

На правах рукописи



ЛЕТНЕВ КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ГЛАВНЫХ МЕХАНИЗМОВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург – 2023

Диссертационная работа выполнена на кафедре подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент **Лукашук Ольга Анатольевна**, заведующий кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

Официальные оппоненты:

Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроения Механико-машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (СПГУ)

Иов Иван Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и электромеханических систем Института недропользования ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ)

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ)

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 11-00 на заседании диссертационного совета 24.2.423.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30, 2-й учебный корпус, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» – <https://www.ursmu.ru/zashhita-letnev>

Автореферат диссертации разослан «23» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

 А.Е. Пелевин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время карьерные электромеханические экскаваторы (мехлопаты) являются основным видом выемочно-погрузочного оборудования на открытых горных работах. Рост объемов добычи полезных ископаемых открытым способом в значительной степени зависит от эффективности работы таких экскаваторов, являющихся ведущим и определяющим звеном в технологической цепи горного оборудования.

Как показывает практика эксплуатации мехлопат, при совместной работе приводов главных механизмов (подъема и напора) в процессе экскавации горной массы наблюдается увеличение продолжительности копания из-за несогласованности между скоростями подъема и напора при перемещении ковша в рабочей зоне экскаватора. В результате возрастает число переключений аппаратуры управления, что, в свою очередь, приводит к излишнему расходу электроэнергии, повышенной утомляемости машиниста.

Современные исследования и решения проблем повышения эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов, направленные на снятие противоречия между ограничением производительности в силу ручного управления и потенциально высокой эффективностью, сдерживаются отсутствием достаточно полных моделей движения ковша при выполнении экскаватором рабочих операций и качественно новых алгоритмов управления, обладающих высокой адаптивностью в условиях существенной неопределенности состояния горной машины и внешней технологической обстановки.

Тема исследования соответствует направлениям исследований, указанных в паспорте научной специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины», а именно: 14. Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых; 15. Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы эксплуатации карьерного выемочно-погрузочного оборудования, обоснования рациональных значений режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора для конкретных условий эксплуатации, разработки алгоритмов управления движением ковша экскаватора рассмотрены в работах Домбровского Н. Г., Подэрни Р. Ю., Певзнера Л. Д., Шестакова В. С., Комиссарова А. П., Лагуновой Ю. А., Панкратова С. А., Вэблера Д., Булеса П., Слесарева Б. В., Савченко А. Я., Беякова Ю. И., Кубачека В.Р., Девяткина Ю. А., Яковлева А. В., Маттиса А. Р., Рехтмана А. П., Bender F. A., Frimpong S., Tafazoli S. и др.

Анализ научных работ, посвященных исследованиям в области карьерных экскаваторов, показывает, что проблема создания автоматизированной системы управления приводами главных механизмов в настоящее время остается нерешенной ввиду сложности согласования режимных параметров механизмов

подъема и напора с энергосиловыми параметрами, реализуемыми на режущей кромке ковша, в процессе экскавации горных пород при непрерывно изменяющихся характеристиках объекта управления (ковша). Предложенные решения позволяют лишь косвенно определять состояние объекта управления при помощи абстрактной модели.

Существующие подходы и средства не обеспечивают в должной степени решения проблемы повышения эффективности эксплуатации и производительности карьерных экскаваторов, что обуславливает необходимость разработки математической модели процесса экскавации и программного решения, обеспечивающих выбор рациональных значений соответствующих параметров.

Объектом исследования является процесс экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора.

Предметом исследования являются закономерности функционирования главных механизмов карьерного экскаватора при их совместном действии в процессе отработки экскаваторного забоя.

Основная идея работы состоит в установлении функциональных зависимостей между параметрами, определяющими положение ковша в забое, и режимными параметрами главных механизмов.

Целью работы является повышение эффективности работы карьерного экскаватора путем координации рабочих движений главных механизмов.

Задачи работы:

1. Определение структурной схемы и анализ общего передаточного механизма приводов главных механизмов.
2. Разработка математической модели процесса экскавации и выполнение вычислительного эксперимента.
3. Определение режимных параметров механизмов при перемещении ковша по заданной траектории и совместной работе главных механизмов.

Научная новизна полученных результатов заключается:

- в разработке математической модели процесса экскавации на основе кинематического и силового анализа рычажного механизма;
- в обосновании рациональных режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора, реализующих заданный (требуемый) закон движения ковша (скорости и усилия на режущей кромки).

Теоретическая значимость работы состоит:

- в установлении взаимозависимостей между режимными параметрами главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации;
- в установлении закономерностей формирования энергозатрат на экскавацию горных пород в пределах рабочей зоны экскаватора;
- в оценке энергоемкости процесса экскавации.

Практическая значимость работы состоит:

- в разработке методики расчета рациональных режимных параметров главных механизмов при экскавации горных пород с учетом кинематических свойств общего передаточного механизма;
- в разработке имитационной модели процесса экскавации и алгоритма

вычислительного эксперимента.

Методология и методы исследования. Основным инструментом для установления взаимосвязей между конструктивными и режимными параметрами рычажного механизма и главных механизмов является математическое моделирование процесса экскавации. Основой математической модели является структурный, кинематический и силовой анализ рычажного механизма. На основе математической модели разработана блок-схема расчета режимных параметров главных механизмов, представляющая собой набор расчетных значений режимных параметров, при которых реализуется перемещение ковша по заданной траектории с заданными энергосиловыми параметрами. В качестве метода исследований принят вычислительный эксперимент, выполняемый на основе имитационной модели.

Положения, выносимые на защиту:

1. В процессе экскавации горных пород происходит «обратимость» главных механизмов, при которой начальным звеном общего передаточного механизма, соединяющего главные механизмы с ковшом, является звено «рукоять-ковш».
2. Рациональные значения режимных параметров главных механизмов определяются координатами вершины режущей кромки ковша из условия формирования заданной траектории перемещения ковша в процессе отработки забоя.
3. Согласование режимных параметров главных механизмов при их совместном действии приводит к снижению энергозатрат процесса экскавации в конкретных горнотехнических условиях.

Степень достоверности положений, выводов и результатов исследования подтверждается корректным использованием методов теории машин и механизмов, математического и имитационного моделирования, вычислительного эксперимента, современного вычислительного оборудования и компьютерного программного обеспечения, удовлетворительной сходимостью результатов вычислительного эксперимента с техническими данными (отклонение значений не более 15 %).

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических и практических конференциях: научно-техническая конференция «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В. Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2017-2019); международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика» (г. Пермь, 2017-2019, 2021); международный симпозиум «Неделя горняка» (г. Москва, 2019, 2021); международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Челябинск, Сочи, 2017-2021); международная научная конференция «MIP: Engineering: Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» (г. Красноярск, 2020); международная научно-техническая конференция «Промышленное производство и металлургия» (г. Нижний Тагил, 2020); международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий

обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь, 2019-2020); всероссийская научно-практическая конференция «Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта» (г. Екатеринбург, 2021).

Личный вклад соискателя заключается: в формулировании целей и задач исследования; участии на всех этапах диссертационного исследования – совместном проведении экспериментальных исследований, обработке экспериментальных данных, анализе, описании и обобщении полученных результатов, написании и оформлении рукописи диссертации, публикации научных работ по результатам исследований; выполнении структурного, кинематического и силового анализа рычажного механизма; разработке математической модели процесса экскавации горных пород; разработке блок-схемы расчета режимных параметров главных механизмов в виде имитационной модели процесса экскавации горных пород; проведении вычислительного эксперимента для определения рациональных значений скоростей подъема и напора и оценки уровня энергопотребления при экскавации грунта; разработке алгоритма цифрового управления двигателями главных механизмов; установлении закономерностей формирования режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора.

Реализация результатов работы:

- разработана методика расчета скоростей и усилий рабочих движений при перемещении ковша по заданным траекториям в соответствии с паспортом экскаваторного забоя;
- разработаны алгоритм вычислительного эксперимента и программа расчета скоростей и усилий рабочих движений, позволяющая реализовать практически любую траекторию перемещения ковша за счет координации движений подъема и напора при заданных энергосиловых параметрах, реализуемых на ковше;
- полученные результаты работы внедрены в хозяйственную деятельность и используются в аналитической работе ООО «Комплексное проектирование» (представлена «Справка о внедрении результатов диссертационного исследования»); обсуждены на техническом совете и приняты к использованию в опытно-конструкторские работы отдела экскаваторного оборудования ПАО «Уралмашзавод» (представлен «Акт о практическом использовании результатов диссертационного исследования»); приняты к внедрению в учебный процесс Уральского федерального университета для использования в лекционных, практических, лабораторных занятиях по специальным дисциплинам (представлен «Акт внедрения в учебный процесс результатов диссертационного исследования»).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 24 научных статьи, в том числе 6 – в рецензируемых научных изданиях ВАК, 11 – в рецензируемых научных изданиях Scopus / Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Материал диссертации изложен на 131 странице машинописного текста, в том числе содержит 18 таблиц, 31 рисунок, библиографический список из 133 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Анализ состояния вопроса и постановка задач исследования» рассмотрено состояние вопроса, обоснована актуальность исследования, проведен анализ результатов выполненных работ по теме диссертации, сформулированы цель и задачи работы.

Обзор литературы по проблеме повышения эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов (мехлопат) показал, что вопросы, связанные с повышением эффективности их эксплуатации, рассматриваются в аспекте повышения эффективности управления. В работах Рехтмана А.П. показано, что в результате проведенных экспериментальных исследований режимов работы главных механизмов карьерного экскаватора из-за несогласованности режимных параметров или противодействия главных механизмов при их совместной работе в процессе экскавации горных пород выявлена существенная динамика нагружения механизмов подъема и напора. Певзнером Л.Д. предложены алгоритмы управления приводами напора и подъема для выполнения операции черпания с использованием технологии нечеткой логики. Кравцов В.А. применил робототехнический подход к математическому описанию движения ковша мехлопаты, представив расчетную схему экскаватора мехлопаты в виде эквивалентного манипуляционного робота (без учета сил, возникающих при взаимодействии ковша экскаватора с забоем). Однако в настоящее время остается нерешенной задача создания автоматизированной системы управления приводами главных механизмов карьерного экскаватора ввиду сложности согласования и координации режимных параметров механизмов подъема и напора в процессе экскавации.

Повышение качества и эффективности управления возможно на основе формализации рабочего процесса экскавации горных пород и установления взаимозависимостей между энергосиловыми параметрами, реализуемыми на режущей кромке ковша (зубьях), и режимными параметрами главных механизмов с учетом горнотехнических условий разработки и параметров экскаваторного забоя. Установление взаимосвязей между кинематическими параметрами рабочих движений экскаватора (подъема и напора) и перемещением ковша в рабочей зоне экскаватора позволит разработать систему адаптивного управления рабочим процессом экскавации, способную обеспечить эффективное ведение процесса экскавации горных пород.

Во второй главе «Анализ общего передаточного механизма приводов главных механизмов карьерного экскаватора» описаны особенности процесса экскавации, выполнены структурный, кинематический и силовой анализы рычажного механизма, разработана математическая модель процесса экскавации, получены выражения для кинематических и динамических передаточных функций, доказано первое научное положение.

Основной рабочей операцией, выполняемой карьерным экскаватором, является послойная выемка горных пород при перемещении ковша (вершины

режущей кромки) по эквидистантным траекториям, параллельным откосу уступа, на максимальную высоту копания (высоту уступа). При совместном функционировании главных механизмов и рабочего оборудования экскаватора в процессе экскавации образуется общий передаточный механизм приводов главных механизмов (рисунок 1). Общий передаточный механизм включает главные механизмы и рычажный механизм, соединяющий главные механизмы с ковшом и преобразующий движения звеньев главных механизмов в перемещение ковша.



Рисунок 1 – Структурная схема электромеханической системы экскаватора

Рычажный механизм включает стойку и три подвижных звена (рисунок 2): звено 1 в виде жестко соединенных рукояти AB и ковша BK (звено «рукоять-ковш»), образующее со стойкой O_1 двухподвижную пару (поступательную и вращательную) посредством седлового подшипника; звено 2 в виде стержня CD (подъемный канат и подвеска ковша) и звено 3 в виде кривошипа (головной блок стрелы), образующие вращательные пары между собой, со звеном 1 и стойкой O_2 .

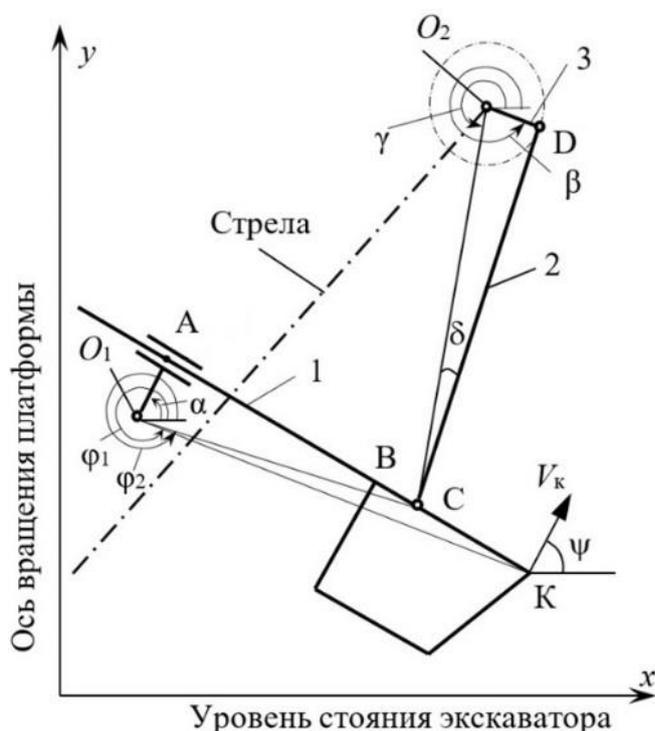


Рисунок 2 – Кинематическая схема рычажного механизма

Число степеней подвижности рычажного механизма составляет:

$$W = 3n - 2p_1 - p_2 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 3 - 1 = 2, \quad (1)$$

где n – число подвижных звеньев, p_1 – число одноподвижных кинематических пар, p_2 – число двухподвижных пар.

При работе механизма напора звено «рукоять-ковш» совершает возвратно-поступательное движение, т.е. происходит три фазы движения – втягивание рукояти в седловой подшипник, остановка и выдвигание рукояти. Вид фазы движения рукояти зависит от ее положения, характеризуемого значением полярного угла φ_1 радиуса вектора точки K , и угла наклона траектории перемещения ковша ψ .

Направление вектора скорости напора зависит от соотношения углов φ_1 и ψ : при $\varphi_1 + 90^\circ < \psi$ вектор скорости напора направлен к точке A (ниже оси опорного вала O_1 происходит втягивание рукояти в седловой подшипник); при $\varphi_1 + 90^\circ > \psi$ вектор скорости напора направлен к точке K (выше оси опорного вала O_1 происходит выдвигание рукояти).

Так как при движении ковша в пределах рабочей зоны экскаватора скорость

напора меняет направление в зависимости от положения ковша в забое, следовательно, изменяется форма плана скоростей (рисунок 3) и вид зависимостей для определения скоростей рабочих движений.

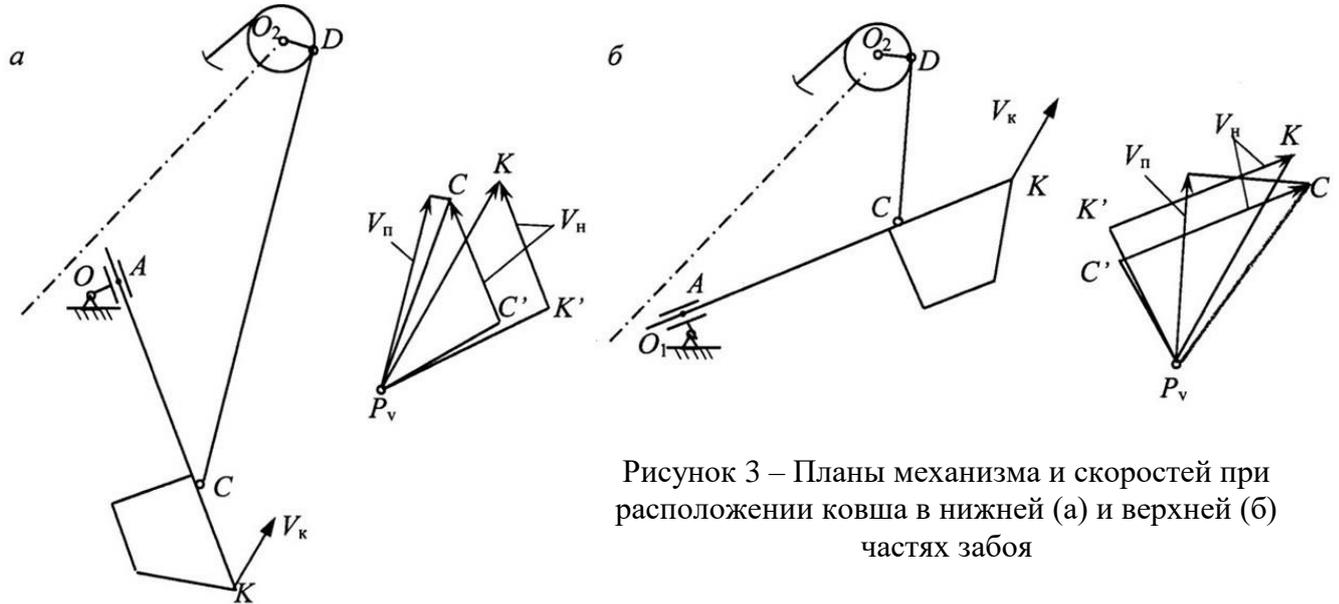


Рисунок 3 – Планы механизма и скоростей при расположении ковша в нижней (а) и верхней (б) частях забоя

Силовой анализ рычажного механизма основывается на решении прямой задачи динамики (без учета сил инерции ввиду их малых величин) – по заданному закону движения звеньев определить действующие силы. Основной задачей силового анализа является определение динамической (силовой) передаточной функции, т. е. зависимости между усилиями подъема и напора и силой сопротивления копанью.

Кинематические передаточные функции определяют соотношения между скоростью копания и скоростями подъема и напора. Динамические передаточные функции определяют соотношения между касательной составляющей силы сопротивления копанью и усилиями подъема и напора.

Зависимости для определения передаточных функций составят в общем виде:

$$\text{КПФ} = \frac{V_{\text{п(н)}}}{V_{\text{к}}} = f_1(X_{\text{к}}, Y_{\text{к}}, l_n, l_i, \psi, \alpha_i); \quad (2)$$

$$\text{ДПФ} = \frac{F_{\text{п(н)}}}{F_{\text{к}}} = f_2(X_{\text{к}}, Y_{\text{к}}, l_n, l_i, \psi, \alpha_i, G_n, G_{\text{к+п}}, P_0),$$

где КПФ, ДПФ – кинематическая и динамическая передаточные функции; l_n – длины звеньев; l_i – переменные длины звеньев (рукоять, ковш); ψ – угол наклона касательной к траектории перемещения ковша; α_i – углы, определяющие положения звеньев; G_n – силы тяжести звеньев; $G_{\text{к+п}}$ – сила тяжести груженого ковша; P_0 – сила сопротивления копанью.

Усилие подъема определяется на основе решения уравнения суммы моментов сил относительно оси опорного вала O_1 (при $F_c^n = KF_c^t$):

$$F_{\text{п}} = \frac{F_c^t [(X_{\text{к}} - X_{O_1})(\sin \psi - K \cos \psi) - (Y_{\text{к}} - Y_{O_1})(\cos \psi + K \sin \psi)] + G_{\text{к+п}} X_{\text{СК}} + G_{\text{п}} X_{\text{СП}}}{(X_{O_1} - X_{\text{С}}) \sin(\gamma - \delta) - (Y_{O_1} - Y_{\text{С}}) \cos(\gamma - \delta)}, \quad (3)$$

где F_c^τ – касательная составляющая силы сопротивления копания; $G_{к+п}$ и G_p – силы тяжести грузеного ковша и рукоятки соответственно.

Усилие напора определится из уравнения проекций сил на рукоять AB :

$$\sum(F_i)_{AB} = F_H + (G_{к+п} + G_p) \cos \alpha - F_{II} \sin(\gamma - 180^\circ - \delta - \alpha) + F_c^\tau [\cos(90^\circ - \psi + \alpha) + K \cos(\psi + 90^\circ - (\alpha - 90^\circ))]. \quad (4)$$

Отсюда

$$F_H = F_{II} \sin(\alpha + \delta - \gamma) + F_c^\tau [\sin(\alpha - \psi) + K \cos(\alpha - \psi)] - (G_{к+п} + G_p) \cos \alpha. \quad (5)$$

Определение скоростей необходимо производить для двух случаев – втягивание рукоятки и напорное движение:

$$V_H = \frac{V_K \cos(\psi - \varphi_1)}{\sin(\alpha - \varphi_1)};$$

$$V_{C1} = \frac{V_K O_1 C \cos(\psi - \alpha)}{O_1 K \sin(\alpha - \varphi_1)};$$

$$V_{II} = V_{II1} \text{ при условии } \varphi_1 + 90^\circ < \psi :$$

$$V_{II1} = V_C \sin(\varphi_2 + \delta + \varepsilon - \gamma);$$

$$V_C = (V_H^2 + V_{C1}^2 + 2|V_H|V_{C1} \cos(\alpha - \varphi_2))^{0,5};$$

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{|V_H| \sin(\alpha - \varphi_2)}{V_C}\right); \quad (6)$$

$$V_{II} = V_{II2} \text{ при условии } \varphi_1 + 90^\circ \geq \psi :$$

$$V_{II2} = V_C \sin(\varphi_2 + \delta - \varepsilon - \gamma);$$

$$V_C = (V_H^2 + V_{C1}^2 - 2V_H V_{C1} \cos(\alpha - \varphi_2))^{0,5};$$

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{V_H \sin(\alpha - \varphi_2)}{V_C}\right),$$

где $\varphi_1 = \arctg \frac{Y_K - Y_{01}}{X_K - X_{01}}; \alpha = \varphi_1 + \alpha_0; \alpha_0 = \arctg \frac{AK}{O_1 A}; AK = (O_1 K^2 - O_1 A^2)^{0,5};$

$AC = AK - CK; O_1 K = ((X_K - X_{01})^2 + (Y_K - Y_{01})^2)^{0,5}; X_C = X_{01} + O_1 A \cos \alpha +$

$+ AC \sin \alpha; Y_C = Y_{01} + O_1 A \sin \alpha - AC \cos \alpha; \varphi_2 = \arctg \frac{Y_C - Y_{01}}{X_C - X_{01}}; \gamma = \arctg \frac{Y_C - Y_{02}}{X_C - X_{02}};$

$l_{II} = ((X_C - X_{02})^2 + (Y_C - Y_{02})^2 - R^2)^{0,5}; \delta = \arctg \frac{R}{l_{II}},$

где $O_1 C, O_1 K$ – текущие значения радиус-векторов точек C и K ; $\alpha, \beta, \varphi_1, \varphi_2, \psi, \varepsilon$ – угловые величины; V_C – абсолютная скорость точки C ; V_{C1} – скорость точки C в переносном (вращательном) движении звена «рукоять-ковш»; $X_{01}, Y_{01}, X_{02}, Y_{02}$ – координаты оси напорного вала O_1 и оси головного блока O_2 ; $O_1 A, CK, R (O_2 D)$ –

размеры элементов рабочего оборудования.

Кинематические и динамические передаточные функции, представленные в виде математической модели (аналитических выражений для определения режимных параметров главных механизмов), полностью определяют кинематические и динамические свойства механизма при заданных скорости копания и силе сопротивления копанию.

В результате проведенного анализа установлено, что положение начального звена (звена «рукоять-ковш») и скорость копания, а также положения всех звеньев общего передаточного механизма приводов главных механизмов и скорости рабочих движений (подъема и напора) определяются координатами вершины режущей кромки ковша. Таким образом, в процессе экскавации горных пород происходит «обратимость» главных механизмов, т.е. ведущим (начальным) звеном общего передаточного механизма является звено «рукоять-ковш», а звенья главных механизмов становятся ведомыми.

Таким образом, первое положение, выносимое на защиту, доказано.

В третьей главе «Определение рациональных значений режимных параметров главных механизмов» рассмотрены особенности функционирования главных механизмов карьерного экскаватора, на основе математической модели процесса экскавации разработана имитационная модель, приведены результаты вычислительного эксперимента с целью определения рациональных режимных параметров главных механизмов экскаватора в конкретных горнотехнических условиях, доказано второе научное положение.

На основе проведенного анализа общего передаточного механизма разработана блок-схема расчета режимных параметров главных механизмов в виде имитационной цифровой модели процесса экскавации горных пород, выполнено имитационное моделирование, результаты которого представлены в виде набора расчетных значений скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории.

В качестве метода исследований на данном этапе принят вычислительный эксперимент, выполняемый на основе имитационной модели процесса экскавации грунта. Для алгоритмических моделей экспериментирование с помощью модели тождественно нахождению значений выходных характеристик при заданных значениях входных переменных и постоянных аргументов, т. е. подстановке в алгоритм конкретных чисел и расчету по формулам.

Модель реализована в цифровом виде в приложении MS Excel (рисунок 4) с использованием таблиц ввода данных и вывода результатов, встроенных формул, диаграмм, именованных областей данных и программного кода для расчета, написанного на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications. На основе модели выполнен вычислительный эксперимент по расчету режимных параметров главных механизмов экскаватора ЭКГ-20 (ЭКГ-20А) производства ПАО «Уралмашзавод» при отработке экскаваторного забоя.

В таблице 1 приведены результаты расчета режимных параметров главных механизмов (скорости подъема $V_{п}$ и напора $V_{н}$, усилия подъема $F_{п}$ и напора $F_{н}$) при

перемещении ковша в пределах рабочей зоны со скоростью копания $V_k = 1$ м/с и при расчетной высоте копания 12 м по начальной, средней (т. е. в центре рабочей зоны экскаватора) и конечной траекториям с углом наклона $\psi = 60^\circ$, соответствующим углу откоса уступа.

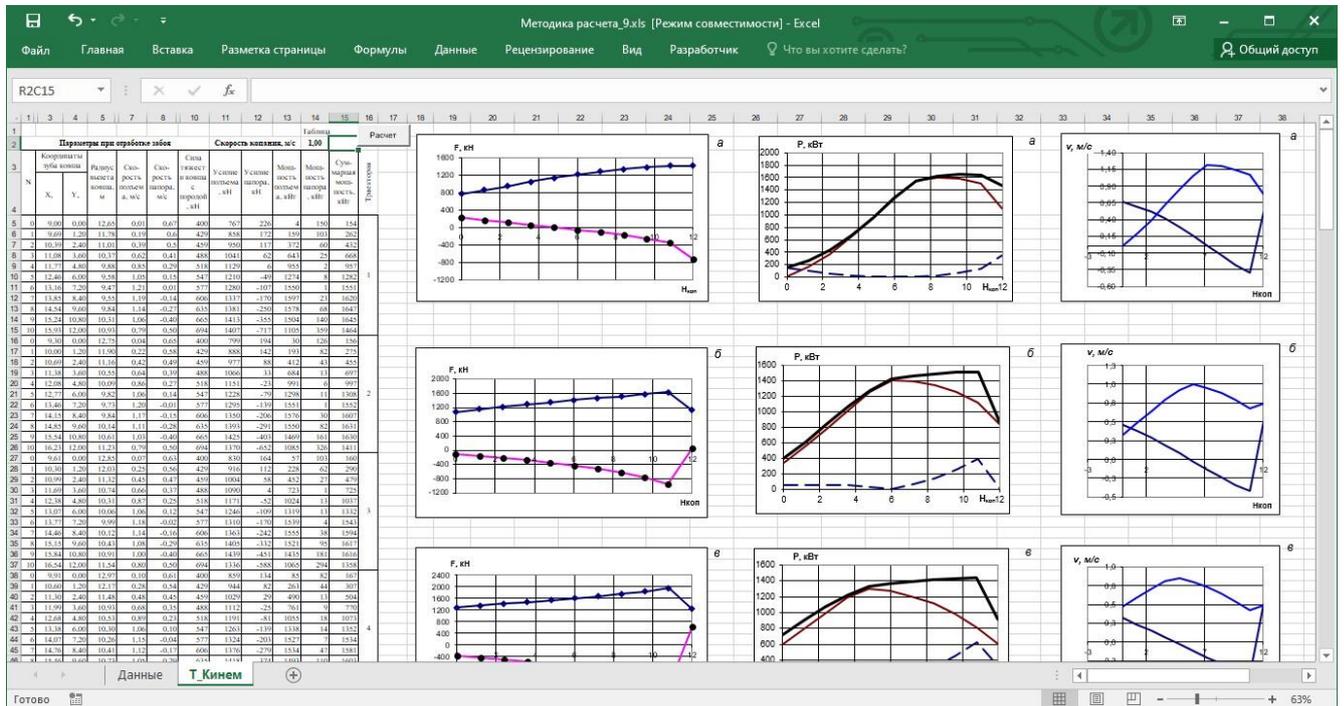


Рисунок 4 – Вывод результатов расчета и диаграмм

Таблица 1 – Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А

№№	Исходные данные			Расчетные данные			
	X_k , м	Y_k , м	$G_{к+п}$, кН	$V_{п1}$, м/с	$V_{п2}$, м/с	$F_{п1}$, кН	$F_{п2}$, кН
Начальная траектория (А)							
1	9	0	400	0,95	-0,87	440	-580
2	10,15	2	450	0,91	-0,81	510	-580
3	11,3	4	500	0,84	-0,70	570	-590
4	12,45	6	550	0,70	-0,51	690	-580
5	13,6	8	600	0,52	-0,19	920	-580
6	14,75	10	650	0,50	0,19	1240	-670
7	15,9	12	700	0,66	0,50	1590	-840
Средняя траектория (Б)							
11	13,5	0	400	0,88	-0,64	770	-230
12	14,65	2	450	0,83	-0,51	810	-240
13	15,8	4	500	0,76	-0,34	850	-230
14	16,95	6	550	0,70	-0,12	890	-200
15	18,1	8	600	0,66	0,11	960	-120
16	19,25	10	650	0,65	0,32	1020	2
17	20,4	12	700	0,62	0,50	1080	200
Конечная траектория (В)							
21	18	0	400	0,79	-0,39	1020	110
22	19,15	2	450	0,73	-0,25	1060	150
23	20,3	4	500	0,68	-0,09	1100	210
24	21,45	6	550	0,61	0,07	1150	320
25	22,6	8	600	0,53	0,23	1210	480
26	23,75	10	650	0,42	0,38	1290	710
27	24,9	12	700	0,27	0,50	1420	1030

Из приведенной таблицы следует, что режимы работы двигателей и режимные параметры главных механизмов существенно изменяются в пределах рабочей зоны экскаватора в зависимости от положения ковша. В целом, расчеты показывают, что в рабочей зоне экскаватора имеются критические участки, в которых режимные параметры принимают экстремальные значения.

Так, при перемещении ковша по начальной траектории усилие подъема значительно возрастает с ростом высоты копания ввиду уменьшения плеча усилия подъема относительно точки O_1 (оси напорного вала) и при максимальной высоте копания усилие подъема достигает предельного значения, соответствующего стопорному моменту на валу двигателя подъемного механизма. При этом соответственно возрастает и усилие напора, которое направлено в сторону оси напорного вала (усилие напора имеет знак минус) и уравнивает усилие подъема. В этом случае ввиду возрастания момента сил, опрокидывающего стрелу в сторону экскаватора, может произойти поворот стрелы («поддомкрачивание») с последующим возвратом (падением) ее в начальное положение, сопровождаемым значительными динамическими нагрузками.

При перемещении ковша по средней траектории скорость подъема уменьшается и при максимальной высоте копания имеет практически нулевое значение, т. е. двигатель подъемного механизма работает в режиме тормоза. В этом случае (при копании в верхней части забоя) перемещение ковша осуществляется, в основном, за счет напорного механизма.

В процессе копания при перемещении ковша по крайней траектории двигателя обоих механизмов (подъемного и напорного) работают в форсированных режимах, причем с ростом высоты копания двигатель подъемного механизма «сдает позиции».

На рисунке 5 представлены графики скоростей подъема и напора при перемещении ковша в процессе отработки забоя при максимальной высоте 17 м.

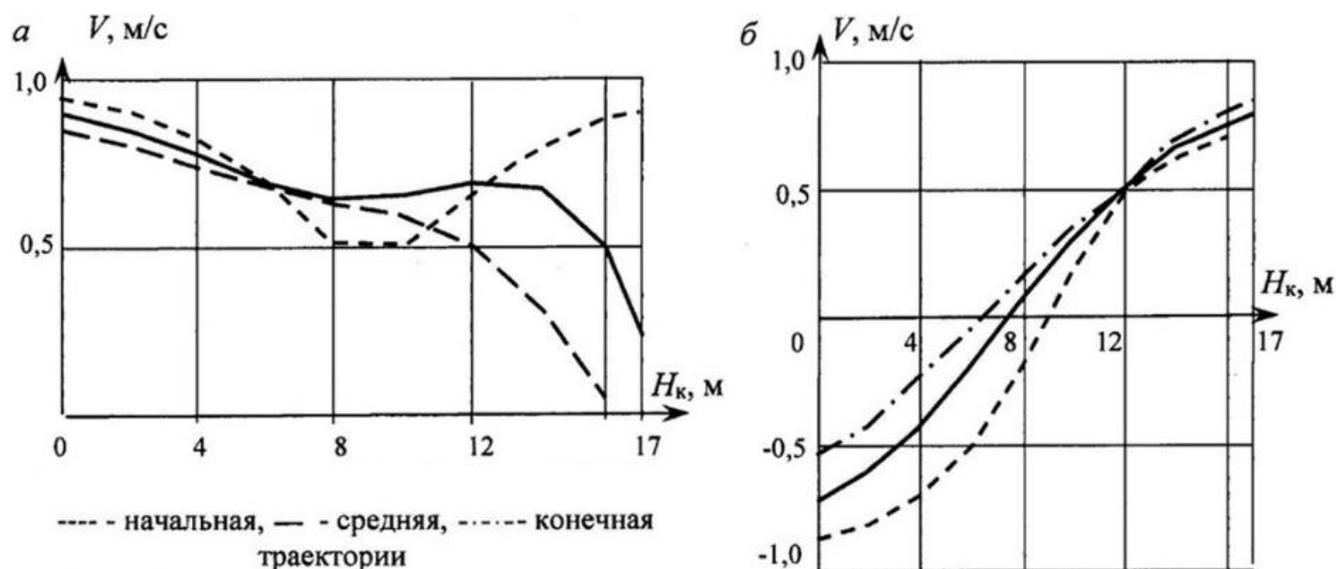


Рисунок 5 – Графики зависимости скорости подъема (а) и напора (б) от высоты копания

Из приведенных графиков следует, что скорости рабочих движений (подъема и напора) изменяются в широком диапазоне и зависят как от высоты копания, так и от вида траектории перемещения ковша (вершины режущей кромки). Скорость подъема с ростом высоты копания уменьшается, причем при перемещении ковша по начальной траектории уменьшение скорости происходит лишь на нижнем участке, а при перемещении по средней траектории скорость подъема при максимальной высоте копания уменьшается практически до нулевого значения. Скорость напора увеличивается с ростом высоты от отрицательных значений (при втягивании рукояти) до положительных при выдвигении рукояти.

Таким образом имитационная модель процесса экскавации является основой для разработки системы управления приводами главных механизмов карьерного экскаватора на базе алгоритма цифрового управления, который формирует

управляющее воздействие на приводы главных механизмов. Алгоритм формирования траектории перемещения ковша и, одновременно, управления процессом экскавации представлен на рисунке 6.

Перемена значений скоростей $V_{п}$ и $V_{н}$ в течение шага при расчетных темпах $T_{п}$ и $T_{н}$ их изменения за шаг соответствует подаче команд на вход системы управления приводами главных механизмов при пошаговом перемещении ковша (Δ_i – интервал времени между переключениями аппаратуры управления, n – количество переключений). Таким образом, формирование траектории перемещения ковша в процессе экскавации заключается, в основном, в создании модели единичного шага перемещения ковша.

Такая методика расчета режимных параметров главных механизмов при экскавации позволяет учесть кинематические свойства

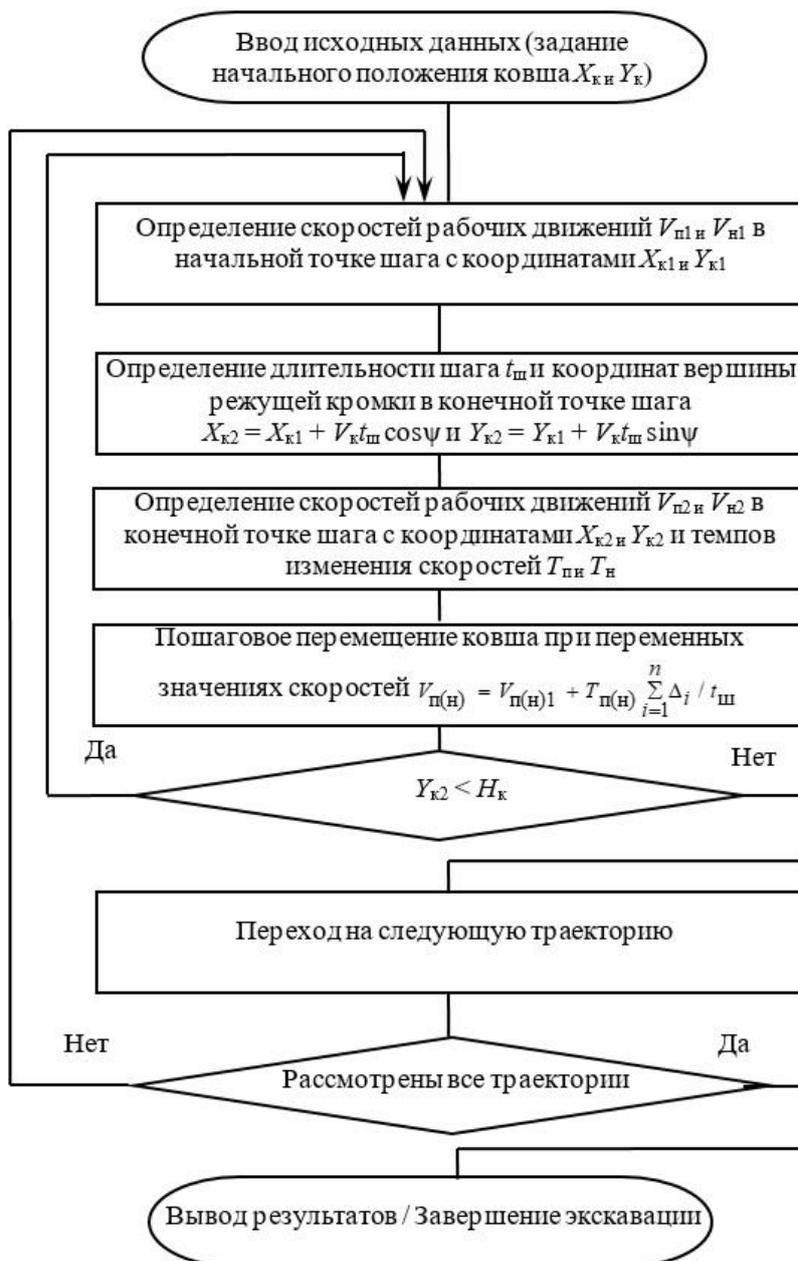


Рисунок 6 – Алгоритм формирования траектории и управления процессом экскавации

общего передаточного механизма и разработать автоматизированную систему управления, которая, с учетом положения ковша в забое в разные промежутки времени, реализует заданные траекторию и скорость его перемещения, устанавливая требуемые скорости механизмов напора и подъема при минимальных затратах времени и энергии.

Разработанная методика расчета позволяет определить рациональные значения режимных параметров главных механизмов (скоростей подъема и напора) в соответствии с паспортом экскаваторного забоя на основе имитационной модели процесса экскавации горных пород. Имитационная модель представляет собой набор расчетных значений режимных параметров, при которых реализуется перемещение ковша по заданной траектории с заданными энергосиловыми параметрами, реализуемыми на ковше. Адекватность модели подтверждается удовлетворительной сходимостью (отклонение значений не более 10-15 %) результатов вычислительного эксперимента с данными натурных испытаний.

Таким образом, второе положение, выносимое на защиту, доказано.

В четвертой главе «Оценка энергозатрат процесса экскавации на основе вычислительного эксперимента» рассмотрены вопросы повышения энергоэффективности карьерных экскаваторов и оценки фактических значений энергозатрат, приведены результаты вычислительного эксперимента с целью определения мощностей и работ усилий подъема и напора, степени использования установленной мощности сетевого двигателя, суммарных энергозатрат, величины энергопотребления, энергоемкости и коэффициента превышения энергопотребления в конкретных горнотехнических условиях, доказано третье научное положение.

Целью данной части исследования является повышение энергоэффективности карьерного экскаватора за счет согласования режимных параметров главных механизмов при их совместном действии в процессе экскавации (копанию) горных пород.

На основе имитационной модели рабочего процесса одноковшового экскаватора выполнен вычислительный эксперимент с целью оценки уровня энергопотребления при экскавации грунта экскаватором ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод».

Выполненный расчет мощностей усилий подъема $P_{п}$ и напора $P_{н}$, а также суммарной мощности $P_{\Sigma} = P_{п} + P_{н}$ показал, что мощности усилий подъема и напора изменяются в широком диапазоне и зависят, в основном, от вылета рукояти и высоты копания. Так, при минимальном вылете рукояти мощности усилий подъема и напора существенно возрастают при увеличении высоты копания, а максимальное значение суммарной мощности превышает величину установленной мощности сетевого двигателя $P_{с.дв} = 2250$ кВт, т. е. перемещение ковша по данной траектории невозможно.

В таблице 2 приведены средние значения мощностей усилий подъема и напора, а также суммарной мощности при перемещении ковша по начальной ($X_{к0} = 10$ м), средней и конечной траекториям.

	Траектория		
	начальная	средняя	конечная
$P_{п}$, кВт	591	439	654
$P_{н}$, кВт	226	231	146
P_{Σ} , кВт	817	670	800

Таблица 2 – Изменение средних значений мощностей усилий подъема и напора и средней суммарной мощности в зависимости от траектории

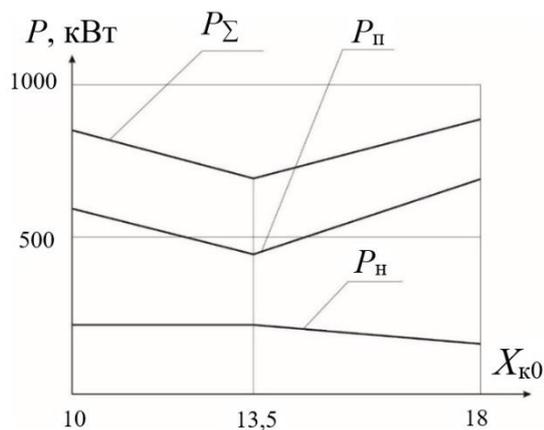


Рисунок 7 – Графики изменения мощностей усилий подъема и напора, а также суммарной мощности в зависимости от вылета рукояти

На рисунке 7 приведены графики изменения мощностей усилий подъема и напора, а также суммарной мощности в зависимости от вылета рукояти (траектории). Как видно из графиков, средние значения мощности усилия подъема и суммарной мощности при перемещении ковша по средней траектории уменьшаются, что обусловливается согласованностью рабочих движений и перемещения ковша (направления векторов скоростей подъема, напора и копания отклоняются незначительно).

Среднее значение суммарной мощности при экскавации грунта в рабочей зоне экскаватора равно 758 кВт, т. е. степень использования установленной мощности сетевого двигателя составит в этом случае $K_{и} = 758 / 2250 = 0,34$, а при отработке забоя в целом будет значительно меньше. То есть при согласовании режимных параметров главных механизмов суммарная потребляемая мощность будет в среднем в 3 раза меньше, чем установленная

Таким образом, распределение потребляемой мощности между приводами главных механизмов зависит от положения ковша в рабочей зоне экскаватора и определяется степенью согласованности рабочих движений (подъема и напора) и перемещения ковша.

Существенный рост энергоемкости процесса экскавации обусловлен энергозатратами на подъем элементов рабочего оборудования и горной массы при копании на высоту уступа или забоя (при разработке взорванной горной массы). Энергозатраты при экскавации горных пород определяются величиной суммарной работы усилий подъема и напора при совместной работе главных исполнительных механизмов подъема и напора.

Текущее значение работы усилия (подъема или напора) составит

$$A_i = 0,5(P_i + P_{i+1})\Delta t \quad (7)$$

где P_i и P_{i+1} – текущие значения мощности усилия, рассчитанные для i -ой и $i + 1$ точек траектории перемещения ковша (вершины режущей кромки); Δt – длительность перемещения ковша на отрезке ($i, i + 1$).

Величина суммарных энергозатрат определяется энергозатратами на преодоление силы сопротивления копания $A_{\text{коп}}$ и на подъем элементов рабочего оборудования и горной массы $A_{\text{под}}$, а также энергозатратами, вызванными «противодействием» главных механизмов (разнонаправленностью векторов скоростей подъема и напора) $A_{\text{ГМ}}$.

В таблице 3 приведены значения отдельных и суммарных энергозатрат для начальной, средней и конечной траекторий.

Таблица 3 – Распределение энергозатрат при экскавации горной породы

Траектория	A_{Σ}		$A_{\text{коп}}$		$A_{\text{под}}$		$A_{\text{ГМ}}$	
	МДж		МДж	%	МДж	%	МДж	%
Высота копания $H_k = 12$ м								
Н	11,28		4,50	39,9	4,95	43,9	1,83	16,2
С	9,89		4,50	45,5	4,95	50,1	0,44	4,5
К	10,91		4,50	41,2	4,95	45,4	1,46	13,4
Высота копания $H_k = 18$ м								
Н	16,84		4,50	26,7	8,25	49,0	4,09	24,3
С	14,26		4,50	31,6	8,25	57,9	1,51	10,5

Из приведенных данных следует, что при увеличении высоты копания существенно возрастают энергозатраты, вызванные «противодействием» главных механизмов – скорость подъема направлена к головному блоку, а скорость напора – в сторону забоя.

Таким образом, величина энергопотребления определяется в зависимости от значений мгновенных мощностей усилий подъема и напора и составит:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n 0,5(P_i + P_{i+1})\Delta t, \quad (8)$$

где P_i и P_{i+1} – значения мгновенных мощностей усилий подъема и напора для i -ой и $i + 1$ точек траектории перемещения ковша (вершины режущей кромки); Δt – длительность перемещения ковша на отрезке $(i, i + 1)$.

Наборы отдельных значений представляют собой единичные энергетические характеристики, т. е. зависимости энергопотребления от энергосиловых параметров, реализуемых на режущей кромке ковша при перемещении ковша по заданной траектории, соответствующей схеме отработки забоя. На основе единичных энергетических характеристик может быть определен интегральный показатель – энергоемкость процесса экскавации для конкретных горнотехнических условий эксплуатации по заданной схеме отработки экскаваторного забоя.

Энергоемкость процесса экскавации составит $a = \mathcal{E}_{\text{сум}} / V$, где $\mathcal{E}_{\text{сум}}$ – суммарное энергопотребление двигателем подъема и напора при отработке фрагмента экскаваторного забоя; V – объем фрагмента забоя, ширина которого равна ширине ковша.

Так энергоемкость процесса экскавации при перемещении ковша вместимостью $V = 20 \text{ м}^3$ по начальной траектории составит при расчетной высоте копания – 564 кДж/м^3 , при максимальной высоте копания – 847 кДж/м^3 . Таким образом, при копании в высоких забоях возрастают время копания и энергозатраты.

Также проведена оценка степени противодействия двигателей главных механизмов в процессе отработки экскаваторного забоя по коэффициенту превышения энергопотребления:

$$K_э = \frac{\mathcal{E}_{\Pi i} + \mathcal{E}_{\text{H}i}}{\mathcal{E}_к + \mathcal{E}_{Gi}}, \quad (9)$$

где $\mathcal{E}_{\Pi i}$, $\mathcal{E}_{\text{H}i}$ – энергопотребление двигателей механизмов подъема и напора на i -ом участке; $\mathcal{E}_к$ – расход энергии при копании; \mathcal{E}_{Gi} – расход энергии при подъеме элементов рабочего оборудования (ковша и рукояти).

В таблице 4 приведены результаты расчета при перемещении ковша (вершины режущей кромки) по эквидистантным траекториям (начальной, средней и конечной) при отработке экскаваторного забоя и значения коэффициента превышения энергопотребления.

Таблица 4 – Расчет коэффициента превышения энергопотребления (угол наклона 60°)

№ №	Координаты точки К, м		Скорости подъема и напора, м/с		Усилия подъема и напора, кН		Мощности усилий, кВт		Сила тяжести и ковша, кН	Расход энергии и на подъем, м, кДж	Энергопотребление, кДж		$K_э$
	$X_к$	$Y_к$	V_{Π}	V_{H}	F_{Π}	F_{H}	P_{Π}	P_{H}	$G_к$	\mathcal{E}_{Gi}	$\mathcal{E}_{\Pi i}$	$\mathcal{E}_{\text{H}i}$	
Начальная траектория ($X_{к0} = 10$ м)													
1	10	0	0,94	-0,82	528	495	494	408	400				
2	11,15	2	0,89	-0,74	589	500	526	372	450	850	1290	1160	1,53
3	12,3	4	0,81	-0,61	642	516	522	316	500	950	1420	1180	1,53
4	13,45	6	0,69	-0,40	759	501	522	201	550	1050	1610	1200	1,56
5	14,6	8	0,57	-0,10	936	495	536	49	600	1150	1940	1160	1,63
6	15,75	10	0,58	0,23	1152	520	671	121	650	1250	2420	1190	1,81
7	16,9	12	0,69	0,50	1349	547	934	275	700	1350	2920	1250	1,99
Средняя траектория ($X_{к0} = 14$ м)													
8	14	0	0,87	-0,61	801	195	696	119	400				
9	15,15	2	0,82	-0,48	838	196	685	94	450	850	1880	450	1,46
10	16,3	4	0,76	-0,30	876	183	662	56	500	950	1970	440	1,42
11	17,45	6	0,70	-0,10	921	142	642	13	550	1050	2060	405	1,37
12	18,6	8	0,66	0,13	978	59	645	8	600	1150	2190	405	1,36
13	19,75	10	0,64	0,33	1040	78	661	26	650	1250	2320	170	1,25
14	20,9	12	0,59	0,50	1093	296	640	148	700	1350	2440	480	1,39
Конечная траектория ($X_{к0} = 18$ м)													
15	18	0	0,79	-0,39	1017	111	799	44	400				
16	19,15	2	0,73	-0,25	1055	148	774	38	450	850	2390	300	1,68
17	20,3	4	0,68	-0,09	1097	214	742	20	500	950	2480	395	1,69
18	21,45	6	0,61	0,07	1147	320	702	24	550	1050	2570	1270	2,13
19	22,6	8	0,53	0,23	1210	480	644	113	600	1150	2730	1060	2,04
20	23,75	10	0,42	0,38	1292	709	546	269	650	1250	2890	1450	2,17
21	24,90	12	0,27	0,50	1416	1030	377	515	700	1350	3090	2060	2,45

Анализ расчетных данных показывает, что энергопотребление двигателей при отработке экскаваторного забоя изменяется в широком диапазоне при практически постоянных расходах энергии при копании и на подъем элементов рабочего оборудования. Данные экспериментальных исследований режимов работы главных механизмов карьерного экскаватора выявили значительные нагрузки, действующие на рабочее оборудование и главные механизмы, возникающие ввиду отсутствия координации рабочих движений (подъема и

напора) при ручном управлении и зависящие от степени противодействия главных механизмов.

Для расчетного случая (прямолинейная траектория, постоянная скорость копания – 1 м/с, угол наклона траектории – 60°, высота копания – 12 м) использование данной системы для одного экскаватора ЭКГ-20А может обеспечить снижение энергозатрат за день до 5167 кВт*ч, при этом экономический эффект в день составит примерно 13227 руб., в год – около 3,6 млн. руб.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что при выемке горных пород карьерным экскаватором энергозатраты существенно изменяются в пределах рабочей зоны экскаватора. Противодействие двигателей главных механизмов приводит к увеличению потребляемой мощности и электроэнергии. Снижение энергозатрат и повышение энергоэффективности карьерных экскаваторов возможно за счет согласования режимных параметров главных механизмов при их совместном действии в процессе экскавации горных пород. Решение поставленных задач обеспечит достижение цели работы, заключающейся в повышении эффективности функционирования карьерного экскаватора в целом.

Таким образом, третье положение, выносимое на защиту, доказано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований решается актуальная научно-техническая задача определения и обоснования рациональных значений скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша по заданным траектории и скорости копания, а также повышения эффективности функционирования карьерного экскаватора.

Основные научные и практические результаты, полученные в работе, состоят в следующем.

1. Выполнены структурный, кинематический и силовой анализы рычажного механизма, построены планы скоростей и усилий подъема и напора.
2. Получены аналитические выражения для определения режимных параметров главных механизмов, сформированы кинематические и динамические передаточные функции, разработаны математическая и имитационная модели процесса экскавации.
3. Разработана методика расчета скоростей и усилий рабочих движений при перемещении ковша по заданным траекториям в соответствии с паспортом экскаваторного забоя.
4. Разработана программа расчета скоростей и усилий рабочих движений, позволяющая реализовать практически любую траекторию перемещения ковша за счет координации движений подъема и напора при заданных энергосиловых параметрах, реализуемых на ковше.
5. На основе имитационной модели проведен вычислительный эксперимент с целью определения рациональных режимных параметров главных механизмов

карьерного экскаватора в конкретных горнотехнических условиях и оценки уровня энергопотребления при экскавации грунта в конкретных горнотехнических условиях работы.

Основные выводы, сделанные в работе, заключаются в следующем.

1. В процессе экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора при совместном действии главных механизмов образуется общий передаточный механизм приводов главных механизмов.
2. В процессе экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора происходит «обратимость» главных механизмов, при этом ведущим (начальным) звеном общего передаточного механизма является звено «рукоять-ковш», а звенья главных механизмов становятся ведомыми.
3. Рациональные значения режимных параметров главных механизмов определяются обобщенными координатами рычажного механизма из условия формирования заданной траектории перемещения ковша в процессе экскавации.
4. Энергоэффективность процесса экскавации в конкретных горнотехнических условиях эксплуатации зависит от положения ковша в рабочей зоне экскаватора.
5. Оценка уровня энергопотребления при экскавации грунта экскаватором ЭКГ-20А показывает, что при согласовании режимных параметров главных механизмов суммарная потребляемая мощность двигателей механизмов подъема и напора будет в среднем в 3 раза меньше, чем установленная, что приведет к соответствующему снижению энергозатрат и годовому экономическому эффекту в размере около 3,6 млн. руб. (для одного экскаватора).
6. Установление взаимозависимостей между режимными параметрами главных механизмов может служить основой для разработки адаптивной системы цифрового управления приводами главных механизмов, обеспечивающей за счет согласования скоростей рабочих движений в конкретных условиях эксплуатации повышение эффективности функционирования экскаватора.

Основные научные результаты опубликованы в следующих изданиях

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Лукашук, О. А. Определение режимных параметров рычажного механизма карьерного экскаватора / О. А. Лукашук, **К. Ю. Летнев** // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 2. С. 94-102.
2. Комиссаров, А. П. Особенности режимов нагружения канатов подъемного и напорного механизмов карьерного экскаватора / А. П. Комиссаров, С. А. Хорошавин, **К. Ю. Летнев** // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 5(151). С. 22-27.
3. **Летнев, К. Ю.** Энергоемкость процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора / К. Ю. Летнев // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 3(143). С. 9-13.
4. Определение энергоемкости процесса экскавации рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора / А. П. Комиссаров, Н. С. Плотников, О. А. Лукашук, **К. Ю. Летнев** // Известия высших учебных заведений. Горный

журнал. 2019. № 1. С. 112-118.

5. Лукашук, О. А. Определение энергозатрат при экскавации грунта / О. А. Лукашук, **К. Ю. Летнев** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 6. С. 113-118.

6. Лукашук, О. А. Определение режимов работы двигателей главных механизмов одноковшового экскаватора / О. А. Лукашук, **К. Ю. Летнев**, А. П. Комиссаров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 5. С. 52-58.

Публикации, индексируемые в международной базе Scopus:

7. Lukashuk, O. Modeling the Process of Rock Excavation with a Front-shovel Operational Equipment of Open-pit Excavators / O. Lukashuk, **К. Letnev**, V. Makarova // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021): ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Vol. 2. Челябинск: Springer, 2022. P. 425-433.

8. Lukashuk, O. Specifics of Rock Excavation Process Using Open-Pit Excavator / O. Lukashuk, **К. Letnev**, A. Komissarov // 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020): Серия Lecture Notes in Mechanical Engineering, Sochi, Russia, 18–22 мая 2020 года. Vol. II. Sochi, Russia: Springer International Publishing, 2021. P. 787-794.

9. Lukashuk, O. A. Development of algorithm for excavation control / O. A. Lukashuk, **К. Y. Letnev**, A. P. Komissarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 15, Nizhny Tagil, 18–19 июня 2020 года. Nizhny Tagil, 2020. P. 012083.

10. Lukashuk, O. Development of Optimization Algorithm to Control Open-Pit Excavator Operation / O. Lukashuk, A. Komissarov, **К. Letnev** // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019): Conference proceedings ICIE 2019, Sochi, Russia, 25–29 марта 2019 года. Sochi, Russia: Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. P. 747-753.

11. Lukashuk, O. A. Increasing power efficiency of open-pit excavators / O. A. Lukashuk, A. P. Komissarov, **К. Y. Letnev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 709, 2, Issue 1. Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 022083.

12. Lukashuk, O. A. Specifics of drives functioning in main mechanisms of open-pit excavator / O. A. Lukashuk, **К. Y. Letnev**, A. P. Komissarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. Sevastopol, 2020. P. 052075.

13. Lukashuk, O. Distribution of consumed power between drives of main mechanisms in open-pit excavators during the process of rock excavation / O. Lukashuk, A. Komissarov, **К. Letnev** // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018: Lecture notes in mechanical engineering, Москва, 15–18 мая 2018 года. Москва: Springer International Publishing, 2019. P. 2273-2281.

14. Lukashuk, O. Operation parameters matching for main mechanisms of open-pit excavators employed in rock excavation / O. Lukashuk, A. Komissarov, **К. Letnev** //

Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018: Lecture notes in mechanical engineering, Москва, 15–18 мая 2018 года. Москва: Springer International Publishing, 2019. P. 2263-2271.

15. Lukashuk, O. Efficiency increase in excavation control as primary reserve of performance increase for open-pit excavators / O. Lukashuk, **K. Letnev**, A. Komissarov // MATEC Web of Conferences: 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol, 10–14 сентября 2018 года. Vol. 224. Sevastopol: EDP Sciences, 2018. P. 02028.

16. Komissarov, A. P. Kinematic features of operational equipment linkage in single-bucket excavators / A. P. Komissarov, O. A. Lukashuk, **K. Y. Letnev** // ACM International Conference Proceeding Series: 4, Valenciennes, 07–11 февраля 2018 года. Valenciennes, 2018. P. 121-125.

17. Lukashuk, O. Operation of single-bucket excavator transmission system / O. Lukashuk, A. P. Komissarov, **K. Y. Letnev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 1, Dubai, 24–26 ноября 2017 года. Dubai, 2018. P. 012016.

Публикации в прочих научных изданиях:

18. **Летнев, К. Ю.** Формирование энергетической характеристики карьерного экскаватора / К. Ю. Летнев // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сборник статей, Екатеринбург, 16 декабря 2020 года / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. С. 98-100.

19. Лукашук, О. А. Идентификация положения ковша карьерного экскаватора в забое / О. А. Лукашук, **К. Ю. Летнев**, М. Д. Лукашук // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. 2019. Т. 1. С. 14-20.

20. Комиссаров, А. П. Разработка имитационной модели процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора / А. П. Комиссаров, **К. Ю. Летнев** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2019 года / Под общей редакцией Ю. А. Лагуновой. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. С. 267-270.

21. Экскавация горных пород как процесс функционирования рабочего оборудования карьерного экскаватора / А. П. Комиссаров, О. А. Лукашук, **К. Ю. Летнев**, В. И. Сайтов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. 2018. Т. 1. С. 75-81.

22. "Обратимость" главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород / А. П. Комиссаров, Н. С. Плотников, **К. Ю. Летнев**, О. А. Лукашук // 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. 48-50.

23. Комиссаров, А. П. Анализ двухкривошипно-рычажных механизмов рабочего оборудования карьерных экскаваторов / А. П. Комиссаров, **К. Ю. Летнев**, О. А. Лукашук // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 20–21 апреля 2017 года. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2017. С. 41-46.

24. Влияние схемы установки стрелы на эффективность функционирования одноковшового экскаватора / В. В. Буров, А. П. Комиссаров, С. А. Хорошавин, **К. Ю. Летнев** // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. 2017. Т. 1. С. 15-21.

Подписано в печать 13.10.2023. Формат 60x84 1/16

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 11913

Копировальный центр «Университетский»

620144, г. Екатеринбург, Университетский пер., д. 3, тел. 8-343-257-90-50