

На правах рукописи

УДК 622.684:629.114.42



Журавлев Артем Геннадиевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ
КАРЬЕРНЫМИ АВТОСАМОСВАЛАМИ С
КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ**

*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 – 2007

Работа выполнена в Институте горного дела УрО РАН

Научный руководитель – член-корреспондент РАН,
доктор технических наук,
профессор
В.Л. Яковлев

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Ю.И. Лель

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
В.В. Шарин

Ведущее предприятие – ОАО Институт "Уралгипроруда"

Защита состоится 21 сентября 2007 г. в 13⁰⁰ 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, 58.
Тел. (343) 350-21-86 Факс (343) 350-21-11

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

Просьба направлять отзывы почтой в 2 экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному выше адресу.

Автореферат разослан 20 августа 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

 В.М. Аленичев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На горнодобывающих предприятиях с открытым способом разработки особая роль принадлежит карьерному транспорту. Он не только наиболее сложное и трудоемкое звено технологического процесса разработки месторождений полезных ископаемых, но в значительной степени определяет условия и показатели работы других звеньев и предприятия в целом. В себестоимости добычи полезного ископаемого доля затрат на транспорт достигает 50-70%.

Стесненность рабочего пространства глубоких и ограниченных в плане карьеров предопределяет необходимость применения автомобильного транспорта. Карьерный технологический автомобильный транспорт обладает рядом неоспоримых преимуществ, однако является одним из наиболее энергоемких. Удельный расход топлива на транспортирование горной массы карьерными автосамосвалами составляет 80-140 г/т·км при суммарном потреблении на отдельных предприятиях до 100 тыс.т в год.

Неуклонно усложняющиеся горно-технические условия эксплуатации автосамосвалов как на отдельных карьерах, так и в целом по отрасли требуют их совершенствования в направлении повышения топливной экономичности, снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами, повышения динамических качеств.

Интерес к созданию комбинированных энергосиловых установок (КЭУ) значительно возрос: отечественные и зарубежные ученые проводят научно-исследовательские работы, крупнейшие мировые автомобилестроительные компании выпускают серийно автомобили с такими агрегатами (в основном легковые и малотоннажные грузовые). Между тем способ рекуперации кинетической и потенциальной энергии с целью дальнейшего использования для движения наиболее благоприятен для применения именно на карьерном технологическом автотранспорте, поскольку в карьере работа транспорта имеет циклический характер со значительным периодом спуска под уклон, когда потенциальная энергия может быть запасена в аккумуляторе и использована для приво-

да систем автосамосвала. Применение комбинированной энергосиловой установки позволило бы комплексно повысить технический уровень и технологические свойства карьерных автосамосвалов по указанным выше направлениям и более эффективно вести открытые горные работы.

Таким образом, необходимость комплексного повышения технических и технологических свойств карьерных автосамосвалов за счет применения комбинированных энергосиловых установок, с одной стороны, и отсутствие научной и методической базы по этому вопросу – с другой делают обоснование параметров транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами с КЭУ, определение технологических и технических требований к ним актуальной научной задачей, имеющей важное практическое значение для проектных институтов, горных предприятий и фирм – производителей карьерных автосамосвалов.

Объект исследований – способ и процессы транспортирования горной массы на карьерах автосамосвалами с КЭУ.

Предмет изучения – взаимосвязь технологических параметров транспортирования и технических параметров карьерных автосамосвалов с КЭУ, критерии обоснования этих параметров.

Цель работы – обосновать параметры транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами с КЭУ и технические требования к ним.

Основная идея диссертационной работы заключается в установлении и использовании зависимостей энергетических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов с КЭУ от горно-технических условий для обоснования их технологических и технических параметров.

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

1. Провести оценку влияния горно-технических условий эксплуатации на энергетические параметры транспортного цикла карьерного автосамосвала.

2. Выбрать критерии и обосновать предпочтительные условия эксплуатации карьерных автосамосвалов с КЭУ. Обосновать области предпочтительного применения автосамосвалов с КЭУ на действующих карьерах.

3. Провести анализ применяемых энергосиловых установок для карьерных автосамосвалов, разработать компоновочные решения автосамосвалов с комбинированной энергосиловой установкой. Разработать технические требования на создание карьерных автосамосвалов с КЭУ.

4. Обосновать технологические параметры карьерных автосамосвалов с КЭУ. Разработать алгоритм выбора параметров и определения эксплуатационных показателей карьерных автосамосвалов с КЭУ для конкретных горно-технических условий эксплуатации.

Методы исследования: анализ, синтез, метод аналогии; обобщение и анализ научно-технической литературы; численное и имитационное моделирование на ЭВМ; математический анализ; математическая статистика; технико-экономический анализ; элементы горно-геометрического анализа.

Научные положения, защищаемые автором:

1. Зависимость минимального средневзвешенного уклона карьерных автодорог для нормальной работы автосамосвалов с КЭУ от расстояния транспортирования носит гиперболический характер; при этом минимальный средневзвешенный уклон прямо пропорционален коэффициенту сопротивления качению дорожного покрытия, доле горизонтальных участков в общем расстоянии транспортирования, обратно пропорционален расстоянию транспортирования, коэффициенту тары автосамосвалов и эффективности работы систем автосамосвала.

2. Нижняя граница области предпочтительных условий применения карьерных автосамосвалов с КЭУ по средневзвешенному уклону определяется по критерию равенства запасаемой и потребляемой энергии. Предельная граница условий применения автосамосвалов с КЭУ определяется параметрами режима подзарядки накопителя энергии от основного двигателя.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается соответствием общепринятым положениям теории и практики открытых горных работ; базированием проводимых исследований на достоверных исходных данных, а также на основополагающих законах физики при обосновании количества выделяемой и потребляемой энергии; сходимостью полученных результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. На основании критерия равенства количества запасаемой и потребляемой энергии за время вспомогательных операций транспортного цикла установлена зависимость предельного минимально необходимого средневзвешенного уклона для нормальной работы автосамосвала с КЭУ.

2. Обоснована область предпочтительных условий применения автосамосвалов с КЭУ по параметрам транспортирования горной массы.

3. Установлены аналитические зависимости эксплуатационных показателей автосамосвалов с КЭУ от горно-технических условий: производительность, среднетехническая и среднеэксплуатационная скорость, расход топлива на транспортную работу, выбросы вредных веществ с отработавшими газами.

4. Разработан алгоритм расчетов основных технических и технологических параметров автосамосвалов с КЭУ для конкретных горно-технических условий карьеров.

Научное значение работы заключается в установлении зависимостей технологических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов от горно-технических условий; обосновании целесообразности применения карьерных автосамосвалов с КЭУ; обосновании предпочтительных условий применения карьерных автосамосвалов с КЭУ по горно-техническим параметрам; разработке алгоритма выбора параметров карьерных автосамосвалов с КЭУ для условий конкретных карьеров.

Практическое значение работы состоит в следующем:

1. Определены технические требования на разработку карьерных автосамосвалов с КЭУ.

2. Предложены компоновочные решения карьерных автосамосвалов с КЭУ различной грузоподъемности.

3. Обоснована экономическая эффективность применения автосамосвалов с КЭУ.

4. Обоснованы предпочтительные условия применения карьерных автосамосвалов с КЭУ, а также области предпочтительного применения автосамосвалов с КЭУ для условий конкретных карьеров.

Внедрение автосамосвалов с КЭУ позволит:

- оптимизировать форму карьера за счет возможности применения транспортных коммуникаций с повышенными продольными уклонами;

- обеспечить более высокую производительность карьерного автотранспорта;

- уменьшить загазованность рабочей зоны карьера;

- снизить в определенных условиях расход топлива карьерным автотранспортом;

- сократить общие и приведенные затраты на транспортирование горной массы.

Личный вклад автора состоит в:

- разработке алгоритма расчета энергетических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов в зависимости от горно-технических условий по элементам транспортного цикла;

- установлении зависимостей минимально необходимой высоты подъема горной массы автосамосвалами с КЭУ и средневзвешенного уклона автодорог по критерию равенства выделяемой и потребляемой за транспортный цикл энергии, определяющих предпочтительные условия применения автосамосвалов с КЭУ;

- разработке конструктивных схем и компоновочных решений карьерных автосамосвалов с комбинированной энергосиловой установкой;

- установлении зависимостей технологических параметров карьерных автосамосвалов с КЭУ от горно-технических условий эксплуатации;

- разработке алгоритма определения технических и технологических параметров автосамосвалов с КЭУ в зависимости от горно-технических условий конкретного карьера.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее отдельные результаты обсуждены и одобрены на: международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2005 г., 2006 г., 2007 г.); международной научно-практической конференции «Карьерный транспорт» (г. Жодино, Республика Беларусь, 2005 г., 2006 г., 2007 г.); второй международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития горнодобывающих отраслей промышленности» (г. Рудный, Республика Казахстан, 2004 г.), VIII международной научно-практической конференции «Проблемы карьерного транспорта» (г. Екатеринбург, 2005 г.), всероссийской конференции «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса» (г. Екатеринбург, 2005 г., 2006 г., 2007 г.); V международной научно-технической конференции – чтении памяти В.Р. Кубачека «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2007 г.), I всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2007 г.); семинарах лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники ИГД УрО РАН, ученом совете ИГД УрО РАН; технических совещаниях у директора НТЦ – главного конструктора ПО «БелАЗ».

Реализация результатов работы. Результаты исследований послужили основой для разработки технико-экономических предложений по применению карьерных автосамосвалов с КЭУ, выполненных совместно с ОАО Институт «Уралгипроруда» для Правительства Свердловской области в плане разработки комплекса новых высокопроизводительных транспортных средств для открытых горных работ. На основании проведенных исследований подготовлены технические требования на разработку карьерного автосамосвала с КЭУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе монография (в соавторстве).

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 179 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения и 5 приложений; содержит 43 рисунка, 38 таблиц и список использованной литературы из 142 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность члену-корреспонденту РАН В.Л. Яковлеву, д.т.н. А.Л. Западинскому, к.т.н. П.И. Тарасову, к.т.н. Ю.А. Бахтурину, В.Ф. Столярову за постоянное внимание к работе, научно-методическую помощь, а также искреннюю признательность коллегам из лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники ИГД УрО РАН, директору НТЦ – главному конструктору ПО "БелАЗ" А.Н. Егорову, заместителям главного конструктора Н.Д. Волоцкому, Н.В. Бигелю, начальнику конструкторского бюро общей компоновки О.Г. Степуку за сотрудничество, поддержку и ценные критические замечания при выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Одной из основных проблем при разработке полезных ископаемых открытым способом является транспортирование горной массы. Поэтому исследованиям в области карьерного транспорта уделяется большое внимание. Основные вопросы технологии открытых горных работ с применением различных видов транспорта нашли отражение в трудах академиков Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, К.Н. Трубецкого, Н.Н. Мельникова, член-корр. АН СССР А.О. Спиваковского, член-корр. РАН В.Л. Яковлева, профессоров М.В. Васильева, В.А. Галкина, М.Г. Новожилова, В.С. Хохрякова, М.Г. Потапова, П.И. Томакова, К.Е. Виницкого, В.П. Смирнова, П.П. Бастана, А.Н. Шилина, А.А. Кулешова и др.

Вопросы повышения технического, научно-технического, эксплуатационного и технико-эксплуатационного уровней карьерного автотранспорта получили развитие в исследованиях член-корр. РАН В.Л. Яковлева, профессоров М.В. Васильева, М.Г. Потапова, В.П. Смирнова, А.А. Кулешова, В.А. Галкина, Ю.И. Леля, С.Ж. Галиева, докторов техн. наук Г.И. Солода, А.Н. Даниярова,

И.В. Зырянова, В.Л. Могилата, кандидатов техн. наук А.Г. Сисина, А.А. Котяшева, П.И. Тарасова, Э.В. Горшкова и др.

Вопросы разработки и оценки технико-технологических свойств горно-транспортного оборудования с применением комбинированных энергосиловых установок отражены в трудах член-корр. РАН Яковлева, докторов технических наук М.В. Васильева, А.Л. Западинского, кандидатов технических наук П.И. Тарасова, Г.Ю. Дзюба и др.

Анализ состояния и изученности вопроса

Неуклонно возрастает глубина карьеров – как отдельных, так и в среднем по отрасли. С увеличением глубины карьеров наблюдается повышение средневзвешенных продольных уклонов карьерных автодорог. Прежде всего это характерно для карьеров, ограниченных в плане (например, кимберлитовых карьеров), из-за необходимости повышения угла откоса бортов карьера. Повышение уклонов позволяет снизить дальность транспортирования, уменьшить необходимый парк автосамосвалов.

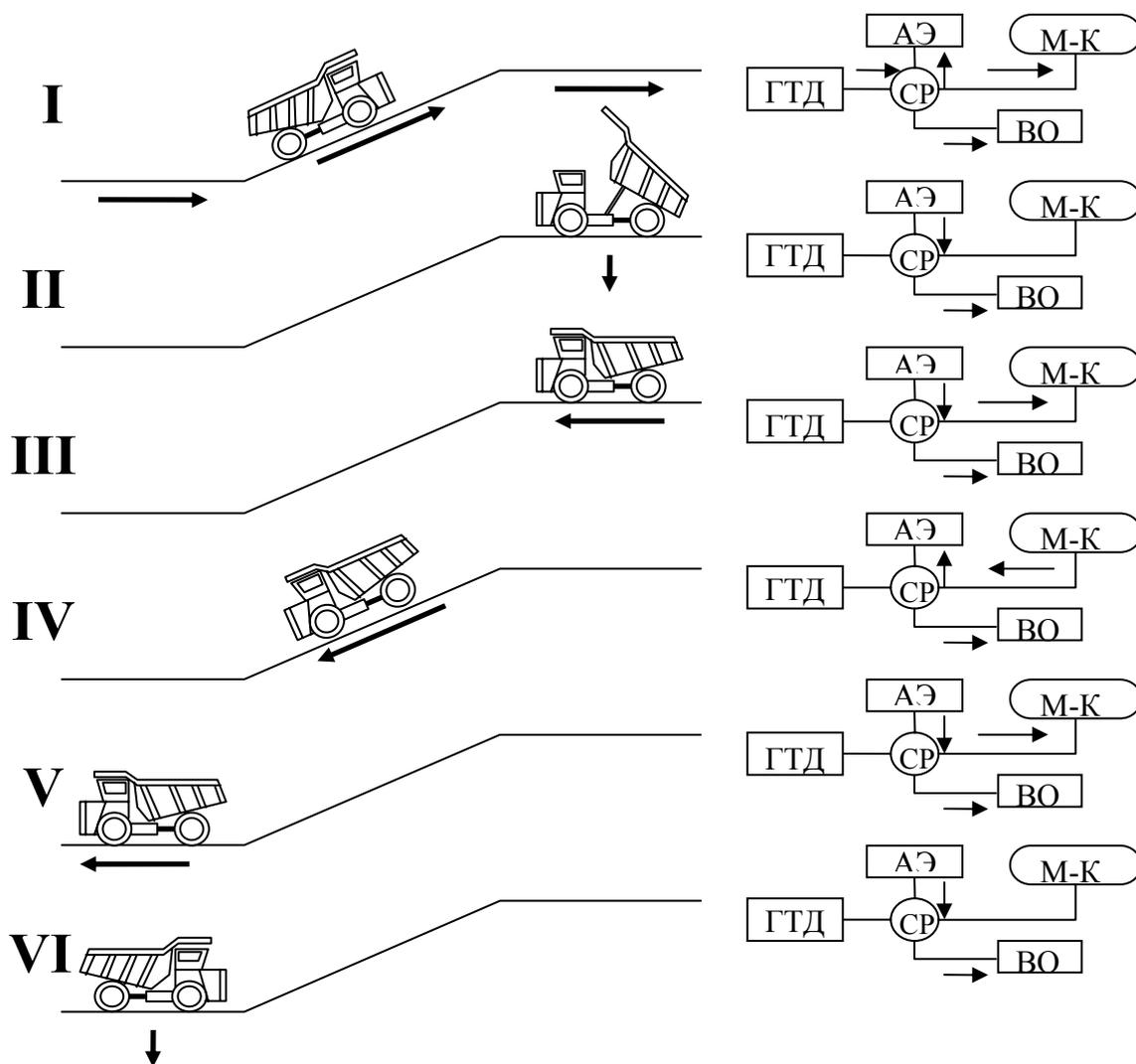
Усложнение условий эксплуатации автотранспорта на глубоких карьерах и необходимость оптимизации геометрических параметров карьеров требуют совершенствования карьерных автосамосвалов по следующим направлениям:

1. Уменьшение ширины автосамосвалов, позволяющее сократить ширину транспортных коммуникаций.
2. Повышение топливной экономичности. Основной задачей является сокращение расхода топлива на 1 т полезного ископаемого, который складывается из затрат топлива на перевозку полезного ископаемого и вскрышных пород.
3. Повышение тягово-динамических качеств автосамосвалов с целью обеспечения высокой производительности.
4. Снижение выброса вредных веществ с отработавшими газами двигателей автосамосвалов.
5. Повышение эффективности и надежности тормозных систем карьерных автосамосвалов.

Исследованиями ряда авторов установлено, что уменьшить отрицательное воздействие перечисленных выше факторов можно применением комбинированных энергосиловых установок. Их отличительной особенностью является использование для движения автосамосвала вырабатываемой при электродинамическом торможении автосамосвала энергии. Принцип работы автосамосвал с КЭУ, предложенный к.т.н. Тарасовым П.И., представлен на рисунке 1.

Достоинством КЭУ является сокращение времени работы двигателя внутреннего сгорания на частичных режимах и холостых оборотах, что позволяет эффективно применять в конструкции газотурбинный двигатель (ГТД). Система комбинированного питания с буферным источником энергии – аккумулятором энергии (АЭ) – позволяет использовать достоинства ГТД и АЭ и в значительной мере избегать тех недостатков, которые проявляются при использовании каждого из них в отдельности. Объединенные в одной схеме двигатель и аккумулятор энергии работают каждый только на определенных этапах транспортного цикла, в оптимальных для этого условиях, что позволяет двигателю работать в стационарном режиме, а необходимая емкость аккумулятора энергии в несколько раз меньше, чем требуется для электромобилей.

В литературе приводятся данные теоретических и экспериментальных исследований контактно-аккумуляторных автосамосвалов, теоретические расчеты технических параметров карьерных автосамосвалов с КЭУ. Однако исследования проводились для устаревших и не выпускаемых в настоящее время моделей автосамосвалов. Отсутствуют расчеты по режимам работы и области предпочтительного применения автосамосвалов с КЭУ. Не проведены исследования по обоснованию технико-эксплуатационных свойств карьерных автосамосвалов с КЭУ. Отсутствуют алгоритмы и методика таких расчетов. Решению этих вопросов посвящены следующие главы.

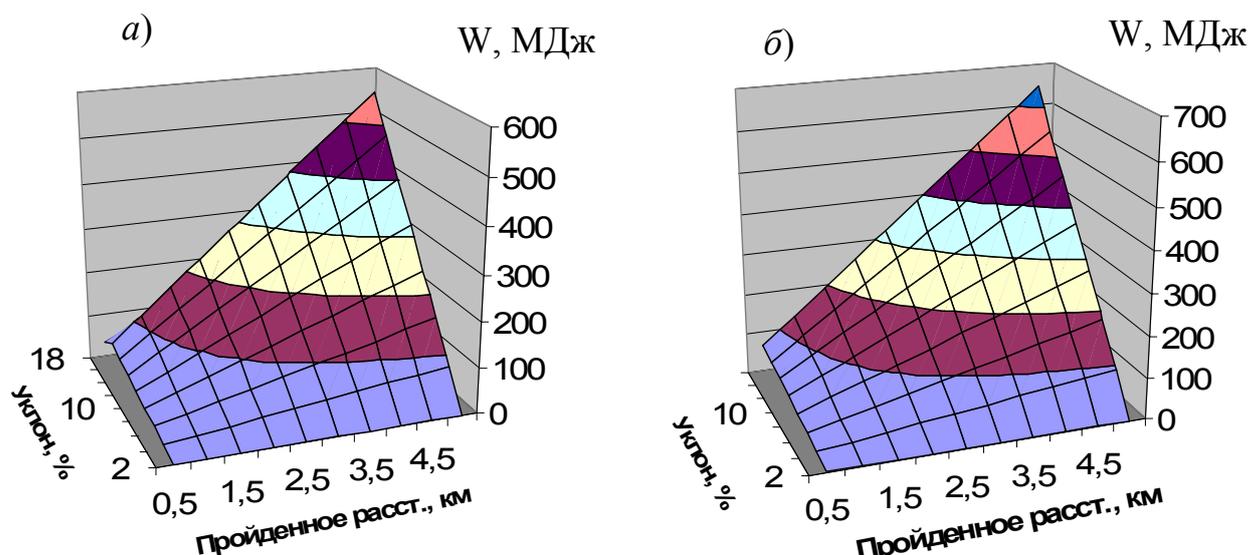


I – в грузовом направлении система регулирования (СР) обеспечивает привод мотор-колес (М-К) от газотурбинного двигателя (ГТД) при движении в грузовом направлении; *II, III* - разгрузка и движение по отвалу с приводом от аккумуляторов энергии (АЭ); *IV* - зарядка АЭ при спуске на нижние горизонты; *V* - движение по забою с приводом от АЭ; *VI* - ожидание и погрузка, вспомогательное оборудование (ВО) питается от АЭ.

Рисунок 1 – Принцип работы карьерного автосамосвала с КЭУ

Исследование энергетических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов

Установлены аналитические зависимости количества выделяемой карьерным автосамосвалом энергии на спуске в зависимости от горно-технических условий. Проведено сравнение полученных зависимостей (рис. 2, б) с данными экспериментально-аналитических исследований, приводимыми в литературе (рис. 2, а), показавшее расхождение не более 2%.



а – по данным экспериментально-аналитических исследований других ученых (БелАЗ-7519), б – по установленным зависимостям (БелАЗ-7513)

Рисунок 2 – Количество энергии, выделяемой автосамосвалами на спуске, в зависимости от горно-технических условий

Исследования энергетических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов на основании установленных зависимостей для условий различных карьеров показали, что они определяются главным образом расстоянием транспортирования, высотой подъема горной массы, средневзвешенным уклоном автодорог, долей горизонтальных участков в общем расстоянии транспортирования.

Анализ энергозатрат по операциям транспортного цикла показал, что в зависимости от конкретных условий карьеров суммарный энергетический баланс за время движения порожняком может быть: гарантированно положительным; незначительно отрицательным; отрицательным со значительной нехваткой энергии, выделяемой при спуске автосамосвала в карьер. Следовательно, можно выделить 3 основных режима работы автосамосвала с КЭУ (табл. 1).

Установлены зависимости, определяющие границу по горно-техническим условиям между режимами с полной и частичной компенсацией.

$$H_n \geq \left[\frac{1000 \omega_o (k_{гор})}{\eta_{АЭ} \eta_P^2 \eta_{ТД} \cdot \Gamma \eta_{ТД} \eta_{СР} (1 - k_{воз})} + \frac{367 N_{в.о.}^{yd}}{k_T \eta_{АЭ} \eta_{ТД} \cdot \Gamma \eta_P \eta_{СР} (1 - k_{воз}) v_{ср.сн}} + 1000 \omega_o (1 - k_{гор}) \right] L + \frac{6,1 (N_{в.о.}^{yd} t_{ногр} + N_{в.о.}^{yd} t_{нукс})}{k_T \eta_{АЭ} \eta_P \eta_{ТД} \cdot \Gamma \eta_{СР} (1 - k_{воз})}, \text{ М;} \quad (1)$$

$$H / L = i_{cp.6} \geq \left[\frac{100 \omega_o (k_{zop})}{\eta_{AЭ} \eta_{CP} (1 - k_{603})} + \frac{36,7 N_{6.0.}^{y0}}{k_T \eta_{AЭ} \eta_{TD} \eta_P (1 - k_{603}) v_{cp.cn}} + 100 \omega_o (1 - k_{zop}) \right] + \frac{0,61 (N_{6.0.погр}^{y0} t_{погр} + N_{6.0.пуск}^{y0} t_{пуск})}{k_T \eta_{AЭ} \eta_P \eta_{TD} \eta_{CP} (1 - k_{603}) L}, \quad \%, \quad (2)$$

где ω_o – основное сопротивление качению колес автосамосвала;

k_{zop} - доля горизонтальных участков в общем расстоянии транспортирования;

k_T - коэффициент тары автосамосвала;

$\eta_{AЭ}, \eta_{CP}, \eta_{TD}, \eta_{TDГ}, \eta_P$ – коэффициенты полезного действия, соответственно, аккумулятора энергии, системы регулирования, тяговых электродвигателей в тяговом и генераторном режимах, колесных редукторов;

k_{603} – доля выделяемой энергии, расходуемая на возбуждение электромашин;

L – дальность транспортирования, км;

$t_{погр}, t_{пуск}$ – продолжительность, соответственно, погрузки и запуска двигателя, мин;

$N_{6.0.}, N_{6.0.погр}^{y0}, N_{6.0.пуск}^{y0}$ - мощность вспомогательного оборудования, отнесенная к грузоподъемности автосамосвала, соответственно, при движении автосамосвала, при ожидании погрузки и простое под погрузкой, при запуске двигателя внутреннего сгорания, кВт/т.

Таблица 1 – Основные возможные режимы работы КЭУ

Наименование	Режим работы аккумулятора энергии	Режим работы двигателя внутреннего сгорания	Критерий идентификации режима
С полной компенсацией	Полностью заряжается на спуске за счет энергии электродинамического торможения	Работает только в грузовом направлении. Нагрузкой является только трансмиссия и вспомогательное оборудование автосамосвала	$W_{рек} \geq W_{треб}$
С частичной компенсацией	Не полностью заряжается на спуске. Дополнительная подзарядка производится от ГТД при движении автосамосвала в грузовом направлении	Работает только в грузовом направлении. Нагрузкой являются, электротрансмиссия, вспомогательное оборудование и тяговый аккумулятор энергии	$W_{рек} + W_{зарДВС} \geq W_{треб}$
Безкомпенсационный	Частично незначительно подзаряжается при торможении и на спуске	Работает на протяжении всего транспортного цикла	$W_{треб} \geq W_{рек} + W_{зарДВС}$

Зависимости носят универсальный характер для автосамосвалов различной грузоподъемности, поскольку выражены удельными показателями. Таким образом, можно сделать вывод, что режимы работы КЭУ не зависят от типа-размера автосамосвала и определяются, в основном, уровнем совершенства технических средств и горно-техническими условиями эксплуатации главным образом расстоянием транспортирования, высотой подъема и сопротивлением качению дорожного покрытия.

Вид зависимости (2) приведен на рисунке 3. Область варьирования кривой ограничивается с нижней стороны минимально возможной долей горизонтальных участков, с верхней – предельно возможными уклонами в соответствии с действующими СНиП и предельно возможными расстояниями откатки по горизонтали, определяемыми конструктивной максимально возможной энергоемкостью аккумулятора энергии.

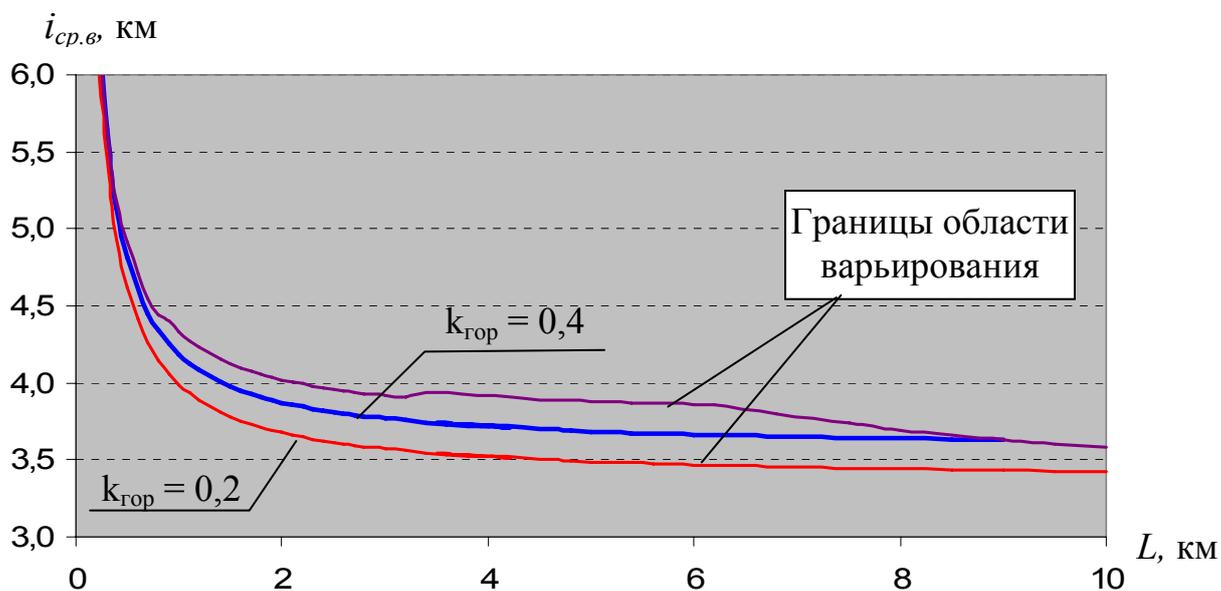


Рисунок 3 – Минимально необходимый уклон по критерию равенства запасаемой и потребляемой энергии автосамосвалом с КЭУ

Граница перехода между режимами работы автосамосвала с КЭУ от частичной компенсации к безкомпенсационному движению определена по указанным выше принципам и также описана аналитическими выражениями. График этих зависимостей аналогичен графику рисунка 3, но смещен вниз на величину, соответствующую энергии подзаряда АЭ от двигателя при движении в грузо-

вом направлении. Предельная граница отличается от гиперболической кривой ввиду ограничений по предельным уклонам и запасу хода автосамосвала при питании трансмиссии от АЭ.

Предпочтительные условия применения автосамосвалов с КЭУ (рисунок 4) определяются на основании установленных зависимостей. Верхняя граница области предпочтительных условий ограничена существующими требованиями СНиП и Единых правил безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Выше этой границы приведены перспективные условия эксплуатации, которые может обеспечить применение автосамосвалов с КЭУ. Слева область ограничена минимально возможными в реальных условиях карьеров расстояниями транспортирования с учетом особенностей технологии применения автосамосвалов с КЭУ.

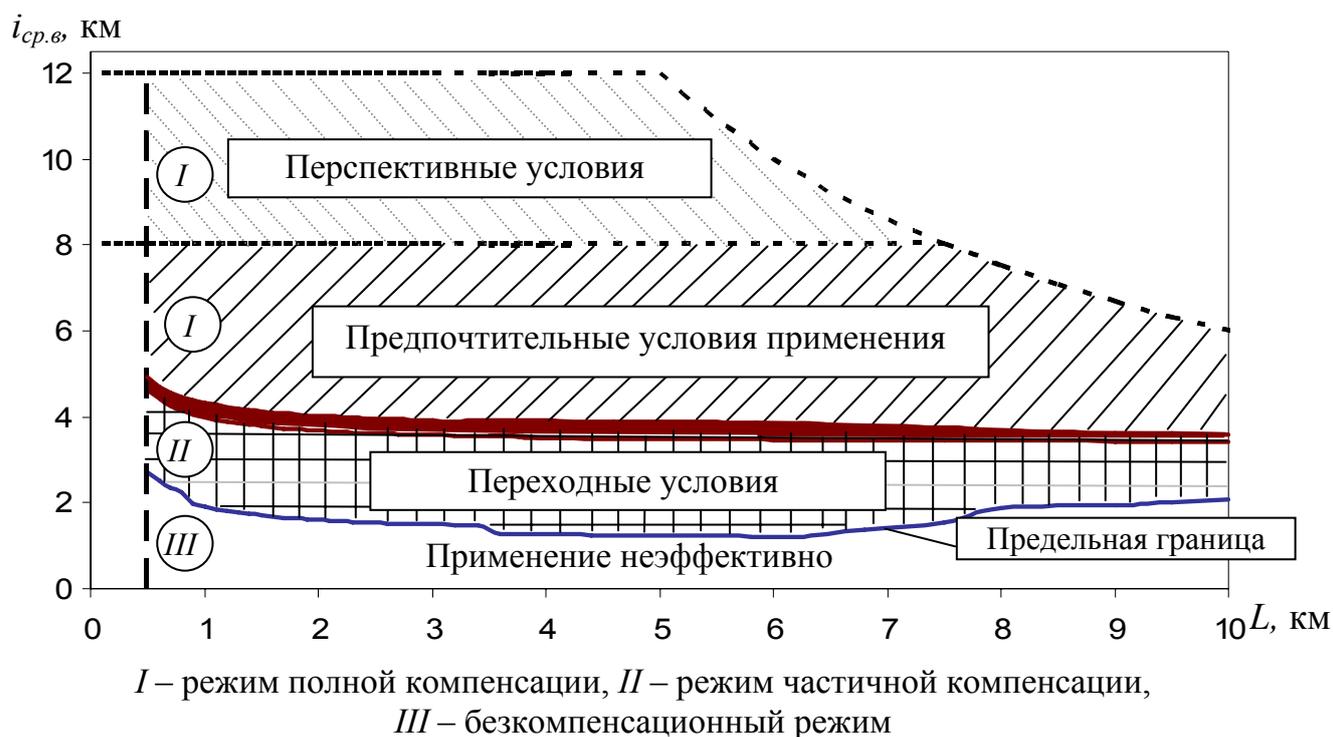


Рисунок 4 – Режимы работы и предпочтительные условия применения автосамосвалов с КЭУ в зависимости от горно-технических условий

Обоснование технических параметров автосамосвалов с КЭУ

В третьей главе дано обоснование технических характеристик автосамосвалов с КЭУ на основании результатов исследования энергетических показате-

телей транспортного цикла карьерных автосамосвалов с учетом существующих и перспективных узлов и агрегатов.

Анализ конструкций и параметров газотурбинных двигателей показал, что ряд существующих серийных моделей пригоден для использования в КЭУ карьерных автосамосвалов. Высокие показатели топливной экономичности имеют осваиваемые в настоящее время российскими производителями ГТД с рекуператорами тепла отработавших газов. Как показал анализ возможности применения на автосамосвалах с КЭУ накопителей различного типа, наиболее технически целесообразно использование трех видов накопителей: инерционных аккумуляторов, суперконденсаторов и электролитических аккумуляторных батарей. Каждый из них обладает характерными особенностями, обуславливающими преимущества и недостатки их использования в силовой установке по конструктивным и технологическим соображениям. В ближайшее время возможно применение суперконденсаторных накопителей энергии асимметричного типа, а также электролитических аккумуляторов.

Проведенные исследования позволили разработать технические требования на карьерные автосамосвалы с КЭУ, часть которых отражена в таблице 2.

На основании проведенных расчетов энергетических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов и разработанных технических требований на них предложен ряд компоновочных решений автосамосвалов с КЭУ различной грузоподъемности.

Возможно создание автосамосвала с КЭУ с использованием ГТД либо дизельного двигателя. В первом варианте за счет меньшей массы ГТД по сравнению с дизелем масса, а значит и энергоемкость АЭ может быть значительной. Во втором варианте с целью сохранения грузоподъемности и динамических качеств необходимо стремиться к минимизации массы накопителя энергии, а следовательно, к минимальным расстояниям откатки по горизонтали на участках погрузки-разгрузки. Такие конструктивные варианты целесообразно создавать для скорейшего создания и совершенствования экспериментальных образцов

автосамосвалов с КЭУ, а также для применения в качестве сборочного транспорта на карьерах с многотранспортной системой.

Таблица 2 - Технические требования к перспективному ряду карьерных автосамосвалов с КЭУ

Параметр	Модель-аналог автосамосвалов БелАЗ			
	7549	7514	7513	7530
Грузоподъемность, т	90	120	136	220
Масса снаряженного автосамосвала, т	65	86	102	146
Преодолеваемый средневзвешенный уклон (расчетный / максимальный, %)	12 / 18	12 / 18	12 / 18	12 / 18
Средняя скорость в грузовом направлении при подъеме по расчетному уклону, км/ч	18-20	18-20	18-20	18-20
Мощность ДВС, кВт / л.с.	1550/2110	2000/2700	2300/3130	3600/4900
Длительная мощность тягового аккумулятора энергии (АЭ), кВт (Движение до 1 км со скоростью 35 км/ч)	290	380	450	640
Время работы АЭ на длит. мощности, с	До 200	До 200	До 200	До 200
Максимальная расчетная кратковременная мощность, кВт (разгон)	400	540	600	1000
Время работы на максим. мощности, с	До 5	До 6	До 6	До 7
Основной режим работы, кВт (движение на промежуточных горизонтальных участках)	150	200	220	320
Время непрерывной работы на основном режиме, с	30	30	30	30
Мощность, потребляемая при простое, кВт	8	10	10	12
Время непрерывного простоя, мин.	До 5 и более	До 5 и более	До 5 мин и более	До 5 и более
Напряжение, В	До 750	До 1200	До 1200	До 1200
Ток, А	До 310	До 460	До 500	До 850
Масса аккумулятора, т				
- при применении дизельного двигателя	До 0,6	До 0,9	До 1	До 1,5
- при применении ГТД	До 4,1	До 5,9	До 6	До 9,8
- при применении ГТД с рекуператором	До 2,7	До 4,6	До 4	До 7,5

Особое место занимает вопрос обеспечения безопасности при использовании автосамосвалов на повышенных уклонах (до 16% на отдельных участках при средневзвешенном уклоне 12%). Анализ тормозных систем карьерных автосамосвалов показал, что рабочая тормозная система, конструктивно выполненная в виде дисковых тормозов, способна при незначительной доработке обеспечить необходимую эффективность. Вспомогательная тормозная система, представляющая собой систему электродинамического торможения, должна быть усовершенствована в направлении повышения тормозных усилий при вы-

соком коэффициенте полезного действия в широком диапазоне скоростей. Для обеспечения аварийного торможения автосамосвала на высоких уклонах в случае выхода из строя рабочей и вспомогательной тормозных систем целесообразно разработать аварийную тормозную систему, представляющую собой специальные подвижные «башмаки», перемещаемые при торможении в зону контакта колесо – дорога, и обеспечивающие более эффективное трение пары профилированный металл – дорога. На предложенную конструкцию получен патент РФ на изобретение № 2286895 от 10.11.2005.

Обоснование технологических параметров транспортирования горной массы автосамосвалами с КЭУ

В этой главе представлены результаты исследования технологических параметров карьерных автосамосвалов с КЭУ (среднетехнической и среднеэксплуатационной скорости, производительности, топливной экономичности, объема выброса вредных веществ с отработавшими газами двигателя) и дано технико-экономическое обоснование их применения на карьерах Уральского региона.

Среднетехническая скорость за транспортный цикл

$$v_{cp.m} = \frac{2(N_{ДВС} - N_{в.о})\eta_{mp}}{k_{zop} \left[\frac{3,6}{v_{zop} N_{ДВС} \eta_{mp} - (G_a + q)\omega_o g} \right] + (G_a + q)\omega_o g + \frac{3,6}{v_{cn}} N_{ДВС} \eta_{mp} + i_{cp.в} g (1 - k_{zop})(G_a + q)}, \text{ км/ч, (3)}$$

где $N_{ДВС}$, $N_{ВО}$ – соответственно номинальная мощность двигателя внутреннего сгорания и мощность потребляемая вспомогательным оборудованием, кВт;

v_{zop} , v_{cn} – скорость автосамосвала соответственно в грузовом направлении на горизонтальных участках и средняя скорость автосамосвала в порожняковом направлении, км/ч;

η_{mp} – коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала;

G_a – масса снаряженного автосамосвала, т;

q – грузоподъемность автосамосвала, т;

g – ускорение свободного падения, м/с².

С целью определения топливной экономичности для каждого режима работы автосамосвала с КЭУ установлены зависимости расхода топлива от горно-технических условий в л/100 км, г/т-км и г/т. Значения удельного расхода топлива на транспортную работу варианта автосамосвала с КЭУ с газотурбинным двигателем приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Удельный расход топлива на транспортную работу автосамосвалом с КЭУ грузоподъемностью 139 т

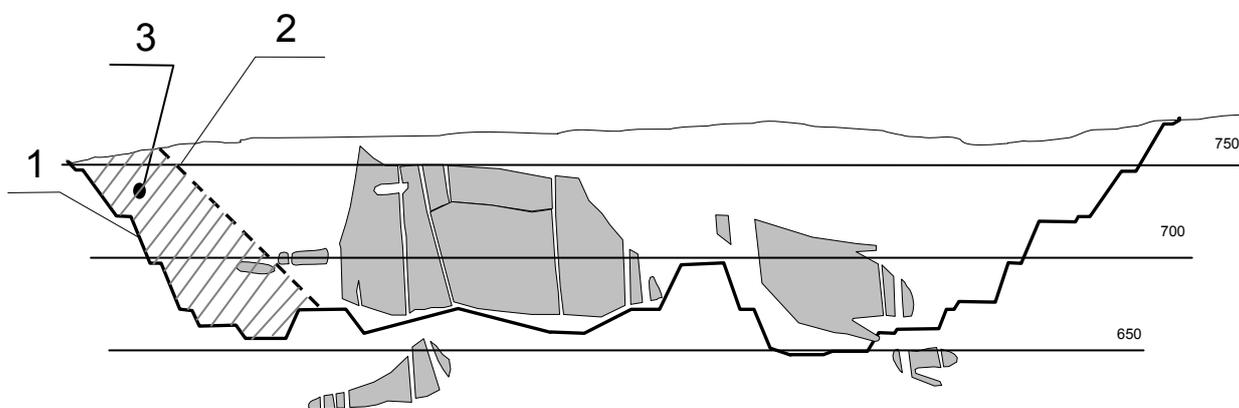
Высота подъема, м	Плечо откатки L, м					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
10	38,3	30,8	27,1	25,8	25,2	24,8
20	44,0	35,4	29,4	27,4	26,4	25,8
40	72,4	41,1	34,0	30,5	28,7	27,6
60	100,9	55,4	35,3	33,5	31,0	29,5
80	129,3	69,6	39,7	33,3	33,3	31,3
100		83,8	46,8	36,4	32,3	29,9
120		98,0	53,9	39,2	34,7	31,8
140		112,2	61,1	44,0	37,0	33,6
160		126,5	68,2	48,7	39,0	35,5
180			75,3	53,5	42,6	37,3
200			82,4	58,2	46,1	38,9
300			117,9	81,9	63,9	53,1
400				105,6	81,7	67,3
500					99,4	81,5
600					117,2	95,8

30,8	- режим полной компенсации
30,8	- режим частичной компенсации
30,8	- безкомпенсационный режим

По разработанному алгоритму (на основе существующих методик) проведено сравнение выбросов вредных веществ с отработавшими газами и сокращение землеотвода при применении автосамосвалов с КЭУ на модельном карьере. Результаты исследований показали, что применение автосамосвалов с КЭУ с ГТД обеспечивает сокращение суммарных выбросов вредных веществ на 75-78% по сравнению с дизельными автосамосвалами.

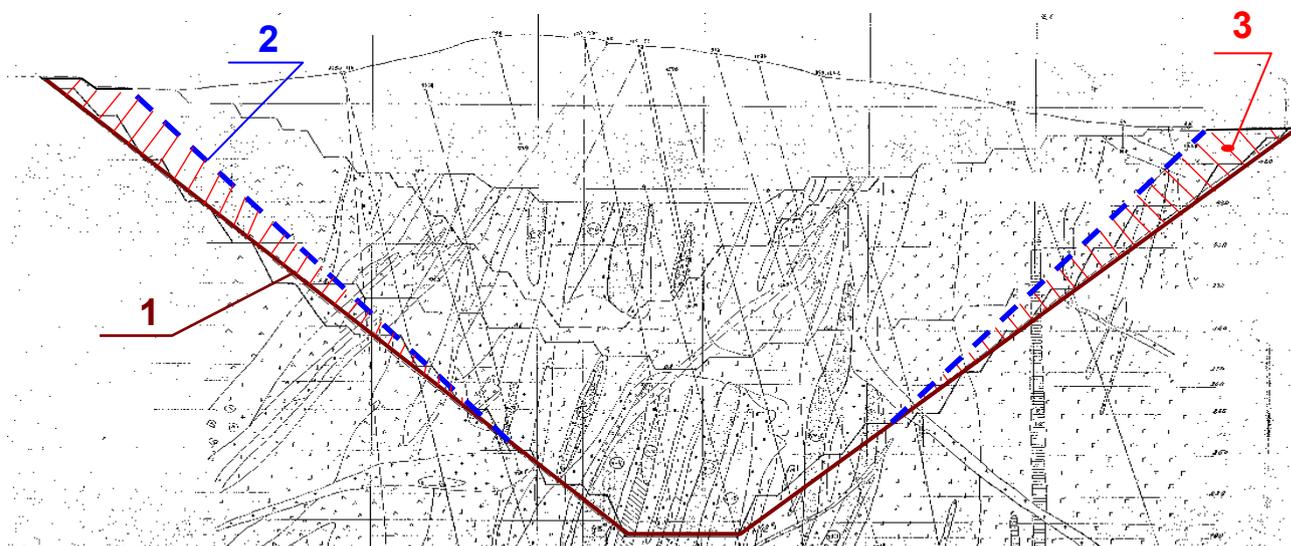
Разработан алгоритм определения технических и технологических параметров карьерных автосамосвалов с КЭУ в зависимости от конкретных горно-технических условий. С использованием данного алгоритма проведено технико-экономическое обоснование применения автосамосвалов с КЭУ для условий

карьеров Шемурский (рисунок 5) и Малый Куйбас (рисунок 6). Достигнуто сокращение объемов вскрыши по карьеру Шемурский на 2,8 млн. м³, по карьеру Малый Куйбас на 8 млн. м³ и снижение затрат на транспортирование горной массы на 25-30%.



1 – контур карьера при применении дизельных автосамосвалов; 2 – контур карьера при применении автосамосвалов с КЭУ; 3 – сокращаемый объем вскрыши (2,8 млн. м³)

Рисунок 5 – Профиль Шемурского карьера на конец отработки с применением автосамосвалов с КЭУ и дизельных автосамосвалов



1 – контур карьера при применении дизельных автосамосвалов; 2 – контур карьера при применении автосамосвалов с КЭУ; 3 – сокращаемый объем вскрыши (8 млн. м³)

Рисунок 6 – Профиль карьера Малый Куйбас на конец отработки с применением автосамосвалов с КЭУ и дизельных автосамосвалов

Расчеты показали, что для данных карьеров установленные технологические ограничения сферы применения автосамосвалов с КЭУ подтверждаются экономическими показателями. Исследование возможности применения авто-

самосвалов с КЭУ на различных карьерах (кимберлитовых, рудных, всего более 10) позволили определить области применения автосамосвалов с КЭУ на действующих карьерах (таблица 4).

Таблица 4 – Области применения автосамосвалов с КЭУ на действующих карьерах

Группа	Карьеры	Предпочтительные условия применения	Конструктивные особенности автосамосвала с КЭУ
Карьеры большой глубины с автомобильной монотранспортной системой	Трубки Удачная, Комсомольская, Юбилейная. Сорский, Коршуновский	Высота подъема горной массы не менее 130-150 м. Плечо откатки за пределами карьера не более 3 км	Двигатель – ГТД. АЭ – суперконденсаторы с возможностью наращивания энергоемкости либо ИА
Карьеры со сборочным автотранспортом в комбинированной транспортной системе	Ковдорский, Костомукшский, Соколовский, Сарбайский, Качарский	Перегрузка внутри карьера. Высота подъема не менее 50 м. Суммарная длина участков погрузки-разгрузки до 600 м	Дизельный двигатель. АЭ – электролитические аккумуляторы либо суперконденсаторы
Карьеры цветной металлургии	Малый Куйбас, Шемурский	Средневзвешенный уклон не менее 5-6%	ГТД либо дизель. АЭ – суперконденсаторы с возможностью наращивания энергоемкости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена актуальная задача по научному обоснованию параметров транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами с комбинированной энергосиловой установкой (КЭУ).

Основные результаты диссертационной работы:

1. Установлены зависимости энергетических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов от горно-технических условий по элементам транспортного цикла. Погрешность расчетов по сравнению с экспериментальными данными не превышает 3-5%.

2. Проведены исследования энергетических параметров транспортного цикла карьерных автосамосвалов для условий различных карьеров с магистральным и сборочным автомобильным транспортом. Установлено, что определенная совокупность горно-технических условий позволяет реализовать пита-

ние систем карьерных автосамосвалов и тягового электропривода во время вспомогательных операций транспортного цикла без использования двигателя внутреннего сгорания за счет аккумулирования энергии электродинамического торможения автосамосвала на спуске.

3. Установлены аналитические зависимости, описывающие нижнюю границу области предпочтительных условий применения автосамосвалов с КЭУ по критерию равенства аккумулируемой и потребляемой за время вспомогательных операций транспортного цикла энергии. В координатах $H - L$ зависимость носит характер прямой пропорциональности, в координатах $i - L$ зависимость носит гиперболический характер. Погрешность расчетов по данным зависимостям не превышает 3-5%.

4. Обоснованы предпочтительные условия применения автосамосвалов с КЭУ на основании критерия равенства аккумулируемой и потребляемой за время вспомогательных операций транспортного цикла энергии. Предельная граница условий применения автосамосвалов с КЭУ определяется параметрами режима подзарядки накопителя энергии от основного двигателя.

5. Обоснованы условия применения карьерных автосамосвалов с КЭУ на действующих карьерах: в качестве магистрального транспорта при монотранспортной системе высота подъема не менее 100 м и средневзвешенный уклон автодорог не менее 4-5%; в качестве сборочного звена при комбинированных технологических схемах транспорта высота подъема не менее 40-50 м при средневзвешенном уклоне автодорог не менее 4-5% и суммарной протяженности горизонтальных участков погрузки и разгрузки не более 600 м.

6. На основании технологических требований разработаны конструктивные схемы карьерных автосамосвалов с КЭУ. Целесообразно их создание на базе существующих карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией. В качестве накопителя энергии пригодны электролитические аккумуляторы, суперконденсаторные накопители (конденсаторы двойного слоя), инерционные аккумуляторы. Обоснованы технические требования на карьерные автосамосвалы с КЭУ.

7. Разработан алгоритм выбора параметров и определения эксплуатационных показателей карьерных автосамосвалов с КЭУ для конкретных горно-технических условий эксплуатации. Он является основой для технико-экономических расчетов по применению автосамосвалов с КЭУ на конкретных карьерах, а также базой для разработки норм расчета производительности.

8. На основании исследований выполнены технико-экономические предложения по применению автосамосвалов с КЭУ для карьеров Шемурский и Малый Куйбас, показавшие сокращение затрат на транспортирование горной массы на 15-25% по сравнению с транспортированием применяемыми дизельными автосамосвалами.

9. Намечены следующие направления дальнейших исследований по повышению эксплуатационно-технологических параметров карьерных автосамосвалов с КЭУ как путем изменения их конструкции, так и за счет совершенствования технологии и организации горного производства:

- совершенствование алгоритмов расчета технологических параметров автосамосвалов с КЭУ в зависимости от горно-технических условий, создание методики;

- обоснование технологических параметров карьерных автосамосвалов для применения их в условиях нагорных карьеров;

- рассмотрение варианта использования запасаемой в аккумуляторе энергии при движении автосамосвала с грузом на подъем;

- оптимизация параметров системы двигатель внутреннего сгорания – аккумулятор энергии;

- разработка и совершенствование конструкций накопителей энергии, газотурбинных двигателей, а также автосамосвала в целом для устойчивой работы на дорогах с высоким продольным уклоном (12-16%).

Результаты исследований послужили основой для выполнения технико-экономических предложений для Правительства Свердловской области «Разработка комплекса новых высокопроизводительных транспортных средств для открытых горных работ».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Ведущие рецензируемые научные журналы и издания, рекомендуемые ВАК РФ

1. Тарасов П.И., Журавлев А.Г. Оптимизация карьерного автотранспорта с учетом топливной экономичности силовых установок // Горные машины и автоматика. – 2004. – №7. – С. 28-36.

2. Тарасов П.И., Журавлев А.Г. Методика определения топливной экономичности карьерных автосамосвалов // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. – №3. – С. 6-11.

3. Яковлев В.Л., Тарасов П.И., Журавлев А.Г. Теория и практика использования топливно-энергетических ресурсов на открытых горных работах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №1. – С. 231-237.

4. Журавлев А.Г., Фурин В.О., Ворошилов А.Г., Тарасов А.П., Бабаскин С.Л. Новые транспортные средства и комплексы для глубоких карьеров // Горный журнал. – 2006. – №8. – С. 35-39.

5. Тарасов П.И., Фефелов Е.В., Журавлев А.Г. Исследование топливной экономичности карьерных автосамосвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №10. – С. 277-284.

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

Научные сборники, журналы и материалы конференций:

7. Яковлев В.Л., Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Тарасов А.П. Пути снижения расхода дизельного топлива автотранспортом в условиях карьеров Якутии // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Материалы Международной научно-практической конференции (г. Якутск, 14-17 июня 2005 г.). – Якутск, 2005. – С. 153-162.

8. Тарасов П.И., Журавлев А.Г. О создании комбинированных энергосиловых установок для карьерных автосамосвалов // Проблемы карьерного транспорта. Материалы VIII Международной научно-практической конференции, 20-23 сентября 2005 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – С. 183-186.

9. Журавлев А.Г., Фефелов Е.В. Комбинированные энергосиловые установки для карьерных автосамосвалов // Уральский горнопромышленный форум: Горное дело. Оборудование. Технологии: Сборник докладов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С.146-148.

10. Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Исаков М.В. Перспективы применения топливных элементов на карьерном автотранспорте // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов V международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2007 г. – С. 69-73.

11. Журавлев А.Г. Технические и технологические аспекты применения карьерных автосамосвалов с комбинированной энергосиловой установкой // Проблемы недропользования. Материалы I молодежной научно-практической конференции (14 февраля 2007 г., г. Екатеринбург). – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – С. 135-148.

12. Журавлев А.Г. Вопросы компоновочных схем карьерных автосамосвалов с КЭУ // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – С. 56-59.

Монография:

13. Стариков В.С., Тарасов П.И., Яковлев В.Л., Журавлев А.Г. Диагностика электромеханической трансмиссии карьерных дизель-электрических автосамосвалов. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2006. – 130 с.

Патент:

Пат. 2286895 Российская Федерация, МПК⁷ В 60 Т 1/14. Устройство для аварийной остановки грузовых автомобилей / Яковлев В.Л., Егоров А.Н., Тарасов П.И., Шахматов Д.С., Журавлев А.Г., Тарасов А.П.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук. – 2005105729/11; заявл. 01.03.2005; опубл. 10.11.2006, Бюл. №31. – 5 с.: ил

Тираж 100 экз. Заказ № _____
Типография