

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D070700- «Горное дело»

**Утегенова Әсем Ержанқызы**

### **ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ КАРЬЕРА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ**

#### **Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технической проблемы**

Горнодобывающее производство как одно из наиболее энергоемких отраслей промышленности занимает существенную часть энергетического баланса Казахстана.

Энергоемкость открытого способа добычи полезных ископаемых в значительной степени (50-90%) определяется энергозатратами на транспортирование горной массы, имеющими тенденцию к увеличению с ростом глубины разработки.

Современный период развития открытого способа разработки месторождений твердых полезных ископаемых характеризуется растущей значимостью энергозатрат на внутрикарьерный транспорт горной массы, которые в структуре себестоимости добычи горной массы составляют примерно половину всех эксплуатационных расходов.

Увеличение энергоемкости при одновременном интенсивном росте цен на энергоресурсы становится одним из основных факторов, лимитирующих развитие горного производства, и делает необходимым внедрение высокоэффективных энергосберегающих технологий учета и снижения расхода дизельного топлива и электроэнергии технологическим карьерным транспортом.

Исследования в области карьерного транспорта проведенные учеными стран СНГ и опыт многолетней эксплуатации показали, что наиболее эффективной для карьерных условий является электрическая тяга, обладающая рядом тягово- эксплуатационных преимуществ перед другими видами тяги.

Энергетические преимущества железнодорожного транспорта перед автомобильным объясняются меньшими значениями коэффициента сопротивления движению груженого поезда (в 8-10 раз) и коэффициента тары. Коэффициент тары современных думпкаров составляет 0,41 - 0,50 а отечественных автосамосвалов 0,70-0,84. Однако реализация этих преимуществ при работе на подъем горной массы ограничивается сравнительно небольшим уклоном железнодорожных трасс (40-60‰) и значительным коэффициентом их развития до (1,5-1,8). Поэтому целью

диссертационной работы является установление закономерностей влияния величины руководящего уклона съездов на уровень энергозатрат при подъеме горной массы из глубоких карьеров.

Энергетическая эффективность и сведенные к минимуму эксплуатационные затраты являются основными факторами при выборе наиболее подходящих технологий горнодобывающих работ. Глобальное применение полустационарных (передвижных) и мобильных (самодвижущихся) дробильных установок приводит к значительному сокращению количества используемого крупнотоннажного грузового транспорта. Помимо снижения себестоимости горное оборудование непрерывного действия обладает огромным потенциалом для снижения  $\text{CO}_2$ , выделяемого при разработке горных месторождений, обеспечивая, таким образом, более благоприятные условия для окружающей среды.

#### **Основание и исходные данные для разработки темы.**

Основанием для разработки темы диссертационной работы является снижение потребления различных видов энергии при перемещении горной массы в глубоких карьерах железнодорожным, автомобильным, конвейерным и контейнерным видами транспорта на карьерах Актогай и Бозымчак.

В качестве исходных данных для разработки темы исследований принято установление удельного значения энергопотребления различными видами карьерного транспорта, являющегося количественной мерой характеризующей свойства объекта разработки и параметров сопряженных технологических процессов.

Современные открытые горные работы и комплексы по переработке руд характеризуются большими масштабами и мощностью используемого оборудования. В условиях растущего дефицита энергетических, материальных, трудовых и других видов ресурсов, важным остается фактор времени на выполнение технологических процессов.

Установлено, что критерии энергетической эффективности – удельная энергоемкость и удельное действие – могут быть использованы в качестве критериев оптимизации транспортных процессов открытых горных работ.

Главными показателями любого производственного процесса, которыми следует управлять и которые необходимо контролировать, являются количество производственного кондиционного продукта и количество израсходованной энергии за время производства технологического процесса. В связи с этим можно сделать вывод об универсальности этих показателей, что в принципе не противоречит ни физическому, ни философскому пониманию энергии как формы движения и работы, как меры механического взаимодействия физических тел.

При энергетической оценке транспортных систем глубоких карьеров возникают два ключевых вопроса, требующих решения.

**Первый** связан с приведением тепловой энергии дизельного топлива, потребляемой автотранспортом, и электрической энергии, расходуемой конвейерным и железнодорожным транспортом, в сопоставимый вид.

*При другом подходе*, получившем достаточно широкое распространение в практике, расход электроэнергии приводится к расходу дизтоплива путем умножения на коэффициент, характеризующий удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии на дизельных электростанциях (230-250 кг/кВт·ч). Здесь мы явно завышаем энергоемкость электрифицированных видов транспорта, поскольку основной объем электроэнергии горнодобывающие предприятия получают с электростанций, работающих на природном газе, угле и мазуте. Разница в оценках удельной энергоемкости отдельных видов транспорта глубоких карьеров при использовании указанных методик составляет 3,0-3,5 раза.

По нашему мнению, наиболее объективно сопоставление путем приведения расхода электроэнергии и дизельного топлива к расходу первичных энергоресурсов, т.е. к “условному топливу” (у.т.), с учетом соответствующих затрат энергии на их добычу, переработку и транспортирование. Аналогичный подход получил распространение и за рубежом.

**Второй** вопрос связан с выбором и обоснованием критерия оценки энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров и отдельных видов транспорта. Критерий оценки энергетической эффективности транспортных систем является тем основным фактором, который должен определить достоверность результатов работы транспорта глубоких карьеров и эффективность принимаемого решения.

#### **Обоснование необходимости проведения данной научно-исследовательской работы.**

Тенденция постоянного увеличения грузоподъемности автотранспорта приводит к расширению области его эффективного применения. Вместе с тем, рост глубины карьеров усложняет условия эксплуатации автотранспорта и предъявляет повышенные требования к его надежности, определяемой, в частности, энергетической эффективностью производства.

Необходимость проведения настоящей научно-исследовательской работы продиктована востребованностью повышения энергетической эффективности работы карьерного транспорта, путем критериальной оценки энергетической эффективности различных видов и типов транспортного оборудования карьеров и установления закономерностей изменения удельного расхода дизельного топлива и электрической энергии карьерным транспортом при эксплуатации на глубоких карьерах, определение путей снижения энергозатрат при транспортировании горной массы.

В связи с изложенным, исследования, направленные на повышение энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров и их обоснование по энергетическим критериям являются необходимыми для проведения научно-исследовательской работы.

**Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них** определяются полнотой проведенного обзора патентного поиска по проблеме методик установления энергетической эффективности различных видов карьерного транспорта, направленных на повышение производительности транспортных систем карьера, снижение расхода дизельного топлива и электроэнергии. Выявлено, что в существующих методиках нет должного отражения вопросов энергетической эффективности карьерного транспорта и отсутствуют методы, методики и рекомендации, направленные на упорядочение организации, учета и контроля расхода энергоресурсов.

В ранее выполненных патентах и работах при выборе параметров карьерного технологического транспорта не учитываются энергетические затраты при транспортировании горной массы, недостаточно обоснована критериальная база оценки энергетической эффективности различных видов и типов транспортного оборудования, не уделено должного внимания закономерностям изменения удельного расхода дизельного топлива и электрической энергии карьерным транспортом при эксплуатации на глубоких карьерах, не разработан комплекс технологических программ и путей снижения энергозатрат при транспортировании горной массы. Поэтому возникла необходимость восполнения этих пробелов.

#### **Сведения о метрологическом обеспечении диссертации.**

Диссертация выполнена на основе опытно-промышленных работ на руднике Актогай и Бозымчак. Анализ результатов исследований проведен на базе лаборатории карьера Актогай (РАВ - Plant Administration Building) и карьера Бозымчак, где используются приборы и установки, прошедшие государственную метрологическую поверку в период их эксплуатации. В табличных и графических данных использованы единицы измерений, соответствующие метрологическим правилам и нормам Международной системы единиц СИ.

#### **Актуальность темы.**

Вопросы экономии энергетических ресурсов стояли перед обществом во все времена. С повышением уровня развития цивилизации эта актуальная проблема все больше обостряется, перерастая в кризис всей экономики.

Для успешного решения этой проблемы необходимо наладить систему контроля и учета тепловой и электрической энергии: разработку и внедрение эффективных технологических решений, обеспечивающих уменьшение общих и удельных расходов энергии, проведение комплексного анализа предприятий по вопросам энергосбережения; внедрение альтернативных, более экономичных источников получения и передачи энергии.

Анализ структуры энергопотребления на карьерах показывает, что наиболее энергоемким является процесс транспортирования горной массы. Увеличение энергоемкости при одновременном интенсивном росте цен на энергоресурсы становится одним из основных факторов, лимитирующих развитие горного производства, и делает необходимым внедрение

высокоэффективных энергосберегающих технологий учета и снижения расхода дизельного топлива и электроэнергии технологическим карьерным транспортом.

**Новизна темы** заключается в обосновании принципа энергетической оценки технологических процессов транспортных систем глубоких карьеров с учетом универсального критерия удельной энергоемкости (удельное энергопотребления на единицу продукции) в условиях растущего дефицита энергетических ресурсов.

В работе получены следующие новые научные результаты:

- разработан метод энергетической оценки различных видов карьерного транспорта, базирующийся на установленных зависимостях удельных энергозатрат на подъем горной массы от параметров внутрикарьерных трасс, позволяющий формировать энергетически эффективные транспортные системы глубоких карьеров;

- разработаны методики установления рациональных уклонов карьерных трасс по критерию минимизации энергозатрат на подъем горной массы;

- установлены зависимости энергетической эффективности транспортных систем карьера от глубины ввода магистрального транспорта и организации перевозок по схеме «сверху вниз».

#### **Связь работы с другими научно-исследовательскими работами**

Работа выполнена в рамках лота программы «Энергосбережение – 2020» (далее – Программа). Основание для разработки Подпункт б) пункта 2 Протокола совещания с участием Президента Республики Казахстан от 23 января 2013 года № 01-7.1. Государственный орган, ответственный за разработку и реализацию Программы Министерство индустрии и новых технологий Республики Казахстан (далее – МИНТ).

**Цель исследований** - разработка метода энергетической оценки и практических рекомендаций по снижению энергоемкости транспортных систем на карьерах.

**Объектом исследования** являются транспортные системы глубоких карьеров.

**Предметом исследования** являются энергетические показатели работы различных видов карьерного транспорта.

**Задачи исследования, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом:**

В соответствии с поставленной целью в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ условий разработки глубоких карьеров, технико-экономических и энергетических показателей эксплуатации различных видов карьерного транспорта на карьерах Казахстана.

2. Разработан метод энергетической оценки транспортных систем глубоких карьеров, исходя из минимума энергетических расходов при увеличении уклонов транспортных коммуникаций.

3. Разработана имитационно-статистическая модель функционирования различных видов карьерного транспорта при различных уклонах карьерных трасс.

4. Разработана методика автоматизированного расчета зависимости энергетической эффективности транспортных систем карьера от глубины ввода магистрального транспорта и организации перевозок по схеме «сверху вниз».

В диссертации использован комплекс научных методов исследований, включающий:

- научное обобщение и технико-экономический анализ опыта разработки глубоких карьеров и эксплуатации транспортных систем;
- энергетический анализ процессов открытых горных работ;
- геоинформационное и экономико-математическое моделирование, многофакторный регрессионный анализ, методы дифференциального исчисления.

#### **Методологическая база научных исследований**

К числу основных методов исследования и анализа, применяемых при выполнении диссертационной работы, относятся:

- метод регрессионного и корреляционного анализа;
- статистический анализ эксплуатационных данных;
- построение графических зависимостей в программе Microsoft Excel и ANSYS:

- исследование влияния горнотехнических факторов, схемы путевого развития, надежности элементов транспортной системы, вместимости складов и бункеров и других технологических параметров на производительность автомобильно-конвейерного транспорта.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Разработка стратегии формирования энергетически эффективных транспортных систем глубоких карьеров, обеспечивается с использованием в качестве основного критерия минимума затрат первичных энергоресурсов (условного топлива) на подъем горной массы, а в качестве дополнительного - минимума удельного действия, связывающего энергозатраты с производительностью и организацией работы транспортной системы.

- Повышение энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров достигается увеличением уклонов транспортных коммуникаций. Для каждого вида транспорта установлены рациональные уклоны внутрикарьерных трасс, обеспечивающие минимальные энергозатраты на подъем горной массы.

- Установленная взаимосвязь энергетической эффективности транспортных систем карьеров от глубины ввода магистральных видов транспорта (железнодорожных тоннелей, мобильных комплексов ЦПТ) и организации перевозок по схеме «сверху вниз», позволяет обоснованно выбирать рациональные параметры транспортных систем и обеспечивает повышение их энергетической эффективности на 17-20 %.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке методики установления рациональных уклонов карьерных трасс по критерию энергозатрат на подъем горной массы, в частности для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией оптимальный руководящий уклон определяется качеством дорожного покрытия и составляет: для автодорог с асфальтобетонным покрытием 80 - 100 ‰, для щебеночных автодорог 90-110‰; для автодорог без покрытия на скальном основании 100 - 120 ‰; для электрофицированного железнодорожного и конвейерного транспорта оптимальный уклон (угол наклона конвейерного подъема) составляет: при эксплуатации тяговых агрегатов 40 - 50 ‰, электровозной тяги 30 - 40 ‰, ленточных конвейеров большой производительности угол их наклона составляет 17<sup>0</sup>-19<sup>0</sup>, а для конвейеров с прижимной лентой 40<sup>0</sup>-60<sup>0</sup>.

Разработаны рекомендации по установлению рациональных продольных уклонов трасс отдельных видов транспорта по энергетическому критерию, которые следует рассматривать как частный оптимум и нижний предел уклона, принимаемый при проектировании транспортных систем. Окончательное решение по руководящим уклонам следует принимать из глобального оптимума - удельной энергоемкости всей транспортной системы и экономических показателей. Как правило, в глубоких карьерах значения оптимальных уклонов магистральных видов транспорта, установленных по энергозатратам транспортной системы, на 10 - 25% выше значений, установленных по энергозатратам конкретного вида транспорта.

**Публикации и апробация работы.** Публикации включают 3 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus (Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, Украина) ISBN 2071-2227 IF 0,20; 3 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования Республики Казахстан; 12 докладов на международных научно-практических конференциях, из них два в дальнем зарубежье (Польша).

Основные положения и результаты исследований по диссертации докладывались и получили одобрение на международных научно-практических конференциях: «VII International symposium of younger searchers» Transport problems Katowice, Poland 2017г.; «IX International conference» Transport problems Katowice, Poland 2017г. Международная научно-практическая конференция «Рациональное использование минерального и техногенного сырья в условиях индустрии 4.0», Казахстан, Алматы, 2019 г.;

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем диссертации составляет 102 страниц машинописного текста, 6 таблиц, 30 рисунков, списка литературы, включающего 108 наименований и 4 приложения.

## Основное содержание работы

В последние годы энергетический метод оценки транспортных систем открытых горных работ получил наибольшее развитие в трудах многих ученых. В любом технологическом процессе при этом выделяют три энергетические составляющие:

1. Теоретическую энергоемкость процесса - расчетное удельное количество энергии, необходимое для заданного изменения физического состояния и пространственного положения объекта.

2. Удельное энергопотребление - полное количество энергии, израсходованной в данном технологическом процессе на единицу продукции.

3. Удельную энергоемкость процесса - физическое удельное количество энергии, расходуемой в реальном технологическом процессе на изменение физического состояния и пространственного положения единицы массы или объема горные породы.

Под удельной энергоемкостью мы будем понимать полное количество энергии, израсходованной в данном технологическом процессе на единицу продукции, т.е. то же, что и удельное энергопотребление.

Весь опыт исследований, подкрепленный анализом технической литературы, свидетельствуют о том, что этот критерий действительно является универсальным и может быть применен в самых различных сферах материального производства. Такой подход получил наибольшее распространение в практике открытых горных работ.

Если горные работы в карьере ведутся по нескольким транспортным схемам, то общая удельная энергоемкость определяется из выражения

$$w_k = \sum_{j=i-1}^m \frac{w_{mcj} \cdot V_j}{\sum_{k=i-1}^m V_k}, \quad (1)$$

где  $w_{mcj}$  - удельная энергоемкость  $j$ -й транспортной схемы транспортных работ, кДж/т;

$m$  - количество транспортных схем;

$V_j$  - объем выемки и транспортирования горной массы по  $j$ -й технологической схеме, т/год;

$\sum_{k=i-1}^m V_k = \Pi_k$  - производительность карьера по горной массе, т/год.

В качестве дополнительного критерия для сравнения энергоемкости различных технологических процессов может быть принята величина удельного действия, представляющая собой произведение количества энергии, расходуемой данным технологическим процессом, и времени необходимого на выполнение этого процесса.

$$d_m = \sum_{j=i-1}^n w_{mcj} \cdot t_j, \quad (2)$$

где  $w_{mcj}$ - удельная энергоемкость, кДж/т;

$t_j$ - время на выполнение  $i$ -го технологического процесса, с.

Таким образом, удельное энергопотребление является количественной мерой, характеризующей свойства объекта разработки и параметры сопряженных технологических процессов.

Исходя из функций транспорта глубоких карьеров, в качестве основного критерия оценки энергетической эффективности может быть принята величина удельных затрат на подъем 1 т горной массы из карьера, приведенной к первичным энергоресурсам – условному топливу (у.т.).

Тогда коэффициент полезного использования энергии определится из выражения:

$$\eta = (P_T / P_\Phi) \cdot 100\% \quad (3)$$

где  $P_T$  – теоретически необходимая величина расхода энергии на подъем 1 т горной массы на высоту 1м ( $P_T=9,81$  кДж/тм);

$P_\Phi$  – фактические затраты энергии данным видом транспорта, кДж/тм.

Приведение фактических затрат энергии к расходу первичных энергоресурсов рекомендуется производить по следующим выражениям:

$$P_{\Phi.a} = qk_{пер}k_Tk_d; \quad P_{\Phi.к.(ж)} = wk_эk_{пот}k_m,$$

где  $P_{\Phi.a}$ ,  $P_{\Phi.к.(ж)}$  - удельный расход топлива на подъем горной массы, соответственно, автомобильным и конвейерным (железнодорожным) транспортом,

$q$ ,  $w$  – соответственно, удельный расход дизельного топлива (кг/тм) и электроэнергии (кВт·ч/тм) конвейерным (железнодорожным) транспортом;

$k_d$ ,  $k_{пер}$  - коэффициенты, учитывающие затраты энергии на добычу и транспортирование топлива ( $k_d = 1,04 \div 1,10$ ) и на получение дизельного топлива из нефти ( $k_{пер} = 1,18 \div 1,20$ );

$k_T$  - коэффициент, учитывающий разницу удельной теплоты сгорания дизельного и условного топлива ( $k_T=1,5$ );

$k_э$  – коэффициент, учитывающий затраты условного топлива на получение 1 кВт·ч электроэнергии ( $k_э = 0,31 \div 0,33$  кг/кВт·ч);

$k_{пот}$  -коэффициент, учитывающий потери электроэнергии при передаче и распределении ( $k_{пот} = 1,09$ ).

Тогда формулу (1) можно представить в виде:

$$\eta = \frac{P_T}{F \cdot Q_{y.m}} \cdot 100\%.$$

где  $Q_{y.m}$  - удельная теплота сгорания условного топлива, кДж/г ( $Q_{y.m} = 29,3$  кДж/г).

При равных или близких показателях удельной энергоемкости, отдельных моделей транспортных средств, видов транспорта или транспортных систем необходимо использовать дополнительный критерий – удельное действие [Дж·с] – это физическая величина, представляющая собой произведение количества энергии, расходуемое на перемещение объекта и времени его перемещения. Тогда удельное действие запишется следующим образом

$$D = P_o \cdot t_n; \quad D_{к(ж)} = P_{к(ж)} \cdot t_{к(ж)} ,$$

где  $D, D_{к(ж)}$  - удельное действие, соответственно, автомобильного и конвейерного (железнодорожного) транспорта, кг.у.т. с/тм;

$t_n, t_{к(ж)}$  – среднее время подъема горной массы, соответственно, автомобильного и конвейерного (железнодорожного) транспорта, с.

Изложенный методический подход позволяет оценить энергетическую эффективность транспортных систем и отдельных видов транспорта, использующих различные виды энергии.

В общем виде расход дизельного топлива автосамосвалом за транспортный цикл  $Q_{ц}$ , л определяется как:

$$Q_{ц} = Q_1 + Q_{дв} + Q_{п} + Q_{р} + Q_{м} + Q_o , \quad (4)$$

где  $Q_1, Q_{дв}$  - расход топлива, соответственно, на движение с грузом и в порожняковом направлении, л;

$Q_{п}, Q_{р}, Q_{м}, Q_o$  - расход топлива, соответственно, при погрузке, разгрузке, маневровых операциях, а также в период ожидания погрузки, л.

В развернутом виде

$$Q_{ц} = \sum_{i=1}^n l_j (g_{гр} + g_{п}) + \frac{g_1(t_n + t_o) + g_2 t_1 + g_3 t_2 + g_4 t_3}{60} , \quad (5)$$

где  $g_{гр}, g_{п}$  - удельный расход топлива, соответственно, груженых и порожних автосамосвалов на j-м участке трассы, л/км;

$l_j$  - длина j-го участка трассы, км;

n – количество участков трассы;

$g_1, g_2, g_3, g_4$  - удельный расход топлива, соответственно, на холостом ходу двигателя, при разгрузке и на маневровых операциях, л/км;

$t_1, t_2, t_3, t_4$  - продолжительность, соответственно, погрузки, разгрузки, маневровых операции и ожидания погрузки, мин.

Удельный расход топлива груженых и порожних автосамосвалов (л/км) при движении на  $j$ -м горизонтальном участке трассы или на подъем ( $i \geq 0$ ) и работе двигателей в тяговом режиме

$$g = \frac{g_1(G_1 + k_{\text{п}}G_2)(w+i)k_{\text{п}}}{3,67 \cdot 10^2 \cdot \eta_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где  $G_1$  – грузоподъемность автосамосвала, т;

$G_2$  - собственная масса автосамосвала, т;

$w$  - коэффициент сопротивления качению на  $j$ -ом участке трассы;

$i$  - уклон  $j$ -го участка трассы;

$\rho$  - плотность дизельного топлива ( $\rho=0,825/0,865$  кг/л);

$g_1$ -удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя;

$k_{\text{п}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий изменение величины  $g_{\text{н}}$  в реальных условиях на  $j$ -м участке трассы;

$\eta_{\text{а}}$ - коэффициент полезного действия трансмиссии автосамосвала.

Удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя ( $g_{\text{н}}$  является паспортной величиной, характеризующей фактический расход топлива для получения 1 кВт полезной энергии.

$$g_{\text{н}} = \frac{3600}{Q_{\text{дт}} \eta_{\text{з}}}, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{дт}}$  - теплота сгорания дизельного топлива, кДж/г ( $Q = 43,5$  кДж/г);

$\eta_{\text{з}}$ - эффективный КПД двигателя.

Отсюда

$$g_{\text{н}} = \frac{3600}{g \cdot Q} \cdot 100\%, \quad (8)$$

Комплексная оценка на основе двух критериев энергетической эффективности дает наиболее полное и эффективное сравнение энергетических показателей карьерного автотранспорта.

Энергетические преимущества железнодорожного транспорта перед автомобильным объясняются меньшими значениями коэффициента сопротивления движению груженого поезда (в 8-10 раз) и коэффициента

тары. Коэффициент тары современных думпкаров составляет 0,41-0,50, а отечественных автосамосвалов 0,70-0,84. Однако реализация этих преимуществ при работе на подъем горной массы ограничивается сравнительно небольшим уклоном железнодорожных трасс (40-60‰) и значительным коэффициентом их развития (до 1,5-1,8). Поэтому целью диссертационной работы является установление закономерностей влияния величины руководящего уклона съездов на уровень энергозатрат при подъеме горной массы из глубоких карьеров.

Для подъема поезда из карьера необходимо выполнить работу  $A_0$ , равную произведению силы  $F$  на путь  $S$ .

$$A_0 = F \cdot S, \quad (9)$$

где  $F$  – равнодействующая ускоряющих и замедляющих сил, действующих на поезд в процессе его подъема из карьера.

С другой стороны, работа этой силы равна приращению кинетической и потенциальной энергии поезда.

Так как

$$U_2 - U_1 = \Delta U = mg\Delta h, \quad (10)$$

где  $U_2 - U_1$  - изменение потенциальной энергии, а

$$F = F_k - \omega_0, \quad (11)$$

Имеем

$$(F_k - \omega_0)S = \frac{m}{2}(V_2^2 - V_1^2) + mg\Delta h, \quad (12)$$

где  $F_k$  - тяговое усилие локомотива, Н;

$\omega_0$  - полное сопротивление движению поезда, Н;

$m$  – масса поезда, кг;

$\Delta h$  - высота подъема поезда из карьера, м

Так как

$$F_k S = \frac{m}{2}(V_2^2 - V_1^2) + mg\Delta h + \omega_0 S, \quad (13)$$

то

$$A = 0,5m(V_2^2 - V_1^2) + mg\Delta h + \omega_0 S, \quad (14)$$

где  $m$  - масса поезда, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta h$  - высота подъема поезда из карьера, м.

Таким образом, выражение (10) представляет собой уровень энергетических затрат на подъем горной массы из карьеров как величину работы, выполняемой транспортным средством в процессе движения с расчетного горизонта до устья капитальной траншеи. Выражение  $0,5m(V_2^2 - V_1^2)$  характеризует часть работы, выполняемой локомотивом для придания поезду кинетической энергии в процессе разгона со скорости  $V_1$  до скорости  $V_2$ .

Одним из основных показателей, характеризующих эффективность применения конвейерного транспорта, является энергоемкость транспортирования груза. Основными факторами, влияющими на уровень энергетических затрат на подъем горной массы конвейерным транспортом, в частности ленточными конвейерами, являются: основное сопротивление движению ленты по роликам, определяющее расчет установочной мощности привода (проектируется приводная станция); угол наклона конвейерного става.

Выражение удельного действия на подъем 1 т горной массы на высоту 1 м (по аналогии с автомобильным и железнодорожным транспортом) имеет вид (кВт·ч·с/т·м)

$$D_k = \frac{2,673 \cdot 10^{-2} \left[ k_{\text{сopr}}(1+k_T) \frac{\omega}{\sin a_K} + 1 \right]}{N_{\text{уд}} \eta_k^2}, \quad (15)$$

где  $k_{\text{сopr}}$  – коэффициент, учитывающий долю сопротивления на концевых барабанах конвейера;

$\omega_k$  - коэффициент сопротивления движению ленты по роликам, Н/т;

$a_k$  - угол наклона конвейеров, град;

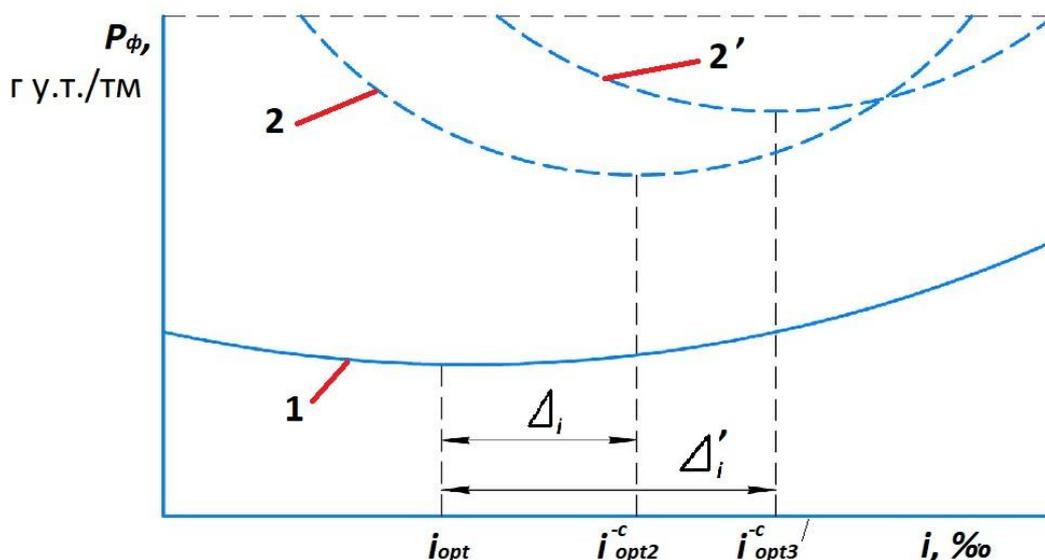
$N_{\text{уд}}$  - удельная мощность электрического привода, кВт/т;

$k_T$  - коэффициент тары конвейера.

Оптимальный продольный уклон трасс по энергетическому критерию для отдельных видов транспорта и конкретных моделей транспортных средств следует рассматривать как частный оптимум и нижний передел уклона, который рекомендуется принимать при проектировании транспортных систем. Он определяется топливной экономичностью, конструктивными параметрами транспортных средств, качеством дорожного покрытия и характеризуется относительным постоянством для конкретных моделей транспортных средств. Окончательно принятие решений по руководящим уклонам трасс следует принимать на основе глобального оптимума- удельной энергоемкости всей транспортной системы (рис.1.).

Для оптимизации уклонов автодорог на нагорно-глубинных карьерах обосновано использование следующих физических критериев:

- величина удельных затрат энергии на подъем (спуск) 1 т горной массы на 1 м (Г/Т·М);
- суммарное время движения по уклону в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме (спуске) горной массы на 1 м (с);
- удельные действие - комплексный критерий, представляющий собой произведение удельных затрат энергии на подъем (спуск) горной массы автосамосвалами на 1 м, и времени подъема (спуска) горной массы на 1 м (Г·с/Т·М). (рис.2.)

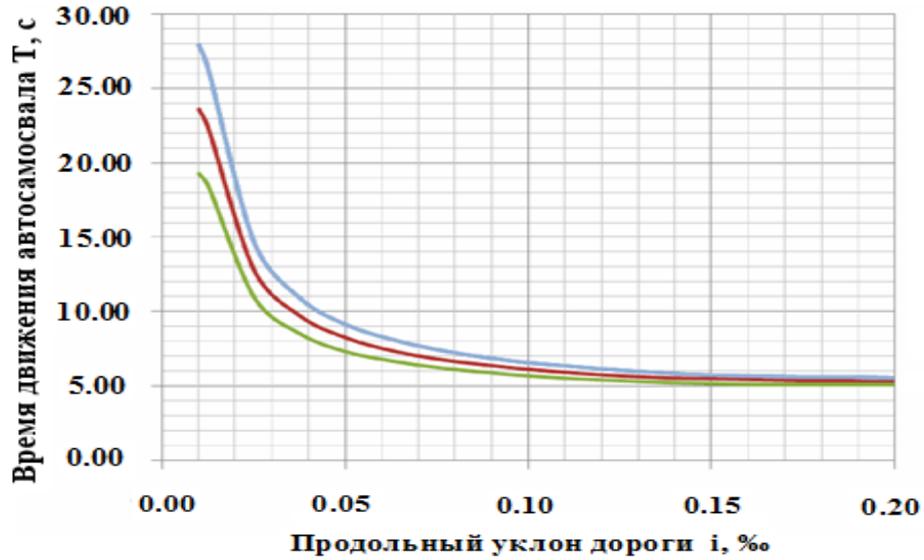


1 - удельные энергозатраты магистрального транспорта; 2, 2' - удельные энергозатраты транспортной системы при глубине карьера  $H_k$  и  $H'_k$  / ;  $i_{opt}$  - оптимальный уклон трассы по энергетическому критерию (частный оптимум),  $i_{opt} = const$ ;  $i_{opt1}, i_{opt2}$  - оптимальные уклоны трассы магистрального транспорта по энергетическому критерию транспортной системы (глобальный оптимум);  $\Delta_i, \Delta'_i$  - интервалы изменения оптимального уклона с увеличением глубины разработок.

Рисунок 1 - Выбор области оптимальных уклонов для различных видов карьерного транспорта

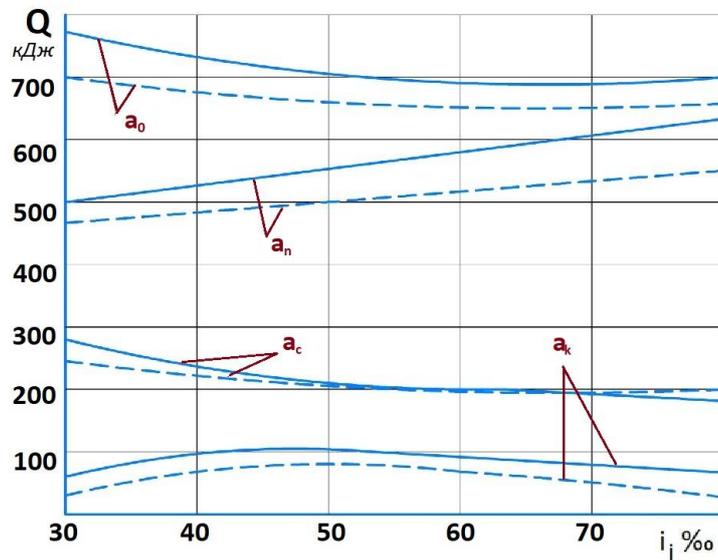
Изменение удельной работы для подъема 1 т горной массы при железнодорожном транспорте для различных уклонов трассы, приведено на рисунке 3.

Для определения оптимального значения угла наклона ленточного конвейера, принимая во внимание приведённые выше графики, а также вывод о динамике увеличения погонной нагрузки ( $q_m$ , кг·м) конвейерной установки с изменением высоты подъема транспортируемой горной массы, установлены зависимости длины конвейера от среднего угла подъёма трассы конвейера и от погонной нагрузки на ленте (рисунок 4).



- Время транспортирования горной массы на подъем,  $T$ , с, при  $\omega_0=0,02$
- Время транспортирования горной массы на подъем,  $T$ , с, при  $\omega_0=0,01$
- Время транспортирования горной массы на подъем,  $T$ , с, при  $\omega_0=0,03$

Рисунок 2 - Зависимость времени движения автосамосвала БелАЗ-7512 (120 т) в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме (спуске) горной массы на 1 м, при работе на подъем горной массы



$a_0$  – суммарная работа для подъема 1 т горной массы;  $a_k$  – работа, связанная с приданием поезду кинетической энергии;  $a_n$  – работа, связанная с изменением потенциальной энергии;  $a_c$  – работа, связанная с преодолением сопротивления движению поезда на трассе.

Рисунок 3 - Изменение удельной работы, (А), выполняемой локомотивом, для подъема 1 т горной массы из карьера глубиной 300 м при различных уклонах трассы

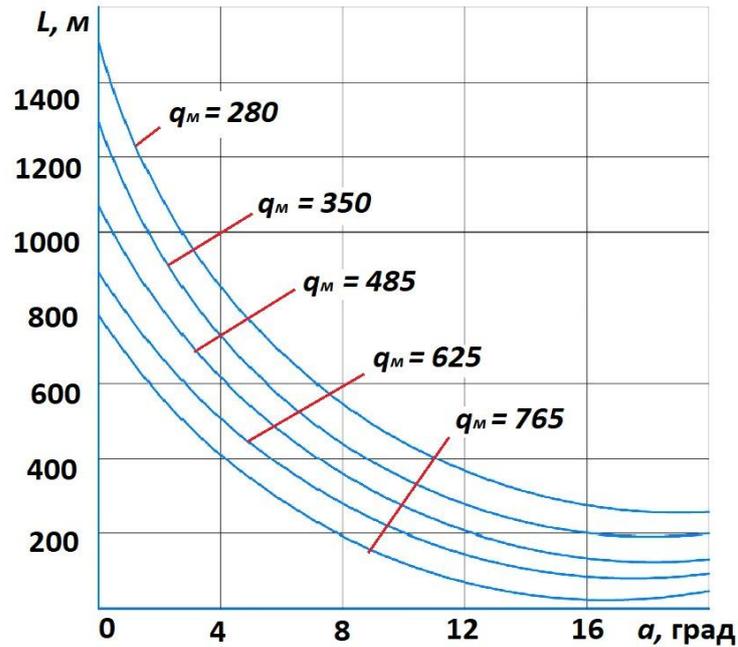


Рисунок 4 – Зависимости длины конвейера (L) от среднего угла подъема (α) трассы конвейера и от погонной нагрузки на ленте (q<sub>м</sub>, кг·м)

Диаграмма роста экономической эффективности контейнерной технологии в зависимости от глубины карьера при производительности млн.т в год представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Зависимость экономической эффективности внедрения контейнерной технологии от глубины карьера

Анализируя график (рис.5) можно сделать вывод, что экономическая эффективность при внедрении на карьере контейнерного подъёма с ростом глубины разработки увеличивается. Это происходит из-за снижения эксплуатационных затрат, таких как расход дизельного топлива, амортизационных отчислений и снижения затрат на проведение ремонтов оборудования.

На рисунке 6 приведены результаты расчета вариантов энергопотребления для транспортировки материалов в карьерах в зависимости от различных высот подъема для технологий с использованием автосамосвалов и ленточных конвейеров. Величины энергопотребления соотнесены к массе транспортируемого материала и кратчайшему горизонтальному расстоянию транспортировки. Третья кривая описывает соотношение энергопотребления между автосамосвалами и ленточными конвейерами.

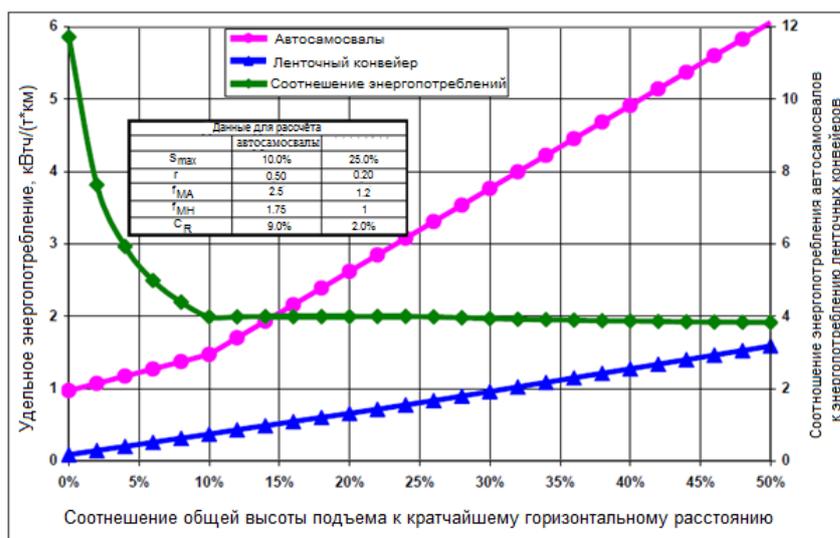


Рисунок 6 - Диаграмма энергопотребления при изменении высоты подъема для транспортировки автосамосвалами и ленточными конвейерами

Для внедрения на открытых горных работах предлагается новая автомобильно-конвейерно-контейнерная (а-к-к) технология транспортировки горной массы, которая позволит повысить показатели открытых горных работ по экономии энергоресурсов и сохранению окружающей среды на качественно новом уровне.

Отказ от подъема горной массы автотранспортом дает возможность увеличить предельные уклоны автосъездов, так как они будут использованы для движения только порожних автомобилей. Возможный переход от уклонов 8% на уклоны 15% даст сокращение площади, отведенной в карьере для размещения автосъездов.

Известные рекомендации по выбору рациональных параметров перегрузочных пунктов при циклично-поточной технологии с применением автосамосвалов не могут быть использованы из-за конструктивных и технологических особенностей транспортной системы с автотранспортом.

Для решения такой задачи разработана методика определения рациональных энергетических параметров перегрузочных пунктов при циклично-поточной технологии с применением автосамосвалов. Пусть на бункерный перегрузочный пункт поступает пуассоновский поток с

параметром  $\lambda$ , время обслуживания каждого автосамосвала  $t_{обс}$  является величиной случайной, которая подчиняется показательному закону распределения с параметром  $\mu$ , все точки разгрузки на перегрузочном пункте одинаковой производительности.

Исходя из условия обеспечения бесперебойной работы погрузочного оборудования в карьере, поступающий на перегрузочный пункт грузопоток  $Q_A$  (производительность автосамосвалов), должен быть равен производительности карьера  $Q_K$ , т.е.  $Q_A=Q_K$ .

С учетом неравномерности работы погрузочно-транспортного оборудования производительность карьера (т/ч) можно представить в виде

$$Q_K = N_э Q_э^{тех} K_э K_в K_{нер}^э K_{нер}^{от}, \quad (16)$$

где  $N_э$  – число работающих экскаваторов в карьере, шт.;

$Q_э^{тех}$  - техническая производительность экскаватора,

$K_э$  - коэффициент экскавации;

$K_в$  - коэффициент использования экскаватора.

$K_{нер}^э$  - коэффициент неравномерности работы экскаваторов;

$K_{нер}^{от}$  - коэффициент неравномерности работы автосамосвала;

На рис. 7 приведен график зависимости рациональной емкости бункера от производительности карьера для следующих показателей:

$$Q_k = 5 \div 20 \text{ млн. } \frac{\text{т}}{\text{год}}; q_a = 60 \text{ т};$$

$t_{обс} = 90 \text{ с}$  – для автосамосвалов грузоподъемностью 60 т;

$t_{обс} = 120 \text{ с}$  – для автосамосвалов грузоподъемностью 91 т.

Проведенные исследования показывают, что с увеличением производительности карьера в два раза рациональная емкость бункера увеличивается в 1,7 раза при  $q_a = 60 \text{ т}$  и в 1,8 раза при  $q_a = 91 \text{ т}$ . Повышение грузоподъемности автосамосвалов с 60 до 91 т при прочих равных условиях вызывает необходимость увеличения емкости бункера в 1,3 раза.

Материалы, изложенные в диссертации и систематизированные выводы, свидетельствуют о значительных резервах повышения энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров.

Целесообразность применения имитационных моделей для исследования параметров работы многозвенных автомобильно-конвейерно-контейнерных (а-к-к) транспортных систем на карьерах обусловлена следующим:

1. Структурной и функциональной сложностью систем, аналитическое описание которых существенно затруднено. Имитационные модели могут

быть построены без привлечения сложного математического аппарата при обязательном сохранении их логической структуры.

2. Необходимостью учета стохастического характера горнотранспортных процессов. Применение для этих целей аппарата теории массового обслуживания с учетом приспособления модели к решению широкого круга задач объективно ведет к увеличению ее размерности, усложнению, снижению точности расчетов. Имитационные модели оказываются наиболее результативными для исследования энергетических показателей системы в динамике, когда в ее функционировании принимают участие случайные факторы (рис.8).

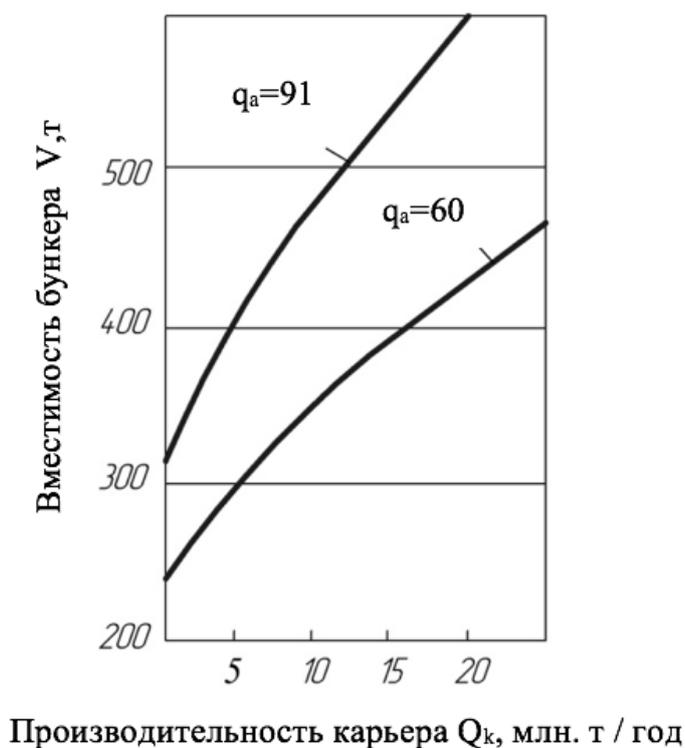


Рисунок 7 - Зависимость рациональной емкости бункера  $V$  от производительности карьера  $Q_k$

С целью унификации и упрощения процесса моделирования для идентификации распределений случайных величин используется гамма распределение:

$$f(a, v, x) = \frac{a}{\Gamma(v)} x^{v-1} e^{-ax} ,$$

$$v = \frac{1}{v^2} : a = \frac{v}{x} ,$$

где  $v$  и  $x$  – соответственно коэффициент вариации и математическое ожидание величины.

Функционирование а-к-к транспорта укрупненно может быть описано совокупностью векторов состояний и моментов изменения состояний элементов системы.

Вектор состояния автомобильного транспорта  $VSSA = (VS1, VS2)$

$VS1 = 1$  - наличие потока автосамосвалов;

0 - отсутствие потока автосамосвалов

Вектор состояний  $VS2$  формируется в момент прибытия очередного автосамосвала на дробильно-перегрузочный пункт

$VS2 = 1$  - автосамосвал разгружается;

0 - нет разгрузки

Вектор моментов изменения состояний в функционировании автомобильного звена

$VSM = \{MLPA, MNOA, MPA\}$ ,

где  $MLPA$  - момент возобновления организованного потока автосамосвалов;

$MNOA$  - момент прерывания потока автосамосвалов;

$MPA$  - момент разгрузки автосамосвалов.

Блок-схема имитирующего алгоритма представлена на рис. 8. В блоке  $A_2B_2$  осуществляется ввод исходных данных. В блоках  $A_4B_4$  и  $L_2A_2$  определяется интервал работоспособного состояния  $K^{го}$  конвейера  $TRK(K)$  по соответствующему распределению.

В настоящее время на карьерах Казахстана имеются значительные организационные возможности снижения расхода дизельного топлива, включающие:

- совершенствование управления работой автотранспорта, в том числе внедрение автоматизированных систем управления с компьютерными устройствами;

- повышение качества технического обслуживания и ремонта автосамосвалов;

- совершенствование нормирования и планирования расхода топлива.

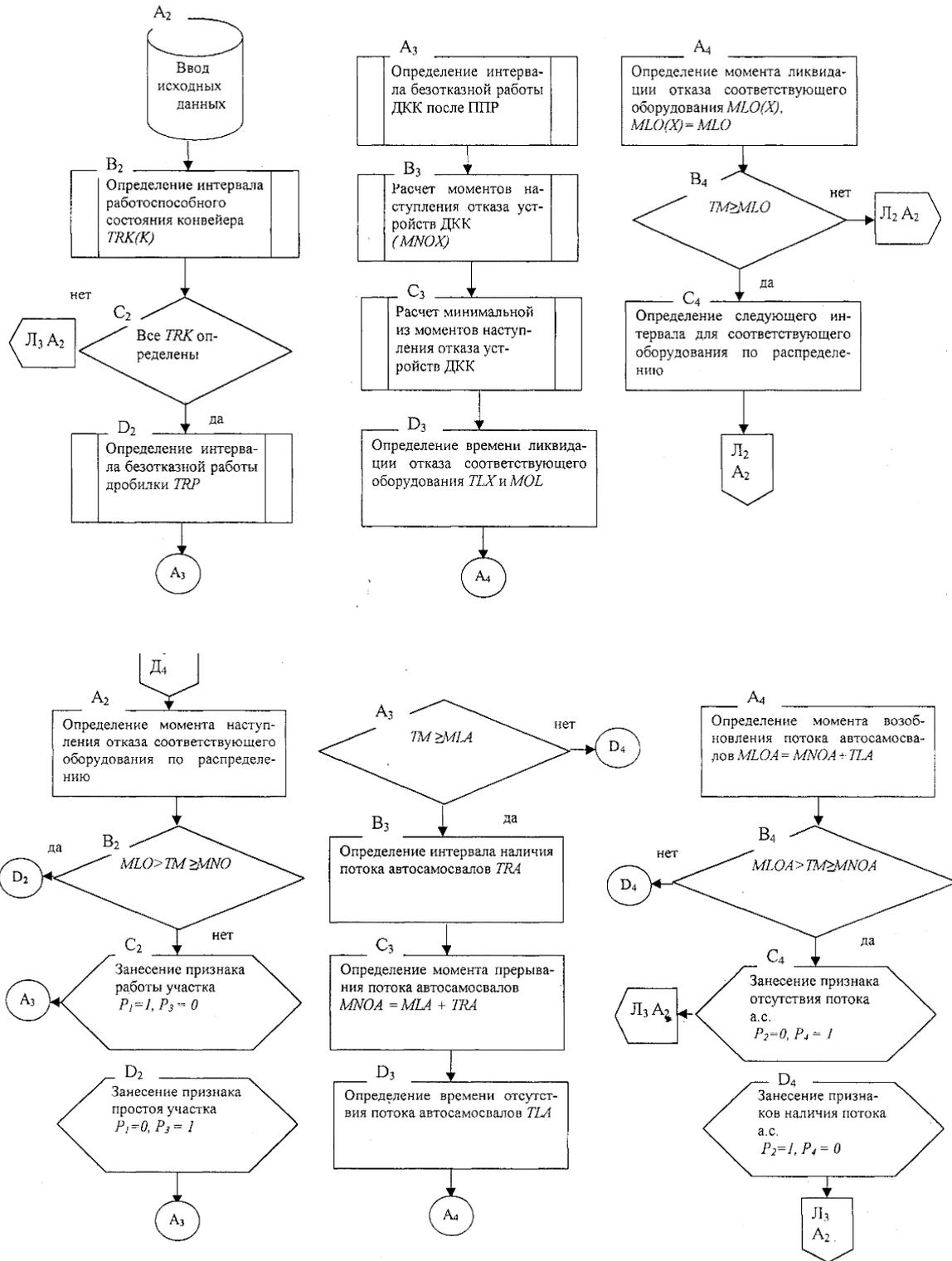


Рисунок 8 - Блок-схема алгоритма имитационной модели работы а-к-к. транспорта

## Заключение

В результате выполненных исследований дано новое решение актуальной прикладной задачи повышения энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров, заключающееся в разработке метода энергетической оценки различных видов карьерного транспорта, оптимизации уклонов транспортных коммуникаций и разработке автоматизированной методики планирования и нормирования расхода дизельного топлива на основе геоинформационного банка данных.

**Основные научные выводы, результаты и практические рекомендации заключаются в следующем:**

1. Разработан метод энергетической оценки транспортных систем глубоких карьеров. Обосновано использование в качестве основного критерия оценки величина удельных затрат первичных энергоресурсов (условного топлива) на подъем 1 т горной массы на 1 м, а в качестве дополнительного - удельного действия, представляющего произведение удельных энергозатрат на подъем горной массы и времени ее подъема, связывающего энергозатраты с производительностью и организацией работы транспорта.

2. Установлено, что энергетическая эффективность конвейерного транспорта ( $P_k$ ) в 2,0 раза выше, чем электрифицированного железнодорожного ( $P_{ж}$ ), и в 2,0 - 2,5 раза выше, чем автомобильного ( $P_a$ ).

3. Разработана методика оптимизации уклонов карьерных трасс по критерию энергозатрат на подъем горной массы. Установлено: для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией оптимальный руководящий уклон определяется качеством дорожного покрытия и составляет: для автодорог с асфальтобетонным покрытием 80 - 100 ‰, для щебеночных автодорог 90-110‰, для автодорог без покрытия на скальном основании 100 - 120 ‰; для электрифицированного железнодорожного и конвейерного транспорта оптимальный уклон (угол наклона конвейерного подъема) составляет: при эксплуатации тяговых агрегатов 40 - 50 ‰, электровозной тяги 30 - 40 ‰, ленточных конвейеров с прижимной лентой большой производительности угол их наклона составляет  $38^{\circ}$ - $40^{\circ}$ .

4. Оптимальный продольный уклон трасс отдельных видов транспорта по энергетическому критерию следует рассматривать как частный оптимум и нижний предел уклона, принимаемый при проектировании транспортных систем. Окончательное решение по руководящим уклонам следует принимать из глобального оптимума - удельной энергоемкости всей транспортной системы и экономических показателей. Как правило, в глубоких карьерах значения оптимальных уклонов магистральных видов транспорта, установленных по энергозатратам транспортной системы, на 10 - 25% выше значений, установленных по энергозатратам конкретного вида транспорта.

5. Ввиду сложности и динамичности условий эксплуатации автосамосвалов в глубоких карьерах планирование и нормирование энергетических показателей целесообразно проводить на основе разработанной комплексной методики, включающей: экспериментально-аналитический метод изучения и описания энергетических показателей карьерного автотранспорта; создание геоинформационной модели автотранспортных коммуникаций; геоинформационного блока данных - совокупности баз данных горнотранспортного оборудования, системы автотранспортных коммуникаций, первичной маркшейдерской информации и программных средств их взаимодействия, управления и обработки; создание и ведение блока информационно-советующих (экспертных) данных.

6. Применение комплексной методики расчета энергетических показателей транспортных систем позволяет повысить научную обоснованность и точность планирования и нормирования расхода дизельного топлива карьерными автосамосвалами на 9 - 12% по сравнению с существующими методами.

7. Повышение энергетической эффективности транспортных систем карьеров (на 17 - 20%) обеспечивается путем глубокого ввода магистральных видов транспорта (железнодорожные тоннели, мобильные комплексы ЦПТ) и организацией перевозок по схеме «сверху вниз». Основными направлениями повышения энергетической эффективности работы автосамосвалов на магистральных перевозках являются внедрение автосамосвалов с автоматической гидромеханической трансмиссией и применение повышенных (10 - 12%) уклонов автодорог, а на сборочных - оптимизация схем вскрытия временными съездами. Разработанные на основе исследований «Методика автоматизированного расчета энергетических показателей карьерного автотранспорта» и «Линейные дифференцированные нормы расхода дизельного топлива автосамосвалами» приняты к внедрению на карьере АО «Актогай».

8. Теоретически и практически обоснованы допустимые напряжения грузонесущей и прижимной конвейерной ленты на переходном участке загрузочного узла КНК путем варьирования упругими характеристиками резинокросовых лент; получены значения их предварительных натяжений и величины радиуса переходного участка, полученные на основе разработанной комплексной методики исследования. Разработана математическая модель напряженного состояния грузонесущей и прижимной лент, которая описывается системой уравнений в частных производных, варьируемыми параметрами в которых являются модули упругости лент в продольном и поперечном направлении, коэффициенты Пуассона и нагрузки, действующие на ленты.