

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Т.Ф. Горбачева

на правах рукописи

Фурман Андрей Сергеевич

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАССАХ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент
Буялич Геннадий Даниилович

Кемерово – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОСАМОСВАЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ	10
1.1. Состояние и эксплуатационные показатели современного карьерного транспорта	10
1.2. Направления исследований и рекомендации по повышению производительности экскаваторно-автомобильных комплексов	24
1.3. Анализ известных методик определения экономических показателей эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов.....	39
1.4. Анализ факторов, влияющих на скоростные режимы движения карьерных автосамосвалов	45
1.5. Цель и задачи исследования	53
1.6. Выводы.....	53
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА	55
2.1. Обоснование скоростных режимов карьерных автосамосвалов	55
2.2. Аналитическое исследование скоростных ограничений.....	58
2.3. Экспериментальное исследование скоростных режимов.....	64
2.4. Выводы.....	74
3. ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ОТ ПРОДОЛЬНЫХ УКЛОНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАСС.....	75
3.1. Расчетная схема маршрута	75
3.2. Критерии эффективности экскаваторно-автомобильных комплексов.....	79

3.3. Определение рационального продольного уклона трассы.....	86
3.3.1. Определение рационального продольного уклона трассы на основе производительности	86
3.3.2. Определение рационального продольного уклона трассы на основе себестоимости при перевозке вскрышных пород	89
3.3.3. Определение рационального продольного уклона трассы на основе прибыли при перевозке полезного ископаемого	104
3.4. Выводы.....	107
4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСКАВАТОРНО- АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ РАЗРЕЗА АО «КРАСНЫЙ БРОД»	108
4.1. Определение скоростей движения карьерных автосамосвалов на участках технологической трассы	108
4.2. Определение продолжительности транспортного цикла на технологической трассе.....	113
4.3. Выводы.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время в угольной промышленности страны особое внимание уделяется открытому способу добычи угля, что связано с более высокой его производительностью и рентабельностью. По разным оценкам, доля угля, добываемого открытым способом, составляет в настоящее время 50–65 %, а в дальнейшем увеличится до 80–85 %.

Развитие открытого способа добычи полезного ископаемого сопровождается ростом масштабов производства, увеличением глубины разрезов и усложнением горнотехнических условий эксплуатации основного технологического оборудования. С ростом глубины разрезов наиболее узким местом в горном производстве становится технологический автомобильный транспорт, так как рост глубины сопровождается усложнением профиля трасс. Сложность профиля трассы зависит от изменчивости величин дорожных уклонов и радиусов поворотов, т. е. от параметров трассы, ограничивающих скорости движения карьерных автосамосвалов. В свою очередь скорость движения карьерных автосамосвалов на отдельных участках технологической трассы определяют такие параметры трасс, как коэффициенты сопротивления качению и сцепления колеса с дорогой, ровность дорожного полотна, радиус поворота, продольный уклон, что также сказывается на эффективности использования экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) в целом.

Удельный вес транспортных затрат в трудоемкости и энергоемкости процесса добычи полезных ископаемых при работе с глубины 100–150 м достигает 55–60 %, а при увеличении глубины до 200–250 м – 65–70 %. Из них более 50 % приходится на автомобильный транспорт. Целесообразно практическую реализацию и дальнейшее развитие научно-исследовательских работ в области совершенствования эффективных методов эксплуатации ЭАК и выбора технико-эксплуатационных показателей применительно к конкретно складывающейся обстановке направить на обеспечение требуемой производительности с наименьшими затратами.

В связи этим повышение эффективности использования ЭАК и снижение транспортных издержек на перевозки является актуальной задачей.

Степень разработанности

Научные и теоретические основы эффективной эксплуатации ЭАК изложены в трудах Васильева М.В., Кулешова А.А., Александрова В.И., Зырянова И.В., Глебова А.В., Ташкинова А.С., Гордиенко Б.В., Астафьева Ю.П., Белякова Ю.И., Хохрякова В.С., Яковенко Б.В., Малюты Д.И. и других. В этих работах описываются условия применения ЭАК, определяется область их рационального использования, излагаются особенности организации и обобщается опыт его работы на горнодобывающих предприятиях с открытым способом добычи полезных ископаемых. Несмотря на широкий диапазон проведенных исследований, недостаточно полно исследовано влияние параметров технологических трасс на режимы движения функциональных машин ЭАК и интенсивности их изменения, что, в свою очередь, оказывает влияние на эффективность оценки показателей эксплуатации ЭАК в целом.

Цель работы оценка влияния параметров технологических трасс на эффективность эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов.

Идея работы состоит в оценке эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на основе производительности, себестоимости и прибыли, зависящих от параметров технологических трасс.

Для достижения указанной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Установить влияние параметров профиля технологических трасс на закономерности движения карьерных автосамосвалов
2. Обосновать критерии оценки эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов
3. Разработать методику оценки эффективности экскаваторно-автомобильного комплекса с учетом его состава и параметров технологической трассы.

4. Сравнить варианты реализации разработанной методики при выборе состава экскаваторно-автомобильного комплекса для условий конкретного разреза.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Закономерности движения карьерных автосамосвалов определяются составом ЭАК, профилем технологической трассы, параметрами ускоренного и замедленного движения в порожнем и груженом состояниях, которые характеризуются нормальным законом распределения и доверительными интервалами, зависящими от продольного уклона трассы.

2. Эффективность ЭАК определяется уровнем производительности, себестоимости или прибыли, которые зависят от параметров технологических трасс, составом и параметрами входящих в него машин, и при этом производительность имеет экстремумы во всём диапазоне продольных уклонов, на которых разрешена эксплуатация карьерных автосамосвалов, а себестоимость и прибыль – в диапазоне уклонов от 90 до 110 %.

Научная новизна работы:

– впервые определены доверительные интервалы скоростей и ускорений в зависимости от продольного уклона трассы, которые на горизонтальных участках трасс характеризуются значениями ускорений от $(-0,43)$ до $(0,39)$ м/с² в груженом направлении и от $(-0,53)$ до $(0,42)$ м/с² – в порожнем, а при увеличении уклонов они уменьшаются и на уклонах свыше 110 % находятся в пределах от $(-0,10)$ до $(0,08)$ м/с² в груженом направлении и от $(-0,10)$ до $(0,10)$ м/с² – в порожнем;

– разработана методика по выбору эффективного состава ЭАК в зависимости от параметров технологических трасс, отличающаяся определением производительности, себестоимости или прибыли, с учетом времени и пути разгона и торможения, а также степени загрузки автосамосвалов;

– впервые установлены зависимости изменения производительности, прибыли и себестоимости транспортирования горной массы карьерными ав-

тосамосвалами от продольного уклона трассы и состава ЭАК для оценки эффективности его эксплуатации.

Достоверность научных результатов подтверждена результатами вычислительных экспериментов, правомочностью принятых критериев эффективности и допущений, сопоставлением результатов компьютерного моделирования с фактическими данными (расхождение расчётных со средними значениями фактических скоростей до 13,3 % на горизонтальных участках и на участках с величиной уклона от 50 ‰ – до 10 %, а по маршруту в целом – до 5 %).

Теоретическая ценность заключается в установлении зависимостей производительности, себестоимости и прибыли от продольного уклона трассы и состава ЭАК, а так же доверительных интервалов скоростей и ускорений карьерных автосамосвалов.

Практическая ценность заключается в использовании полученных зависимостей для проектирования новых трасс при углубке разрезов; в разработке методики, позволяющей определить эффективную структуру погрузочно-транспортного оборудования для различных горнотехнических условий.

Реализация результатов работы

Научные результаты работы внедрены и используются в АО «Черниговец» и ОАО «УК«Кузбассразрезуголь» при проектировании участков открытой разработки угольных месторождений в части профилирования технологических трасс и выбора эффективного оборудования, а так же в ООО «НИИЦ КузНИУИ» при экспертных заключениях по техническому перевооружению разрезов Кузбасса.

Методы исследований, используемые в ходе выполнения работы:

- метод фотометрической съемки при экспериментальном определении скоростей и ускорений движения карьерных автосамосвалов;
- методы математической статистики при обработке результатов экспериментальных исследований;

- методы компьютерного моделирования для получения зависимостей производительности, себестоимости и прибыли карьерных автосамосвалов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях Кузбасского государственного технического университета (Кемерово, 2003–2017); II Всероссийской молодежной научно-практической конференции по проблемам недропользования (Екатеринбург, 2008); XII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» Сибресурс–2008 (Кемерово, 2008); V Международной конференции «Инновации в технологиях и образовании» (Белово, 2012); V, VII, VIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «РОССИЯ МОЛОДАЯ» (Кемерово, 2013, 2015, 2016); Международной научно-практической конференции «Современная наука: Проблемы и пути их решения» (Кемерово, 2015); XXIV Международном научном симпозиуме «Неделя горняка–2016» (Москва, 2016); V Международной научной конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2016); Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы в горном деле» (Междуреченск, 2016); II Международной научно-практической конференции «Научно–технический прогресс: Актуальные и перспективные направления будущего» (Кемерово, 2016); III Международной научно-практической конференции «Интеграция современных научных исследований в развитие общества» (Кемерово, 2017).

Личный вклад автора заключается в формировании основной идеи; выборе метода исследований и непосредственном их выполнении; анализе полученных результатов и разработке модели работы экскаваторно-автомобильных комплексов (св. РФ № 2012616861); разработке методики оценки эффективности эксплуатации ЭАК.

Публикации

По теме диссертационного исследования автором опубликовано 17 работ, в том числе 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, включает в себя введение, 4 главы, заключение, список использованной литературы из 112 наименований, приложений. Диссертация содержит 43 рисунка и 11 таблиц.

1. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОСАМОСВАЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

1.1. Состояние и эксплуатационные показатели современного карьерного транспорта

Анализ состояния карьерного транспорта, эксплуатируемого на разрезах Кузбасса, показывает необходимость выработки конкретных рекомендаций по оптимальному выбору автомобильного транспорта карьеров, распределению его по забоям и экскаваторам, а также определения возможности оперативного управления этими параметрами в соответствии с меняющимися горнотехническими, дорожными, климатическими и другими условиями.

Автомобильный транспорт является основным видом транспорта в трех четвертях карьеров мира. Он используется для перевозки примерно 80 % всей горной массы, в т.ч. в США, Канаде и Южной Америке – около 85 %, в Австралии – примерно 100 %, в южной Африке – более 90 %. В России и странах СНГ удельный вес автомобильного транспорта приблизился к 75 % [1]. Кроме выполнения полного транспортного цикла, автомобильный карьерный транспорт достаточно широко используется в качестве одного из звеньев комбинированного транспорта.

Эффективность применения автомобильного транспорта в качестве основного карьерного транспорта, обуславливается его основными достоинствами, к которым относятся:

- высокая мобильность и маневренность, благодаря малым радиусам поворота;
- способность преодолевать достаточно крутые уклоны (до 80–100 ‰) и высокая скорость передвижения;
- относительно небольшие собственные размеры автомобиля;
- отсутствие необходимости в обустройстве специальных путей;

- автономность и, вследствие этого, возможность обеспечения большей оперативности управления и гибкости.

Эти качества карьерного автомобильного транспорта позволяют регулировать транспортные потоки, переносить места погрузки, применять погрузочную технику на более коротком фронте работ (чем при железнодорожном транспорте) [2].

Большие преодолеваемые уклоны и малые радиусы поворота дают возможность сократить объем работ по обустройству транспортных коммуникаций и заметно сократить их длину. Высокая маневренность карьерных автосамосвалов также позволяет снизить в несколько раз трудоемкость отвалообразования, по сравнению с железнодорожным транспортом, за счет применения бульдозеров вместо экскаваторов или плугов.

Затраты на строительство карьерных автодорог в 2,5–3,5 раза меньше по сравнению с устройством железнодорожных путей, на мягких песчаных и глинистых грунтах, и в 1,2–1,5 раза – на естественном скальном основании [2]. При этом полностью отсутствует затратный и трудоемкий процесс переноса путей. Также меньшими являются затраты труда на процесс перевозки в целом, благодаря сокращению количества путевых рабочих, вспомогательного, ремонтного и обслуживающего персонала [2].

Большая оперативность и гибкость управления погрузочно-транспортным комплексом обеспечивается тем, что автосамосвалы функционируют независимо друг от друга, и каждый из них в любое время может быть направлен к любому из экскаваторов. Помимо этого, выход карьерного автосамосвала из строя в результате поломки практически не влияет на производительность, так как не вызывает остановки работы карьерного автомобильного транспорта в целом.

Кроме достоинств автомобильный карьерный транспорт имеет и недостатки, основными из которых являются следующие:

- небольшие экономически целесообразные расстояния транспортировки (до 5 км), меньшее количество перевозимого груза каждым отдельным

автосамосвалом, большими амортизационными отчислениями, связанными с коротким сроком службы карьерных автосамосвалов (4–5 лет), что увеличивает себестоимость транспортирования горной массы [3];

- большая стоимость ремонта и содержания карьерных автосамосвалов, доходящая до 30–33 % стоимости перевозок [3], а также зависимость работы карьерных автосамосвалов от поставок горюче-смазочных материалов и запасных частей;

- высокая зависимость от климатических условий (усложнения эксплуатации при снегопадах, низких температурах, гололедице);

- повышенный расход автомобильных шин в результате их быстрого износа при работе на скальных породах (стоимость шин достигает 20–22 % стоимости перевозок) [3];

- значительная загазованность, создаваемая карьерными автосамосвалами, что вызывает необходимость искусственного проветривания карьеров; в противном случае в периоды туманов, безветрия, пасмурной погоды необходимо останавливать проведение горных работ иногда на длительные периоды времени.

При анализе изменения основных показателей работы парка большегрузных автосамосвалов, эксплуатируемых на разрезах Кузбасса в период с 2005 по 2014 гг., использовались данные, полученные в ОАО «УК Кузбассразрезуголь».

Производительность автомобиля и автопарка принято оценивать двумя основными показателями: объемом перевезенной горной массы и грузооборотом (транспортной работой) за анализируемый период времени.

Основные эксплуатационные показатели, характеризующие эффективность использования карьерного автомобильного транспорта, отображены в табл. 1.1.

Технологический автотранспорт на угольных разрезах Кузбасса эксплуатируется в широком спектре климатических и горнотехнических условий. Это связано, прежде всего, с большими различиями в географическом

расположении карьеров, их различной производительностью, глубиной, типом рельефа местности, формой залегания полезного ископаемого, крепостью горных пород и так далее. В свою очередь такое различие в условиях эксплуатации обуславливает различия в основных эксплуатационных показателях. Так, например, значительное различие в длинах плеч откатки на различных разрезах обусловили большие колебания в количестве выполненной транспортной работы для перевозки соответствующего объема горной массы (табл. 1.1, рис. 1.1).

Кроме расстояния перевозки на годовую производительность одного среднесписочного автосамосвала существенное влияние оказывает структура парка карьерных автосамосвалов по их грузоподъемности (табл. 1.2, рис. 1.2).

Таблица 1.1

Основные эксплуатационные показатели по разрезам
ОАО «УК Кузбассразрезуголь» в 2014 году

Наименование разреза, автобазы	Объем пере- возок, тыс. т	Грузооборот, тыс. т·км	Среднее расстояние перевозки, км	Среднеспи- сочное коли- чество авто- самосвалов, ед.
ОАО «УК КРУ»	7799943,6	2106679,6	2,7	478,8
р-з «Кедровский»	94507,6	212662,0	2,25	49,8
р-з «Моховский»	45657,1	99579,6	2,18	36,4
р-з «Караканский»	20242,3	48647,3	2,4	15,6
р-з «Бачатский»	105760,0	436413,1	4,13	64,1
р-з «Краснобродский»	105774,3	284232,3	2,69	62,2
р-з «Вахрушевский»	47058,3	111070,7	2,36	27,2
р-з «Талдинский»	213603,5	536801,4	2,51	117,6
р-з «Осинниковский»	35020,2	114951,8	3,28	22,2
р-з «Ерунаковский»	37106,8	122980,4	3,31	32,9
р-з «Сартакинский»	32239,5	49349,9	1,53	25,0
р-з «Калтанский»	42974,0	89991,1	2,09	25,9

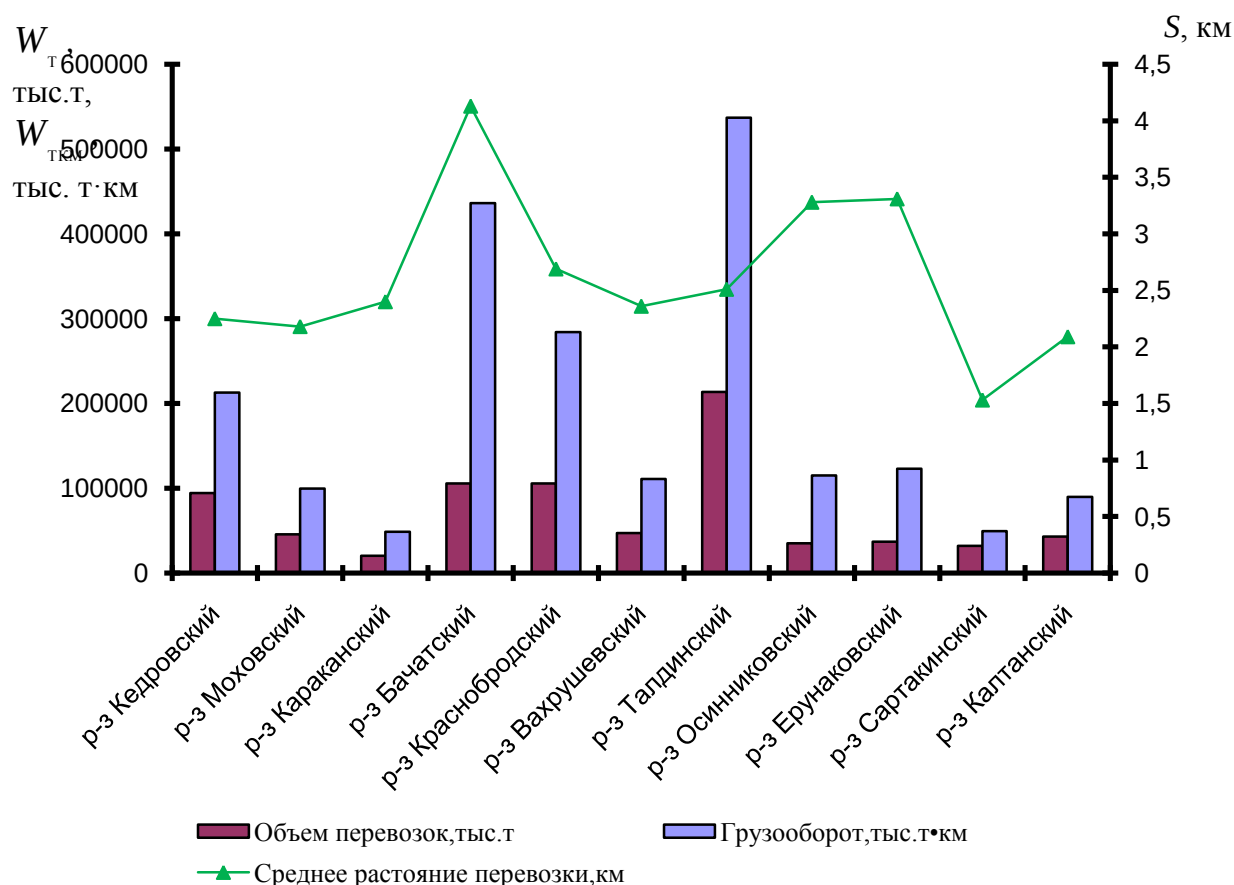


Рис. 1.1. Объем перевозок W_T , грузооборот W_{TKM} и среднее расстояния перевозки S для разрезов ОАО «УК Кузбассразрезуголь» за 2014 год

Анализ рис. 1.2 показывает, что при большом разбросе значений средней грузоподъемности автосамосвалов производительность одного среднесписочного автосамосвала для различных разрезов находится примерно на одном и том же уровне. Наиболее показательным в этом отношении является разрез «Бачатский»: при средней грузоподъемности 188 т производительность составляет 1651,16 тыс. т. А, например, на «Калтанском» разрезе при той же производительности – средняя грузоподъемность 98 т, т. е. ниже на 47,88 %.

Таблица 1.2

Средняя грузоподъемность автосамосвалов и годовая производительность среднесписочного автосамосвала в 2014 г.

Наименование разреза, автобазы	Производительность одного среднесписочного автосамосвала, тыс. т	Грузооборот одного среднесписочного автосамосвала, тыс. т·км	Средняя грузоподъемность автосамосвала, т
р-з «Кедровский»	1898,16	4271,26	145
р-з «Моховский»	1253,56	2734,05	79
р-з «Караканский»	1298,17	3119,81	88
р-з «Бачатский»	1651,16	6813,42	188
р-з «Краснобродский»	1700,25	4568,84	139
р-з «Вахрушевский»	1732,7	4089,65	104
р-з «Талдинский»	1816,48	4564,95	143
р-з «Осинниковский»	1577,77	5178,94	123
р-з «Ерунаковский»	1128,90	3741,42	82
р-з «Сартакинский»	1289,84	1974,39	73
р-з «Калтанский»	1659,16	3474,43	98

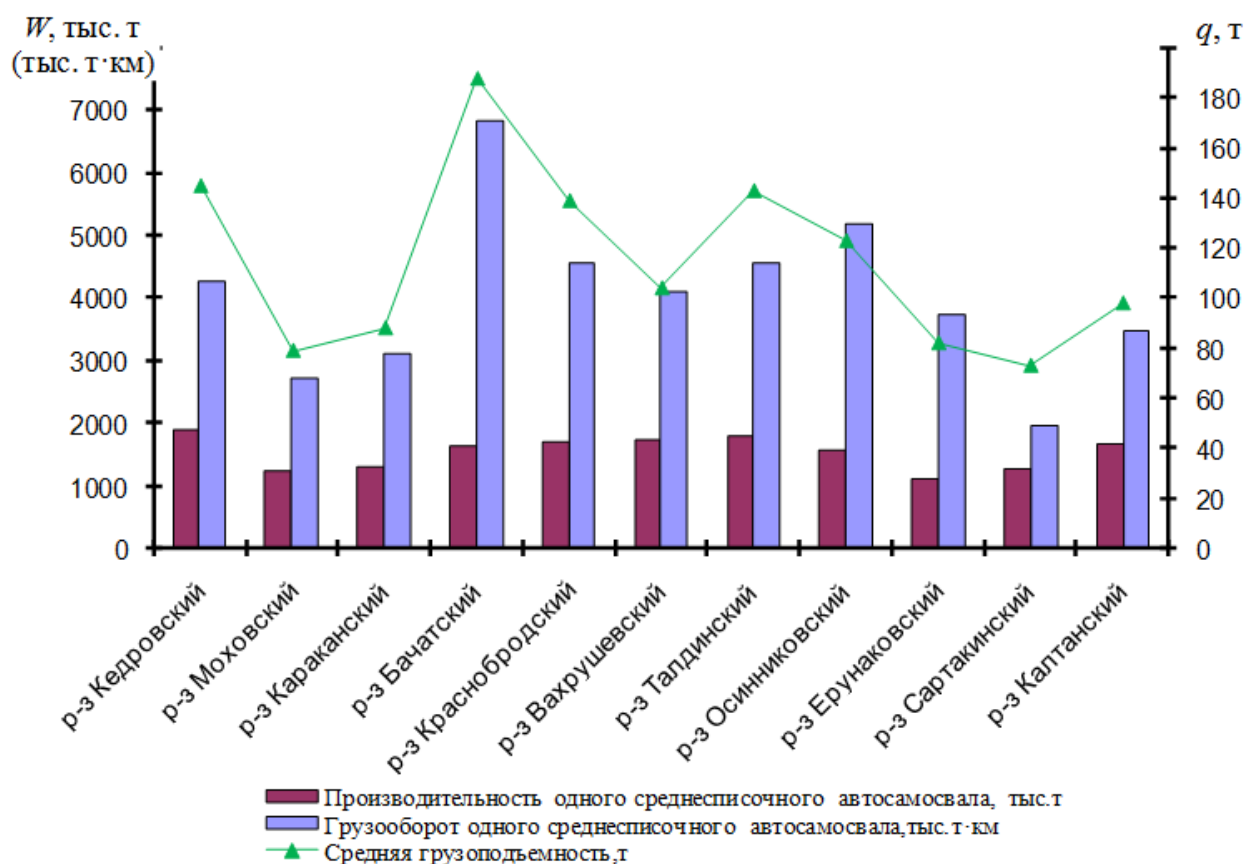


Рис. 1.2. Производительности автосамосвалов W и их средняя грузоподъемность q для разрезов ОАО «УК Кузбассразрезуголь» в 2014 году

Одними из наиболее важных показателей интенсивности эксплуатации карьерных автосамосвалов являются их эксплуатационная скорость, простои в течение рейса и внутрисменные простои, характеризующие потери рабочего времени в силу действия различных причин. Средние значения этих параметров за 2014 год для различных разрезов приведены в табл. 1.3 и на рис. 1.3–1.4.

Большой интерес представляет собой структура внутрисменных простоев карьерных автосамосвалов и, соответственно, потерь в объемах перевозок, вызванных этими простоями (рис. 1.3, 1.4). Наибольший вес потерь рабочего времени имеют потери по вине самих разрезов, то есть по причине организационного характера. Потери, вызванные внутрисменными простоями автосамосвалов в ОАО «УК Кузбассразрезуголь», составили в 2014 г. 3600,8 тыс. м³ (табл.1.3).

Таблица 1.3

Средние значения показателей простоев и эксплуатационной скорости для разрезов ОАО «УК Кузбассразрезуголь» в 2014 году

Наименование разреза	Внутрисменные простои, мото·ч	Потери горной массы, тыс. м ³	Эксплуатационная скорость, км/ч
ОАО «УК КРУ»	32411,4	3600,8	14,61
р-з «Кедровский»	17981,2	2098,8	11,92
р-з «Моховский»	816,3	49,4	17,08
р-з «Караканский»	1158,8	133,4	13,21
р-з «Бачатский»	2934,4	413,3	15,4
р-з «Краснобродский»	2630,7	279,8	15,39
р-з «Вахрушевский»	554,1	63,6	14,96
р-з «Талдинский»	2481,0	295,1	14,81
р-з «Осинниковский»	275,5	25,6	13,58
р-з «Ерунаковский»	1109,0	59,8	18,31
р-з «Сартакинский»	1876,2	103,2	13,58
р-з «Калтанский»	594,2	78,9	12,63



Рис. 1.3. Распределение внутрисменных простоев автосамосвалов в ОАО «УК Кузбассразрезуголь» в 2014 году



Рис. 1.4. Распределение потерь объема перевозок (производительности автосамосвалов) по ОАО «УК Кузбассразрезуголь» в 2014 году

Из рис. 1.3 и 1.4 видно, что основная доля внутрисменных простоев 88,12 %, снижающих производительность автосамосвалов, и потери в объе-

мах перевозок 89,53 % происходят по организационно-техническим причинам, которые при рациональной организации работы автосамосвалов могут быть устранены или значительно снижены в отличие от простоев (11,88 %) и потерь (10,47 %), вызванных климатическими условиями.

На производительность карьерных автосамосвалов влияет множество факторов, которые можно разделить на следующие группы [4]:

- физико-механические свойства перевозимых грузов, а также условия залегания месторождения;
- климатические условия производства открытых горных работ;
- техническое состояние и структура парка большегрузных автосамосвалов, а именно, технические характеристики и типы применяемых автосамосвалов, их возраст и техническое состояние, состояние производственно-технической базы, квалификация обслуживающего персонала и т. д.

Из широкого спектра физико-механических свойств горных пород на производительность ЭАК существенное влияние оказывает их крепость и плотность. Они оказывают значительное влияние на скорость выполнения операций процессов погрузки автосамосвала и транспортирования горной массы.

Существенное влияние на работу горного оборудования оказывают климатические условия открытых горных работ, а именно: температура и влажность окружающего воздуха, высота над уровнем моря, запыленность, количество и интенсивность осадков, скорость ветра. Климатические условия на карьерах Кузбасса характеризуются как умеренные [1].

Надежность автосамосвалов и другого горного оборудования зависит от их конструктивных особенностей, качества изготовления и от многочисленных факторов, характеризующих условия эксплуатации, таких как горно-технические факторы, качество дорожных покрытий, организованность процессов технической эксплуатации, режимы и качество технического обслуживания и др.

Динамика изменения основных показателей, характеризующих эффективность использования карьерного автомобильного транспорта, отображена в табл. 1.4 и на рис. 1.5–1.9.

При анализе изменения состояния парка большегрузных автосамосвалов, эксплуатируемых на разрезах Кузбасса в период с 2005 по 2014 годы, использовались данные, полученные в ОАО «УК Кузбассразрезуголь».

Анализируя результаты, приведенные на рис. 1.5, можно сделать вывод, что в период 2005–2013 г. такие показатели, как объем перевозок и грузооборот постоянно увеличивались. Однако при увеличении объема перевозок на 128 % грузооборот вырос на 143 %. То есть прослеживается некоторая тенденция к увеличению расстояний транспортирования, что может быть вызвано как увеличением глубины карьеров, так и нерациональной планировкой карьерных полей.

В 2014 г. произошло снижение объема перевозок и грузооборота на 5 % и 9 % соответственно, что можно объяснить снижением числа автосамосвалов.

Из анализа результатов, приведенных в табл. 1.4 и на рис. 1.6–1.9 можно сделать вывод о том, что среднесписочное количество автомобилей сокращалось до 2010 г., потом начало расти, а с 2013 г. снова снижается при одновременном увеличении средней грузоподъемности автосамосвалов в течение последних десяти лет. Это вызвано вводом в эксплуатацию автосамосвалов большей грузоподъемности, что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к надежности и эффективности использования подвижного состава. Увеличение средней грузоподъемности автосамосвалов привело к тому, что, начиная с 2013 г., наблюдается снижение производительности одной автотонны при одновременном росте производительности одного автосамосвала.

Таблица 1.4

Основные показатели работы автотранспорта на разрезах ОАО «УК Кузбассразрезуголь» с 2005 по 2014 г.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Среднее расстояние транспортирования, км	3,13	2,78	2,68	2,72	2,79	2,88	3,01	2,98	2,84	2,7
Грузооборот одного среднесписочного автосамосвала, тыс. т·км	1905,01	2231,32	2455,49	2788,65	3137,13	3430,87	4279,55	4546,6	4547,37	4400,1
Среднесписочное количество автосамосвалов	507,2	458,5	452,1	432,2	411	404,3	421,0	491,7	513	478,8
Объем перевозок, тыс. т	359453	382204,8	462598,9	444827,1	465568,4	519504,0	597927,6	750482,9	821446,1	779943,6
Грузооборот, тыс. т·км	966220	1061453,8	1195318,4	1221646	1315240,2	1492630,3	1801862,2	2235652,6	2332930,3	2106679,6
Коэффициент использования пробега	0,463	0,466	0,473	0,476	0,478	0,480	0,483	0,486	0,488	0,489
Коэффициент использования грузоподъемности	0,855	0,882	0,885	0,902	0,920	0,930	0,935	0,935	0,946	0,946
Коэффициент использования парка	0,629	0,713	0,729	0,746	0,783	0,718	0,831	0,838	0,814	0,817
Эксплуатационная скорость, км/ч	13,8	13,59	13,38	13,37	13,65	14,61	15,01	15,18	14,56	13,79
Удельный расход топлива, г/т·км	112,97	109,85	103,15	97,1	94,82	89,13	84,72	84,21	84,12	82,34
Средняя грузоподъемность автосамосвалов, т	86,3	88,6	90,7	94,8	99,0	105,2	111,0	114,0	124,0	129,0
Производительность 1 автотонны, т·км	22070	25600	27070	29420	32040	35090	38410	39760	36670	34150
Производительность 1 автотонны, т	8210	9380	10100	10820	11480	12190	12750	13350	12910	12640

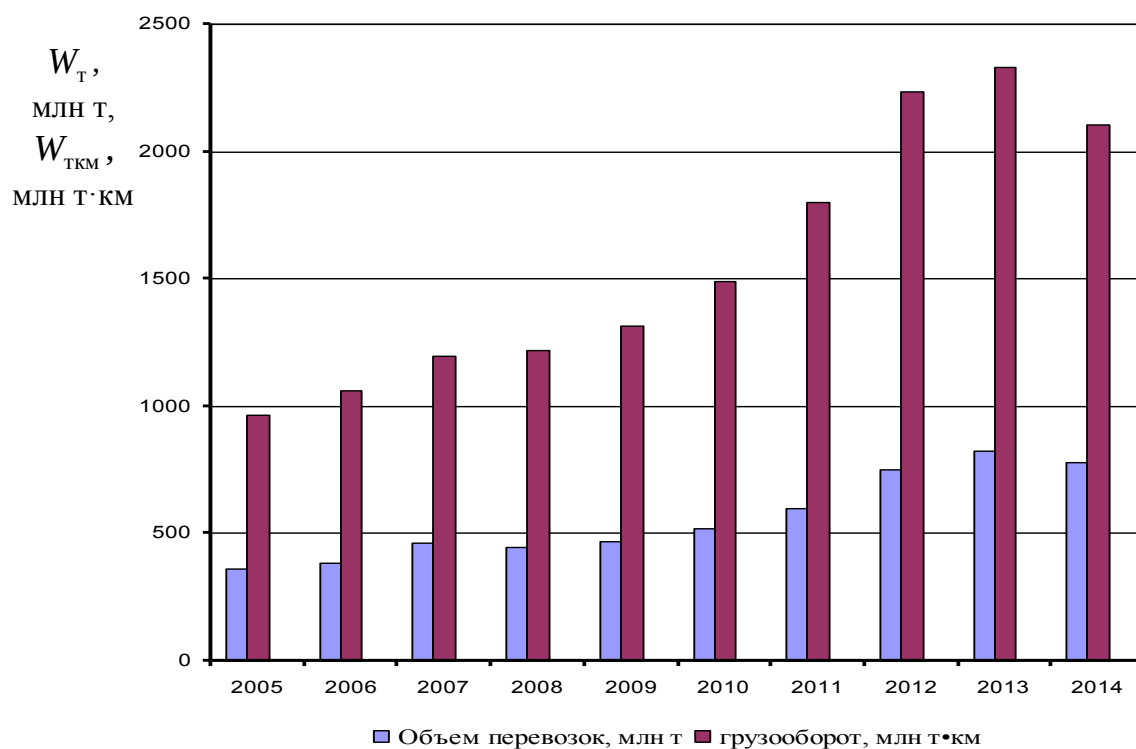


Рис. 1.5. Изменение объема перевозок W_T и грузооборота W_{TKM} по годам на разрезах ОАО «УК Кузбассразрезуголь»



Рис. 1.6. Изменение средней грузоподъемности q и среднесписочного количества A_{cp} автосамосвалов в ОАО «УК Кузбассразрезуголь» по годам

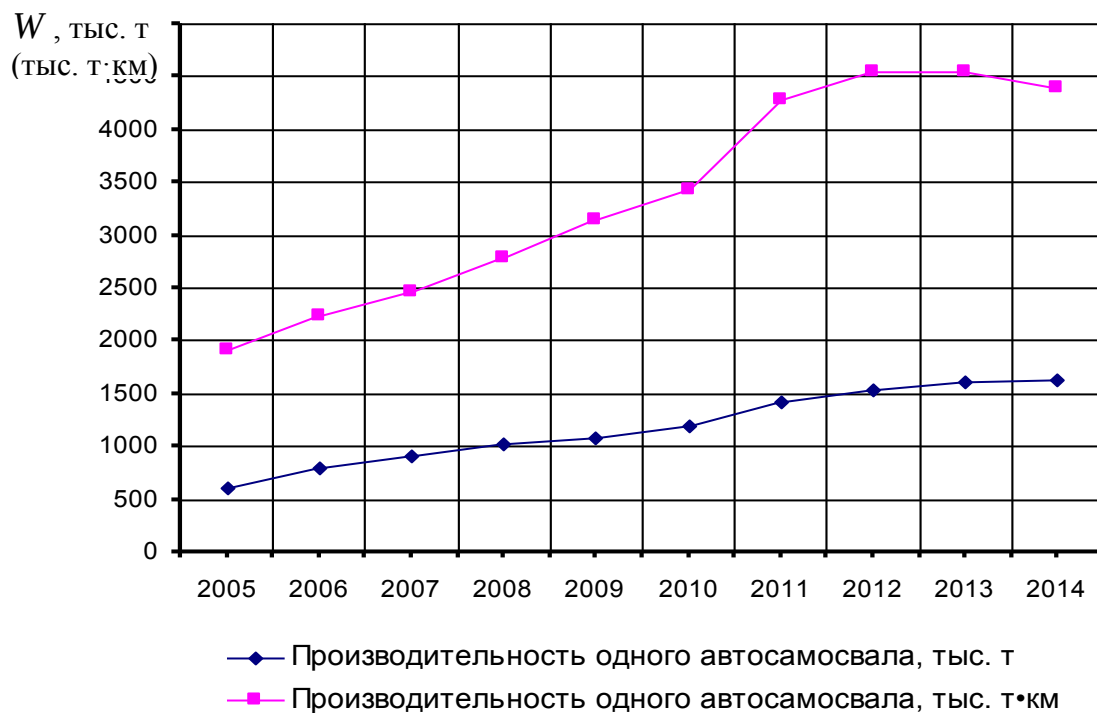


Рис. 1.7. Изменение производительности W одного среднесписочного автосамосвала ОАО «УК Кузбассразрезуголь» по годам

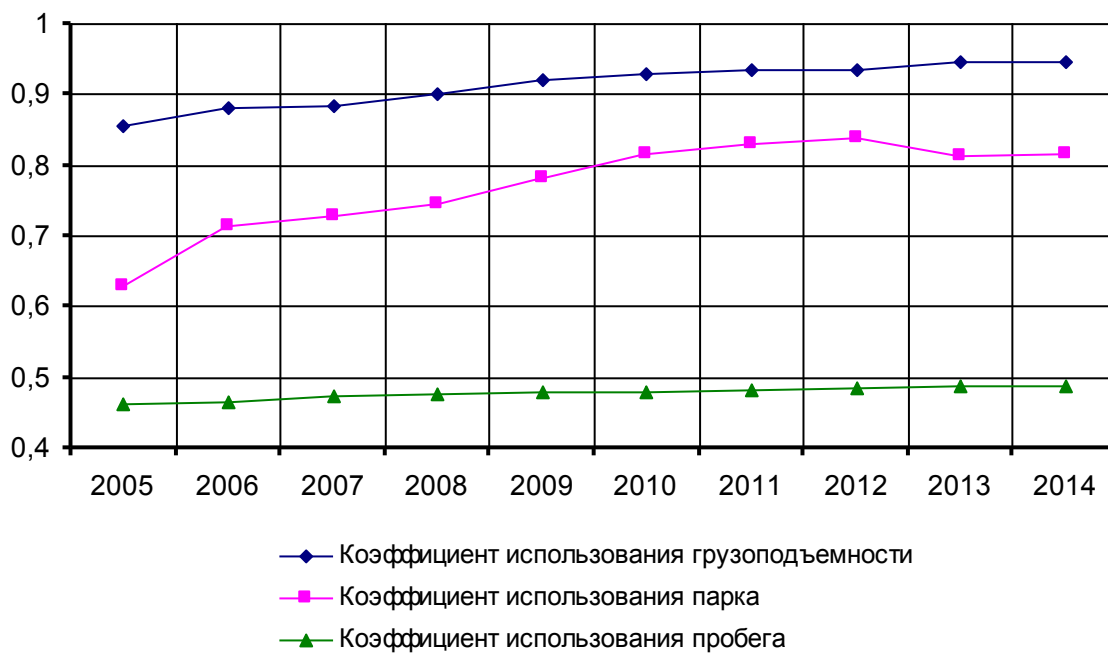


Рис. 1.8. Изменение комплексных показателей эффективности использования автосамосвалов ОАО «УК Кузбассразрезуголь» по годам

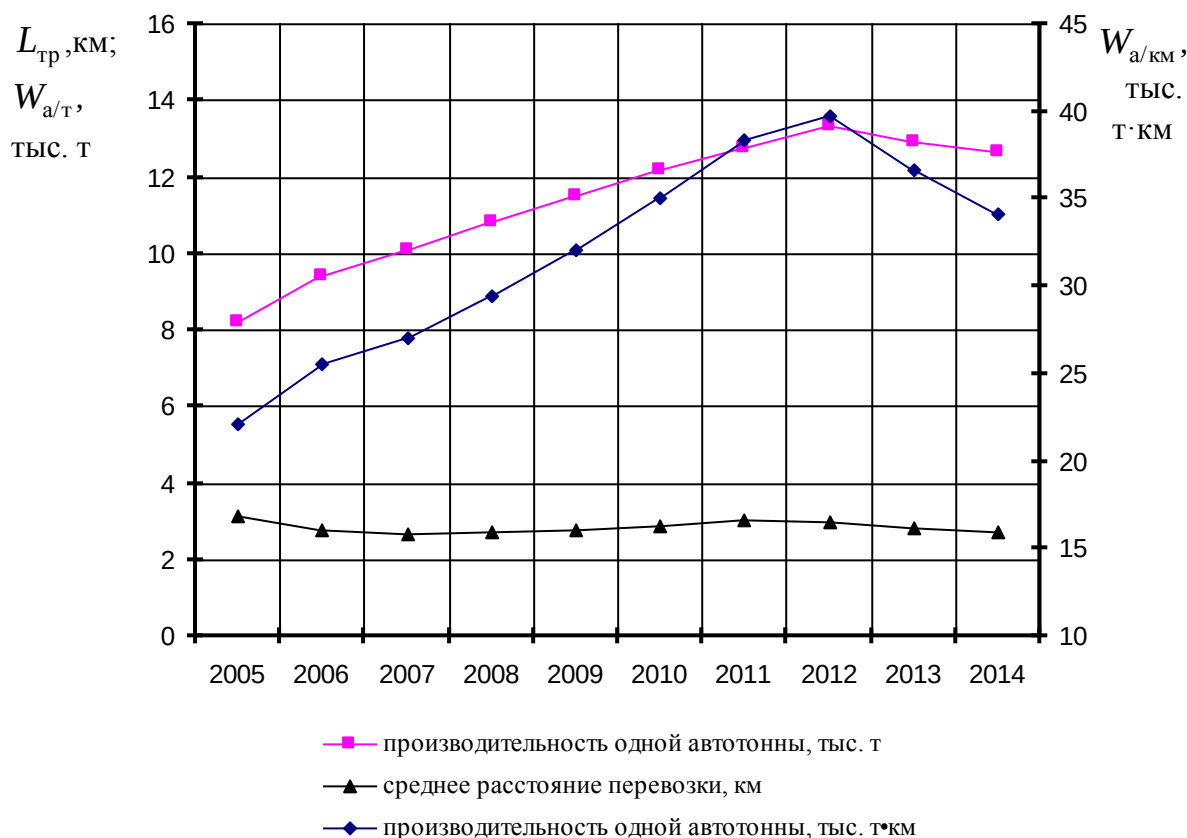


Рис. 1.9. Изменение производительности автосамосвалов за 10 лет эксплуатации на предприятиях ОАО «УК Кузбассразрезуголь»

Кроме того, увеличение коэффициентов использования грузоподъемности и использования парка говорит о том, что автосамосвалы эксплуатируются все более интенсивно, а это также может сказаться на их надежности и, следовательно, на производительности.

Также, снижение среднего расстояния транспортирования в процессе разработки месторождения полезного ископаемого является следствием увеличения дорожных уклонов, что привело к снижению эксплуатационной скорости автосамосвалов в 2013–2014 г.

1.2. Направления исследований и рекомендации по повышению производительности экскаваторно-автомобильных комплексов

Одним из направлений повышения эффективности использования экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) является совершенствование организации перевозки горной массы и процесса погрузки. Большинство авторов считают производительность и себестоимость перевозки горной массы основными показателями эффективности работы ЭАК [1, 5–7].

Одним из основных условий эксплуатации экскаваторов и автосамосвалов с максимальной эффективностью является их согласованная работа. Большое количество факторов оказывают влияние на работу ЭАК. При исследовании их влияния на эффективность эксплуатации ЭАК применяются следующие подходы:

- использование теоретических зависимостей, которые дают несколько завышенные результаты, поскольку не учитывается вероятностный характер процесса [1];
- использование экспериментальных методов получения данных по эксплуатации ЭАК в различных условиях, их последующая обработка методами математической статистики для получения регрессионных зависимостей. Полученные регрессионные зависимости отличаются достаточной точностью результатов, но применимы только в горнотехнических условиях, типичных для данного карьера, а проведение натурных экспериментов требует больших временных и материальных затрат [1];
- использование имитационного моделирования с применением вычислительной техники, позволяет оценивать влияние на производительность и себестоимость как комплекса факторов в целом, так и каждого фактора в отдельности [1].

Высокие эксплуатационные затраты и значительная стоимость автосамосвалов приводят к необходимости изыскания путей их рационального использования на разрезах Кузбасса, где опыт использования карьерных авто-

самосвалов показал, что с ростом их грузоподъемности возрастают требования к надежности, ремонтпригодности и к уровню эксплуатации. Рациональная организация эксплуатации карьерных автосамосвалов на разрезе является одним из путей интенсификации применения автомобильного транспорта. Процесс технического перевооружения определяет необходимость не только замены одной марки карьерных автосамосвалов на другую, но и корректирование используемых на разрезе технологических решений, а также обеспечения условий, позволяющих использовать новую технику на максимальном уровне. Таким образом, процесс перевооружения должен сопровождаться созданием соответствующих технологий для их применения в достаточно сложных геологических условиях разрезов Кузбасса.

Теоретические и научные основы организации погрузочно-разгрузочных работ и эффективной эксплуатации функциональных машин ЭАК изложены в трудах Васильева М.В. [4, 7–9, 11, 12], Мельникова Н.В. [13] Астафьева Ю.П. [14, 15], Кулешова А.А. [1, 6, 16–21], Яковенко Б.В. [22], Малюты Д.И. [23], Спиваковского А.О. [24, 25], Беякова Ю.И. [26, 27], Гордиенко Б.В. [28, 29] и других.

Карьерный автомобильный транспорт эксплуатируется на разрезах с разнообразными видами погрузочного оборудования и транспортирует горную массу с различными физико-механическими свойствами.

Практика использования карьерных автосамосвалов на ведущих карьерах показывает, что до 70 % перевозимых вскрышных пород имеет объемный вес $2,2\text{--}2,7\text{ т/м}^3$, большая часть руд цветных и черных металлов характеризуется объемным весом от $2,9$ до $3,8\text{ т/м}^3$, у каменного угля объемный вес составляет $1,1\text{--}1,3\text{ т/м}^3$ [30].

Конструктивным параметром карьерного автосамосвала, осуществляющим взаимосвязь между объемной массой горной породы, емкостью ковша экскаватора и грузоподъемностью автосамосвала является емкость кузова карьерного автосамосвала [9].

В работе [7] авторы на основании проведенных исследований отмечают, что рациональным соотношением между объемом кузова карьерного автосамосвала и ковшем экскаватора следует считать 4:1, а максимальным – не более, чем 6:1–7:1.

В работе [16] приведены результаты исследования влияния соотношения емкости кузова автосамосвала (V_a) и ковша экскаватора (E) на стоимостные показатели открытой разработки, а также установлены рациональные его значения в зависимости от расстояния транспортирования (L): 4–6 при L до 1,5 км, 6–10 при L до 5 км и 8–10 при L свыше 5 км.

Рекомендуемые различными авторами рациональные соотношения V_a/E примерно одинаковы при коротких расстояниях транспортирования (до 1,0–1,5 км). При больших расстояниях транспортирования (свыше 1,5 км) рекомендации значительно различаются [16].

При выборе оптимальных экскаваторно-автомобильных комплексов большую роль играет такой показатель, как производительность автосамосвалов и экскаватора.

Производительность автосамосвала определяется [12]:

$$W_a = \frac{T_{см} - T_{пз}}{\Delta t_a + t_{погр} + t_{мп} + t'_{дв} + t''_{дв} + t_{разгр}} q K_q, \text{ т/ч}, \quad (1.1)$$

где $T_{см}$ – продолжительность смены, ч; $T_{пз}$ – продолжительность подготовительно-заключительных операций, ч; Δt_a – продолжительность ожидания погрузки, ч; $t_{погр}$ – продолжительность погрузки, ч; $t_{мп}$ – продолжительность маневрирования автосамосвала под погрузку, ч; $t'_{дв} + t''_{дв}$ – продолжительность движения автосамосвала в обоих направлениях, ч; $t_{разгр}$ – время на маневры и разгрузку автосамосвала, ч; q – грузоподъемность автосамосвала, т; K_q – коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала.

В работе [22] авторы для определения производительности предлагают следующую формулу:

$$W_a = \frac{T_{см} - T_{пз}}{t_{ц}} q_a K_q K_{иа}, \quad (1.2)$$

где $t_{ц}$ – продолжительность транспортного цикла, ч; $K_{иа}$ – коэффициент использования автосамосвалов

$$K_{иа} = \left[n - \sum_{k=2}^n (\kappa - 1) P_k \right] / n, \quad (1.3)$$

где n – число автосамосвалов у экскаватора; P_k – вероятность того, что в любой момент времени у экскаватора будет находиться k автосамосвалов.

В работе [15] производительность автосамосвалов рассчитывается по следующим формулам:

$$W_a = \frac{q\gamma V_t \beta}{l_{ег} + T_{пр} V_t \beta}, \text{ т/ч} \quad \text{или} \quad W_a = \frac{q\gamma}{\frac{l_{ег}}{V_t \beta} + T_{пр}}, \text{ т/ч}, \quad (1.4)$$

$$W_a = \frac{q\gamma V_t \beta l_{ег}}{l_{ег} + T_{пр} V_t \beta}, \text{ т} \cdot \text{км/ч} \quad \text{или} \quad W_a = \frac{q\gamma l_{ег}}{\frac{l_{ег}}{V_t \beta} + T_{пр}}, \text{ т} \cdot \text{км/ч}, \quad (1.5)$$

где q – грузоподъемность автосамосвала, т; V_t – техническая скорость автосамосвала, км/ч; γ – коэффициент использования грузоподъемности; β – коэффициент использования пробега; $l_{ег}$ – длина ездки с грузом, км; $T_{пр}$ – продолжительность простоя автосамосвала за один рейс, ч.

$T_{\text{пр}}$ складывается из продолжительности погрузки $t_{\text{погр}}$, маневрирования под погрузку и разгрузку $t_{\text{мп}}$ и $t_{\text{мр}}$, ожидания погрузки и разгрузки $t_{\text{ож}}$ и продолжительности других простоев $t_{\text{пр}}$ [4]

$$T_{\text{пр}} = t_{\text{погр}} + t_{\text{мп}} + t_{\text{мр}} + t_{\text{разгр}} + t_{\text{ож}} + t_{\text{пр}}. \quad (1.6)$$

По практическим данным $t_{\text{ож}}$ должно быть не больше продолжительности погрузки одного автосамосвала, а в среднем должно составлять около $0,5t_{\text{погр}}$ [4].

Различают теоретическую, техническую и эксплуатационную производительность экскаватора [27].

Теоретическая производительность

$$Q = 60qn, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1.7)$$

где q – геометрическая емкость ковша, м^3 ; n – расчетное число циклов экскаватора в минуту, $n = 60/t_{\text{ц}}$, где $t_{\text{ц}}$ – теоретическая продолжительность цикла экскаватора, с. Тогда

$$Q = \frac{3600q}{t_{\text{ц}}}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (1.8)$$

Теоретическая производительность определяется расчетным путем, исходя из конструктивных параметров экскаваторов при высоте забоя, разгрузке в отвал и угле поворота 90° ;

Техническая производительность учитывает условия работы экскаватора в забое и является максимально возможной для данной модели при непрерывной работе в конкретных условиях:

$$Q_{\text{т}} = \frac{3600q}{t_{\text{ц}}} \cdot \frac{K_{\text{н}}}{K_{\text{рк}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1.9)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения ковша экскаватора; $K_{\text{рк}}$ – коэффициент разрыхления горной массы в ковше;

Эксплуатационная производительность экскаватора за смену учитывает использование его во времени:

$$Q_{\text{э}} = \frac{3600q}{t_{\text{ц}}} \cdot \frac{K_{\text{н}}}{K_{\text{рк}}} T_{\text{см}} K_{\text{в}}, \text{ м}^3/\text{смену}, \quad (1.10)$$

где $K_{\text{в}}$ – коэффициент использования сменного времени экскаватора; $T_{\text{см}}$ – число часов сменного времени.

$K_{\text{в}}$ учитывает передвижки экскаватора, осмотр, ожидание транспорта, неподготовленность забоя и так далее.

В работе [26] автор предлагает определять сменную производительность экскаватора по выражению:

$$Q_{\text{см}} = \frac{3600E}{t_{\text{ц}}} K_{\text{э}} K_{\text{тр}} (T_{\text{см}} - t_{\text{по}}), \text{ м}^3/\text{смену}, \quad (1.11)$$

где E – объем ковша экскаватора, м^3 ; $K_{\text{э}}$ – коэффициент экскавации; $K_{\text{тр}}$ – коэффициент ожидания транспорта, учитывающий неравномерность его подачи; $t_{\text{по}}$ – время регламентированных и организационных перерывов, ч.

Производительность экскаватора при погрузке породы в работе [31] определяется:

$$Q_{\text{э}} = q_{\text{п}} \frac{3600}{t_{\text{п}}} K_{\text{в}}, \text{ т/ч}, \quad (1.12)$$

где q_{Π} – вес породы в кузове автосамосвала, т; t_{Π} – продолжительность погрузки; $K_{\text{в}}$ – коэффициент использования сменного времени.

В работе [32] автор отмечает, что производительность экскаватора оказывает значительное влияние на работу карьерных автосамосвалов при расстояниях транспортирования до 3–5 км, а при увеличении расстояния перевозки – практически не влияет на работу автотранспорта.

Продолжительность погрузки определяется по формуле [31]:

$$t_{\Pi} = t_{\Pi} n_k + t_{\text{мп}}, \text{ ч}, \quad (1.13)$$

где n_k – количество ковшей, загружаемых в автосамосвал; $t_{\text{мп}}$ – продолжительность обмена груженого автосамосвала порожним или время маневра под погрузку, ч.

В работе [33] автор предлагает определять продолжительность погрузки следующим образом:

$$t = \frac{q}{Q_{\text{в}}} = \frac{q}{Ek_{\text{н}} \gamma_{\text{р}}} t_{\Pi}, \text{ час при } \gamma_{\text{р}} \geq \frac{q}{V_{\text{а}}}, \quad (1.14)$$

$$t = \frac{q}{Q_{\text{о}}} = \frac{V_{\text{а}}}{Ek_{\text{н}}} t_{\Pi}, \text{ час при } \gamma_{\text{р}} < \frac{q}{V_{\text{а}}}, \quad (1.15)$$

где $Q_{\text{в}}, Q_{\text{о}}$ – производительность экскаватора, соответственно, по массе (т/ч) и по объему ($\text{м}^3/\text{ч}$); $\gamma_{\text{р}}$ – насыпная плотность груза, $\text{т}/\text{м}^3$.

Продолжительность рабочего цикла экскаватора t_{Π} складывается из продолжительностей копания (черпания) $t_{\text{коп}}$, поворота экскаватора $t_{\text{пов}}$ и выгрузки $t_{\text{в}}$ [15]:

$$t_{\Pi} = t_{\text{коп}} + t_{\text{пов}} + t_{\text{в}}, \text{ ч}. \quad (1.16)$$

Продолжительность копания [34]:

$$t_{\text{коп}} = E \frac{K_9 K_{\text{рк}} K_F}{N \eta} \cdot 36,72, \text{ ч}, \quad (1.17)$$

где N – мощность подъемного двигателя экскаватора, кВт; η – КПД рабочего оборудования экскаватора.

Продолжительность поворота [34]:

$$t_{\text{пов}} = 8,08 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{\frac{I(1,37 + \eta_{\text{п}}^2) \beta^2}{N_{\text{max}} \eta_{\text{п}}}}, \text{ ч}, \quad (1.18)$$

где I – момент инерции вращающейся части экскаватора, Нмс²; $\eta_{\text{п}}$ – КПД механизма поворота; N_{max} – максимальная мощность поворотного двигателя, кВт; β – угол поворота экскаватора, рад.

Производительное использование автосамосвалов существенно зависит от схем подъезда и установки их у экскаватора [32]. Влияние при этом оказывают способ вскрытия месторождения, размеры рабочих площадок и условия экскаваторной погрузки. На работу экскаваторов существенное влияние оказывают также ширина заходки и высота уступа. От их выбора зависит продолжительность рабочего цикла экскаватора и его техническая производительность. При разработке мягких пород необходимо иметь минимальную ширину забоя, обеспечивающую наименьший угол поворота экскаватора β к разгрузке. Это достигается при рациональном расположении автосамосвалов относительно оси движения экскаватора. Соблюдение этих условий при разработке скальных пород, требующих предварительного рыхления, достигается только в тех случаях, когда развал породы после взрыва убирается за 2–3 прохода экскаватора с минимальной шириной заходки.

От ширины заходки из всех операций рабочего цикла экскаватора при прочих равных условиях зависит только время поворота, продолжительность

которого достигает 50–60 % времени цикла. Минимальная продолжительность поворота экскаватора может быть достигнута при минимальном угле поворота, который определяется схемой заезда и установки автосамосвала у экскаватора.

Схема установки автосамосвалов в пунктах погрузки и разгрузки, а также схема заезда определяют минимальные размеры маневровых площадок.

Аналитически длина маневрового пути груженого и порожнего автосамосвала описывается формулой [4]:

$$L_{\text{ман}} = 4l_a + \pi R_{\pi} + l_o, \text{ м}, \quad (1.19)$$

где l_a – длина автосамосвала, м; R_{π} – радиус поворота автосамосвала, м; l_o – расстояние между осевыми линиями автодорог для груженых и порожних автосамосвалов, м.

Продолжительность маневров автомобиля в пунктах приема горной массы [4]:

$$t_{\text{ман}} = \frac{L_{\text{ман}}}{V_{\text{ср}}} + \tau_{\text{н}}, \text{ с}, \quad (1.20)$$

где $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость маневров, м/с, $V_{\text{ср}} = \frac{V_1 + V_2}{2}$; V_1, V_2 – скорость движения передним и задним ходом, м/с; $\tau_{\text{н}}$ – дополнительное время для точной установки автосамосвала при разгрузке, с.

Время маневрирования автосамосвала зависит от принятой схемы заезда под погрузку или разгрузку [34]:

– при петлевой схеме заезда под погрузку:

$$t_{\text{ман}} = \frac{L_{\text{ман}}}{V_{\text{м}}}, \text{ с}, \quad (1.21)$$

где $V_{\text{м}}$ – скорость движения при маневрировании, м/с.

$$L_{\text{ман}} = 4 \frac{\pi n^{\circ}}{180 \cdot 1000} + R_{\text{п}}, \text{ м}, \quad (1.22)$$

где n° – угол поворота автосамосвала к погрузке, град.

– при тупиковой схеме заезда и при маневрировании груженого автосамосвала при разгрузке:

$$t_{\text{мп,мр}} = \frac{L_{\text{ман}}}{V_{\text{м}}} + t', \text{ с}, \quad (1.23)$$

где t' – дополнительное время на переключение передачи, с.

$$L_{\text{ман}} = \frac{2R_{\text{п}}}{1000} + \frac{2\pi n^{\circ}}{180 \cdot 1000} R_{\text{п}}, \text{ м}. \quad (1.24)$$

Скорости маневрирования карьерных автосамосвалов рекомендуется принимать [15]: 9,4 км/ч при тупиковом заезде; 10 км/ч при петлевом заезде; 9 км/ч при маневрировании автосамосвала под разгрузку.

Рекомендуемые радиусы поворота $R_{\text{п}}$ автосамосвалов при выполнении маневров [1]:

- при тупиковом заезде $R_{\text{п}} = (1,3–1,4)R_{\text{мин}}$;
- при петлевом заезде $R_{\text{п}} = (1,2–1,3)R_{\text{мин}}$;
- при маневрировании автосамосвала под разгрузку $R_{\text{п}} = (1,4–1,5)R_{\text{мин}}$,

где $R_{\text{мин}}$ – конструктивный минимальный радиус поворота.

Условие нормального разворота самосвалов [13]:

1. При встречном движении, когда проезд автосамосвала происходит по специально оставляемой на почве пласта транспортной площадке:

$$S = f + g \geq 2R_{\text{п}},$$

где S – ширина заходки экскаватора, м; $f = 0,5h$ – приращение развала породы к ширине заходки по целику, м; h – высота уступа по полезному ископаемому, м; g – ширина проезжей части, м;

2. При встречном движении в пределах площадки выработанной заходки по полезному ископаемому:

$$f + S > R_{\text{п}},$$

3. При поточном движении, возможном при разработке полезного ископаемого и вскрыше независимыми блоками с двумя выездами у каждого. В этом случае ширина площадки определяется как в первом случае.

В работе [65] автором предложена методика рациональной загрузки автосамосвалов, которая позволяет за счет снижения динамических нагрузок в процессе погрузки снизить простои автосамосвалов в ремонте и тем самым увеличить годовую производительность, но в ней не учитывается транспортная составляющая процесса добычи.

Таким образом, эффективность использования функциональных машин ЭАК в процессе погрузки в большей степени зависит от геометрических параметров рабочей площадки, которая в свою очередь определяется величиной уклона. С ростом глубины разработки это влияние будет все более существенным.

Вопросам экономико-математического моделирования работы горно-транспортного оборудования посвящены работы Васильева М.В. [10, 30, 35], Смирнова В.П. [36], Сироткина З.Л. [37], Белякова Ю.И. [27], Шпарь А.Г. [38], Кулешова А.А. [7], Веницкого К.Е. [32, 40], Воронова А.Ю. [84] и др.

Современные горные предприятия являются сложными производственными системами, эффективность функционирования которых во мно-

гом зависит от прогрессивности принятых решений на стадии проектирования и строительства, а также в период их работы. Поэтапное освоение месторождений связано с правильным выбором средств комплексной механизации, который требует на данном этапе информацию о параметрах бурового, экскавационного и транспортного оборудования для последующих этапов разработки, обуславливающих элементы технологических процессов. Выбор способа действия во всех звеньях оптимизации технологического процесса методами, связанными анализом минимального числа факторов и инженерных решений и базирующихся только на опыте и интуиции с традиционными мерками и представлениями, не всегда бывает эффективным. Единственно приемлемой в этих условиях является оптимизация управленческих решений операционными методами [17].

На первом этапе решения задач операционными методами устанавливаются переменные, ограничения на их изменение в исследуемом процессе, критерии оценки эффективности различных вариантов решений.

Второй этап сводится к построению модели, представляющей собой выраженные в математической форме основные взаимосвязи между статическими и динамическими структурными элементами задачи совместно с функцией цели и ограничениями на независимые переменные.

На заключительном этапе моделирования устанавливаются значения переменных, обеспечивающих выбор оптимального варианта по принятому критерию при заданном уровне функционирования, исследуются наиболее благоприятные сочетания переменных и последствия возможных отклонений от оптимального плана. Исследование операций завершается детальной интерпретацией полученных при оптимизации решений модели оптимального плана.

Проектирование открытых разработок методами исследования операций включает большой комплекс задач по экономической оценке месторождения, установлению оптимальных линейных параметров карьера, его производительности и режима горных работ, выбору схемы вскрытия и системы

разработки, выбору наиболее экономичного для данных условий оборудования, тесной увязке отдельных технологических звеньев в единую цепь по их величине и пространственному расположению. Среди них к числу основных относятся задачи установления оптимальных параметров сопряжено работающего горного и транспортного оборудования для отдельных его типов и конкретных условий [32].

Условия работы автосамосвалов могут быть самыми разными: погрузка в забоях осуществляется экскаваторами с различной емкостью ковша, разнообразны также расстояния транспортирования и профиль дорог на участках. Кроме того, в отдельные смены число одновременно работающих автосамосвалов и экскаваторов меняется. В этих условиях необходима четкая организация работы транспорта на основе рационального его использования.

Заслуживает внимания метод решения задачи оптимизации ЭАК, предложенный Венициким К.Е. [32], который отличается тем, что приведенные затраты оптимизируются одновременно по грузоподъемности автосамосвала и емкости ковша экскаватора. Для отыскания оптимальных значений, минимизирующих исходное выражение, определяются частные его производные соответственно по объему ковша и вместимости кузова и приравняются к нулю. Оптимальные параметры ЭАК устанавливаются совместным графическим решением системы уравнений в координатах E (объем ковша) и V_a (вместимость кузова). Принятые в модели допущения, что масса, мощность и производительность экскаватора могут быть представлены как функция емкости ковша, правомерны лишь для ограниченного круга экскаваторов, когда линейные параметры изменяются весьма незначительно или пропорционально емкости ковша.

Технико-экономическое сравнение видов карьерного транспорта в работе [39] производится при условии, что рассматриваемые варианты имеют оптимальные параметры. Это означает, что каждому из вариантов соответствует оптимальная транспортная схема в карьере, тип горного и транспортного оборудования, руководящий уклон путей, фронт работ и так далее.

Решение этой задачи осуществляется методом вариантов, при котором для конкретных условий проектирования рассматриваются технически возможные варианты применения транспортных средств и горного оборудования при соответствующих параметрах карьера, основными из которых являются глубина, длина фронта работ, мощность и угол падения пласта полезного ископаемого.

Применение этого метода в многовариантных расчетах предполагает использование средств вычислительной техники, позволяющей на основе экономико-математической модели карьера произвести необходимые технико-экономические расчеты.

Анализ полученных результатов позволяет выбрать оптимальное решение – вид транспорта, транспортных средств и соответствующее горное оборудование, но этот метод не учитывает совершенствование технических характеристик горнотранспортного оборудования и его замену в процессе разработки.

При моделировании погрузочно-транспортных работ с применением автомобильного транспорта в работе [40] независимыми переменными, подлежащими оптимизации применительно к конкретным технологическим условиям и задачам, являются рабочие параметры экскаваторов (емкость ковша и максимальная высота черпания), грузоподъемность автосамосвала и руководящий уклон капитальных траншей, но в ней не учитывается взаимосвязь тягово-скоростных свойств автосамосвалов и профиля трассы.

Потаповым М.Г. [41] методом статистического моделирования были установлены рациональные соотношения между сопряженными рабочими параметрами углевозов и экскаваторов. При этом учитывался вероятностный характер протекания погрузочного процесса, но не учтен транспортный процесс.

В работе [84] Вороновым А.Ю. разработана имитационная модель, позволяющая повысить эксплуатационную производительность ЭАК посредством оптимизации распределения автосамосвалов по пунктам погрузки. Ав-

тором предлагается за счет комбинированного закрепления автосамосвалов за экскаваторами снизить простои как автосамосвалов в пунктах погрузки, так и экскаваторов и тем самым повысить производительность. Транспортный процесс в работе практически не рассматривается, из всего разнообразия параметров, влияющих на процесс перевозки горной массы, учитываются лишь расстояние перевозки и скорость движения автосамосвалов.

В основу экономико-математической модели [7] положен метод статистического моделирования. Входные параметры в процессе моделирования систематически меняются: варьируются не только типы экскаваторов и автосамосвалов, но и условия их эксплуатации.

В качестве целевой функции эффективности комплекса приняты минимальные удельные приведенные затраты на погрузку и транспортирование одной тонны горной массы с учетом капиталовложений в непроизводительную сферу горного предприятия [7]:

$$C_{п.т.о} = [\Theta_{п.т} + (K_1 E_{к1} + K_2 E_{к2})] \rightarrow \min, \quad (1.25)$$

где $\Theta_{п.т}$ – эксплуатационные расходы на погрузку и транспортирование одной тонны горной массы, руб; K_1, K_2 – соответственно капитальные затраты в производственной и непроизводственной сферах предприятия, необходимые для создания погрузочно-транспортной системы карьера, приходящиеся на одну тонну горной массы, руб; $E_{к1}, E_{к2}$ – нормативные коэффициенты окупаемости капиталовложений.

В отдельных случаях в качестве целевой функции может быть принята максимальная производительность по комплексу с учетом всех вспомогательных процессов. Однако данная функция не имеет оптимума, то есть производительность будет постепенно расти с ростом рабочих параметров машин.

В каждом конкретном случае необходимо решить, что важнее на данном этапе для горного предприятия – минимальные приведенные затраты

или производительность по комплексу. Повышение производительности на погрузочно-транспортных работах может привести в отдельных случаях к увеличению приведенных затрат и себестоимости продукции из-за большой стоимости оборудования и технической базы его эксплуатации.

Для решения задачи определения оптимальных параметров работы карьерного автомобильного транспорта, поставленной автором в работе [30], принят следующий порядок:

1. Анализ и выбор реальных и перспективных горнотехнических и технологических условий эксплуатации автосамосвалов на карьерах, оказывающих влияние на показатели процесса транспортирования.
2. Установление статистических закономерностей и взаимосвязей режимов и показателей работы автомобильного транспорта с условиями эксплуатации и существующим оборудованием.
3. Выбор критериев оптимальности, отвечающих целям и задачам исследования.
4. Выбор метода решения, составление программ и решение задачи при существующих вариантах.
5. Анализ полученных результатов, выбор оптимальных параметров работы автотранспортных средств большой грузоподъемности и их классификация по виду автомобилей и условиям эксплуатации.

В основной массе моделей продольный уклон трассы либо не учитывается вовсе, либо принимается постоянным. Таким образом, не учитывается взаимосвязь профиля трассы с тягово-скоростными свойствами автосамосвалов.

1.3. Анализ известных методик определения экономических показателей эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов

Себестоимость транспортирования горной массы является важнейшим показателем эффективности использования ЭАК. Себестоимость может вы-

ражаться в затратах, отнесенных к единице перевезенного груза, совершенной транспортной работы или пробега. В структуре себестоимости карьерных перевозок большинство авторов выделяют три составляющих: транспортную, дорожную и погрузочно-разгрузочную.

В общем виде транспортная составляющая запишется в виде [44]:

$$S_{\square} = \frac{3_{\text{пер}} L + 3_{\text{пост}} T}{Q}, \quad (1.26)$$

где $3_{\text{пер}}$, $3_{\text{пост}}$ – соответственно, переменные и постоянные расходы, руб; T – расчетный период времени, ч; L – пробег автосамосвала за расчетный период, км; Q – производительность автосамосвала, т (т·км).

При расчетах себестоимости в течении коротких периодов, например в течении смены, авторы рекомендуют использовать следующие формулы [42]:

$$S_{T\square} = \frac{\frac{L}{\beta} \left(3_{\text{пер}} + \frac{3_{\text{пост}}}{VK_{\text{в}}} \right) + 3_{\text{пост}} \frac{t_{\text{пр}}}{K_{\text{в}}}}{G_{\text{г}} K_3}, \quad (1.27)$$

$$S_{\text{ткм}\square} = \frac{\frac{L}{\beta} \left(3_{\text{пер}} + \frac{3_{\text{пост}}}{VK_{\text{в}}} \right) + 3_{\text{пост}} \frac{t_{\text{пр}}}{K_{\text{в}}}}{LG_{\text{г}} K_3}, \quad (1.28)$$

где $S_{\text{т}}$, $S_{\text{ткм}}$ – себестоимость, соответственно 1 тонны, 1 тоннокилометра, руб/т, руб/ткм; L – расстояние транспортирования, км; β – коэффициент использования пробега; V – среднетехническая скорость движения автосамосвала, км/ч; $G_{\text{г}}$ – грузоподъемность автосамосвала, т; $t_{\text{пр}}$ – суммарное время простоя автосамосвала в течение рейса, ч; $K_{\text{в}}$ – коэффициент использования автосамосвала в течение смены; K_3 – коэффициент загрузки автосамосвала.

В структуру переменных затрат входят расходы на [41, 42]:

- топливо для автосамосвалов;
- смазочные и прочие эксплуатационные материалы;
- техническое обслуживание и эксплуатационный ремонт;
- амортизацию подвижного состава;
- износ и ремонт шин,

а постоянные расходы состоят из [41, 42]:

- накладных расходов;
- амортизации подвижного состава на восстановление.

Заработная плата водителей выделяется в отдельную статью расходов, но может и включаться в состав постоянных затрат [43, 42]:

$$S_3 = \frac{3_{\text{ч}} T_{\text{ц}}}{L_{\text{гр}} G_{\text{г}}}, \quad (1.29)$$

где $3_{\text{ч}}$ – часовая заработная плата с начислениями, руб; $T_{\text{ц}}$ – продолжительность рейса, ч; $L_{\text{гр}}$ – длина транспортирования в грузовом направлении, км; $G_{\text{г}}$ – грузоподъемность автосамосвала, т.

Дорожная составляющая стоимости транспортирования может быть выражена формулой [42]:

$$S_{\text{д}} = LM \left[\frac{A}{B} + \left(\frac{K_{\text{р}}}{B_{\text{к}}} + \frac{C_{\text{р}}}{B_{\text{с}}} \right) \left(1 + \frac{2K_{\text{т}}}{K_3} \right) + \frac{E}{b} \right], \quad (1.30)$$

где M – ширина дороги, м; L – длина дороги, м; A – стоимость строительства 1 м^2 дороги, руб; $K_{\text{р}}$, $C_{\text{р}}$ – стоимость капитального и текущего ремонтов 1 м^2 , руб; E – ежегодные расходы на текущий ремонт и содержание 1 м^2 дороги, руб; B – суммарный вес груза, перевозимого по дороге, т; $B_{\text{к}}$, $B_{\text{с}}$ – работоспособность дорожного покрытия, соответственно, до капитального и среднего

ремонт, в брутто тоннах; b – годовая напряженность движения в нетто тоннах; K_T – коэффициент тары; K_3 – коэффициент загрузки автосамосвала.

Погрузочно-разгрузочная составляющая определится как [30]:

$$S_{\text{пр}} = (K_{\text{эк}} + K_{\text{отв}}) E_H + C_{\text{эк}} + C_{\text{от}}, \quad (1.31)$$

где $K_{\text{эк}}$, $K_{\text{отв}}$ – капитальные затраты на экскавацию и укладку в отвал 1 т горной массы, руб; E_H – коэффициент эффективности капитальных вложений; $C_{\text{эк}}$, $C_{\text{от}}$ – эксплуатационные расходы на экскавацию и укладку в отвал 1 т горной массы, руб.

$$K_{\text{эк}} = \left[\frac{(2A_{\text{эк}} + A_6)(q_a t_{\text{ц}} + E \gamma t_{\text{м}}) K_{\text{сп}}}{2e \gamma q_a T_{\text{см}} n_{\text{см}} D K_{\text{в}} K_3} \right], \quad (1.32)$$

где $A_{\text{эк}}$ – стоимость экскаватора в забое, руб; A_6 – стоимость бульдозера в забое, руб; q_a – грузоподъемность автосамосвала, т; $t_{\text{ц}}$ – время цикла экскаватора, ч; E – емкость ковша экскаватора, м³; γ – объемная масса горной породы, т/м³; $t_{\text{м}}$ – время остановки экскаватора при подаче очередного автосамосвала, ч; $K_{\text{сп}}$ – коэффициент списочного состава; $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $n_{\text{см}}$ – число смен в сутки; D – число суток работы карьера в году; $K_{\text{в}}$ – коэффициент использования оборудования во времени; K_3 – коэффициент экскавации.

$$K_{\text{отв}} = \left[\frac{2A_6(q_a t_{\text{ц}} + E \gamma t_{\text{м}}) K_{\text{сп}} K_{\text{пл}}}{E \gamma q_a T_{\text{см}} n_{\text{см}} D K_{\text{в}} K_3} \right], \quad (1.33)$$

где A_6 – стоимость бульдозера на отвале, руб; $K_{\text{пл}}$ – коэффициент, учитывающий объем планировочных работ на отвале.

$$C_{\text{эк}} = \left(C_{\text{э}} + \frac{1}{2} C_{\text{зб}} \right) \left(\frac{q_a t_{\text{ц}} + E \gamma t_{\text{м}}}{E \gamma q_a T_{\text{см}} K_{\text{в}} K_{\text{э}}} \right) + \frac{C_{\text{зд}}}{10^9 \gamma h_{\text{у}} B}, \quad (1.34)$$

где $C_{\text{э}}$ – стоимость машиносмены экскаватора, руб; $C_{\text{зб}}$ – стоимость машиносмены бульдозера в забое, руб; $C_{\text{зд}}$ – стоимость создания и содержания 1 км забойных автодорог, руб; $h_{\text{у}}$ – высота уступа, м; B – ширина рабочей площадки, м.

$$C_{\text{от}} = \frac{2C_{\text{об}} K_{\text{сп}} (q_a t_{\text{ц}} + E \gamma T_{\text{см}})}{E \gamma q_a K_{\text{в}} K_{\text{э}} T_{\text{см}}} + \frac{C_{\text{од}}}{10^9 \gamma h_{\text{от}} B_{\text{min}}}, \quad (1.35)$$

где $C_{\text{об}}$ – стоимость машиносмены бульдозера на отвале, руб; $C_{\text{од}}$ – стоимость сооружения и годового содержания отвальных автодорог, руб; $h_{\text{от}}$ – высота яруса отвала, м; B_{min} – минимальная ширина площадки для разгрузки автосамосвала на отвале, м.

В работах [3, 44] авторами исследуется влияние на себестоимость перевозок расстояния транспортирования без учета его зависимости от продольного уклона трассы. Так, при изменении расстояния транспортирования по сравнению с начальными условиями формула себестоимости на единицу транспортной работы запишется как:

$$C_{\text{и}} = \frac{C_{\text{н}} \left[\frac{l_{\text{и}}}{l_{\text{н}}} (1 - k) + k \right]}{l_{\text{и}} / l_{\text{н}}}, \quad (1.36)$$

где $C_{\text{и}}$, $C_{\text{н}}$ – искомая и начальная себестоимости, руб/т·км; $l_{\text{и}}$, $l_{\text{н}}$ – расстояние транспортирования горной массы в новых и начальных условиях, км; k – коэффициент, характеризующий долю условно-постоянных расходов в эксплуатационных затратах.

В работе [26] проведено экономико-математическое моделирование карьеров с транспортными схемами разработки. Одной из основных задач моделирования является установление рациональных моделей карьерных мехлопат для различных горнотехнических условий. Разработанные алгоритмы моделируют различные виды работ (буровзрывные, экскаваторные, транспортные, отвальные и вспомогательные) и отдельные их этапы и разновидности.

Проектирование экскаваторных работ произведено в тесной увязке и одновременно с проектированием основных параметров и элементов системы разработки (высота уступа, протяженность фронта работ и других). Так как эти параметры взаимосвязаны, то задача по определению оптимальных параметров карьеров и горнотранспортного оборудования относится к задачам по определению сложных целевых функций многих переменных, выражаемых обычно нелинейными аналитическими зависимостями.

При решении задачи принят критерий оптимальности, который учитывает влияющие на него факторы с одновременным учетом динамики развития горных работ. Таким критерием является в большинстве случаев минимум приведенных затрат $Z_{пр}$ [26]:

$$Z_{пр} = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_7) \rightarrow \min, \quad (1.37)$$

где X_1 – размеры карьерного поля; X_2 – календарное распределение объемов полезного ископаемого и вскрышных пород; X_3 – направление развития горных работ; X_4 – способ вскрытия карьерного поля; X_5 – элементы системы разработки; X_7 – типы бурового, экскаваторного и транспортного оборудования.

Решение задачи сводится к определению минимума этой функции, то есть к отысканию таких значений $X_1, X_2, \dots, X_7$, при которых значение функции является минимальным. Комплексное решение задачи не позволяет оце-

нить влияние на затраты каждого из факторов по отдельности, т. е. например, невозможно выделить транспортные затраты связанные с эксплуатацией разных марок автосамосвалов.

При оценке влияния продольных уклонов технологических трасс на себестоимость наибольший интерес будут представлять транспортные затраты и затраты связанные с содержанием дорог, поскольку в них учитывается расстояние транспортирования, а погрузочно-разгрузочные затраты при этом будут постоянными.

1.4. Анализ факторов, влияющих на скоростные режимы движения карьерных автосамосвалов

Скорость является важнейшим эксплуатационным показателем карьерного автотранспорта, определяющим его производительность и безопасность.

Методы расчета скоростей движения в различных дорожных условиях представлены в работах Астафьева Ю.П. [15], В.М. Альтшулера и Н.Н. Мельникова [45], Мариева П.Л. и Кулешова А.А. [1], Васильева М.В. [4, 5, 46, 47, 48, 49, 50], Данилова В.И. [51], Еремеева В.И. [52], Зырянова Н.В. и Зырянова И.В. [53], Казарева А.Н. [54], Костина А.Д. [55], Красневского Л.Г. [56, 57], Печкина В.А. [58, 59, 60, 61], Румшицкого Л.З. [62, 63], Сильянова В.В. [64], Кузнецова С.Р. [66] и др.

Наиболее простой метод расчета скоростей движения автосамосвала, широко применяемый при проектных и эксплуатационных расчетах, – графо-аналитический, реализуемый с помощью динамической характеристики автосамосвала. Однако этот метод не совсем адекватно отражает физический характер процесса движения автосамосвала по карьерным дорогам [1].

В графо-аналитическом методе приняты следующие допущения:

- отсутствуют неустановившиеся режимы движения;
- при движении в тяговом режиме мощность двигателя используется полностью.

Принятые допущения значительно упрощают расчеты, но приводят к значительным погрешностям – до 15–30 %.

Более сложным вариантом расчета скоростей движения является проведение натурных экспериментов для получения данных по скоростным режимам движения карьерных автосамосвалов в различных условиях, которые затем обрабатываются методами математической статистики для получения регрессионных зависимостей. Зависимости, полученные таким методом, отличаются достаточной точностью, но проведение экспериментов требует больших временных и материальных затрат. При этом полученные уравнения применимы только в горнотехнических условиях, типичных для данного карьера и для каждой марки автосамосвалов их необходимо получать отдельно.

Участки съездов, преодолеваемые автосамосвалами с использованием сил инерции при движении на подъем, выражаются следующими зависимостями [5]:

$$V_{гр} = K_{г}L - 10K_{г} + 7, \quad (1.38)$$

$$V_{пор} = K_{п}L + 30K_{п} + 5, \quad (1.39)$$

где $V_{гр}$, $V_{пор}$ – скорости въезда на подъем соответственно груженого и порожнего автосамосвалов, км/ч; L – длина участка, м; $K_{г}$, $K_{п}$ – коэффициенты, которые выражают собой углы подъема соответственно для груженого и порожнего автосамосвалов.

Скорость движения автосамосвала на k -ом элементе трассы [1, 54]:

$$V_k = A + BV_{k-1} + Ci_k + Dl_k, \quad (1.40)$$

где A , B , C , D – эмпирические коэффициенты; i_k – продольный уклон на k -ом элементе трассы, ‰; l_k – длина k -ого элемента трассы, м.

Скорости движения карьерных автосамосвалов на повороте в зависимости от его радиуса имеют вид [5]:

$$V_{\text{гр}} = -0,0026R^2 + 0,47R + 3, \quad (1.41)$$

$$V_{\text{пор}} = -0,006R^2 + 0,68R + 3,1, \quad (1.42)$$

где R – радиус поворота, м.

Случайный характер изменения скорости на маршруте можно оценить коэффициентом неравномерности движения $k_{\text{нд}}$, представляющим собой суммарную величину изменения скорости автосамосвала, отнесенную к 1 км его пробега [5]:

$$k_{\text{нд}} = \frac{\sum \Delta V}{L}. \quad (1.43)$$

В работе [66] автором получена эмпирическая зависимость скорости движения автосамосвала с гидромеханической трансмиссией в зависимости от динамического фактора D и массы перевозимого груза G :

$$V_{\text{дв}} = \frac{255,77 - 0,111D^{0,437}G}{D^{0,314}}. \quad (1.44)$$

Любая модель движения базируется на системе дифференциальных уравнений, описывающих процесс движения на основе теории автомобиля. Различные условия эксплуатации при этом вводятся в модель в виде вероятностных характеристик. Это позволяет достаточно точно воспроизвести с помощью модели любую ситуацию, возникающую в процессе перевозок, и сделать соответствующие выводы, необходимые для более детального планирования транспортного цикла.

Моделированию посвящены работы Франко Р.Т. [67], Яснопольского В.В. [67, 68], Виноградова В.С. [69], Андреева А.В., Анчарова И.Л. и Кудинова Г.П. [70], Астафьева Ю.П. и Полищука Г.К. [71], Безбородовой Г.Б. и Галушко В.Т. [72], Васильева М.В. [4, 73], Виницкого К.Е. и Реентовича Э.И. [74], Казареца А.Н. [54], Кулешова А.А. [54, 75], Печкина В.А. [60, 61], Ребрина Е.Ю. [76], Храмова В.Ю., Фигурова И.В. и Щура О.З. [77], Яковенко Б.В. [73, 78] и др.

Как правило, моделирование карьерного автомобильного транспорта решает частные задачи и подразделяется на три характерные группы [4]:

1. Экономико-математическое моделирование процесса транспортирования автосамосвалами для определения оптимальных параметров автотранспорта.

2. Математическое моделирование и расчет узлов, систем и конструктивных элементов автосамосвалов большой грузоподъемности.

3. Моделирование технологических параметров транспортного процесса для выявления оптимальных форм его организации и определения отдельных влияющих факторов.

Математические модели процесса транспортирования горной массы автосамосвалами строятся на основе ограничений [72]:

- условие морфологического соответствия транспортного средства и окружающей среды, которое определяет беспрепятственный проезд автомобиля по любой трассе с неровным рельефом;
- условие достаточной опорной способности ходовой части автомобиля, которое определяет возможность перемещения автосамосвала (без застревания) по переувлажненным грунтам, снегу и т.д.;
- условие достаточной силы тяги автосамосвала, которое определяет возможность перемещения автосамосвалом груза по карьерной дороге с заданным продольным рельефом;
- условие достаточного сцепления с дорогой,

а также допущений и упрощений, идеализирующих условия эксплуатации [4]:

- микропрофиль карьерных забойных и постоянных автодорог, как правило, исключается из рассмотрения, поэтому поверхность автодороги заменяется условной идеальной поверхностью с постоянным сопротивлением качению и однородными эксплуатационными качествами;
- режим работы автомобиля принимается постоянным – переходные процессы при изменении режима движения по сложному профилю в карьере не учитываются;
- в процессе моделирования не рассматриваются организационные факторы, связанные с плотностью автомобильного потока на магистральных выездных автодорогах.

В работе [54] была разработана схема алгоритма определения скоростей движения, основанная на математической модели, полученной в результате решения общего уравнения движения автосамосвалов методом Эйлера. Для корректировки модели был проведен производственный эксперимент на карьере ГОКа «Эрдэнэт». Апробация математической модели движения автосамосвалов и анализ замеров скоростей показали хорошую сходимость результатов на прямолинейных участках маршрута. Однако, на криволинейных участках, а также при приближении на подъемах к конечным пунктам выявились серьезные расхождения до 15–40 %.

Для расчета скоростей движения автосамосвалов на этих участках были предложены регрессионные зависимости, позволяющие значительно уменьшить ошибку при проведении расчетов до 1,4–2,2 %.

В конце маршрута «модель VOST»:

$$V_{i+1} = 0,81 V_i + 38,57 \Delta L - 2,75 , \quad (1.45)$$

где V_{i+1} – скорость движения автосамосвала на $(i+1)$ -м отрезке, пройденном за короткий интервал времени, км/ч; ΔL – расстояние до конца конечного участка, м.

Скорость движения на криволинейных участках:

- по модели VKP1 (эмпирическое уравнение скорости движения карьерных автосамосвалов на участке длиной $\Delta L' = 0,0067 V_i + 0,0003 R - 0,084$):

$$V_{i+1} = 6,64 + 0,42 V_i - 0,065 R + 0,11 U_{j+1} - 0,14 \Delta U + 91 \Delta L'', \quad (1.46)$$

где U_{j+1} – уклон криволинейного участка, ‰; ΔU – разность уклонов криволинейного и предыдущего прямолинейного участка, ‰; $\Delta L''$ – расстояние от точки снижения скорости движения до центра криволинейного участка, м $\Delta L'' = L_j + (L_{j+1})/2$; L_{j+1} – длина криволинейного участка, м.

- по модели VKP2 (эмпирическое уравнение скорости движения карьерных автосамосвалов на второй половине криволинейного участка автодорог):

$$V_{i+1} = 0,72 V_i + 0,02 R - 0,1 U_{j+1} + 240 \Delta L''' - 1,04, \quad (1.47)$$

где $\Delta L'''$ – расстояние до конца криволинейного участка, м $\Delta L''' = L_j - L_{j+1}$; L_{j+1} – пройденный автосамосвалом путь на криволинейном участке.

В работе [78] представлен алгоритм цифровой модели процесса движения автосамосвала на основе следующей расчетной схемы:

- разгон автосамосвала происходит с максимально возможным ускорением, величина которого не ограничивается подачей топлива;
- на автомобильном заезде автосамосвал движется с максимальной скоростью, возможной на данном участке пути с заданным сопротивлением;

- остановка или замедление движения автосамосвала происходит с заданным ускорением, изменение скорости движения на заезде определяется условиями эксплуатации.

Данная модель строится на пошаговом определении эксплуатационных показателей процесса движения автосамосвала (разгона, скорости движения и т.д.). Такой подход позволяет проследить их изменение в каждой фазе движения.

В основе модели лежит дифференциальное уравнение движения автосамосвала:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A - A_1 V}{BV}, \quad (1.48)$$

$$A = N_e \eta_{тр}; \quad A_1 = \frac{G_a (K_T + 1)(f + \sin \alpha)}{270}; \quad B = \frac{\delta G_a}{270g}.$$

где N_e – мощность двигателя автосамосвала, кВт; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии автосамосвала; G_a – собственный вес автосамосвала, кН; K_T – коэффициент тары; f – коэффициент сопротивления качению; α – угол продольного уклона карьерной автодороги, град; δ – коэффициент учета вращающихся масс; g – ускорение свободного падения, м/с².

Численные решения данного уравнения методом Рунге-Кутты с постоянным шагом H дают значения скорости как функции времени.

Таким образом, авторы моделей либо не учитывают неустановившиеся режимы движения, либо используют предельные значения ускорений. Поскольку неустановившиеся режимы составляют 40–60 % [4] всего времени движения возникает необходимость исследований направленных на выявление интенсивности изменения режимов движения.

На эффективность эксплуатации ЭАК большое влияние оказывает величина продольного уклона трассы. Завышенное значение уклона приводит к снижению скорости движения автосамосвалов на подъемах и спусках, повышенному расходу топлива и шин, ухудшаются условия безопасности при

движении. Заниженное же значение уклона приводит к увеличению объемов горнокапитальных работ и увеличению протяженности трасс [1].

Исследованию условий и особенностей работы автосамосвалов в карьерах, а также оптимизации уклонов карьерных автодорог до настоящего времени было посвящено ограниченное число работ. Этому направлению посвящены работы Дороненко Е.П. [79], Муна В.С. [80], Горшкова Э.В. [81]. В этих работах авторами проведены исследования влияния продольного уклона трасс и глубины карьера на расход дизельного топлива, коэффициента сцепления и затрат на техническое обслуживание и ремонт автосамосвалов. Однако за прошедшие десятилетия произошли существенные изменения конструкции, а так же в эксплуатационно-технических характеристиках автосамосвалов и полученные результаты исследований этих работ должны быть уточнены.

В работе [82] автор на основании критерия, зависящего от КПД трансмиссии, скорости движения автосамосвалов и расхода дизельного топлива определяет оптимальность дорожного уклона. В этой работе рассматриваются только нагорно-глубинные карьеры и не уделено внимание производительности ЭАК.

В работе [8] достаточно полное отражение имеют технические ограничения уклонов автодорог. Автором разработана методика и выполнены экспериментальные исследования по установлению влияния уклона автодорог на объемы разноса бортов карьеров при использовании автосамосвалов большой грузоподъемности. Однако, в работе недостаточно исследованы взаимосвязи параметров систем разработки карьера с эксплуатационно-техническими характеристиками применяемых типов карьерных автосамосвалов.

В работе [83] автор на основании критерия эффективности эксплуатации, отражающего отношение эталонной транспортной работы к затрачиваемой энергии топлива, оценивает эффективность использования автосамосва-

лов с различными силовыми установками. В работе не рассматривается протяженность и характер изменения профиля трасс.

1.5. Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является оценка влияния параметров технологических трасс на эффективность эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

1. Установить влияние параметров профиля технологических трасс на закономерности движения карьерных автосамосвалов
2. Обосновать критерии оценки эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов
3. Разработать методику оценки эффективности экскаваторно-автомобильного комплекса с учетом его состава и параметров технологической трассы.
4. Сравнить варианты реализации разработанной методики при выборе состава экскаваторно-автомобильного комплекса для условий конкретного разреза.

1.6. Выводы

1. Установлено влияние на технико-экономические показатели работы функциональных машин ЭАК, выражающееся в постепенном сокращении среднесписочного состава автосамосвалов при одновременном увеличении их средней грузоподъемности, росте интенсивности эксплуатации карьерных автосамосвалов и увеличении дорожных уклонов.

2. Выявлено, что на производительность ЭАК влияют скорость движения автосамосвалов, расстояние транспортирования, время погрузки, соотношение объемов ковша экскаватора и грузовой платформы автосамосвала,

коэффициент использования грузоподъемности, продольный уклон трассы, дорожные неровности, геометрические параметры погрузочных площадок и связанные с ними схемы заезда и маневрирования.

3. Установлено, что к основным параметрам ЭАК, влияющим на их производительность и эффективность и зависящим от параметров трасс относятся скорость движения автосамосвала, расход топлива и шин.

4. Выявлено, что на экономическую эффективность использования ЭАК влияют затраты, связанные с содержанием дорог, процессами погрузки-разгрузки, техническим обслуживанием и ремонтом горнотранспортного оборудования, расходом топлива и шин, а также скорость движения автосамосвалов и влияющие на нее параметры трасс.

5. Применение теоретических зависимостей дает завышенные результаты, поэтому необходимо определить доверительные интервалы скоростей движения карьерных самосвалов с целью корректирования их значений, полученных по теоретическим зависимостям.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА

2.1. Обоснование скоростных режимов карьерных автосамосвалов

Скорость движения автосамосвалов это один из самых информативных комплексных показателей эффективности эксплуатации карьерного транспорта. Влияние ее на процесс перевозки горной массы противоречиво и значительно. С одной стороны, от величины скорости зависит производительность карьерных автосамосвалов, и движение с заниженным значением скорости приводит к снижению эффективности применения автомобильного транспорта и росту себестоимости транспортирования. С другой стороны, движение карьерных автосамосвалов с завышенным значением скорости приводит к повышению расхода топлива, снижению ресурса опорных металлоконструкций и шин, что, в свою очередь, приводит к увеличению затрат по соответствующим статьям и росту себестоимости перевозок [85].

В связи с этим исследования скоростных режимов движения карьерных автосамосвалов в разнообразных условиях эксплуатации являются как сложной, так и важной задачей.

Большое количество факторов оказывают влияние на скорость движения карьерных автосамосвалов, основными из которых являются качество дорожного полотна, продольный профиль трассы, удельная мощность двигателя, тип трансмиссии, условия безопасности движения и т.д. [10, 85, 109]. На схеме (см. рис. 2.1) отображено место скорости движения карьерных автосамосвалов в процессе транспортирования горной массы.



Рис. 2.1. Факторы, влияющие на скорость движения карьерных автосамосвалов и технико-экономические показатели транспортирования

Факторы, влияющие на скорость движения, делятся на внешние и внутренние. Внешние факторы накладывают ограничения на величину скорости движения карьерных автосамосвалов. В этой группе значительное влияние на скорость движения оказывают продольный профиль технологиче-

ской трассы, ровность дорожного полотна и радиусы поворотов. В группе внутренних факторов основными являются тягово-скоростные свойства карьерного автосамосвала, которые закладываются в него заводом-изготовителем. Тяговые возможности автосамосвала, а следовательно, и его максимальная техническая скорость, определяются отношением мощности двигателя к полной массе автосамосвала и оцениваются удельной мощностью, выражаемой в кВт/т. [85].

Движение с завышенными значениями скорости по недостаточно ровной технологической трассе приводит к повышенному износу шин, неоправданно высокому динамическому нагружению опорных металлоконструкций и рамы автосамосвала [103, 104, 105], что может привести к их преждевременному выходу из строя.

Величина продольного уклона карьерной трассы ограничивает максимально возможную скорость движения карьерного автосамосвала при движении на подъем – в зависимости от тягово-скоростных свойств автосамосвала и климатических условий, а при движении на спуск – исходя из условия безопасности торможения в конкретных дорожных условиях.

Радиус поворота ограничивает допустимую скорость движения карьерного автосамосвала и с его уменьшением скорость автосамосвала снижается. Это ограничение связано, во-первых, с условиями опрокидывания и скольжения автосамосвала в поперечном направлении, что в основном зависит от состояния трассы (величина поперечного уклона трассы, коэффициент сцепления колеса с дорогой) и, во-вторых, с повышенным износом крупногабаритных шин.

Влияние климатических условий на скорость движения связано со снижением скорости в условиях ограниченной видимости и величиной ветровых нагрузок.

Горнотехнические условия оказывают влияние, в основном, на эксплуатационную скорость автосамосвалов, которая зависит от соотношения общего времени простоев и времени движения автосамосвала. Важнейшими

показателями в горнотехнических условиях являются сложность выемки и расстояние транспортировки горной массы, от которых зависят величины времен простоя под погрузкой и непосредственного движения.

Психофизиологическое состояние и квалификация водителя являются важнейшими факторами, оказывающими влияние на скорость движения карьерного автосамосвала. Водитель карьерного автосамосвала управляет скоростью и сам определяет скоростные ограничения в зависимости от условий движения. От его физиологического состояния и уровня квалификации зависит объективность оценки условий движения и адекватность реагирования на них. Водитель, для обеспечения высокой производительности, должен стремиться двигаться с высокой скоростью, но при этом не должен превышать допустимой по условиям безопасности скорость движения.

Таким образом, на скоростные режимы движения карьерных автосамосвалов, оказывается комплексное влияние, взаимосвязанных между собой факторов.

2.2. Аналитическое исследование скоростных ограничений

При движении по различным участкам карьерных автодорог водитель автосамосвала стремится к повышению скорости, что приводит к росту производительности. Однако скорость движения не может быть выше некоторых предельных значений, диктуемых тягово-скоростными свойствами автосамосвала, условиями безопасности движения, особенностями эксплуатации крупногабаритных шин и тяговых электродвигателей.

1. Максимально-возможная скорость движения автосамосвала на подъеме V_{imax} определяется тягово-скоростными свойствами автосамосвала, дорожными и климатическими [86].

Максимально-возможная скорость преодоления автосамосвалом подъема может быть выражена из уравнения мощностного баланса:

$$N_k = N_i + N_f + N_\omega + N_j, \quad (2.1)$$

где N_k – мощность, подводимая к колесам карьерного автосамосвала, кВт;
 N_i – мощность, используемая для преодоления сопротивления подъему, кВт;
 N_f – мощность, используемая для преодоления сопротивления качению, кВт;
 N_ω – мощность, используемая для преодоления сопротивления воздуха, кВт;
 N_j – мощность, используемая для преодоления инерции при разгоне автосамосвала, кВт.

Или в развернутом виде

$$N_{emax} \eta_{тр} = \frac{(G_a + q \gamma)}{1000} [g(f + i) + \delta_{вр} j_a] V_a + \frac{KF}{1000} V_a^3, \quad (2.2)$$

где N_{emax} – максимальная мощность двигателя автосамосвала, кВт; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии автосамосвала; G_a – собственная масса автосамосвала, кг; γ – коэффициент использования грузоподъемности; q – грузоподъемность автосамосвала, кг; f – коэффициент сопротивления качению; g – ускорение свободного падения, м/с²; i – уклон трассы; $\delta_{вр}$ – коэффициент учета вращающихся масс; j_a – ускорение автосамосвала, м/с²; V_a – скорость движения автосамосвала, м/с; KF – фактор обтекаемости автосамосвала, Н·с²/м².

На достаточно крутых уклонах, где скорость движения автосамосвалов не превышает 15 км/ч, расчет может производиться без учета сил сопротивления воздуха [1]:

$$V_{imax} = \frac{270 N_e \eta_{тр}}{(G_a + q \gamma)(f + i)}, \quad (2.3)$$

где N_e – мощность двигателя автосамосвала, кВт; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии автосамосвала; G_a – собственный вес автосамосвала, кН; q – грузоподъемность автосамосвала, кН; γ – коэффициент использования грузоподъемности; f –

коэффициент сопротивления качению Н/кН; i – уклон трассы, ‰; V_{imax} – максимально возможная скорость движения автосамосвала, м/с.

Решение уравнения (2.2) наиболее целесообразно проводить с помощью ЭВМ численными методами.

На рис. 2.2 представлена схема алгоритма расчета максимально-возможной скорости преодоления карьерным автосамосвалом подъема.

2. Допустимая скорость движения автосамосвала при прохождении поворота V_{Rmax} зависит от дорожных условий, а именно, от коэффициента сцепления колес с опорной поверхностью, поперечного уклона трассы, и продольным профилем трассы. При прохождении поворота накладываются два типа ограничений:

- по условию бокового скольжения автосамосвала [1, 42, 64, 87, 88]:

$$V_{Rmax} = 3,6\sqrt{gR(\varphi \pm i_b)}, \quad (2.4)$$

где R – радиус поворота, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; φ – коэффициент сцепления колес автосамосвала в поперечном направлении; i_b – поперечный уклон карьерной трассы (уклон виража);

- по условию ограниченной видимости [1, 64]:

$$V_{Rmax} = \sqrt{\frac{127(\varphi^2 + i^2)}{k_3\varphi}}(l_b - 5), \quad (2.5)$$

где l_b – расчетное расстояние видимости, м; $l_b = \sqrt{8Rf}$; $f = B/2$; B – ширина земляного полотна, м; φ – коэффициент продольного сцепления; i – продольный уклон, на котором расположена кривая поворота; k_3 – коэффициент эксплуатационных условий торможения.

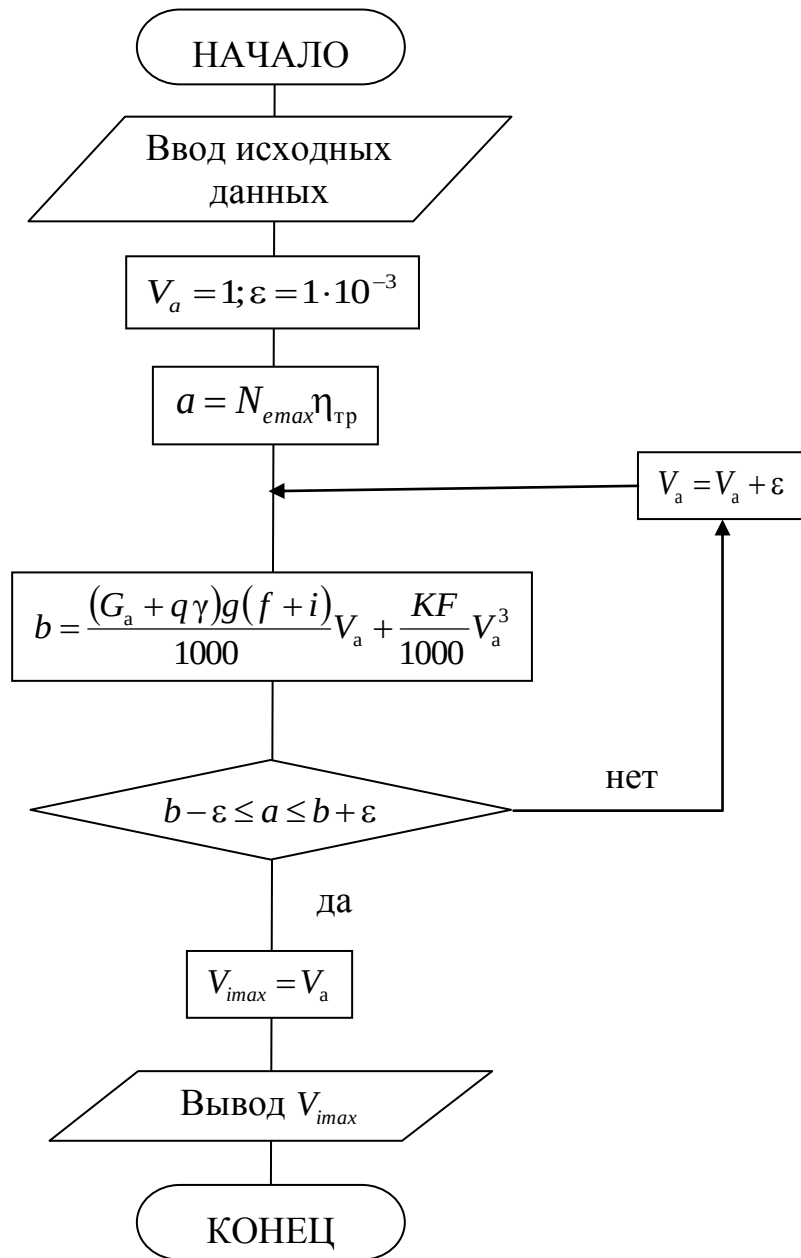


Рис. 2.2. Схема алгоритма расчета максимально возможной скорости преодоления карьерным автосамосвалом подъема (процедура «VPOD»)

Допустимая скорость движения автосамосвала при прохождении поворота на подъемах с уклоном i , заканчивающихся горизонтальным участком (уклон до 20 %) [64]:

$$V_{Rmax} = \sqrt{\frac{127(\varphi + i)}{k_3}} (l_B - 5), \quad (2.6)$$

где $l_b = \sqrt{9,6R}$.

Допустимая скорость движения автосамосвала на повороте при выпуклом переломе с сопрягающимися уклонами i_1 и i_2 [64]:

$$V_{R\max} = \sqrt{\frac{127(\varphi + i_1)(\varphi + i_2)}{k_y \varphi}} (l_b - l_0), \quad (2.7)$$

где l_0 – запас пути, м.

3. Допустимая скорость автосамосвала при движении под уклон V_d определяется величиной остановочного пути, который должен быть меньше расстояния видимости [5]:

$$l_b \geq S_{\text{ост}} + l_3, \quad (2.8)$$

из этого неравенства [5]:

$$V_d \leq \sqrt{\frac{t_p + 2g(\varphi - i)(l_b - l_3)}{k_T k_y}} - g t_1 (\varphi - i)(k_T k_y - 2t_p), \quad (2.9)$$

где t_p – время реакции водителя, с; φ – коэффициент сцепления колеса с дорогой; i – продольный уклон карьерной автодороги; k_T – коэффициент тары; k_y – коэффициент условий торможения; t_1 – период нарастания тормозного усилия, с; l_3 – запас длины остановочного пути, принимается равным длине автосамосвала, м.

Или

$$V_d = \frac{g \left[\frac{\mu_T}{r_k} \lambda + (G_a + q\gamma) f (1 - \lambda) \pm (G_a + q\gamma) i \right]}{G_a + q\gamma} + \sqrt{t_{\pi}^2 + \frac{2(G_a + q\gamma)(l_b - l_3)}{g \left[\frac{\mu_T}{r_k} \lambda + (G_a + q\gamma) f (1 - \lambda) \pm (G_a + q\gamma) i \right]}} - t_{\pi}, \quad (2.10)$$

$$+ \frac{g \left[\frac{\mu_T}{r_k} \lambda + (G_a + q\gamma) f (1 - \lambda) \pm (G_a + q\gamma) i \right]}{G_a + q\gamma}$$

где μ_T – тормозной момент автосамосвала, кг·м; r_k – радиус качения колеса, м; f – коэффициент сопротивления качению; i – продольный уклон карьерной автодороги; t_{π} – предтормозное время, с; λ – коэффициент, определяющий степень проскальзывания заторможенных колес; l_3 – запас длины остановочного пути, принимается равным длине автосамосвала, м; G_a – собственная масса автосамосвала, кг; q – грузоподъемность автосамосвала, кг; γ – коэффициент использования грузоподъемности; g – ускорение свободного падения, м/с².

Кроме скоростных ограничений, зависящих, большей частью, от эксплуатационных параметров трасс, на скорость оказывает влияние ровность дорожного полотна.

Зависимости снижения скорости движения автосамосвалов от величины дорожных неровностей, полученные в СПГГИ [1]:

- для груженых автосамосвалов

$$\Delta V = 0,0436V + 0,3898H, \quad (2.9)$$

- для порожних автосамосвалов

$$\Delta V = 0,0105V + 0,7422H, \quad (2.10)$$

где ΔV – снижение скорости, км/ч; V – скорость автосамосвала, движущегося по ровной дороге, км/ч; H – высота неровностей, см.

Универсальность этих формул заключается в том, что начальная скорость является интегральным показателем, зависящем от мощности двигателя автосамосвала, массы перевозимого груза, сопротивления качению, продольного уклона трассы, коэффициента сцепления и расстояния видимости. Поэтому в формуле учитывается только величина неровностей.

2.3. Экспериментальное исследование скоростных режимов

Для определения характера изменения скоростных режимов движения карьерных автосамосвалов, а также доверительных интервалов скоростей движения и ускорений был проведен эксперимент в условиях АО «Красный Брод» ОАО «УК Кузбассразрезуголь». Испытанию подвергались автосамосвалы БелАЗ-75131 грузоподъемностью 130 т, мощностью двигателя 1100 кВт, максимальной скоростью 48 км/ч, работавшие совместно с экскаватором ЭКГ-12,5 с вместимостью ковша 12,5 м³ и продолжительностью цикла 32 с. Автосамосвалы в количестве 3 единиц перевозили вскрышные породы на маршруте, продольный профиль и план которого приведены на рис. 2.3 и 2.4. Данный маршрут «Забой-Отвал-Забой» протяженностью 4200 м является характерным для технологических трасс разрезов Кузбасса и характеризуется одним поворотом радиусом 140 м, дорожным покрытием переходного типа со средними величинами неровности от 5 до 10 см и разбросом значений продольного уклона трассы от 0 до 114 %.

Замеры скоростей движения карьерных автосамосвалов проводились методом фотометрической съемки с интервалом 2 секунды. Общее число замеров более 3500.

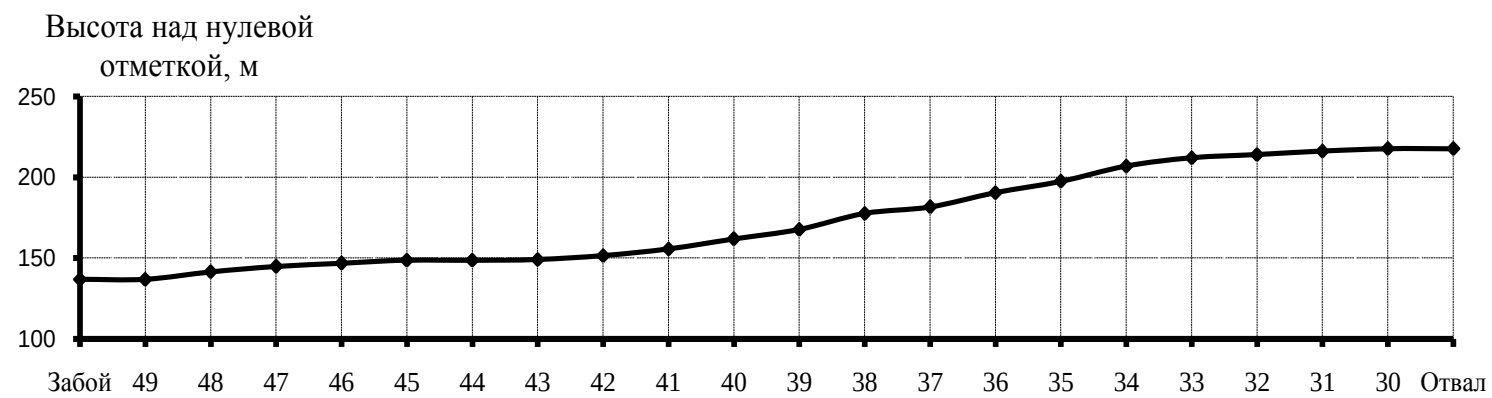


Рис. 2.3. Продольный профиль маршрута

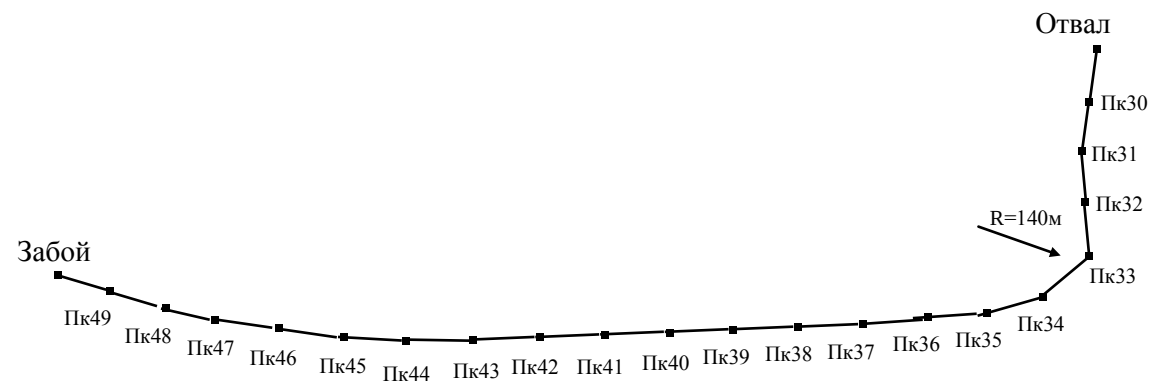


Рис. 2.4. План маршрута

Замеры проводились весной в период таяния снега в утреннее и дневное время, что позволяет получить усредненные результаты периода лета-зима. За время замеров автосамосвалы управлялись 6 разными водителями, что дает средние результаты по квалификации водителя.

При влиянии на транспортный процесс большого числа факторов, он носит стохастический характер. Это определяет большую вариацию результатов измерений значений мгновенной скорости в заданной точке пространства [89, 90].

На рис. 2.5–2.9 и в табл. 2.1, 2.2 представлены результаты статистической обработки скоростей движения карьерных автосамосвалов в программе STATISTICA 6.0. По всем участкам распределение скоростей описывается нормальным законом, при доверительной вероятности 95%.

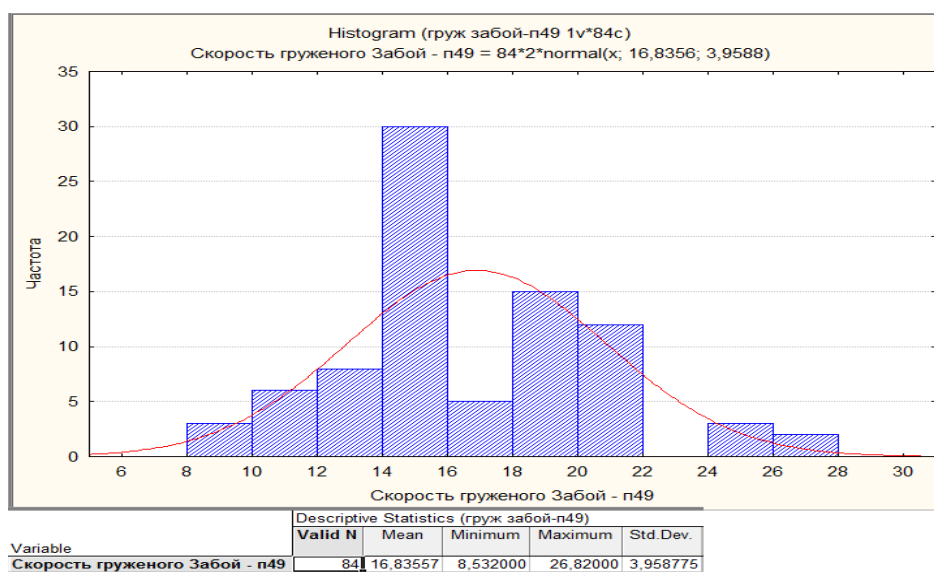


Рис. 2.5. Распределение скоростей движения на участке забой-п49
в груженом направлении

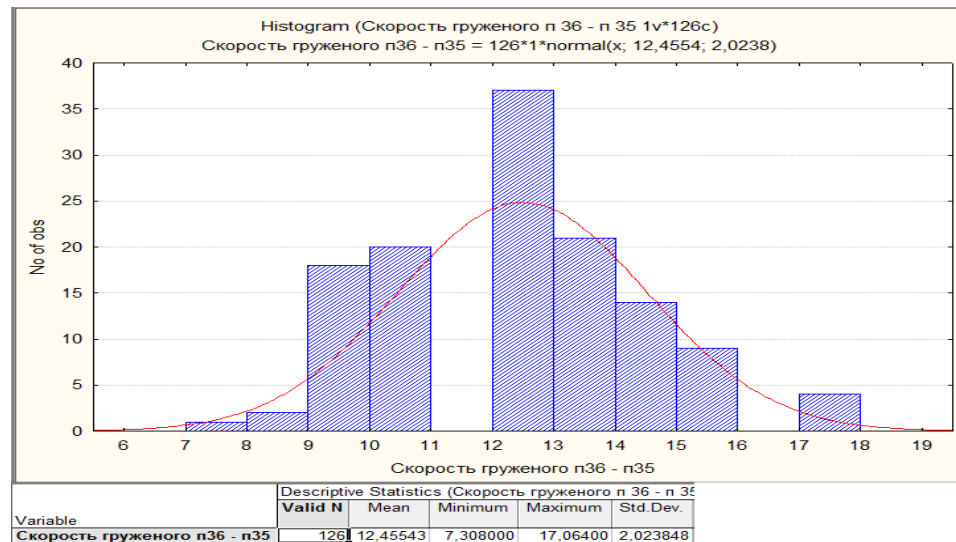


Рис. 2.6. Распределение скоростей движения на участке п36-п35 в груженом направлении

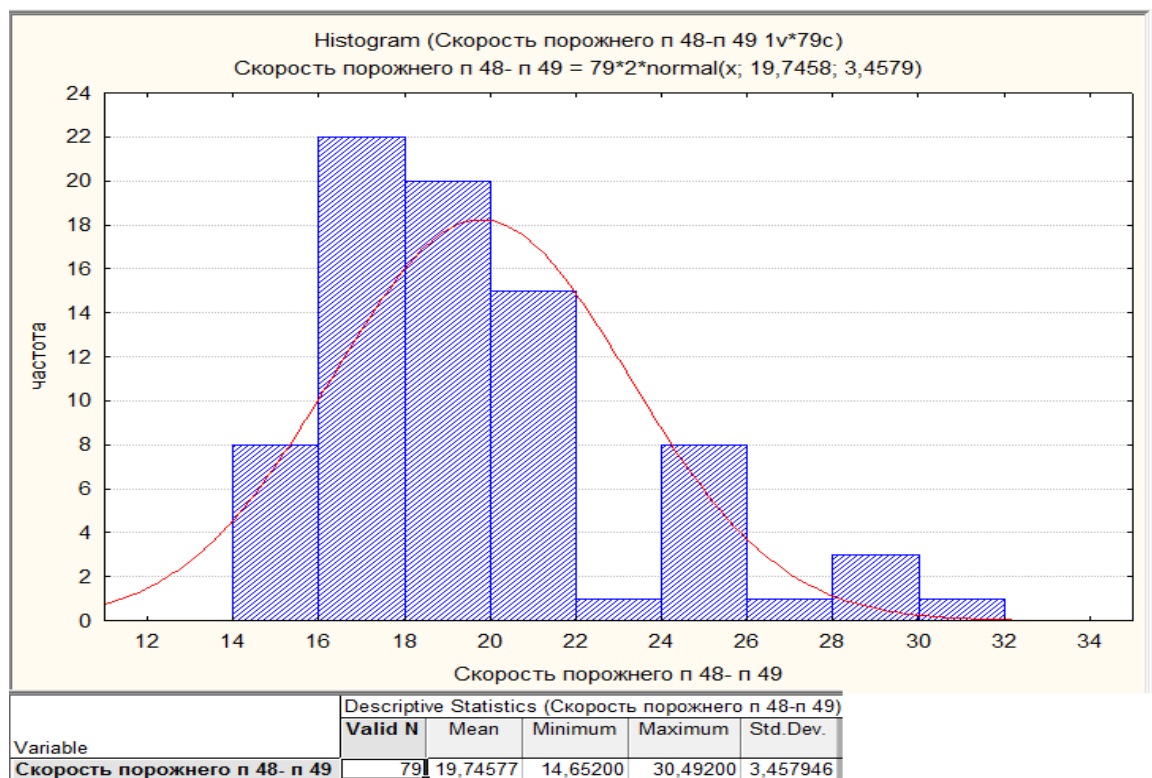


Рис. 2.7. Распределение скоростей движения на участке п48-п49 в порожнем направлении

Таблица 2.1

Распределение скоростей движения карьерных автосамосвалов в грузе
направлении

Уклон, ‰	Средняя скорость, км/ч	Доверительный интервал, σ км/ч	Максимальная скорость, км/ч	Минимальная скорость, км/ч
0*	16,83	3,959	26,82	8,53
0*	16,96	4,365	27,67	7,64
0	28,53	4,959	47,59	16,18
4	28,38	4,236	46,23	15,14
23	23,66	3,643	37,56	14,03
38	22,43	3,537	35,43	12,82
48	20,5	3,345	30,27	10,53
58	19,55	3,532	28,26	9,33
68	16,86	1,347	21,34	8,53
102	13,5	0,754	17,06	8,15
114	11,72	0,635	16,51	7,35

* – забойный и отвальный участки трассы не сгруппированы по величине уклона и не отражены на рисунке 2.8 в связи с тем, что на этих участках величина скорости ограничена $V_0 = 20$ км/ч.

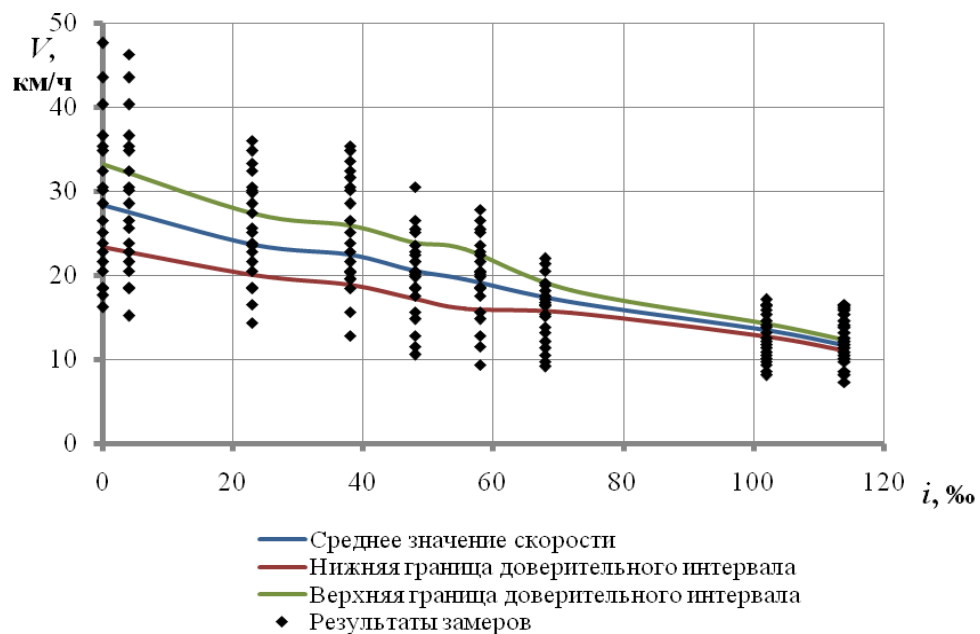


Рис. 2.8. Распределение скоростей движения (V) в зависимости от продольного уклона трассы (i) при движении в грузе

Таблица 2.2

Распределение скоростей движения карьерных автосамосвалов в порожнем направлении

Уклон, ‰	Средняя скорость, км/ч	Доверительный интервал, σ км/ч	Максимальная скорость, км/ч	Минимальная скорость, км/ч
0*	20,88	4,254	28,32	9,45
0*	17,28	3,768	24,78	8,35
0	33,4	4,576	44,16	22,57
4	32,32	4,154	42,46	21,34
23	28,83	3,661	37,43	18,82
38	28,66	3,636	35,41	18,42
48	18,83	3,253	29,61	12,53
58	17,87	2,873	27,53	12,48
68	17,16	2,356	25,36	11,21
102	16,05	1,861	21,72	10,98
114	15,24	1,537	21,1	10,98

* – забойный и отвальный участки трассы не сгруппированы по величине уклона и не отражены на рисунке 2.9 в связи с тем, что на этих участках величина скорости ограничена $V_0 = 20$ км/ч.

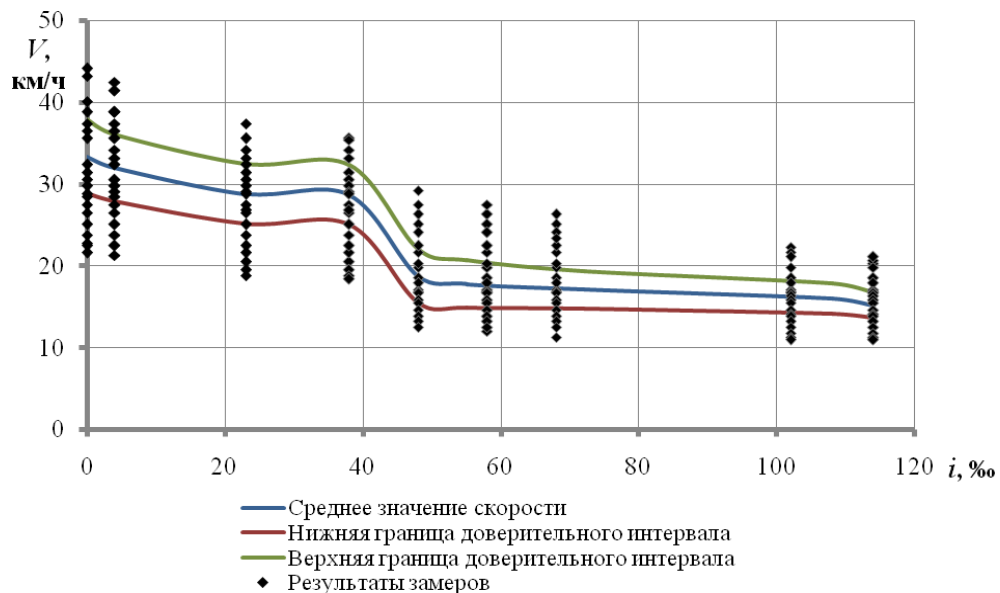


Рис. 2.9. Распределение скоростей движения (V) в зависимости от продольного уклона трассы (i) при движении в порожнем направлении

На рис. 2.10–2.14 и в табл. 2.3, 2.4 представлены результаты статистической обработки ускорений карьерных автосамосвалов в программе STATISTICA 6.0. По всем участкам распределение ускорений описывается нормальным законом, при доверительной вероятности 95 %.

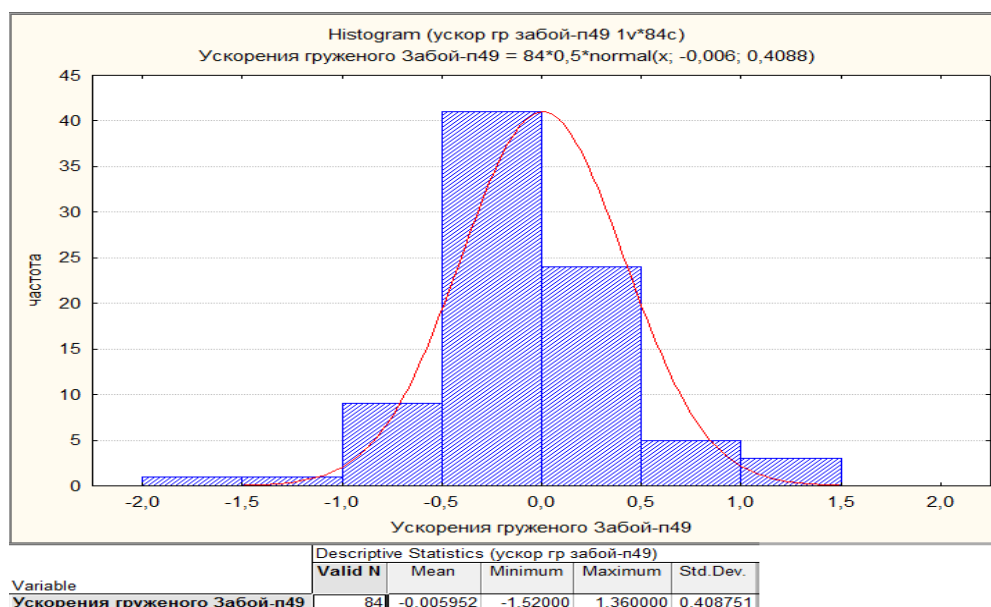


Рис. 2.10. Распределение ускорений на участке забой-п49 при движении в груженом направлении

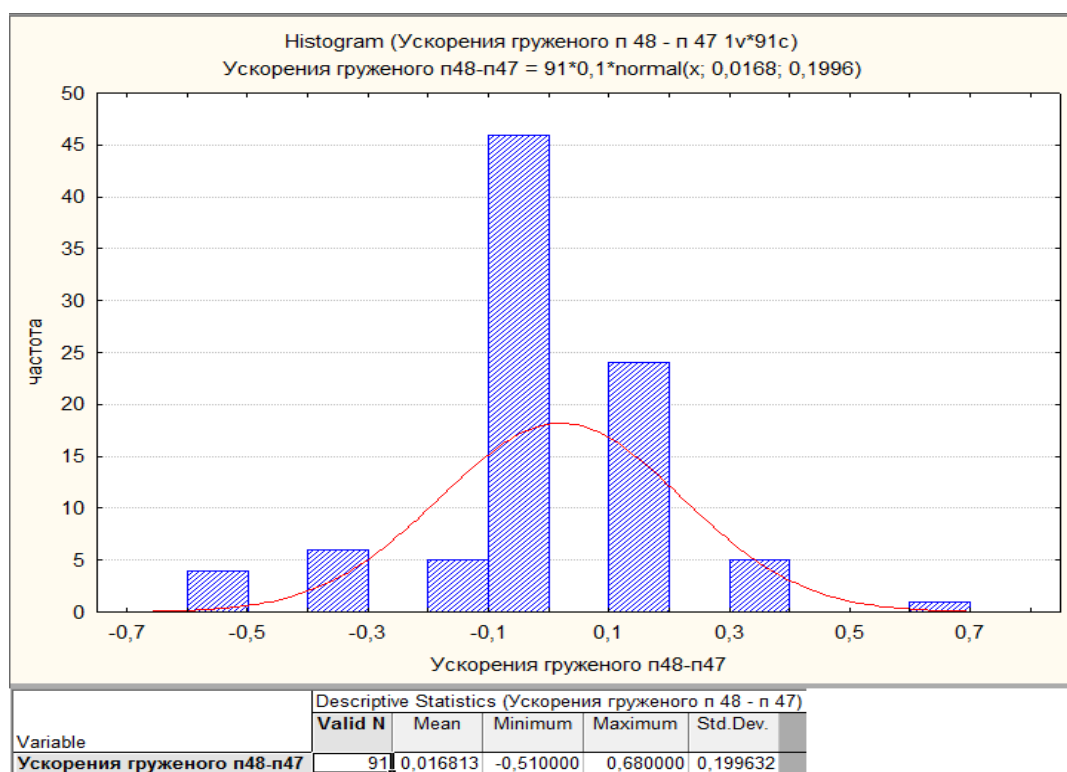


Рис. 2.11. Распределение ускорений на участке п48-п47 при движении в груженом направлении

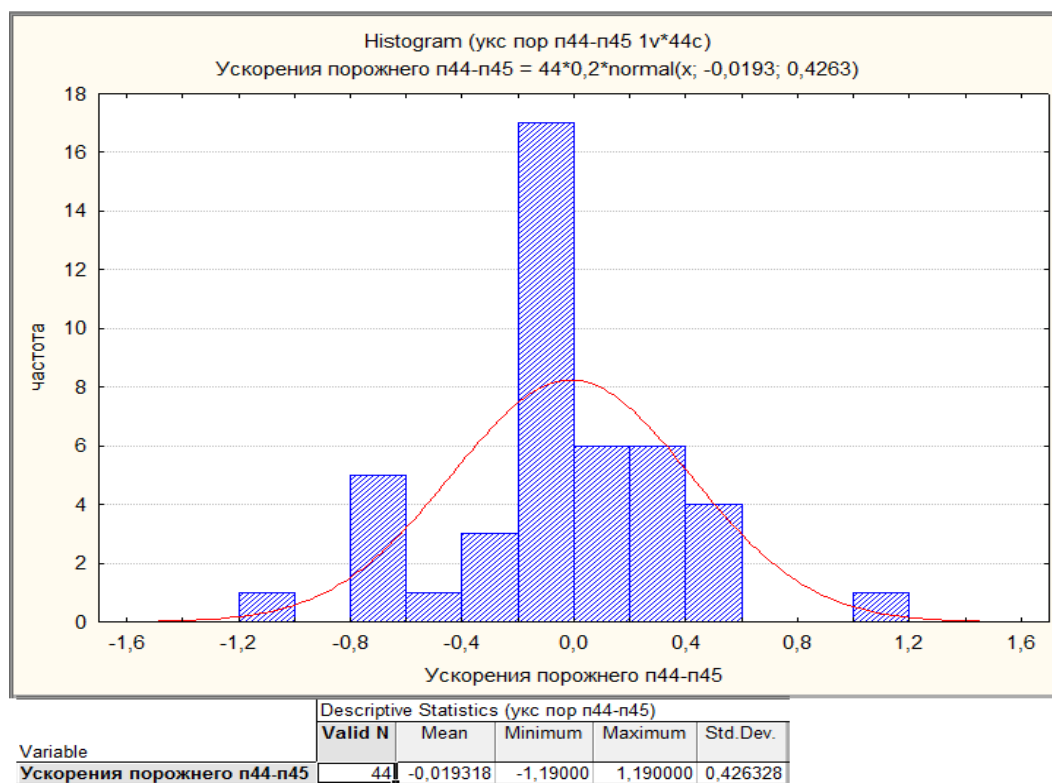


Рис. 2.12. Распределение ускорений на участке п44-п45 при движении
в порожнем направлении

Таблица 2.3

Распределение ускорений карьерных автосамосвалов при движении
в груженом направлении

Уклон, ‰	Среднее ускорение, м/с ²	Доверительный интервал, σ м/с ²	Максимальное ускорение, м/с ²	Минимальное ускорение, м/с ²
0	-0,0159	0,4093	1,02	-1,19
4	-0,0045	0,4084	1,36	-1,02
23	-0,0171	0,3926	1,52	-2,03
38	-0,0081	0,3183	0,68	-0,53
48	-0,0095	0,2055	0,34	-0,51
58	-0,0192	0,1275	0,51	-0,85
68	-0,0119	0,1108	0,68	-0,51
80	-0,0063	0,1076	0,17	-0,34
102	-0,0349	0,0998	0,17	-0,17
114	-0,0110	0,0901	0,17	-0,17

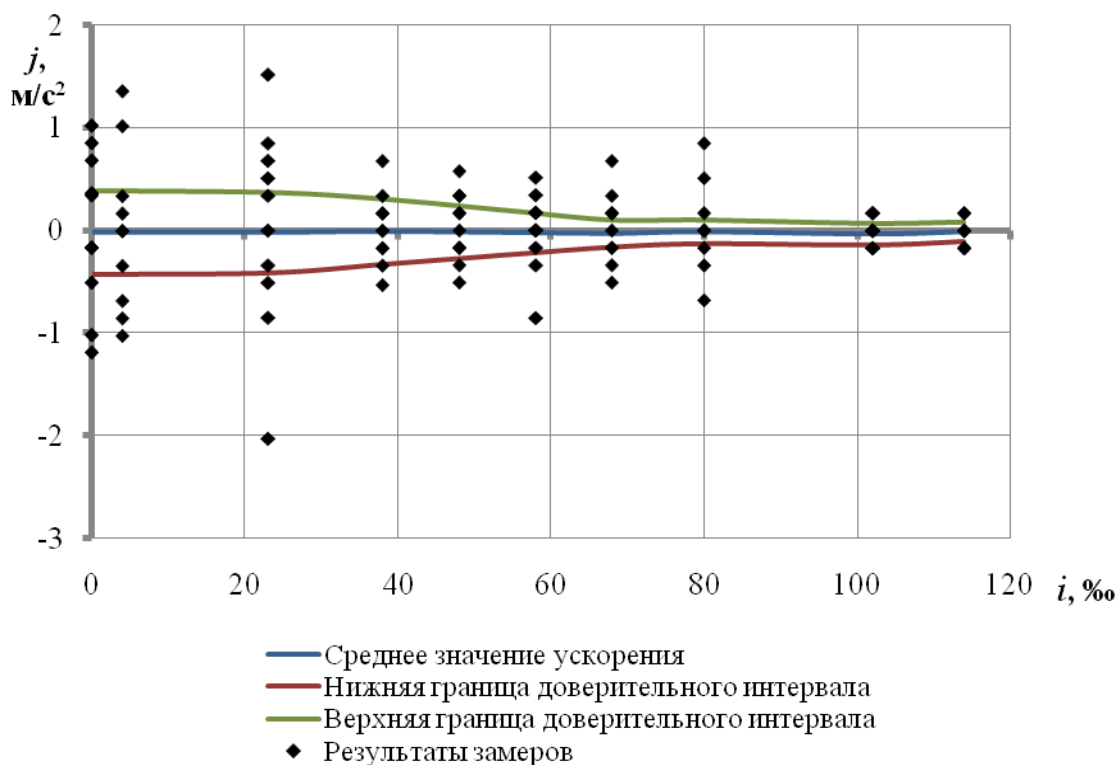


Рис. 2.13. Распределение ускорений (j) автосамосвалов в зависимости от продольного уклона трассы (i) при движении в груженом направлении

Таблица 2.4

Распределение ускорений карьерных автосамосвалов при движении в порожнем направлении

Уклон, ‰	Среднее ускорение, м/с^2	Доверительный интервал, $\sigma \text{ м/с}^2$	Максимальное ускорение, м/с^2	Минимальное ускорение, м/с^2
0	-0,0567	0,4769	1,19	-1,19
4	-0,0468	0,4356	1,02	-0,85
23	-0,0238	0,3853	1,19	-1,02
38	-0,0016	0,3549	0,51	-0,51
48	0,0052	0,2827	0,68	-0,51
58	-0,0013	0,2574	1,02	-1,02
68	-0,0003	0,2048	0,51	-0,68
80	-0,0021	0,1764	0,85	-0,68
102	-0,0052	0,1128	0,51	-0,68
114	-0,0004	0,1037	0,17	-0,34

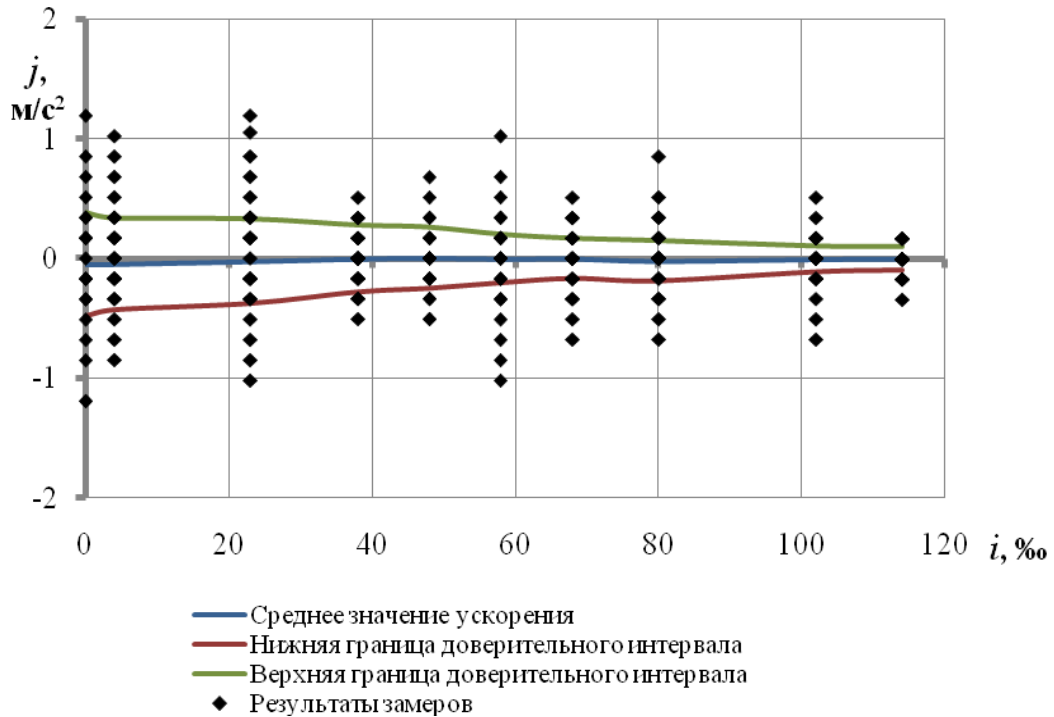


Рис. 2.14. Распределение ускорений (j) автосамосвалов в зависимости от продольного уклона трассы (i) при движении в порожнем направлении

Наибольшее рассеивание значений скоростей наблюдается на ровных участках, значения ускорений изменяются от $(-2,03)$ до $(1,52) \text{ м/с}^2$ в груженом направлении и от $(-1,19)$ до $(1,19) \text{ м/с}^2$ в порожнем направлении. На подъемах движение более равномерное, значения ускорений на этих участках приближается к нулю. При движении автосамосвала под уклон больше 55 ‰ основная масса значений ускорения лежат в пределах от $(-0,34)$ до $(0,34) \text{ м/с}^2$, но наблюдается большой разброс скоростей, которые водители выбирают из соображений безопасности спуска. С увеличением крутизны спуска эта неравномерность выбора уменьшается [107, 108].

Средние значения ускорений близки к нулю, следовательно, в модели движения в случае близких значений начальной и конечной скоростей движение можно считать равномерным, а в случае различия их значений следует использовать доверительные интервалы ускорений [107, 108].

Таким образом, в модели движения при расчете неустановившихся режимов в случае движения по горизонтальному участку доверительный интервал ускорений составляет от $(-0,425)$ до $(0,394)$ м/с^2 в груженом направлении и от $(-0,534)$ до $(0,420)$ м/с^2 в порожнем, а при увеличении уклона он уменьшается и на уклоне 114 ‰ составляет от $(-0,101)$ до $(0,079)$ м/с^2 в груженом направлении и от $(-0,104)$ до $(0,103)$ м/с^2 в порожнем [107, 108].

2.4. Выводы

1. Выявлено, что основными параметрами трасс, ограничивающими скорость движения, являются продольный уклон, коэффициент сцепления и радиус поворота, а параметрами трасс, определяющими скорость движения автосамосвалов, являются коэффициент сопротивления качению, продольный уклон и неровности дорожного полотна.

2. Экспериментально установлено, что наибольшая вариация скоростей наблюдается на ровных участках, значения ускорений изменяются от $(-2,03)$ до $(1,52)$ м/с^2 , а на уклонах больше 55 ‰ движение более равномерное, значения ускорений на этих участках в основной массе находятся в диапазоне от $(-0,34)$ до $(0,34)$ м/с^2 при движении на спуск и от $(-0,17)$ до $(0,17)$ м/с^2 при движении на подъем.

3. Рекомендовано, что в расчетах неустановившихся режимов движения, возникающих при въезде автосамосвала на участок с отличной от предыдущего скоростью движения, следует использовать доверительные интервалы ускорений, которые на горизонтальном участке трассы лежат в пределах от $(-0,43)$ до $(0,39)$ м/с^2 в груженом направлении и от $(-0,53)$ до $(0,42)$ м/с^2 в порожнем, а при увеличении уклона они уменьшаются и на уклонах больше 110 ‰ составляют от $(-0,10)$ до $(0,08)$ м/с^2 в груженом направлении и от $(-0,10)$ до $(0,10)$ м/с^2 в порожнем.

3. ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ОТ ПРО- ДОЛЬНЫХ УКЛОНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАСС

3.1. Расчетная схема маршрута

В виду того, что в реальности геометрия маршрутов движения карьерных автосамосвалов характеризуется большим разнообразием, а также имеются значительные изменения величин продольного уклона в пределах одной трассы, возникает необходимость применения единой расчётной схемы маршрута для получения закономерностей изменения производительности и себестоимости перевозок карьерных автосамосвалов от продольного уклона трассы.

В зависимости от геометрии различают простую, спиральную, петлевую и комбинированную трассы в соответствии с рис. 3.1–3.3.

Если сделать развёртки представленных выше трасс, то можно заметить, что все они представляют собой совокупность отрезков трассы в соответствии с рис. 3.4.

Любую трассу можно представить в виде простой в соответствии с рис. 3.1., если допустить, незначительное изменение продольных уклонов отрезков трассы. Применяя такую расчётную схему маршрута, мы используем допущение о пренебрежении снижения скорости автомобиля на криволинейных участках трассы.

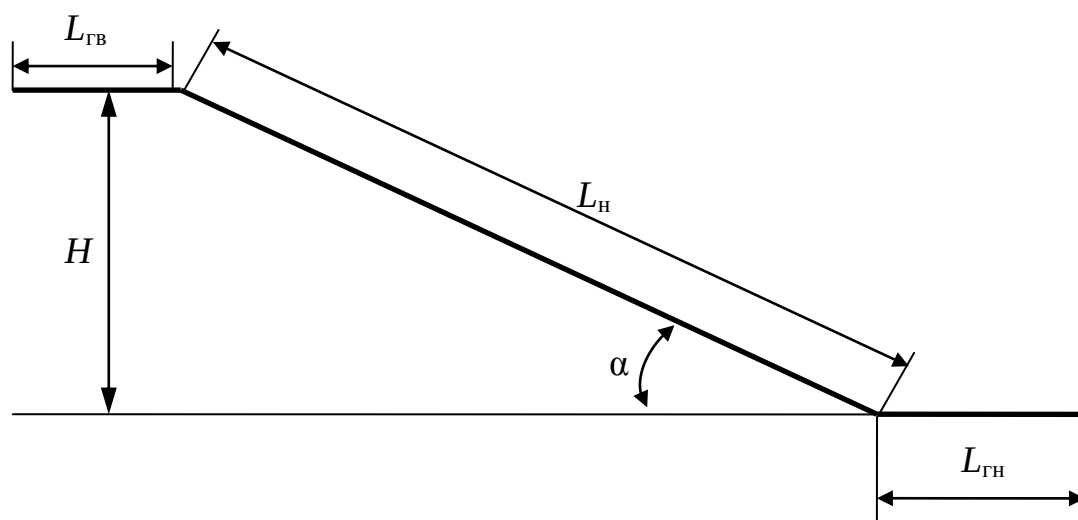


Рис. 3.1. Простая трасса

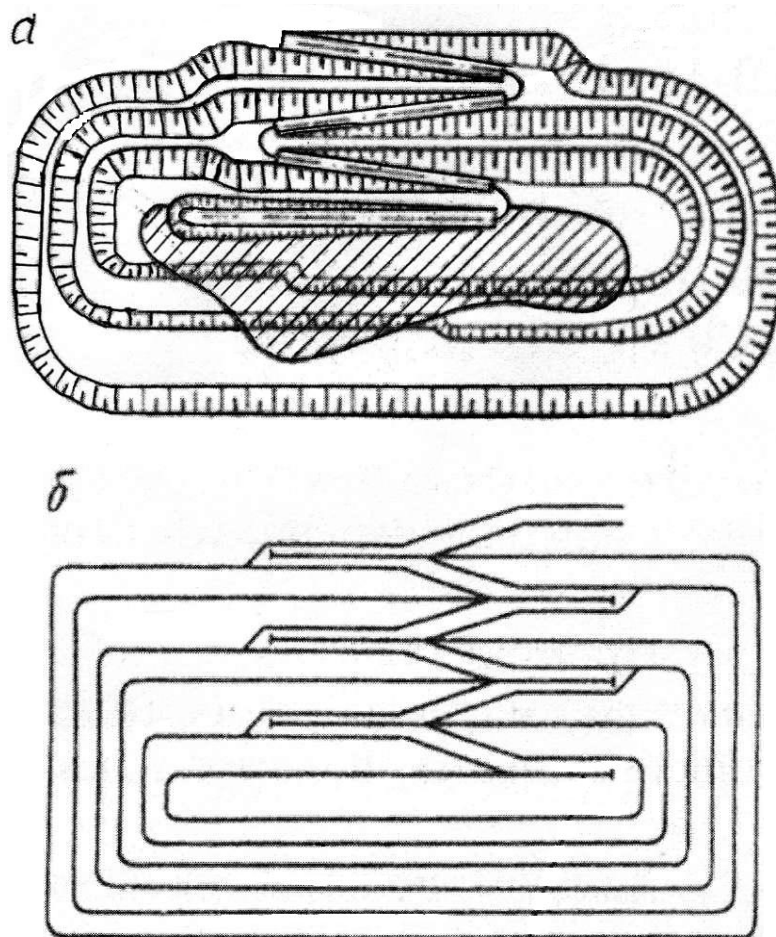


Рис. 3.2. Петлевая (а) и тупиковая (б) трассы

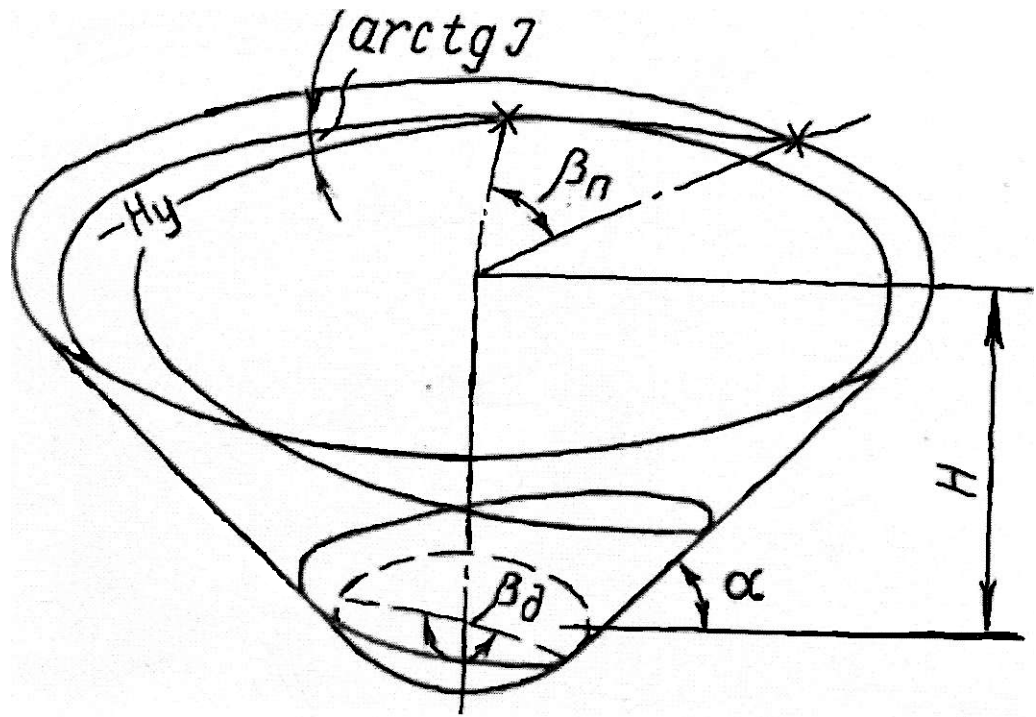


Рис. 3.3. Спиральная трасса

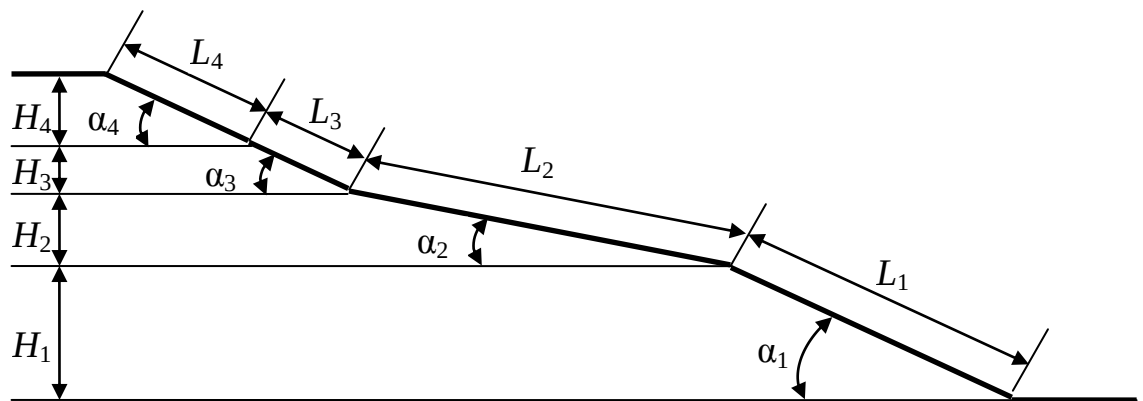


Рис. 3.4. Развёртка трассы

Длина транспортирования:

$$l = L_{\text{ГВ}} + L_{\text{Н}} + L_{\text{ГН}}, \quad (3.1)$$

где $L_{\text{ГВ}}$ — длина горизонтального верхнего участка маршрута, км; $L_{\text{Н}}$ — длина наклонного участка маршрута, км; $L_{\text{ГН}}$ — длина горизонтального нижнего участка маршрута, км.

Расчётная схема такова, что сразу после съезда автосамосвала с наклонного участка маршрута он начинает маневрировать под погрузку или разгрузку, а после маневрирования, погрузки или разгрузки он сразу начинает двигаться по наклонному участку маршрута. Длительность манёвров учитывает время простоя автосамосвала в течение одного рейса $T_{\text{пр}}$, поэтому в формулах для подсчёта производительности автомобилей длина транспортирования принимается равной

$$l = L_{\text{н}}, \quad (3.2)$$

Представим длину транспортирования через продольный уклон трассы:

$$l = L_{\text{н}} = \frac{H}{\sin \alpha}, \quad (3.3)$$

где H – перепад высот транспортирования, км.

В виду малости α :

$$i = \operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha, \quad (3.4)$$

где i – продольный уклон трассы.

Из этого получаем:

$$l = \frac{H}{i}. \quad (3.5)$$

Таким образом, длина транспортирования обратно пропорциональна продольному уклону трассы.

3.2. Критерии эффективности экскаваторно-автомобильных комплексов

Продольный уклон дороги оказывает сложное воздействие на производительность ЭАК. Рассмотрим простой ЭАК, состоящий из одного экскаватора и одного автосамосвала. С одной стороны, если принять техническую скорость автосамосвала неизменной, тогда с увеличением уклона за счет уменьшения расстояния транспортирования производительность ЭАК будет увеличиваться. С другой стороны, увеличение уклона приводит к снижению технической скорости, что увеличивает время транспортирования, а, следовательно, уменьшает производительность. Следовательно, реальная зависимость часовой производительности от продольного уклона трассы носит полиномиальный характер [91] (рис. 3.5) и описывается уравнением вида:

$$W_T = Ai^4 + Bi^3 + Ci^2 + Di + E \quad (3.6)$$

где i – продольный уклон трассы, ‰; A, B, C, D, E – коэффициенты, зависящие от параметров трассы и технических характеристик машин, входящих в ЭАК.

Помимо производительности карьерных автосамосвалов продольный уклон трассы также будет оказывать влияние и на структуру ЭАК. Так, например, уменьшение продольного уклона повлечет за собой увеличение расстояния транспортирования и времени движения автосамосвалов, что вызовет необходимость увеличить их количество. На рисунке 3.6 представлено количество автосамосвалов в ЭАК в зависимости от продольного уклона трассы.

Однако, снижение технической скорости, как следствие увеличения продольного уклона при неизменном расстоянии транспортирования, также приведет к росту числа автосамосвалов [92].

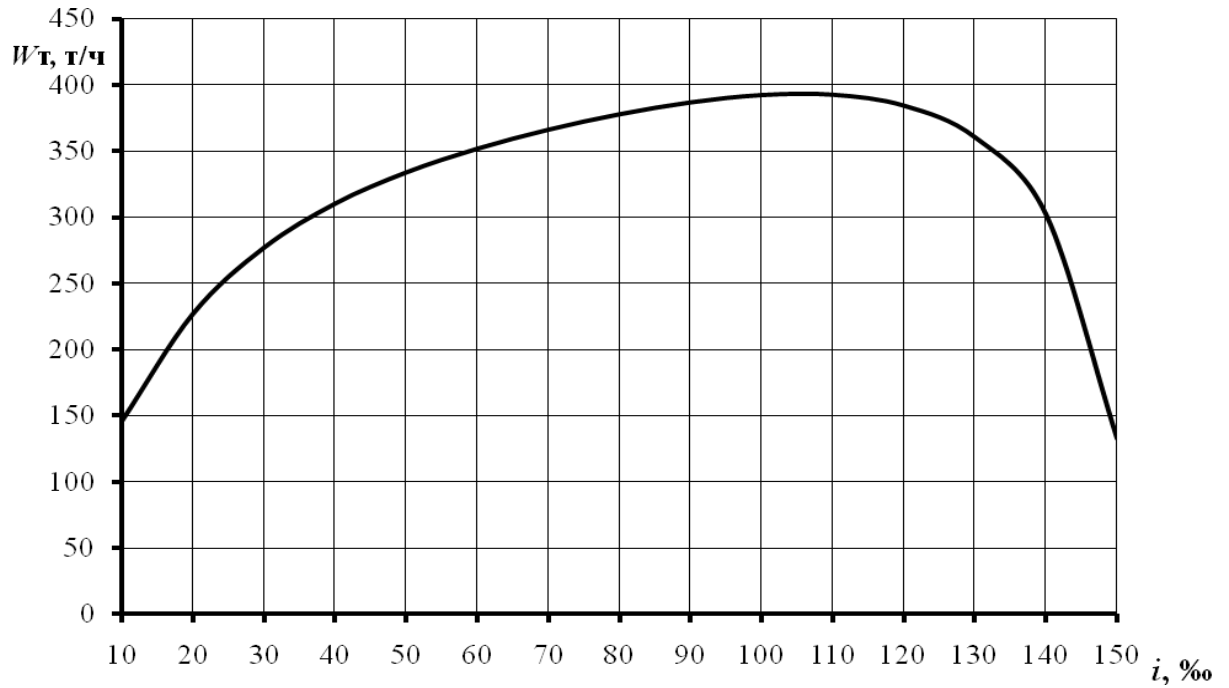


Рис. 3.5. Зависимость производительности (W_T) автосамосвала БелАЗ-75131 от продольного уклона трассы (i)

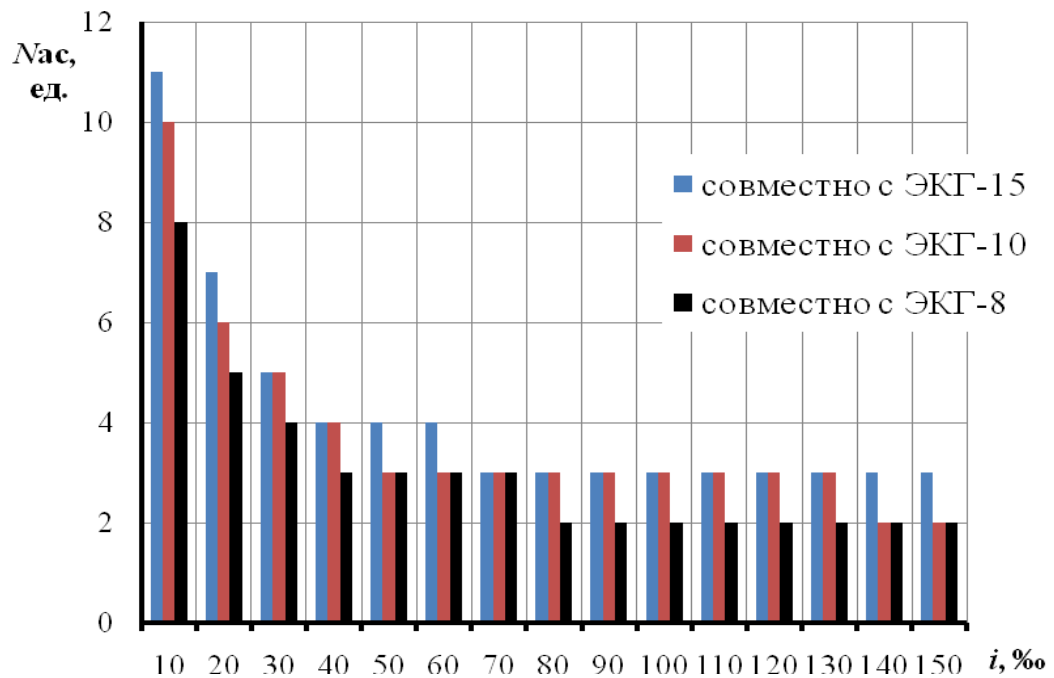


Рис. 3.6. Зависимость количества автосамосвалов (N_{ac}) БелАЗ-75131 от продольного уклона трассы (i)

Эксплуатация различных экскаваторов с разным количеством карьерных автосамосвалов, т.е. изменение структуры ЭАК, приводит к изменению производительности ЭАК в зависимости от продольного уклона трассы (рис. 3.7).

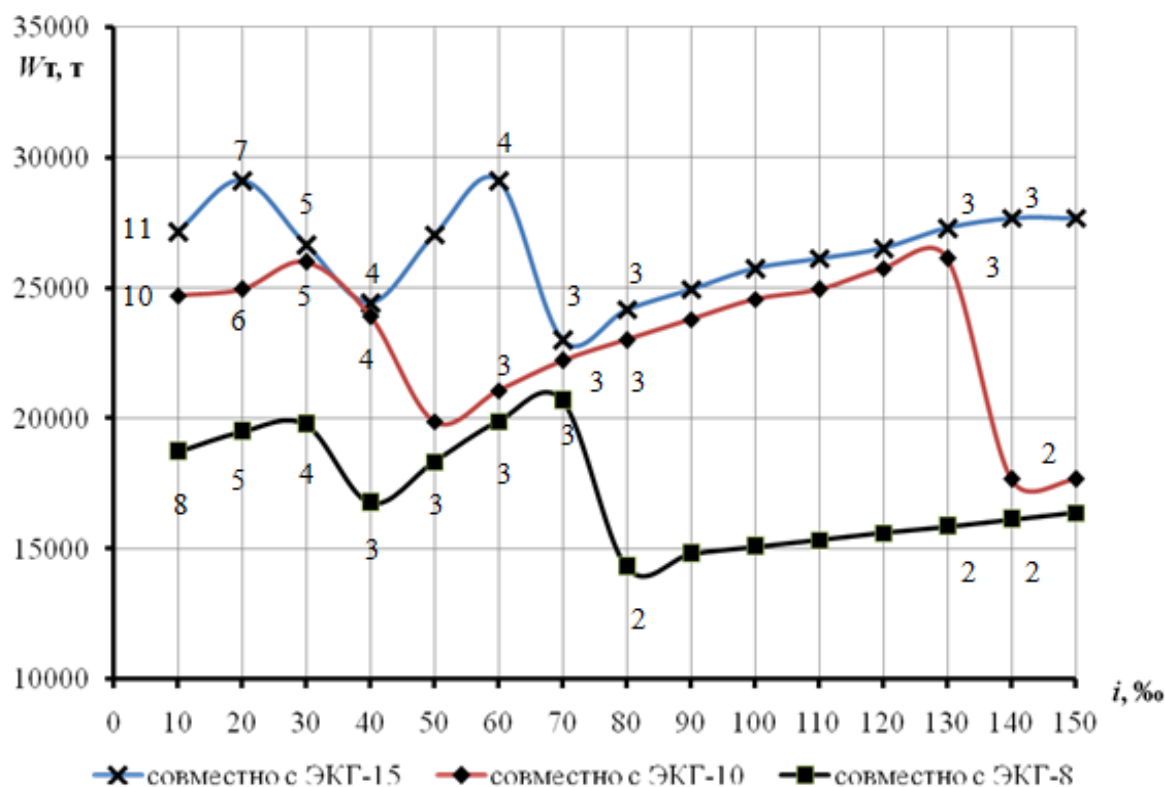


Рис. 3.7. Зависимость производительности (W_t) и количества автосамосвалов БелАЗ-75131 в ЭАК от продольного уклона трассы (i)

Такой характер изменения производительности обусловлен не только изменением количества автосамосвалов в ЭАК в зависимости от уклона трассы, но и косвенным влиянием других структурных параметров ЭАК. Так, например, погрузка одного и того же автосамосвала разными экскаваторами даст разные значения коэффициента использования грузоподъемности, что в свою очередь скажется на скорости движения автосамосвала на уклоне [93].

Тягово-скоростные свойства автосамосвала определяют его способность преодолевать уклоны различной величины и, в свою очередь, оказыва-

ют влияние на характер зависимости производительности ЭАК от продольного уклона трассы (рис. 3.8).

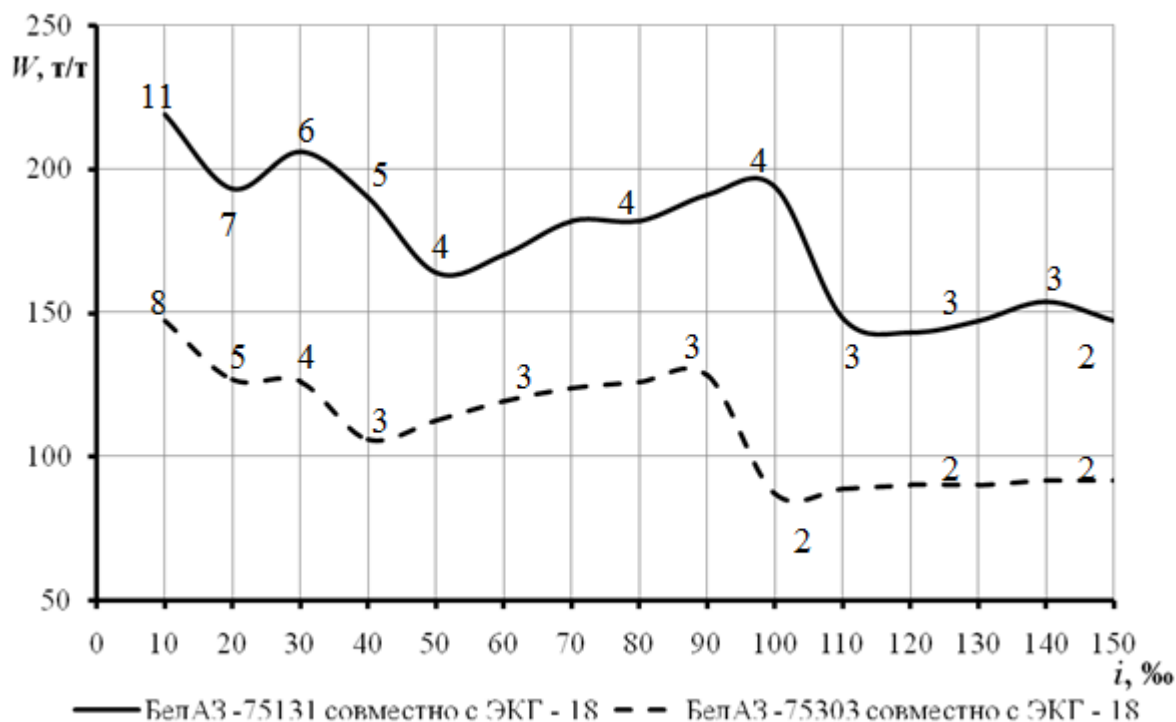


Рис. 3.8. Зависимость производительности одной автотонны (W) от продольного уклона трассы (i)

Таким образом, продольный уклон трассы оказывает значительное и весьма сложное влияние на производительность ЭАК и, следовательно, может быть использован для выбора его рациональной структуры для эксплуатации с максимальной производительностью.

Продольный уклон дороги оказывает сложное воздействие на себестоимость перевозок. С одной стороны, если принять эксплуатационные затраты неизменными, тогда с увеличением уклона за счет повышения часовой производительности себестоимость перевозок будет снижаться, и зависимость себестоимости перевозок от продольного уклона дороги будет носить гиперболический характер [94] (рис. 3.9).

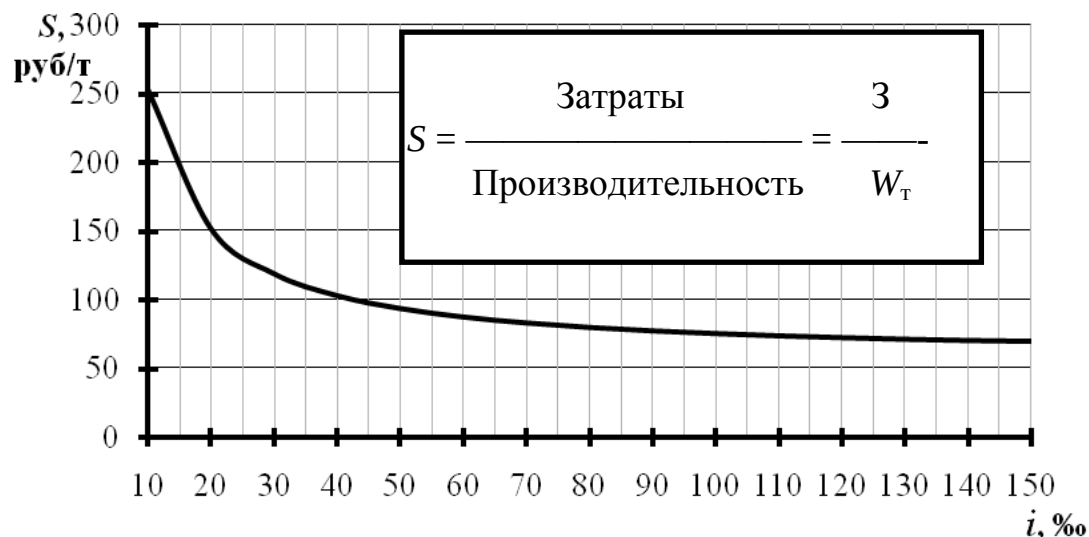


Рис. 3.9. Зависимость себестоимости перевозок (S) автосамосвала БелАЗ-75131 от продольного уклона трассы (i) при неизменных затратах

С другой стороны, увеличение уклона приводит к повышению расхода топлива и смазочных материалов, увеличению простоев автосамосвалов в техническом обслуживании и ремонте, более быстрому износу парка автосамосвалов и, значит, увеличению эксплуатационных расходов по соответствующим статьям. Таким образом, зависимость суммарных эксплуатационных затрат от уклона будет направлена на увеличение затрат с ростом уклона (рис. 3.10).

Следовательно, реальная зависимость себестоимости перевозок от продольного уклона дороги носит полиномиальный характер [95] (рис. 3.11) и описывается уравнением (3.6), а значит, имеет экстремум, при котором себестоимость перевозок будет минимальна. С другой стороны себестоимость может быть использована для рационального выбора продольного уклона трассы.

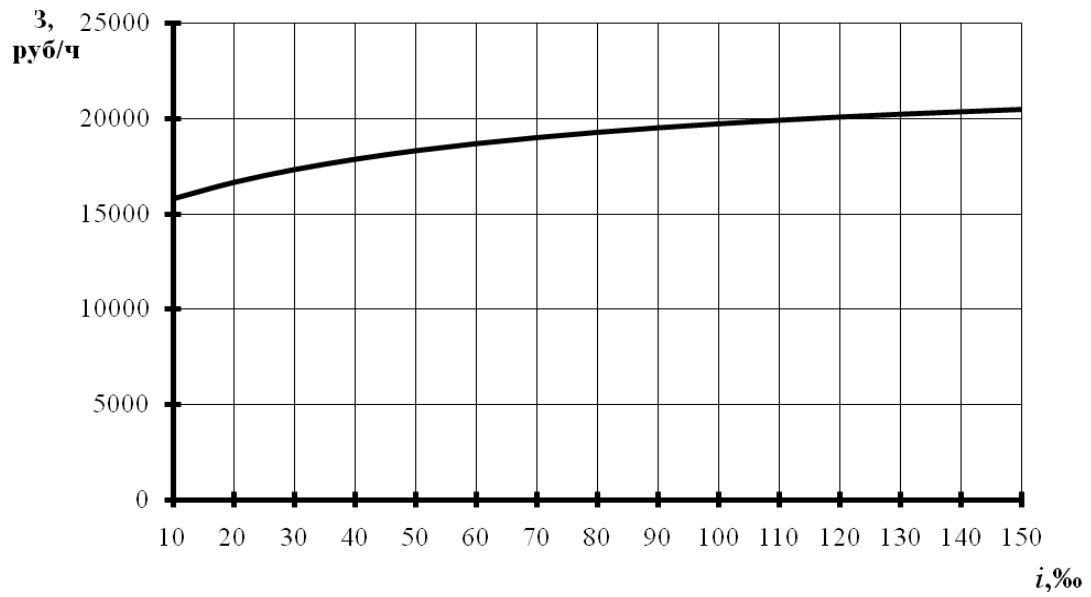


Рис. 3.10. Зависимость суммарных часовых эксплуатационных затрат (Z) автосамосвалов БелАЗ-75131 от продольного уклона трассы (i)

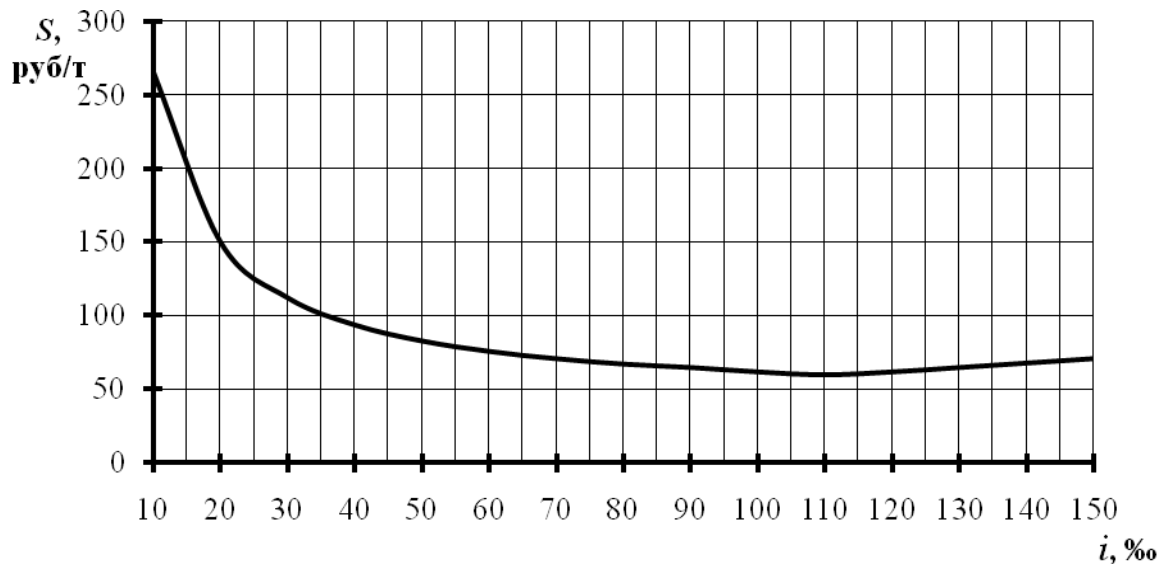


Рис. 3.11. Реальная зависимость себестоимости (S) перевозок автосамосвалов БелАЗ-75131 от продольного уклона трассы (i)

В процессе транспортирования горной массы на карьерах перевозят два типа грузов: вскрышную породу и полезное ископаемое. Для каждого из этих грузов будет свое условие определения рационального уклона.

Перевозка вскрышных пород не приносит доход от транспортного процесса, поэтому для предприятия определяющим будет минимизация всех эксплуатационных затрат. В связи с этим, рациональным уклоном при перевозке вскрыши будет тот, при котором будет минимальна себестоимость перевозок:

$$i_{\text{рац}} \rightarrow S = \min, \quad (3.7)$$

Одним из важнейших звеньев получения горнодобывающим предприятием прибыли является перевозка полезного ископаемого. Поэтому, величина эксплуатационных затрат на перевозку не будет иметь большого значения, а определяющим фактором будет величина полученной прибыли за определенный период. В связи с этим, оценивать рациональность продольного уклона трассы при транспортировке полезного ископаемого при помощи только себестоимости перевозок нецелесообразно. Так, например, некоторое изменение продольного уклона при транспортировке полезного ископаемого, приведет к росту себестоимости за счет увеличения эксплуатационных затрат, но если при этом повысится производительность карьерных автосамосвалов, то общая прибыль от совершения транспортного процесса также увеличится. Планируемая прибыль от транспортировки полезного ископаемого в зависимости от продольного уклона трассы имеет вид полиномы, обратной относительно оси i полиноме себестоимости [91] (рис. 3.12).

Экстремумы себестоимости и планируемой за определенный период прибыли совпадают достаточно редко. В связи с этим, условие для оценки рациональности продольного уклона трассы при транспортировке полезного ископаемого будет иметь вид:

$$i_{\text{рац}} \rightarrow \Pi = Д - SQ = \max, \quad (3.8)$$

где $i_{\text{рац}}$ – рациональный продольный уклон трассы; S – себестоимость транспортирования полезного ископаемого, руб/т; D – доход от реализации полезного ископаемого, руб; Q – объем реализованного полезного ископаемого, т.

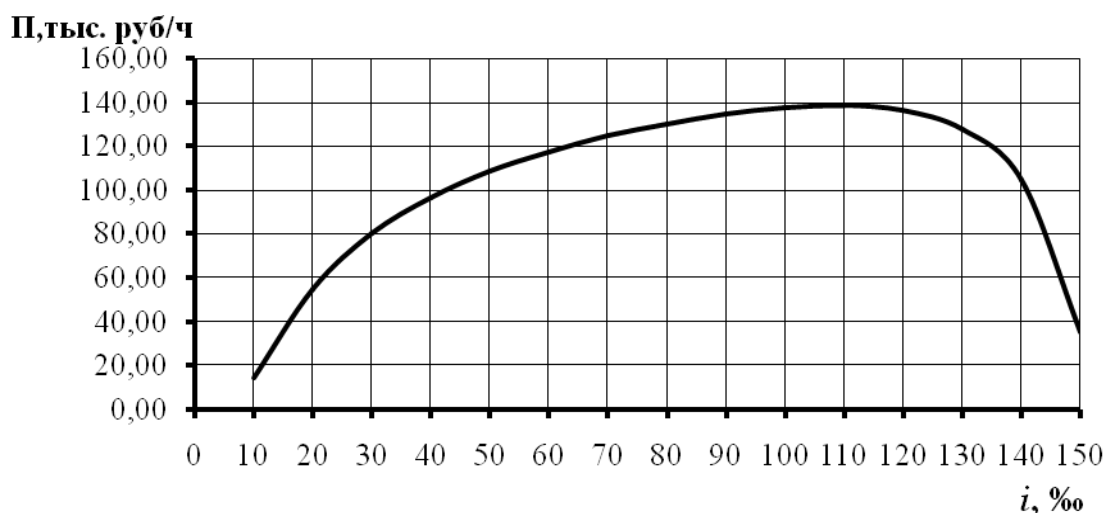


Рис. 3.12. Зависимость планируемой прибыли (П) автосамосвалов БелАЗ-75215 за час, полученной в результате перевозки полезного ископаемого, от продольного уклона трассы (i)

3.3. Определение рационального продольного уклона трассы

3.3.1. Определение рационального продольного уклона трассы на основе производительности

Условие рационального выбора запишется в виде:

$$[W_T = \max] \rightarrow i_{\text{рац}}$$

То есть рациональный уклон будет соответствовать максимальной производительности ЭАК [92, 96]

$$W_T = \frac{q \gamma T_{\text{см}} N_{\text{ас}}}{\frac{l_{\text{ег}}}{\beta V_T} + T_{\text{пр}}}, \quad (3.9)$$

где q – грузоподъемность автосамосвала, т; γ – коэффициент использования грузоподъемности; β – коэффициент использования пробега; $T_{\text{пр}}$ – общее время простоя автосамосвала в течение одного рейса, ч; $V_{\text{т}}$ – техническая скорость движения автосамосвала, км/ч; $N_{\text{ас}}$ – число автосамосвалов ЭАК; $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $l_{\text{ег}}$ – расстояние транспортирования груза, км (см. формулу (3.5)).

Техническую скорость можно определить по формуле:

$$V_{\text{т}} = 2 \left(\frac{V_i V_{\text{д}}}{V_i + V_{\text{д}}} \right), \quad (3.10)$$

где, V_i – скорость движения автосамосвала на подъем, км/ч; $V_{\text{д}}$ – допустимая скорость движения на спуск, км/ч.

Скорости движения на подъем V_i и спуск $V_{\text{д}}$ определяются по формулам (2.3) и (2.10), а затем корректируются с учетом доверительных интервалов определенных в разделе 2.3.

С учетом этого можно записать:

$$W_{\text{т}} = \frac{q\gamma T_{\text{см}} N_{\text{ас}}}{\frac{H}{2i\beta \left(\frac{V_i * V_{\text{д}}}{V_i + V_{\text{д}}} \right)} + T_{\text{пр}}} . \quad (3.11)$$

На рис. 3.13 представлена схема алгоритма определения рационального уклона на основе производительности.

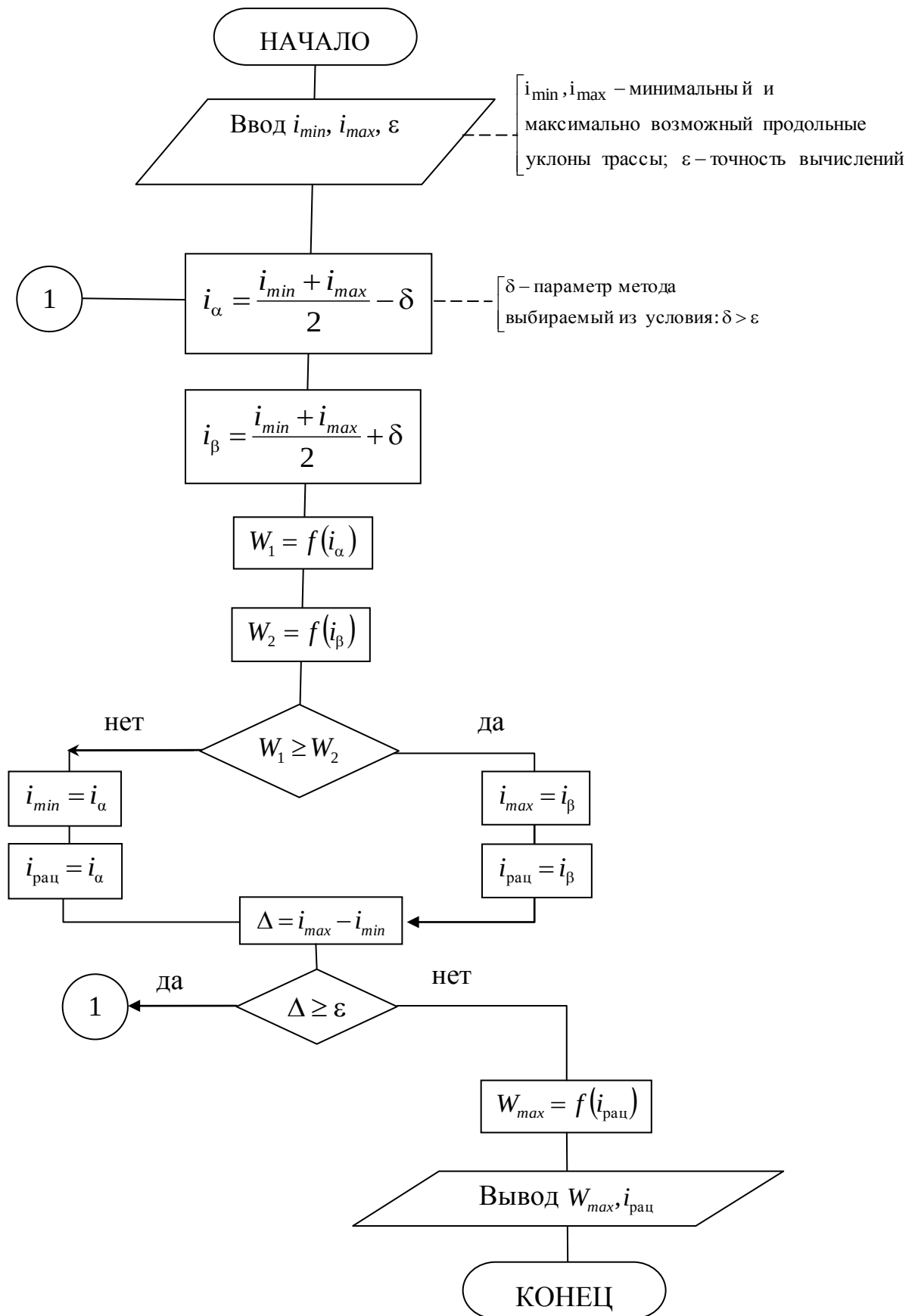


Рис. 3.13. Схема алгоритма расчета рационального уклона на основе функционального критерия (процедура «PROIS»)

Производится расчет для разных ЭАК, при их эксплуатации в различных дорожных, технико-эксплуатационных, климатических и горнотехнических условиях. Для оперативности и удобства проведения расчета необходимо создать базу данных, включающую в себя:

- данные по конструкционным признакам для различных ЭАК;
- данные, характеризующие дорожные условия;
- данные, характеризующие технико-эксплуатационные данные;
- данные, характеризующие горнотехнические условия;
- данные, характеризующие климатические условия.

Оптимумы для различных сочетаний ЭАК приходятся на весь диапазон продольных уклонов трасс (см. рис. 3.8, 3.9), в которых разрешена эксплуатация карьерных автосамосвалов. Таким образом, рациональный ЭАК на основе производительности возможно подобрать для любой трассы.

3.3.2. Определение рационального продольного уклона трассы на основе себестоимости при перевозке вскрышных пород

Условие рационального выбора запишется в виде:

$$[S_T = \min] \rightarrow i_{\text{рац}},$$

где S_T – себестоимость транспортирования груза, руб.

То есть рациональный продольный уклон карьерной дороги при перевозке вскрыши будет соответствовать минимальной себестоимости одной тонны перевезенного груза

$$S_T = \frac{3_{\text{пер}} + 3_{\text{пост}} + 3_{\text{пр}} W_T + 3_{\text{д}} W_{\text{ткм}}}{W_T}, \quad (3.12)$$

или

$$S_T = \frac{3_{\text{пер}}}{W_T} + \frac{3_{\text{пост}}}{W_T} + 3_{\text{д}} \frac{H}{i} + 3_{\text{пр}}, \quad (3.13)$$

где $Z_{\text{пост}}$, $Z_{\text{пер}}$ – соответственно, постоянные и переменные часовые затраты на транспортировку, руб/ч; $Z_{\text{пр}}$ – затраты на погрузку и разгрузку одной тонны горной массы, руб/т; $Z_{\text{д}}$ – затраты, связанные с содержанием одного километра технологической трассы, руб/ткм; $W_{\text{т}}$, $W_{\text{ткм}}$ – часовая производительность карьерных автосамосвалов, выраженная, соответственно, в т/ч и ткм/ч; H – перепад высот транспортирования, км.

$$W_{\text{т}} = \frac{q\gamma}{\frac{H}{2i\beta\left(\frac{V_i * V_{\text{д}}}{V_i + V_{\text{д}}}\right)} + T_{\text{пр}}}, \quad (3.14)$$

где q – грузоподъемность автосамосвала, т; γ – коэффициент использования грузоподъемности; β – коэффициент использования пробега; $T_{\text{пр}}$ – общее время простоя автосамосвала в течение одного рейса, ч; V_i – скорость движения автосамосвала на подъем, км/ч; $V_{\text{д}}$ – допустимая скорость движения на спуск, км/ч.

Из формулы (3.13) следует, что четвертое слагаемое себестоимости не зависит от продольного уклона карьерой дороги, оно, в данном случае является постоянным и, значит, не будет оказывать влияние на величину рационального уклона. Следовательно, для решения задачи определения рационального продольного уклона карьерной трассы при транспортировке вскрыши результирующая формула имеет следующий вид:

$$S_{\text{т}} = \frac{Z_{\text{пер}} + Z_{\text{пост}}}{W_{\text{т}}} + Z_{\text{д}} \frac{H}{i}, \quad (3.15)$$

Далее рассмотрим все статьи затрат, обозначенных в формуле (3.15) и их связь с продольным уклоном технологической трассы.

Из формулы (3.15) следует, что затраты связанные с содержанием карьерных дорог обратно пропорциональны величине уклона и не зависят от часовой производительности карьерных автосамосвалов

$$Z_{\text{пер}} = Z_{\text{т}} + Z_{\text{см}} + Z_{\text{ш}} + Z_{\text{то,тр}}, \quad (3.16)$$

где $Z_{\text{т}}$, $Z_{\text{см}}$, $Z_{\text{ш}}$, $Z_{\text{то,тр}}$ – часовые затраты, соответственно, на топливо, смазочные материалы, шины, проведение технического обслуживания и текущего ремонта, руб/ч.

$$Z_{\text{т}} = G_{\text{т}} \Pi_{\text{т}} \quad (3.17)$$

где $G_{\text{т}}$ – часовой расход дизельного топлива, л/ч; $\Pi_{\text{т}}$ – цена одного литра дизельного топлива, руб.

В процессе выполнения транспортной работы карьерный автосамосвал может находиться различных фазах движения [110], в соответствии с которыми и необходимо определять расход топлива. В течение рейса автосамосвал может:

- 1) двигаться на подъем в груженом или порожнем состоянии;
- 2) двигаться под уклон в груженом или порожнем состоянии;
- 3) маневрировать в пунктах погрузки или разгрузки;
- 4) простаивать, ожидая погрузку или разгрузку.

В первом случае автосамосвал движется в тяговом режиме и для расчета расхода топлива можно воспользоваться уравнением топливного баланса [97, 98]:

$$Q_s = \frac{g_e \eta_e}{10 \gamma_{\text{т}} V_{\text{т}}} (N_{\text{тд}} + N_{\text{мд}} + N_{\text{эд}} + N_{\text{тр}} + N_f + N_{\alpha} + N_{\omega} + N_j), \quad (3.18)$$

где Q_s – путь расход топлива, л/100км; g_e – удельный расход двигателем дизельного топлива, г/(кВт·ч); η_e – эффективный КПД двигателя; γ_t – плотность дизельного топлива, кг/л; N_{td} , N_{md} , $N_{эд}$ – соответственно, термодинамические, механические и эксплуатационные потери в двигателе, кВт; $N_{тр}$ – потери мощности в трансмиссии, кВт; N_f , N_α , N_ω , N_j – мощность двигателя, затрачиваемая, соответственно, на преодоление автосамосвалом сил сопротивления качению, подъему, воздуха и сил инерции, кВт; V_t – техническая скорость автосамосвала, м/с.

Часовой расход топлива запишется [98, 99]:

$$G_{т\Box} = \frac{10g_e\eta_e}{\gamma_{т\Box}} (N_{td} + N_{md} + N_{эд} + N_{тр} + N_f + N_\alpha + N_\omega + N_j), \quad (3.19)$$

Распишем правую часть уравнения.

$$N_{td} = N_{т\Box} - N_i = (1 - \eta_i) N_{т\Box}, \quad (3.20)$$

$$N_{md} = N_i - N_e = (1 - \eta_m) N_i, \quad (3.21)$$

$$N_{эд} = N_e - N_\omega = (1 - \eta_\omega) N_e, \quad (3.22)$$

$$N_{тр} = N_\omega - N_K = (1 - \eta_{тр}) N_\omega, \quad (3.23)$$

$$N_{т\Box} = \frac{G_{т\Box} H_u}{3600}, \quad (3.24)$$

или

$$N_{т\Box} = N_i + (1 - \eta_i) N_{т\Box}. \quad (3.25)$$

Следовательно

$$N_{\square} = \frac{N_i}{\eta_i}, \quad (3.26)$$

учитывая это, формула (3.20) перепишется в виде:

$$N_{\text{тд}} = N_{\text{т}\square} - N_i = (1 - \eta_i) \frac{N_i}{\eta_i}, \quad (3.27)$$

где $N_{\text{т}}$ – мощность, эквивалентная тепловой энергии, кВт; H_u – низшая теплота сгорания дизельного топлива, кДж/кг; N_i , N_e , $N_{\text{э}}$ – соответственно, индикаторная, эффективная и эксплуатационная мощности двигателя, кВт; $N_{\text{к}}$ – мощность, подводимая к ведущим колесам автосамосвала, кВт; η_i , $\eta_{\text{м}}$, $\eta_{\text{э}}$ – соответственно, индикаторный, механический и эксплуатационный КПД двигателя; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии.

$$N_f = \frac{(G_a + q\gamma)gf\cos\alpha}{1000} V_{\text{т}\square} \approx \frac{(G_a + q\gamma)gf}{1000} V_{\text{тл}}, \quad (3.28)$$

$$N_{\alpha} = \frac{(G_a + q\gamma)g\sin\alpha}{1000} V_{\text{т}\square} \approx \frac{(G_a + q\gamma)gi}{1000} V_{\text{тл}}, \quad (3.29)$$

$$N_{\omega} = \frac{KFV_{\text{тл}}^3}{1000}, \quad (3.30)$$

$$N_j = \frac{(G_a + q\gamma)\delta}{1000} V_{\text{т}\square} j_a. \quad (3.31)$$

где G_a – собственная масса автосамосвала, кг; f – коэффициент сопротивления качению автосамосвала; α – угол продольного уклона карьерной автодо-

роги, град.; g – ускорение свободного падения, м/с²; i – величина продольного уклона карьерной автодороги, %; K – коэффициент обтекаемости карьерного автосамосвала, Н·с²/м⁴; F – наибольшая площадь поперечного сечения карьерного автосамосвала, м²; δ – коэффициент учета вращающихся масс карьерного автосамосвала; j_a – ускорение автосамосвала, м/с²; V_T – техническая скорость автосамосвала, м/с; V_{TB} – геометрическая сумма скоростей автосамосвала и ветра, м/с.

$$V_{TB} = \sqrt{V_T^2 + V_B^2 + 2V_TV_B \cos \beta_B}, \quad (3.32)$$

где V_B – скорость ветра, м/с; β_B – угол между направлением ветра и продольной осью автосамосвала, град.

Подставив выражения (3.28) – (3.31) в уравнение (3.19), получим:

$$G_{T\Box} = \frac{10g_e \eta_e}{\gamma_{T\Box}} (N_{TD} + N_{MD} + N_{ED} + N_{TP}) + \frac{10g_e \eta_e}{\gamma_{\Box}} \times \left[\frac{(G_a + q\gamma)gf}{1000} V_T + \frac{(G_a + q\gamma)gi}{1000} V_T + \frac{KF}{1000} V_{TB}^3 + \frac{(G_a + q\gamma)\delta}{1000} V_T j_a \right], \quad (3.33)$$

После некоторых упрощений, уравнение (3.33) будет иметь вид:

$$G_{T\Box} = \frac{10g_e \eta_e}{\gamma_{T\Box}} (N_{TD} + N_{MD} + N_{ED} + N_{TP}) + \frac{10g_e \eta_e}{\gamma_T} \left[\frac{g(f+i) + j_a \delta}{1000} (G_a + q\gamma) V_{T\Box} + \frac{KF}{1000} V_{TB}^3 \right], \quad (3.34)$$

Первое слагаемое уравнения (3.34) не зависит от технической скорости движения автосамосвала и является часовым расходом топлива от потерь мощности в двигателе и трансмиссии. Если обозначить его как часовой рас-

ход дизельного топлива автосамосвалом от внутренних потерь мощности G_η , тогда формула для часового расхода дизельного топлива примет вид:

$$G_T = G_\eta + \frac{10g_e\eta_e}{\gamma_T} \left[\frac{g(f+i) + j_a\delta}{1000} (G_a + q\gamma) V_{T\Box} + \frac{KF}{1000} V_{TB}^3 \right]. \quad (3.35)$$

На спуске автосамосвал, как правило, движется в режиме торможения, и часовой расход топлива не будет зависеть от технической скорости движения карьерного автосамосвала [100]:

$$G_T = \frac{10q_{xx}\eta_e}{\gamma_T} (N_{TD} + N_{MD} + N_{ЭД}), \quad (3.36)$$

где q_{xx} – удельный расход дизельного топлива двигателем карьерного автосамосвала на режиме холостого хода, г/(кВт·ч).

Полученные по формулам (3.35) и (3.36) расчетные значения часового расхода топлива необходимо уточнить [1]:

$$G_{T\text{факт}} = G_{T\Box} k_z k_{из}. \quad (3.37)$$

где k_z – коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива в зимнее время; $k_{из}$ – коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива при износе двигателя.

Расход смазочных материалов зависит от расхода топлива. Существуют нормативы расхода различных видов смазочных материалов на один литр израсходованного топлива [101]. В соответствии с этим часовые затраты на смазочные материалы определяются как:

$$З_{см} = G_{T\text{факт}} (q_{\text{мот}} \Pi_{\text{мот}} + q_{\text{транс}} \Pi_{\text{транс}} + q_{\text{спец}} \Pi_{\text{спец}} + q_{\text{пласт}} \Pi_{\text{пласт}}) \quad (3.38)$$

где $q_{\text{мот}}$, $q_{\text{транс}}$, $q_{\text{спец}}$, $q_{\text{пласт}}$ – нормативы расхода на 1 литр израсходованного дизельного топлива, соответственно, моторных, трансмиссионных и специальных масел, пластичных смазок, кг/л; $\Pi_{\text{мот}}$, $\Pi_{\text{транс}}$, $\Pi_{\text{спец}}$, $\Pi_{\text{пласт}}$ – цена одного килограмма, соответственно, моторных, трансмиссионных и специальных масел, пластичных смазок, руб/кг.

Часовые затраты на шины определяются как:

$$З_{\text{ш}} = G_{\text{шфакт}} \Pi_{\text{ш}}, \quad (3.39)$$

где $G_{\text{шфакт}}$ – фактический для данных условий движения автосамосвала часовой расход шин, 1/ч; $\Pi_{\text{ш}}$ – цена одной шины, руб.

Часовой нормативный расход шины зависит от суточного режима работы карьерных автосамосвалов и нормативного ресурса шин. Он рассчитывается по формуле [102]:

$$G_{\text{шнорм}} = \frac{l_{\text{сс}} n}{ct_{\text{см}} L_{\text{н}}}, \quad (3.40)$$

где $l_{\text{сс}}$ – среднесуточный пробег автосамосвала, км; n – количество установленных на автосамосвале колес; c – количество смен работы автосамосвала; $t_{\text{см}}$ – продолжительность одной смены, ч; $L_{\text{н}}$ – средненормативный ресурс шины на одном автосамосвале, км.

Средненормативный ресурс шин, установленных на одном автосамосвале, зависит от соотношения установленных на этом самосвале новых и уже восстановленных шин. Он определится как [102]:

$$L_{\text{н}} = \frac{L_{\text{нов}} n_{\text{нов}} + L_{\text{вост}} n_{\text{вост}}}{n}, \quad (3.41)$$

где $L_{\text{нов}}$, $L_{\text{восст}}$ – нормативный ресурс, соответственно, новой и восстановленной шины, км; $n_{\text{нов}}$, $n_{\text{восст}}$ – количество установленных на одном автосамосвале, соответственно, новых и восстановленных шин.

Фактический ресурс крупногабаритной шины зависит от состояния дорожного покрытия и от скорости движения по нему. Установлена эмпирическая зависимость ресурса крупногабаритной шины в зависимости от технической скорости движения автосамосвала и ровности дорожного полотна [103]:

$$L_{\text{ш}} = 102,3 - 0,105V_{\text{т}} - 0,149h - 0,08V_{\text{т}}h, \quad (3.42)$$

где $L_{\text{ш}}$ – фактический ресурс шины, выраженный в процентах от нормативного, %; h – средняя высота неровностей карьерной автодороги, т. е. величина прогиба шестиметровой линейки, положенной на поверхность карьерной автодороги, см.

Следовательно, изменение часового расхода шин будет обратно пропорционально изменению их ресурса:

$$G_{\text{шфакт}} = G_{\text{шнорм}} \frac{100}{L_{\text{ш}}}. \quad (3.43)$$

Тогда

$$З_{\text{ш}} = G_{\text{шнорм}} Ц_{\text{ш}} \frac{100}{L_{\text{ш}}}. \quad (3.44)$$

Если обозначить произведение часового нормативного расхода шин на цену шины, как нормативные часовые затраты на шины $З_{\text{шнорм}}$, то формула (3.44) примет вид:

$$З_{\text{ш}} = З_{\text{шнорм}} \frac{100}{L_{\text{ш}}} \quad (3.45)$$

или

$$3_{\text{ш}} = 3_{\text{шнорм}} \frac{100}{102,3 - 0,149h - V_{\text{т}}(0,105 + 0,08h)}. \quad (3.46)$$

Вопросу технического обслуживания и ремонта горнотранспортного оборудования посвящена работа Квагинидзе В.С. [104].

Часовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт автосамосвалов – есть произведение удельных затрат на ТО и ТР на эксплуатационную скорость автосамосвалов:

$$3_{\text{то,тр}} = 3_{\text{то,тр}}^{\text{уд}} V_{\text{э}}. \quad (3.47)$$

Удельные затраты на ТО и ТР складываются из удельных затрат на техническое обслуживание и удельных затрат на текущий ремонт, выраженных в руб/км.

$$3_{\text{то,тр}}^{\text{уд}} = 3_{\text{то}}^{\text{уд}} + 3_{\text{тр}}^{\text{уд}}, \quad (3.48)$$

$$3_{\text{то}}^{\text{уд}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n l_{\text{то}i}}, \quad (3.49)$$

$$3_{\text{тр}}^{\text{уд}} = \frac{\sum_{j=1}^m c_j}{\sum_{j=1}^m L_{\text{п}j}}, \quad (3.50)$$

где d – стоимость проведения одного технического обслуживания данного карьерного автосамосвала, руб; $l_{\text{то}}$ – периодичность проведения данного вида

технического обслуживания, км; n – количество видов технического обслуживания; c – стоимость проведения текущего ремонта данного узла или агрегата, руб; L_p – средний ресурс данного узла или агрегата, км; m – количество узлов и агрегатов на автосамосвале, требующих проведение хотя бы одного раза в течении всего срока эксплуатации работ по текущему ремонту.

Изучению влияния различных дорожных факторов, как по отдельности, так и в комплексе на ресурс опорных металлоконструкций посвящены работы Кулешова А.А., Зырянова Н.В и Зырянова И.В. [103], Астаховой Т.В. [105], Кузнецова И.В. [106].

В работе [103] установлено, что при движении с высокой скоростью по неровной дороге опорные металлоконструкции (рама, подвеска, диски колес и т.д.) воспринимают на себя значительные ударные и вибрационные нагрузки, что ощутимо снижает их ресурс. Была выведена регрессионная зависимость ресурса, выраженного в процентах от номинального, опорных металлоконструкций карьерного автосамосвала от технической скорости его движения и высоты неровности дорожного полотна карьерной автодороги.

$$L_M = 101,2 + 0,038V_T + 0,01h - 0,084V_T h, \quad (3.51)$$

где L_M – фактический ресурс опорных металлоконструкций, выраженный в процентах от нормативного, %; h – средняя высота неровностей карьерной автодороги, т. е. величина прогиба шестиметровой линейки, положенной на поверхность карьерной автодороги, см; V_T – техническая скорость автосамосвала, км/ч.

Следовательно, узлы и агрегаты автосамосвала можно разделить на две группы. Во-первых, узлы и агрегаты, ресурс которых не зависит от технической скорости движения карьерных автосамосвалов. Они формируют постоянные затраты на текущий ремонт [111]. И, во-вторых, узлы, и агрегаты, относящиеся к опорным металлоконструкциям, ресурс которых будет зависеть

от технической скорости движения карьерных автосамосвалов по карьерной автодороге с заданной неровностью дорожного полотна. Затраты на их текущий ремонт будут носить переменный характер.

$$Z_{\text{тр}}^{\text{уд}} = \frac{\sum_{j=1}^k c_{\text{пост}}}{\sum_{j=1}^k L_{\text{рпост}}} + \frac{\sum_{s=1}^x c_{\text{м}}}{\sum_{s=1}^x L_{\text{рм}}} \cdot \frac{100}{L_{\text{м}}}, \quad (3.52)$$

или

$$Z_{\text{тр}}^{\text{уд}} = Z_{\text{трпост}} + Z_{\text{трм}} \frac{100}{101,2 + 0,01h + V_{\text{т}}(0,038 - 0,084h)}, \quad (3.53)$$

где $c_{\text{пост}}$, $c_{\text{м}}$ – стоимость текущего ремонта, соответственно, узлов и агрегатов, не относящихся к опорным металлоконструкциям, и опорных металлоконструкций, руб; $L_{\text{рпост}}$, $L_{\text{рм}}$ – средний ресурс, соответственно, узлов и агрегатов, не относящихся к опорным металлоконструкциям, и опорных металлоконструкций, км; k – количество узлов и агрегатов, относящихся к опорным металлоконструкциям; x – количество опорных металлоконструкций; $L_{\text{м}}$ – фактический ресурс опорных металлоконструкций, выраженный в процентах от номинального, %; $Z_{\text{трпост}}$, $Z_{\text{трм}}$ – удельные затраты на текущий ремонт, соответственно, зависящие и не зависящие от технической скорости движения карьерного автосамосвала, руб/км.

Таким образом

$$Z_{\text{то,тр}}^{\text{уд}} = Z_{\text{то,трпост}} + Z_{\text{трм}} \frac{100}{101,2 + 0,01h + V_{\text{т}}(0,038 - 0,084h)}. \quad (3.54)$$

Эксплуатационная скорость движения карьерных автосамосвалов – есть отношение общей длины одной ездки к общему времени одного оборо-

та, включающему в себя время непосредственного движения и суммарное время простоев в течение одного рейса.

$$V_{\text{э}} = \frac{l_{\text{е}}}{T_{\text{дв}} + T_{\text{пр}}} \quad (3.55)$$

или после некоторых преобразований

$$V_{\text{э}} = \frac{1}{\frac{1}{V_{\text{т}}} + \frac{T_{\text{пр}} i}{2H}}, \quad (3.56)$$

где $l_{\text{е}}$ – общая длина одной ездки, км; $T_{\text{дв}}$ – время, затраченное автосамосвалом непосредственно на движение в течении одного оборота, ч; $T_{\text{пр}}$ – общее время простоя автосамосвала в течение одного рейса, включающее в себя время погрузки, разгрузки, установки по погрузку, установки под разгрузку, ожидания погрузки, ожидания разгрузки, ч; H – перепад высот транспортирования, км; i – продольный уклон трассы.

Итоговая формула для расчета часовых затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт карьерных автосамосвалов будет иметь вид:

$$\begin{aligned} Z_{\text{то,тр}} = & \frac{Z_{\text{то,трпост}}}{\frac{1}{V_{\text{т}}} + \frac{T_{\text{пр}} i}{2H}} + \\ & + \frac{100 Z_{\text{трм}}}{\left(\frac{1}{V_{\text{т}}} + \frac{T_{\text{пр}} i}{2H} \right) [101,2 + 0,01h + V_{\text{т}} (0,038 - 0,084h)]} \end{aligned} \quad (3.57)$$

На рис. 3.14 представлена схема алгоритма определения рационального уклона на основе экономического критерия при перевозке вскрыши.

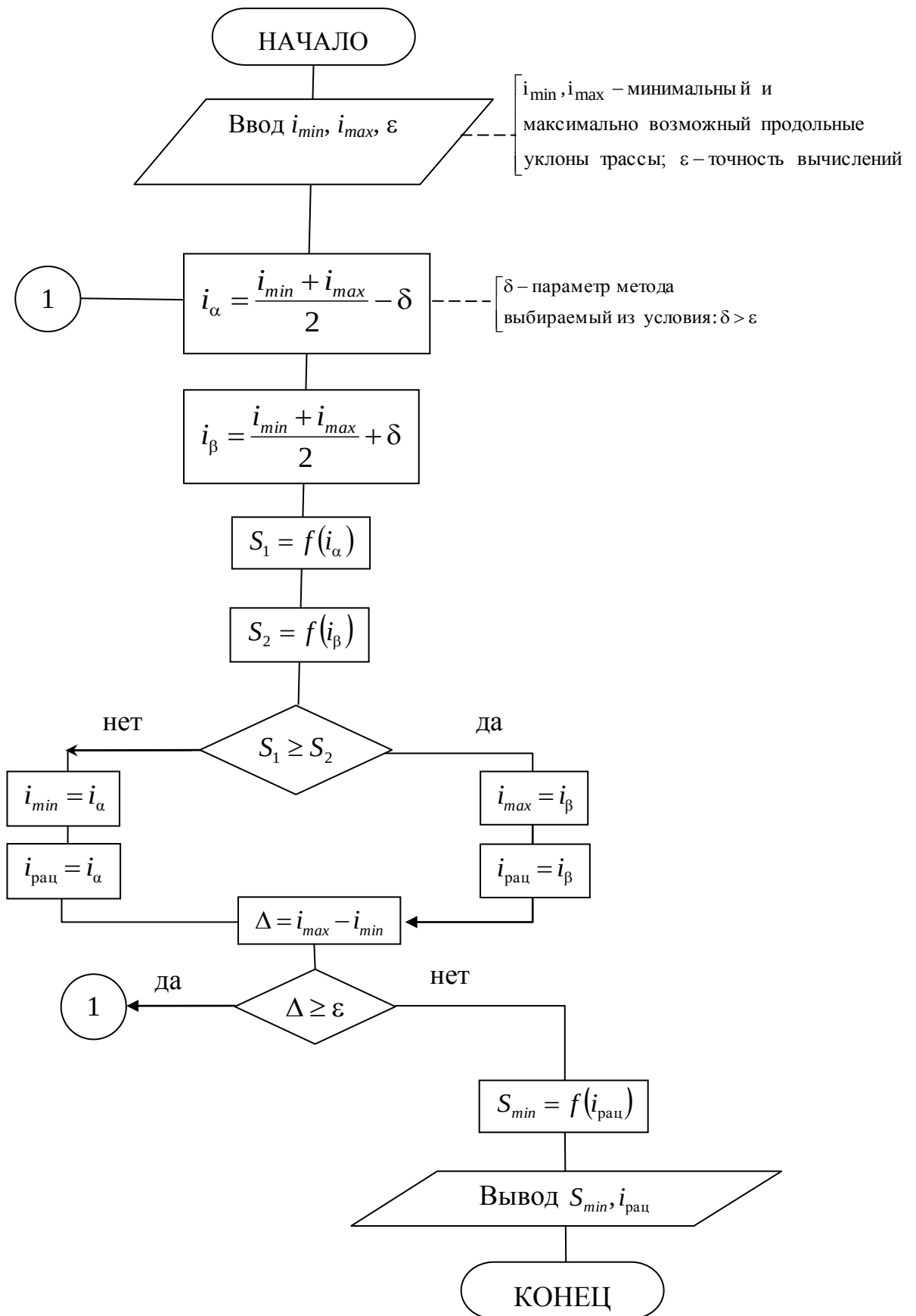


Рис. 3.14. Схема алгоритма расчета рационального уклона на основе экономического критерия при перевозке вскрыши (процедура «SEBES»)

Расчет производится для разных ЭАК, при их эксплуатации в различных дорожных, технико-эксплуатационных, климатических и горнотехнических условиях. Для оперативности и удобства проведения расчета необходимо создать базу данных, включающую в себя:

- данные по конструкционным признакам для различных ЭАК;
- данные, характеризующие дорожные условия;
- данные, характеризующие технико-эксплуатационные условия;
- данные, характеризующие стоимостные показатели;
- данные, характеризующие горнотехнические условия;
- данные, характеризующие климатические условия.

При различных сочетаниях экскаваторно-автомобильных комплексов оптимумы приходятся на диапазон продольного уклона трассы 90–110 ‰ (рис. 3.15). Это объясняется тем, что начиная с этого диапазона, расстояние транспортирования, а, следовательно, затраты на содержание карьерных дорог и затраты топлива на транспортирование горной массы, снижаются не так быстро как на первоначальном этапе. С дальнейшим увеличением уклона снижение этих затрат уже не компенсирует резкое увеличение затрат по остальным статьям расходов.

В работе [1] авторами приведена статистика по распределению уклонов по семи крупнейшим карьерам. Согласно приведенным статистическим данным удельный вес автодорог с уклонами 80–100 ‰ составляет в среднем 17 ‰, с уклонами 60–80 ‰ – 24 ‰, свыше 100 ‰ – 5 ‰. Таким образом, рациональный ЭАК на основе себестоимости возможно подобрать для менее 20 ‰ трасс.

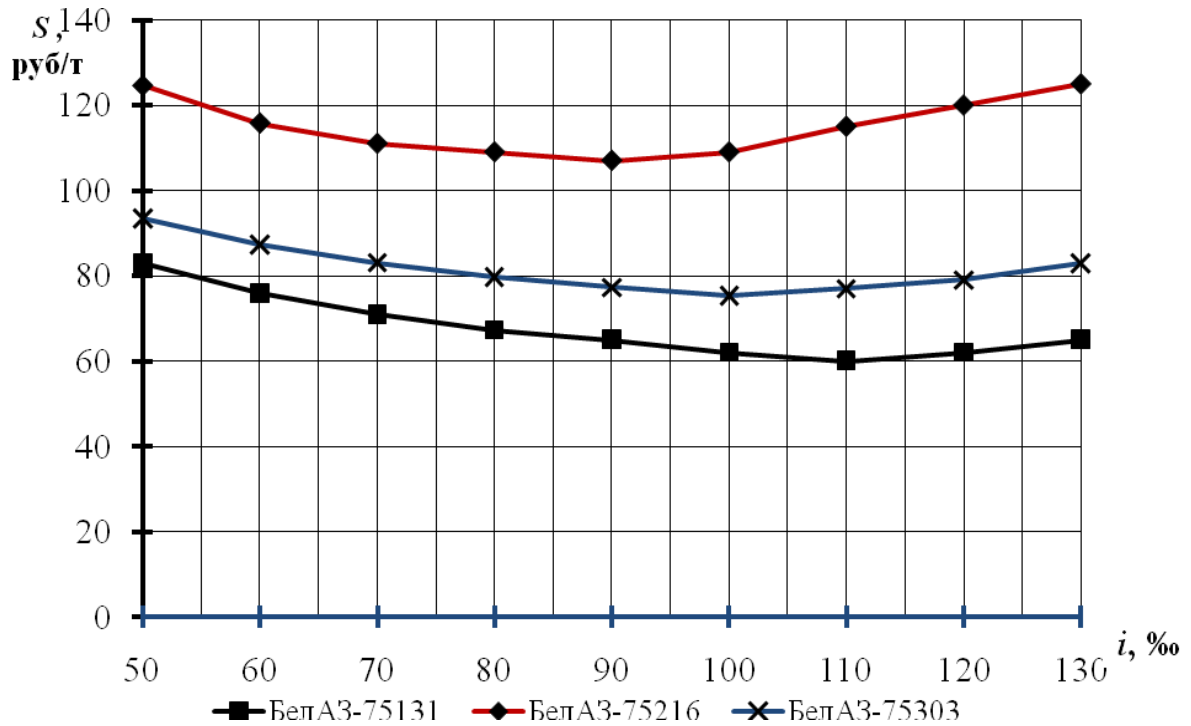


Рис. 3.15. Зависимость себестоимости (S) перевозок автосамосвалами при совместной работе с ЭКГ-18 от продольного уклона трассы (i)

3.3.3. Определение рационального продольного уклона трассы на основе прибыли при перевозке полезного ископаемого

Условие рационального выбора запишется в виде:

$$[\Pi = Д - S_T Q = \max] \rightarrow i_{\text{рац}},$$

где Π – планируемая прибыль от совершения транспортной работы за заданный период времени, руб; $Д$ – доход от совершения транспортной работы за данный период времени, руб; S_T – себестоимость транспортирования одной тонны полезного ископаемого, руб/т; Q – объем перевозок полезного ископаемого за данный период времени, т.

$$S_T = \frac{З_{\text{пер}} + З_{\text{пост}} + З_{\text{пр}} W_T + З_{\text{д}} W_{\text{ткм}}}{W_T}, \quad (3.58)$$

или

$$S_T = \frac{3_{\text{пер}} + 3_{\text{пост}}}{W_T} + 3_{\text{пр}} + 3_{\text{д}} \frac{H}{i}, \quad (3.59)$$

$$D = Q \Pi_{\text{пи}}, \quad (3.60)$$

$$Q = W_T T, \quad (3.61)$$

где $\Pi_{\text{пи}}$ – цена реализации предприятием одной тонны полезного ископаемого, руб/т; T – заданный период времени, ч.

Следовательно:

$$\Pi = W_T T (\Pi_{\text{пи}} - S_T), \quad (3.62)$$

или

$$\Pi = T \left(W_T \Pi_{\text{пи}} - 3_{\text{пер}} - 3_{\text{пост}} - 3_{\text{пр}} W_T - 3_{\text{д}} W_T \frac{H}{i} \right). \quad (3.63)$$

На рис. 3.16 представлена схема алгоритма определения рационального уклона на основе экономического критерия при перевозке полезного ископаемого.

Поскольку геометрия реальных маршрутов отличается от принятой расчетной схемы, то есть эксплуатационные параметры трассы уже не будут постоянными, для определения рациональности применения ЭАК на реальной трассе необходимо решить следующие задачи:

- определение скоростей движения карьерных автосамосвалов по маршруту;
- определение продолжительности транспортного цикла.

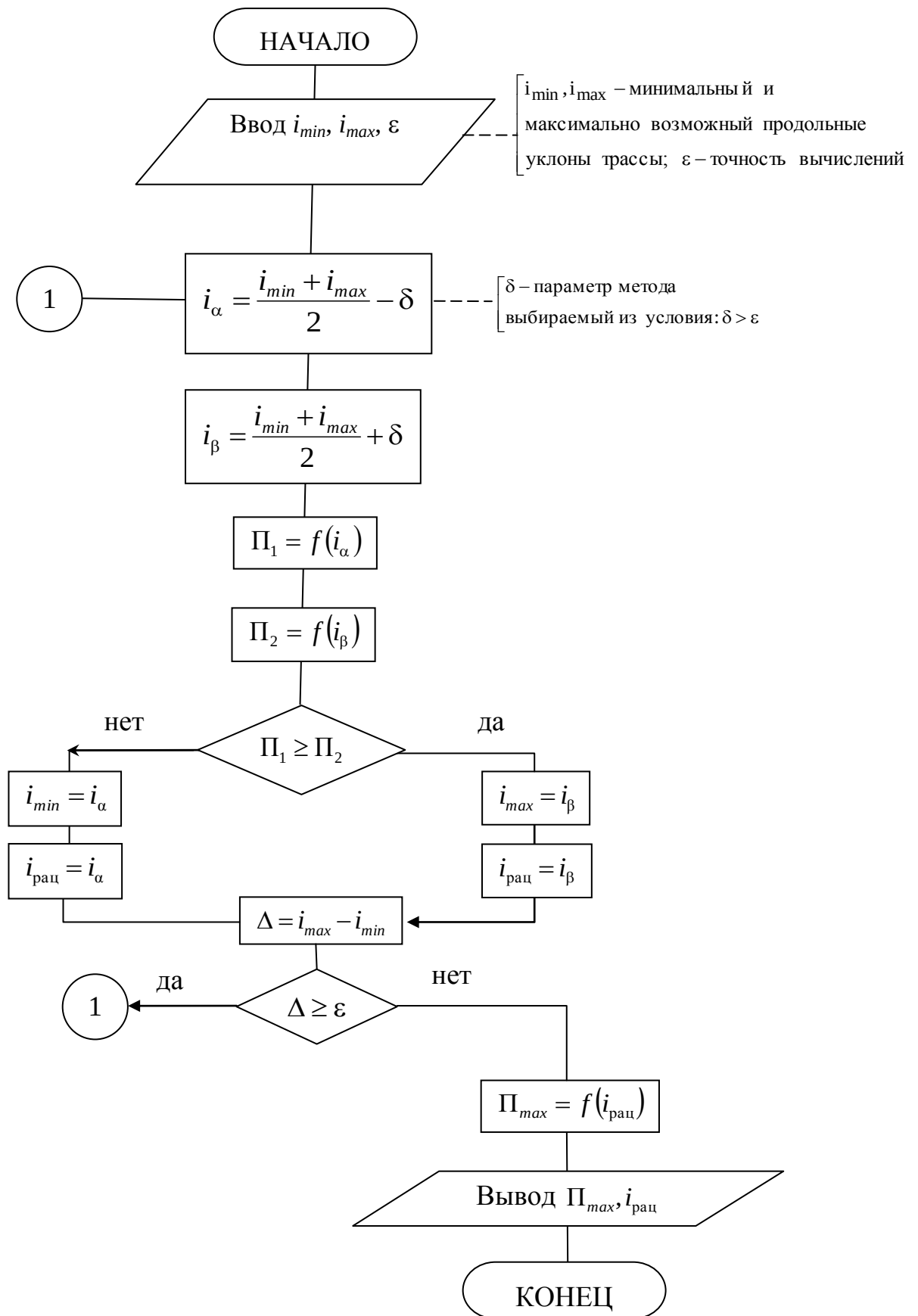


Рис. 3.16. Схема алгоритма расчета рационального уклона на основе экономического критерия при перевозке полезного ископаемого (процедура «PRIBIL»)

3.4. Выводы

1. Установлены полиномиальные зависимости производительности, прибыли и себестоимости перевозок от продольного уклона трассы с экстремумами, обеспечивающими выбор рациональной структуры и параметров эффективности ЭАК.

2. Выявлено, что экстремумы себестоимости и прибыли не совпадают, следовательно, рациональные параметры ЭАК в зависимости от продольного уклона трассы следует выбирать: при перевозке полезного ископаемого по прибыли, а при перевозке вскрыши – по себестоимости.

3. Установлено, что экстремумы производительности приходятся на весь диапазон продольных уклонов, на которых разрешена эксплуатация карьерных автосамосвалов, а оптимумы себестоимости только на 90–110 %.

4. Выявлено, что переход от принятой упрощенной расчетной схемы к реальным маршрутам требует решения задач определения скоростей движения карьерных автосамосвалов по маршруту и определения продолжительности транспортного цикла.

4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ РАЗРЕЗА АО «КРАСНЫЙ БРОД»

4.1. Определение скоростей движения карьерных автосамосвалов на участках технологической трассы

Расчет строится на основе ограничений скоростей и доверительных интервалов скоростей движения карьерных автосамосвалов (см. раздел 2).

Подготовка исходных данных происходит путем формирования баз данных в соответствии с их классификацией. Исходные данные для расчета условно делятся на две группы по частоте их переподготовки. Во-первых, это условно постоянные данные, значения которых не требуют изменений перед каждым расчетом. Их значения заносятся в базу данных. И, во-вторых, переменные данные, которые вводятся с клавиатуры. Базы данных создаются по следующим признакам:

- данные, характеризующие дорожные условия;
- данные скоростных ограничений на отдельных участках трассы;
- конструктивные данные по используемым ЭАК.

Скорость рассчитывается по пикетам на каждые 100 метров маршрута. Определяются максимально возможные скорости движения по условиям преодоления подъема и безопасности движения и их снижение за счет величин дорожных неровностей. Полученные значения скорости сравниваются с верхней границей доверительных интервалов скоростей. В качестве скорости в пикете принимается наименьшее значение из расчетных и верхней границы доверительного интервала.

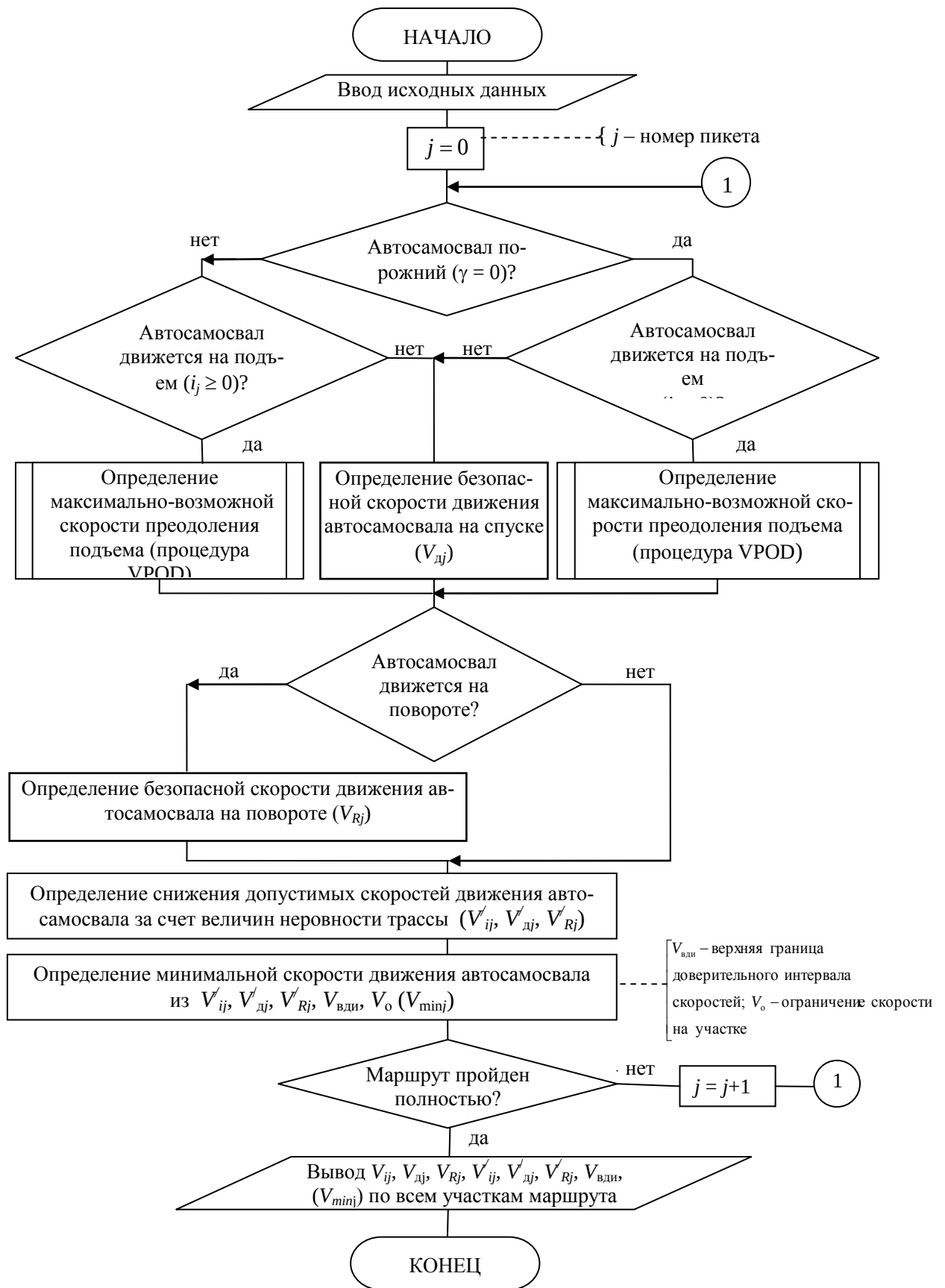


Рис. 4.1. Схема алгоритма расчета скоростей движения карьерных автосамосвалов (Процедура «Speed»)

С помощью, написанной по алгоритму, представленному на рис. 4.1, программы [112] был проведен сравнительный анализ фактических скоростей движения автосамосвалов БелАЗ-75131 (см. рис. 4.2, 4.3) при перевозке вскрыши по одному из маршрутов АО «Красный Брод» ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь»» (см. рис. 2.2, 2.3) и расчетных скоростей для тех же условий движения. Результаты расчета представлены в табл. 4.1.

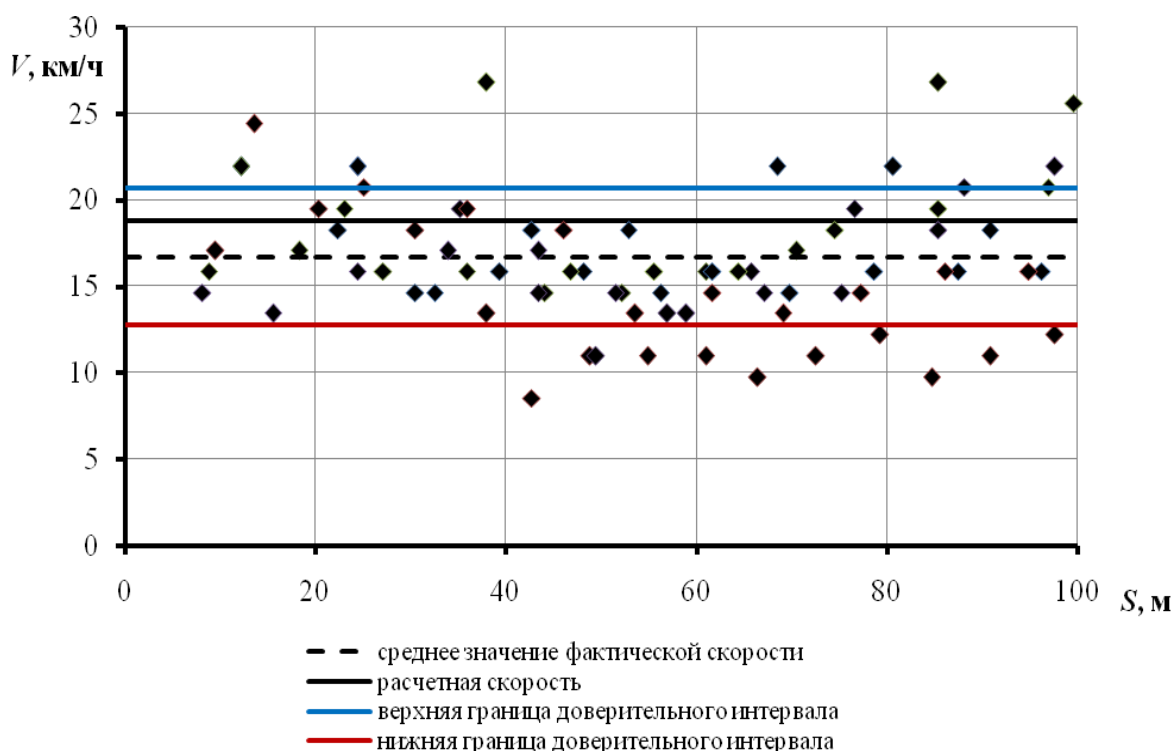


Рис. 4.2. Сравнение фактических и расчетной скоростей (V) на участке забой–пикет 49 (S)

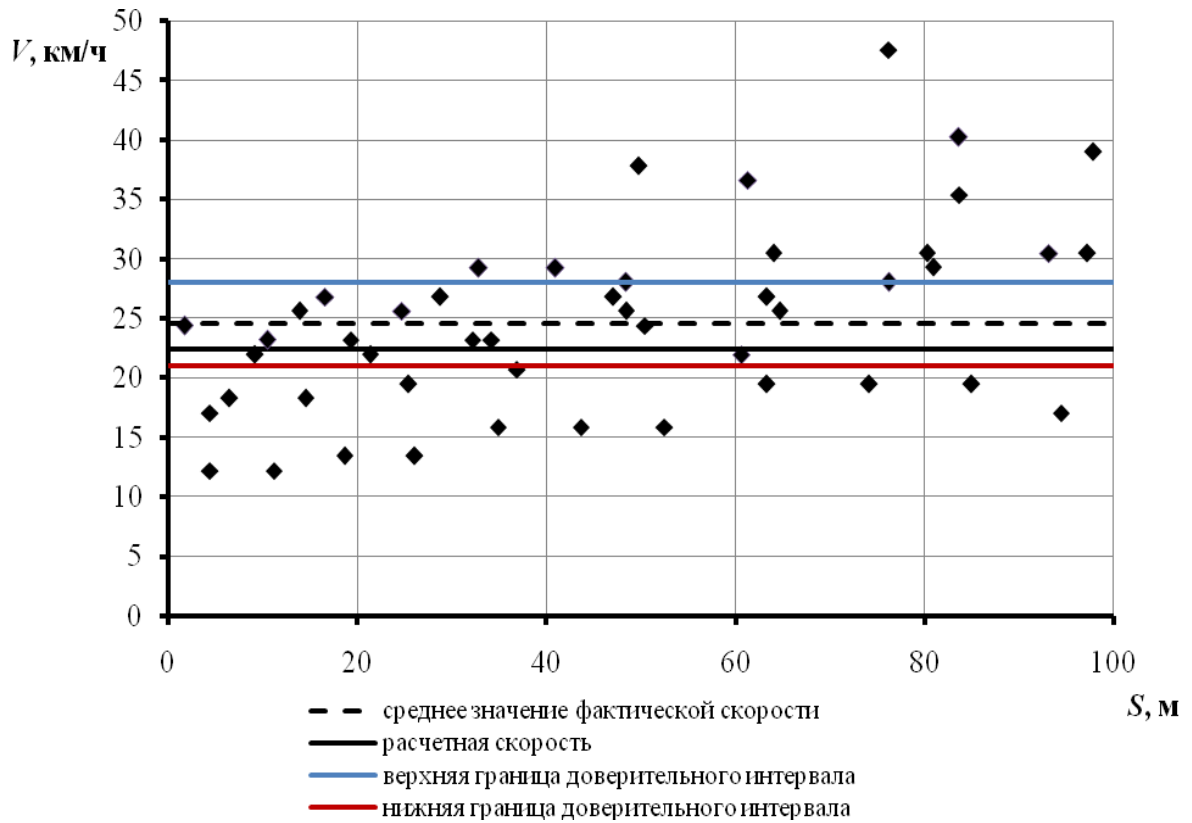


Рис. 4.3. Сравнение фактических и расчетной скоростей (V) на участке пикет 49–пикет 48(S)

Таблица 4.1

Сравнительный анализ расчетных и фактических скоростей движения

№ пикетов	Уклон, ‰	Расчетная скорость, км/ч	Фактическая скорость, км/ч	Отклонение, %
Забой-пк49	0	18,8	16,83	13,3
пк49-пк48	55,6	22,4	24,54	-9,5
пк48-пк47	38,0	20,3	22,4	-10,3
пк47-пк46	23,3	22,8	19,86	12,8
пк46-пк45	22,0	24,9	22,52	9,5
пк45-пк44	0	28,3	25,5	9,8
пк44-пк43	4,0	31,6	28,38	10,1
пк43-пк42	28,0	30,2	31,6	-4,6
пк42-пк41	48,5	24,4	22,86	6,3
пк41-пк40	72,0	17,0	16,86	0,8
пк40-пк39	68,0	15,4	15,56	-1,0
пк39-пк38	114,0	11,5	11,72	-1,9
пк38-пк37	48,0	16,7	16,3	2,3

Продолжение табл. 4.1

№ пикетов	Уклон, ‰	Расчетная ско- рость, км/ч	Фактическая ско- рость, км/ч	Отклонение, %
пк37-пк36	102,0	13,8	14,4	-4,3
пк36-пк35	80,0	12,78	12,46	2,6
пк35-пк34	108,0	10,5	10,8	-2,8
пк34-пк33	58,0	13,6	12,52	7,9
пк33-пк32	23,3	20,3	19,08	6,0
пк32-пк31	26,0	23,9	25,48	-6,6
пк31-пк30	18,0	20,6	18,28	11,2
пк30-Отвал	0	18,5	16,96	8,3
Отвал-пк30	0	23,3	20,88	10,3
пк30-пк31	-18,0	32,4	28,88	10,8
пк31-пк32	-26,0	32,7	28,72	12,1
пк32-пк33	-23,3	32,7	28,72	12,1
пк33-пк34	-58,0	17,5	16,4	6,7
пк34-пк35	-108,0	14,6	15,88	-8,7
пк35-пк36	-80,0	15,6	14,7	5,7
пк36-пк37	-102,0	15,1	16,2	-7,2
пк37-пк38	-48,0	16,2	17,64	-8,8
пк38-пк39	-114,0	13,9	15,2	-9,3
пк39-пк40	-68,0	15,8	16,08	-1,7
пк40-пк41	-72,0	15,8	16,72	-5,8
пк41-пк42	-48,5	16,2	17,72	-9,3
пк42-пк43	-28,0	31,8	28,5	10,3
пк43-пк44	-4,0	35,6	32,32	9,2
пк44-пк45	0	37,8	33,4	11,6
пк45-пк46	-22,0	31,8	28,72	9,6
пк46-пк47	-23,3	31,3	27,48	12,2
пк47-пк48	-38,0	30,3	28,66	5,1
пк48-пк49	-55,6	20,6	19,8	3,8
пк49-Забой	0	18,2	17,28	5,0
Средняя скорость, км/ч		21,886	20,813	4,9

Наибольшие отклонения до 13,3 % наблюдаются на ровных участках, для которых характерна большая неравномерность движения. На участках с

значениями уклона свыше 50 ‰, где движение более равномерное расхождение менее 10 ‰. Отклонение средней скорости на маршруте менее 5 ‰.

4.2. Определение продолжительности транспортного цикла на технологической трассе

Расчет строится на исходных данных и результатах расчета скоростей движения. Для каждого рассматриваемого участка конечная скорость, которую автосамосвал должен достичь и двигаться с ней, есть расчетная скорость для данного участка (на конечных участках $V_{\text{кон}} = 0$), а начальная скорость – есть скорость конечная от предыдущего участка (на начальных участках $V_{\text{нач}} = 0$).

Значения ускорений (замедлений) для каждого участка определяются верхней (нижней) границей доверительных интервалов ускорений, полученных в разделе 2 в зависимости от продольного уклона трассы.

Время разгона:

$$T_{\text{разг}} = (V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}) / j_{\text{разг}}, \quad (4.1)$$

где $V_{\text{кон}}$, $V_{\text{нач}}$ – конечная и начальная скорости движения автосамосвала на участке трассы, м/с; $j_{\text{разг}}$ – ускорение на участке трассы, соответствует верхней границе доверительного интервала ускорений, м/с².

Путь разгона:

$$S_{\text{разг}} = T_{\text{разг}}(V_{\text{кон}} + V_{\text{нач}}) / 2, \quad (4.2)$$

где $V_{\text{кон}}$, $V_{\text{нач}}$ – конечная и начальная скорости движения автосамосвала на участке трассы, м/с; $T_{\text{разг}}$ – время разгона на участке трассы, с.

Время замедления:

$$T_{\text{зам}} = (V_{\text{нач}} - V_{\text{кон}}) / j_{\text{зам}}, \quad (4.3)$$

где $V_{\text{кон}}$, $V_{\text{нач}}$ – конечная и начальная скорости движения автосамосвала на участке трассы, м/с; $j_{\text{зам}}$ – замедление на участке трассы, соответствует нижней границе доверительного интервала ускорений, м/с².

Путь разгона:

$$S_{\text{зам}} = T_{\text{зам}}(V_{\text{кон}} + V_{\text{нач}}) / 2, \quad (4.4)$$

где $V_{\text{кон}}$, $V_{\text{нач}}$ – конечная и начальная скорости движения автосамосвала на участке трассы, м/с; $T_{\text{зам}}$ – время замедления на участке трассы, с.

Время простоя под погрузкой и разгрузкой:

$$T_{\text{пр}} = t_{\text{погр}} + t_{\text{разгр}} + t_{\text{ож.п-р}} + t_{\text{пр.др}}, \quad (4.5)$$

где $t_{\text{погр}}$ – продолжительность погрузки автосамосвала, час; $t_{\text{разгр}}$ – продолжительность разгрузки автосамосвала, час; $t_{\text{ож.п-р}}$ – продолжительность ожидания погрузки и разгрузки, час; $t_{\text{пр.др}}$ – продолжительность простоев других, час.

$$t_{\text{погр}} = t'_{\text{погр}} + t_{\text{мп}}, \quad (4.6)$$

$$t_{\text{разгр}} = t'_{\text{разгр}} + t_{\text{мр}}, \quad (4.7)$$

где $t'_{\text{погр}}$, $t'_{\text{разгр}}$ – продолжительность непосредственной погрузки и разгрузки, соответственно, час; $t_{\text{мп}}$, $t_{\text{мр}}$ – продолжительность маневрирования автосамосвала под погрузку и разгрузку, соответственно, час.

Продолжительность маневрирования автосамосвала зависит от принятой схемы заезда под погрузку и разгрузку, наиболее распространенными из которых являются петлевая (кольцевая) и тупиковая.

При петлевой схеме заезда под погрузку:

$$t_{\text{мп}} = \frac{S_{\text{м}}}{V_{\text{м}}}, \quad (4.8)$$

где $S_{\text{м}}$ – путь, пройденный автосамосвалом при маневрировании, км; $V_{\text{м}}$ – скорость движения при маневрировании.

При расчете времени на погрузку и разгрузку автосамосвалов скорости их маневрирования рекомендуется принимать [15]: 10 км/ч при петлевом заезде; 9,4 км/ч при тупиковом заезде под погрузку; 9 км/ч при маневрировании груженого автосамосвала под разгрузку.

$$S_{\text{м}} = 4 \frac{\pi n^{\circ}}{180 \cdot 1000} R_{\pi} \approx 6,98 \cdot 10^{-5} n^{\circ} R_{\pi}, \quad (4.9)$$

где n° – угол поворота автосамосвала при установке под погрузку, град.; R_{π} – радиус поворота автосамосвала, м.

Рекомендуемые радиусы поворота автосамосвала при заезде под погрузку и разгрузку:

- при петлевом заезде $R_{\pi} = (1,2-1,3)R_{\text{мин}}$;
- при тупиковом заезде $R_{\pi} = (1,3-1,4)R_{\text{мин}}$;
- при маневрировании груженого автосамосвала $R_{\pi} = (1,4-1,5)R_{\text{мин}}$,

где $R_{\text{мин}}$ – конструктивный минимальный радиус поворота.

При тупиковой схеме заезда под погрузку и при заезде под разгрузку:

$$t_{\text{мп}} = \frac{S_{\text{м}}}{V_{\text{м}}} + t_1, \quad (4.10)$$

где $t_1 = 2,8 \cdot 10^{-3}$ – время на переключение передачи, ч.

$$S_m = \frac{2R_n}{1000} + \frac{2\pi n^0}{180 \cdot 1000} R_n \approx 5,14 \cdot 10^{-3} \cdot R_n, \quad (4.11)$$

$$t'_{\text{погр}} = n_{\phi} t_{\text{ц}}, \quad (4.12)$$

где n_{ϕ} – количество загружаемых ковшей; $t_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла экскаватора, ч.

$$t_{\text{ц}} = 5,5\sqrt{V_9} + 0,1 \cdot \beta_{\text{п}} + \frac{2,5}{C_{\text{к}}}, \quad (4.13)$$

где V_9 – вместимость ковша экскаватора, м^3 ; $\beta_{\text{п}}$ – угол поворота стрелы экскаватора, град.; $C_{\text{к}}$ – соотношение линейных размеров ковша и наибольшего размера самого крупного куска горной массы.

$$t'_{\text{разгр}} = 1,5(t_1 + t_2), \quad (4.14)$$

где t_1, t_2 – соответственно продолжительность подъема и опускания платформы автосамосвала, час.

$$t_{\text{ож.п-р}} = 0,5(t_{\text{погр}} + t_{\text{разгр}}), \quad (4.15)$$

$$t_{\text{пр.др}} = 0,5t_{\text{ож.п-р}}, \quad (4.16)$$

Схема алгоритма расчета представлена на рис. 4.4. Результаты сравнительного анализа расчетного и фактического времени движения автосамосвалов БелАЗ-75131 представлены в табл. 4.2.

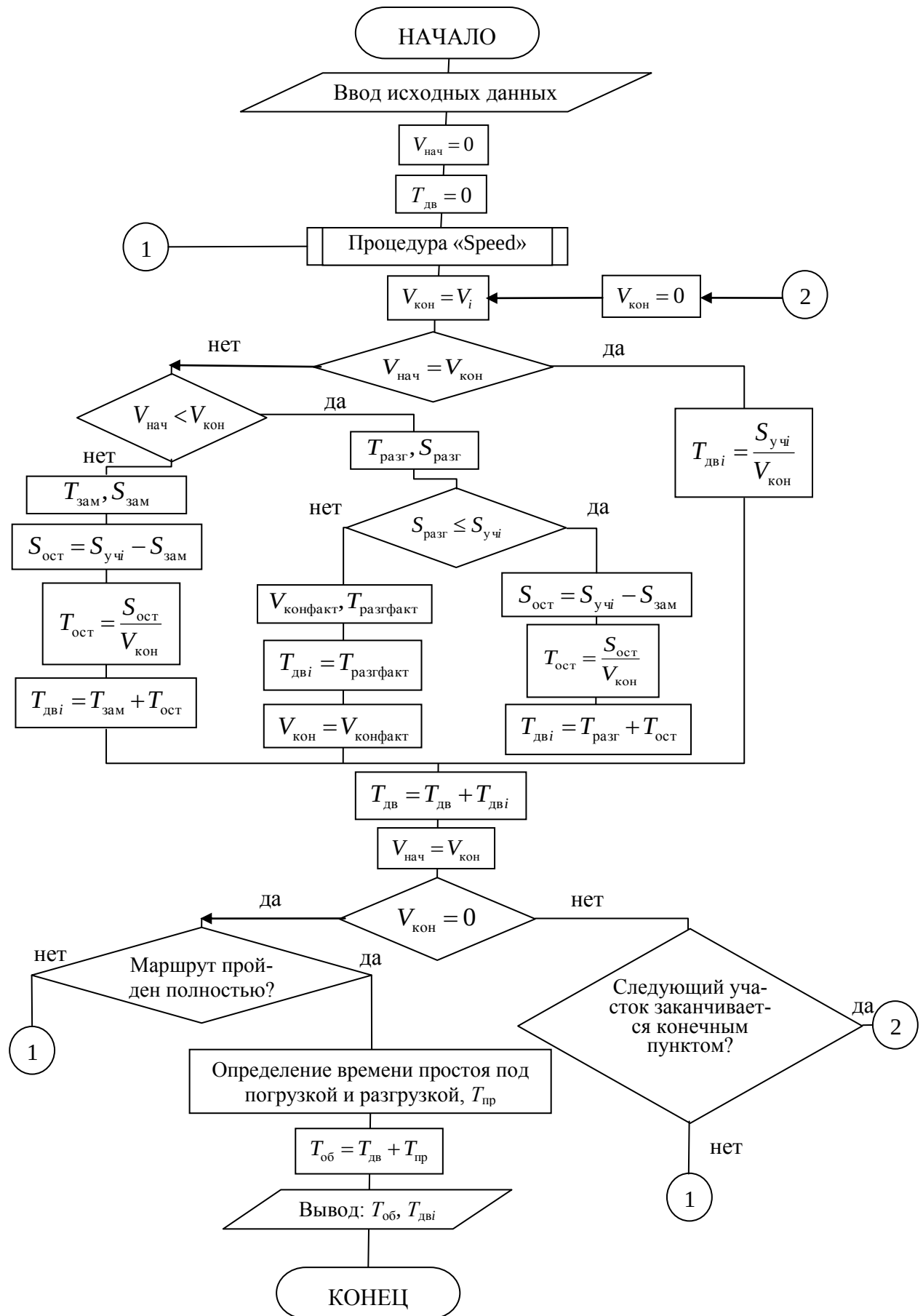


Рис. 4.4. Схема алгоритма расчета продолжительности транспортного цикла карьерных автосамосвалов (Процедура «Time Circle»)

Таблица 4.2

Сравнительный анализ расчетного и фактического времени движения
БелАЗ-75131 при перевозке вскрыши

№ пикетов	Уклон, ‰	Расчетное время, ч	Фактическое время, ч	Отклонение, %
Забой-пк49	0	0,0056	0,0061	-8,3
пк49-пк48	55,6	0,0045	0,0041	8,7
пк48-пк47	38,0	0,0049	0,0045	9,3
пк47-пк46	23,3	0,0045	0,005	-10,0
пк46-пк45	22,0	0,004	0,0044	-10,5
пк45-пк44	0	0,0035	0,0039	-10,9
пк44-пк43	4,0	0,0032	0,0035	-11,3
пк43-пк42	28,0	0,0033	0,0032	4,4
пк42-пк41	48,5	0,0041	0,0044	-6,7
пк41-пк40	72,0	0,0059	0,0059	-0,8
пк40-пк39	68,0	0,0065	0,0064	1,0
пк39-пк38	114,0	0,0087	0,0085	1,8
пк38-пк37	48,0	0,006	0,0061	-2,4
пк37-пк36	102,0	0,0072	0,0069	4,1
пк36-пк35	80,0	0,0074	0,0082	-10,2
пк35-пк34	108,0	0,0095	0,0093	2,7
пк34-пк33	58,0	0,0074	0,008	-8,6
пк33-пк32	23,3	0,0049	0,0052	-6,3
пк32-пк31	26,0	0,0042	0,0039	6,2
пк31-пк30	18,0	0,0049	0,0055	-12,6
пк30-Отвал	0	0,0054	0,0059	-9,0
Отвал-пк30	0	0,0043	0,0048	-11,5
пк30-пк31	-18,0	0,0031	0,0035	-11,4
пк31-пк32	-26,0	0,0031	0,0035	-11,4
пк32-пк33	-23,3	0,0031	0,0035	-11,4
пк33-пк34	-58,0	0,0054	0,0061	-12,8
пк34-пк35	-108,0	0,0068	0,0063	8,0
пк35-пк36	-80,0	0,0064	0,0068	-6,1
пк36-пк37	-102,0	0,0066	0,0062	6,7
пк37-пк38	-48,0	0,0062	0,0057	8,1
пк38-пк39	-114,0	0,0072	0,0066	8,5
пк39-пк40	-68,0	0,0063	0,0062	1,7
пк40-пк41	-72,0	0,0063	0,006	5,5
пк41-пк42	-48,5	0,0062	0,0056	8,5

Продолжение табл. 4.2

№ пикетов	Уклон, ‰	Расчетное время, ч	Фактическое время, ч	Отклонение, %
пк42-пк43	-28,0	0,0031	0,0035	-11,5
пк43-пк44	-4,0	0,0028	0,0031	-10,1
пк44-пк45	0	0,0026	0,003	-13,1
пк45-пк46	-22,0	0,0031	0,0035	-10,7
пк46-пк47	-23,3	0,0032	0,0036	-11,1
пк47-пк48	-38,0	0,0033	0,0035	-5,3
пк48-пк49	-55,6	0,0049	0,0051	-4,0
пк49-Забой	0	0,0055	0,0058	-5,3
Время движения, ч		0,2147	0,2208	-2,8

Выявленный в пункте 4.1 резерв скорости, составивший 4,9 %, позволил сократить время движения автосамосвалов по маршруту на 2,8 %.

В табл. 4.3 представлено сравнение фактической работы ЭАК в АО «Красный Брод» ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь»» на маршруте, представленном на рис. 2.4 и рационально выбранными ЭАК.

Из анализа данных, приведенных в табл. 4.3 можно сделать вывод о том, что используя на маршруте автосамосвалы БелАЗ-75131 совместно с ЭКГ-15 можно повысить производительность ЭАК на 38,9 %, а ЭАК состоящий из автосамосвалов БелАЗ-75303 и экскаватора ЭКГ-20 повысит производительность на 49,8 %. При этом использование ЭАК состоящего из автосамосвалов БелАЗ-75303 и экскаватора ЭКГ-20 увеличит себестоимость перевозок на 17,2 %, а ЭАК состоящий из автосамосвалов БелАЗ-75131 при совместной работе с ЭКГ-15 снизит себестоимость на 2,9 %. Кроме этого у автосамосвалов БелАЗ-75303 производительность одной автотонны снизится на 2,7 %, а у БелАЗ-75131 она возрастет на 4,2 %. Эксплуатация БелАЗ-75131 с объемом кузова 71,2 м³ совместно с экскаватором ЭКГ-15 позволяет увеличить количество автосамосвалов в ЭАК и за счет этого увеличить производительность на 32,7 %, но при этом снижается производительность одной автотонны.

Таблица 4.3

Сравнение эффективности работы различных ЭАК в АО «Красный Брод» ОАО УК «Кузбассразрезуголь»

Тип автосамосвала	(фактич.) БелАЗ-75131	БелАЗ-75131			БелАЗ-75131			БелАЗ-75303		
Тип эксковатора	ЭКГ-12,5	ЭКГ-15			ЭКГ-10			ЭКГ-20		
Объем кузова с «шапкой» 2:1, м ³	71,2	71,2	75,5	84,0	71,2	75,5	84,0	112	138	147
Коэффициент использования грузоподъемности	0,936	0,866	0,921	0,947	0,953	0,936	0,957	0,879	0,965	0,932
Себестоимость, руб/т	101,3	100,6	98,4	99,7	102,4	101,7	103,2	118,3	118,7	119,5
Средняя скорость по маршруту, км/ч	20,81	21,96	21,88	21,48	21,38	21,64	21,18	20,47	19,86	20,12
Время оборота, мин	15,72	14,08	14,43	14,93	16,34	15,87	16,57	15,64	16,21	15,88
Число автосамосвалов, ед.	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3
Сменная производительность, т.	15861	21052	22030	21667	14867	14966	14929	22150	23760	22927
Изменение W_T , %	–	32,7	38,9	36,6	-6,3	-5,6	-5,9	39,6	49,8	44,5
Производительность 1 автотонны, т	40,7	40,5	42,4	41,7	38,12	38,38	38,28	36,9	39,6	38,2
Изменение $W_{a/T}$, %	–	-0,5	4,2	2,5	-6,3	-5,7	-5,9	-9,3	-2,7	-6,1

Следовательно, наиболее рациональным ЭАК, из имеющегося в АО «Красный Брод» оборудования, на данном маршруте будет ЭАК состоящий из автосамосвалов БелАЗ-75131 с объемом кузова $75,5 \text{ м}^3$ и экскаватора ЭКГ-15.

4.3. Выводы

1. Разработанное на основе предложенной методики алгоритмическое и программное обеспечение позволяет планировать режимы работы автосамосвалов и экскаваторно-автомобильных комплексов, с учетом скоростей и времени движения на отдельных участках трассы, как на уже существующих, так и на проектируемых разрезах.

2. Установлено, что на ровных участках маршрута, характеризующихся большой неравномерностью движения, отклонения средних фактических скоростей от расчетных не превышают 13,3 %, а на участках со значительной величиной уклона – менее 10 %.

3. Рекомендовано, что при определении продолжительности транспортного цикла необходимо учитывать параметры ускоренного и замедленного движения автосамосвалов, реальные характеристики профиля трассы и состав ЭАК.

4. При сопоставлении средних фактических и расчетных скоростей движения автосамосвалов по маршруту АО «Красный Брод» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» с помощью разработанной методики выявлен резерв скорости, составляющий 4,9 %, который позволяет сократить время движения автосамосвалов на 2,8 % и повысить производительность перевозки вскрыши на 38,9 % за счет увеличения количества горнотранспортного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненного автором исследования дано новое решение актуальной задачи повышения эффективности использования ЭАК, путем ее оценки в зависимости от параметров технологических трасс, что имеет большое значение для горнодобывающей отрасли.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Определено, что наибольшая вариация скоростей наблюдается на горизонтальных участках, на которых значения ускорений изменяются от $(-2,03)$ до $(1,52)$ м/с^2 при движении груженом направлении и от $(-1,19)$ до $(1,19)$ м/с^2 в порожнем направлении, а на уклонах движение более равномерное, основная масса значений ускорений на этих участках находится в диапазоне от $(-0,17)$ до $(0,17)$ м/с^2 при движении на подъем и от $-(0,34)$ до $(0,34)$ м/с^2 на спуск.

2. Выявлено, что распределение скоростей и ускорений на участках трассы подчиняется нормальному закону, а также, доверительные интервалы ускорений на горизонтальных участках трассы лежат в пределах от $(-0,43)$ до $(0,39)$ м/с^2 в груженом направлении и от $(-0,53)$ до $(0,42)$ м/с^2 в порожнем, а при увеличении уклона они уменьшаются и на уклонах более 110 ‰ составляют от $(-0,10)$ до $(0,08)$ м/с^2 в груженом направлении и от $(-0,10)$ до $(0,10)$ м/с^2 в порожнем.

3. Установлено, что эффективность ЭАК определяется параметрами технологических трасс, составом и техническими параметрами входящих в него машин и оценивается производительностью, себестоимостью и прибылью, зависящими от продольного уклона трассы, при этом при различных условиях эксплуатации и составах ЭАК производительность имеет экстремумы во всём диапазоне продольных уклонов, на которых разрешена эксплуатация карьерных автосамосвалов, а себестоимость и прибыль – в диапазоне уклонов от 90 до 110 ‰.

4. Разработанная методика оценки эффективности экскаваторно-автомобильного комплекса в зависимости от параметров технологических трасс на основе повышения производительности, прибыли и снижения затрат, позволяет определить скорости движения карьерных автосамосвалов по маршруту, продолжительность транспортного цикла рационального типа ЭАК как для существующих трасс, так и для вновь проектируемых.

5. Определено, что на ровных участках маршрута, характеризующихся большой неравномерностью движения, отклонения средних фактических скоростей от расчётных – до 13,3 %, а на участках с значениями уклона выше 50 ‰ – до 10 %.

6. При сопоставлении средних фактических и расчетных скоростей движения автосамосвалов по маршруту АО «Красный Брод» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» с помощью разработанной методики выявлен резерв скорости, составляющий 4,9 %, который позволяет сократить время движения автосамосвалов на 2,8 % и повысить производительность перевозки вскрыши на 38,9 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мариев, П.Л. Карьерный автотранспорт / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. – Санкт-Петербург: Наука, 2004. – 429 с.
2. Васильев, М.В. Автомобильный транспорт карьеров / М.В. Васильев, В.П. Смирнов, З.Л. Сироткин. – Москва: Недра, 1973. – 280 с.
3. Циперфин, И.М. Карьерный автомобильный транспорт: справочник / И.М. Циперфин, В.Д. Штейн. – Москва: Недра, 1992. – 415 с.
4. Васильев, М.В. Эксплуатация карьерного автотранспорта / М.В. Васильев, В.П. Смирнов, А.А. Кулешов. – Москва: Недра, 1979. – 280 с.
5. Васильев, М.В. Транспортные процессы и оборудование на карьерах. – Москва: Недра, 1986. – 240 с.
6. Кулешов, А.А. Выбор оптимальной типажной структуры экскаваторно-автомобильных комплексов для условий конкретного карьера. – Ленинград, 1989. – 70 с.
7. Кулешов, А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров. – Москва: Недра, 1980. – 317 с.
8. Васильев, М.В. Транспорт глубоких карьеров. – Москва: Недра, 1983. – 295 с.
9. Васильев, М.В. Железородные карьеры / М.В. Васильев, К.М. Штукатуров, А.Ф. Ткачев. – Москва: Недра, 1982. – 262 с.
10. Александров, В.И. Эффективность карьерных автосамосвалов в режиме топливной экономичности/ IV Международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении». – Санкт-Петербург, 2016. – Т. II. – С. 122–126.
11. Васильев, М.В. Комбинированный транспорт на карьерах. – Москва: Недра, 1975. – 360 с.
12. Васильев, М.В. Совершенствование организации транспортных работ на карьерах: учебное пособие / М.В. Васильев, Б.В. Яковенко, Б.А. Егин, А.К. Сухов. – Ленинград: ЛГИ, 1976. – 69 с.

13. Системы разработки и транспорт на карьерах / под ред. Мельникова Н.В. – Москва: Недра, 1974. – 424 с.
14. Астафьев, Ю.П. Добыча руд открытым способом за рубежом. – Москва: Недра, 1983. – 325 с.
15. Астафьев, Ю.П. Планирование и организация погрузочно-транспортных работ на карьерах / Ю.П. Астафьев, Г.К. Полищук. – Москва: Недра, 1986. – 168с.
16. Кулешов, А.А. Проектирование и эксплуатация карьерного автотранспорта. – Санкт-Петербург, 1994. – 230 с.
17. Кулешов, А.А. Теоретические основы высокоэффективной эксплуатации мощных систем карьерного автотранспорта: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06. – Москва, 1982. – 31 с.
18. Кулешов, А.А. Оценка ресурса базовых узлов карьерных автосамосвалов / А.А. Кулешов, Н.В. Зырянов, И.В. Зырянов // Цветная металлургия. – 1994. – № 11. – С. 30–32.
19. Кулешов, А.А. Карьерный автотранспорт на современном этапе развития: монография КИЦМ / А.А. Кулешов, Ю.А. Плютов. – Красноярск, 1994. – 88 с.
20. Кулешов, А.А. Расчет железнодорожного и автомобильного карьерного транспорта с помощью ЭВМ: учебное пособие / А.А. Кулешов, С.Н. Резников. – Ленинград: ЛГИ, 1986. – 45 с.
21. Кулешов, А.А. Эксплуатация карьерного транспорта в условиях Севера / А.А. Кулешов, Л.Г. Тымовский. – Москва: Недра, 1973. – 144 с.
22. Яковенко, Б.В. Организация работы карьерного автомобильного транспорта / Б.В. Яковенко, Г.Г. Коваленко. – Киев.: Техніка, 1978. – 127с.
23. Малюта, Д.И. Планирование работы карьерного автомобильного транспорта / Д.И. Малюта, Б.В. Яковенко, В.А. Адамский. – Москва: Недра, 1977. – 79 с.
24. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины. – Москва: Машиностроение, 1983. – 487 с.

25. Спиваковский, А.О. Транспортные машины и комплексы открытых горных разработок / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов. – Москва: Недра, 1983. – 383 с.
26. Беляков, Ю.И. Проектирование экскаваторных работ. – Москва: Недра, 1993. – 325 с.
27. Беляков, Ю.И. Совершенствование экскаваторных работ на карьерах. – Москва: Недра, 1974. – 304 с.
28. Гордиенко, Б.В. Повышение эффективности эксплуатации технологического автотранспорта на угольных разрезах / Б.В. Гордиенко, И.И. Полтавский, Г.П. Останин. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. – 166 с.
29. Гордиенко, Б.В. Разработка способов эффективной эксплуатации автомобильного транспорта на разрезах Кузбасса: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Новосибирск, 1991. – 16 с.
30. Васильев, М.В. Автомобильный транспорт карьеров / М.В. Васильев, З.Л. Сироткин, В.П. Смирнов. – Москва: Недра, 1973. – 280 с.
31. Хохряков, В.С. Проектирование и организация работы карьерного автотранспорта. – Москва: Госгортехиздат, 1963. – 166 с.
32. Веницкий, К.Е. Оптимизация технологических процессов на открытых разработках. – Москва: Недра, 1976. – 280 с.
33. Щадов, М.И. Экскавационно-транспортные машины циклического действия / М.И. Щадов, Р.Ю. Подэрни. – Москва, 1989. – 374 с.
34. Добрых, Л.И. Расчет времени погрузки и разгрузки карьерных автосамосвалов с учетом их маневренности / Л.И. Добрых // Горный журнал. – 1986. – № 11. – С. 16–18.
35. Васильев, М.В. Научные основы проектирования карьерного транспорта / М.В. Васильев, В.Л. Яковлев. – Москва: Недра, 1982. – 212 с.
36. Смирнов, В.П. Теория карьерного большегрузного транспорта / В.П. Смирнов, Ю.И. Лель. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 355 с.
37. Сироткин, З.Л. Надежность карьерных автосамосвалов. – Москва: Цветметинформация, 1974. – 72 с.

38. Шапарь, А.Г. Оптимизация параметров транспортно-перегрузочных комплексов на карьерах / А.Г. Шапарь, А.М. Эрперт, Л.М. Римм, В.Т. Лашко. – Москва, 1988. – 207 с.

39. Кузнецов, К.К. Выбор внутрикарьерного транспорта / К.К. Кузнецов, А.И. Ястребов, К.М. Третьяков. – Москва: Недра, 1975. – 152 с.

40. Веницкий, К.Е. Управление параметрами технологических процессов на открытых разработках. – М.: Недра, 1984. – 237 с.

41. Потапов, М.Г. Совершенствование системы обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов / М.Г. Потапов, А.В.Биденко, З.Л.Сироткин, В.Д. Штейн // Горный журнал. – 1994. – № 2. – С. 39–41.

42. Моссаковский, Я.В. Экономика горной промышленности: учебник для вузов. – Москва: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. – 525 с.

43. Астахов, А.С. Экономика горной промышленности / А.С. Астахов, Л.Е. Каменецкий, Ю.А. Чернегов. – Москва: Недра, 1982. – 408 с.

44. Майминд, В.Я. Расчет себестоимости перемещения горной массы при изменении условий транспортирования / В.Я. Майминд // Горный журнал. – 1986. – № 5. – С. 12–14.

45. Альтшулер, В.М. Опыт создания и эксплуатации карьерных автосамосвалов особо большой грузоподъемности / В.М. Альтшулер, Н.Н. Мельников // Горный журнал. – 1974. – № 12. – С. 14–17.

46. Васильев, М.В. Автосамосвалы особо большой грузоподъемности и их эксплуатация на зарубежных карьерах / М.В. Васильев, Ф.И. Вереса // Горный журнал. – 1977. – № 8. – С. 69–73.

47. Васильев, М.В. Автосамосвалы особо большой грузоподъемности на карьерах цветной металлургии / М.В. Васильев, В.П. Смирнов, В.Д. Штейн. – Москва: Цветметинформация, 1975. – 77 с.

48. Васильев, М.В. Исследования технологических режимов работы дизельных и дизель-электрических автомобилей на карьерах / М.В. Васильев, В.И. Смирнов, А.А. Котяшов // Материалы III Всесоюзной научно-

технической конференции по карьерному транспорту. – Свердловск, 1973. – С. 185–192.

49. Васильев, М.В. Опыт эксплуатации автомобильного транспорта на карьерах треста «Орджоникидземагганец» / М.В. Васильев, Г.Л. Середа, В.М. Цыганов, Б.В. Яковенко. – Киев: УкрНИИНТИ, 1970. – 32 с.

50. Транспортирование горной массы с глубоких горизонтов карьеров / под ред. М.В. Васильева. – Свердловск: ИГД, 1984. – 103 с.

51. Данилов, В.И. Исследование и оптимизация скоростных режимов движения в заданных дорожных условиях: дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1977. – 160 с.

52. Еремеев, В.И. Скорость движения автосамосвалов по карьерным дорогам / В.И. Еремеев, В.В. Забелин, В.В. Шурыгин // Горный журнал. – 1995. – № 4. – С. 51–52.

53. Зырянов, Н.В. Исследование скоростных режимов движения карьерных автосамосвалов в различных дорожных условиях / Н.В. Зырянов, И.В. Зырянов // Цветная металлургия. – 1994. – № 2. – С. 24–26.

54. Казарез, А.Н. Эксплуатация карьерных автосамосвалов с электро-механической трансмиссией / А.Н. Казарез, А.А. Кулешов. – Москва: Недра, 1988. – 264 с.

55. Костин, А.Д. Об увеличении технической скорости карьерных автосамосвалов / А.Д. Костин, В.А. Печкин // Повышение эффективности и улучшение качества работы автомобильного транспорта. – Москва, 1984. – С. 79–81.

56. Красневский, Л.Г. Эксплуатационные режимы движения карьерных самосвалов с гидромеханическими трансмиссиями / Л.Г. Красневский, В.Н. Шаколин, В.И. Кочергин, А.В. Анисович // Горный журнал. – 1986. – № 12. – С. 28–30.

57. Красневский, Л.Г. Режимы движения карьерных автосамосвалов с гидромеханическими передачами / Л.Г. Красневский, В.И. Кочергин, В.Н. Шаколин. – Минск: ИНДМАШ АН БССР, 1984. – 46 с.

58. Печкин, В.А. Аппаратура для исследования режимов работы большегрузных карьерных автосамосвалов / В.А. Печкин // Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции «Пути усиления режима экономии топливо-смазочных материалов на предприятиях автомобильного транспорта». – Иркутск, 1983. – С. 37–38.

59. Печкин, В.А. Режимы работы и топливная экономичность карьерных автосамосвалов с гидромеханической передачей в условиях глубокого карьера / В.А. Печкин // Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции «Пути усиления режима экономии топливо-смазочных материалов на предприятиях автомобильного транспорта». – Иркутск, 1983. – С. 35–37.

60. Печкин, В.А. Модели скоростей движения карьерных автомобилей. – Москва: МАДИ, 1984. – 10 с.

61. Печкин, В.А. Повышение эффективности использования большегрузных автомобилей на глубинных карьерах Севера: дис. ... канд. техн. наук. – Москва: МАДИ, 1988. – 163 с.

62. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – Москва: Наука, 1971. – 192 с.

63. Румшицкий, Л.З. Методы обработки результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий, С.Н. Смирнов. – Москва: Московский институт стали и сплавов, 1973. – 162 с.

64. Сильянов, В.В. Расчеты скоростей движения на автомобильных дорогах. – Москва: МАДИ, 1978. – 115 с.

65. Стенин, Д.В. Обоснование влияния ресурса несущих систем и степени загрузки на производительность карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Кемерово, 2008. – 147 с.

66. Кузнецов, С.Р. Обоснование рациональной скорости движения карьерных автосамосвалов в режиме топливной экономичности на основе оптимизации тягово-скоростных характеристик двигателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2014. – 133 с.

67. Франко, Р.Т. Автоматизация производственных процессов на открытых горных разработках / Р.Т. Франко, В.В. Федоровский, В.В. Яснопольский. – Киев: Техніка, 1972. – 168 с.

68. Яснопольский, В.В. Автоматизация технологических процессов на карьерах / В.В. Яснопольский, Г.К. Акутин, Л.В. Гулько, Ю.М. Щербина. – Москва: Недра, 1977. – 311 с.

69. Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях: справочное пособие / под ред. В.С. Виноградова. – Москва: Недра, 1984. – 167 с.

70. Андреев, А.В. Автоматизация карьерного транспорта / А.В. Андреев, И.Л. Анчаров, Г.П. Кудинов. – Москва: Недра, 1963. – 256 с.

71. Астафьев, Ю.П., Полищук, Г.К. Автоматизированные системы управления горнорудными предприятиями. – Киев: Вища школа, 1984. – 216 с.

72. Безбородова, Г.Б., Галушко, В.Т. Моделирование движения автомобиля. – Киев: Вища школа, 1978. – 168 с.

73. Васильев, М.В. Опыт планирования работы карьерного транспорта с использованием математических методов и вычислительной техники / М.В. Васильев, Б.В. Яковенко, В.Л. Яковлев. – Москва: Недра, 1966. – 52 с.

74. Веницкий, К.Е. Применение математических методов при проектировании карьеров / К.Е. Веницкий, Э.И. Реентович. – Москва: ЦНИЭИуголь, 1968. – 114 с.

75. Кулешов, А.А. Математическое моделирование колебаний карьерных автосамосвалов при движении / А.А. Кулешов, Н.В. Зырянов, И.В. Зырянов, В.Ф. Терентьев // Колыма. – 1994. – № 3. – С. 18–30.

76. Ребрин, Е.Ю. Моделирование режимов работы карьерного автотранспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.16. – Екатеринбург, 1995. – 220 с.

77. Храмов, Ю.В., Фигуров, И.В., Щур, О.З. Математическое моделирование движения автомобиля по дорогам с усовершенствованным покрытием. – Москва: НИИНавтопром, 1973. – 64 с.

78. Яковенко, Б.В. Организация работы карьерного автотранспорта. – Москва: Недра, 1978. – 191 с.
79. Дороненко, Е.П. Исследование особенностей работы и основных параметров автомобильного транспорта на карьерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.03. – Магнитогорск: МГМИ, 1963.–175 с.
80. Мун, В.С. Исследование вопросов использования автомобилей-самосвалов на перевозках горной массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ташкент: ТМИ, 1969. – 24 с.
81. Горшков, Э.В. Обоснование рациональных параметров технологического автотранспорта при повышенных уклонах карьерных автодорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.03. – Свердловск, 1984. – 212 с.
82. Ворошилов, Г.А. Обоснование оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2008. – 24 с.
83. Фефелов, Е.В. Обоснование критерия эффективности эксплуатации силовых установок автосамосвалов на глубоких карьерах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2012. – 25 с.
84. Воронов, А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2015. – 19 с.
85. Фурман, А.С. Скоростные и рабочие режимы карьерных автосамосвалов / А.С. Фурман, В.Н. Шадрин, В.Е. Ашихмин // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 4. – С. 123–125.
86. Фурман, А.С. Исследование режима работы экскаваторно-автомобильного комплекса на открытых разработках / А.С.Фурман, Д.В. Стенин, В.Е. Ашихмин // Вестник КузГТУ. – 2007. – № 5. – С. 96–98.
87. Михайлов, В.А. Транспортные машины рудных карьеров. – Киев: Вища школа, 1985. – 183 с.
88. Ренгевич, А.А. Расчет карьерного автомобильного транспорта. – Днепропетровск: ДГИ, 1979. – 64 с.

89. Фурман, А.С. Исследование скоростных режимов движения карьерных автосамосвалов / А.С. Фурман, Г.Д. Буялич // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург. – 2015. – № 10-2 (41). – С. 22–25.

90. Фурман, А.С. Исследование распределения скоростей движения карьерных автосамосвалов / А.С. Фурман, А.А. Хорешок, Д.В. Стенин // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 48–49.

91. Фурман, А.С. Влияние продольного уклона дороги на эффективность использования экскаваторно-автомобильных комплексов / А.С. Фурман // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург. – 2015. – № 3(1). – С. 116–119.

92. Фурман, А.С. Влияние продольного уклона дороги на производительность экскаваторно-автомобильных комплексов / А.С. Фурман, А.А. Хорешок // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С.19–23.

93. Фурман, А.С. Влияние продольного уклона трассы на структуру и производительность экскаваторно-автомобильных комплексов / А.С. Фурман, Г.Д. Буялич // II Международная научно-практическая конференция «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего». – Кемерово, 2016. – Т. I. – С. 10–11.

94. Фурман, А.С. Закономерности изменения эффективности экскаваторно-автомобильных комплексов от продольного уклона дороги / А.С. Фурман, В.Н. Шадрин, В.Е. Ашихмин // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 4. – С. 120–123.

95. Фурман, А.С. Влияние продольного уклона трассы на себестоимость транспортирования горной массы / А.С. Фурман, Г.Д. Буялич // V Международная научно-практическая конференция «Перспективы инновационного развития угольных регионов России». – Прокопьевск, 2016. – С. 162–164.

96. Фурман, А.С. Закономерности изменения производительности карьерных автосамосвалов от продольного уклона трассы / А.С. Фурман, Г.Д. Буялич // Международная научно-практическая конференция «Совре-

менная наука: проблемы и пути их решения». – Кемерово, 2015. – С. 33–35.

97. Фурман, А.С. О нормировании расхода топлива на карьерном транспорте / А.С. Фурман, Д.В. Стенин, В.Е. Ашихмин // Вестник КузГТУ. – 2006. – № 1. – С. 125–127.

98. Высоцкий, М.С., Беленький Ю.Ю., Москвин В.В. Топливная экономичность автомобилей и автопоездов / М.С. Высоцкий, Ю.Ю. Беленький, В.В. Москвин. – Москва: Наука и техника, 1984. – 208 с.

99. Фурман, А.С. Аналитическое исследование топливной экономичности автомобиля с электромеханической трансмиссией / А.С. Фурман, Д.В. Стенин, В.Е. Ашихмин // Вестник КузГТУ. – 2007. – № 5. – С. 94–96.

100. Александров, В.И. Оптимизация удельного расхода топлива карьерных автосамосвалов, на основе геотехнологических условий / В.И. Александров, С.Р. Кузнецов // Естественные и технические науки. – 2013. – № 6(68). – С. 250 – 255.

101. Давыдов, В.И., Шинкевич, И.А. Режим экономии на транспорте. – Москва: Знание, 1984. – 63 с.

102. Ингл, Джон Х. Пути увеличения срока службы шин в процессе их эксплуатации // Горный журнал. – 1994. – № 4. – С. 23–26.

103. Кулешов, А.А. Влияние ровности карьерных дорог на эффективность эксплуатации автосамосвалов особо большой грузоподъемности / А.А. Кулешов, Н.В. Зырянов, И.В. Зырянов // Горный журнал. – 1995. – № 6. – С. 14–16.

104. Квагинидзе, В.С. Диагностика, техническое обслуживание и ремонт карьерного горно-транспортного оборудования в условиях низких температур: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06. – Кемерово, 2003. – 311 с.

105. Астахова, Т.В. Повышение долговечности рам карьерных автосамосвалов на основе исследования их напряженно-деформированного состояния: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Красноярск, 2007. – 200 с.

106. Кузнецов, И.В. Оценка ресурса металлоконструкций задних мостов автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Кемерово, 2015. – 138 с.

107. Фурман, А.С. Исследование транспортного процесса карьерных автосамосвалов / А.С. Фурман, Г.Д. Буялич // Горное оборудование и электромеханика.– № 5. – 2017. – С. 40–42.

108. Фурман, А.С. Исследование скоростных режимов карьерных автосамосвалов / А.С. Фурман, Н.В. Фурман, С.С. Байкалов // III Международная научно-практическая конференция «Интеграция современных научных исследований в развитие общества». – Кемерово, 2017. – С. 6–9.

109. Глебов, А.В. К вопросу оценки качества карьерных автодорог / А.В. Глебов, Ю.И. Лель, Д.Х. Ильбульдин, С.А. Арефьев // Известия Уральского государственного горного университета.– № 3 (43).–2016.– С.70-73.

110. Глебов, А.В. К вопросу повышения точности оценки показателей эксплуатации карьерных автосамосвалов/ А.В. Глебов, Ю.И. Лель, О.В. Мухоморова // Горное оборудование и электромеханика.– № 8. – 2015. – С. 24–29.

111. Глебов, А.В. Определение предельных сроков эксплуатации карьерных самосвалов/ А.В. Глебов, Г.Д. Кармаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).– № 1.– 2015. – С. 50-61.

112. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012616861 Российская Федерация. Программа моделирования работы экскаваторно-автомобильных комплексов / А.С. Фурман, Д.В. Стенин, Н.А. Стенина; заявитель и правообладатель ФБГОУ ВПО Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. – № 2012614675; заявл. 07.06.12; рег. 01.08.12.

 ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ»

Пионерский бульвар, 4а, г. Кемерово, Россия, 650054
Тел. (3842) 44-03-00 факс (3842) 44-06-58 E-mail: office@kru.ru
ОКПО 14788090 ОГРН 1034205040935 ИНН/КПП 4205049090/424950001



СПРАВКА

Результаты научных исследований Фурмана Андрея Сергеевича по обоснованию параметров экскаваторно-автомобильных комплексов использованы в ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» при проектировании участков открытой разработки угольных месторождений в части профилирования трасс и выбора рационального оборудования.

Начальник управления
проектных работ



П.С. Приступа



Российская Федерация
Акционерное Общество
«Черниговец»



652420, Россия, Кемеровская обл., г.Березовский, Тел. +7(384-45) 96-2-12,
Факс +7(384-45) 96-3-15, E-mail: coal@chernigovets.ru
ОКПО 32212927, ОГРН 1024200846887, ИНН/КПП 4203001913/425001001

СПРАВКА

Дана в том, что на АО «Черниговец» проведена апробация научных разработок сотрудника КузГТУ Фурман А. С. по расчету показателей транспортирования горной массы, которые показали хорошую сходимость с фактическими данными.

Начальник УОГР



И.О.Шачнев



Общество с ограниченной ответственностью
**«Научно-исследовательский
испытательный центр КузНИУИ»**

(ООО «НИИЦ КузНИУИ»)

653033, Россия, Кемеровская обл.,
г. Прокопьевск, ул. Крупской, 8
Телефон (384-6) 62-38-02, факс 62-16-60
E-mail: NIIZ-Zhuravl@yandex.ru
<http://kuzniui.ru>



СПРАВКА

Результаты научных исследований Фурмана Андрея Сергеевича в выборе состава экскаваторно-автомобильных комплексов использованы в ООО «НИИЦ КузНИУИ» при проектировании и экспертных заключениях по техническому перевооружению разрезов Кузбасса.

Генеральный директор



С.В. Лобков