

## **Отзыв официального оппонента**

кандидата технических наук Иова Ивана Алексеевича

на диссертационную работу Летнева Константина Юрьевича, выполненную на тему «Обоснование рациональных режимных параметров главных механизмов карьерных экскаваторов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

### **1. Структура диссертационной работы**

Представленная диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений (с программным кодом и тремя актами внедрения). Работа изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 31 рисунок, 18 таблиц, 133 наименования в списке литературы.

### **2. Актуальность темы исследования**

Карьерные экскаваторы являются ведущим звеном в технологической цепи горного оборудования. Повышение эффективности их работы в значительной степени определяет рост объема добычи полезных ископаемых и приобретает особую актуальность в современных условиях рыночной экономики.

В диссертационной работе отмечается, что в процессе экскавации горной массы карьерным экскаватором (мехлопатой) наблюдается снижение скорости и увеличение продолжительности копания из-за неправильно выбранных соотношений между скоростями подъема и напора при совместной работе главных механизмов (механизмов подъема и напора), возрастает число переключений аппаратуры управления, возникает излишний расход электроэнергии, повышается утомляемость машиниста. При этом установление закономерностей работы главных механизмов и разработка адекватной модели процесса экскавации позволит добиться более эффективного управления процессом копания за счет применения соответствующего программного решения и обеспечения требуемого закона движения ковша при практически непрерывном регулировании скоростей рабочих движений. Таким образом формирование и поддержание рациональных режимов совместной работы механизмов подъема и напора в процессе копания для конкретных условий эксплуатации является одним из основных резервов роста производительности карьерных экскаваторов.

### **3. Научная новизна результатов и значимость работы**

Существующие научно-практические подходы не обеспечивают в должной степени решения проблемы повышения эффективности эксплуатации и производительности карьерных

экскаваторов. Полученные в диссертации аналитические выражения для определения режимных параметров главных механизмов и разработанная модель движения ковша при выполнении экскаватором рабочих операций являются в достаточной степени оригинальными научными решениями в этой области.

Значимость работы в теоретическом и практическом выражении определяется установлением закономерностей работы главных механизмов и движения ковша в процессе экскавации, формированием передаточных функций рычажного механизма, разработкой имитационной цифровой модели процесса экскавации рабочим оборудованием карьерного экскаватора как объекта управления, формированием набора расчетных значений скоростей подъема и напора, пропорциональных величинам управляющих воздействий в приводах исполнительных механизмов, построением планов и годографов скоростей, подобных функциям управления двигателями, разработкой алгоритма управления приводами главных механизмов.

#### **4. Обоснованность и достоверность научных положений**

Результаты представленной диссертационной работы отражены в трех научных положениях, выносимых на защиту.

*Во второй главе диссертации доказывается первое научное положение:*

*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».*

В главе проводится кинематический анализ рычажного механизма при помощи графоаналитического метода путем построения планов механизма и скоростей с целью определения положений звеньев по заданному положению начального звена и установления зависимостей для определения скоростей рабочих движений (подъема и напора) при копании. Установлено, что звено «рукоять-ковш» образует со стойкой двухподвижную пару, поэтому за обобщенные координаты принимаются координаты этого звена (а именно координаты вершины режущей кромки ковша), т.е. это звено является начальным (ведущим) звеном общего передаточного механизма, а звенья главных механизмов становятся ведомыми.

На основе кинематического и силового анализа разрабатывается математическая модель процесса экскавации, описывающая кинематические и динамические (силовые) передаточные функции рычажного механизма, определяющие зависимости между соответствующими параметрами ведомых звеньев и ведущего звена: кинематические функции – соотношения между скоростью начального звена (скоростью копания) и скоростями подъема и напора; динамические функции – соотношения между касательной составляющей силы сопротивления

копанию и усилиями подъема и напора.

*В третьей главе диссертации доказывается второе научное положение:*

*Рациональные значения режимных параметров главных механизмов определяются координатами вершины режущей кромки ковша из условия формирования заданной траектории перемещения ковша в процессе отработки забоя.*

Кинематические и динамические передаточные функции, представленные во второй главе, полностью определяют кинематические и динамические свойства механизма при любых заданных законах изменения скорости копания и силы сопротивления копанию. Они предоставляют возможность определить рациональные значения режимных параметров главных механизмов при перемещении ковша из условия обеспечения заданных траектории, скорости и длительности процесса экскавации.

В главе отмечается, что основной рабочей операцией экскаватора является послойная выемка горных пород при перемещении ковша по эквидистантным траекториям, параллельным откосу уступа, на высоту копания. При совместной работе главных механизмов для реализации эквидистант необходимо изменять скорости подъема и напора при их определенном соотношении. Разработанные имитационная модель и программа расчета позволяют определить режимные параметры одновременно для всех возможных траекторий отработки забоя при заданных энергосиловых параметрах. Основными исходными данными для расчета являются скорость вершины режущей кромки ковша (точки К) и угол наклона траектории движения точки К. Задача формирования траектории решается пошаговым перемещением ковша, а именно определением координат вершины режущей кромки и скоростей рабочих движений в начальной и конечной точках каждого шага и продолжением цикла до достижения финальной точки траектории (кромки уступа) с последующим переходом на следующую траекторию. Результаты вычислительного эксперимента по расчету значений скоростей и усилий подъема и напора в процессе отработки забоя представлены в табличном и графическом виде. Предложен алгоритм цифрового управления двигателями главных механизмов, реализующий рациональные значения режимных параметров рабочего процесса для конкретных условий эксплуатации.

*В четвертой главе диссертации доказывается третье научное положение:*

*Согласование режимных параметров главных механизмов при их совместном действии приводит к снижению энергозатрат процесса экскавации в конкретных горнотехнических условиях.*

Представленный в третьей главе расчет значений скоростей и усилий подъема и напора позволил автору на следующем этапе вычислительного эксперимента определить мгновенные мощности усилий рабочих движений и их суммарные мощности в конкретных точках

формирования траектории, а также средние значения мощностей при экскавации грунта в рабочей зоне. Были рассчитаны значения мгновенных и цикловых коэффициентов полезного действия (КПД) передаточного механизма. Выявлено, что при совместном действии главных механизмов значения этих КПД уменьшаются в зависимости от степени рассогласования и, следовательно, роста мощности движущих сил (усилий подъема и напора). Указано, что значения мгновенных и цикловых КПД зависят от величины работы движущих сил, затраченной на изменение потенциальной энергии элементов рабочего оборудования, при этом энергозатраты определяются величиной суммарной работы усилий подъема и напора при совместной работе главных механизмов.

Данные экспериментальных исследований режимов работы 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. Анализ полученных данных показал, что энергопотребление двигателей при отработке забоя изменяется в широком диапазоне при практически постоянных расходах энергии на копание и подъем элементов рабочего оборудования. Отмечается, что оценка фактических значений энергозатрат позволяет сформировать рациональные энергоэффективные схемы отработки забоев в конкретных условиях эксплуатации, а применение адаптивной цифровой системы управления обеспечивает, за счет согласования скоростей рабочих движений, существенное снижение энергопотребления – годовой экономический эффект при эксплуатации одного экскаватора составит по расчетам около 3,6 млн. руб.

Достоверность научных положений и полученных результатов определяется корректным использованием графоаналитических методов, инструментов математического и имитационного моделирования, вычислительного эксперимента, информационных технологий, а также набором расчетных значений режимных параметров, представленным в диссертации.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных международных научно-практических конференциях, в достаточной степени освещены в 24 печатных работах, в том числе в 6 статьях – в изданиях из перечня ВАК, в 11 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus, подтверждены 3 актами внедрения.

## **5. Вопросы и замечания по диссертационной работе**

- 1) В обзоре публикаций по теме диссертации приводятся примеры нескольких моделей и автоматизированных систем управления, предложенных другими авторами (диссертация, гл. 1). В чем их недостаток по сравнению с предложенными в работе?
- 2) Поясните значимость для исследования представленной структурной схемы

электромеханической системы экскаватора (диссертация, гл. 2, рис. 2.3). Чем, по сути, общий передаточный механизм отличается от рычажного передаточного механизма?

3) В параграфе 2.3. используется формулировка «решении прямой задачи динамики – по заданному закону движения звеньев определить действующие силы». Из аналитической механики известно, что подобная формулировка понимается как «обратная задача».

4) Выбранные допущения при составлении расчетной схемы математической модели (стр. 34) не учитывают упругость каната подъема, чем объясняется подобное решение, а также решение не учитывать моменты инерции рабочего оборудования (стр. 41)?

5) Текст на рис. 3.3 (диссертация, с. 55) плохо различим, не видны результаты расчетов, не понятно, что иллюстрируют графики в правой части экрана.

6) Как предлагаемый алгоритм управления механизмами может быть использован в экскаваторе, если его механизмы находятся в непрерывном динамическом взаимодействии и скорости приводов отличаются от соответствующих скоростей рабочего оборудования из-за наличия упругих связей?

7) Обоснуйте использование Microsoft Excel и Visual Basic for Applications в качестве программного решения для формирования имитационной модели и проведения вычислительного эксперимента. Почему не были использованы специализированные программные инструменты других разработчиков с большим набором возможностей?

## **6. Заключение**

Текст диссертации и автореферата написан грамотным техническим языком с применением терминологии, соответствующей области горных машин и комплексов, оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Защищаемые положения и полученные результаты работы достоверны и обоснованы, обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Замечания не носят принципиального характера и не ставят под сомнение достоверность и обоснованность научных положений, защищаемых в диссертации.

Диссертация Летнева Константина Юрьевича на тему «Обоснование рациональных режимных параметров главных механизмов карьерных экскаваторов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины», является законченной научно-квалификационной работой, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – обоснования рациональных скоростей механизмов подъема и напора, обеспечивающих за счет координации рабочих движений перемещение ковша по заданной траектории с заданной скоростью копания с целью снижения энергозатрат процесса экскавации, повышения эффективности работы карьерных экскаваторов и роста добычи полезных ископаемых в целом. Результаты работы соответствуют

пунктам 14 и 15 паспорта научной специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины», диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Летнев Константин Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины».

Официальный оппонент: кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и электромеханических систем Института недропользования ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

\_\_\_\_\_ Иов Иван Алексеевич

Дата: 21.11.2023

Адрес: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Тел.: +7 (983) 692-65-49, e-mail: [iovivan@rambler.ru](mailto:iovivan@rambler.ru)