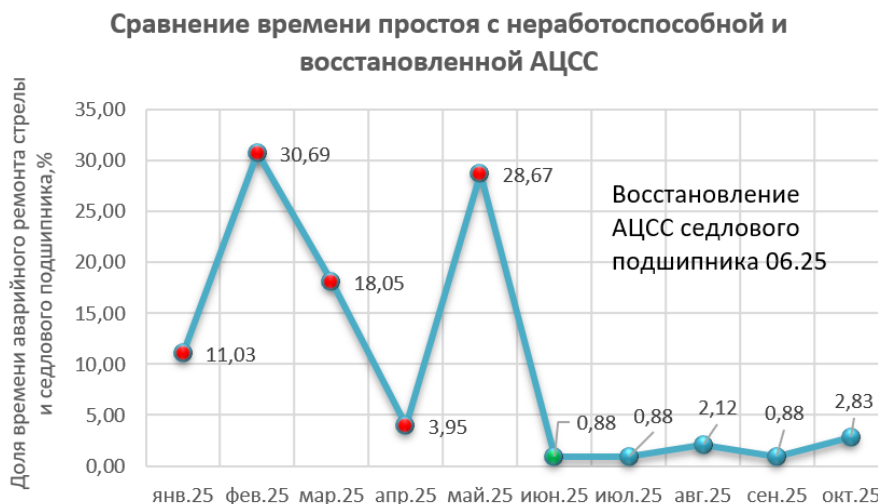


Рисунок 1 – Снижение времени простоев после квалифицированного восстановления АЦСС

Восстановление работоспособности систем смазки привело к значительному повышению КТГ (с 0,73 до 0,86) карьерных экскаваторов, что подтверждается приведенными статическими данными, предоставленными сотрудниками комбината.

Заключение

Как справедливо отмечается в отраслевых материалах [6, 7], «людей, способных провести качественное обслуживание двигателя, много. А тех, кто может провести качественное обслуживание АЦСС, по пальцам пересчитать». Существующая система профессиональной подготовки не успе-

вадет за развитием смазочной техники. Переход от простых систем с визуальным контролем к сложным циркуляционным комплексам с электронным управлением требует принципиально иных компетенций: понимания гидравлики и трибологии, навыков программирования контроллеров, умения интерпретировать данные расходомеров и датчиков, знания свойств современных смазочных материалов.

Проведенный анализ свидетельствует, что недооценка человеческого фактора и недостаточная квалификация персонала сводят на нет преимущества автоматизации процессов смазывания. Эмпирический подход к настройке и обслуживанию современных циркуляционных и специализированных систем, использование нерегламентированных материалов и компонентов приводят к нерациональному расходованию ресурсов, росту аварийных простоев и снижению надежности оборудования.

В связи с этим обоснована необходимость разработки и внедрения программ повышения квалификации для персонала, обслуживающего АЦСС, которые должны учитывать современный уровень развития смазочных систем и включать следующие модули:

- устройство и принцип действия циркуляционных масляных систем (насосные станции, блоки кондиционирования, ограничители потока, прогрессивные дозаторы);
- принципы работы контроллеров и панелей оператора, методы программирования и диагностики;
- методики расчета и настройки оптимальных объемов подачи смазки;
- требования к смазочным материалам;
- устройство и обслуживание специализированных систем (масло-воздух, двухлинейных);
- методы диагностики, регламент технического обслуживания и работа со средствами электронного мониторинга.

Повышение компетентности персонала позволит перейти от практики обслуживания по факту отказа к планово-предупредительной модели, обеспечить проектную эффективность АЦСС и повысить общую надежность оборудования.

Список литературы

1. Иванов С. Л., Дудко П. П., Дмитриев Г. Ю., Подхалюзин С. П./Автоматические централизованные системы смазки. Опыт применения, проблемы и перспективы использования / С. Л. Иванов, П. П. Дудко, Г. Ю. Дмитриев, Подхалюзин С. П. // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 22-26. – EDN: LHPWVD.
2. Колпаков В.О., Шибанов Д.А., Селезнев М.С., Хамидов О.У. Анализ функционирования систем централизованного смазывания узлов карьерных экскаваторов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – №34. – С. 122-128. DOI: 10.26160/2658-3305-2025-34-122-128.
3. SKF Lubrication Systems. Циркуляционные системы смазки маслом SKF LubSys и SKF LINCOLN: презентационные материалы. – SKF Group, 2025.
4. Лагунова Ю.А., Суслина Е.С. Анализ работы системы смазки в дробильно-размольном оборудовании // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 9. С. 34-39.
5. Лагунова Ю.А., Калянов А.Е. Гидропривод в конусных дробилках // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XXIII

международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 218-222

6. Atik N. Введение в системы управления: семинарские материалы. – Lincoln GmbH, 2011.

7. Горные машины: презентационные материалы. – ООО «ТЕХПАРТНЕР», 2025.

УДК 621.225.4:62-192

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГОРНЫХ МАШИН

К.М. Кыныбаев, докторант, **И.В. Телиман**, асс.-профессор, к.т.н.,

Ж.Н. Нокина, асс.-профессор, PhD

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан

В статье выполнен анализ современных подходов к мониторингу и характеристик предиктивной диагностики гидравлических систем горных машин, приведены основные проблемы эксплуатации и характерные отказы аксиально-поршневых насосов.

Ключевые слова: аксиально-поршневой насос, предиктивная диагностика, гидравлическая система, техническое состояние, логико-пороговая модель.

CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF PREDICTIVE DIAGNOSTICS OF AXIAL-PISTON PUMPS IN HYDRAULIC SYSTEMS OF MINING MACHINES

Kynybaev K.M., Teliman I.V., Nokina Zh.N.

The article analyzes modern approaches to monitoring and characteristics of predictive diagnostics of hydraulic systems in mining machines, and describes the main problems of operation and typical failures of axial piston pumps.

Keywords: axial piston pump, predictive diagnostics, hydraulic system, technical condition, logic-threshold model.

Систематизация опыта эксплуатации горных машин указывает на то, что надежность гидропривода напрямую зависит от технического состояния аксиально-поршневых насосов (АПН). Выход из строя АПН приводит к длительным простоям и значительным экономическим потерям в горнодобывающей отрасли. Традиционные стратегии обслуживания по наработке часто неэффективны, так как не выявляют скрытые дефекты на ранних стадиях. По данным исследований, до 60 % отказов в гидравлических контурах экскаваторов вызваны деградацией насосных агрегатов [1].

В современных экскаваторах доминируют схемы с регулируемым АПН. Основными узлами, определяющими ресурс, являются блок цилиндров, распределительный диск и поршневая группа. Исследования подтверждают, что классификация гидросистем должна строиться на синтезе конструктивных и эксплуатационных факторов [2]. В рамках работы был проведен сбор характеристик факторов, влияющих на отказ (Таблица 1).

Особое внимание в предиктивной диагностике следует уделять анализу динамических сигналов управления. Исследования показывают, что износ ресурсопределяющих деталей АПН проявляется не только в утечках, но и в изменении момента на органе управления [3].

Таблица 1
Ключевые параметры деградации компонентов АПН и их диагностические признаки

Узел / Компонент АПН	Характер деградации (износа)	Диагностический признак в модели
Поршневая группа	Рост зазоров до 230 мкм (при норме 45 мкм). Гидроабразивный износ.	Снижение объемного КПД, рост внутренних утечек.
Распределительный узел	Высотная деформация, приводящая к расклиниванию блока.	Увеличение амплитуды пульсаций давления.
Рабочая жидкость	Изменение вязкости при температурах >50 °С.	Температурный градиент, рост потерь мощности на 3–12%.
Подшипниковые узлы	Усталостное разрушение, микротрещины.	Изменение спектральных характеристик вибрации.

В рамках анализа рассмотрены динамические показатели при наработке влияющие на характер изменения сигнала (Таблица 2).

Таблица 2
Динамические показатели износа при наработке

Период наработки, ч	Состояние трибопар	Характер изменения сигнала
0 – 50	Приработка	Стабильный сигнал, минимальный шум
50 – 100	Стабильная работа	Линейный рост зазоров, сохранение КПД
> 100	Прогрессирующий износ	Появление нелинейных колебаний момента, люфты в контактах

После 100 часов наработки возникают характерные колебания, вызванные увеличением люфтов в сопряжениях «поршень–блок» и «распределитель–блок». Эти данные позволяют локализовать дефект без разборки агрегата, используя только штатные датчики давления и положения регулятора.

Для перехода от фиксации отказа к прогнозированию остаточного ресурса (Remaining Useful Life — RUL) необходимо использование стохастических моделей. В анализируемых работах перспективным направлением является использование моделей на основе процессов Винера [4]. Математическая интерпретация износа в данном случае учитывает не только среднюю скорость деградации, но и случайные выбросы нагрузки, характерные для забоя:

$$X(t) = \mu t + \sigma B(t) \quad (1)$$

где μ – дрейф, отражающий среднюю скорость износа (например, рост зазора в микронах); σ – коэффициент диффузии (влияние внешней среды); $B(t)$ – броуновское движение, описывающее неопределенность условий эксплуатации.

Использование такого аппарата в рамках логико-пороговой системы позволяет не просто выдавать сигнал «отказ», а формировать вероятностный прогноз работы узла до следующего планового ремонта.

В статье рассмотрены современные интеллектуальные системы мониторинга (CMS), базирующиеся на многопараметрическом анализе сигналов [5, 6].

Традиционные методы: использование вейвлет-анализа и нечеткого энтропийного разложения сигналов давления [7].

Интеллектуальные методы: применение мгновенной угловой скорости (IAS) и глубинных нейронных сетей для классификации дефектов.

Адаптивные подходы: использование методов переноса знаний (Transfer Learning) для работы с малыми выборками данных в полевых условиях.

Анализ условий работы АПН показал, что основные проблемы связаны с нелинейным характером износа: геометрический износ – средний зазор в поршневой паре достигает 65–70 мкм при допустимом 45 мкм.

Температурная нестабильность: работа при температурах выше 50 °C ведет к доминированию потерь от утечек, снижая энергоэффективность на 3–12 % [8].

Ограниченность данных: большинство моделей, обученных в лабораториях, не учитывают циклические термоколебания реальной эксплуатации экскаваторов [9].

Обозначенная проблематика определяет потребность в разработке адаптивных диагностических решений на основе логико-пороговых моделей. Концепция интегрированной системы включает четыре модуля: мониторинг, предобработка данных, аналитика и цифровой двойник [10].

Вывод. В результате обзора установлено, что существующие диагностические подходы, как правило, рассматривают параметры износа изолированно, без их логической интеграции в единую систему принятия решений. Таким образом, переход к предиктивной диагностике на основе интеграции физико-математических моделей износа и интеллектуальных алгоритмов является приоритетным направлением. Реализация адаптивных логико-пороговых систем позволит существенно повысить надежность и энергоэффективность гидросистем экскаваторов в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы

1 Liu J., Meng S., Zhou X., Gu L. A hydraulic axial piston pump fault diagnosis based on instantaneous angular speed under non-stationary conditions // Lubricants. — 2023. — Vol. 11, № 9. — Article 406.

2 Коростин Александр Сергеевич ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ // Известия ТулГУ. Технические

науки. 2022. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-konstruktsii-i-ekspluatatsii-gidravlicheskih-eksikatorov> (дата обращения: 04.11.2025).

3 Иванов Владимир Николаевич, Пузанов Андрей Викторович ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОБОРОТНЫХ ГИДРОМАШИН // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-povysheniya-ekspluatatsionnyh-svoystv-elementov-vysokooborotnyh-gidromashin> (дата обращения: 04.11.2025).

4 Рахутин Максим Григорьевич, Чан Ван Хиеп, Ле Ван Лой Обоснование оптимальных наработок основных насосов карьерного гидравлического экскаватора // Горная промышленность. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-optimalnyh-narabotok-osnovnyh-nasosov-kariernogo-gidravlicheskogo-eksikatora> (дата обращения: 04.11.2025).

5. Ю. А. Лагунова, Д. В. Быков, А. Е. Калянов [и др.] Диагностика технического состояния парка дробильно-размольного оборудования ПАО «Ураласбест» // Горное оборудование и электромеханика. – 2025. – № 6(182). – С. 23-33. – DOI 10.26730/1816-4528-2025-6-23-33

6 Guo R., Zhao Z., Huo S., Jin Z., Zhao J., Gao D. Research on state recognition and failure prediction of axial piston pump based on performance degradation data // Processes. — 2020. — Vol. 8, № 5. — Article 609.

7 Xiao C., Tang H., Ren Y., Kumar A. Fuzzy entropy assisted singular spectrum decomposition to detect bearing faults in axial piston pump // Alexandria Engineering Journal. — 2022. — Vol. 61. — P. 5869-5885. — DOI: 10.1016/j.aej.2021.11.019.

8 Рахутин М. Г., Занг Кханькуок, Кривенко А. Е., Чан Ванхiep ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ КАРЬЕРНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА // Записки Горного института. 2023. №261. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-temperatury-rabochey-zhidkosti-na-poteri-moschnosti-kariernogo-gidravlicheskogo-eksikatora> (дата обращения: 04.11.2025).

9 Гарсия Х., Риос-Колке Л., Пенья А., Рохас Л. «Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Industrial Equipment: An NLP-Assisted Review of Signal Processing, Hybrid Models, and Implementation Challenges». — Applied Sciences, 15(10), 2025, Article 5465. DOI: 10.3390/app15105465.

10 Ван Л., Лю Ю., Инь Х., Сунь В. «Fault diagnosis and predictive maintenance for hydraulic system based on digital twin model». — AIP Advances, 12(6), 065213, 2022. DOI: 10.1063/5.0098632.

УДК 621.225.4:62-192

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ОТКАЗОВ И МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ КОЛЕСНОГО РЕДУКТОРА ГИБРИДНОГО КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Линь Цюньхао¹, аспирант (Китай), Ю.А. Лагунова^{1,2}, д-р техн. наук, проф.
¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ
²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

В статье объектом исследования является планетарный редуктор колесного гибридного карьерного самосвала. Проведен системный анализ типичных видов отказов, характерных для условий эксплуатации гибридного привода, включая усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев, усталостный излом зубьев от изгиба и заедание зубьев. Особое внимание уделено ключевым факторам, инициирующим отказы: двунаправленным знакопеременным нагрузкам, вызванным рекуперативным торможением; резонансным явлениям, обусловленным высокочастотным возбуждением от электродвигателя; а также ухудшению условий смазки при частых пусках и остановках. На основе этого анализа выполнен обзор современных методов оптимизации конструкции, включающих оптимизацию макропараметров, топологическую оптимизацию, технологии микромодификации профиля и линии зуба, а также модели оценки надежности, базирующиеся на спектрах нагружения. Цель работы - в формировании теоретической базы и предоставлении технических решений для обеспечения высокой надежности при проектировании колесных редукторов гибридных карьерных самосвалов.

Ключевые слова: редуктор колесный ; гибридный карьерный самосвал ; виды отказов ; оптимизация конструкции

OVERVIEW OF FAILURE MODELS AND OPTIMIZATION METHODS FOR THE HYBRID MINING TRUCK WHEEL GEARBOX

Lin Qunhao, Yu.A. Lagunova

In this article, the object of research is the planetary gearbox of the wheel gearbox of a hybrid mining dump truck. A systematic analysis of typical types of failures characteristic of the hybrid drive operation conditions is carried out, including fatigue chipping of the working surfaces of the teeth, fatigue fracture of the teeth from bending, and tooth seizure. Special attention is paid to the key factors initiating failures: bi-directional alternating loads caused by regenerative braking; resonance phenomena caused by high-frequency excitation from the electric motor; and deterioration of lubrication conditions during frequent starts and stops. Based on this analysis, a review of modern methods of design optimization is performed, including optimization of macro parameters, topological optimization, micro-modification technologies of the profile and tooth line, as well as reliability assessment models based on loading spectra. The purpose of the work is to form a theoretical basis and provide technical solutions to ensure high reliability in the design of wheel gearboxes of hybrid dump trucks.

Keywords: wheel reducer; hybrid mining dump truck; types of failures; design optimization

1.Введение. В статье рассматривается планетарный редуктор колесного редуктора, являющийся ключевым элементом силовой передачи гибридного карьерного самосвала. Этот узел выполняет функции снижения частоты вращения, увеличения крутящего момента и восприятия нагрузок;

его надежность непосредственно определяет эффективность и безопасность эксплуатации всей машины. В работе систематизируются механизмы отказов этого компонента в условиях гибридного режима работы, обобщаются современные методы оптимизации его конструкции и направления исследований. Цель работы — предоставить теоретическую основу и технические решения для обеспечения высокой надежности при проектировании колесных редукторов гибридных карьерных самосвалов.

2. Анализ основных видов отказов и механизмов их возникновения

Основные виды отказов планетарного редуктора.

Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев. Под воздействием длительных циклических контактных напряжений на поверхности зуба зарождаются и развиваются усталостные трещины, что приводит к выкрашиванию металла и образованию раковин. Это наиболее распространенный вид контактного усталостного разрушения в планетарных передачах. В тяжелых случаях процесс прогрессирует до обширного выкрашивания, что приводит к полной потере способности передачи крутящего момента.

Усталостный излом зубьев от изгиба. В процессе зацепления зубчатых колес корень зуба испытывает максимальные изгибные напряжения и эффект концентрации напряжений. Под действием циклических нагрузок в галтели корня зуба зарождаются и развиваются усталостные трещины, что в конечном итоге приводит к излому зуба. Такой вид разрушения отличается внезапностью возникновения и представляет собой крайне опасный тип отказа.

Заедание зубьев. В процессе зацепления при тяжелых нагрузках трение между поверхностями зубьев вызывает резкий локальный рост температуры, что приводит к разрыву масляной пленки. Это обуславливает непосредственный металлический контакт и схватывание поверхностей двух зубьев, которые при последующем относительном скольжении разрываются, образуя царапины и задиры. Такое явление наиболее вероятно в условиях низких скоростей, высоких нагрузок и недостаточной смазки и часто сопровождается необратимыми повреждениями поверхности зубьев [1].

Основные причины отказов, характерные для гибридного режима работы

В отличие от традиционных автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, работающих в однонаправленном установившемся режиме, гибридные силовые установки имеют три характерные особенности эксплуатации. Эти особенности являются коренной причиной ускоренного развития трех основных видов отказов и резкого повышения, связанных с ними рисков. Механизмы воздействия этих факторов рассмотрены ниже:

Двунаправленная знакопеременная нагрузка, обусловленная рекуперативным торможением. В редукторах колесного редуктора традиционных автомобилей с ДВС передается только однонаправленный крутящий момент в режиме тяги: напряжение изгиба в корне зуба имеет пульсирующий

характер (коэффициент асимметрии цикла $R=0$), и рабочей является только одна сторона профиля зуба. В гибридных же автомобилях энергия рекупируется при торможении электродвигателем. В процессе торможения происходит смена рабочих поверхностей зубьев: стороны зуба, испытывающие растяжение и сжатие в корне, меняются местами. Это создает симметричный знакопеременный двунаправленный изгиб (коэффициент асимметрии цикла $R=-1$). Такой характер нагружения снижает предел выносливости зубьев при изгибе более чем на 20% по сравнению с однонаправленной нагрузкой, значительно ускоряя зарождение и распространение усталостных трещин в корне зуба и непосредственно повышая риск усталостного излома зубьев от изгиба [2].

Высокочастотная вибрация и риск резонанса, вносимые электродвигателем. В традиционных автомобилях с ДВС основным источником вибрационного возбуждения являются низкочастотные вибрации порядка работы двигателя. В гибридных же системах, оснащенных синхронными электродвигателями с постоянными магнитами, присутствуют высокочастотные электромагнитные возбуждения, а также гармонические возбуждения, обусловленные широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) инвертора. Диапазон частот этих возбуждений охватывает сотни и тысячи герц. Данные широкополосные высокочастотные возбуждения могут вступать в резонанс с собственными частотами планетарного редуктора колесного редуктора, а также с частотами зубчатого зацепления и их гармониками, вызывая резонансные явления в системе. Это резонансное взаимодействие приводит к значительному увеличению амплитуд контактных напряжений на поверхности зубьев и напряжений изгиба в корне зуба, одновременно ускоряя развитие как питтинга на поверхностях, так и усталостного излома зубьев от изгиба. Помимо этого, высокочастотные ударные импульсы в зацеплении нарушают стабильность масляной пленки на рабочих поверхностях зубьев, что дополнительно повышает вероятность возникновения схватывания.

Ухудшение режима смазки, вызванное частыми пусками, остановками и сменой режимов работы. Эксплуатация карьерных самосвалов характеризуется большим количеством циклов пуска, движения на подъем и торможения. В гибридных системах, для оптимального управления рекуперацией энергии, частота переключения режимов работы дополнительно повышается, что приводит к длительной работе редуктора в переходных (неустановившихся) режимах. В процессе низкоскоростного пуска под нагрузкой и при переходных процессах смены крутящего момента, в зацеплении зубчатых колес не успевает сформироваться устойчивая упругая гидродинамическая масляная пленка. Пары трения часто работают в режиме граничного смазывания и даже сухого трения. Одновременно с этим, знакопеременное действие двунаправленной нагрузки приводит к частым разрывам уже сформированной масляной пленки, что резко ухудшает смазывающую способность и напрямую инициирует схватывание рабочих поверхностей зубьев. Износ зубьев, вызванный недостаточной смазкой, уве-

личивает шероховатость поверхностей, что еще больше усиливает концентрацию контактных напряжений и ускоряет развитие питтинга.

3. Методы оптимизации конструкции

Оптимизация макропараметров и топологическая оптимизация

Оптимизация макропараметров является основой проектирования планетарного редуктора колесного редуктора. Ее суть заключается в подборе таких ключевых параметров, как модуль, угол профиля, коэффициенты смещения, ширина венца и количество сателлитов, для достижения баланса между требованиями к легкости конструкции и высокой надежности. Топологическая оптимизация, применяемая к таким несущим элементам, как водило и корпус редуктора, направлена на достижение оптимального сочетания жесткости и минимальной массы. Традиционные методы параметрической оптимизации часто основываются на подборе параметров и опыте проектировщика, что затрудняет нахождение глобального оптимума в условиях многокритериальности и множества ограничений. В последние годы в этой области широкое применение нашли алгоритмы интеллектуальной оптимизации, среди которых наиболее развитыми являются генетический алгоритм (ГА) и алгоритм роя частиц (PSO). Что касается топологической оптимизации, современные исследования сосредоточены главным образом на водиле – ключевом несущем элементе. С использованием методов топологической оптимизации, таких как метод переменной плотности и метод уровней, ставится цель минимизировать податливость конструкции при ограничении на объем материала. Это позволяет оптимизировать структуру водила, обеспечивая легкость при сохранении необходимой жесткости и виброустойчивости, а также снизить момент инерции конструкции. Такое решение повышает адаптивность к динамическим нагрузкам, характерным для гибридных систем с частыми пусками и остановками, уменьшая ударные воздействия переходных процессов.

Технология микромодификации

Технология микромодификации является ключевым средством снижения погрешности передачи, уменьшения ударных нагрузок в зацеплении, подавления вибрации и шума, а также повышения равномерности распределения нагрузки. Это важнейший метод адаптации редукторов гибридных карьерных самосвалов к условиям тяжелых, знакопеременных и двусторонних нагрузок. Микромодификация подразделяется на два основных типа: модификация профиля зуба и модификация линии (направления) зуба.

Модификация профиля зуба включает в себя такие виды, как срезание головки и ножки зуба, а также бочкообразная модификация профиля. Ее суть заключается в намеренном отклонении от теоретической эвольвенты путем снятия очень тонкого слоя материала. Это делается для компенсации упругих деформаций зубьев под действием тяжелых нагрузок, предотвращения жестких ударов в начале и конце зацепления, а также для снижения погрешности передачи и возбуждающих сил в зацеплении.

Модификация линии зуба включает бочкообразную модификацию, модификацию торцов и диагональную модификацию. Основная цель —

компенсировать неравномерность распределения нагрузки по линии зуба, вызванную изгибом валов, погрешностями изготовления и монтажа, а также зазорами в подшипниках. В частности, для планетарного редуктора колесного редуктора неравномерность распределения нагрузки между сателлитами является критическим фактором, определяющим его несущую способность и ресурс.[3]

Модели оценки надежности

Точная оценка надежности является основой и базой верификации для оптимизации конструкции. Современные исследования в этой области эволюционировали от традиционных проверок по статической прочности к прогнозированию усталостного ресурса в условиях полного спектра эксплуатационных нагрузок (на основе динамических спектров нагружения) и верификации с помощью междисциплинарного имитационного моделирования.

Список литературы

1. 杨钟胜.电动轮自卸车轮边减速器齿轮常见失效形式和预防措施[J].汽车工艺与材料,2009,(01):49-55.(Ян Чжуншэн. Распространенные виды отказов зубчатых передач колесного редуктора карьерного самосвала с электроприводом и меры их предупреждения [J]. Автомобильные технологии и материалы, 2009, (01): 49-55.)
2. Hong I J, Kahraman A, Anderson N. An Experimental Evaluation of High-Cycle Gear Tooth Bending Fatigue Lives Under Fully Reversed and Fully Released Loading Conditions[J]. Journal of Mechanical Design, 2021, 143(2): 023402.
3. 王鑫兴,王士军,王文龙,徐传法,王冉.基于齿轮微观修形的行星减速器减振降噪研究[J].机床与液压,2023,51(1):7-11.(Ван Синьсин, Ван Шицзюнь, Ван Вэньлун, Сюй Чуаньфа, Ван Жань. Исследование снижения вибрации и шума планетарного редуктора на основе микромодификации зубчатых колес [J]. Металлорежущие станки и гидравлика, 2023, 51(1): 7-11.)

УДК 621.225.4:62-192

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ИЗНОСА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С.А. Майоров, А.Р. Игнатова

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Рассматривается применение методов машинного обучения для предсказания износа горного оборудования.

Ключевые слова: машинное обучение, горное оборудование, износ, остаточный ресурс, интеллектуальный анализ данных, прогнозирование

MACHINE LEARNING FOR PREDICTING WEAR AND TEAR OF MINING EQUIPMENT

S.A. Mayorov, A.R. Ignatova

This article discusses the application of machine learning methods for predicting the wear and tear of mining equipment.

Keywords: machine learning, mining equipment, wear, residual resource, data mining, forecasting

Горное оборудование работает в условиях высоких нагрузок, вибраций, запыленности и перепад температур. Эти факторы напрямую влияют на износ узлов и механизмов, что приводит к внезапным отказам, простоям и дополнительным затратам. Важно вовремя заметить неисправность и спрогнозировать её возникновение до того, как она приведет к аварийной остановке. Обычно система планово-предупредительных ремонтов строится на регламентных сроках: отработал узел положенное количество часов - подлежит замене или осмотру. Однако на практике ресурс узла зависит не только от наработки, но и от множества других факторов - фактических нагрузок, состояния смежных систем, условий эксплуатации в конкретный период. В результате один и тот же узел на разных машинах может выходить из строя в разное время, и ориентироваться только на календарь становится недостаточно. Более гибкий подход - переход к обслуживанию по фактическому состоянию. Здесь ключевая задача заключается в том, чтобы на основе текущих данных об оборудовании определить, насколько близок узел к предельному состоянию. Но построить точную аналитическую модель, которая учитывала бы все взаимосвязи - нелинейность процессов износа, внешние факторы, историю предыдущих отказов, - крайне сложно. Поэтому в последнее время всё чаще обращаются к методам машинного обучения. Эти методы позволяют выявлять скрытые зависимости в данных, которые неочевидны при традиционном анализе, и строить прогнозы на основе фактической эксплуатационной информации.

В качестве входных данных для таких моделей могут выступать различные показатели: наработка оборудования, параметры нагрузки, температурные режимы, давление в гидросистемах, вибрационные характеристики, данные о проводимых ремонтах и ранее возникавших отказах. Вы-

бор конкретного алгоритма определяется исходными данными. Можно выделить несколько наиболее распространенных подходов:

1. Сверточные нейронные сети применяются в тех случаях, когда анализ ведется по вибрационным сигналам. Сеть автоматически выделяет частотные признаки, характерные для развивающихся дефектов (например, в подшипниковых узлах), и не требует ручного расчета диагностических параметров. В качестве обучающей выборки используются записи вибрации, соответствующие различным состояниям оборудования - от нормальной работы до предаварийного режима.

2. Градиентный бустинг на решающих деревьях нужен при работе с табличными данными разнородных признаков (тип породы, модель оборудования) без дополнительной предобработки и позволяет выявить нелинейные зависимости между условиями эксплуатации и скоростью износа узлов.

3. Рекуррентные нейронные сети и их модификации ориентированы на анализ временных рядов. За счет механизма запоминания предыстории они способны учитывать динамику изменения параметра (например, рост температуры масла) и прогнозировать его поведение на несколько шагов вперед.

4. Логистическая регрессия и метод опорных векторов используются в задачах бинарной классификации, когда требуется отнести текущее состояние узла к одному из классов - «норма» или «отказ». Преимущество этих методов в том, что они хорошо интерпретируются: например, коэффициенты регрессии могут показать, какой из контролируемых параметров вносит наибольший вклад в повышение риска отказа.

Важно то, что модели могут адаптироваться к изменениям условий эксплуатации. По мере накопления новых данных модель может дообучаться, что позволяет уточнять прогнозы. В итоге выстраивается цикл: данные от датчиков и АСУ ТП поступают на обработку, проходят этапы фильтрации и после чего используются для обучения или переобучения модели.

Заключение

Применение методов машинного обучения для анализа эксплуатационных данных дает возможность перейти от обслуживания по регламенту к обслуживанию по фактическому состоянию, что позволяет своевременно планировать ремонтные работы.

Список литературы

1. Храмовских В. А., Шевченко А. Н., Непомнящих К. А. «Адаптивный интеллектуальный анализ данных как инструмент для прогнозирования ресурса узлов горных машин и оборудования».
2. Применение технологий искусственного интеллекта в горнодобывающей промышленности // *Навр*.
3. Жуков В. А., Иванов И. И. Интеллектуальные методы диагностики технического состояния машин. — М.: Машиностроение, 2018.

УДК 621.879

О ВЛИЯНИИ КВАЛИФИКАЦИИ МАШИНИСТА НА НАДЕЖНОСТЬ ХОДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

В.В. Макарова^{1,2}, к.т.н., доцент

¹Уральский Федеральный Университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина

²Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Рассмотрено влияние квалификации машиниста на ходовое оборудование карьерного экскаватора. Определены ключевые знания и навыки, которые способствуют продлению срока службы ходового оборудования и обеспечения бесперебойной работы карьерного экскаватора. Установлена зависимость напряжения в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора от коэффициента управления, который учитывает навыки и опыт машиниста экскаватора.

Ключевые слова: гусеничное ходовое оборудование, надежность, квалификация машиниста, коэффициент управления.

ON THE INFLUENCE OF THE MACHINIST'S QUALIFICATIONS ON THE RELIABILITY OF THE UNDERCARRIAGE EQUIPMENT OF A QUARRY EXCAVATOR

V. V. Makarova

This article examines the impact of operator qualifications on the undercarriage of a quarry excavator. Key knowledge and skills that contribute to extending the service life of the undercarriage and ensuring the smooth operation of the excavator are identified. The relationship between stress in the metal structures of the undercarriage of a quarry excavator and the control coefficient, which takes into account the operator's skills and experience, is established.

Keywords: tracked undercarriage equipment, reliability, driver qualification, control coefficient.

Эффективность и надежность ходового оборудования карьерного экскаватора в значительной степени зависит от квалификации машиниста. Опытный машинист, обладающий глубокими и качественными знаниями конструкции, руководства по эксплуатации и систем управления экскаватором, способен продлить срок службы карьерного экскаватора [1].

Влияние квалификации машиниста на ходовое оборудование – важный аспект, которые часто недооценивают в рамках эксплуатации тяжелой техники. Но именно от навыков и опыта оператора напрямую зависит долговечность, производительность и безопасность одного из самых важных узлов – ходового оборудования.

Во-первых, опытный машинист умеет правильно выбирать режимы работы экскаватора в зависимости от горнотехнических условий, физико-механических свойств разрабатываемых горных пород и условий эксплуатации. Корректная оценка нагрузки, с которой может эксплуатироваться экскаватор, минимизирует износ гусениц, катков, ведущих колес. Машинист может предвидеть потенциальные проблемы, связанные с перегрузкой при перемещении экскаватора по неподготовленной площадке или при движении по абразивным породам. Также, правильная установка экскава-

тора в забое исключает неравномерную нагрузку на одну из гусениц, предотвращая деформацию ходовой части.

Во-вторых, квалифицированный машинист может оперативно среагировать на изменения в работе ходового оборудования, замечая посторонние шумы, вибрации и другие неисправности. Это позволяет выявлять неисправности на ранней стадии, когда ремонт прост и экономически выгоден. Своевременное устранение таких неисправностей предотвращает их превращение в серьезные отказы, которые приводят к дорогостоящему ремонту и внеплановым простоям.

В-третьих, квалификация машиниста проявляется в соблюдении правил эксплуатации и в проведении своевременного технического обслуживания ходового оборудования, что в свою очередь увеличивает межремонтный период. Это включает в себя регулярную смазку, проверку натяжения гусениц, очистку от грязи и камней.

Мастерство машиниста включает в себя комплекс навыков и приёмов работы, при которых отсутствуют удары и перегрузки механизмов [2]. Квалифицированный машинист за время цикла совершает минимальное число манипуляции органами управления, правильно устанавливает машину относительно забоя и транспортных средств, что исключает лишнее движения рабочего оборудования при копании и погрузке [2].

На рисунке 1 представлен график зависимости напряжения в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора от коэффициента управления, который учитывает навыки и опыт машиниста экскаватора [3]. С уменьшением коэффициента управления увеличивается напряжение металла в металлоконструкциях ходового оборудования. С увеличением напряжений и превышением допустимых значений будут развиваться трещины и увеличиваться количество неисправностей в элементах ходового оборудования.

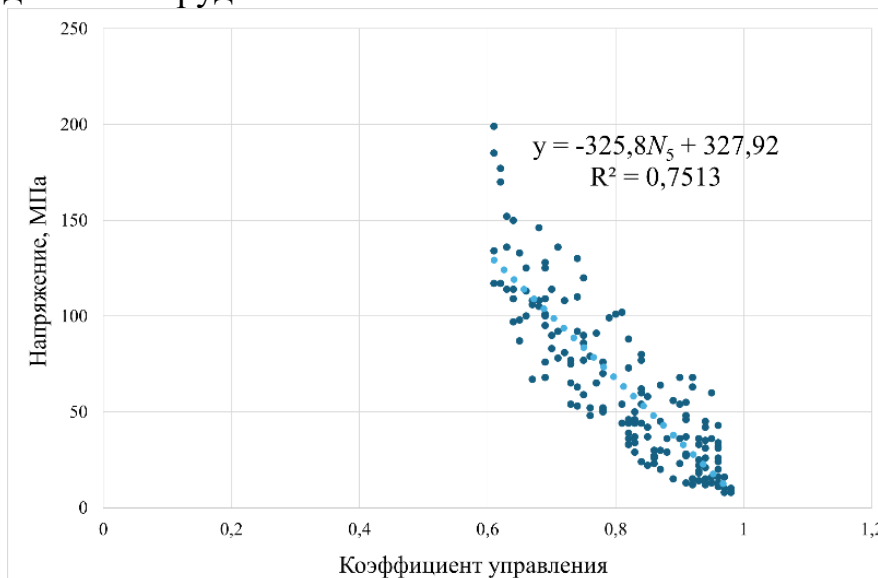


Рис. 1. График зависимости напряжения от коэффициента управления

Таким образом, квалификация машиниста — это комплекс знаний, навыков и умений, направленных на обеспечение безопасной и долговечной работы ходового оборудования карьерного экскаватора.

Список литературы

1. Абдрахманов А.А., Сафин Г.Г., Габитов И.А., Титанов А.В., Чернухин С.А., Великанов В.С. КВАЛИФИКАЦИЯ ПЕРСОНАЛА КАК ИНСТРУМЕНТ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12-2. С. 193-198; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35236> (дата обращения: 02.02.2026).
2. ЭКСПЛУАТАЦИЯ КАРЬЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. Изучение конструкции и правил эксплуатации карьерного экскаватора: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: С.Ю. Кувшинкин, П.В. Иванова, Д.А. Шибанов. СПб, 2021. – 43 с.
3. Макарова В. В. Повышение эффективности функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора в условиях ПАО «Ураласбест» : специальность 2.8.8 «Гео-технология, горные машины» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Макарова Валерия Викторовна, 2024. – 197 с.

УДК 622.233.05

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУРОВЫХ УСТАНОВОК PIT VIPER 231 НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

В.В. Маличенко¹, магистрант, **И.В. Телиман¹**, асс.-профессор, к.т.н.,
П.Г. Безкоровайный¹, ст.преподаватель

¹Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
г. Караганда, Казахстан

Представлен комплексный технический аудит эксплуатации буровых установок Epiroc Pit Viper 231 (PV231) в условиях Бозшакольского месторождения (Казахстан). На основе анализа наработки парка машин (5 638 м/ч и 4 039 м/ч) идентифицированы критические точки потери эффективности, связанные с эргономикой сервисного доступа, конструктивными особенностями систем пылеподавления и программными алгоритмами защиты. Предложен комплекс инженерных мероприятий по модернизации узлов, позволяющий сократить время неплановых простоев на 23 часа в месяц и повысить коэффициент технической готовности (КТГ) до целевых показателей.

Ключевые слова: буровая установка, Pit Viper 231, надежность, КТГ, оптимизация обслуживания, простой, эксплуатационные показатели.

WAYS TO INCREASE THE PRODUCTIVITY OF PIT VIPER 231 DRILLING RIGS IN OPEN PIT MINING OPERATIONS

Malichenko V.V., Teliman I.V., Bezkorovainyy P.G.

The article presents a comprehensive technical audit of the operation of Epiroc Pit Viper 231 (PV231) drilling rigs at the Bozshakol deposit (Kazakhstan). Based on an analysis of the fleet's performance (5,638 m/h and 4,039 m/h), critical points of efficiency loss were identified, related to the ergonomics of service access, design features of dust suppression systems, and software protection algorithms. A set of engineering measures for modernizing the units was proposed, which would reduce unscheduled downtime by 23 hours per month and increase the technical readiness factor (TRF) to the target values.

Keywords: drilling rig, Pit Viper 231, reliability, TRF, service optimization, downtime, performance indicators.

Интенсификация открытых горных работ неразрывно связана с оптимизацией производительности – буровзрывного комплекса. Современные высокопроизводительные буровые станки шарошечного бурения, такие как Epiroc Pit Viper 231, представляют собой сложные электрогидравлические системы, требующие адаптации к конкретным горно-геологическим и климатическим условиям эксплуатации [1]. Опыт работы на месторождениях Центральной Азии показывает, что даже незначительные, на первый взгляд, конструктивные недоработки могут приводить к существенным кумулятивным потерям рабочего времени.

В рамках исследования были проанализированы показатели двух буровых установок: RIG US091135 и RIG US091139. Суммарная наработка парка за отчетный период составила 9 677 моточасов (Таблица 1).

Таблица 1

Основные эксплуатационные показатели (на январь-июль 2025 г.)

Параметр	Ед. изм.	RIG US091135	RIG US091139	Среднее
Общая наработка	м/ч	5 638	4 039	-
Чистая производительность бурения	м/ч	37,83	34,96	36,40
Общая производительность машины	м/м.ч	22,15	22,31	22,23
Коэффициент готовности (Availability)	%	-	-	87,9
Использование (Utilization)	%	-	-	80,2
Средняя наработка на отказ (MTBF)	ч	-	-	93,5

Анализ структуры простоев (рис. 1) выявил, что наибольший вклад в неплановые потери вносят электрические (95,5 ч) и гидравлические системы (97,1 ч).

В плановых простоях наибольшее время занимают задержки, связанные с выполнением регламентных работ (Backlog — 207,7 ч) (рис. 2).

Аудит показал, что принцип быстрого отклика на неисправность на текущих моделях PV231 реализован не в полной мере. Конструкция, затрудняющая обслуживание, является, по мнению сервисных инженеров, "скрытой поломкой" в будущем.

Особого внимания заслуживает предложение по разделению защитных конструкций моторного отсека на две независимые секции с установкой их на вертикальные пальцы-оси. Это позволяет открывать их по принципу дверей, обеспечивая мгновенный доступ к гидравлическим и топливным магистралям без применения тяжелой грузоподъемной техники.



Рис. 1. Распределение unplanned простоев по системам оборудования



Рис. 2. Распределение плановых простоев по категориям

Модернизация системы пылеподавления. Система сухого пылеподавления на PV231 сталкивается с проблемами при прохождении обводненных горизонтов. Короткая траектория всасывающей гофры способствует попаданию влажного шлама непосредственно в бункер, что ведет к разрыву фильтров и повреждению крыльчатки гидромотора.

Инженерное предложение: Установка защитной резиновой шторки на всасывающем окне внутри рабочего стола. Шторка играет роль инерционного сепаратора: тяжелая фракция с влагой замедляется и оседает, в то время как сухая пыль беспрепятственно поступает в систему. Также рекомендуется переход на телескопическую конструкцию юбки (по аналогии с серией DML), что исключит засыпание скважины при опускании станка с домкратов.

Таблица 2

Предложения по оптимизации времени обслуживания

Узел / Датчик	Текущая проблема	Предложенное решение	Эффект (мин)
Вакуумный датчик компрессора	Требуется полный демонтаж кронштейна	Прорезка проушины для поворота	20 -> 5
Датчик фильтра сцепления	Невозможен съём без демонтажа базы	Удлинение кронштейна на 3-4 дюйма	30 -> 5
Датчик давления насоса	Упирается в плиту, доступ ограничен	Технологическое отверстие в плите	40 -> 10
Моторный отсек	Доступ перекрыт при утечках	Разделение конструкции на поворотные секции	240 -> 30

Коррекция программных алгоритмов защиты. Одной из причин низкой операционной эффективности являются ложные срабатывания алгоритма сравнения датчиков температуры компрессора. Текущий допуск расхождения в 3 В при длительности 200 мс является избыточно жестким и чувствительным к электромагнитным помехам [3, 4].

Решение: Программное увеличение времени фильтрации сигнала до 5–10 секунд. Данный интервал является безопасным с точки зрения тепловой инерции компрессора, но достаточным для фильтрации высокочастотных помех, что позволит исключить до 5 аварийных остановок за смену.

Внедрение предложенных изменений направлено на устранение 23 часов незапланированных простоев в месяц. При средней чистой производительности 36,4 м/ч это эквивалентно дополнительным 837 метрам пробуренных скважин ежемесячно на каждую единицу техники.

Снижение показателя MTTR (среднее время восстановления) за счет улучшения эргономики позволит сервисным службам более эффективно распределять ресурсы и сокращать время ожидания ремонта (Backlog), который на текущий момент является крупнейшей статьей потерь.

Вывод. Проведенный анализ подтверждает, что для достижения максимальной эффективности буровых установок Pit Viper 231 необходим переход от стандартных регламентов к адаптивной модели эксплуатации. Предложенные меры по модернизации кронштейнов, изменению алгоритмов RCS и доработке системы пылеподавления позволяют нивелировать конструктивные недостатки и существенно повысить КТГ оборудования в условиях реальных карьеров Казахстана.

Список литературы:

1. Артемьев В. Б. Стратегия, тактика и практика инновационного развития открытых горных работ // Уголь. — 2017. — № 2. — С. 4-11.
2. Epiroc. Pit Viper 231 Surface Blasthole Drill Rig: Technical Specifications and Performance Data. — Orebro, Sweden, 2024.

3. Karamov A., Kuttybayev A. Theoretical study of priority technical and technological indicators of drilling rigs in the context of the mining industry // Herald of Khmelnytskyi National University. — 2024. — Vol. 331, No. 2. — P. 112-118.
4. Ziganshin T. Extremum Seeking Control for Performance in Rotary Drilling. — Stockholm: Diva Portal, 2025. — 142 p.

УДК 622:658.562; 622.121; 622.142.1; 622.143.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СМАЗЫВАНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОБ

Е.А. Медведь ¹, студент, А.С. Смирнов ¹, студент

Научный руководитель Д.А. Шибанов, канд. техн. наук, доцент

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Санкт-Петербург, РФ

Эксплуатация машин в условиях запыленности, особенно железорудных карьеров, приводит к абразивному изнашиванию подшипников скольжения из-за инфильтрации частиц железорудной пыли в зазор пары трения. Предложен подход к обоснованию рациональных режимов работы автоматических систем смазки на основе визуального анализа проб пластичного смазочного материала. С помощью цифрового микроскопа исследована проба с наработкой 72 часа ролика седлового подшипника экскаватора. Проведена количественная оценка продуктов изнашивания. Предложен критерий рациональной настройки системы АЦСС по концентрации абразивных частиц в пробе смазочного материала.

Ключевые слова: абразивный износ, подшипник скольжения, пластичная смазка, АЦСС.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RATIONAL LUBRICATION MODES FOR FRICTION UNITS BASED ON THE RESULTS OF MICROSCOPIC ANALYSIS OF SAMPLES

Medved E.A., Smirnov A.S.

Operation of machinery in dusty environments, especially in iron ore open-pit mines, leads to abrasive wear of plain bearings due to the infiltration of iron ore dust particles into the clearance of the friction pair. An approach to substantiating rational operating modes of automatic lubrication systems based on visual analysis of grease samples is proposed. A sample with 72 hours of operation from the saddle bearing roller of an excavator was examined using a digital microscope. A quantitative assessment of wear products was carried out. A criterion for rational adjustment of the automatic centralized lubrication system based on the concentration of abrasive particles in the grease sample is proposed.

Keywords: abrasive wear, plain bearing, grease, automatic centralized lubrication system.

В составе современных машин и оборудования горной и нефтегазовой отрасли присутствуют подшипники скольжения. Они используются в опорах как тихоходных, так и быстроходных узлов, работающих в условиях вибрационных и ударных нагрузок. Подшипники скольжения применяются в случаях, когда по условиям сборки опоры должны быть разъёмными

(например, в опорах коленчатых валов), при ограниченных радиальных габаритах, а также при эксплуатации в абразивных и агрессивных средах.

Благодаря хорошей демпфирующей способности и динамическим свойствам, подшипники скольжения легко воспринимают значительные вибрационные и ударные нагрузки. К достоинствам подшипников скольжения также относится высокая предельная быстроходность, практически неограниченная при обеспеченной устойчивости. В режиме жидкостного трения пара вал-подшипник обладает низким коэффициентом трения и высоким КПД, а также в таких условиях подшипники обладают практически неограниченной долговечностью при нормальных режимах работы. Из конструктивных преимуществ можно отметить небольшие радиальные размеры, а также возможность выполнить подшипник разъемным, что обеспечивает удобство монтажа.

К недостаткам подшипников скольжения можно отнести необходимость применения специализированных систем смазки, обеспечивающих требуемые параметры смазывания. В переходных режимах (пуск и остановка) возможен износ, связанный с неустойчивостью движения и нарушением сплошности масляной плёнки. Дополнительным недостатком является необходимость применения дорогостоящих антифрикционных материалов, в том числе цветных металлов и специальных сплавов [1].

Основной причиной отказа узлов пары трения системы «вал-втулка», в котором втулка является подшипником скольжения, является абразивное изнашивание. Особо выражено это проявляется при работе машин и механизмов в условиях большой запыленности [2]. Наиболее тяжелыми условиями по критерию запыленности являются добычные участки железорудных карьеров. В составе железорудной пыли содержится высокая концентрация частиц железистого кварцита, а также диабаз, пегматита и гранита, которая в сочетании с высокой твердостью этих минералов приводит к интенсивному изнашиванию узлов трения.

При работе узла трения в таких условиях происходит постепенная инфильтрация взвешенных в воздухе абразивных частиц в зазор между валом и втулкой. По мере увеличения зазора между валом и втулкой скорость инфильтрации увеличивается. Таким образом, можно говорить о двух факторах, влияющих на интенсивность абразивного изнашивания – это время инфильтрации и величина зазора между трущимися поверхностями.

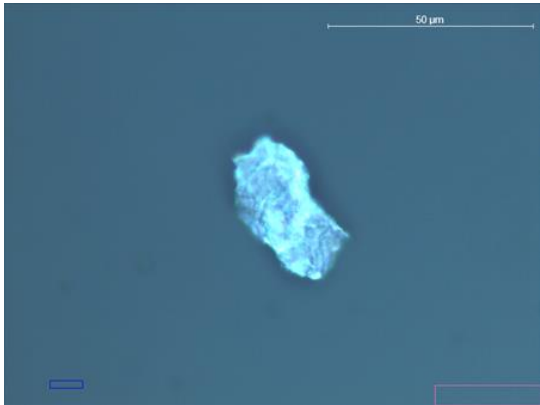
Снижение концентрации абразивных частиц в смазочном материале узла трения обеспечивается своевременной подачей новой порции смазочного материала автоматической централизованной системой смазки (АЦСС) в данный узел. При настройке системы АЦСС осуществляется регулирование как объема подаваемого смазочного материала в точку смазывания, так и интервалом времени между его подачами [3].

В свою очередь, указанные регулировки осуществляются субъективно оператором машины или механиком, обеспечивающим работоспособность этой машины. Предлагается обосновать рациональные объем и интервалы подачи смазочного материала в узел смазывания на основе оценки концен-

трации абразивных частиц в смазочном материале. Оценку концентрации абразивных частиц предлагается проводить посредством визуального анализа по количественному содержанию на площадь по взятой пробе с использованием цифрового микроскопа с увеличением не менее 50х.

В рамках исследования проведен анализ густого смазочного материала *Gazpromneft Grease L EP 1*. Смазочный материал с наработкой 72 часа, собран с ролика седлового подшипника карьерного экскаватора. На первом этапе целью данного анализа смазочного материала было определение концентрации, форм и размеров продуктов изнашивания в отработанном смазочном материале. На лабораторное стекло размером 77х26 мм наносился слой смазочного материала. Средняя площадь получившегося пятна составила 215 мм².

Пятно исследуемого смазочного материала было разделено на 9 зон (рис. 1). Следует отметить, что площадь каждой образованной зоны равна площади при пятикратном увеличении микроскопа. Каждая из зон пятна смазочного материала детально рассматривалась под микроскопом последовательно с кратностью увеличения 5х, 10х, 20х и 50х.

	
<i>Рис. 1. Исследуемый смазочный материал</i>	<i>Рис. 2. Частица размером 39,9 мкм в 5 зоне пятна пробы смазочного материала при увеличении 50х</i>

В результате проведенного анализа пробы было выявлено, что продукты изнашивания имеют размеры до 40 мкм. Форма частиц – угловатая, оскольчатая, в частности частицы с острыми гранями, ребрами и вершинами, неправильной формы (рис. 2).

Суммарно по всем обозначенным зонам пятна смазочного материала выявлено продуктов изнашивания размером менее 5 мкм более 1076 ед. и размером более 5 мкм – 144 ед. Результаты анализа концентрации абразивных частиц в пробе смазочного материала приведены в таблице 1.

Вывод. В рамках исследования предлагается опытным путем для конкретных условий эксплуатации подбирать интервал времени между подачами смазочного материала и его объем на основе визуального контроля с помощью цифрового микроскопа образца пластичного смазочного материала. Критерием рационального обоснования настроек режимных параметров АЦСС является отсутствие абразивных частиц в паре трения.

Таблица 1 – Результаты анализа концентрации абразивных частиц в пробе смазочного материала

Зоны	Количество, ед.		Наиболее крупные размеры (длина), мкм
	Более 5 мкм	Менее 5 мкм	
1	26	106	33,8; 30,0; 27,4; 15,5; 15 и меньше
2	23	90	36,6; 31,1; 20,7; 15,0; 14,9 и меньше
3	22	117	20,5; 19,7; 17,8; 15,0 и меньше
4	12	102	26,4; 24,3; 20,0 и меньше
5	20	178	39,9; 25,0; 21,0; 18,3; 16,0; 14,5 и меньше
6	9	123	Все размером порядка 6-8 мкм
7	3	97	45,0; 11,5 и меньше
8	10	110	27,5; 20,0; 15,0; 14,1 и меньше
9	19	153	40,5; 22,5; 19,5; 15,0; 15,0; 15,0; 14,9 и меньше
Итого	144	1076	

Список литературы

1. Цветков Ю.Н., Петров В.А., Горбаченко Е.О. Сравнительные триботехнические характеристики полимерных материалов для дейдвудных подшипников в условиях граничной смазки // Судостроение. – 2023. – №1(866). – С. 43-50.
2. Абдельвахаб Агагена, Михайлов А. В. Влияние железорудной пыли на изнашивание поверхности штоков гидроцилиндров карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 5–23. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_5.
3. Колпаков В.О., Шибанов Д.А., Селезнев М.С., Хамидов О.У. Анализ функционирования систем централизованного смазывания узлов карьерных экскаваторов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – № 34. – С. 122-128.

УДК 622.2:629.3.083.4

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

К.С. Репкина¹, аспирант

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

В статье приведены основные виды загрязнения гидравлической жидкости в гидросистемах горного оборудования. Отмечены основные причины ухудшения свойств жидкости (загрязнение частицами и водой) и связанные с ними ускоренное изнашивание элементов гидросистемы и рост аварийных простоев. Отмечены важность комплектования горного оборудования гидравлической жидкостью и предотвращение загрязнения окружающей среды при аварийных разливах и утечках. Вариантом сокращения текущих расходов на приобретение гидравлической жидкости может служить применение мобильных фильтрационных установок для очистки гидравлической жидкости с целью ее повторного использования.

Ключевые слова: горное оборудование, гидравлическая система, гидравлическая жидкость, загрязнения, утечки и разливы, фильтрация, мобильная установка.

HYDRAULIC FLUID CONTAMINATION DURING OPERATION OF MINING EQUIPMENT

K.S. Repkina

This article describes the main types of hydraulic fluid contamination in mining equipment hydraulic systems. It identifies the main causes of fluid deterioration (particle and water contamination) and the associated accelerated wear of hydraulic system components and increased downtime. The importance of equipping mining equipment with hydraulic fluid and preventing environmental pollution from accidental spills and leaks is highlighted. A way to reduce ongoing hydraulic fluid purchasing costs is to use mobile filtration units to purify hydraulic fluid for reuse.

Keywords: mining equipment, hydraulic system, hydraulic fluid, contamination, leaks and spills, filtration, portable unit.

Гидравлический привод горных и строительных машин (экскаваторы, погрузчики, самосвалы, бульдозеры) функционирует в режимах высоких нагрузок и переменных температур, при этом рабочая среда зачастую характеризуется повышенной запыленностью и влажностью. В таких условиях гидросистема становится одним из наиболее уязвимых узлов, поскольку работоспособность насосов, распределителей и гидроцилиндров напрямую определяется качеством рабочей жидкости и стабильностью ее свойств [1].

Практика эксплуатации показывает, что отказы гидросистем часто носят комбинированный характер: деградация жидкости ускоряет износ элементов, а ухудшение состояния уплотнений и соединений увеличивает риск утечек. Дополнительно на надежность влияет «человеческий фактор» обслуживания: долив на месте эксплуатации, вскрытие контуров, замена фильтров и рукавов, выполняемые в неблагоприятной среде, повышают вероятность вторичного загрязнения. В результате гидравлическая жидкость перестает быть «нейтральным» компонентом и превращается в один из основных объектов управления при обеспечении готовности техники.

Гидравлическая жидкость в горных машинах одновременно выполняет несколько функций: передача энергии, смазка и противоизносная защита, уплотнение рабочих зазоров, отвод тепла, антикоррозионная защита. При этом ресурс гидросистемы определяется не только конструкцией агрегатов, но и тем, насколько стабильно жидкость сохраняет необходимые характеристики в реальных условиях эксплуатации.

Для горных машин характерны три группы источников загрязнений:

1) остаточные (первичные) – связанные с производством и монтажом компонентов, а также с этапом ввода машины в эксплуатацию;

2) внешние (естественные) – проникновение минеральной пыли и влаги из окружающей среды через дыхательные элементы баков, изношенные уплотнения и при операциях технического обслуживания. В условиях горного производства загрязнение гидравлической жидкости минеральной пылью стоит рассматривать в качестве определяющего фактора. На рисунке показан процесс погрузки взорванной гранитной массы экскаватором Cat 374 на гранитном карьере «Гавриловского карьероуправления» в Выборгском районе Ленинградской области. Погрузка сопровождается интенсивным пылеобразованием в рабочей зоне экскаватора, что является потенциальным источником загрязнения гидравлической жидкости через сапун гидробака и уплотнения силовых гидроцилиндров.



Рис. Пылеобразование при погрузке взорванной гранитной массы

3) генерируемые (внутренние) – продукты изнашивания (металлические частицы) и вторичные загрязнения, возникающие при контакте пар трения с абразивными включениями.

Загрязнения различной природы приводят к типовым негативным эффектам: абразивное изнашивание, заиливание и заклинивание дроссельных и распределительных устройств, рост внутренних утечек и потерь энергии, повышение уровня шума и кавитационные явления. В условиях присутствия воды повышается склонность к пенообразованию и ускоряется старение жидкости, что дополнительно ухудшает смазывающие свойства и устойчивость присадочного пакета [2].

Важной особенностью горных машин является значительный объем рабочей жидкости в гидросистеме и высокий уровень рабочих давлений. Даже при небольших дефектах соединений или уплотнений потери жидкости могут быть экономически заметными, а аварийные ситуации, например, повреждение рукавов высокого давления и фитингов, приводят к вне-

запному разливу и вынужденным простоям. С точки зрения эксплуатации критичны два аспекта:

1) Обеспечение гидравлической жидкостью определяется не только объемом бака, но текущими потребностями при плановых заменах, доливках при утечках и восполнении требуемого объема гидравлической жидкости после аварийных ситуаций.

2) Разливы гидравлической жидкости сопровождаются загрязнением почвы и риском попадания в водоприемники. Кроме того, после аварийного разлива обслуживание проводится в условиях ограниченного времени и запыленной площадки, что повышает вероятность внесения дополнительного загрязнения при доливке и сборке контура [3].

Следовательно, управление жидкостью должно включать не только плановую замену по наработке, но и мероприятия, учитывающие нерегламентированные события: частичные потери, вынужденные доливки. В этих случаях становится важным наличие подготовленного резерва очищенной жидкости, пригодной для безопасного восполнения объема без ухудшения класса чистоты.

Традиционная схема обеспечения чистоты жидкости в гидросистеме опирается на штатные фильтры. Однако в тяжелых условиях горных работ их возможностей бывает недостаточно из-за ограниченной грязеемкости, необходимости частой замены и риска вторичного загрязнения при росте перепада давления и при обслуживании фильтров [4]. Поэтому целесообразно дополнять штатную фильтрацию автономной механической очисткой жидкости вне гидросистемы.

Включение в программу технического обслуживания операции off-line фильтрации как мероприятия «по состоянию» и/или по факту неблагоприятных событий (запыленная работа, утечки, вскрытие контура, замена РВД, снижение ресурса линейных фильтров, ухудшение чистоты по контрольным измерениям) подразумевает улучшение следующих факторов:

- снижение концентрации твердых частиц и ограничение роста максимальной крупности загрязнений, что уменьшает абразивное воздействие на пары трения;
- увеличение фактического ресурса линейных фильтров и снижение частоты их замены;
- возможность частичной замены при сохранении части жидкости, еще не выработавшей ресурс до плановой замены;
- формирование резерва очищенной жидкости для доливок после мелких утечек и локальных разливов, что снижает потребность постоянно использовать только новую жидкость.

Эффективность поддержания чистоты гидравлической жидкости фильтрацией на мобильных фильтрационных установках проявляется в [14]:

- фильтрации жидкости после обкатки машин (50-100 моточасов);
- периодической фильтрации жидкости в баках гидравлических систем;

- фильтрации жидкости при сезонной замене;
- низкой трудоемкости проведения очистки;
- увеличении ресурса штатных фильтров гидросистем;
- снижении затрат на комплектацию и утилизацию жидкости;
- снижении затрат и сокращение простоев на ТО и Р;
- повышении ресурса гидравлической жидкости.

Такой подход позволяет связать обслуживание жидкости с показателями технического состояния, а не только с календарной/ресурсной периодичностью, что особенно важно для машин с различной долей работы в тяжелых режимах [5].

Вывод. При эксплуатации горных машин в запыленной и влажной среде состояние гидравлической жидкости является ключевым фактором надежности гидросистем. Утечки и аварийные разливы, нередко возникающие при повреждениях элементов гидросистемы, приводят не только к прямым потерям жидкости, но и к росту рисков вторичного загрязнения при ремонте и доливках на месте эксплуатации. Для управления техническим состоянием гидросистем целесообразно рассматривать гидравлическую жидкость как управляемый объект обслуживания и дополнить штатную фильтрацию автономной механической очисткой на мобильных фильтрационных установках. Включение операции off-line очистки гидравлической жидкости в регламент ТО, как по наработке, так и по фактическому состоянию, позволяет повысить чистоту жидкости, продлить ресурс фильтров и жидкости, снизить вероятность внезапных отказов и сократить затраты на приобретение гидравлической жидкости.

Список литературы

1. Ng F., Harding J.A., Glass J. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 83 (2017) 176-193. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.06.006.
2. Krzysztof Władzielczyk, Piotr Kipczak. Ageing process of hydraulic oil in single-bucket excavators in rock mining *New Trends in Production Engineering – Volume 2, issue 1, 2019.* pp. 130-139. DOI 10.2478/ntpe-2019-0014.
3. Guerin T. Root causes of fluid spills from earthmoving plant and equipment: Implications for reducing environmental and safety impacts. *Engineering Failure Analysis*, Volume 45, October 2014, Pages 128-141. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.06.011.
4. Агагена Абдельвахаб, Репкина К.С., Михайлов А.В. Корректировка регламента технического обслуживания карьерного гидравлического экскаватора на руднике Бухадра // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство.* – 2024. – № 24. – С. 146-151. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-146-151.
5. Sandeep Mishra, Neeraj Kumar Goyal, Arup Mukherjee. Reliability Analysis and Life Cycle Cost Optimization of Hydraulic Excavator *March 2024 Journal of Reliability and Statistical Studies* 16(2): 297-328. DOI:10.13052/jrss0974-8024.1626

УДК 622:658.562; 622.121

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЁННОСТИ СМАЗОЧНОГО МАСЛА РЕДУКТОРОВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ НА ОСНОВЕ БАЗОВОЙ ШКАЛЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

А.Э. Салимов¹, аспирант, С.Л. Иванов¹, д-р техн. наук, проф.

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
г. Санкт-Петербург, РФ

Техническое состояние редукторов карьерных экскаваторов определяет надёжность и непрерывность технологического процесса, а наличие продуктов изнашивания в масле служит индикатором интенсивности этого процесса. Рассмотрены ограничения традиционных капельных методов анализа, не обеспечивающих количественной связи между характеристиками масляного пятна и массовой долей ферромагнитных частиц. Предложен способ диагностики на основе базовой шкалы загрязнённости, калиброванной по модельным образцам масла с известной массовой долей продуктов изнашивания. Описана методика подготовки эталонных образцов, отбора проб с магнитным улавливателем и расчёта относительной концентрации несгораемых частиц. Показано, что базовая шкала обеспечивает количественную оценку классов чистоты масла и применима для экспресс-диагностики технического состояния редукторов в эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, трансмиссионный редуктор, смазочное масло, ферромагнитные частицы, продукты износа, базовая шкала загрязнённости, экспресс-диагностика, обслуживание по фактическому состоянию

ASSESSMENT OF GEARBOX OIL CONTAMINATION IN MINING EXCAVATOR TRANSMISSIONS USING A BASIC SCALE OF FERROMAGNETIC WEAR PAR- TICLES

A.E.Salimov, S.L.Ivanov

The technical condition of mining excavator gearboxes determines the reliability and continuity of the process, and the presence of wear products in the oil serves as an indicator of the intensity of this process. The limitations of traditional droplet analysis methods, which do not provide a quantitative relationship between the characteristics of the oil slick and the mass fraction of ferromagnetic particles, are discussed. A diagnostic method is proposed based on a basic contamination scale calibrated against model oil samples with a known mass fraction of wear products. A methodology for preparing reference samples, collecting samples with a magnetic collector, and calculating the relative concentration of non-combustible particles is described. It is shown that the basic scale provides a quantitative assessment of oil cleanliness classes and is applicable for rapid diagnostics of the technical condition of gearboxes under operating conditions.

Keywords: quarry excavator, transmission gearbox, lubricating oil, ferromagnetic particles, wear products, basic contamination scale, express diagnostics, condition-based maintenance

Введение. Техническое состояние редукторов карьерных экскаваторов непосредственно определяет надёжность и непрерывность производственного процесса. В условиях интенсивных динамических нагрузок, переменных режимов работы и абразивного воздействия эксплуатационная деградация узлов трения неизбежно сопровождается образованием продуктов изнашивания, преимущественно ферромагнитной природы.

Концентрация частиц в смазочном масле является интегральным показателем интенсивности изнашивания элементов зубчатых передач и

подшипниковых узлов. Контроль состояния масла традиционно рассматривается как один из наиболее информативных способов диагностики трансмиссионных механизмов.

Однако существующие методы анализа характеризуются либо высокой трудоёмкостью и необходимостью применения лабораторного оборудования, либо носят преимущественно качественный характер, основанный на визуальной интерпретации структуры масляного пятна. В последнем случае отсутствует объективная количественная связь между аналитическим отпечатком и массовой долей твёрдых несгораемых частиц загрязнения, что снижает метрологическую достоверность результатов и ограничивает возможность их использования в системах прогнозирования отказов.

Особую проблему представляет применение универсальных эталонов оценки загрязнённости. Характер продуктов изнашивания определяется конструктивными особенностями редуктора, материалами зубчатых передач, режимами нагружения и типом применяемого масла. Использование обобщённых шкал без учёта этих факторов приводит к систематической погрешности и снижению диагностической чувствительности метода [1].

В условиях перехода к обслуживанию по фактическому состоянию возрастает потребность в разработке способов, обеспечивающих количественную оценку массовой доли опасных ферромагнитных частиц, воспроизводимость результатов в полевых условиях и адаптацию диагностического критерия к конкретному типу масла и узла.

Цель исследования – разработка и методическое обоснование способа количественной оценки загрязнённости смазочного масла редукторов на основе формирования базовой шкалы классов чистоты, обеспечивающей связь между аналитическим отпечатком масла и массовой долей ферромагнитных продуктов изнашивания.

Материалы и методы

Построение базовой шкалы загрязнённости

Метод построения базовой шкалы основан на формировании калиброванного ряда эталонных образцов масла с заранее известной массовой долей ферромагнитных продуктов изнашивания, имитирующих реальные эксплуатационные загрязнения масла редуктора.

В качестве нулевого эталона принимается образец чистого масла ТАП-15, не содержащий механических примесей (класс 0). Далее формируется серия искусственно загрязнённых образцов с возрастающей концентрацией ферромагнитных частиц в диапазоне от 0,0005% до 0,064% массовой доли загрязнений, охватывающим весь эксплуатационный интервал – от допустимого уровня загрязнения масла до критического [2].

В качестве загрязнителя используются продукты изнашивания, отобранные из реального редуктора либо имитирующие их по химическому составу и фракционному распределению. Навески загрязнителя массой M_n подготавливаются с шагом, соответствующим установленным классам чистоты и помещаются в контрольный объём чистого масла мас-

сой M_m . После интенсивного перемешивания получают однородную модельную пробу с известной массовой долей загрязнения.

Отбор пробы и формирование аналитического отпечатка

Отбор пробы из каждого модельного образца осуществляется устройством с очищаемым магнитным улавливателем частиц. Принцип действия устройства основан на концентрации ферромагнитных частиц на магнитной поверхности, формировании воспроизводимого объёма масляной плёнки (0,05 мл) и принудительном переносе капли на фильтровальную бумагу.

Сформированная капля переносится на предварительно взвешенную фильтровальную бумагу. После впитывания образуется характерный аналитический отпечаток, включающий наружную диффузионную зону, внутреннее кольцо и центральное ядро с концентрированными частицами загрязнения.

Фиксируются геометрические параметры отпечатка: наружный диаметр пятна D , внутренний диаметр d , отношение диаметра ядра к диаметру отпечатка $d_{\text{яд}}/D$, диаметр, занимаемый частицами загрязнителя d_0 . Фильтровальная бумага с пробой взвешивается (масса M_6), фиксируется на видео- или фото-носитель, а затем подвергается сжиганию в специальной емкости [2, 3].

Относительная концентрация твёрдых несгораемых частиц рассчитывается по формуле:

$$Z = \frac{M_{\text{бп}} - M_{\text{п}}}{M_6 - M_{\text{ф}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $M_{\text{бп}}$ – масса пепла после сжигания бумаги с пробой; $M_{\text{п}}$ – несгораемая часть фильтровальной бумаги с загрязнением; M_6 – масса бумаги с масляным пятном; $M_{\text{ф}}$ – масса чистого фильтра.

Полученные значения массовой доли загрязнения сопоставляются с соответствующими навесками и формируют калиброванную градацию классов чистоты.

Результаты и обсуждение

В результате создаётся базовая шкала загрязнённости, представляющая собой визуальный ряд (рис. 1) аналитических отпечатков с количественной привязкой к массовой доле ферромагнитных частиц и эксплуатационными пороговыми значениями.

Шкала включает следующие классы чистоты:

- **Класс 0 (0%)** – чистое масло, однородная структура пятна (на рис.1 не показан);
- **Класс 1 (0,0005–0,001%)** – допустимое загрязнение, минимальные включения (соответствует 10-11 классам чистоты по ГОСТ 17216-2001.);
- **Класс 2 (0,002–0,004%)** – повышенное загрязнение, заметные ферромагнитные частицы (соответствует 12-13 классам чистоты по ГОСТ 17216-2001.);
- **Класс 3 (0,008–0,0016%)** – предельное состояние, интенсивное ядро пятна (соответствует 14-15 классам чистоты по ГОСТ 17216-2001.);

- **Класс 4** (0,032 – 0,064%) – критическое загрязнение, требует немедленной замены масла (соответствует 16-17 классам чистоты по ГОСТ 17216-2001.).

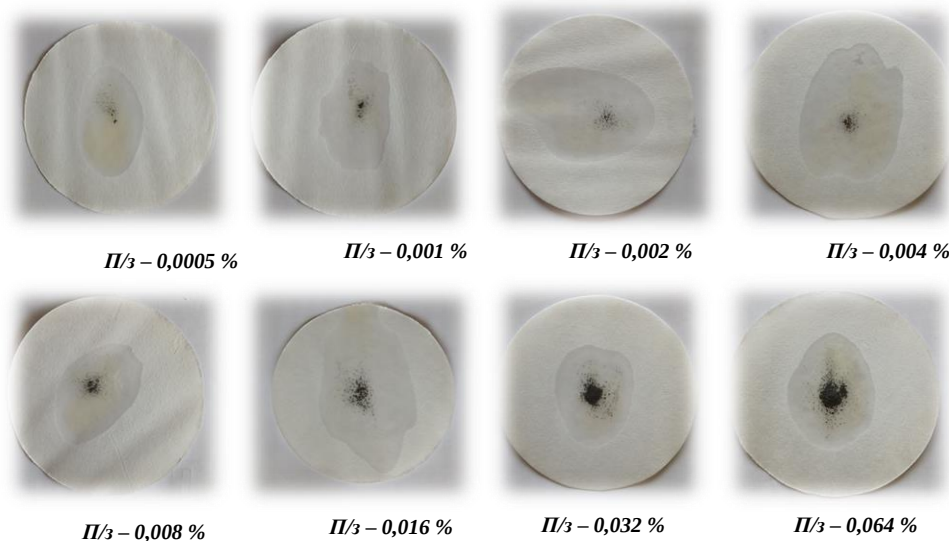


Рис. 1. Базовая шкала загрязнённости смазочного масла ТАП-15 редукторов карьерных экскаваторов (материалы автора)

Опробование применения шкалы для оценки реальных проб масла редукторов подъема и напора экскаватора ЭКГ-20К показало удовлетворительное совпадение результатов, полученных по вышеописанной методике, лабораторным исследованиям. По значению массовой доли ферромагнитных частиц установлено, что контролируемые редукторы находились один в состоянии прогрессирующего износа (класс 3), а второй – в допустимых пределах (класс 1).

Базовая шкала обеспечивает количественную интерпретацию результатов анализа и снижает влияние субъективных факторов. Диагностическая чувствительность метода позволяет выявлять начальные стадии износа, что особенно важно для перехода к предиктивным стратегиям технического обслуживания.

Практическая значимость

Разработанный метод может применяться непосредственно в процессе эксплуатации оборудования без привлечения дополнительного лабораторного оборудования. Данные, полученные при анализе масла, используются для оценки риска отказов, обоснования регламентного технического обслуживания и снижения вероятности внезапных простоев.

Метод целесообразно интегрировать в системы обслуживания по фактическому состоянию трансмиссионных узлов карьерных экскаваторов. Базовая шкала адаптируется к конкретному типу масла и редуктора, что повышает точность диагностики и обеспечивает прослеживаемость изменений.

Применение метода на карьере подтверждено при оценке состояния редукторов экскаватора ЭКГ-20К, где выявлены различия в техническом состоянии узлов трансмиссии, соответствующие эксплуатационным данным.

Предложенная методика применима как для трансмиссий с картерной смазкой, так и с циркуляционной системой смазывания, разница состоит лишь в месте забора пробы, так при контроле редуктора подъема проба берется непосредственно из картера, функционирующего редуктора, а для редуктора напора – в непосредственной близости фильтра насосной станции системы смазки. Мониторинг состояния масла с заданной периодичностью позволяет оценить динамику процесса изнашивания и, соответственно заблаговременно принимать меры по снижению рисков отказа.

Заключение

Разработан способ количественной оценки загрязнённости смазочного масла редукторов карьерных экскаваторов на основе базовой шкалы ферромагнитных частиц. Метод обеспечивает воспроизводимую связь между характеристиками аналитического отпечатка и массовой долей продуктов изнашивания.

Базовая шкала, калиброванная по модельным образцам, формирует градацию классов чистоты с эксплуатационными пороговыми значениями и применима для экспресс-диагностики в полевых условиях. Результаты анализа реальных проб масла подтвердили диагностическую эффективность метода и его соответствие лабораторным данным.

Применение базовой шкалы повышает точность оценки технического состояния трансмиссионных систем и способствует реализации стратегий предиктивного технического обслуживания.

Список литературы

1. Маньшев Д.А., Селезнев М.В. Результаты оценки показателей качества трансмиссионного масла при эксплуатации // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 7 (86). – С. 49–58.
2. Салимов А.Э., Иванов С.Л., Потапов Е.А. Оценка состояния трансмиссии по результатам проб масла в магнитном поле // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования: Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 11–13 ноября 2025 г. — Пермь: ПНИПУ, 2025. — С. 128–132.
3. Мякотных А.А. Совершенствование технологического процесса технического обслуживания экскаватора на основе оценки загрязнённости рабочей жидкости его гидравлической трансмиссии // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XIX Всерос. конф.-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 г. – СПб., 2021. – С. 139–140.

КАРЬЕРНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТ НЕФТИ И ГАЗА

***Чтоб дробилки не стояли,
Чтобы фабрика жила,
Чтобы нефть из дальней дали
На заводы потекла,
Чтобы газ был нам подмогой
И в дома нёс благодать –
Надо знать про транспорт много
И уметь его создать!***

Доц. П.А. Жиганов

УДК 656.1

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА РАБОТУ АВТОТРАНСПОРТА В КАРЬЕРЕ

К.В. Абдрахманова¹, преподаватель, **М.О. Краснова¹**, студент

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Рассмотрено применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также технические характеристики современных дронов. назначение безлюдных технологий, приведены примеры систем, используемых на транспорте. Показаны ключевые факторы, влияющие на внедрение БПЛА в управление автотранспортом в карьере.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, беспилотный летательный аппарат, мониторинг, горная порода.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE SYSTEM ON THE OPERATION OF VEHICLES IN A QUARRY

K.B. Abdrakhmanova, M.O. Krasnova

The application of unmanned aerial vehicles, as well as the technical characteristics of modern drones, is considered. the purpose of unmanned technologies, examples of systems used in transport are given. The key factors influencing the introduction of UAVs in the management of vehicles in the career are given.

Keywords: road transport, unmanned aerial vehicle, monitoring, rock formation, rock.

Одной из главных задач карьера является транспортировка горной породы, где используется различный карьерный транспорт, который представляет собой сложную систему, состоящую из подвижного состава, вспомогательного оборудования, транспортных коммуникаций, системы управления, средств для технического обслуживания и ремонта. При этом значительная часть подвижного состава – это автомобильный транспорт, основу которого составляют самосвалы.

Цель работы: рассмотреть применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как инструмента повышения эффективности карьерного автотранспорта, а также технических характеристик современных дронов: защита от пыли и влаги, система высокоточного позиционирования RTK, тепловизионные и полнокадровые камеры; описать методы передачи данных и их обработки; проанализировать необходимость внедрения БПЛА в управление всей транспортной инфраструктуры

Автомобильный транспорт получил широкое распространения благодаря своей автономности, большой мобильности в достаточно сложных дорожных условиях. Тем не менее, у него есть ряд недостатков: быстрый износ за счет большого количества порожних пробегов, снижение эффективности в зависимости от ряда погодных условий, высокая энергоемкость, затраты на обслуживание, большие простои при использовании, а также высокий риск аварийности и травматизма, обусловленный влиянием человеческого фактора.

Контролирование и учет недостатков вручную не всегда эффективен из-за большой площади обрабатываемых территорий карьера, поэтому на помощь автомобильному транспорту могут прийти беспилотные летатель-

ные аппараты (БПЛА). БПЛА активно используются в горной промышленности для выполнения следующих задач: аэромагнитная съёмка, проведения маркшейдерских работ, мониторинг хвостохранилищ.

Современные БПЛА представляют собой целостный механизм, позволяющий в несколько раз ускорить процессы управления карьера. Практически все БПЛА могут находиться в рабочем состоянии длительное время, маневрировать в воздухе, иметь защиту от влажности и загрязнений от пыли, а также обладать технологией спутниковых изменений RTK (Real-Time Kinematic), которая позволяет более точно определить местоположение, чем GPS.

Главное преимущество использования БПЛА – это возможность непрерывного мониторинга состояния карьера и 3D-моделирования окружающего пространства. Для выполнения аэрогеологической съёмки дроны (БПЛА) оснащены полнокадровыми фотокамерами, а также совместимыми тепловизионными и визуальными камерами. Полученные данные могут передаваться оператору различными методами, но самыми распространёнными стали:

- специализированное ПО на смартфон/планшет или с помощью карты захвата;

- использование радиоканалов с усиленными антеннами, позволяющие получать данные с БПЛА в режиме реального времени.

На основе полученных с аэрофотосъёмки данных формируются ортофотопланы, цифровая модель местности, трехмерная модель карьера.

Получение планов местности позволяет решать ряд задач:

- контроль состояния дорог, скорости движения, а также всей транспортной инфраструктуры в целом, за счёт постоянно обновляемых данных оператор видит места скопления транспорта, или представляющие собой опасность из-за возможного обвала горной породы.

- определение точного объема перевозок, что, в свою очередь, дает возможность рассчитать объем вывезенной горной массы и учёт работы каждого самосвала, это в дальнейшем обеспечивает возможность минимизировать простои на техническое обслуживание.

- повышение точности и объективности данных. БПЛА обеспечивают высокую точность сбора данных о состоянии дорог, бортов карьера, отвалов и других объектов. Аэрофотосъёмка и лазерное сканирование позволяют создавать детальные 3D-модели рельефа, что важно для планирования работ, контроля объёмов добычи и прогнозирования изменений. Данные, полученные с БПЛА, объективны и могут храниться для последующего анализа.

- оперативность получения информации. Сбор данных с помощью БПЛА происходит значительно быстрее, чем при традиционных методах. Например, по оценкам KPMG, применение дронов увеличивает скорость изучения рельефа в 3–7 раз, а обработку данных — до 3 раз. Это позволяет оперативно реагировать на изменения в карьере, например, на появление проблемных зон или необходимость ремонта дорог.

- проектировать оптимальные дороги подъезда. Например, можно оптимизировать маршруты движения самосвалов, синхронизировать их работу с погрузчиками и другой техникой, что минимизирует простои. Также возможно прогнозировать объёмы добычи и планировать развитие горных работ.

- повышение безопасности. Исключение человека из зон повышенного риска — ключевое преимущество. БПЛА могут проводить мониторинг труднодоступных и опасных участков (например, после взрывов, в зонах возможного обвала или оползня), не подвергая персонал опасности. Это особенно важно в карьерах, где сотрудники сталкиваются с такими рисками, как обвалы, загазованность, работа в экстремальных условиях.

Данные, полученные с БПЛА, легко интегрируются в существующие программные комплексы (ГИС, САД и др.). Это способствует созданию единого цифрового пространства для управления карьером, что повышает эффективность принятия решений и координации работ.

Таким образом, системы беспилотных летательных аппаратов выступают не только дополнительным инструментом в работе транспорта на открытых горных работах, но и сложной самостоятельной системой, которая замыкает контроль управления карьером и его транспортной системой в целом, что позволяет ускорить процесс реализации непрерывного мониторинга и обеспечить безопасность всей транспортной и логистической системы карьера.

Список литературы

1. Бабаев С.Н. Технология мониторинга открытых горных работ с применением беспилотного летального аппарата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-monitoringa-otkrytyh-gornyh-rabot>
2. Гришин И. А., Козлова А.Е., Дёрина Н.В, Великанов В.С., Хамидулина Д.Д, Логунова Т.В. Реализация возможностей использования беспилотных летательных аппаратов в горном деле. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-36-41/> (дата обращения: 14.02.2026).
3. Применения БПЛА в горнодобыче и геологоразведке. Прогрессивный журнал о разведке, добыче и переработке полезных ископаемых- «Добывающая промышленность». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dprom.online/mtindustry/primenenie-bpla/>– Дата доступа: 15.02.2026.

УДК 656.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНЫХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

К.В. Абдрахманова¹, преподаватель, Е.Е. Ненашева¹, студент

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Рассмотрены технологические особенности трех типов карьерных самосвалов, адаптированных к беспилотному режиму работы. Проведен сравнительный анализ силовых установок, типов трансмиссий, тормозных систем, а также наличия и глубины интеграции систем автономного управления. На основе выполненного анализа определены оптимальные условия эксплуатации каждого типа самосвалов.

Ключевые слова: беспилотный карьерный самосвал; автономное управление; гидромеханическая трансмиссия; электромеханический привод; гибридный привод; рекуперация энергии; конденсаторный накопитель; условия эксплуатации.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF UNMANNED MINING DUMP TRUCKS

K.B. Abdrakhmanova, E. E. Nenasheva

The article discusses the technological features of three types of mining dump trucks adapted to the unmanned mode of operation. A comparative analysis of power plants, types of transmissions, braking systems, as well as the availability and depth of integration of autonomous control systems is carried out. Based on the performed analysis, the optimal operating conditions of each type of dump trucks are determined.

Keywords: unmanned mining dump truck; autonomous control; hydromechanical transmission; electromechanical drive; hybrid drive; energy recovery; capacitor bank; operating conditions.

На открытых горных работах карьерные самосвалы выполняют основную транспортную работу. Их технический уровень определяет производительность и себестоимость перевозки горной массы. В последнее десятилетие активно развиваются беспилотные технологии, и ведущие производители горной техники интегрируют системы автономного управления в серийные модели.

На рынке представлены три основных типа карьерных самосвалов, различающихся принципом построения силовой передачи. Это машины с гидромеханической трансмиссией, с электромеханическим приводом на постоянном токе и с гибридным приводом на переменном токе с конденсаторным накопителем. Каждый тип имеет собственную конструктивную школу, представленную конкретными производителями, и каждая из этих схем по-разному приспособлена для работы в беспилотном режиме.

Цель работы заключается в сравнительном анализе технологических характеристик трех типов карьерных самосвалов, адаптированных к беспилотному режиму работы, выявлении их преимуществ и недостатков, а также в определении условий, в которых каждый из них наиболее эффективен. Сравнение проводится на примере конкретных серийных моделей, являющихся характерными для каждого из рассматриваемых типов приводов.

Для проведения сравнительного анализа были выбраны три модели карьерных самосвалов грузоподъемностью 220–240 тонн, представляющие различные инженерные школы и типы приводов, каждый из которых имеет сертифицированные решения для перехода на беспилотный режим. В качестве объектов исследования приняты Caterpillar 793F с гидромеханической трансмиссией, БелАЗ-7513R с электромеханическим приводом переменного тока и Komatsu IAHV, оснащенный гибридной гидравлической системой. Анализ проводится по совокупности параметров, включая энергоэффективность силовой установки, особенности адаптации к автономному управлению и применимость в различных горнотехнических условиях [1].

Самосвал Caterpillar 793F представляет американскую школу карьерного машиностроения, где основой конструкции является механическая трансмиссия. Силовая установка машины базируется на дизельном двигателе Cat C175-16, крутящий момент от которого передается через гидротрансформатор и многоступенчатую планетарную коробку передач [2]. При переводе такой машины в беспилотный режим основной задачей для разработчиков программного обеспечения становится работа с дискретностью переключения передач. Алгоритмы автономного управления должны прогнозировать профиль трассы, чтобы выбирать момент переключения без потери скорости на затяжных подъемах. Торможение осуществляется механическими многодисковыми тормозами и гидравлическим замедлителем, энергия торможения в этой схеме преобразуется в тепло и не используется повторно. Caterpillar 793F предназначен для работы в условиях, где требуется высокая механическая прочность трансмиссии, однако в режиме частых разгонов и торможений он уступает конкурентам по топливной эффективности.

Самосвал БелАЗ-7513R реализует схему с электромеханической трансмиссией переменного тока [3]. В этой конструкции дизельный двигатель вращает тяговый генератор, а электроэнергия подается на тяговые электродвигатели, встроенные в ступицы задних колес. Отсутствие механической коробки передач упрощает задачу беспилотного управления: регулирование скорости осуществляется путем изменения параметров тока, что обеспечивает плавность хода. В конструкции предусмотрено электродинамическое торможение, при котором тяговые двигатели переходят в генераторный режим. В базовой версии БелАЗ-7513R энергия, вырабатываемая при торможении, гасится на тормозных резисторах и рассеивается в виде тепла. Таким образом, машина обеспечивает снижение износа механических тормозов, но не дает прироста топливной экономичности за счет рекуперации.

Самосвал Komatsu IAHV оснащен гидромеханической трансмиссией с интегрированным гидравлическим аккумулятором давления. При торможении гидронасосы закачивают азот в аккумуляторы, накапливая энергию в виде сжатого газа [4]. При разгоне сжатый азот через гидромотор подключается к трансмиссии, снижая нагрузку на дизельный двигатель. С точки зрения адаптации к беспилотному режиму, эта система требует от

алгоритмов управления способности прогнозировать профиль дороги для своевременного накопления и расходования энергии в гидроаккумуляторах. Топливная экономичность достигается за счет использования накопленной при торможении энергии при последующих разгонах.

Сравнительный анализ рассмотренных типов карьерных самосвалов показывает, что конструктивные различия в силовых установках и трансмиссиях напрямую влияют на сложность разработки алгоритмов автономного управления и энергоэффективность транспортного цикла. Машины с гидромеханической трансмиссией требуют от программного обеспечения точного прогнозирования момента переключения передач для предотвращения потери тяги на подъемах, но обеспечивают предсказуемое поведение на скальных грунтах за счет жесткой механической связи. Электромеханические трансмиссии переменного тока упрощают задачу управления скоростью благодаря бесступенчатому регулированию тягового усилия, а наличие электродинамического торможения снижает износ механических тормозов, однако без системы накопления энергии топливная экономичность остается на уровне традиционных машин [5].

Принципиальное значение для эффективности беспилотной техники имеет наличие и тип системы рекуперации энергии. Гибридные схемы с гидравлическими или конденсаторными накопителями позволяют возвращать энергию торможения в рабочий цикл при последующих разгонах, что дает ощутимый прирост топливной экономичности на маршрутах с частыми перепадами высот. Однако использование накопителей усложняет программно-аппаратный комплекс, требуя от алгоритмов автономного управления способности прогнозировать профиль трассы и распределять энергетические потоки в реальном времени [6].

Таким образом, каждая из рассмотренных конструктивных схем имеет свои преимущества и ограничения, которые необходимо учитывать при выборе техники для конкретных горнотехнических условий. Проведенный сравнительный анализ технологических характеристик карьерных самосвалов Caterpillar 793F, БелАЗ-7513R и Komatsu IAHV позволяет сделать вывод об отсутствии универсальной конструктивной схемы, одинаково пригодной для всех условий беспилотной эксплуатации. Caterpillar 793F с гидромеханической трансмиссией сохраняет позиции на скальных грунтах благодаря механической надежности, БелАЗ-7513R с электромеханическим приводом обеспечивает простоту адаптации к автономному управлению, а Komatsu IAHV с гибридной гидравлической системой наиболее эффективны в глубоких карьерах с интенсивным грузопотоком.

Выбор конкретной модели для внедрения беспилотных технологий должен определяться совокупностью факторов: характером грунтов, профилем трасс, интенсивностью грузопотока и готовностью предприятия к обслуживанию более сложных гибридных систем. В долгосрочной перспективе гибридные и полностью электрические схемы представляются наиболее перспективным направлением развития, поскольку именно они позволяют реализовать главное преимущество автономного вождения — оптимизацию энергопотребления на всем транспортном цикле. Однако

темпы перехода к таким системам будут зависеть от экономической целесообразности их применения в конкретных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Горобцов А. Беспилотные самосвалы для работы в карьерах [Электронный ресурс] / А. Горобцов // perevozka24.com. – 2021. – 21 апреля. – URL: <https://perevozka24.com/pages/bespilotnye-samosvaly-dlya-raboty-v-karerah> (дата обращения: 14.02.2026). – Текст электронный.
2. Caterpillar Inc. [Электронный ресурс] / Caterpillar Inc. – Peoria, 2024– Режим доступа: <https://www.caterpillar.com/>. – Дата доступа: 15.02.2026.
3. ОАО «БелАЗ» [Электронный ресурс] / ОАО «БелАЗ». – Жодино, 2024 – Режим доступа: <https://belaz.by>. – Дата доступа: 15.02.2026.
4. Komatsu Ltd. Официальный сайт в России [Электронный ресурс] / Komatsu Ltd. – URL: <https://www.komatsu.ru/>. – Дата доступа: 15.02.2026.
5. Сайкин А.М. Особенности разработки беспилотных грузовых автомобилей с электроотягой с учетом условий эксплуатации в Российской Федерации / А.М. Сайкин // Вестник Вятского государственного агротехнологического университета. – 2025. – № 3 (25). – С. 1–12.
6. Дубинкин Д.М. Тенденции развития грузовых платформ карьерных самосвалов / Д.М. Дубинкин, А.В. Ялышев, Ш.Я. Исмаилова // Горная промышленность. – 2023. – № 3. – С. 72–76. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-72-76.

УДК 622.647.25

СРАВНЕНИЕ КОНЦЕПЦИЙ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.А. Гордин¹

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
г. Кемерово, РФ

В работе рассматривается актуальная задача повышения эффективности ленточных конвейеров горной промышленности за счёт отказа от роlikоопор и перехода к бесконтактному способу поддержания ленты. Показано, что системы магнитной левитации (MagLev) способны снизить потери на трение и износ, повысить ресурс ленты и создать предпосылки для увеличения скорости транспортирования. Приведена классификация способов создания магнитной левитации для конвейерных систем и выполнено сравнение электромагнитных, постоянномагнитных и гибридных схем по управляемости, энергопотреблению и эксплуатационным особенностям. Отмечено, что наибольший практический интерес для горных предприятий представляют решения на постоянных магнитах как энергоэффективная и конструктивно простая основа для дальнейшего развития магнитоподвесных конвейеров.

Ключевые слова: Магнитная левитация (MagLev); ленточный конвейер; магнитный подвес ленты; бесконтактная поддержка; износ ленты.

COMPARISON OF MAGNETIC-LEVITATION CONVEYOR CONCEPTS FOR THE MINING INDUSTRY

S.A. Gordin

The paper addresses the pressing task of improving the efficiency of belt conveyors in the mining industry by eliminating idlers and switching to a non-contact method of belt support. It is shown that magnetic levitation (MagLev) systems can reduce friction and wear losses, extend belt service life, and create prerequisites for increasing conveying speed. A classification of magnetic levitation methods for conveyor systems is presented, and electromagnetic, permanent-magnet, and hybrid configurations are compared in terms of controllability, energy consumption, and operational characteristics. It is noted that permanent-magnet solutions are of the greatest practical interest for mining enterprises as an energy-efficient and structurally simple basis for the further development of magnetically suspended conveyors.

Keywords: Magnetic levitation (MagLev); belt conveyor; magnetic belt suspension; non-contact support; belt wear.

Конвейерные системы играют важную роль на всех этапах горного производства, однако традиционные ленточные конвейеры с роlikоопорами имеют существенные недостатки. Провисание ленты между опорами вызывает неравномерный прогиб и рост сопротивления движению, а прохождение кусков груза через зоны соприкосновения с роliками сопровождается ударными нагрузками и ускоренным износом. Дополнительно контакт ленты с роliками приводит к трению, усталостным напряжениям и усталостному износу, что ограничивает скорость транспортирования (обычно около 4-5 м/с, максимум порядка 10 м/с) и повышает эксплуатационные затраты. Это делает задачу модернизации способа поддержания ленты актуальной.

Перспективным направлением является применение систем магнитной левитации (MagLev), где подъёмная сила создаётся магнитным полем

и движение осуществляется без механического контакта. Это потенциально снижает трение и износ, повышая энергоэффективность и ресурс оборудования [1].

Способы реализации магнитной левитации в конвейерных системах можно разделить на четыре основные группы (рис.1): сверхпроводниковые, электромагнитные, на постоянных магнитах и гибридные. Сверхпроводниковые решения обеспечивают высокие значения подъёмной силы и устойчивость, но требуют сложной криогенной инфраструктуры. Электромагнитные системы позволяют активно управлять зазором и стабилизировать положение ленты, однако характеризуются повышенным энергопотреблением и усложнением системы управления. Подвес на постоянных магнитах энергоэффективен и конструктивно проще, но имеет ограниченные возможности адаптации к переменным нагрузкам. Гибридные схемы объединяют преимущества постоянных магнитов (базовая подъёмная сила) и электромагнитов (подстройка и стабилизация), предлагая компромисс между управляемостью и энергозатратами при более высокой сложности и стоимости.



Рис. 1. Способы создания магнитной левитации

Управляемая левитация на электромагнитах основана на создании подъёмной силы магнитным полем катушек, величина которого регулируется изменением тока (рис. 2) [2]. Это позволяет поддерживать заданный зазор между лентой подвесом, компенсировать возмущения и адаптироваться к изменению нагрузки в процессе транспортирования. Такая система требует замкнутого контура управления.

Пассивная левитация на постоянных магнитах основана на формировании подъёмной силы за счёт взаимодействия магнитных полей без подачи энергии на создание поля. В конвейерных системах (рис. 3) [3] постоянные магниты размещают в опорной части на ставе и на ленте, поддерживая ленту без контакта с роликоопорами.

Постоянные магниты в системах магнитной подвески конвейерной ленты обладают рядом важных достоинств. Прежде всего, они формируют магнитное поле без энергопитания, поэтому подвес не требует затрат электроэнергии на поддержание подъёмной силы и не зависит от работы силовой электроники в штатном режиме. Это повышает энергоэффективность и снижает эксплуатационные расходы, что особенно важно для протяжённых конвейерных линий. Конструктивно такие системы обычно проще: отсутствуют катушки, источники питания и сложные контуры регулирования, что уменьшает количество потенциальных. Также, постоянные магниты обеспечивают устойчивое, воспроизводимое поле во времени, что упрощает проектирование и позволяет заранее определить требуемую не-

сущую способность и геометрию подвеса за счёт выбора марки магнита и магнитной схемы.

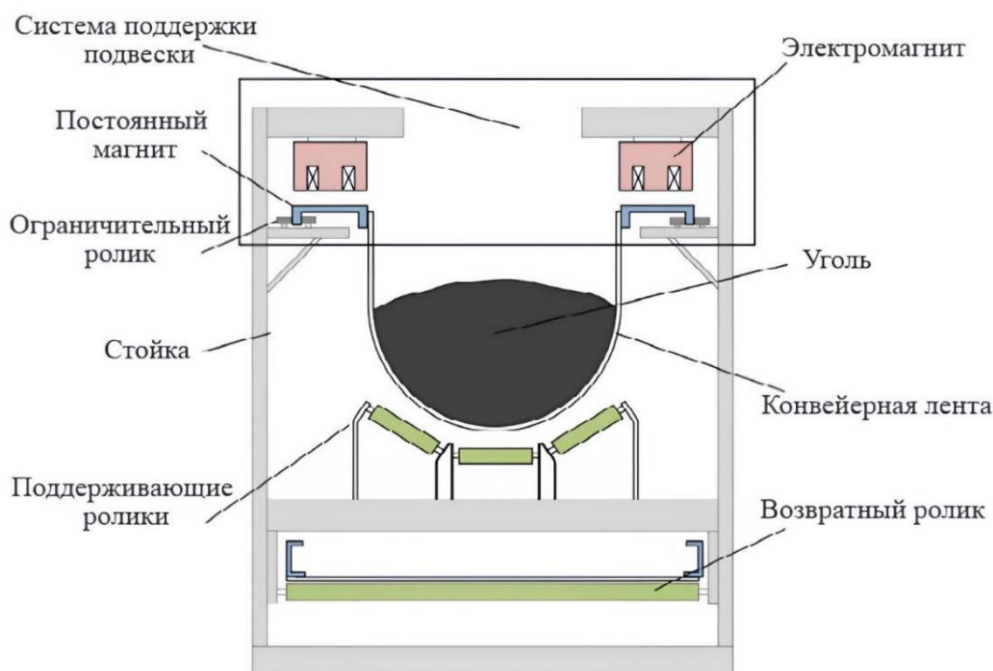


Рис. 2. Конструкция ленточного конвейера с магнитной подвеской

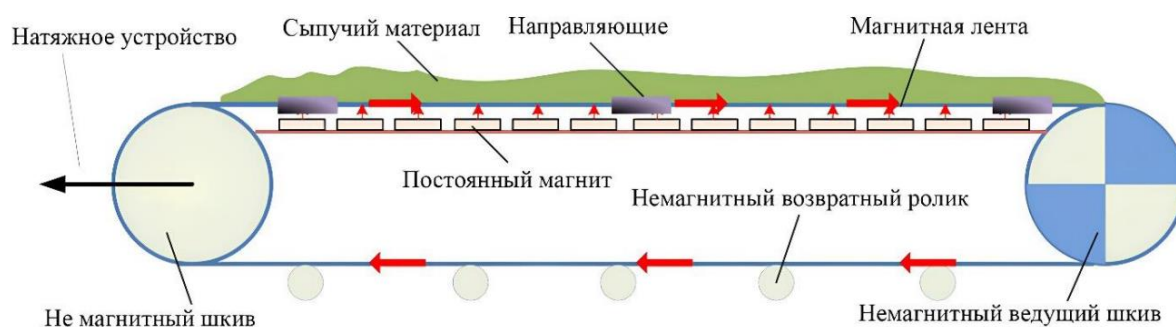


Рис. 3. Конвейерная система на постоянных магнитах

Ограничением пассивного подвеса является низкая управляемость: величина подъёмной силы и жёсткость подвеса задаются геометрией и магнитными характеристиками, поэтому система хуже адаптируется к изменению массы груза, динамическим возмущениям и неравномерной загрузке.

Гибридные системы объединяют постоянные магниты и электромагниты, постоянные магниты создают основную подъёмную силу (базовое поле), а электромагниты используются для подстройки, стабилизации зазора и компенсации переменных нагрузок. Такой подход позволяет снизить энергопотребление по сравнению с полностью электромагнитным подвесом и одновременно сохранить управляемость, особенно в переходных режимах.

Преимущество гибридной схемы — компромисс между энергоэффективностью и устойчивостью: активная часть работает «по необходимости», а пассивная обеспечивает базовую несущую способность. Недостатки связаны с усложнением конструкции и управления: требуется согласо-

вание магнитных полей, размещение датчиков и силовой электроники, а также обеспечение отказоустойчивости и защиты в тяжёлых условиях эксплуатации.

Вывод. Уход от роlikоопорного поддержания ленты является актуальным направлением для горной промышленности, поскольку позволяет снизить влияние трения, ударных нагрузок и износа, которые ограничивают скорость и повышают эксплуатационные затраты ленточных конвейеров. Магнитолевитационные (MagLev) решения представляют перспективную технологическую основу для бесконтактной поддержки ленты, потенциально повышая энергоэффективность и ресурс оборудования. При этом наибольший практический интерес для внедрения в условиях длительной эксплуатации представляют системы на постоянных магнитах, так как они обеспечивают базовую подъёмную силу без энергопитания, отличаются конструктивной простотой и могут стать наиболее экономически оправданным вариантом при дальнейшей оптимизации магнитной схемы и обеспечении устойчивости подвеса.

Список литературы

1. Гордин С. А. и др. Перспективы Создания Конвейера С Магнитным Подвесом Ленты Для Горной Промышленности // Техника И Технология Горного Дела. 2025. № 2 (29). С. 40–62.
2. Hu K. и др. Magnetic Levitation Belt Conveyor Control System Based on Multi-Sensor Fusion // Appl. Sci. 2023. Т. 13, № 13.
3. Wang Z. и др. Optimization on detent force characteristics of the permanent magnet suspension belt conveyor // Adv. Mech. Eng. SAGE Publications, 2018. Т. 10, № 5. С. 1687814018778186.

УДК 622.23.05

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ВНЕДРЕНИИ БЕЗЛЮДНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА КАРЬЕРАХ

Жилинков А.А.^{1,2}, канд. техн. наук, **Ю.А. Лагунова**^{1,2}, проф., д.т.н.

¹Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

²«УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Проектированию, разработке и внедрению безлюдных грузовых перевозок и беспилотных систем на открытых горных работах сопутствует ряд проблем различного характера. Установлено, что кроме технических, экономических и социальных проблем имеется еще ряд проблем эксплуатационного характера. Эти проблемы связаны со сложными условиями эксплуатации, спецификой производственного и технологического процессов добычи. Также предложены мероприятия для решения рассматриваемых проблем

Ключевые слова. Карьерный самосвал, открытые горные разработки, беспилотные и безлюдные технологии, условия эксплуатации

ANALYSIS OF THE PROBLEMS IN THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF UNMANNED TRANSPORTATION IN QUARRIES

Zhilinkov A.A., Yu.A. Lagunova

The design, development and implementation of unmanned cargo transportation and unmanned systems in open-pit mining are accompanied by a number of problems of various kinds. It has been established that in addition to technical, economic and social problems, there are a number of operational problems. These problems are related to difficult operating conditions, the specifics of production and technological processes of extraction. Measures are also proposed to solve the problems under consideration.

Keywords. Mining dump truck, open-pit mining, unmanned and unpopulated technologies, operating conditions

Во многих отраслях промышленности активно проектируются, внедряются и уже применяются безлюдные технологии и беспилотные системы. Безлюдные технологии с разной степенью автоматизации также используют и в горнодобывающей промышленности. На открытых горных разработках наиболее распространены безлюдные грузовые перевозки с использованием роботизированных самосвалов.

Системы безлюдных грузовых перевозок внедрены и работают на карьерах таких стран как Австралия, Канада, Китай, Чили, Бразилия, Перу, Швеция, РФ, Норвегия, США, ЮАР и др. Внедрением беспилотных систем, разработкой и производством транспортных роботизированных машин занимается ряд производителей: Komatsu (Япония), Caterpillar (США), Hitachi (Япония), БелАЗ (Беларусь), Liebherr (Германия), Scania и Volvo (Швеция), ХЕМС (Китай), ETF (Словения) и КамАЗ (РФ). Кроме того, достаточно большое количество компаний занимается разработкой систем автоматизации и управления [1].

Карьерный самосвал-робот представляет собой, собственно, саму механическую систему (автотранспортное средство), оборудованную элементами комплексной системы управления. Система управления, в свою очередь, включает бортовые подсистемы и элементы (бортовой компьютер, подсистемы сканирования окружающего пространства, передачи инфор-

мации, контроля, мониторинга, диагностики, навигации и др. Управление, контроль и мониторинг всем парком осуществляется автоматизированной системой диспетчеризации (рис. 1) [2, 3].



Рис. 1. Принципиальная схема управления парком роботизированных самосвалов на грузовых перевозках

Традиционные проблемы при проектировании и внедрении безлюдных грузовых перевозок и беспилотных систем на открытых горных разработках можно разделить на несколько групп в зависимости от влияния различных факторов: технические, экономические и социальные (табл. 1).

Также существует ряд проблем эксплуатационного характера. Они обусловлены горнотехническими, горно-геологическими, природно-климатическими, дорожными и другими условиями. Трассы автомобильных дорог имеют весьма сложный продольный профиль и план. Поверхности площадок на грузовых фронтах могут иметь дефекты и уклоны в продольном и (или) поперечном направлении. Процесс погрузки-разгрузки горной массы также имеет ряд специфических особенностей: необходимость маневрирования, высота падения груза, число циклов погрузки, квалификация операторов погрузочных и других машин, состояние поверхности забоя, свойства горной породы. В таких специфических условиях транспортные машины перемещаются по сложной траектории, постоянно меняя скорость и направление движения. Кроме того, с течением времени эксплуатационные условия постоянно меняются и этот процесс имеет случайный характер [4].

С учетом вышесказанного, комплексная система управления роботизированной транспортной машиной должна не только обеспечивать безопасность транспортного процесса, но и адекватно фиксировать параметры

условий эксплуатации. После количественной оценки система должна поддерживать рациональный режим движения. Это необходимо для обеспечения нормального нагрузочного режима работы всех агрегатов, узлов и механизмов. При этом критериями нагрузочного режима следует считать величину деформаций и напряжений в различных элементах конструкции.

Таблица 1 – Проблемы безлюдных грузовых перевозок на открытых горных разработках

Наименование группы факторов	Факторы
Технические проблемы	1) наличие сложного электронного оборудования; 2) несовместимость нового и существующего оборудования на самосвале; 3) несовместимость роботизированных самосвалов с погрузочными машинами; 4) интероперабельность отдельных автономных систем.
Экономические проблемы	1) удорожание транспортной машины; 2) затраты на содержание дополнительного оборудования; 3) затраты на обучение и переподготовку персонала; 4) затраты на модернизацию других машин или всего транспортно-грузового комплекса; 5) затраты на программное обеспечение
Социальные аспекты	1) нежелание персонала всех уровней внедрять и осваивать новые технологии, методы и режимы работы; 2) отсутствие или недостаток квалифицированного персонала
Проблемы эксплуатационного характера	1) сложные и постоянно изменяющиеся условия эксплуатации, которые трудно идентифицировать и оценивать количественно в автоматическом режиме; 2) отсутствие алгоритма выбора и поддержания рационального режима движения, пропорционального изменению дорожных условий; 3) сложная траектория движения самосвалов по объектам карьеров, требующая постоянно изменять траекторию, скорость и часто маневрировать; 4) несоответствие конструктивных и эксплуатационных параметров условиям движения, маневрирования, погрузки-выгрузки

Решению проблем эксплуатационного характера при разработке и внедрении безлюдных технологий могут поспособствовать мероприятия, сущность которых заключается в следующем:

- адаптация технологий добычи, вскрыши, погрузочно-разгрузочных, перегрузочных и других работ под конструктивные параметры и эксплуатационные возможности роботизированных транспортных машин;
- адаптация технических параметров погрузочных машин, других машин и оборудования под конструктивные параметры и эксплуатационные возможности роботизированных транспортных машин;

- совершенствование конструктивных параметров и систем управления самих транспортных машин для их адаптации к работе в автоматическом режиме;

- комплексная адаптация (совершенствование конструкции, модернизация машин и оборудования, изменение технологии проведения горных работ).

Целью приведенных мероприятий является упрощение процесса управления в автоматическом режиме и снижения нагрузочного режима за счет улучшения дорожных условий, уменьшения количества управляющих воздействий, маневров, снижения частоты приложения нагрузок и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор систем безлюдных грузовых перевозок на карьерах / А.Ю. Воронов, Ю.Е. Воронов, И.С. Сыркин и др. // Уголь. 2022. № S12. С. 30-36. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36>.
2. Будущее безлюдных технологий на открытых горных работах / Журнал «Горная Промышленность». 2020 №3. С.32.
3. Бархатов, С. П. Исследование возможностей применения роботизированных самосвалов в горнодобывающей отрасли / С. П. Бархатов, Я. В. Устинова, А. С. Семенов // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 1(159). – С. 19-27. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-1-19-27.
4. Воронов, А. Ю. Современное состояние и перспективы развития роботизированных грузоперевозок на карьерах / А. Ю. Воронов, Ю. Е. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 6(146). – С. 16-24. – DOI 10.26730/1816-4528-2019-6-16-24.

УДК 622.23:681

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ РОЛИКОПОР ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Е.Г. Кузин¹, Д.С. Грибов¹, С.А. Бурштык¹

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске

В работе приведены результаты анализа отказов основных компонентов ленточных конвейеров в горной промышленности. Показано, что доля отказов роlikоопор составляет от 23 до 30% (в среднем 27%) и занимает второе по важности место после ленты. Отмечена проблема низкого внимания к износу роlikоопор персонала ремонтных служб, что впоследствии приводит к более значимым и затратным отказам. Рассмотрены направления повышения технического уровня роlikоопор. Основными из них являются: применение новых полимерных материалов, совершенствование конструкции и уплотнений подшипниковых узлов, внедрение самодиагностирующих роlikов и систем, применение новых технологических решений, позволяющих отказаться от классических роlikов – внедрение устойчивых подвесов ленты на магнитных подушках. Рассмотрены основные достоинства и недостатки указанных решений, а также сложности их внедрения в горной промышленности. Представлены направления дальнейших исследований в данной области.

Ключевые слова: Ролики ленточных конвейеров, ресурс, техническое обслуживание, полимерные ролики, магнитный подвес ленты.

IMPROVING THE TECHNICAL LEVEL OF ROLLER BEARINGS OF BELT CONVEYORS

E.G. Kuzin, D.S. Gribov, S.A. Burshtyk

This paper presents the results of the failure analysis of the main components of belt conveyors in the mining industry. It is shown that the failure rate of roller supports ranges from 23 to 30% (on average 27%) and occupies the second most important place after the tape. The problem of low attention to the wear of roller bearings by repair service personnel is noted, which subsequently leads to more significant and costly failures. The directions of increasing the technical level of roller supports are considered. The main ones are: the use of new polymer materials, the improvement of the design and seals of bearing assemblies, the introduction of self-diagnostic rollers and systems, the use of new technological solutions that make it possible to abandon classic rollers - the introduction of stable suspensions of tape on magnetic pads. The main advantages and disadvantages of these solutions, as well as the difficulties of their implementation in the mining industry, are considered. The directions of further research in this field are presented.

Keywords: Conveyor belt rollers, resource, maintenance, polymer rollers, magnetic belt suspension.

Ленточный конвейер остается одной из самых перспективных транспортных машин горного производства. Объективными предпосылками этого факта являются высокая надежность и малая энергоемкость. Высокая надежность базируется на простоте конструкции, а малая энергоемкость на низком коэффициенте сопротивления движению ленты по роlikоопорам [1, 2].

В работе [3] показано, что на долю роlikоопор приходится до 20 – 25 % стоимости ленточного конвейера, при этом работоспособность кон-

вейера значительно зависит от качественного взаимодействия ленты с роlikоопорами.

Оценка статистических данных по отказам компонентов ленточного конвейера, показывает, что доля роlikоопор составляет от 23 до 30 %, что доказывает их значимость для обеспечения надежности (см. рис. 1).

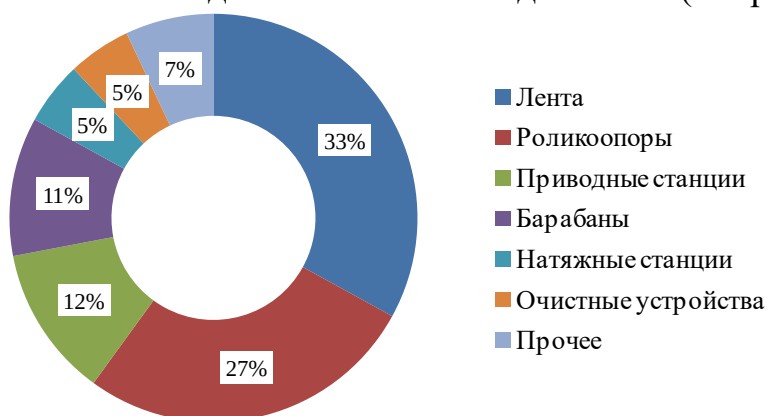


Рисунок 1 – Диаграмма отказов основных элементов ленточных конвейеров

Полный анализ отказов выявляет существенное влияние отказавших роlikов на последующие отказы ленты, однако служба главного механика на горных предприятиях уделяет им внимание в последнюю очередь. Часто можно увидеть картину отсутствия роlikоопор или их полное изнашивание (см. рис. 2).



Рисунок 2 – Фото износа роlikов

Применение теплового контроля, рассмотренное в работе [4] позволяет выявить зарождающуюся проблему задолго до возникновения отказов, вызванных полным разрушением подшипникового узла, а уж тем более корпуса роlikоопоры.

Следует заметить, что даже представленные на рис. 2 проблемы с роlikами, возникшие не менее нескольких суток назад, не приводят к остановке ленточного конвейера. Конвейер остается в работоспособном состоянии, однако возрастают нагрузки на привод и темпы износа ленты и особенно стыков ленты. Скрытая опасность состоит в возможности нагрева ленты, вплоть до последующего возгорания, но, что гораздо опаснее, происходит возникновение открытых искр от трения металла о металл и

существует вероятность воспламенения (взрыва) газовой рудничной атмосферы (на угольных и калийных шахтах).

Рассмотрим методы повышения технического уровня роlikоопор. Среди производителей сложилось мнение, что роlikоопоры достигли технического совершенства, обладают достаточной простотой и менять ничего не надо (кроме самих изношенных роликoв). Так или иначе, любое усложнение приведет к снижению надежности. При этом мы считаем, что имеется возможность их дальнейшего совершенствования. Анализ литературных источников позволил выделить следующие направления совершенствования грузонесущих роlikоопор (табл. 1).

Таблица 1 – Направления совершенствования роlikоопор

Направление	Применение новых полимерных материалов	Совершенствование конструкции и подшипниковых узлов	Внедрение диагностики и систем мониторинга	Отказ от роликoв. Применение магнитных подвесов
Преимущества	Меньшая масса Высокая износостойкость Стойкость к коррозии Демпфирование ударных нагрузок Меньший коэффициент трения при заклинивании Большой срок службы ленты	Рациональное распределение нагрузок Препятствия проникновению пыли и (или) влаги Снижение абразивного износа	Информация об износе поступает дистанционно и на ранней стадии Предотвращение внезапных отказов	Существенное снижение коэффициента трения Уменьшение мощности приводных станций Значительное увеличение срока службы ленты
Недостатки	Способность к накоплению статического электричества Меньшая температура плавления	Усложнение конструкции Большая стоимость Выше требования к обслуживанию Снижение универсальности применения	Малоэффективно если не использовать эту информацию Значительное удорожание машины в целом Выше требования к обслуживанию	Применение специальной ленты с магнитами Возможность колебаний движения ленты Значительное усложнение конструкции Отсутствие опыта эксплуатации

Перечисленные направления обладают как достоинствами, так и недостатками. Внедрение новых решений требует привлечения средств и воли лиц, принимающих решения по сопровождению проектов и обратной связи с разработчиками.

Следует заметить, что горная отрасль весьма консервативная и следует оценивать риски от внедрения улучшений. Так, если на роликoв требуют замены (кричащие об этом на мониторе диспетчера сервисной службы) не будут обращать внимания (см. рис 2), красивые решения не принесут экономических выгод производству.

Таким образом, повышение технического уровня роlikоопор ленточных конвейеров в горной промышленности направлено на создание более легких, износостойких и «умных» конструкций с встроенными элементами диагностики, а также переход в надсистему – полный отказ от классических роликов и внедрение устойчивого магнитного подвеса ленты. Перспективные роlikоопоры не только сами будут служить дольше и способны сохранять самый дорогостоящий элемент конвейера – ленту.

Направления дальнейших исследований заключаются в поиске комбинированных материалов, обладающих положительными свойствами полимеров и способных отводить статические заряды для исключения искробразования, применение простых и дешевых конструктивных решений диагностики состояния подшипников и повышения ресурса роlikоопоры в целом.

Список литературы

1. Кузин, Е. Г. Оценка технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров методами неразрушающего контроля: специальность 05.05.06 "Горные машины": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузин Евгений Геннадьевич. – Кемерово, 2020. – 141 с. – EDN LOCCJI.
2. Достовалова, А. В. Оценка потерь энергии при работе роlikоопор ленточного конвейера / А. В. Достовалова, В. Д. Быкадоров, Е. Г. Кузин // Кузбасс: образование, наука, инновации: материалы Инновационного конвента, Кемерово, 15 декабря 2017 года. – Кемерово: Сибирский государственный индустриальный университет, 2017. – С. 31-33. – EDN YWYWNZ.
3. Кузин, Е. Г. Анализ проблем при эксплуатации роликов ленточных конвейеров горных предприятий / Е. Г. Кузин, С. А. Бурштык // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 428-431. – EDN MYZWNA.
4. Лунегов, М. В. Возможности инфракрасной термографии при оценке технического состояния элементов ленточных конвейеров / М. В. Лунегов, Е. Г. Кузин // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая": – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 14006. – EDN ZQVTYT.

УДК 629.35

О ПРОБЛЕМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНООСНЫХ АВТОТРАКТОРНЫХ ПРИЦЕПОВ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ИНЕРЦИОННЫМИ ТОРМОЗНЫМИ СИСТЕМАМИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В.В. Кузнецов¹, старший преподаватель, **Ю.Н. Строганов**², доцент, канд. тех. наук.

¹Военный учебный центр при ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, РФ

Представлены проблемы эксплуатации одноосных автотракторных прицепов с гидравлическими инерционными тормозными системами. Сделан вывод и определены пути решения проблем.

Ключевые слова: инерционная тормозная система, гидропривод, тормозная жидкость, кавитация.

ABOUT THE PROBLEMS OF OPERATION OF SINGLE-AXLE AUTO-TRACTOR TRAILERS WITH HYDRAULIC INERTIA BRAKING SYSTEMS AND WAYS TO SOLVE THEM

V.V. Kuznetsov, Yu.N. Stroganov

This article presents the operational challenges of single-axle tractor-trailers with hydraulic inertial braking systems. Conclusions are drawn and solutions are identified.

Keywords. Inertial braking system, hydraulic drive, brake fluid, cavitation.

В целях повышения безопасности дорожного движения карьерного транспорта и специального оборудования (дизель-генераторы, компрессоры и т.д.) смонтированного на одноосных прицепах грузоподъемностью до 3,5 тонн в составе автопоездов в последние годы все чаще устанавливают инерционные тормозные системы (ИТС) с гидравлическим приводом, как наиболее рациональные и эффективные (рис 1.) [1].

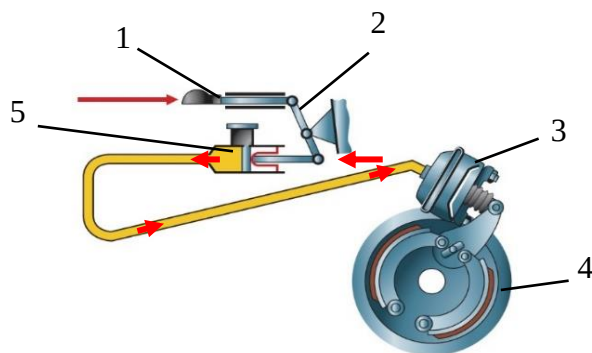


Рис. 1 Схема гидравлической инерционной тормозной системы

1 – подвижная часть дрыгла прицепа, 2 – поворотный рычаг, 3 – рабочий тормозной цилиндр, 4 – колесный тормоз, 5 – главный тормозной цилиндр.

В гидроприводе рабочим телом по передаче энергии является жидкость, благодаря ее свойствам передачи равного давления во все стороны.

В частности, в гидроприводе инерционных тормозных систем одноосных автотракторных прицепов используют тормозные жидкости, отечественного производства «Нева», «Томь», «Роса», РосDOT4 и зарубежные DOT-3, DOT-4. Данные тормозные жидкости обеспечивают температурный диапазон кипения свежей «сухой» жидкости в интервале от 190 до 275 °С, а «влажной» жидкости (содержание воды 3,5 % по массе) в пределах от 140 до 155 °С. Основным недостатком тормозных жидкостей на гликолевой основе является их гигроскопичность (способность жидкости поглощать воду из окружающей среды). Данный недостаток не только определяет нижний порог температуры закипания и ограничивает срок службы тормозной жидкости от 1,5 до 2 лет, но и порождает появление кавитации [2].

Кавитация — это процесс образования пузырьков пара (закипание) рабочей жидкости при падении давления ниже критического, сопровождающийся их последующим схлопыванием, что вызывает гидроудары, шумы, эрозию металлических деталей, пенообразование [3].

Давление в гидроприводе прямо пропорционально силе наката прицепа на тягач умноженного на передаточное отношение рычажного механизма тормоза наката и обратно пропорционально площади поршня главного тормозного цилиндра, умноженного на коэффициент полезного действия гидравлической системы и выражается по следующей формуле [4]:

$$P = \frac{F_{\text{накат}} \cdot i}{S_{\text{гц}} \cdot \eta} \quad (1)$$

где $F_{\text{накат}}$ — сила наката прицепа на тягач, Н; i — передаточное отношение рычажного механизма тормоза наката; $S_{\text{гц}}$ — площадь поршня главного тормозного цилиндра, м²; η — механический коэффициент полезного действия системы.

Сила наката прицепа на тягач определяется по формуле:

$$F_{\text{накат}} = m \cdot a \quad (2)$$

где m — масса прицепа, кг; a — замедление прицепа, м/с².

Замедление прицепа выражается по формуле:

$$a = \frac{v_0^2 - v_k^2}{t} \quad (3)$$

где v_0 — начальная скорость движения автопоезда до торможения, м/с; v_k — конечная скорость движения автопоезда после торможения, м/с; t — время торможения, с.

Возьмем для расчета одноосный прицеп оборудованный инерционно тормозной системой с гидравлическим приводом, имеющий следующие параметры: $m = 150$ кг, $d = 19$ мм, $I = 1,3$, $\eta = 0,95$. Подставив в формулы значения, получим графическую зависимость (рис.2) давления в гидроприводе от величины замедления за разные промежутки времени торможения.

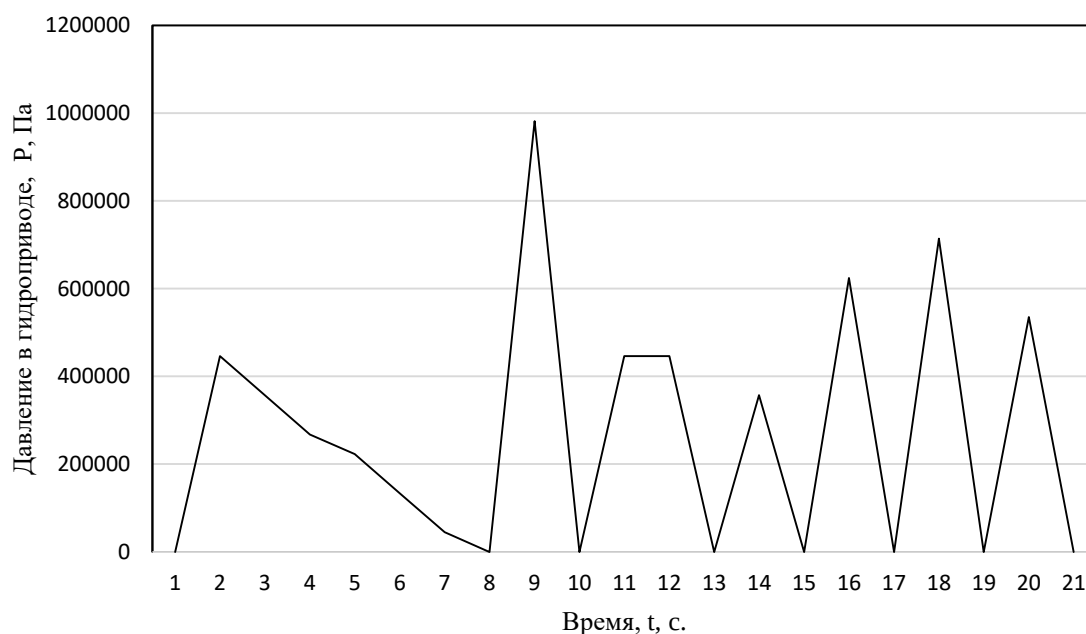


Рис. 2 Расчетный график изменения давления в гидроприводе ИТС

Из графика видно, что давления в гидроприводе инерционной тормозной системы прицепа представляет собой импульсную кривую, синхронизированную с торможением тягача. Давление резко возрастает при накате прицепа на тягач и плавно падает при его разгоне или при полной остановке, повторяя циклы торможения, при этом величина давления зависит от замедления.

Учитывая, что при экстренных торможениях пиковое значение давления в гидроприводе инерционной тормозной системы прицепа может достигать от 10МПа до 20МПа, то наибольшая вероятность возникновения кавитации при падении давления в гидроприводе, то есть при растормаживании прицепа, а особенно при резком падении давления.

При движении автопоезда в плотном городском потоке, а также в горной местности и в карьерах частота торможений возрастает в разы по отношению к движению по ровным участкам местности. В результате кавитации на поверхности трубопровода возникают раковины, что вызывает большую турбулентность и повышается сопротивление жидкости при движении по трубопроводу. Частицы вырванного металла со стенок трубопровода, в результате схлопывания пузырьков воздуха, попадают между трущимися деталями главного и рабочих тормозных цилиндров, что приводит к повышенному износу деталей и разгерметизации тормозной системы и как следствие внезапный отказ тормозной системы.

Вывод. Кавитация в гидроприводе инерционной тормозной системы одноосных автотракторных прицепов, в процессе их эксплуатации, существенно влияет на эффективность её работы и безопасность дорожного движения автопоездов.

В целях снижения такого явления, как кавитация в гидроприводе инерционной тормозной системы одноосных автотракторных прицепов рекомендуется выполнять следующие:

регулярная проверка уровня тормозной жидкости в системе и компенсационных отверстий в главном тормозном цилиндре;
замена тормозной жидкости через каждые 1,5 – 2 года;
удаление воздуха из тормозной системы путем её прокачки;
использование современных тормозных жидкостей (DOT 4, DOT 5.1) с более высокой температурой кипения;
применение в конструкции гидропривода более современных материалов и оборудования, недопускающего резкого падения давления в системе.

Список литературы

1. Кузнецов В.В., Строганов Ю.Н., статья «Обзор инерционных тормозных систем одноосных автотракторных прицепов» сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, 2025, стр. 95-97.
2. Эксплуатация и диагностика транспортных средств специального назначения [Текст]: учебник в 5 ч. Часть 3. Эксплуатационные материалы/ А.М. Вторушин [и др.]. – Омск: ОАБИИ, 2016. – 102 - 103 с.
3. Кавитация. Понятие кавитации. Причины её присутствия в гидроприводе <https://promsnab-gidroimpuls.ru/news/kavitatsiya-v-gidronasose> (дата обращения: 18.02.2026).
4. Железнов, Е. И. Оценка тормозных свойств малотоннажного автопоезда / Е. И. Железнов, А. Л. Поротиков, Р. Е. Железнов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 15 (149). — С. 51-56. — URL: <https://moluch.ru/archive/149/42237/> (дата обращения: 16.02.2026).

УДК 62-529

РОБОТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНОЙ ДОБЫЧЕ: ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ САМОСВАЛОВ

Д.Н. Лаженцев¹, студент, В.П. Захарова¹, канд. техн. наук,

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, РФ

Проанализировано развитие горной промышленности в транспортной сфере. Показано применение беспилотных самосвалов при транспортировке горных пород. Рассмотрен отечественный пример грузового автомобиля.

Ключевые слова: беспилотные карьерные самосвалы; автономная работа; удалённое управление; GPS/ГЛОНАСС; челночное; БЕЛАЗ-7513R; БЕЛАЗ-75319; круглосуточная эксплуатация.

ROBOTIZATION OF TRANSPORT PROCESSES IN MINING: THE USE OF UNMANNED DUMP TRUCKS

D.N. Lazhentsev, V.P. Zakharova

The development of the mining industry in the transport sector is analyzed. The use of unmanned dump trucks in the transportation of rocks is shown. A domestic example of a truck is considered.

Keywords: unmanned mining dump trucks; autonomous operation; remote control; GPS/GLONASS; shuttle; BELAZ-7513R; BELAZ-75319; round-the-clock operation.

Горная промышленность развивается уже долгое время и в настоящие дни имеет в своём инвентаре не ручные виды транспорта, а самоходные самосвалы. Раньше люди добывали полезные ископаемые, применяя открытые и подземные методы. С помощью огня и клиньев, а также простейшие механизмы на колёсах производили разрушение пород. В современности же осуществляется использование металлических агрегатов в качестве современной горной техники. [1]

Изначально в сфере транспортировки были внедрены ручные тачки и конные телеги. В середине XIX века на замену им люди стали создавать железнодорожные вагоны. Развивалась автомобильная техника, начали использоваться грузовые автомобили.

Новый шаг в революции карьерной техники – это беспилотные самосвалы. Они представляют специализированные в конкретной сфере машины для выполнения транспортирующих функций в горнодобывающей промышленности. Данные устройства способны работать без помощи водителя. Такие системы работают или автономно, или с применением удалённого управления. В них действуют GPS или же ГЛОНАСС и наборы таких датчиков, как лидары, радары, ультразвуковые и оптические сенсоры, способные обеспечивать точность позиционирования вплоть до 10 миллиметров. При такой схеме всего один оператор может контролировать около четырёх машин, а не всего одну. [2]

Там, где раньше, до описываемых технологий, располагалась кабина оператора – теперь встроен интеллектуальный модуль. Но существуют и

гибридные модели, где присутствует и непосредственно кабина. Такая система даёт возможность эксплуатировать технику без остановок.

Данные машины нашли своё применение в шахтах, карьерах, где в человеческом присутствии имеется риск или же необходима высокая точности при недостаточно удобных условиях работы.

Так, в 2018 году была разработана гибридная модель БЕЛАЗ-7513R с кабиной и дистанционным управлением. Благодаря производимому "челночному" движению появилась возможность уменьшить время маршрута на 12%.

Ещё одна модель БЕЛАЗ-75319 имеет в распоряжении двигатель с 12 цилиндрами и обогащена полным набором датчиков. [3]

Ныне существующие и производящиеся инжиниринговые решения стараются каждый год стать автономнее и экономичнее. Появляется целый ряд преимуществ в виде оптимизации работы и круглосуточного использования.

Вывод. По этапам совершенствования добычи полезных ископаемых видно, как люди стараются сделать этот процесс безопаснее и продуктивнее. От применения ручных тачек и конных телег до беспилотных самосвалов, оснащёнными GPS-навигаторами и датчиками безопасности. Вследствие чего осуществляется работа в тяжёлых условиях. Совершенствование горной промышленности в сфере транспортировки позволяет производить гораздо эффективнее, безопаснее и выгоднее транспортировку ископаемых.

Список литературы

1. История развития горного дела в мире [Электронный ресурс] / Официальный сайт города Белово. — Белово, 2011. — URL: <https://goo.su/VMxKIQ1> (дата обращения: 18.02.2026);
2. Coal-Liza. Беспилотные технологии в угольной отрасли [Электронный ресурс] // Живой Журнал (LiveJournal). — (дата публикации: 21.09.2018). — URL: <https://goo.su/gKjB6iB> (дата обращения: 18.02.2026);
3. [Анатолий Горобцов] Беспилотные самосвалы для работы в карьерах [Электронный ресурс] / Perevozka24.com. — (дата публикации: 21.04.2021), — URL: <https://goo.su/CJNLrK2> (дата обращения: 18.02.2026).

УДК 62-529

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ САМОСВАЛОВ В КАРЬЕРЕ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПРОБЕГА

С.А. Майоров, А.А. Ермаков

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Рассмотрена актуальная задача оптимизации транспортных потоков в условиях карьера. Основное внимание уделено методам расчета кратчайшего пути для автосамосвала от погрузочного пункта до пункта разгрузки с учетом динамически изменяющейся инфраструктуры карьера

Ключевые слова: карьер, автосамосвал, кратчайший путь, граф, алгоритм Дейкстры, алгоритм A*

ALGORITHMIC METHODS FOR OPTIMIZING DUMP TRUCK ROUTES IN A QUARRY TO MINIMIZE MILEAGE

S.A. Mayorov, A.A. Ermakov

This article discusses the current problem of optimizing transport flows in a quarry. The main focus is on methods for calculating the shortest route for a dump truck from the loading point to the unloading point, taking into account the dynamically changing infrastructure of the quarry

Keywords: quarry, dump truck, shortest path, graph, Dijkstra algorithm, A* algorithm

Затраты на карьерный автотранспорт достигают 50-60 % эксплуатационных расходов. Основным резервом их снижения является оптимизация маршрутов движения самосвалов, направленная на минимизацию пробега и времени цикла. Решение задачи осложняется изменением конфигурации фронта работ, уклонами дорог, ограничениями для крупногабаритной техники и переменной загруженностью сети.

Карьерная дорожная сеть формализуется в виде взвешенного ориентированного графа $G = (V, E)$, где V – вершины (перекрестки, пункты погрузки и разгрузки), E – ребра (участки дорог). Вес ребра W отражает интегральную стоимость проезда: длину, время, расход энергии, износ шин, загруженность. Цель: для вершин S (погрузка) и F (разгрузка) найти путь $P = (S, \dots, F)$ с минимальной суммой весов ребер: $\sum w(e) \rightarrow \min$.

Классический алгоритм Дейкстры гарантирует нахождение оптимального маршрута, но обладает высокой вычислительной сложностью $O(|V|^2)$ и не использует эвристики, что затрудняет его применение на детализированных карьерных сетях. Адаптация требует упрощения графовой модели и динамического обновления весов ребер.

Более эффективным инструментом для решения рассматриваемой задачи выступает алгоритм A, являющийся развитием алгоритма Дейкстры, который использует эвристическую функцию $h(v)$, оценивающую стоимость пути от текущей вершины v до цели F . Функция $f(v) = g(v) + h(v)$ определяет порядок обхода вершин. Обеспечивает более высокую производительность, но требует качественной эвристики. В карьерных условиях стандартные эвристики (евклидово расстояние) недостаточно точны из-за рельефа. Для практического внедрения необходимы: динами-

ческие веса ребер (учет заторов, погоды, ремонтов), ограничения на ребра и вершины (запреты по типу техники, массе, очереди), многоальтернативность (N кратчайших путей), учет профиля пути с дифференциацией стоимости подъема для груженого и порожнего самосвала. Предлагается двухуровневое решение. Стратегический уровень: на основе статической 3D-модели строится граф и предварительно рассчитываются матрицы кратчайших расстояний. Tактический уровень: в реальном времени на основе данных телеметрии производится оперативная коррекция маршрута с учетом текущих ограничений.

Ожидаемый эффект: Сокращение длины рейса на 7-15%, снижение расхода топлива и износа шин на 10-20%, увеличение производительности, повышение безопасности за счет исключения хаотичных перемещений.

Заключение

Задача требует адаптации классических алгоритмов к динамике карьерной среды. Предложенная гибридная архитектура является эффективным решением. Перспективы связаны с интеграцией методов машинного обучения для прогнозирования загруженности сети.

Список литературы

1. Корьяков А.С., Кузнецов Ю.Н. Модели и алгоритмы планирования грузопотоков в карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №5.
2. Чернов А.В., Петров И.С. Модификация алгоритма A^* для задач маршрутизации карьерного транспорта с учетом рельефа // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 5. – С. 34-40.
3. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2013. – 1328 с.
4. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Виноградов Ю.И. Системные основы управления горнотранспортными комплексами карьеров. – М.: Изд-во АГН, 1999. – 287 с.
5. Кузьмин В.П. Модели и методы оптимизации транспортных систем карьеров. – Новосибирск: Наука, 1990. – 216 с.

УДК 621.604

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРУТОНАКЛОННОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА

В. Н. Макаров, проф., **В.Я. Потапов**, проф., **Н. В. Макаров**, канд. техн. наук,
В.В. Потапов, доц., канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Уточнена методика расчета крутонаклонного ленточного конвейера в части определения действующих на прижимной рычаг усилий и напряжений. Предложена графическая и математическая модель схемы силового взаимодействия элементов конструкции и транспортируемого материала. Получено уравнение максимального изгибающего момента, обусловленного конструктивными особенностями конвейера, что позволяет производить расчет геометрических параметров прижимного рычага, а также необходимого усилия поджатия пружины. Установлена существенная нелинейность зависимости массы крутонаклонного ленточного конвейера от угла его наклона при заданной производительности конвейера и высоте подъема транспортируемого груза. Показано, что с учетом ограничения угла наклона ленточного конвейера, обусловленного снижением положительного трения сил трения с его ростом, при определенном значении угла наклона, масса конвейера увеличивается пропорционально росту высоты подъема транспортируемого материала при сохранении производительности. С учетом влияния коэффициента трения, силы тяжести дополнительно передаваемого усилия на диафрагму, прижимной рычаг и транспортную ленту определен оптимальный диапазон угла наклона конвейера, обеспечивающего снижение его материалоемкости при заданной производительности по сравнению с известными конвейерами.

Ключевые слова: крутонаклонный ленточный конвейер, поперечные перегородки, угол наклона, насыпной материал, прижимной рычаг, энтура давления, изгибающий момент.

THE METHOD OF CALCULATING THE STEEPLY INCLINED BELT CONVEYOR TRANSPORT

Makarov V. N., Potapov V.Ya., Makarov N. V., Potapov V.V.,

A steeply inclined belt conveyor with fan-shaped transverse benches is proposed, which allows to increase not only the angle of its inclination, but also the mass of transported cargoes due to more efficient filling of the working space of the tape and counteraction to gravity forces. The proposed design of the conveyor significantly increases the effectiveness of dust suppression in the process of transporting bulk materials. The construction of the slope belt conveyor is protected as intellectual property in the form of patents for invention. The method for calculating the slope-belt conveyor in the part of determining the forces and stresses acting on the clamping lever is specified. A graphical and mathematical model of the scheme of force interaction of structural elements and transported material is proposed. The equation of the maximum bending moment due to the structural features of the conveyor is obtained, which makes it possible to calculate the geometric parameters of the clamping lever, as well as the necessary force for the spring. An essential non-linearity of the dependence of the mass of the slope-belt conveyor belt on its angle of inclination at a given conveyor capacity and the height of the lift of the transported cargo is established. It is shown that, taking into account the limitation of the angle of inclination of the belt conveyor due to the decrease in the positive friction of frictional forces with its growth, at a certain value of the angle of inclination, the mass of the conveyor increases in proportion to the growth of the lifting height of the transported material while maintaining productivity. Taking into account the influence of the coefficient of friction, the gravity force of the additional force transferred to the diaphragm,

the presser lever and the conveyor belt, the optimum range of the conveyor angle is determined, which reduces its material capacity at a given capacity in comparison with the known conveyors.

Keywords: *steeply inclined conveyor, transverse partitions, tilt angle, bulk material, clamping lever, pressure diagram, bending moment.*

Значительная часть транспортируемых грузов перемещают на требуемую согласно техническому заданию высоту. При этом в условиях ограниченного пространства возникает необходимость применения крутонаклонных ленточных конвейеров.

Изучение конструкции и принципа действия, известных крутонаклонных конвейеров показало, что в большинстве случаев задача по транспортированию грузов под значительным углом наклона решается за счет обжатия перемещаемого груза, т. е. увеличения силы трения, препятствующей смещению груза под действием силы тяжести. Применяемые в настоящее время типы конвейеров имеют ряд технических ограничений, главными из которых являются функционирование при углах наклона не более $25 - 30^\circ$, а также невозможность полной локализации пылеобразования [1-7].

С целью увеличения угла наклона и массы транспортируемых грузов ленточного конвейера за счет более эффективного заполнения предложен модернизированный ленточный конвейер [8-11]. Предлагаемый крутонаклонный ленточный конвейер содержит огибающую приводной и натяжной концевые барабаны 1 и 2 транспортную ленту 3 с грузовой и порожней ветвями 4 и 5. Подпружиненные прижимные рычаги 6 шарнирно закреплены по краям ходовых опор 7 для создания замкнутого контура ленты 3. Поперечные перегородки 8 выполнены из установленных внахлест сегментов 9 и 10 с возможностью обеспечения их подвижности относительно друг друга и поперек транспортной ленты 3. При этом шаг установки поперечных перегородок 8 равен шагу расположения прижимных рычагов 6.

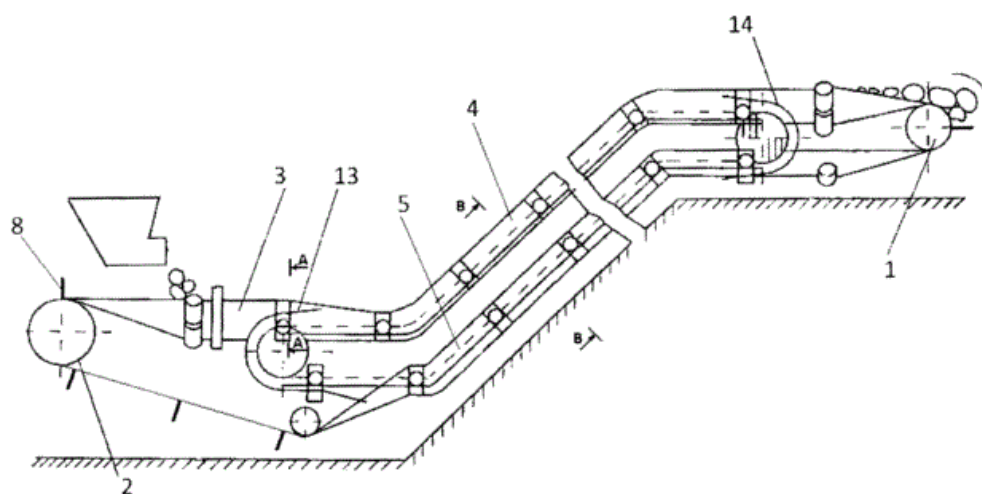


Рис. 1. Общая схема крутонаклонного ленточного конвейера

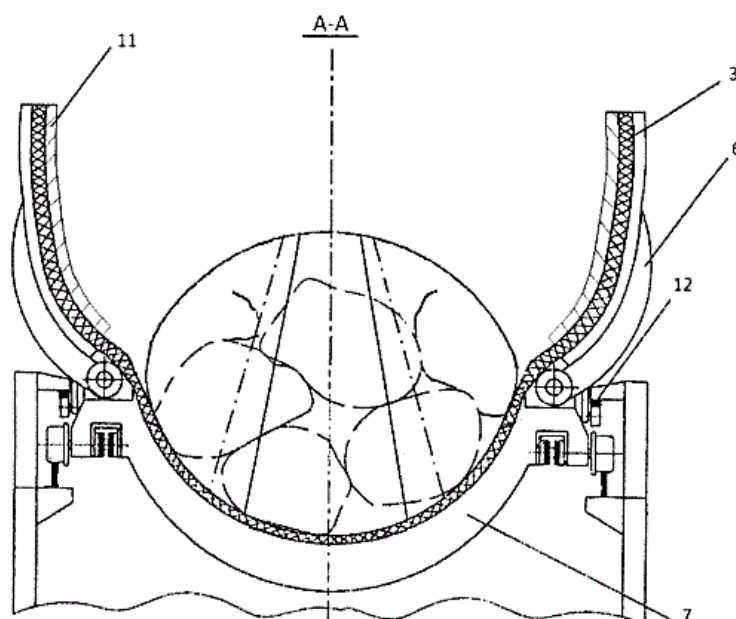


Рис. 2. Схема формирования замкнутого рабочего пространства по средствам прижимных рычагов и вверных поперечных перегородок (разрез А-А крутонаклонного ленточного конвейера)

Для восприятия нагрузок от поперечных сегментов 9 и 10 поперечных перегородок 8 и перемещаемого груза вверх боковые участки транспортной ленты 3 снабжены упорными элементами 11 из эластичного материала.

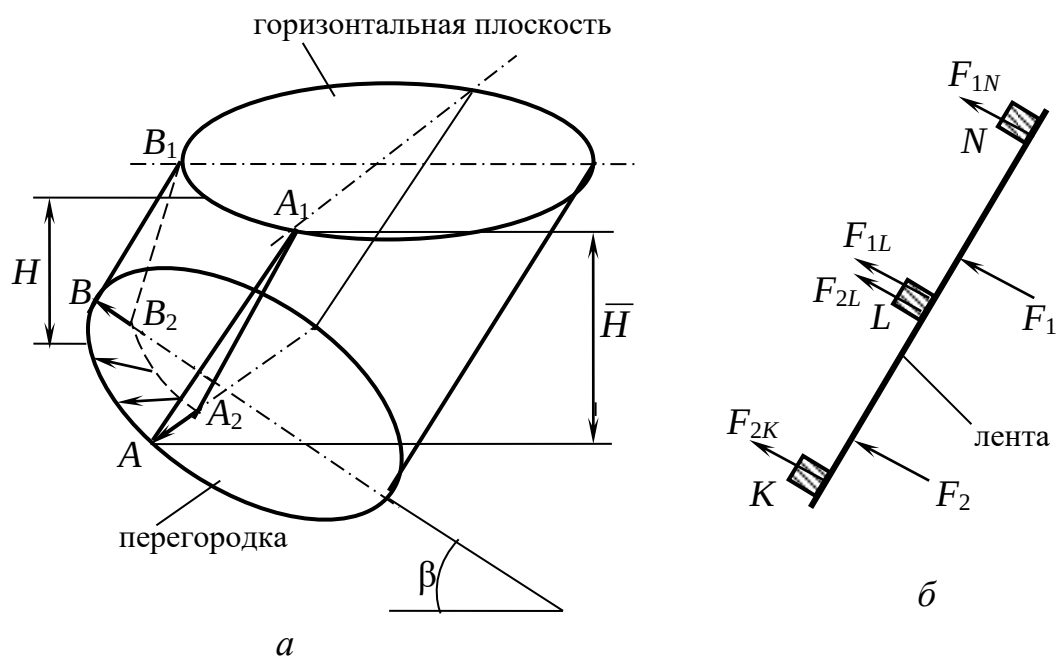
Подпружиненные прижимные рычаги 6 предназначены для взаимодействия с боковыми участками грузонесущей ленты 3 на верхней ветви 4 конвейера и поддержки ленты 3 на ее нижней ветви 5 (рис. 1-4).

В статье предложена методика расчёта от работоспособности которого зависит замыкание ленты в трубу и сохранение трубчатой формы в процессе транспортирования. Эпюра давления материала на ленту, которое воспринимается прижимным рычагом, представляет собой фигуру $ABB_1A_1A_2B_2$ (рис. 3, а).

Давление материала на прижимной рычаг в его произвольной точке равно

$$p = \gamma_3 H = \gamma_3 (\bar{H} - r \sin \alpha \sin \beta), \quad (1)$$

где γ_3 – эквивалентный насыпной удельный вес, равный насыпному удельному весу с поправками на трение частиц материала между собой и по поверхности ленты [7]; H – глубина расположения точки на прижимном рычаге (рис. 3, а); $\bar{H}$ – среднее значение глубины, соответствующее расположению условной жёсткой заделки прижимного рычага (рис. 3, 4); r – внутренний радиус прижимного рычага; α – угол, определяющий расположение точки на прижимном рычаге; β – угол между горизонталью и поверхностью перегородки.



a

б

Рис. 3. Давление материала на ленту:

a – эпюра давления; *б* – распределение силы давления между прижимными рычагами K, L, N

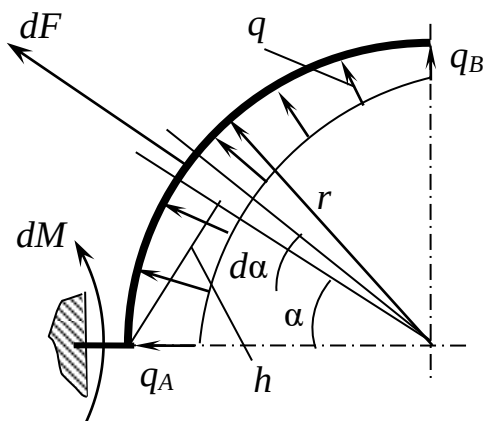


Рис. 4. Сила давления в виде распределённой нагрузки

Прижимные рычаги K, L, N вместе с лентой образуют два пролёта, в которых действуют силы давления F_1 и F_2 . Сила F_1 передаётся лентой на рычаги L и N в виде сил F_{1L} и F_{1N} , а сила F_2 – на рычаги K и L в виде сил F_{2K} и F_{2L} (рис. 3, б).

Распределённая нагрузка q в радиальном сечении равна площади эпюры p в сечении, имеющим форму треугольника с основанием, определяемым по формуле (1), и высотой $H = \bar{H} - r \sin \alpha \sin \beta$,

$$q = \frac{1}{2} \gamma_s (\bar{H} - r \sin \alpha \sin \beta)^2. \quad (2)$$

С учетом рис. 4 элементарная сила давления на дуге $r d\alpha$ равна:

$$dF = q r d\alpha = \frac{1}{2} \gamma_s (\bar{H} - r \sin \alpha \sin \beta)^2 r d\alpha. \quad (3)$$

Сила dF создаёт относительно жёсткой заделки элементарный момент:

$$dM = dFh = \frac{1}{2} \gamma_{\alpha} (\bar{H} - r \sin \alpha \sin \beta)^2 r^2 \sin \alpha d\alpha, \quad (4)$$

где h – плечо силы dF относительно заделки.

Момент, нагружающий рычаг в заделке, равен [12]:

$$\begin{aligned} M &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \gamma_{\alpha} (\bar{H} - r \sin \alpha \sin \beta)^2 r^2 \sin \alpha d\alpha = \\ &= \frac{\gamma_{\alpha} r^2}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\bar{H}^2 \sin \alpha - 2\bar{H}r \sin^2 \alpha \sin \beta + r^2 \sin^3 \alpha \sin^2 \beta) d\alpha = \\ &= \frac{\gamma_{\alpha} r^2}{2} \left(\bar{H}^2 - \frac{\pi}{2} \bar{H}r \sin \beta + \frac{2}{3} r^2 \sin^2 \beta \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Формула (5) позволяет определить действующий на прижимной рычаг максимальный изгибающий момент и осуществить расчет потребного усилия поджимающей пружины и элементов конвейера на прочность.

На рис. 5 приведен график изменения относительной удельной массы крутонаклонного ленточного конвейера $\bar{m}$ и приведенного изгибающего момента прижимного рычага $\bar{M}$ в сравнении с конвейером с углом наклона 15° в зависимости от угла наклона при заданной производительности и высоте подъёма транспортируемого материала [1, 4, 12].

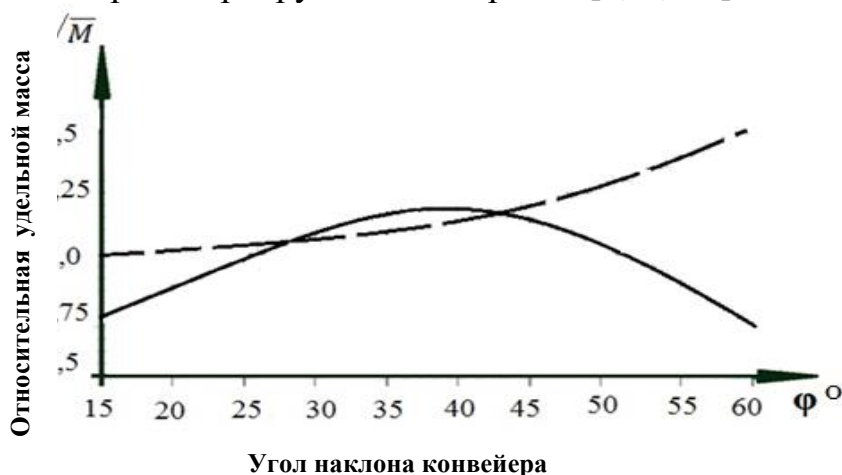


Рис. 5. Изменение относительной массы конвейера $\bar{m}$ (—); изменение приведенного изгибающего момента прижимного рычага $\bar{M}$ (—).

Экспериментальные исследования с использованием промышленных композитов показали возможность снижения материалоемкости конвейера до 12 % при угле его наклона $\Phi = 30-46^\circ$ увеличения производительности и конвейера в среднем на 16 % [16].

Использование предлагаемого крутонаклонного ленточного конвейера с поперечными перегородками позволяет снизить материалоемкость конвейерного транспорта в условиях ограничения производственных площадей при подъеме транспортируемого материала на заданную высоту.

Список литературы

1. Юдин А.В. Горнопромышленный транспорт. Расчет и проектирование транспортных систем: учеб. пособие. – Екатеринбург: УГГУ, 2014. 306 с.
2. Дьяков В.А., Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Ленточные конвейеры в горной промышленности. М.: Недра, 1982. 168 с.
3. Tubular belt conveyer with turnover of the return run of the belt / Davydov, S.; Kashcheev, I.; Sychev, S.; Lyaptsev, S. // [Refractories and Industrial Ceramics](#), Volume 51, Number 4, December 2010, pp. 250-255(6).
4. [Energy-saving pneumatic lift](#)/Davydov S.Ya., Kashcheev I.D.//[Refractories and Industrial Ceramics](#). 2011. - V., 1. - P. 1-5.
5. Ya. Davydov, N.P. Kosarev, N.G. Valiev, G. A. Boyarskikh, M. S. Filatov. Prerequisites for the Creation of Energy-Conserving Constructions of Tubular Belt Conveyors. *Refractories and Industrial Ceramics*. Vol. 57. No. 5. [Januari](#) 2017 pp.462-466.
6. Шешко Е.Е. Горнотранспортные машины и оборудование для открытых работ. М.: Изд-во МГГУ, 2006. 260 с.
7. Справочник по горнотранспортным машинам непрерывного действия. М.: Недра, 1982. 191 с.
8. Патент № 152528 RU. Заявка № 201414865 от 02.12.2014. Крутонаклонный ленточный конвейер. Давыдов С.Я., Филатов М.С., опубл.10.06.2015. Бюл. № 16.
9. Патент № 2455216 RU. Заявка № 2010142101 от 13.10.2010. Крутонаклонный ленточный конвейер. Мулухов К.К., Беслекоева З.Н., опубл.10.07.2012. Бюл. № 19.
10. Патент № 2589529 RU. Заявка № 2015107158 от 02.03.2015. Крутонаклонный ленточный конвейер. Макаров В.Н., Чуркин В.Н., Кокарев К.В., Давыдов С.Я., опубл.10.07.2016. Бюл. № 19.
11. Макаров В.Н., Кокарев К.В., Макаров Н.В, Чуркин В.Н., Крутонаклонный ленточный конвейер для перемещения огнеупорных материалов. *Новые огнеупоры* № 3, 2017, С. 31-32.
12. Смирнов В.И. Курс высшей математики Т.2. М.: Наука, 1974. 655 с.
13. Промышленные композиты. Возможности и перспективы \ Ю.В. Холодников [и др.]. – Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 455 с/

УДК 622.6

ПРОЕКТ РАЗРАБОТКИ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УГМК: НЕОБХОДИМОСТЬ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

А.Д. Пашко¹, канд. техн. наук, В.С. Великанов², докт. техн. наук, В.Х.Матвеев³,

¹НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, РФ

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

³Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Челябинск, РФ

*В исследовании представлен подход к созданию мобильных автономных транспортных платформ (МАТП) для безопасной и высокоэффективной работы в условиях предприятий горно-металлургического комплекса, в частности для внедрения в УГМК. Научная проблема заключается в необходимости комплексного обеспечения требований манёвренности, надёжного восприятия в сложной среде, безопасности, адаптивности к задачам и общей экономической эффективности решений. В работе обоснована актуальность разработки для технологического развития отрасли, сформулированы цель и задачи исследования. Методология основана на системном анализе, теории управления и ориентирована на практическую реализацию. Результатом являются принципы и рекомендации, направленные на преодоление ключевых технологических барьеров при внедрении автономных систем в производственную цепочку УГМК. **Ключевые слова:** автономные мобильные платформы, ограниченное пространство, методология проектирования, горно-металлургический комплекс, УГМК, роботизация, адаптивные системы.*

PROJECT DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS TRANSPORT SYSTEMS FOR UGMC: NECESSITY AND STRATEGIC ADVANTAGES

A. D.Pashko, V.S.Velikanov, V.H.Matveev

The study presents an approach to the creation of mobile autonomous transport platforms (MATP) for safe and highly efficient operation in the mining and metallurgical complex, in particular for implementation in the Ural Mining and Metallurgical Company. The scientific problem lies in the need to comprehensively ensure the requirements of maneuverability, reliable perception in a complex environment, safety, adaptability to tasks, and overall economic efficiency of solutions. The paper substantiates the relevance of the development for the technological development of the industry, and the purpose and objectives of the study are formulated. The methodology is based on system analysis, control theory, and is focused on practical implementation. The result is the principles and recommendations aimed at overcoming the key technological barriers in the implementation of autonomous systems in the production chain of UMMC.

Keywords: autonomous mobile platforms, limited space, design methodology, mining and metallurgical complex, UMMC, robotization.

Введение. Развитие мобильных автономных транспортных платформ (МАТП) соответствует не только национальным целям России в области технологического суверенитета, но и ключевым стратегическим задачам Уральской горно-металлургической компании (УГМК) по повышению эффективности, безопасности и конкурентоспособности. Внедрение таких систем напрямую способствует росту производительности горнотранспортных операций, снижению издержек и созданию принципиально нового уровня промышленной безопасности на предприятиях холдинга.

Несмотря на доступность отдельных роботизированных решений, для УГМК критически отсутствует целостная методика внедрения МАТП, учитывающая специфику ограниченных пространств шахт, карьеров и це-

хов. Существующие прототипы не гарантируют стабильной работы в наших условиях из-за комплекса противоречивых требований:

1. Компактность и манёвренность: Оборудование должно работать в ограниченном пространстве, выполняя сложные манёвры с грузом.
2. Устойчивое восприятие среды: Системы должны точно «видеть» и ориентироваться при пыли, вибрации, слабом освещении и без устойчивого сигнала GPS.
3. Гарантированная безопасность: Необходимо абсолютное исключение столкновений как между самими платформами, так и с людьми или инфраструктурой.
4. Гибкость и адаптивность: Платформа должна быть многофункциональной (транспорт, погрузка, диагностика) и быстро перенастраиваться под новые задачи.
5. Экономическая целесообразность: Решение должно быть оптимизировано по совокупной стоимости владения, автономности работы и возможности масштабирования на весь холдинг.

Текущие разрозненные технологии не решают эту проблему комплексно, что создаёт риски при их прямом внедрении.

Методика исследований.

Цель и задачи проекта для УГМК: Создать научно-практическую основу (методологию) для разработки и внедрения в УГМК автономных мобильных платформ, которые безопасно и эффективно работают в стеснённых пространствах, отвечая всем производственным и экономическим требованиям холдинга.

Задачи проекта:

1. Анализ мирового опыта и выявление ограничений существующих МАТП для условий предприятий УГМК.
2. Формирование принципов проектирования МАТП, ориентированных на нашу отраслевую специфику.
 - о Разработка и адаптация алгоритмов для: интеллектуального построения маршрутов в динамической среде; надёжного позиционирования и распознавания препятствий с использованием комплекса датчиков; координации групп машин для безаварийной совместной работы.
3. Создание гибкой системы управления, позволяющей оперативно менять сценарии работы платформ.
4. Разработка модели для технико-экономического обоснования проектов по роботизации.
5. Практическая проверка решений на симуляторах и опытных образцах в условиях, приближенных к реальным на предприятиях УГМК.

Результаты и их обсуждение.

В результате УГМК получит эксклюзивную методологию и набор инструментов для внедрения МАТП, включая принципы проектирования, программные алгоритмы и модель для расчёта экономического эффекта.

Практическая выгода для холдинга:

- Рост производительности за счёт круглосуточной работы техники и оптимизации логистики.

- Снижение аварийности и травматизма путём исключения человеческого фактора в опасных операциях.
- Сокращение операционных затрат на обслуживание парка, энергию и оплату труда.
- Повышение управляемости и предсказуемости производственных процессов.

Перспективы развития в УГМК:

- Создание и испытание рабочих прототипов для ключевых операций.
- Включение разработанных стандартов в корпоративные системы безопасности и сертификации.
- Интеграция автономных систем в цифровую экосистему УГМК (цифровые двойники, системы предиктивной аналитики и планирования).

Вывод. Реализация данного проекта позволит УГМК не только устранить существующий технологический пробел, но и занять лидирующую позицию в отрасли по уровню автоматизации. Разработанная методология станет основой для создания безопасных, экономически эффективных и масштабируемых автономных решений, что укрепит конкурентные преимущества холдинга на глобальном рынке.

Список литературы

1. Фурунжиев Р. И., Муравьёв А. А. Проектирование мобильных роботов: методы и алгоритмы. — М.: Машиностроение, 2015. — 416 с.
2. Лакота Н. А., Рудианов Н. А., Хрущёв В. В. Управление мобильными роботами и робототехническими системами. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 384 с.
3. Петров А. В., Иванов С. П. Методы локального планирования траектории для мобильных роботов в условиях ограниченного пространства // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2023. — Т. 24, № 5. — С. 312–320.
4. ГОСТ Р 60.0.0.4 2019 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. Базовая терминология для описания мобильных платформ.
5. ISO 13482:2014 Robots and robotic devices — Safety requirements for personal care robots. — Geneva: ISO, 2014.

УДК 621.867.2

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ КРИВОЛИНЕЙНОСТИ ТРАССЫ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ

Н.Е Серебренников, аспирант
НИТУ МИСИС, г. Москва, РФ

Рассмотрены конструктивные особенности конвейеров с подвесной лентой. Определены основные направления исследований, посвященных эксплуатационным характеристикам данного типа конвейеров. Определены перспективные направления исследований, связанных влиянием криволинейности трассы конвейера на его конструкцию и характеристики.

Ключевые слова: конвейер, подвесная лента, эксплуатационные характеристики, криволинейная трасса.

ON THE EFFECT OF THE TRACK CURVATURE ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF A CONVEYOR WITH A SUSPENDED BELT

N.E. Serebrennikov

The design features of conveyors with a suspended belt are considered. The main research areas related to the operational characteristics of this type of conveyor are identified. Promising research areas related to the influence of the curvature of the conveyor route on its design and characteristics are identified.

Keywords: conveyor, overhead belt, performance characteristics, curved route.

В последнее время все большей популярностью пользуются конвейеры с подвесной лентой. Конструкция таких конвейеров существенно отличается от обычных ленточных конвейеров – лента бортами крепится к роликовым подвескам, которые движутся по трубчатым направляющим. Таким образом, лента касается только приводного и обводного барабана, что значительно уменьшает сопротивление транспортированию [1]. Конвейеры с подвесной лентой имеют ряд преимуществ:

- отсутствие просыпей, пыления и дробления груза при его транспортировке;
- уменьшенная до 1,5 раз энергоемкость транспортирования;
- увеличение срока службы ленты в 1,5...2 раза;
- повышение угла наклона до 30...35 градусов;
- увеличенная на 30 % производительность при сохранении ширины ленты.

При анализе научных работ, посвященных конвейерам с подвесной лентой, были определены основные направления исследований в этой области:

- разработка и оптимизация узлов конвейера;
- исследования прочности и несущей способности ленты;
- исследования динамики движения ленты и сопротивлений движению;
- исследования устойчивости положения ленты;
- изучение прочности соединения ленты с роликами.

Стоит отметить, что значительная часть исследований посвящена транспортированию по прямолинейным трассам. При этом процессам, возникающим от криволинейности трассы, уделено недостаточно внимания. Наиболее полно проблемы влияния криволинейности трассы конвейера на процессы, возникающие в его ленте, описаны в работах Педченко А.В. [2, 3, 4]. Исследуются геометрические параметры желоба ленты и устойчивость формы ленты при изгибе в вертикальной плоскости, устанавливаются наиболее опасные и нагруженные места на трассе конвейера. В ходе исследований определено, что наиболее опасным случаем является прогиб порожней ленты выпуклостью вниз в условиях повышенного продольного натяжения бортов. При этом в исследованиях не затронуты процессы, возникающие при изгибе в горизонтальной плоскости. Можно выделить несколько задач касаясь влияния изгиба трассы конвейера в горизонтальной плоскости на его эксплуатационные характеристики:

- влияние криволинейности трассы на распределение нагрузок в ленте и подвесках;
- определение наиболее опасных участков трассы конвейера;
- влияние криволинейности трассы на стабильность положения ленты конвейера;
- влияние криволинейности трассы на сопротивление движению и энергетические показатели.

Вывод. При проектировании конвейеров с криволинейной трассой необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на разработку научно обоснованных рекомендаций по выбору эксплуатационных параметров КПЛ при работе на криволинейных трассах.

Список литературы

1. Родина, М. В. Научные проблемы проектирования конвейеров с подвесной грузонесущей лентой / М. В. Родина // Достижения вузовской науки : сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 03 февраля 2017 года. – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Центр развития научного сотрудничества", 2017. – С. 140-144. – EDN ZQPEQD.
2. Педченко О.С. Определение геометрических параметров желоба подвесной конвейерной ленты. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 5. – С. 373-376. –УДК 622.647.
3. Педченко О.С. Исследование устойчивости формы желоба подвесной конвейерной ленты при изгибе в вертикальной плоскости. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 5. – С. 376-379. –УДК 621.867.2.
4. Педченко О.С. Методика моделирования продольного изгиба подвесной конвейерной ленты в вертикальной плоскости. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 5. – С. 310-312. –УДК 621.867.2.

УДК 622.72

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ RAIL VEYOR В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.А. Чистяков, магистрант

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, РФ

В статье рассматриваются технические особенности, области применения и экономическая эффективность автоматизированной рельсовой транспортной системы Rail Veyor для перевозки горной массы. Показаны преимущества технологии перед традиционными видами транспорта: экологичность за счёт электропривода, полная автоматизация, способность работать в сложных условиях подземных выработок и на крутых уклонах. Приведены данные по экономической окупаемости и перспективам внедрения в российской горнодобывающей отрасли

Ключевые слова: Rail Veyor, горный транспорт, автоматизация, подземная добыча, экологичность, энергоэффективность.

APPLICATION OF RAIL VEYOR TRANSPORT SYSTEM IN MINING INDUSTRY Chistyakov M.A

The article examines technical features, application areas and economic efficiency of the automated rail transport system Rail Veyor for hauling bulk materials. Advantages of the technology over traditional transport types are demonstrated: environmental friendliness due to electric drive, full automation, ability to operate in complex conditions of underground workings and on steep gradients. Data on economic payback and prospects for implementation in the Russian mining industry are provided

Keywords: Rail Veyor, mining transport, automation, underground mining, environmental friendliness, energy efficiency

Современная горнодобывающая промышленность постоянно сталкивается с необходимостью повышения эффективности транспортировки горной массы при одновременном снижении экологической нагрузки и себестоимости производства. В этих условиях особую актуальность приобретают инновационные транспортные решения, сочетающие преимущества различных видов перевозок. Одной из таких технологий является канадская система Rail Veyor — автоматизированная рельсовая транспортная система для перевозки сыпучих грузов, разработанная компанией Railveyor Technologies Ltd. Система представляет собой беспилотный электрический состав, движущийся по специальной узкоколейной рельсовой колее. Основное назначение технологии — замена дизельного автотранспорта и частичная альтернатива ленточным конвейерам при транспортировке руды, угля и других полезных ископаемых на расстояния от 2 до 20 километров.

История развития технологии Rail Veyor начинается в конце 1990-х годов в Канаде, когда инженеры компании разработали концепцию автоматизированного рельсового транспорта для решения проблем вентиляции и экологической безопасности в подземных рудниках. Первый коммерческий проект был реализован в 2007 году на золотодобывающем руднике в Южной Африке, расположенном на глубине свыше 2000 метров. Успешная эксплуатация системы в экстремальных условиях подтвердила её работоспособность и экономическую целесообразность. В последующие годы

технология получила распространение в Северной Америке, Австралии и других регионах с развитой горнодобывающей промышленностью. В России интерес к системе проявили крупнейшие добывающие компании, включая ПАО «Норникель» и СУЭК, которые оценивают возможность внедрения технологии на подземных рудниках и угольных шахтах для снижения вентиляционных нагрузок и повышения автоматизации производственных процессов. Техническое описание системы включает рельсовую инфраструктуру, по которой движутся составы из тяговых модулей с электродвигателями и грузовых платформ объёмом 2,5–4,5 м³. Каждая вагонетка способна перевозить 4–6 тонн горной массы. Питание осуществляется от контактной сети постоянного тока напряжением 550–750 В. Скорость движения состава составляет 4,6 м/с (16,5 км/ч). Система способна преодолевать уклоны до 22 % и проходить повороты с минимальным радиусом 30,5 м, что обеспечивает её применение в условиях сложного рельефа и ограниченного пространства подземных выработок. Особенностью конструкции является применение одноосных тележек, снижающих массу подвижного состава. Рельсы монтируются на штампованных стальных шпалах, что обеспечивает быстрый монтаж и возможность перекладки пути. Управление движением полностью автоматизировано и осуществляется из центрального диспетчерского пункта с помощью программного обеспечения Railveyor Control System. Система включает датчики положения составов, автоматическое регулирование скорости, систему предотвращения столкновений и удалённое диагностирование оборудования. Все операции — от погрузки до разгрузки — выполняются без участия оператора, что исключает человеческий фактор и значительно повышает безопасность эксплуатации.

Принцип работы системы основан на концепции непрерывного цикла транспортировки. Грузёные вагонетки движутся по верхнему пути от пункта погрузки к месту разгрузки, а порожние вагоны возвращаются по нижнему пути, часто в опрокинутом положении, что позволяет компактно размещать двойную нитку рельсов в ограниченном пространстве подземных выработок. Погрузка материала осуществляется непосредственно в карьере или подземном забое с помощью экскаваторов или дробильных установок. По команде системы состав отправляется по маршруту, на пункте выгрузки платформы автоматически опрокидываются, разгружая содержимое в приёмный бункер или на конвейерную линию. После разгрузки вагонетки возвращаются в зону погрузки для повторного цикла. Такой подход обеспечивает постоянную транспортировку горной массы без простоев, характерных для циклического транспорта. Области применения системы весьма разнообразны и охватывают как подземную, так и открытую добычу полезных ископаемых. Наиболее эффективно технология рекомендовала себя в подземных рудниках с протяжёнными горизонтальными или слабонаклонными выработками. Здесь система применяется для транспортировки руды от забоя к подземным дробильным установкам, а также для откатки горной массы от дробилок к подъёмникам. Ключевым преимуществом в подземных условиях является полное отсутствие вы-

хлопных газов, что позволяет значительно сократить мощность вентиляционных установок и улучшить условия труда горняков. На открытых горных работах система используется для транспортировки вскрышных пород и полезного ископаемого на средние расстояния от 3 до 15 километров, особенно в условиях сложного рельефа, где прокладка конвейеров экономически нецелесообразна. Преимущества применения на карьерах включают возможность преодоления значительных уклонов без дополнительных инженерных сооружений, быструю перенастройку маршрута при изменении конфигурации карьера и независимость от погодных условий.

Экономическая эффективность внедрения системы подтверждена многочисленными кейсами эксплуатации. Для типовой системы длиной 5 км с производительностью 4000 т/ч общая стоимость проекта составляет 10–14 млн. долларов США, включая рельсовую инфраструктуру, подвижной состав, систему электроснабжения и автоматики. Годовые эксплуатационные затраты на перевозку одного миллиона тонн груза оцениваются в 580–720 тыс. долларов, включая расходы на электроэнергию, техническое обслуживание, амортизацию и минимальный персонал. Эти затраты на 30–45 % ниже по сравнению с использованием дизельных автосамосвалов и на 15–25 % ниже затрат на эксплуатацию ленточных конвейеров при аналогичных условиях. Срок окупаемости инвестиций при замене дизельного автотранспорта составляет 2,5–4 года, при замене конвейерной системы — 4–6 лет. Дополнительный экономический эффект достигается за счёт снижения затрат на вентиляцию в подземных условиях до 40 %, уменьшения страховых премий благодаря повышению безопасности, а также сокращения простоев.

Экологические преимущества системы являются одними из ключевых факторов её привлекательности. При использовании электроэнергии из возобновляемых источников система становится полностью углеродно-нейтральной. Даже при питании от традиционных электростанций выбросы углекислого газа на тонну перевозимого груза в 3–4 раза ниже, чем у дизельных самосвалов. Уровень шумового загрязнения не превышает 65 децибел на расстоянии 10 метров, что значительно ниже 85–95 децибел у дизельной техники. Отсутствие двигателей внутреннего сгорания полностью исключает риск загрязнения почвы и грунтовых вод утечками топлива и масел. С точки зрения промышленной безопасности система практически исключает дорожно-транспортные происшествия, которые являются одной из основных причин травматизма в горнодобывающей отрасли. В подземных условиях устраняется риск отравления выхлопными газами, а снижение вибрационной и шумовой нагрузки положительно влияет на здоровье работников.

Несмотря на значительные преимущества, система Rail Veyor имеет определённые ограничения и не является универсальным решением для всех условий. Её применение экономически оправдано при длине трассы от 2 до 20 километров, годовом объёме перевозок от 1,5 млн. тонн и наличии стабильного маршрута на период не менее 7–10 лет. Технология особенно эффективна в условиях сложного рельефа с уклонами 8–22 % и в

подземных условиях с ограничениями по вентиляции. Не рекомендуется применять систему при очень коротких расстояниях менее 1 км, так как срок окупаемости становится неприемлемым, а также при очень длинных трассах свыше 25 км, где ленточные конвейеры становятся более выгодными. Дополнительными ограничениями являются частое изменение конфигурации забоев, отсутствие надёжного энергоснабжения и недостаточные объёмы перевозок менее 500 тыс. тонн в год. Перспективы развития технологии связаны с несколькими направлениями модернизации. Ведутся работы по внедрению рекуперативного торможения, позволяющего возвращать до 30% энергии при спуске гружёных составов на нижние горизонты. Активно развивается интеграция с системами цифрового двойника для прогнозирования износа компонентов и планирования технического обслуживания. Разрабатываются гибридные решения, сочетающие преимущества Rail Vveyor с автономными электросамосвалами на участках с часто изменяющейся конфигурацией. В России потенциал внедрения технологии оценивается как значительный: более 60 подземных рудников с глубиной отработки свыше 500 метров нуждаются в замене устаревшего транспорта, а угольная промышленность сталкивается с проблемой вентиляции на глубоких шахтах.

Транспортная система Rail Vveyor представляет собой зрелую и технически отработанную технологию, занимающую важную нишу между традиционными видами транспорта в горнодобывающей промышленности. Её ключевые преимущества — полная автоматизация, экологичность за счёт использования электроэнергии, высокая энергоэффективность, способность работать в сложных условиях подземных выработок и на крутых уклонах — делают её привлекательной для современных предприятий, стремящихся к снижению углеродного следа и цифровой трансформации производственных процессов.

В перспективе ближайших десяти лет технология Rail Vveyor может занять значимую долю рынка систем внутрикарьерного и подземного транспорта, особенно в сегменте средних и крупных горнодобывающих предприятий, стремящихся к повышению эффективности и устойчивости своих операций.

Список литературы

1. Транспортная система «Rail-Vveyor» как решение для горнодобывающей отрасли / Rosmining.ru. – 2024. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosmining.ru>
2. Перспективы внедрения автоматизированных транспортных систем на угольных шахтах России: Аналитический обзор / СУЭК. – Кемерово, 2025. – 18 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Пленарное заседание

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ РОССИИ: ВЫЗОВЫ, РЕАЛИИ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ. А.В. Глебов, ИГД УрО РАН	4

2. ОТ 3D МОДЕЛИ К КАРЬЕРЕ: ПЕРВАЯ ПРОФЕССИЯ В ИНЖЕНЕРНОМ ДЕЛЕ. Н.В. Савинова, Ю.О. Переверзев, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», АНО «Уральская научно-техническая творческая мастерская «М-Лабс».....	8

3. УРАЛМАШЗАВОД – ТВОРЕЦ ГОРНОЙ ТЕХНИКИ. Ю.А. Лагунова, С.А. Червяков, В.О. Фурин, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», ООО «СГИ», ПАО «Уралмашзавод».....	13

<u>Секция 1. Машины и оборудование для открытых и подземных горных работ</u>.....	23

1. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСОВ ШАХТНОГО ВОДООТЛИВА. Д.С. Дьяк, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва	24

2. СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ГОЛОВНЫХ КАНАТОВ НАКЛОННОГО ПОДЪЁМА. С.В. Белов, Е.Л. Садыков, В.Я. Потапов, В.В. Потапов, П.В. Трутнев, ФБГОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	26

3. АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД. В.Я. Потапов, В.В. Потапов, М.В. Архипов, А.М. Кузнецов, К.А. Парамонов, ФБГОУ ВО «Уральский государственный горный университет».....	30

4. АЛГОРИТМ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ГОРНЫХ МАШИН. И.В. Бровченко, Е.Б. Мазиков, Д.А. Задков, Санкт-Петербургский горный университет имени императрицы Екатерины II	35

5. ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ УПЛОТНИТЕЛЬНОГО УЗЛА СИЛОВОГО ГИДРОЦИЛИНДРА. Г. Д. Буялич, К. Г. Буялич, М. А. Бяков, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.....	39

6. О ПРИЧИНАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ. В. С. Великанов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург	43

7. ТИПОЛОГИЯ БАРЬЕРОВ ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДНЫХ ПРИВОДОВ В КАРЬЕРНЫЕ ЭКСКАВАТОРЫ РФ. П.С. Волобуева, Ю.А. Лагунова, К.Ю. Летнев, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	46

8. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ТОРМОЖЕНИЯ. С.В. Белов, Л.А. Гаврилова, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	51
9. СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ. С.Н. Гамаюнов, А.И. Жигульская, Б.Ф. Зюзин, Л.В. Копенкина, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь.....	55
10. ПОВЫШЕНИЕ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ РЕЗЦОВОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ. Д.С. Грибов, К.А. Просовский, А.О. Говорливых, Д.И. Шишлянников, АО «ВНИИ ГАЛУРГИИ», г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.....	59
11. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ БУРОВЫЕ УСТАНОВКИ ОЧИСТНОГО БУРЕНИЯ. О.С. Данилов, С.М. Баладжаев, Д.Л. Сливцев, ФГБОУ ВО «Заполярный унтет им. Н.М. Федоровского», г. Норильск.....	63
12. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНЫХ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЕЙ. Д.Я. Соловых, А.И. Есюнин, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.....	67
13. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LS-УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОПРИВОДОМ ГОРНЫХ МАШИН. П.А. Ефимов, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва	71
14. МОБИЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДОБЫЧИ ТОРФА. А.И. Жигульская, А.А. Иванов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь.....	75
15. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО МАССИВА РАБОЧИМ ИНСТРУМЕНТОМ ГОРНЫХ МАШИН. Д.А. Задков, С.Е. Речкин, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург.....	79
16. РЕЖИМЫ ПУСКА И ТРОГАНИЯ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН. В.Ю. Зверев, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.....	83
17. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РЕЗЦОВ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОГРЕБЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ. Д.С. Юсов, П.В. Иванова, С.Л. Иванов, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург	86
18. ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКСКАВАТОРОВ. К.М. Исаев, В.С. Шестаков, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург	88

19. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПОРЦИЙ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА BUCYRUS 495HD. И.А. Иов, И.В. Зырянов, Н.К. Кузнецов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, ФГАОУ ВО «Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова», г. Мирный, ПАО «Уралмашзавод», г. Екатеринбург.....	92
20. УВЕЛИЧЕНИЕ НАРАБОТКИ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОПОНИЖАЮЩИХ СКВАЖИН. В. К. Картавцев, М. О. Говорливых, Н. К. Кинетов, Научный руководитель: Д. И. Шишлянников, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.....	96
21. К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА. А.В. Кожей, Д.С. Стожков, Н.В. Шнайдер, А.Е. Угольников, ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет», г. Екатеринбург.....	99
22. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЭКСКАВИРОВАННОГО ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ ПОЛОЙ КОНИЧЕСКОЙ ФРЕЗОЙ С ПРОХОДНЫМИ НОЖАМИ. Г. С. Козачков, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».....	102
23. О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕГЛАМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА АВТОМАТИЧЕСКИХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ СМАЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ. В.О. Колпаков, Д.А. Шибанов, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.....	105
24. ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОГРУЗЧИКА В УСЛОВИЯХ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ. А. А. Коминов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург	109
25. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ВЫЕМОЧНО-ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН. П.А. Коновалов, А. Федченков, Ю.А. Лагунова, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург.....	113
26. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПРУГОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОХОДИМОСТИ ПО НЕОСУШЕННОЙ ЗАЛЕЖИ. Л.В. Копенкина, В.Ф. Сеницын, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь.....	119

27. ПРИВОД ПОВОРОТНОГО МЕХАНИЗМА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА: ВИДЫ, ОТЛИЧИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ. М.Д. Ларионов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург	123
28. БАРАБАННАЯ ФРЕЗА С НЕКРУГЛЫМИ КОЛЕСАМИ В ПРИВОДЕ. Я.Л. Либерман, О.А. Лукашук, А.Г. Мазеин, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.....	127
29. УВЕЛИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КОМБАЙНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ. Д.А. Лосев, Д.А. Ситников, И.Х. Тюбеев, Д.И. Шишлянников, АО «ВНИИ ГАЛУРГИИ», г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.....	132
30. ОЦЕНКА СЛОЙНОСТИ УРАВНОВЕШЕННОГО ЧЕТЫРЕХСАТЕЛЛИТНОГО ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО РОБОТА. И.В. Максимов, М.И. Верховский, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.....	136
31. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ РАСШИРИТЕЛЕЙ ОБРАТНОГО ХОДА ДЛЯ БУРЕНИЯ ВОССТАЮЩИХ СКВАЖИН. Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.Ю. Борисов, О.А. Алиткина, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово.....	139
32. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛОВ БУЛЬДОЗЕРОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ. Д.С. Москвина, С.Ю. Кувшинкин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.....	143
33. РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА ТИПА «ОБРАТНАЯ ЛОПАТА» С РЕГУЛИРУЕМЫМ УГЛОМ РЕЗАНИЯ ЗУБЬЯМИ КОВША. А.К. Муравский, Д.Б. Ковалевский, Р.В. Разорвин, К.Д. Ложкин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь.....	147
34. К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА. П.А. Побегайло; А.Н. Ильина, ФГБОУВО МАИ (НИУ), Москва...	150
35. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИДРОПЕРФОРАТОРОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ КРЕПКИХ ПОРОД. К.Б. Кызыров, О.С. Решетникова, Д.А. Ашимбаев, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, Казахстан.....	154
36. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С КОМ-	159

ПАКТНЫМИ РОТОРНЫМИ ЭКСКАВАТОРАМИ. И.А. Сайда-минов, Д.В. Ермолаев, Филиал «МИСИС» в г. Губкине	
37. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ РАБОТЕ КОМБАЙНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ. А. В. Сенькин, Д. И. Шишляников, А.А. Иванченко, С.А. Фролов, А.А. Рыбин, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.....	164
38. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СЫПУЧЕСТИ СМЕРЗШЕГОСЯ УГЛЯ НА РАЗГРУЗОЧНЫХ ТЕРМИНАЛАХ МОРСКИХ ПОРТОВ. Р. Д. Скворцов, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, г. Москва	168
39. ДИНАМИЧЕСКИЙ СИЛОВОЙ АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКГ-20К С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНОГО МАНИПУЛЯТОРА. О.У. Хамидов, Д.А. Шибанов, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург.....	172
40. КОМБИНИРОВАННЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН АГРЕГАТА ДЛЯ ПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ. В.И. Шишляников, О.И. Плотникова, Е.А. Бисерова, А.О. Щенин, Д.И. Шишляников, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.....	177
41. АНАЛИЗ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ВОДЫ В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ШАХТНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК. Т. И. Юсупов, В.Я. Потапов, В.В. Потапов, Сибайский институт (филиал) Уфимского университета науки и технологий, г. Сибай, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург.....	181
<i>Секция 2. Машины и оборудование обогатительных фабрик</i>	185
1. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКЕ «ЧЕРНИГОВСКАЯ». М.С. Горяйнов, В.М. Ефременко, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово.....	186
2. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ. Г.А. Басалай, Д.А. Карпович. Белорусский национ. техн. университет, Минск, Беларусь.....	189
3. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОФИЛИРОВАНИЮ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ КОНУСНЫХ ДРОБИЛОК КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ. И.Д. Бодров, Н.С. Голиков, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.....	193

4. В ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ПРАКТИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИДЕИ ВЫПОЛНЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫМ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЩЕК ДРОБИЛЬНЫХ МАШИН. В.С. Бойко, И.А. Жуков, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.....	196
5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ. В.С. Бочков, А.Г. Бабенко, К.В. Бочкова, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	199
6. АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТОРФОВОДЯНОЙ СУСПЕНЗИИ. А.С. Данилов, А.А. Гажов, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».....	203
7. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ В ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ АСБЕСТООБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК. В.А. Елохин, В.Я. Потапов, В.В. Потапов, Т.В. Гредина. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	207
8. НАГРУЗКИ, ВОСПРИНИМАЕМЫЕ ГУСЕНИЧНОЙ ХОДОВОЙ ЧАСТЬЮ ПРИ РАБОТЕ САМОХОДНЫХ ДРОБИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УСТАНОВОК. Ю.А. Лагунова, Д.О. Шпанькова, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург,.....	213
9. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУД ПРИ ДРОБЛЕНИИ В АППАРАТАХ МНОГОКРАТНОГО УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ. Е.С. Львов, А.И. Матвеев. ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Якутск.....	219
10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД. В.Я. Потапов, Д.С. Стожков, В.В. Потапов, К.А. Парамонов. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»....	223
<u>Секция 3. Геологоразведочное и нефтегазовое оборудование</u>	230
1. ЭВОЛЮЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КУСТОВЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК. Н.М. Баженов, Л.А. Гаврилова, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург	231
2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ BLAST MAKER ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПАСПОРТА БУРЕНИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК. О.С. Данилов, А.С. Звягина, Д.А. Охрименко, ФГБОУ ВО «Заполярный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск.....	235

3. К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СПУСКОПОДЪЕМНОГО КОМПЛЕКСА БУРОВЫХ УСТАНОВОК. С.В. Воробель, А.К. Муравский, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь	239
4. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕМОНТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ. В.Ф. Копачев, Ю.В. Холодников, Е.А. Копачева. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, ООО СКБ «Мысль»	242
5. ЗАЩИТА ПОГРУЖНЫХ ГАЗОСЕПАРАТОРОВ ОТ ПОЛЕТА В СКВАЖИНУ. Ю. Г. Коротков, Д. И. Дремина, А. О. Будыкин, Д. В. Мусихин, А. М. Кадыров, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».....	246
6. СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СРОКА СЛУЖБЫ БУРОВЫХ СТАНКОВ СБШ-250 В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН. М.Б. Хамидов, НИТУ МИСИС, Москва	249
7. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОВЫХ ПЕРЕДВИЖНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. С.А. Хорошавин, Д.Ф. Гайсин, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.....	252
<u>Секция 4. Вопросы моделирования и расчеты сложных технических систем</u>	256
1. К РАСЧЕТУ АРОЧНОЙ КРЕПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЕКТА. К. Бейсембаев, В. Гаузер, В. Куклич, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан.....	257
2. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ENAS DEM. С.В. Брякунов, А.С. Бормотов. ООО «Системы инженерного анализа», г. Екатеринбург, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.....	261
3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ENAS SOLIDSIM. С.В. Брякунов, ООО «Системы инженерного анализа», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.....	270
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕКОСНЫХ НАГРУЗОК В ЭЛЕМЕНТАХ ОПОР МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ. В. С. Великанов, «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	276

5. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОХОДЧЕСКИМ ЦИКЛОМ НА ОСНОВЕ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ. Е.А. Волкова, А.В. Дружинин, ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет», г. Екатеринбург.....	278
6. НЕЙРОСЕТЕВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ В КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РОБОТИЗАЦИИ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА УГЭ-300. Е.А. Волкова, С.А. Хорошавин, В.Н. Полузадов, ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет», г. Екатеринбург, Уральский Федеральный Ун-тет им. первого президента России Б.Н. Ельцина	282
7. СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В МЕХАНИЗМАХ ЭКСКАВАТОРА. И.В. Зырянов, А.А. Иов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск.....	286
8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. И.П. Лян, ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва.....	290
9. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СОРТИРОВКА: РАЗРАБОТКА ПРОСТОГО АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ СВЕТЛЫХ И ТЕМНЫХ КАМНЕЙ НА РYTHON. С.А. Майоров, М.А. Новгородов, ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет», г. Екатеринбург...	294
10. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ: ПРОГРАММА ДЛЯ ПОДСЧЕТА ОБЪЕМА ГОРНОЙ МАССЫ В ОТВАЛЕ ПО ЗАМЕРАМ ДРОНА. С.А. Майоров, Л.Д. Фролова, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».....	297
11. РАЗРАБОТКА TELEGRAM-БОТА ДЛЯ ОПОВЕЩЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРА О ПРОСТОЕ ЭКСКАВАТОРА. С.А. Майоров, Р.Е. Костюнин, ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет».....	299
12. СОВЕРШЕНТВОВАНИЕ ГАЗООТСАСЫВАЮЩИХ ВЕНТИЛЯТОРОВ НА БАЗЕ ПРИРОДОПОДОБНЫХ СОРАЗМЕРНОСТЕЙ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ОЧИСНОЙ ЗАБОЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ. Е. С. Нурхожаев, В.Н. Макаров, С. А. Попов, Р.Г. Ахметов, АО «Костанайские минералы», г. Житикара, Республика Казахстан, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия.....	302
13. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ РУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ ГОРНЫХ МЕТАЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ. Е. С. Нурхожаев, В.Н. Макаров, С. А. Попов, Р.Г. Ахметов, АО «Костанайские минералы», г. Житикара, Республика Казахстан, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, РФ.....	305

14. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОКАЗАНИЙ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТЕНЗОРОЗЕТКИ.	В.В. Макарова, Ю.А. Лагунова, В.С. Великанов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург....	309
15. К МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПОРОДНОГО БЛОКА ПО КОЗЫРЬКУ КРЕПИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА.	Ж.Нокина, К. Бейсембаев, Н. Малыбаев, Карагандинский техн. университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан..	313
16. ВЛИЯНИЕ ВИДА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООТВОДА В АНОДНОМ УЗЛЕ ПЛАЗМОТРОНА.	Р. А.Окулов, Е.С.Коновалова, К. С.Коновалов, П. Н.Синицин. ФГБУН «Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.....	317
17. ДИНАМИКА СИСТЕМЫ "ВИБРАЦИОННАЯ МАШИНА – ГРАНУЛИРОВАННАЯ СРЕДА".	Г. Я. Пановко, А. Е. Шохин, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва.....	321
18. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЗУБА КОВША КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ЭКВИВАЛЕНТНОМ НАГРУЖЕНИИ.	А.А. Пецык, А.П. Харченко. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва	325
19. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАПАНОВ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ.	О.В. Сокерина, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	329
20. НАРАЩИВАЕМЫЕ БАШЕННЫЕ ПОДЪЕМНИКИ, ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА.	В.И. Точилин, АО «Спецтехномаш», г. Красноярск.....	333
21. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ БЛОКА КРОВЛИ.	Г.Д. Буялич, К.Г. Буялич, В.Ю.Умрихина, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.....	337
22. ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ РОТОРА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА.	Я.Л. Либерман, О.А. Лукашук, Маалаоуи Хамед (Тунис), ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	341

23. ПОСТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СТРУКТУРЫ СОПРЯЖЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ «СПАСАТЕЛЬНЫЙ РОБОТ – ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ УГЛЕПОРОДНЫЙ ГРУНТ» НА ОСНОВЕ MATLAB-EDEM-RECURDYN-PARTICLEWORKS.	
Чжэн Дундун (Китай), Ю.А. Лагунова, ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный ун-тет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург	345
<u>Секция 5. Проблемы материаловедения, производства и конструирования в машиностроении</u>	349
1. ПРИМЕНЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, УКРЕПЛЕННЫХ ОКСИДАМИ И КАРБИДАМИ.	
Д.А. Цевменко, В.Е. Адас. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	350
2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОМ ФОТОПОЛИМЕРНОЙ 3D-ПЕЧАТИ.	
В.Е. Адас, М.Л. Хазин, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	354
3. ВЫБОР ПРИБОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН.	
А.Д. Халимоненко, А.А. Голова, Ю.Д. Сопина, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II	359
4. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6.	
А.А. Дзюба, Е.Г. Злотников, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.....	363
5. УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ АВТОКОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.	
Д.Ю. Ершов, К.В. Курыленко, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный ун-тет императрицы Екатерины II»	367
6. К ВОПРОСУ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ЯЗВЕННОЙ КОРРОЗИИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ.	
В.И. Болобов, Г.Г. Попов, И.В. Жуйков. Санкт-Петербургский горный университет имени Императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург.....	371
7. ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОТОТИПИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ.	
А. Н. Михайлов, Д. С. Жарких, Д. О. Киселица, Д. В. Огренич, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР, РФ.....	376

8. ТРУДНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ. Н.А. Новикова, Я.В. Зырянова. ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет», г. Екатеринбург.	382
9. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ НА ПРИМЕРЕ ВНЕДРЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ (РЕЕК CF и ESD). И. М. Прокофьев, В. П. Захарова, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.....	387
10. СРАВНИТЕЛЬНАЯ СТОЙКОСТЬ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ 09Г2С И 20 К ВОДОРОДНОМУ ОХРУПЧИВАНИЮ. В.И. Болобов, Г.Г. Попов, Г.А. Тигранян, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург.....	390
11. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОТВЕРСТИЙ РАСТОЧНЫМИ ОПРАВКАМИ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ. М.А. Адмакин, А.Д. Халимоненко, А.А. Голова, Ю.Д. Сопина, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.....	392
12. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ОРЕБРЕНИЯ МЕДНЫХ ТРУБ ДЛЯ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ. А.Н. Михайлов, С.Б. Котляров, В.Б. Котляров, Б.С. Котляров. Донецкий национальный технический ун-тет, г. Донецк, ДНР.....	396
13. ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ ПОСАДОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ НА РЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. А.Н. Михайлов, В.Б. Котляров, С.Б. Котляров, Б.С. Котляров. Донецкий национ. технический ун-тет, г. Донецк, ДНР, РФ....	400
<u>Секция 6. Ремонт, сервисное обслуживание и диагностика горного оборудования</u>	404
1. ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА БУРОВЫХ СТАНКОВ. И.С. Воробьев, АО «Копейский машзавод», г. Копейск, Челябинская область..	405
2. РЕМОНТНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭКСКАВАТОРАМ-ДРАГЛАЙНАМ В СЛУЧАЕ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЦАПФЫ. В.С. Ефремов, К.А. Ананьев, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.....	409
3. ОПЫТ ЗАРУБЕЖНЫХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ОБСЛУЖИВАНИИ РУКАВОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ. К.А. Ананьев, О.В. Долбня, С.А. Гордин. ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово...	413
4. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ. Л.И. Андреева, Т.И. Красникова, Челябинский филиал Института горного дела УрО РАН, г. Челябинск, ООО «Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства (ООО «НИИОГР»», г. Челябинск	417

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ. В. С. Великанов, ФГБОУ ВО «Уральский госуд. горный университет», г. Екатеринбург.....	421
6. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ПРИЧИН ОТКАЗОВ ПОГРУЗОЧНОЙ ТЕХНИКИ CATERPILLAR. А.С. Герасимов, И.В. Телиман, И.И. Ерахтина, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан.....	425
7. ЦИФРОВИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА КНР. И.В. Дрягина, А.П. Комиссаров. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	429
8. К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ СИСТЕМ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЖИДКОСТНОЙ СМАЗКИ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ. Е.С. Иванова, С.Л. Иванов, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.....	432
9. О НЕОБХОДИМОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА, ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СМАЗКИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. В.О. Колпаков, М.С. Селезнев, С.П. Подхалюзин. ООО «ТЕХПАРТНЕР», г. Санкт-Петербург.....	436
10. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГОРНЫХ МАШИН. К.М. Кыныбаев, И.В. Телиман, Ж.Н. Нокина, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан.....	441
11. ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ОТКАЗОВ И МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ КОЛЕСНОГО РЕДУКТОРА ГИБРИДНОГО КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА. Линь Цюньхао (Китай), Ю.А. Лагунова. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.....	445
12. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ИЗНОСА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. С.А. Майоров, А.Р. Игнатова. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»....	450
13. О ВЛИЯНИИ КВАЛИФИКАЦИИ МАШИНИСТА НА НАДЕЖНОСТЬ ХОДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА. В.В. Макарова, Уральский Федеральный Университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург.....	452
14. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУРОВЫХ УСТАНОВОК P11 VIPER 231 НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ. В.В. Маличенко, И.В. Телиман,	454

П.Г. Безкоровайный, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан.....

15. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СМАЗЫВАНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОБ.

Е.А. Медведь, А.С. Смирнов, Д.А. Шибанов, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», Санкт-Петербург.....

458

16. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. **К.С. Репкина**, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.....

462

17. ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЁННОСТИ СМАЗОЧНОГО МАСЛА РЕДУКТОРОВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ НА ОСНОВЕ БАЗОВОЙ ШКАЛЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ. **А.Э. Салимов, С.Л. Иванов**, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. г. Санкт-Петербург.....

466

Секция 7. Карьерный транспорт и транспорт нефти и газа...

471

1. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА РАБОТУ АВТОТРАНСПОРТА В КАРЬЕРЕ. **К.В. Абдрахманова, М.О. Краснова**, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург....

472

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНЫХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ. **К.В. Абдрахманова, Е.Е. Ненашева**, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....

475

3. СРАВНЕНИЕ КОНЦЕПЦИЙ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. **С.А. Гордин**, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

479

4. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ВНЕДРЕНИИ БЕЗЛЮДНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА КАРЬЕРАХ. **Жилинков А.А., Ю.А. Лагунова**, Уральский государственный горный университет, УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург.....

483

5. НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ РОЛИКОПОР ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ.

Е.Г. Кузин, Д.С. Грибов, С.А. Бурштык, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске..

487

6. О ПРОБЛЕМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНООСНЫХ АВТОТРАКТОРНЫХ ПРИЦЕПОВ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ИНЕРЦИОННЫМИ ТОРМОЗНЫМИ СИСТЕМАМИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ. **В.В. Кузнецов, Ю.Н. Строганов**, Военный учебный центр при ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ...

491

7. РОБОТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНОЙ ДОБЫЧЕ: ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ САМОСВАЛОВ.	Д.Н. Лаженцев, В.П. Захарова, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.....	495
8. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ САМОСВАЛОВ В КАРЬЕРЕ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПРОБЕГА.	С.А. Майоров, А.А. Ермаков. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	497
9. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРУТОНАКЛОННОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА.	В. Н. Макаров, В.Я. Потапов, Н. В. Макаров, В.В. Потапов. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	499
10. ПРОЕКТ РАЗРАБОТКИ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УГМК: НЕОБХОДИМОСТЬ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА.	А.Д. Пашко, В.С. Великанов , В.Х.Матвеев, НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Челябинск.....	505
11. К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ КРИВОЛИНЕЙНОСТИ ТРАССЫ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ.	Н.Е Серебренников, НИТУ МИСИС, г. Москва.....	508
12. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ RAIL VEYOR В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.	М.А. Чистяков, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.....	510

Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека.

Доклады публикуются в авторской редакции. Набор и компьютерная верстка на настольной издательской системе IBM.

Подготовка макета – *Ю.А. Лагунова*

Подписано в печать 18.03.2026 г. Бумага «Svetocopy» Формат 60×84
1/16

Ризография Печ. л. 27,43 Уч.-изд.л. Тираж 50 экз.

Кафедра горных машин и комплексов

620144, г. Екатеринбург, пер. Университетский, 3,

Копицентр «Университетский»,

Уральский государственный горный университет

E-mail: Yu.Lagunova@mail.ru