

На правах рукописи



УДК 622.684:629.353.026

Фефелов Евгений Васильевич

**ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК
АВТОСАМОСВАЛОВ НА ГЛУБОКИХ КАРЬЕРАХ**

*Специальность 25.00.22 «Геотехнология (подземная,
открытая и строительная)»*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

**Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
«Институт горного дела Уральского отделения РАН»**

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор
Яковлев Виктор Леонтьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Лаптев Юрий Викторович

кандидат технических наук, доцент
Горшков Эдуард Викторович

Ведущее предприятие ОАО Институт «Уралгипроруда»

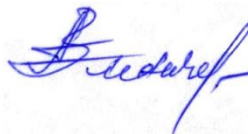
Защита состоится « » 2012 г. в часов
на заседании диссертационного совета Д 004.010.01
при Институте горного дела УрО РАН по адресу:
620219, г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58.
Тел.: +7 (343) 3502186
Факс: +7 (343) 3502111

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института горного дела УрО РАН.

Просьба направлять отзывы почтой в 2 экземплярах, заверенных печатью организа-
ции, по указанному выше адресу.

Автореферат разослан « » 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



В.М. Аленичев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современном этапе и в ближайшей перспективе открытые горные работы имеют преимущественное развитие и продолжают оставаться основой освоения месторождений России и стран СНГ, в том числе и при комбинированной системе разработки месторождений. Важнейшим технологическим процессом, определяющим эффективность разработки месторождения, является транспортирование горной массы.

В последние десятилетия значительно изменились условия эксплуатации карьерных автосамосвалов. Глубина отдельных карьеров достигает 500-650 м, в результате расстояние транспортирования увеличивается: до 4-6 км – при комбинированной схеме транспорта, до 10-12 км – при монотранспортной системе (автотранспорт). При этом, несмотря на существенные различия горнотехнических условий, на карьерах и разрезах России и стран СНГ преимущественно работают автосамосвалы с одинаковыми техническими характеристиками силовых установок. Поэтому эффективность их эксплуатации на разных предприятиях различна. В то же время карьерный автотранспорт в связи с его мобильностью и гибкостью остается основным видом транспорта на открытых горных работах как самостоятельно, так и в комбинации с другими видами транспорта. Появляется потребность в исследовании влияния горнотехнических условий на режимы работы силовых установок с целью их совершенствования по следующим направлениям: повышение топливной экономичности, повышение удельной мощности, обеспечение безопасной и высокопроизводительной работы на повышенных уклонах (при уклоне 8-12% в настоящее время и до 16-18% в перспективе).

Таким образом, совершенствование методики соотнесения технических параметров карьерных автосамосвалов и технологических параметров процесса транспортирования горной массы, определение технических характеристик силовых установок автосамосвалов для условий глубоких карьеров на основе критерия эффективности эксплуатации является актуальной научной задачей, имеющей важное практическое значение для проектных институтов, машиностроительных заводов и горнодобывающих предприятий.

Объект исследований – процесс транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами.

Предмет изучения – взаимосвязь технологических параметров процесса транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами с техническими характеристиками силовых установок.

Основная идея диссертационной работы заключается в установлении и использовании зависимостей технологических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов от горнотехнических условий для оптимизации и выбора технических характеристик силовых установок.

Цель работы – обоснование критерия эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов с различными техническими характеристиками силовых установок для условий глубоких карьерах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1 Оценить степень влияния технических характеристик силовых установок и технологических параметров процесса транспортирования на эффективность работы карьерных автосамосвалов.

2 Исследовать влияние параметров условий эксплуатации (высота подъема, уклон трассы) на параметры транспортного цикла карьерных автосамосвалов (производительность, эксплуатационный расход топлива) на основе имитационного моделирования (вычислительного эксперимента).

3 Дифференцировать условия эксплуатации карьерных автосамосвалов на действующих карьерах по продольному уклону автомобильной трассы.

4 Обосновать рациональные технические характеристики силовых установок для различных условий эксплуатации автосамосвалов на карьерах.

5 Усовершенствовать методику выбора технических характеристик силовых установок автосамосвалов для транспортирования горной массы в условиях глубоких карьеров на основе предложенного критерия эффективности эксплуатации.

Научные положения, защищаемые автором:

1 Эффективность эксплуатации карьерного автосамосвала с различными техническими характеристиками силовых установок оценивается ранжированными

значениями коэффициента эффективности эксплуатации, отражающего отношение эталонной транспортной работы к затрачиваемой энергии топлива.

2 Критерием оптимизации и выбора технических характеристик силовой установки карьерного автосамосвала для условий глубоких карьеров является максимум коэффициента эффективности эксплуатации.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается соответствием общепринятым положениям теории и практики открытых горных работ, теории автомобилей и двигателей внутреннего сгорания; базированием проводимых исследований на достоверных исходных данных; сходимостью полученных результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1 На основе вычислительного эксперимента с имитационной моделью карьерного автосамосвала в различных условиях эксплуатации установлены зависимости параметров процесса транспортирования горной массы (высота подъема, расстояние) от технических характеристик силовых установок автосамосвалов.

2 В качестве критерия эффективности эксплуатации предложен коэффициент эффективности использования энергии топлива, на основе которого установлена рациональная удельная мощность автосамосвала для условий глубоких карьеров.

3 Оценена эффективность эксплуатации карьерного автосамосвала при продольных уклонах трасс до 18% и высоте подъема горной массы до 900 м.

4 Обоснована область предпочтительных условий применения на карьерах автосамосвалов с различной удельной мощностью по техническому критерию – коэффициенту эффективности использования энергии топлива.

Научное значение работы заключается в установлении зависимости между параметрами процесса транспортирования горной массы и техническими характеристиками силовых установок карьерных автосамосвалов, обосновании коэффициента эффективности использования энергии топлива для оптимизации технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов.

Практическое значение работы для предприятий машиностроительной и горнодобывающей отраслей заключается в том, что:

1 Обоснован критерий выбора технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов для условий глубоких карьеров.

2 Усовершенствована методика определения технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов для различных горнотехнических условий.

3 Обоснованы предпочтительные условия применения силовых установок с различными техническими характеристиками.

Методы исследования: обобщение и анализ научно-технической литературы; имитационное моделирование режимов работы силовых установок (вычислительный эксперимент); анализ результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования; регрессионный анализ.

Личный вклад автора состоит в разработке имитационной модели силовой установки карьерного автосамосвала; обосновании критерия для оценки эффективности карьерных автосамосвалов с различными техническими характеристиками их силовых установок в условиях глубоких карьеров; установлении зависимостей технических характеристик силовых установок от технологических параметров процесса транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее отдельные результаты обсуждены и одобрены на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2009 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы карьерного транспорта» (г. Екатеринбург, 2009 г., 2011 г.), Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2011 г.); семинарах лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники ИГД УрО РАН, ученом совете ИГД УрО РАН; технических совещаниях у генерального конструктора – директора НТЦ ОАО «БелАЗ».

Реализация результатов работы. Результаты исследований послужили основой для выполнения научно-исследовательской работы по обоснованию технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов БелАЗ-7513, проводимой ФГБУН «Институт горного дела Уральского отделения РАН», ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» и ОАО «Белорусский автомобильный завод».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 5 работ в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 139 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения и 6 приложений; содержит 39 рисунков, 15 таблиц и библиографический список из 111 наименований.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета Б.А. Шароглазову, д.т.н., профессору кафедры «Детали машин» Уральского государственного лесотехнического университета Е.Е. Баженову, к.т.н., доценту кафедры «Автомобили и тракторы» Уральского федерального университета А.И. Бассу за постоянное внимание к работе, научно-методическую помощь; коллегам из лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники, генеральному конструктору – директору НТЦ ОАО «Белорусский автомобильный завод» А.Н. Егорову, главному конструктору ООО «Уральский дизель-моторный завод» В.В. Лашманову, начальнику отдела адаптации двигателей Московского представительства компании Cummins Inc. А.Е. Ольшевскому за сотрудничество и ценные критические замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ состояния и изученности вопроса

Современный этап развития открытого способа добычи полезных ископаемых характеризуется прогрессирующим ростом глубины и масштабов работ, увеличением производственной мощности и пространственных параметров карьеров, концентрацией фронта добычных работ и усложнением транспортных коммуникаций.

Основными ограничивающими факторами при использовании автомобильного транспорта на карьерах является расстояние транспортирования, высота подъема горной массы и уклоны автодорог.

Показателем, характеризующим трудоемкость выполнения транспортной работы карьерными автосамосвалами, служит средневзвешенный уклон, величина которого позволяет учитывать горизонтальные, слабонаклонные и крутые участки трассы.

$$i_{\text{ср.в}} = \frac{H_{\text{п}}}{L} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $H_{\text{п}}$ – высота подъема горной массы, м;

L – расстояние транспортирования горной массы, м.

По мере увеличения глубины разработки, сокращения параметров карьеров в плане происходит усложнение горнотехнических условий эксплуатации, и работа автомобильного транспорта приобретает ряд специфических особенностей. Вскрытие и подготовка новых горизонтов в глубинной части карьеров производится в стесненных условиях рабочего пространства при большой концентрации погрузочного и транспортного оборудования, с высокими темпами углубки.

Проблемам разработки глубоких карьеров посвящено много работ, основными из которых являются научные труды акад. Н.В. Мельникова, акад. В.В. Ржевского, акад. К.Н. Трубецкого, член-корр. РАН В.Л. Яковлева, д.т.н. М.Г. Новожилова, д.т.н. В.С. Хохрякова, д.т.н. М.В. Васильева и др.

Начиная с 60-х гг. XX века и до настоящего времени вопросы проектирования и эксплуатации карьерного, в том числе автомобильного, транспорта, обоснования необходимости создания новых транспортных средств, условий их эффективного применения всегда находились и находятся в центре внимания научной школы карьерного транспорта в Институте горного дела МЧМ СССР (ныне Институт горного дела УрО РАН). Результаты исследований отражены в трудах д.т.н., проф. М.В. Васильева, чл.-корр. РАН Яковлева и многих других сотрудников института. С ростом глубины карьеров и вовлечением в эксплуатацию новых месторождений доля автомобильного транспорта на открытых горных разработках постоянно увеличивается, а условия его эксплуатации усложняются. В связи с этим создание и совершенствование карьерного автотранспорта является одним из основных направлений поддержания устойчивой работы горнодобывающих предприятий.

Вопросы повышения эффективности автотранспорта, в том числе на глубоких карьерах, нашли отражение в исследованиях д.т.н. И.В. Зырянова, д.т.н. П.Л. Мариева, д.т.н. Ю.И. Леля, д.т.н. А.С. Довженка, д.т.н. З.Л. Сироткина, к.т.н. А.А. Котяшева, к.т.н. Э.В. Горшкова, к.т.н. П.И. Тарасова, А.Н. Егорова и др. Авторами рассмотрены конкретные вопросы совершенствования конструктивных параметров автосамосва-

лов, технической эксплуатации, повышения надежности, увеличения ходимости крупногабаритных шин, планирования и нормирования работы экскаваторно-автомобильной техники, автоматизации управления карьерным автотранспортом.

В настоящее время при выборе мощности двигателя внутреннего сгорания проектируемого автомобиля исходят из необходимости преодоления полного сопротивления движению при максимальной скорости. Автомобили с такими параметрами являются «универсальными» как по отношению к горнотехническим условиям движения, так и по отношению к экономическим условиям горнодобывающих предприятий.

Так как в существующих методиках определения технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов не учитываются реальные условия движения, обусловленные параметрами процесса транспортирования горной массы, то предлагается дополнительно оценивать эксплуатационные свойства карьерных автосамосвалов коэффициентом эффективности эксплуатации в конкретных горнотехнических условиях и на его основе оптимизировать и выбирать технические характеристики силовых установок. Предпосылки выбора рациональных технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов для условий глубоких карьеров по техническому критерию – интегральному коэффициенту – заложены в диссертации к.т.н. Тарасова П.И. (рисунок 1, *а*), по экономическому критерию – себестоимости транспортирования – в диссертации к.т.н. Горшкова Э.В. (рисунок 1, *б*).

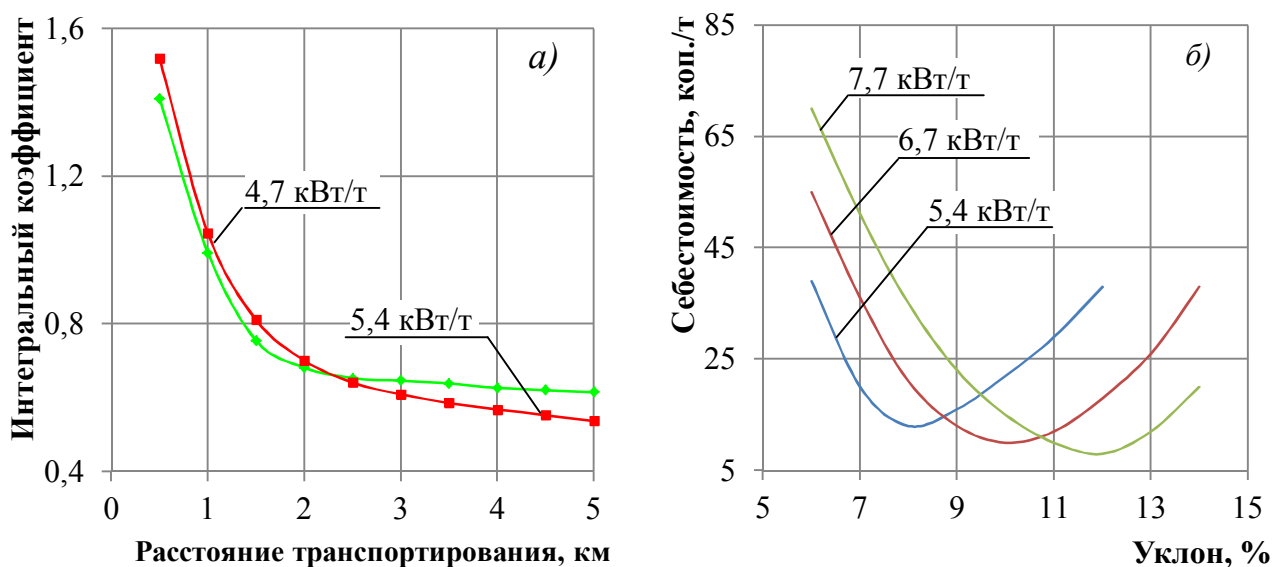


Рисунок 1 – Критерии выбора удельной мощности карьерных автосамосвалов: *а* – интегральный коэффициент (по к.т.н. Тарасову П.И.), *б* – себестоимость транспортирования 1 т горной массы (по к.т.н. Горшкову Э.В.)

Влияние горнотехнических условий эксплуатации на технические характеристики силовых установок карьерных автосамосвалов

Наибольшее влияние глубина разработки оказывает на производительность и технико-экономические показатели карьерного транспорта. До настоящего времени на большинстве отечественных карьеров полной компенсации снижения технико-экономических показателей транспортирования с увеличением глубины разработки техническим прогрессом обеспечить не удастся. В связи с этим транспортная проблема была и остается одной из важнейших проблем разработки глубоких карьеров.

В области совершенствования технологии открытой разработки усилия направлены, главным образом, на создание технологических схем ведения горно-транспортных работ, основанных на принципах эффективного сочетания технологических процессов горного производства и соответствующего этим процессам оборудования. Естественно, что в этом случае для каждого типа оборудования стремятся определить область экономически целесообразного применения.

Чтобы определить параметры разрабатываемых на перспективу карьерных автосамосвалов и оптимизировать их эксплуатационную эффективность, необходимо знать их производительность и её зависимость от технологических, природно-климатических условий и характеристик устанавливаемых на них агрегатов, в первую очередь двигателей энергосиловых установок.

Условия эксплуатации можно разделить на две группы: не зависящие от транспорта, но влияющие на эффективность его эксплуатации; зависящие от параметров транспортной системы карьера (схема транспорта, комбинация видов транспорта, расстояние транспортирования и высота подъема горной массы и т.д.).

Горнотехнические условия влияют на режимы работы, определяя эффективные показатели карьерного автосамосвала. Обобщение опыта эксплуатации глубоких карьеров, анализ проектов их развития на перспективу и до конца разработки позволяют достаточно четко на каждом из них выделить три основные зоны по глубине:

- верхняя зона характеризуется возможностью организации прямых съездов, стационарностью основных транспортных коммуникаций;
- средняя зона вскрывается с использованием средств железнодорожного и автомобильного транспорта путем организации временных съездов, зачастую с неоднократным изменением направления движения;

- нижней зоне свойственны ограниченность пространственных размеров, сложность сооружения даже временных транспортных коммуникаций, необходимость постоянного производства работ по вскрытию и подготовке новых горизонтов.

Однако высота этих зон и предпочтительные виды транспорта для их вскрытия и разработки на различных карьерах в зависимости от их пространственных размеров существенно различны. Тем не менее можно выделить ряд карьеров, имеющих относительно близкие размеры в плане и по глубине, условия для формирования транспортных систем на которых примерно идентичны.

Разработанная д.т.н. В.Л. Яковлевым систематизация отражает рациональные зоны эксплуатации карьерного транспорта по видам и зоны перехода с одного вида транспорта на другой.

Предлагаемая дифференциация относится к автотранспорту и устанавливает рациональные зоны (группы условий) эксплуатации карьерных автосамосвалов с рациональными техническими характеристиками силовых установок в конкретных горнотехнических условиях. В настоящее время технология ведения горных работ предусматривает зоны эксплуатации карьерного автотранспорта, которые различаются расстоянием транспортирования и высотой подъема горной массы. Наблюдается разброс значений расстояния транспортирования и высоты подъема горной массы, поэтому предлагается разделить горнотехнические условия глубоких карьеров на группы по средневзвешенному уклону (таблица 1, рисунок 2). В соответствии с предлагаемой дифференциацией необходимо применять силовые установки с рациональными техническими характеристиками, соответствующими каждой группе условий. Идея дифференциации горнотехнических условий на глубоких карьерах с целью применения автосамосвалов с рациональными техническими характеристиками энергосиловых установок принадлежит к.т.н. Тарасову П.И.

Таблица 1 – Характеристика существующих горнотехнических условий

Типы автомобильных трасс	Высота подъема горной массы, м	Расстояние транспортирования, км	Средневзвешенный уклон, %
Крутонаклонные	0-600	1-10	6-8
Наклонные	0-300	1-5	4-6
Слабонаклонные	0-100	1-3	2-4

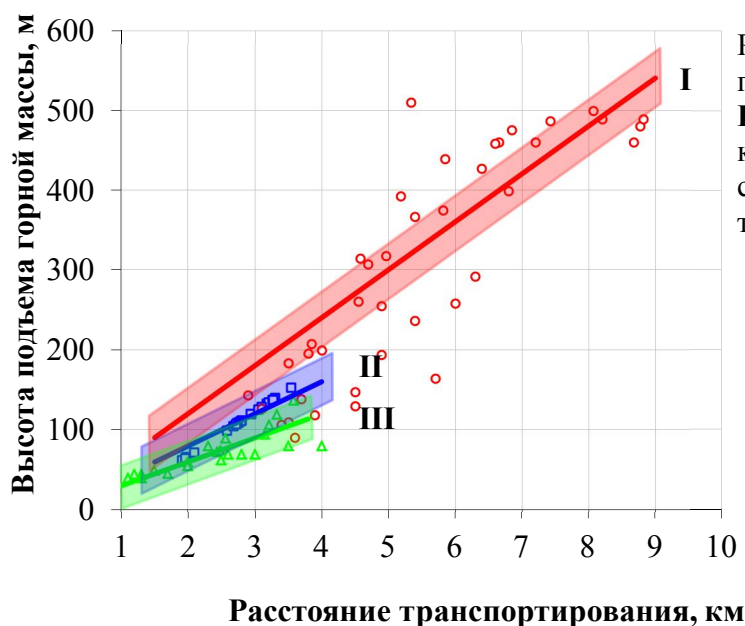


Рисунок 2 – Дифференциация горнотехнических условий I, II, III – соответственно крутонаклонные, наклонные, слабонаклонные автомобильные трассы

Экспериментальные исследования режимов работы силовых установок карьерных автосамосвалов в различных горнотехнических условиях

Весьма актуальной задачей при разработке и доводке транспортного двигателя является определение таких значений конструктивных, регулировочных параметров, которые обеспечивали бы наибольшую эффективность карьерного автосамосвала во всей совокупности горнотехнических условий.

Из всего комплекса технических характеристик силовой установки выделяют две основные: максимальную мощность и эксплуатационный расход топлива. В дальнейшем будем оперировать не полной массой карьерного автосамосвала и мощностью силовой установки, а удельной мощностью автосамосвала $P_{уд}$.

Процесс транспортирования и карьерный автосамосвал описывается множеством характеристик X_m , изменяющихся в процессе функционирования и являющихся функцией времени. Имитационная модель включает выбор инструкции по изменению значений множества характеристик X_m , выполнение которых позволяет воссоздать с некоторым приближением процесс функционирования реальной системы. Проведение вычислительного эксперимента с имитационной моделью на компьютере заключается в проведении компьютерных расчетов с целью сбора, накопления и последующей обработки статистики и изменений значений характеристик $X_m(t)$.

Задача выбора оптимальных значений удельной мощности $P_{уд}$ и эксплуатационного расхода топлива $Q_{ср}$ сводится к тому, чтобы путем варьирования в

определенном диапазоне значений $P_{уд}$ и $Q_{ср}$ найти те сочетания расстояния транспортирования и высоты подъема горной массы, которые обеспечивают максимальное значение показателя – коэффициента эффективности использования энергии топлива. Следовательно, критериями эффективности являются $P_{уд}$, $Q_{ср}$ и $k_{эф}$, которые определяются в результате имитационного моделирования транспортного цикла карьерного автосамосвала по дороге с реальным профилем.

Для расчета технологических параметров транспортного цикла карьерного автосамосвала применено имитационное моделирование, которое реализовано в компьютерной программе «Виртуальная демонстрационно-исследовательская модель карьерных автосамосвалов». Объектом моделирования является транспортный цикл карьерного автосамосвала БелАЗ-7513 грузоподъемностью 130-136 т с дизельным двигателем внутреннего сгорания Cummins QSK45 и электромеханической трансмиссией. При моделировании приняты следующие допущения:

- руководящий уклон трасс от 4 до 18%;
- глубина карьера от 100 до 900 м и соответствует высоте подъема горной массы;
- коэффициент развития трассы по проф. В.С. Хохрякову 1,2;
- скорость – максимальная по требованиям безопасности (30 км/ч).

Определить одно оптимальное сочетание значений удельной мощности и эксплуатационного расхода топлива автосамосвала для различных горнотехнических условий практически невозможно. Поэтому выбор типичного маршрута для характерных условий эксплуатации является ответственным моментом. Для карьерных автосамосвалов грузоподъемностью 130-136 т может быть несколько характерных условий эксплуатации, различающихся по средневзвешенному уклону, расстоянию транспортирования и высоте подъема горной массы (таблица 2).

Таблица 2 – Характерные условия эксплуатации карьерных автосамосвалов

Высота подъема, м	Расстояние транспортирования (км) при коэффициенте развития трасс 1,2 и руководящем уклоне, %								
	2	4	6	8	10	12	14	16	18
100	6,00	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67
200	–	6,00	4,00	3,00	2,40	2,00	1,71	1,50	1,33
300	–	9,00	6,00	4,50	3,60	3,00	2,57	2,25	2,00
450	–	–	9,00	6,75	5,40	4,50	3,86	3,38	3,00
600	–	–	–	9,00	7,20	6,00	5,14	4,50	4,00
900	–	–	–	–	10,80	9,00	7,71	6,75	6,00

Проведенное имитационное моделирование транспортного цикла карьерного автосамосвала в условиях из таблицы 2 показывает, что при малых значениях средне-взвешенного уклона удельная мощность автосамосвала не влияет на производительность (рисунок 3). При повышении уклона автодорог возрастает и производительность (рисунок 4, а), что объясняется сокращением расстояния транспортирования. С увеличением высоты подъема производительность падает из-за увеличения расстояния транспортирования (рисунок 4, б).

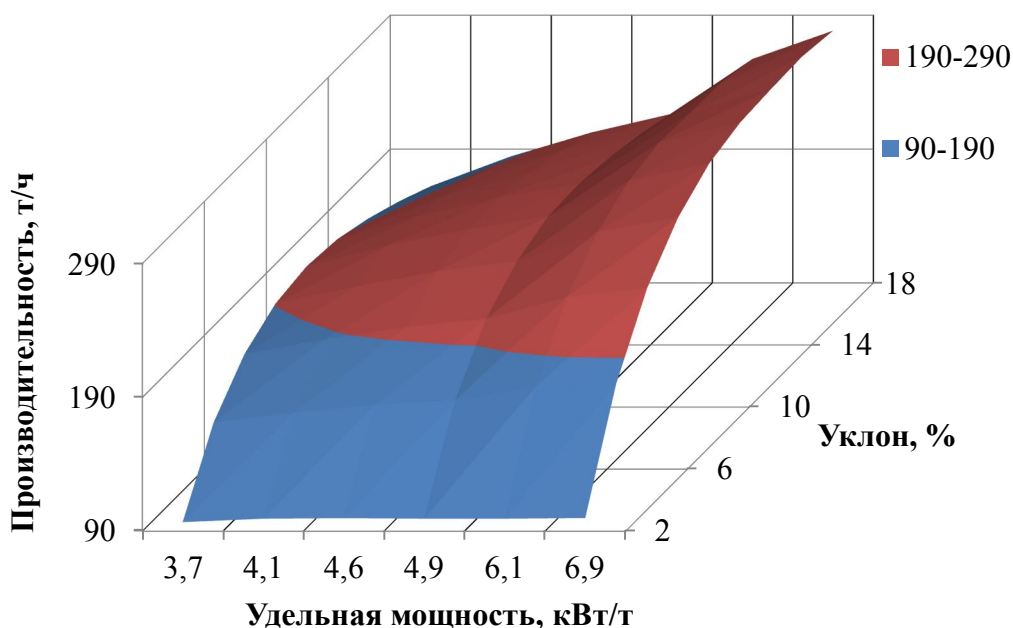


Рисунок 3 – Часовая производительность карьерного автосамосвала в зависимости от удельной мощности и уклона трассы при высоте подъема 300 м

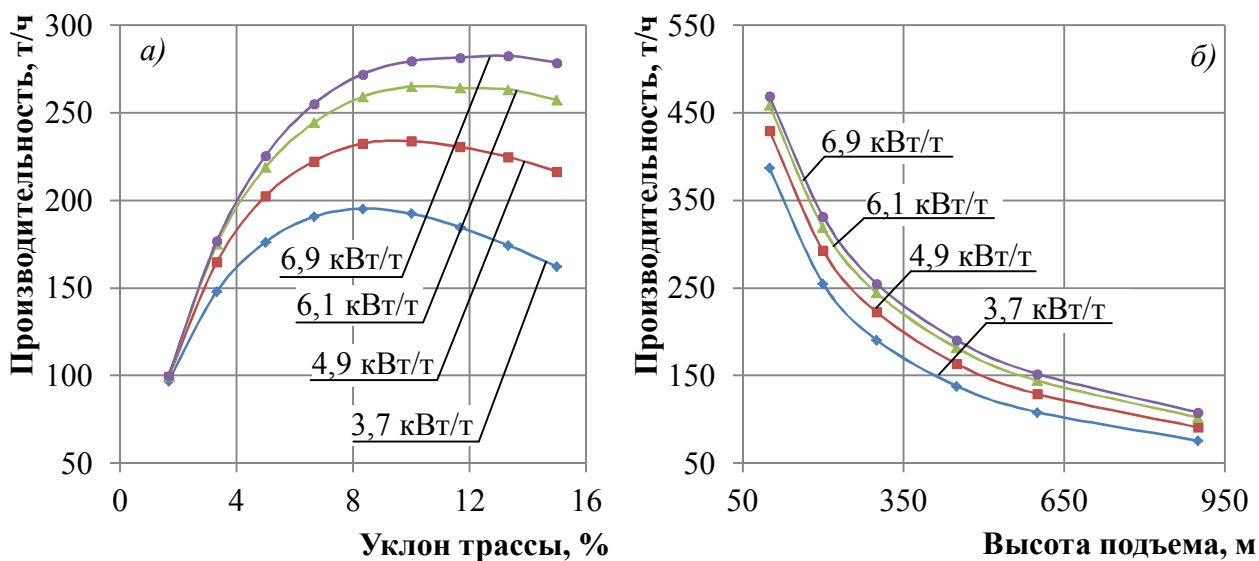


Рисунок 4 – Часовая производительность карьерного автосамосвала в зависимости: а) – от уклона трассы при высоте подъема 300 м, б) – от высоты подъема при угле трассы 8%

Сравнение топливной экономичности карьерных автосамосвалов с различной удельной мощностью также показывает, что при уклоне до 6-8% удельная мощность не влияет на удельный расход топлива (рисунок 5). Установлено, что при уклонах трасс свыше 8-10% более экономичны автосамосвалы с большей удельной мощностью (рисунок 6, а). С увеличением высоты подъема горной массы при постоянном уклоне трассы топливная экономичность автосамосвалов улучшается, но более экономичны двигатели с меньшей удельной мощностью (рисунок 6, б).

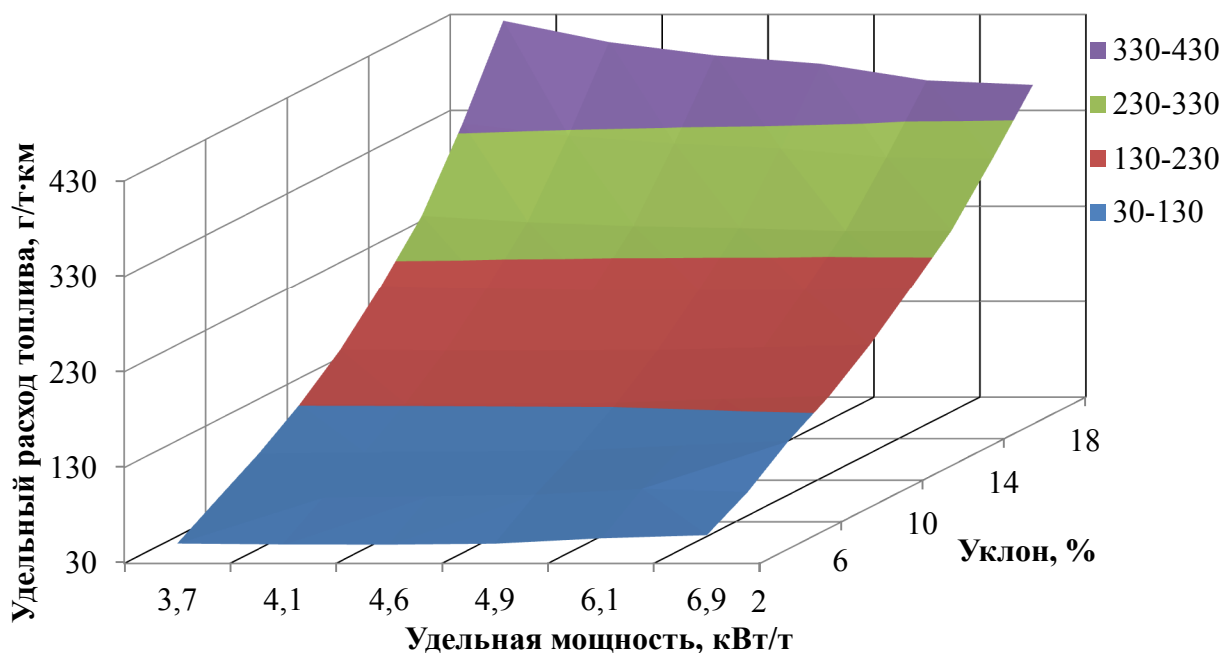


Рисунок 5 – Удельный расход топлива карьерного автосамосвала в зависимости от удельной мощности и уклона трассы при высоте подъема 300 м

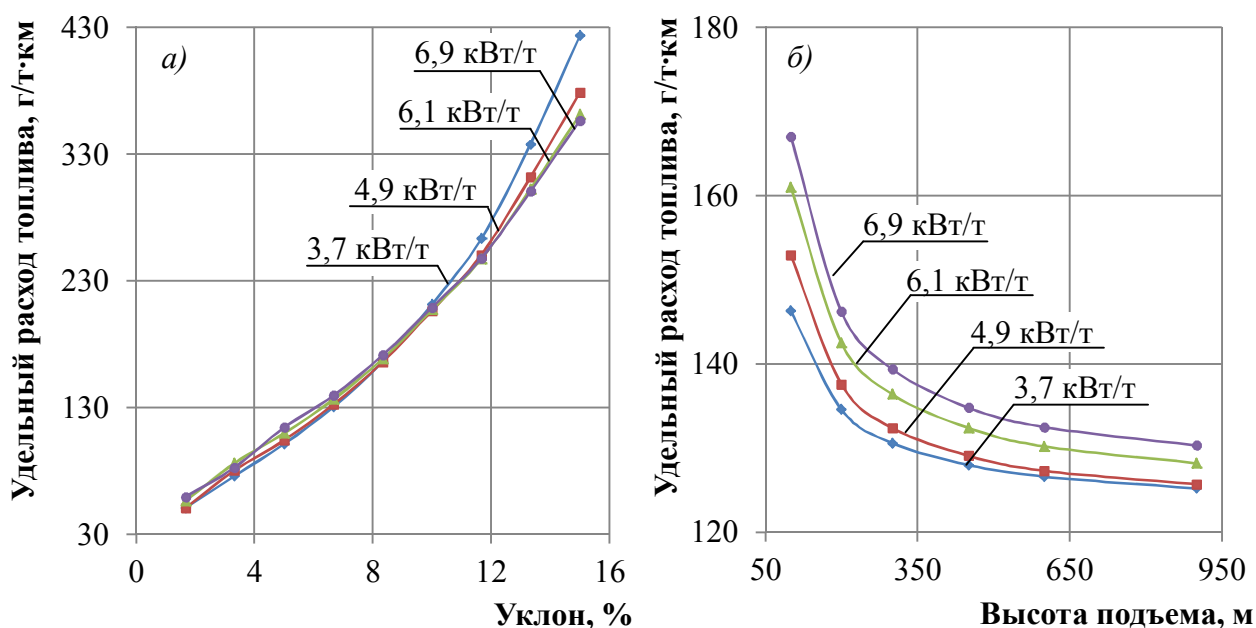


Рисунок 6 – Удельный расход топлива карьерного автосамосвала в зависимости: а) – от уклона трассы при высоте подъема 300 м, б) – от высоты подъема при уклоне трассы 8%

В итоге имитационная модель процесса транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами позволяет быстро и оперативно определить наиболее выгодные технические параметры автотранспорта. В частности, рассчитав эксплуатационные показатели карьерного автосамосвала, можно определить рациональные параметры силовых установок в конкретных горнотехнических условиях по критериям максимальной производительности либо по минимальному эксплуатационному расходу топлива.

Технико-экономическое обоснование технических характеристик силовых установок автосамосвалов для условий глубоких карьеров

Основной задачей системного подхода при выборе параметров силовых установок является установление связей и закономерностей, присущих транспортным системам карьеров. Системный подход подразумевает рассмотрение объекта как системы и ориентирование исследований на раскрытие целостности объекта. Транспортная система карьера характеризуется целостностью, цикличностью, упорядоченностью элементов и их управляемостью. Определение и выбор технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов, обеспечивающих высокие показатели эффективности в заданных условиях эксплуатации, является целью их функционального проектирования. Характеристики функционирования карьерного автосамосвала зависят от его физических свойств, воздействий внешней среды и управляющих воздействий водителя или системы автоматического управления. Поэтому функциональное проектирование необходимо осуществлять на основе системного подхода, рассматривая систему карьерный автосамосвал – транспортирование горной массы.

Карьерный автосамосвал как система характеризуется структурой и параметрами. Структура автосамосвала определяет ее составные части и связи между ними и должна обеспечивать оптимальное его функционирование, для чего характеризующие автосамосвал параметры должны быть оптимизированы.

Сопоставление силовых установок представляет собой сложную и вместе с тем слабо изученную проблему. В практике научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций эти вопросы являются чрезвычайно актуальными. Проведенные исследования показывают, что качество транспортных средств, как и показатели транспортной работы, играют важную роль в выборе технических харак-

теристик силовых установок. Показателем при оценке энергетических характеристик дизельных двигателей в настоящее время служит удельный эффективный расход топлива, который недостаточно отражает реальную экономичность автосамосвалов. Для оценки эффективности эксплуатации силовых установок карьерного автосамосвала необходим комплексный показатель, который должен учитывать и технические характеристики силовой установки, и параметры процесса транспортирования.

Проведенный анализ критериев эффективности транспортных средств общего назначения и карьерных автосамосвалов позволяет сказать, что в рассмотренных работах горнотехнические условия учитываются недостаточно (таблица 3). Поэтому для выбора технических характеристик силовых установок необходимо использовать коэффициент эффективности использования энергии топлива, который отражает отношение эталонной транспортной работы автосамосвала к затрачиваемой энергии топлива и характеризует эффективность автосамосвала в условиях глубоких карьеров.

$$k_{\text{эф}} = \frac{A_3}{E_T} 100, \quad (2)$$

где A_3 – эталонная транспортная работа, Дж;

E_T – затрачиваемая энергия топлива, Дж.

Эталонная транспортная работа определяется как работа силы тяги по перемещению горной массы на заданное расстояние при заданном сопротивлении движению:

$$A_3 = F_T L, \quad (3)$$

где F_T – сила тяги на колесе, Н;

L – расстояние транспортирования, м.

$$F_T = M_a g \left(f + \frac{i}{100} \right) \quad (4)$$

где M_a – полная масса карьерного автосамосвала, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

f – коэффициент сопротивления качению;

i – уклон трассы, %.

Поскольку на карьерных автосамосвалах используется дизельный двигатель, то в расчетах принимаем затрачиваемую энергию дизельного топлива.

$$E_T = Q_p H_u \quad (5)$$

где Q_p – расход топлива карьерного автосамосвала за рейс, кг;

H_u – теплотворная способность топлива, Дж/кг (для дизельного топлива $H_u = 42,7 \cdot 10^6$ Дж/кг).

Таблица 3 – Критерии оценки эффективности эксплуатации средств автотранспорта

Формула	Единица измерения	Автор(ы)	Назначение	Применимость для карьерного автотранспорта
$k_{эф} = \frac{m_r v_{ср}}{100 Q_s}$	$\frac{т \cdot км}{л \cdot ч}$	М.С. Высоцкий, А.И. Гришкевич, Л.Х. Гилелес и др.	Применяется для оптимизации параметров двигателя и трансмиссии магистральных автопоездов	Не отражает горнотехнических условий эксплуатации (высота подъема, уклон автодорог)
$K = Q v^2 L \sqrt{H/\hat{V}}$	тран	В.А. Петухов, И.Л. Шегалов	Выбор транспортно-логистической стратегии перевозок и приоритетных видов транспорта и их скоростных режимов	Обобщенный показатель, который базируется на средних статистических величинах и не отражает специфики технологии горных работ
$\lambda = W\Pi$	$\frac{Дж}{ч}$	Ю.Е. Воронов, А.В. Буянкин	Позволяет количественно оценить выполнение автосамосвалом своей функции	Не учитываются конкретные горнотехнические условия эксплуатации
$\eta = \frac{P_T}{P_\phi Q_{y,t}} \cdot 100$	%	Ю.И. Лель	Служит для оценки энергетической эффективности различных видов карьерного транспорта	Не учтены горнотехнические условия, транспортная работа и производительность во времени
$D = P T$	$\frac{г \cdot с}{т \cdot м}$	Ю.И. Лель, Э.В. Горшков, Г.А. Ворошилов	Используется для обоснования оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров	Для оценки эффективности различных видов транспорта в идентичных или отличающихся условиях карьеров
$K_{инт} = \frac{Q_n^б}{Q_n^ф}$	–	П.И. Тарасов	Используется для оценки эффективности карьерных автосамосвалов в различных горнотехнических условиях	Не учитывается производительность карьерного автосамосвала и совершаемая транспортная работа

Проведенные расчеты коэффициента эффективности использования энергии топлива карьерных автосамосвалов с различной удельной мощностью и полученные закономерности показывают, что оптимизацию и выбор технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов необходимо проводить для дифференци-

рованных групп горнотехнических условий, а одним из основных признаков дифференциации является продольный уклон автомобильных трасс. Предпочтительные условия применения карьерных автосамосвалов с различной удельной мощностью определяются на основании установленных закономерностей (рисунки 7, 8, 9) по максимуму коэффициента эффективности эксплуатации. Так, из рисунка 7, а видно, что при уклонах трасс до 8% наиболее эффективно используется энергия топлива у автосамосвалов с удельной мощностью 3,7 кВт/т, а при повышенных уклонах – с удельной мощностью 6,9 кВт/т. Но с увеличением высоты подъема горной массы эффективность карьерных автосамосвалов возрастает при повышении удельной мощности (рисунки 8, а, 8, б).

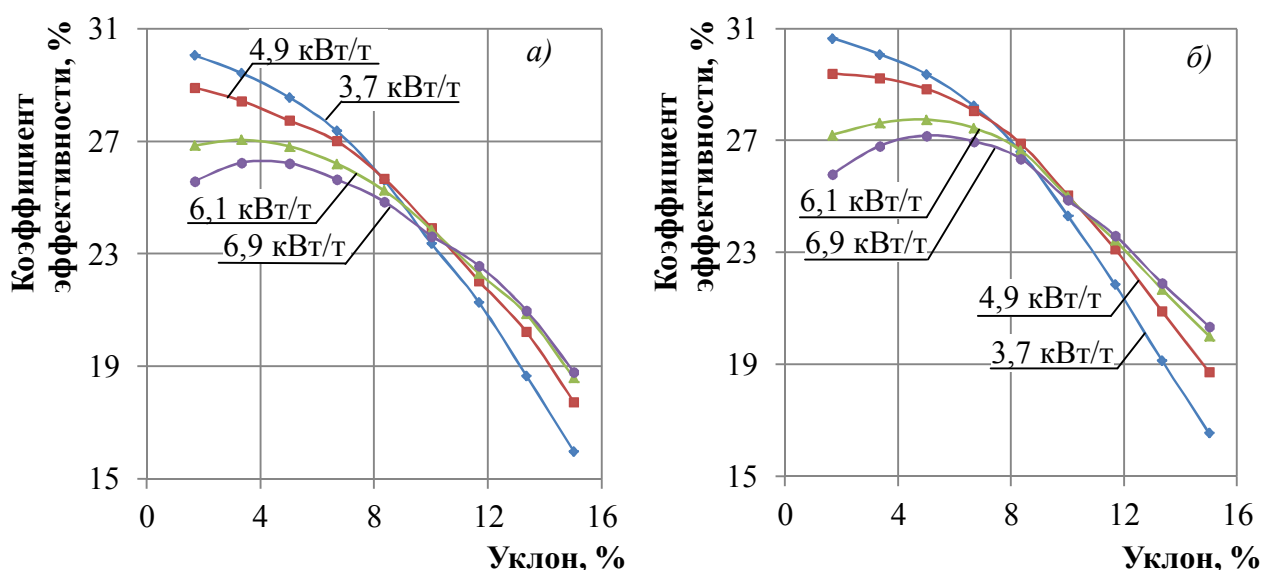


Рисунок 7 – Коэффициент эффективности карьерных автосамосвалов с различной удельной мощностью в зависимости от уклона трасс при высоте подъема 300 м (а) и 600 м (б)

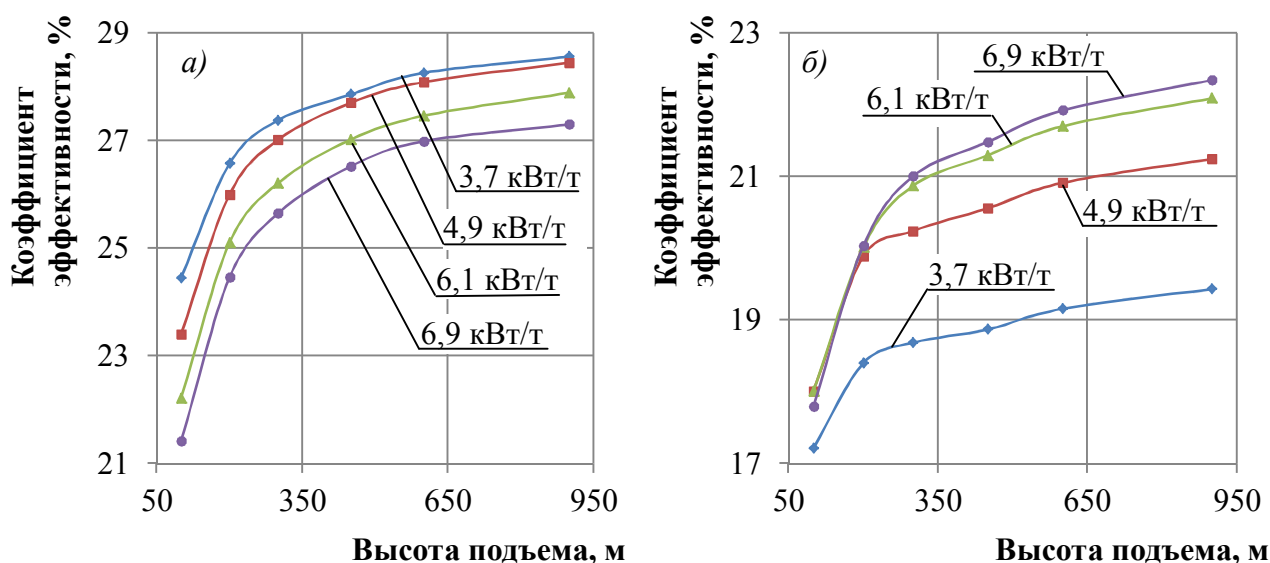


Рисунок 8 – Коэффициент эффективности карьерных автосамосвалов с различной удельной мощностью в зависимости от высоты подъема при руководящем уклоне трассы 8% (а) и 16% (б)

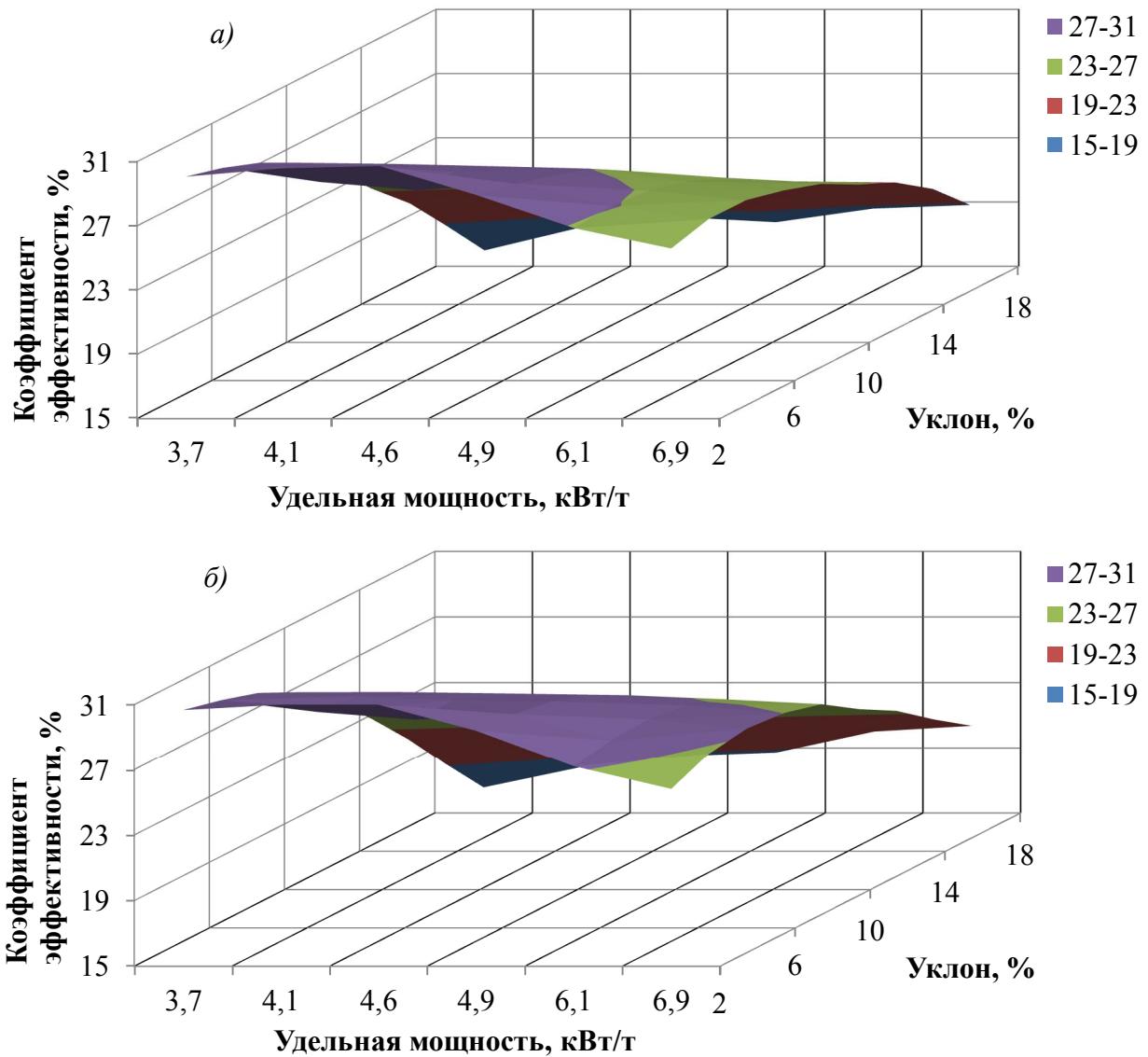


Рисунок 9 – Коэффициент эффективности карьерных автосамосвалов в зависимости от удельной мощности и уклона трасс при высоте подъема 300 м (а) и 600 м (б)

Коэффициент эффективности использования энергии топлива силовых установок карьерных автосамосвалов как функция высоты подъема горной массы, средневзвешенного уклона и удельной мощности описывается функционально-факторным степенным уравнением регрессии с самоопределяющимися показателями. Уравнение получено на имитационных стендах сотрудника Института горного дела УрО РАН д.т.н. Антонова В.А., коэффициент детерминации 0,91.

$$k_{\text{эф}} = 31,45 - 138,95H^{-0,722} - 0,0459i^{1,89} - 1,14 \cdot 10^{-31}N_{\text{уд}}^{36,97}, \quad (6)$$

где H – высота подъема горной массы, м;

i – средневзвешенный уклон трассы, %;

$N_{\text{уд}}$ – удельная мощность карьерного автосамосвала, кВт/т.

Как показывают расчеты, при средневзвешенном уклоне 8% себестоимость транспортирования 1 т и 1 т·км горной массы увеличивается с повышением удельной мощности карьерного автосамосвала (рисунок 10, а) и уменьшается при средневзвешенном уклоне 16% (рисунок 10, б).

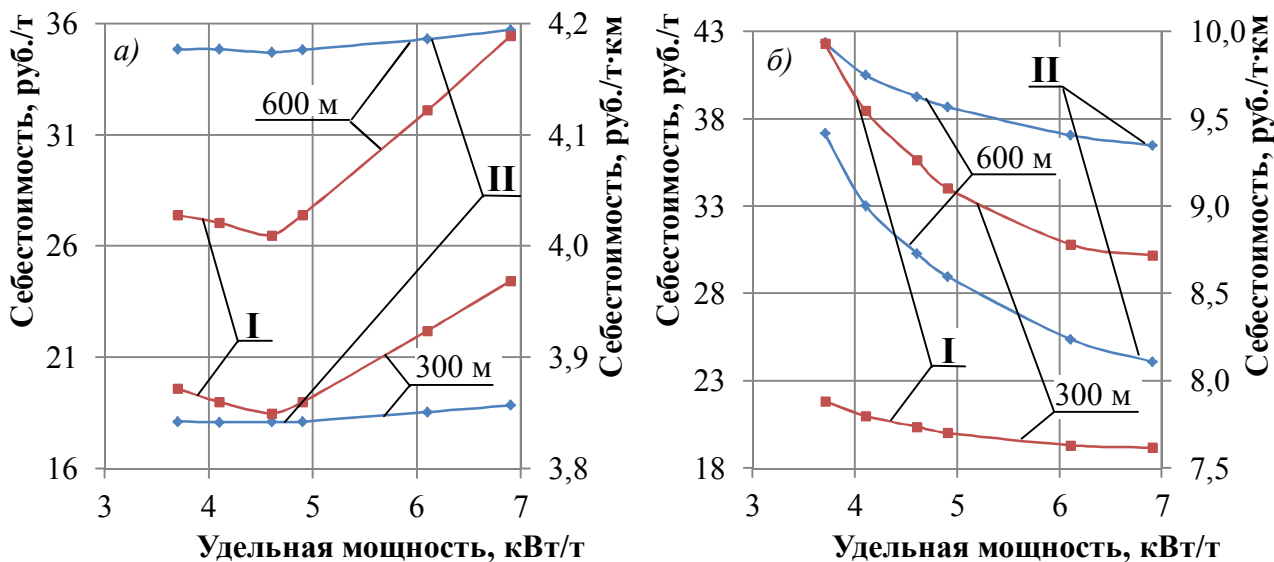


Рисунок 10 – Себестоимость перевозки 1 т (график I) и 1 т·км (график II) горной массы карьерными автосамосвалами в зависимости от удельной мощности при высоте подъема горной массы 300 и 600 м и уклоне трасс 8% (а), 16% (б)

Выбор и оптимизация технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов по коэффициенту эффективности эксплуатации для условий глубоких карьеров подтверждается расчетами себестоимости транспортирования горной массы (рисунок 11).

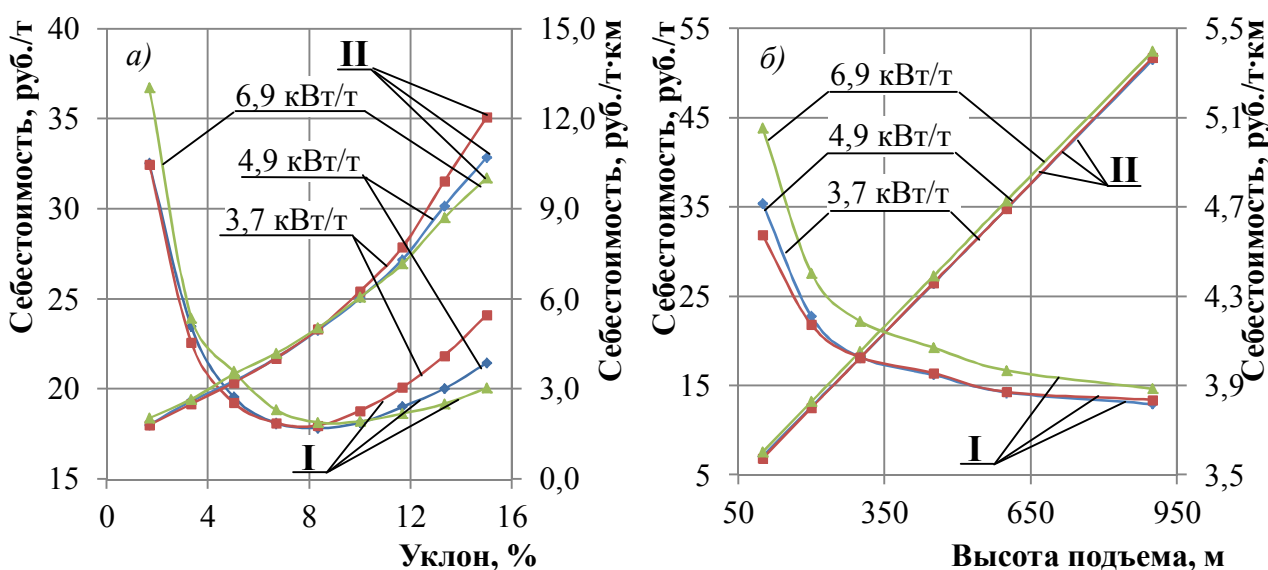


Рисунок 11 – Себестоимость перевозки 1 т (график I) и 1 т·км (график II) горной массы карьерными автосамосвалами с различной удельной мощностью в зависимости от уклона трасс (а, при высоте подъема 300 м) и высоты подъема (б, при уклоне трасс 8%)

Изменение технологии открытых горных работ с учетом применения карьерных автосамосвалов с рациональными техническими характеристиками силовых установок позволит принимать свой порядок разработки и календарный план, объемы горнокапитальных и текущих вскрышных работ, интенсивность ведения горных работ и т.д. (таблица 4). Но необходимо учитывать, что при повышении продольного уклона автомобильных трасс углы откоса бортов карьеров не должны выходить за пределы устойчивости.

Таблица 4 – Предпочтительные условия применения карьерных автосамосвалов с различной удельной мощностью

Высота подъема горной массы, м	Удельная мощность карьерного автосамосвала (кВт/т) при уклоне трассы, %								
	2	4	6	8	10	12	14	16	18
100	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	4,1	4,6	4,9	6,1
200	3,7	3,7	3,7	3,7	4,1	4,6	4,9	6,9	6,9
300	3,7	3,7	3,7	4,1	4,6	4,9	6,9	6,9	6,9
450	3,7	3,7	4,1	4,6	4,9	4,9	6,9	6,9	6,9
600	3,7	4,1	4,1	4,6	4,9	4,9	6,9	6,9	6,9
900	4,1	4,1	4,1	4,6	4,9	6,1	6,9	6,9	6,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований решена актуальная научная задача по обоснованию критерия эффективности эксплуатации силовых установок автосамосвалов для транспортирования горной массы в условиях глубоких карьеров.

Основные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1 На основании проведенного имитационного моделирования (вычислительного эксперимента) транспортного цикла на примере карьерного автосамосвала грузоподъемностью 136 т с различными техническими характеристиками силовых установок установлены взаимосвязи мощности и расхода топлива с высотой подъема горной массы и средневзвешенным уклоном автомобильных трасс. Погрешность расчетов по сравнению с экспериментальными данными составляет 2-5%.

2 В качестве критерия оптимизации и выбора технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов предложен коэффициент эффективности использования энергии топлива, который отражает отношение эталонной транспортной работы к затрачиваемой энергии топлива и описывается функционально-факторным уравнением регрессии в зависимости от уклона трассы, высоты подъема горной массы и удельной мощности автосамосвала.

3 Установленные закономерности изменения коэффициента эффективности использования энергии топлива показывают, что с увеличением высоты подъема горной массы эффективность карьерного автосамосвала возрастает, причем при уклоне трасс до 6-8% более эффективны карьерные автосамосвалы с меньшей удельной мощностью, а при уклоне от 8-10 до 16-18% – автосамосвалы с бóльшей удельной мощностью.

4 Впервые установлено, что по коэффициенту эффективности эксплуатации предпочтительными условиями для применения карьерных автосамосвалов с удельной мощностью 3,7-4,6 кВт/т являются трассы со средневзвешенным уклоном 4-8% при высоте подъема до 300 м, а для автосамосвалов с удельной мощностью 4,9-6,9 кВт/т – трассы с уклоном 10-16% при высоте подъема от 300 до 900 м.

5 Усовершенствованная методика определения мощности силовых установок автосамосвалов позволяет выбрать рациональные значения удельной мощности автосамосвала для транспортирования горной массы в условиях глубоких карьеров и отличается от общепринятой методики тем, что:

- при заданных высоте подъема, расстоянии транспортирования, уклоне трассы, удельной мощности автосамосвала рассчитываются эксплуатационные показатели – часовая производительность, расход топлива и коэффициент эффективности;

- проводится поиск максимального значения коэффициента эффективности из полученного массива данных;

- выбираются такие технические характеристики силовой установки (мощность, удельный эффективный расход топлива), которые обеспечивают максимальное значение коэффициента эффективности;

- выбранные технические характеристики силовой установки карьерного автосамосвала проверяются по условиям тяги и сцепления в заданных условиях эксплуатации.

6 Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- совершенствование системы управления энергосиловой установкой карьерного автосамосвала, основанной на анализе тягового усилия и выборе оптимальных режимов работы, для минимизации потерь мощности;

- разработка адаптивной системы управления силовой установкой карьерного автосамосвала, приспособляющейся к мгновенным изменениям горнотехнических условий при движении.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Ведущие рецензируемые журналы и издания, рекомендуемые ВАК РФ

1 Фефелов Е. В. Эксплуатационные показатели энергоэффективности двигателей карьерных самосвалов / Е. В. Фефелов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 11. – С. 400 - 405.

2 Фефелов Е. В. Задача выбора параметров силовых установок карьерных самосвалов для конкретных горно-технических условий / П. И. Тарасов, Е. В. Фефелов // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 10. – С. 25-28.

3 Фефелов Е. В. Выбор расходомеров для карьерных автосамосвалов / П. И. Тарасов, Е. В. Фефелов, А. Г. Журавлев // Изв. вузов. Горный журнал. – 2007. – № 2. – С. 96 - 102.

4 Фефелов Е. В. Исследование топливной экономичности карьерных автосамосвалов / П. И. Тарасов, А. Г. Журавлев, Е. В. Фефелов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 10. – С. 277 - 286.

5 Фефелов Е.В. Выбор технических характеристик силовых установок карьерных автосамосвалов для конкретных горно-технических условий / Е.В. Фефелов // Проблемы недропользования: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – М.: Издательство «Горная книга». – 2011 г. -№ОВ11. – С. 573 – 585.

Научные сборники, журналы и материалы конференций

6 Проблемы оптимизации параметров силовых установок карьерных автосамосвалов на основе ездовых циклов / П. И. Тарасов, А. И. Басс, А. Г. Журавлев, Е. В. Фефелов // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: материалы Третьей всероссийской научно-технической конференции (г. Екатеринбург, 13 апреля 2005 г.) / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2005. – С. 8 -10.

7 Фефелов Е. В. К вопросу оптимизации параметров силовых установок карьерных автосамосвалов / В. А. Липчук, Е. В. Фефелов // Проблемы и пути устойчивого развития горнодобывающих отраслей промышленности: материалы Четвёртой Международной научно-практ. конф. / ИГД им. Д. А. Кунаева. – Хромтау, 2007. – С. 310 - 312.

8 Фефелов Е. В. Оптимизация параметров силовых установок карьерных автосамосвалов по горнотехническим факторам / Е. В. Фефелов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов V Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В. Р. Кубачека. – Екатеринбург: УГГУ, 2007. – С. 79-82

9 Фефелов Е. В. Влияние горнотехнических показателей на выбор типа и параметров силовых установок карьерных самосвалов / Е. В. Фефелов // Проблемы недропользования: материалы II всероссийской молодёжной научно-практической конференции, 12-15 февраля 2008 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С. 45 - 50.

10 Фефелов Е. В. Технические и технологические параметры эксплуатации силовых установок карьерных самосвалов БелАЗ / Е. В. Фефелов // Проблемы карьерного транспорта: материалы IX международной научно-практической конференции, 9-12 октября 2007 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С.181-184.

11 Фефелов Е. В. Комплекс экспериментальной аппаратуры для исследования карьерных автосамосвалов / П. И. Тарасов, А. Г. Журавлев, Е. В. Фефелов и др. // Проблемы карьерного транспорта: материалы X международной научно-практической конференции, 14-16 октября 2009 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 211 - 214.

12 Фефелов Е. В. Инструментарий для моделирования энергетических показателей карьерных автосамосвалов «БелАЗ» / Е. В. Фефелов, М. В. Исаков // Проблемы карьерного транспорта: материалы X международной научно-практической конференции, 14-16 октября 2009 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 221-224.

13 Фефелов Е. В. Особенности моделирования энергетических параметров поршневых ДВС, используемых на транспорте / Б. А. Шароглазов, Е. В. Фефелов // Проблемы карьерного транспорта: материалы X международной научно-практической конференции, 14-16 октября 2009 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 232 - 237.