

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

На правах рукописи

ТРАОРЕ АБУБАКАР СИДИКИ

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЕМКИ БОКСИТОВЫХ
РУД МАШИНАМИ ПОСЛОЙНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ПРОЧНОСТИ ПОРОД

Специальность 2.8.8
«Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент

Пастихин Денис Валерьевич

Москва 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1 Общие сведения о бокситовых месторождениях	9
1.2 Краткий обзор бокситовых месторождений в Республике Гвинея	14
1.3 Анализ современного состояния технологий разработки бокситовых месторождений	18
1.4 Анализ современного состояния исследований влияния прочностных свойств бокситов на технологию, организацию и показатели работы машин послойного фрезерования	29
1.5 Анализ изменчивости прочностных свойств бокситовых месторождений	38
Выводы по первой главе и постановка задач исследования	44
2 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ И ИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАБОТУ АВТОСАМОСВАЛОВ	46
2.1 Виды неровностей, образующихся на поверхности блока при фрезеровании бокситов с изменчивостью прочности пород машинами послойного фрезерования, и их оценка	46
2.2 Организация работы автомобильного транспорта и режим движения автосамосвалов	51
2.3 Исследование влияния формы поверхности блока на технологические показатели работы автосамосвалов	55
2.4 Анализ методик расчета производительности машин послойного фрезерования	61
Выводы по второй главе	65
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ МАШИН ПОСЛОЙНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ БОКСИТОВ	67
3.1 Условия разработки месторождения бокситов «Балая»	67
3.2 Установление аналитических зависимостей для расчёта производительности машины послойного фрезерования	68
3.3 Математическое моделирование работы машины послойного фрезерования и анализ результатов	82
3.4 Обоснование рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования в условиях изменчивости прочности бокситов	96

Выводы по третьей главе	99
4 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ БОКСИТОВЫХ РУД МАШИНАМИ ПОСЛОЙНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ	101
4.1 Обоснование способа погрузки автосамосвала.....	101
4.2 Выбор технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования	111
4.3 Оценка эффективности предложенных решений.....	119
Выводы по четвёртой главе	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях глобального роста мирового потребления природных ресурсов динамика роста потребления отдельных полезных ископаемых может превышать средние показатели. Одним из металлов, спрос на которые характеризуется постоянным ростом, является алюминий – стратегический материал для производства различных видов продукции, а также широко применяемый при современной трансформации мирового энергетического сектора. Устойчивое развитие сырьевой базы и эффективное использование бокситов, основной руды алюминия, приобретает все большее экономическое и геостратегическое значение.

Мировая горнодобывающая промышленность сталкивается с растущей проблемой: обеспечение баланса между повышением объемов производства, ростом производительности, обеспечением безопасности горного производства и охраной окружающей среды при разработке месторождений полезных ископаемых. Применение машин послойного фрезерования для добычи бокситов стало технологическим ответом на экологические и прецизионные требования. Сдерживающим фактором увеличения объемов добычи бокситов на основе применения машин послойного фрезерования на ряде месторождений стали геологические особенности пород этих месторождений.

Физико-механические свойства бокситов на этих месторождениях обладают изменчивостью. Ранее теоретически установлены и подтверждены практикой рациональные режимы и глубина фрезерования горных пород, обладающих различной прочностью. В связи с этим при наличии в пределах фрезеруемого слоя горных пород различной прочности из-за различной глубины фрезерования формируются неровности. Эти неровности не только снижают скорость движения автомобильного транспорта по этой поверхности и увеличивают затраты на его эксплуатацию, но и при их существенной высоте ставят под угрозу безопасность его движения. Устранение неровностей осуществляется повторным фрезерованием, что приводит к потере эксплуатационной производительности

применяемого комплекса оборудования на 15–25 %. Поэтому исследование технологии работ машин послойного фрезерования в комплексе с автомобильным транспортом в условиях изменчивости прочности бокситовых руд и обоснование технологических схем их выемки является актуальной научной и практической задачей.

Степень научной проработанности темы исследования. Существенный вклад в развитие теоретических основ открытой разработки месторождений полезных ископаемых с применением безвзрывных технологий, а также машин послойного фрезерования внесли авторы: Анистратов Ю.И., Ермаков С.А., Панкевич М.Ю., Панкевич Ю.Б., Пихлер М., Райков А.Б., Ржевский В.В., Семин А.П., Смагин В.П., Супрун В.И., Федорко П.В., Хосоев Д.В., Чебан А.Ю., Шевченко А.Г., Щадов В.М., Якименко Д.В., Pathak K., Rodkar P. и другие.

Влияние прочностных свойств горных пород на параметры технологических схем и показатели работы машин послойного фрезерования исследовали в своих работах: Карапетян Э.А., Метельков А.А., Ордин А.А., Швабенланд Е.Е., Amar P., Bahadur S.K., Chenna W., Kumar C., Murthy V.M., Prakash A., Ramachandra M.V., Singh K.B. и другие.

Цель работы: установление закономерностей формирования структуры комплекса оборудования и параметров технологических схем при применении машин послойного фрезерования в условиях пространственной изменчивости прочности горных пород, обеспечивающих повышение его производительности.

Идея работы: максимальная производительность комплекса оборудования достигается путем минимизации затрат времени на выполнение непроизводительной работы и простои машины послойного фрезерования, связанных с организацией и технологическими схемами её работы в комплексе с автосамосвалами в условиях повторного фрезерования бокситов для устранения неровностей на поверхности участка фрезерования на основе математического моделирования.

Научная новизна работы заключается:

- в установлении зависимости способа погрузки автосамосвала при работе выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования при добыче бокситов от параметров фрезеруемого блока, структуры комплекса оборудования и схемы фрезерования;
- в комплексном подходе к обоснованию параметров технологических схем ведения горных работ машинами послойного фрезерования и расчету их показателей, учитывающем изменчивость прочности бокситов в пределах разрабатываемого блока и способ их погрузки в автосамосвалы.

Научное значение работы заключается в установлении закономерностей формирования структуры добычного комплекса оборудования и параметров технологических схем при применении машин послойного фрезерования, автосамосвалов и погрузчиков в условиях разработки бокситовых месторождений, характеризующихся пространственной изменчивостью прочности.

Практическое значение работы заключается в разработке алгоритма выбора комплекса оборудования и технологической схемы ведения горных работ при разработке месторождений бокситов машинами послойного фрезерования, обеспечивающей максимальную производительность выбранного комплекса оборудования.

Методы исследования включают аналитическое обобщение сведений, содержащихся в научно-технической и специальной литературе; математическое моделирование с применением программного пакета Microsoft Office Excel; статистическую обработку данных о работе машин послойного фрезерования и результатов математического моделирования в статистическом пакете Statgraphics Centurion.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методом мультипликативной степенной регрессии установлена нелинейная степенная зависимость рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования от её технической

производительности, длины и ширины фрезеруемого блока, площади повторно фрезеруемых неровностей на поверхности блока.

2. Предложено при расчете максимальной производительности комплекса оборудования использовать показатель способа погрузки P_b , учитывающий установленную зависимость способа погрузки автосамосвала от продолжительности рейса автосамосвала, времени обмена автосамосвалов при погрузке, времени погрузки автосамосвала, ожидания погрузчика при создании первоначального фронта работ, количества автосамосвалов в комплексе оборудования; при этом при $P_b < 1$ погрузка автосамосвала должна осуществляться непосредственно машиной послойного фрезерования, а при $P_b > 1$ – погрузчиком из сформированного машиной послойного фрезерования штабеля.

3. Разработан алгоритм выбора технологической схемы отработки блока участка месторождения бокситовых руд машинами послойного фрезерования, основанный на минимизации затрат времени на выполнение непроизводительной работы и простои машины послойного фрезерования, использование которого за счет учета схемы повторного фрезерования неровностей на поверхности участка отработки и способа погрузки полезного ископаемого позволяет повысить эффективность разработки бокситовых месторождений.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: использованием апробированных методик моделирования, способов исследования и программ; сопоставимостью результатов теоретических исследований со статистическими данными и фактическими показателями; высокой прогностической способностью и хорошей точностью моделей (коэффициент детерминации выше 0,89).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы прошли апробацию на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» в 2024, 2025 и 2026 гг.

Реализация работы. Результаты работы были использованы АО «Коми Алюминий» при выборе технологии разработки новых участков Верхне-Щугорского месторождения бокситов.

Личный вклад автора состоит в: проведении теоретических и экспериментальных исследований; установлении зависимостей: способа погрузки автосамосвала при работе выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования от параметров фрезеруемого блока, структуры комплекса оборудования и схемы фрезерования и эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования от её технической производительности, длины и ширины фрезеруемого блока, площади повторно фрезеруемых неровностей на поверхности блока; разработке алгоритма выбора технологической схемы отработки блока участка месторождения бокситовых руд машинами послойного фрезерования.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 статьи, 3 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на 140 страницах, содержит 18 таблиц, 78 рисунков, 1 приложение, список использованных источников из 126 наименований.

1 **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1.1 **Общие сведения о бокситовых месторождениях**

Бокситы представляют собой осадочные горные породы, содержащие значительное количество алюминиевых оксидов, а также другие минералы, такие как гидросиликаты и оксиды железа [1–4]. Они служат основным источником алюминия, который присутствует во множестве промышленных и потребительских изделий. Развитие сырьевой базы бокситов имеет важное значение для удовлетворения растущего спроса на алюминий в мире.

Бокситы впервые были обнаружены во Франции в 1821 г. около города Бо, откуда и возникло их название, и описаны геологом Пьером Бертье [5]. Бокситовые месторождения формируются при интенсивном выветривании, что характерно в условиях тропического климата. Основные факторы, способствующие образованию бокситов, это высокие температуры, обильные дожди и наличие определённых горных пород, таких как материковые силикатные породы [2, 6, 7].

Состав и характеристика бокситов:

Химический состав бокситов [8–12]:

- 1) оксид алюминия [Al_2O_3] (40–60 %) – основной компонент бокситов, от которого зависит основной выход алюминия;
- 2) оксид железа [Fe_2O_3] (5–30 %) – влияет на цвет и качество бокситов;
- 3) оксид кремния [SiO_2] (до 15 %) – высокое содержание может снижать качество боксита;
- 4) оксид титана [TiO_2] (до 15 %).

Качество бокситов определяется уровнем содержания оксида алюминия и другими примесями. Высококачественные бокситы содержат не менее 50–55% Al_2O_3 и менее 5% SiO_2 . Месторождения бокситов высокого качества встречаются в тропических и субтропических зонах, включая ряд стран Африки, Южной Америки и Центральной Америки, а также Азии и Австралии [13,14].

В соответствии с процессом образования выделяют остаточные и осадочные бокситы. Второе название – латеритные и переотложенные соответственно. Если породы были образованы в результате воздействия обоих указанных процессов они называются смешанные.

Также существует классификация бокситов на основе породообразующего минерала. Если преобладает бёмит или диаспор – это моногидрооксидные бокситы. Породы, в которых преобладает гиббсит, относят к тригидрооксидным. И в этой классификации также существует понятие смешанные. Например, к ним относят диаспор-бёмититовые бокситы.

Некоторые классификации основаны на прямом указании породообразующих минералов. В качестве примера можно привести гётит-шамозит-бёмититовые бокситы.

В палитре цветов бокситов чаще встречаются бурые, коричневые и красные оттенки. Также можно встретить бокситы серого, желтого, белого и даже черного цветов.

Разное происхождение, структурные особенности и пористость бокситов определяют изменчивость плотности бокситов. Она меняется в диапазоне от 1800 до 3200 кг/м³ [15].

В основном боксит используется для производства глинозема - основного сырья для получения алюминия. Но в соответствии с химическим составом бокситов они также могут использоваться для производства металла из железной руды, огнеупорных цементов или являться сырьем для получения титана, железа, галлия, хрома и редкоземельных элементов.

Месторождения бокситов по запасам разделяются на крупные (свыше 50 млн т), средние (5–50 млн т) и мелкие (до 5 млн т). Запасы крупнейшего в мире месторождения Боке (Гвинея) оценивают в 2,5 млрд т [15].

Месторождения бокситов разведаны в более чем 50 странах мира, но только в 12 из них сконцентрировано около 93% этих запасов (рисунок 1.1) [14].

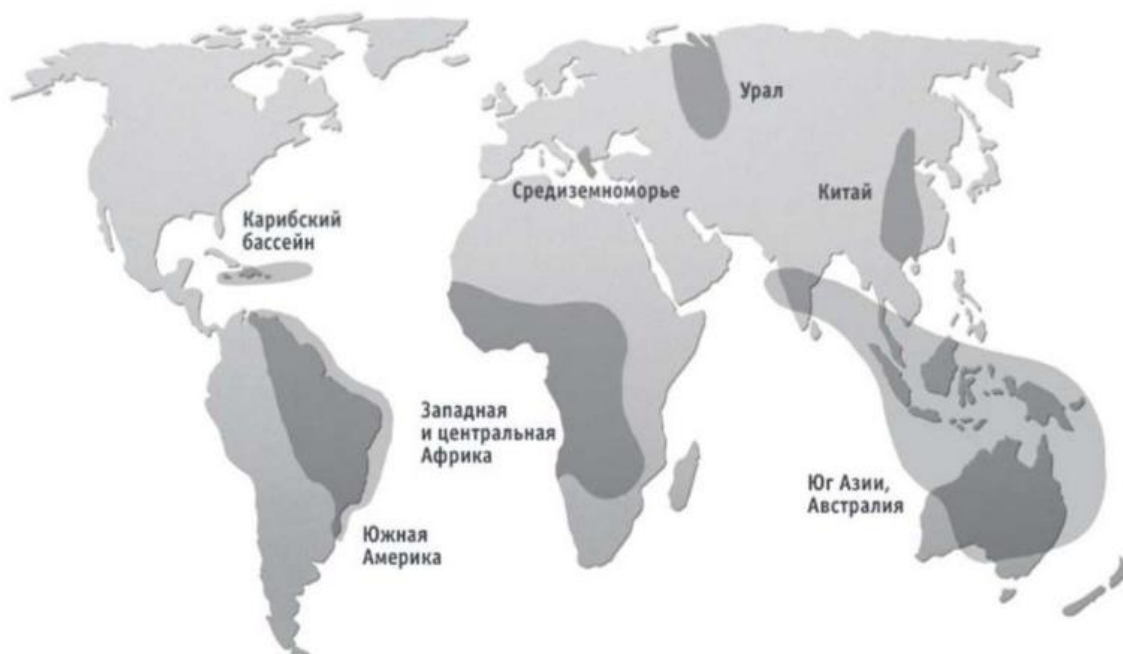


Рисунок 1.1 – Мировая карта бокситовых месторождений [17]

Страны с крупнейшими запасами бокситов в мире (рисунок 1.2):

- 1) Республика Гвинея – один из крупнейших источников бокситов в мире, запасы превышают 7 млрд т, это свыше 25% мировых запасов;
- 2) Австралия – запасы бокситов примерно 3,5 млрд т. Ключевые месторождения находятся в штатах Вест-Энд и Квинсленд. Австралия – одна из ведущих мировых стран по добыче бокситов (рисунок 1.3);
- 3) Вьетнам – запасы бокситов около 3,1 млрд т. Главные месторождения расположены в основном в горных регионах, в частности, в провинциях Дак Нонг и Лам Донг. Считается, что эти месторождения обладают одними из крупнейших запасов бокситов в Азии;
- 4) Индонезия – запасы бокситов около 2,8 млрд т. Основные месторождения бокситов в Индонезии находятся на островах Суматра и Калимантан (Борнео);
- 5) Бразилия – запасы бокситов около 2,7 млрд т. Главные месторождения расположены в штатах Пара и Минас-Жерайс;
- 6) Ямайка – запасы бокситов около 2 млрд т. Основные запасы бокситов находятся в районе Норт-Гренада;

7) Китай – запасы примерно 680 млн т. Главные месторождения сосредоточены в провинциях Ганьсу и Юньнань. Китай является одним из крупнейших потребителей бокситов в мире из-за значительных объёмов производства алюминия;

8) Индия – запасы бокситов около 650 млн т. Главные месторождения находятся в штатах Орисса и Андхра-Прадеш;

9) Россия – запасы бокситов около 480 млн т. Крупные месторождения бокситов находятся на Урале и в Сибири [16].

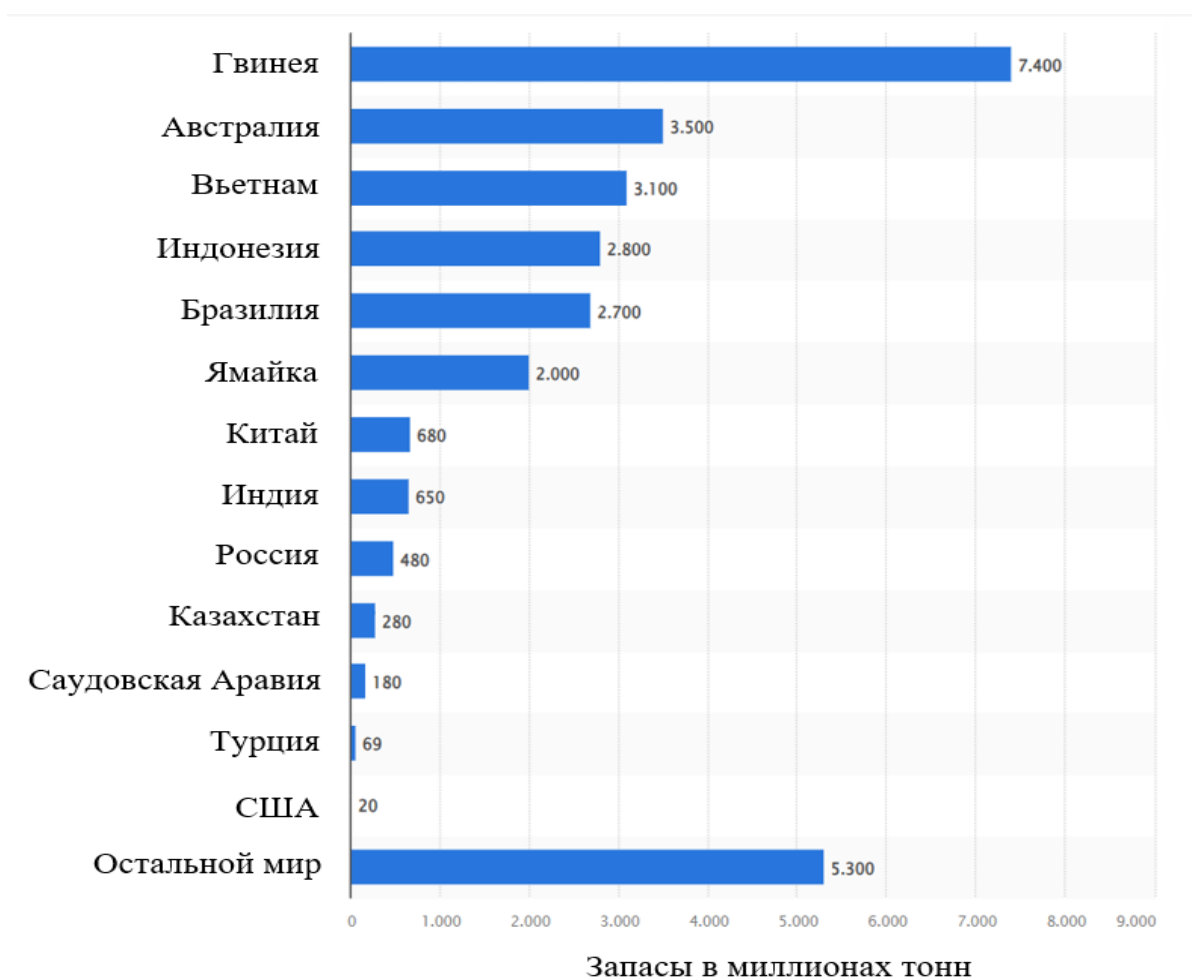


Рисунок 1.2 – Страны с крупнейшими запасами бокситов в мире в 2024 г. (млн т) [16]

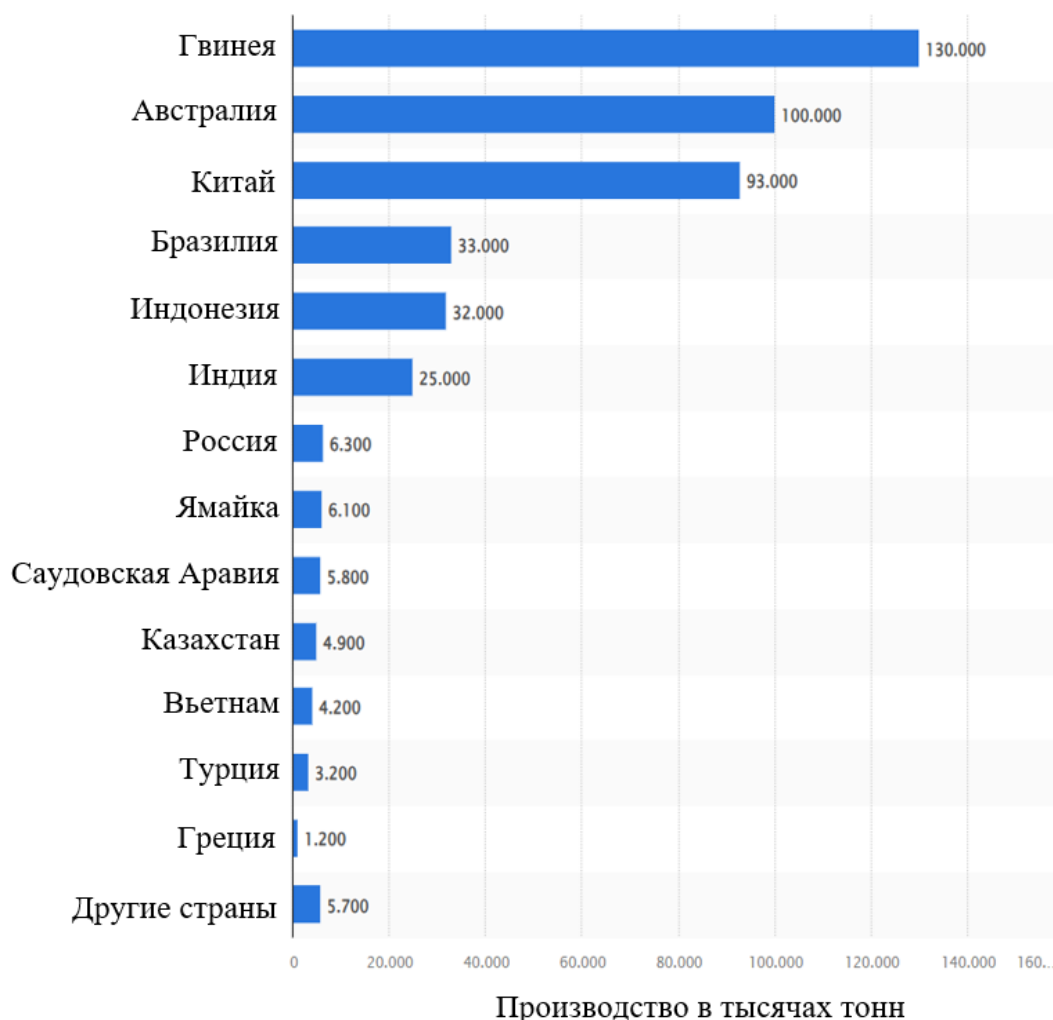


Рисунок 1.3 – Ведущие страны по добыче бокситов в мире в 2024 г. (тыс. т) [18]

Спрос на алюминий продолжает расти благодаря его применению в лёгких конструкциях, электронике и альтернативной энергетике. Международный институт алюминия (International Aluminium Institute – IAI) прогнозирует, что до 2050 г. спрос на алюминий будет увеличиваться в среднем на 3,8% в год (рисунок 1.4). Разработка бокситов сопряжена с загрязнением окружающей среды, а сегодня экологические проблемы становятся всё более важным вопросом. Многие страны и компании ищут более экологически чистые методы добычи и переработки бокситов, а также разрабатывают технологии переработки алюминия для уменьшения зависимости от первичных ресурсов.

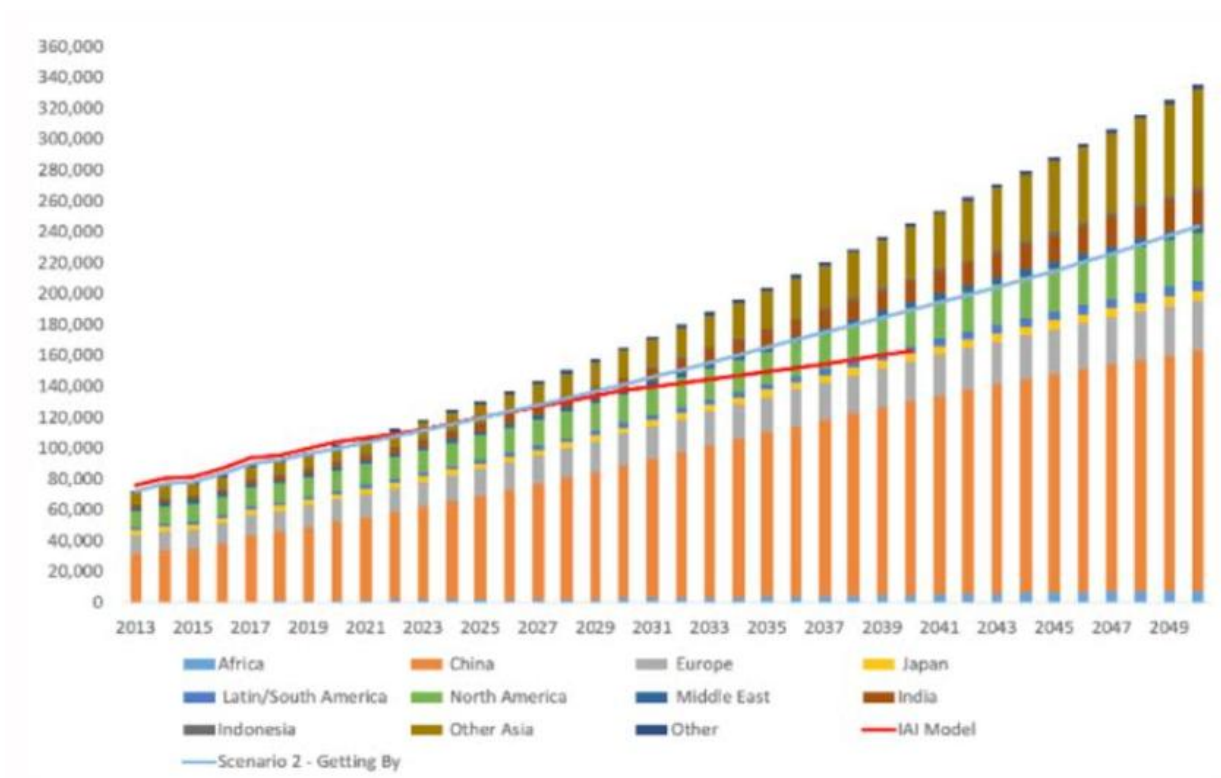


Рисунок 1.4 – Прогноз спроса на алюминий до 2050 г. [19]

1.2 Краткий обзор бокситовых месторождений в Республике Гвинея

Республика Гвинея, расположенная в Западной Африке (рисунок 1.5), занимает первое место по запасам бокситов в мире [20].

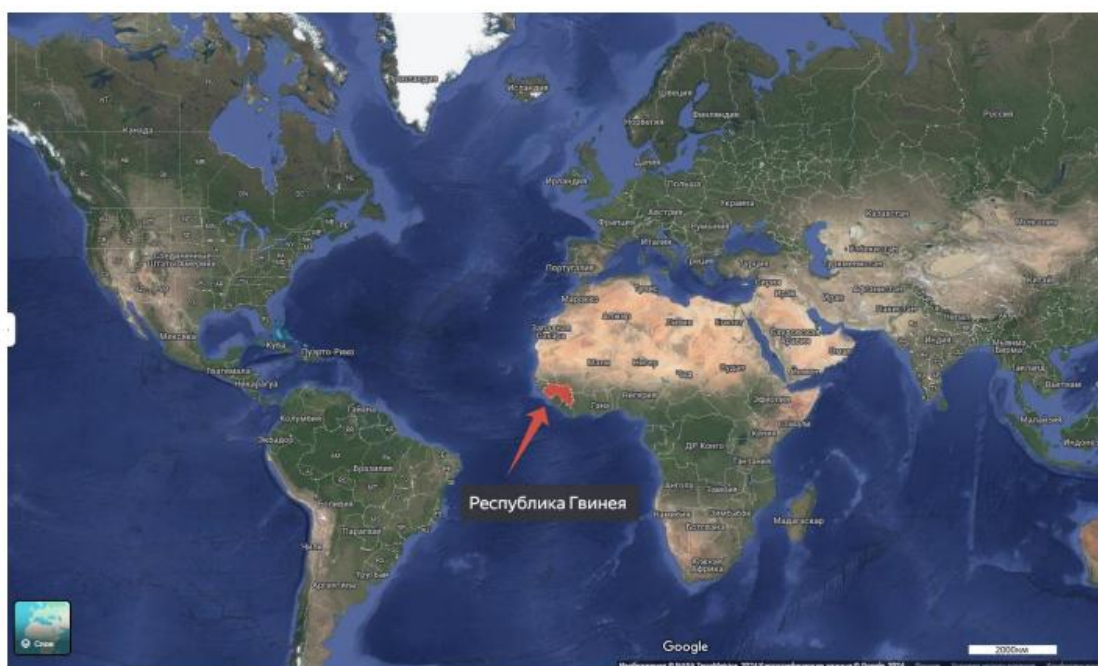


Рисунок 1.5 – Республика Гвинея на мировой карте [21]

Бокситовые месторождения Гвинеи находятся в основном в области с тектоническими структурами, относящимися к криогенной эпохе. Месторождения бокситов в Гвинее имеют аллювиальное и элювиальное происхождение [22–25].

Благодаря своим географическим и геологическим условиям Гвинея обладает одними из самых крупных и богатых месторождений бокситов. Бокситы этих месторождений имеют уникальные качественные характеристики. Содержание окиси алюминия в руде достигает 60–65% (при этом среднее содержание на аналогичных месторождениях редко превышает 50%), при этом SiO_2 – менее 4% [26]. Покрывающие породы практически отсутствуют, а средняя мощность пласта бокситов достигает 9 м. При указанных горно-геологических условиях их добыча осуществляется наиболее дешевым открытым способом.

На 2000 г. мировые запасы бокситов оценивались зарубежными специалистами в 55–75 млрд т, при этом на долю Республики Гвинея приходилось 21–25 млрд т. А по оценке советских геологов, запасы бокситов в Республике Гвинея превышали 27 млрд т [26].

Согласно результатам работы Мамедова В.И. [27], в которой приведены данные о запасах по всем бокситовым месторождениям, Гвинея обладает общими запасами бокситов более 40,14 млрд т, в том числе 3,2 млрд т доказанных запасов и 7,4 млрд т разведанных запасов, изученных по систематической сетке размером не менее 600 х 600 м; 18,7 млрд т предполагаемых ресурсов и более 10,8 млрд т прогнозных ресурсов.

Месторождения бокситов расположены в четырех бокситоносных районах (I, II, III и IV) в Нижней, Средней и Верхней Гвинее (рисунок 1.6) на расстоянии 100–500 км от Атлантического океана [26, 28]:

I. Запасы бокситов в районе Боке-Гаваль оцениваются в 12,71 млрд т при содержании окиси алюминия от 40 до 64%, окиси кремния – менее 4%. Площадь этого бокситового района около 100 кв. км. В него входят 4 группы месторождений.

а. Группа Боке. Запасы этой группы оцениваются в 4,7 млрд т. Содержание окиси алюминия более 50% и окиси кремния – 1–5%. Средняя

мощность залегания месторождений составляет 7,1 м. Годовой объем добычи 300 млн т бокситов.

б. Группа Кумбия. Запасы 1,3 млрд т.

с. Группа Парау-Ямья. Запасы бокситов 3,6 млрд т. Содержание окиси алюминия превышает 40%. Окиси кремния – около 4%.

д. Группа Термессэ. Запасы 2,49 млрд т бокситов с содержанием окиси алюминия более 40% и менее 4% – окиси кремния.

II. Юго-Западный район Гвинеи. Запасы района оценивают в 1,72 млрд т, он включает 4 группы:

а. Группа Фриа. Запасы 364 млн т с содержанием окиси алюминия 47,5% и 1,8% – окиси кремния.

б. Группа Содиоре. Запасы 563,9 млн т со средним содержанием окиси алюминия 45% и менее 4% - окиси кремния.

с. Группа Сампири. Запасы 88 млн т с содержанием окиси алюминия 46%, окиси кремния – 4%, железа – 25% и титана – 1,8%.

д. Группа Манга. Запасы 507 млн т бокситов, содержание окиси алюминия – 46% и окиси кремния – ниже 4%; толщина слоя – 8,8 м. В нее входит бокситоносная зона Киндиа с запасами 200 млн т.

III. Центральный район обладает общими запасами в 1,5 млрд т; среднее содержание окиси алюминия в бокситах этого района – 45–47%, окиси кремния – 2%.

IV. Северо-восточный район обладает запасами в 1,1 млрд т с содержанием окиси алюминия 42,8%, окиси кремния – ниже 2%.

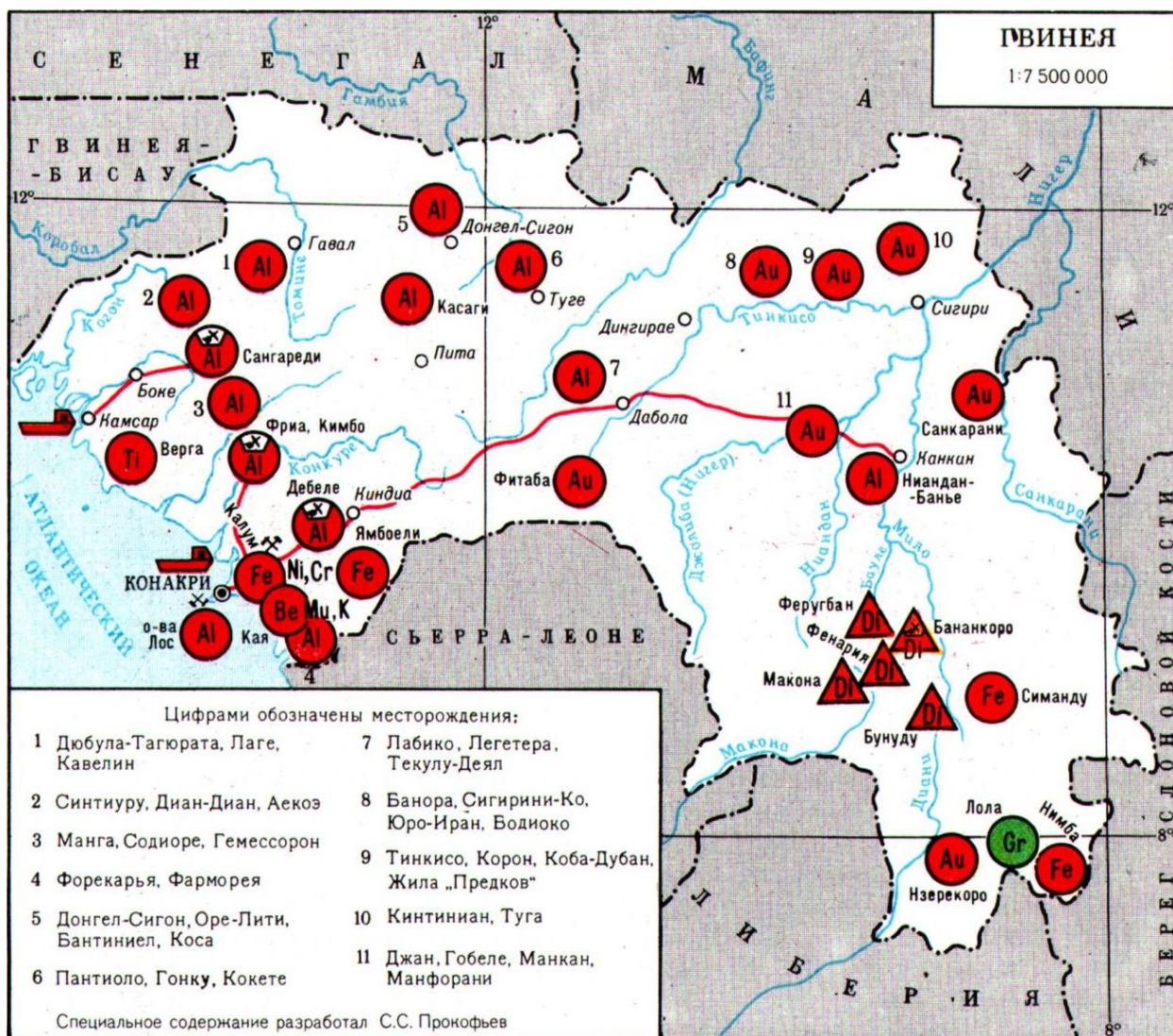


Рисунок 1.6 – Бокситовые месторождения в Республике Гвинея [29]

Бокситы составляют основную часть экспортного потенциала Республики Гвинея, что делает их критически важными для экономического роста и устойчивого развития страны. Вклад горной отрасли в ВВП страны составляет до 25% [30]. Добыча бокситов способствует созданию рабочих мест, инвестированию в инфраструктуру и позволяет правительству получать значительные налоговые поступления.

Несмотря на экономическую выгоду добыча бокситов буровзрывным методом вызывает экологические последствия [31].

Власти страны и компании стремятся внедрять более экологически безопасные методы введения добычи для минимизации негативного воздействия на окружающую среду [32].

Таким образом, можно отметить, что бокситовые месторождения Гвинеи представляют собой важный ресурс, который способствует экономическому развитию страны, но также требует внимательного подхода к экологии и устойчивому развитию.

1.3 Анализ современного состояния технологий разработки бокситовых месторождений

В соответствии с горно-геологическими условиями добыча бокситовых месторождений ведется как открытым, так и подземным способом [33].

На сегодняшний день в мире превалирует открытый способ добычи бокситов, но в соответствующих горно-геологических условиях и при определенных качественных показателях эффективно применение и подземного способа разработки.

Подземная добыча предполагает создание подземных выработок для доступа к залежам бокситов под поверхностью земли, а также всей необходимой инфраструктуры для обеспечения вентиляции, осушения, доступа персонала [34 – 36].

Добыча полезных ископаемых на подземных рудниках ведется более селективно, чем на карьерах.

Выработки в большинстве случаев проводятся по полезному ископаемому, поэтому при подземной добыче для доступа к месторождению удаляется минимальный объём вскрышных пород.

Вскрышная порода часто используется в качестве закладочного материала для укрепления подземных выработок.

Мощность полезного ископаемого, форма рудных тел, прочностные свойства бокситов и вмещающих пород определяют выбор технологии подземной разработки месторождения [37–40].

Применение подземного способа разработки бокситов позволяет снизить эстетическое и экологическое воздействие по сравнению с открытой добычей [41]. Кроме того, он может применяться в районах, где открытая добыча нецелесообразна из-за рельефа местности или близости к инфраструктуре.

Подземный способ разработки более дорогостоящий из-за вопросов вентиляции, безопасности и водоотлива. Поскольку бокситы часто располагаются близко к поверхности, открытая добыча обычно более эффективна.

При открытой разработке бокситовых месторождений часто сталкиваются с необходимостью подготовки пород к выемке. Традиционно на многих предприятиях этот процесс проводится с применением буровзрывных работ. Буровзрывные работы включают бурение скважин, их зарядку взрывчатыми веществами и последующее детонирование [42, 43]. Выполнение данных работ оказывает влияние на безопасность горных работ и эффективность горного производства в целом.

Исследованиями в области процесса разрушения пород взрывом и технологии ведения взрывных работ длительное время занимались и продолжают заниматься многие научно-исследовательские организации. Большой вклад в развитие технологии взрывных работ внесли авторы: Адушкин В.В., Баранов Е.Г., Барон Л.И., Белин В.Л., Викторов С.Д., Демидюк Г.П., Жариков И.Ф., Казаков Н.Н., Козырев А.А., Кутузов Б.Н., Лаврентьев М.А., Мельников Н.В., Мосинец В.Н., Репин Н.Я., Ржевский В.В., Родионов В.Н., Садовский М.А., Семенов Н.Н., Трубецкой К.Н., Федотенко В.С., Ханукаев А.Н., Харитон Ю.Б., Шемякин Е.Н. и многие другие.

Современные технологии взрывных работ предполагают использование компьютерных систем для моделирования и контроля взрывных работ, что позволяет минимизировать потери породы и предотвратить нежелательные последствия, такие как шум и выбросы пыли [44, 45].

Для подготовки пород к выемке в основном применяется метод скважинных зарядов [46–48]. Чаще всего применяются заряды сплошной конструкции, состоящие из одного типа взрывчатого вещества. Ограниченное применение нашли заряды с воздушными промежутками.

Применение буровзрывных работ для подготовки к выемке бокситовых руд оказывает негативное воздействие как на процессы добычи полезного ископаемого, так и на результат деятельности горного предприятия в целом. Затраты на бурение и взрывание увеличивают себестоимость добычи. Периодическая остановка работ и вывод оборудования и людей из опасной зоны перед массовым взрывом приводит к снижению производительности. Нарушение сплошности массива приводит к снижению устойчивости откосов карьера. Отдельно необходимо отметить экологические последствия, такие как попадание химических продуктов разложения взрывчатых веществ в грунтовые воды, реки и водоемы (рисунок 1.7), загрязнение воздуха (рисунок 1.8).



Рисунок 1.7 – Загрязнение воды [49]:
а – загрязненный ручей; *б* – загрязненная река



Рисунок 1.8 – Загрязнение воздуха, связанное со взрывными работами по добыче бокситов [49]

В последние десятилетия наблюдается тенденция к переходу на технологии добычи полезных ископаемых, в которых отсутствуют взрывные работы. Для подобных технологий появился термин – безвзрывные технологии. Безвзрывные технологии разработки месторождений становятся всё более популярными благодаря своей эффективности, безопасности и снижению негативного воздействия на окружающую среду [50–63].

Выбор оборудования для безвзрывной разработки горных пород зависит от различных факторов, включая тип месторождения, его геологические условия, экологические требования и экономические показатели [64–67].

Оборудование, используемое при безвзрывной технологии разработки месторождений, по назначению делят на два класса: в один класс входит оборудование, предназначенное только для разрушения горных пород, во второй – оборудование, выполняющее сразу две функции – разрушение и выемочно-погрузочные операции. При этом по конструктивно-технологическим признакам выделено пять типов машин, отличающихся конструктивным исполнением и способом рыхления горных пород (рисунок 1.9) [68].



Рисунок 1.9 – Типы оборудования, применяемые для безвзрывной разработки массива горных пород на карьерах [68]

Использование тяжелых и сверхтяжелых бульдозеров-рыхлителей позволяет обеспечить достаточно высокую интенсивность разработки месторождений, особенно при трещиноватости и слоистости горных пород (рисунок 1.10) [69]. Недостатками применения бульдозеров-рыхлителей являются привлечение дополнительного погрузочного оборудования для погрузки разрыхленной горной массы, усложнение технологии работ из-за необходимости селективной выемки вмещающих пород при разработке сложноструктурных месторождений, значительное увеличение объемов вскрытых запасов.

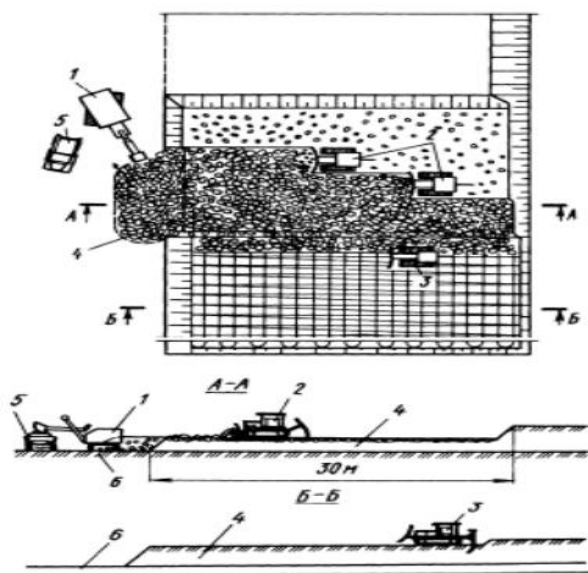


Рисунок 1.10 – Технологическая схема применения бульдозеров-рыхлителей:

1 – экскаватор; 2 – бульдозеры; 3 – рыхлитель;

4 – вскрышные породы;

5 – автосамосвал; 6 – пласт полезного ископаемого [69]

Применение гидромолота для разрушения породы позволяет расширить область применения безвзрывных технологий и разрабатывать месторождения пород с пределом прочности на сжатие $\sigma = 100\text{--}120$ МПа.

Применение безвзрывной технологии в сейсмически опасных регионах, а также в условиях близкого расположения населенных пунктов и промышленных объектов позволило обеспечить их безопасность [59].

Еще одним направлением развития безвзрывных технологий является применение физико-химического разупрочнения горных пород. Снижение прочности породного массива осуществляется воздействием на него водными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для ряда пород снижение прочности может достигать 50%, что позволяет их разрабатывать без применения буровзрывных работ [58] или увеличить производительность горных машин, разрабатывающих месторождения, где буровзрывные работы не выполнялись [70–72].

Совершенствуется выемочное оборудование. Экскаваторы нового поколения ЭКГ-5, оснащённые ковшом активного действия, могут разрабатывать породы с пределом прочности на сжатие до 70 МПа (рисунок 1.11) [73].

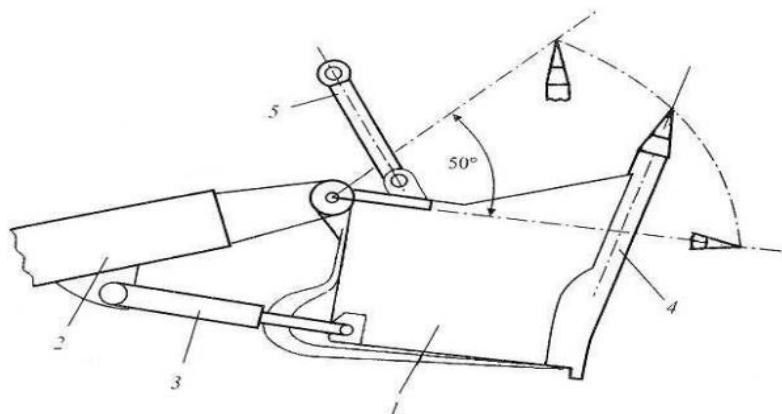


Рисунок 1.11 – Принципиальная схема поворотного ковша активного действия: 1 – ковш; 2 – рукоять экскаватора; 3 – гидроцилиндр поворота ковша; 4 – пневмоударник; 5 – элемент подвески ковша [73]

Компания «Sandvik Mining and Construction» (Венгрия) разработан роторный экскаватор, обладающий повышенным усилием резания (рисунок 1.12). Он

эффективно применяется при выемке пород с пределом прочности до 60–80 МПа [74].



Рисунок 1.12 – Роторный экскаватор компании «Sandvik Mining and Construction» [74]

Отдельно необходимо отметить широкий выпуск различными компаниями различных по своей конструкции машин послойного фрезерования и их эффективное использование при разработке бокситовых месторождений [55, 66, 75, 76].

Для селективной безвзрывной добычи полезных ископаемых создан целый класс машин «Continuous Surface Miner, CSM».

На сегодняшний день на карьерах мира работает более 600 машин послойного фрезерования различных моделей.

Наиболее известные модели машин послойного фрезерования представлены ниже:

- Wirtgen – серия SM;
- Vermeer – серия T;
- Tenova Takraf – серии MTS и SM;
- Dosco – серия TB;
- Weserhütte и Paurat – фрезерные комбайны серии SM;
- Voest-Alpine Bergtechnik (входит в группу Sandvik) – фрезерные комбайны VASM, серия MC;
- Huron Manufacturing – фрезерный комбайн Easy-Miner;

- Krupp Fördertechnik – серия KSM;
- Eickhoff – серия ET;
- Rahco – фрезерный комбайн CME;
- McNally-Pittsburg – фрезерный комбайн WL-50;
- CMI - серии TR и PR;
- Unit Rig – фрезерный комбайн Unimatic.

С появлением машин послойного фрезерования многие специалисты занимались исследованиями в области их применения для открытой разработки месторождений.

Были выполнены исследования в области технологии послойного фрезерования при разработке сложноструктурных угольных месторождений и сконструирован комбинированный рабочий орган, применение которого снижает переизмельчение горных пород [77, 78].

Ю. П. Пташник [79] и Е. Е. Швабенланд [80] в своих исследованиях доказали, что применение машин послойного фрезерования позволяет обеспечить требуемое качество извлечения минерального сырья, сократить экологические последствия и обеспечить безопасность горных работ.

Сегодня на открытых горных работах применяются машины послойного фрезерования с различным расположением рабочего органа (рисунок 1.13) [81].

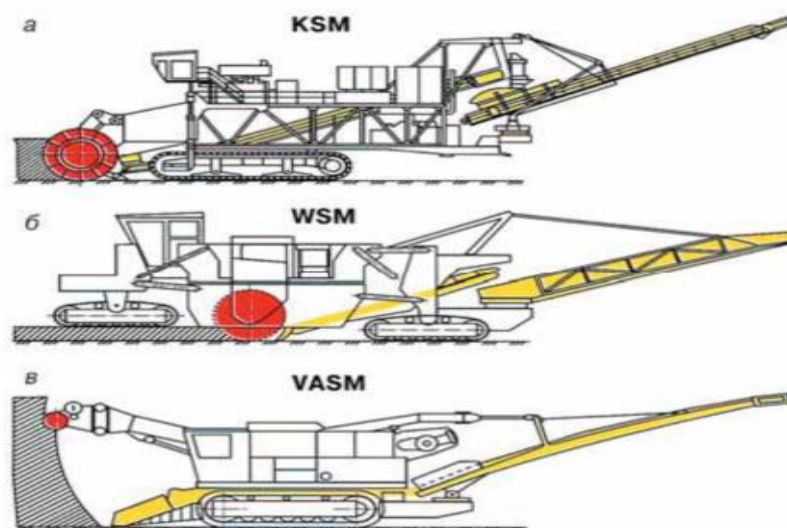


Рисунок 1.13 – Машины послойного фрезерования с расположением рабочего органа:

а – в передней части машины; *б* – на раме по центру; *в* – на стреле [81]

Наибольшую эффективность показали машины послойного фрезерования с центральным и передним расположением рабочего органа. Эти машины могут разрабатывать породы прочностью до 150 МПа [81, 82]. Технологическая схема их работы представлена на рисунке 1.14 [56, 61].

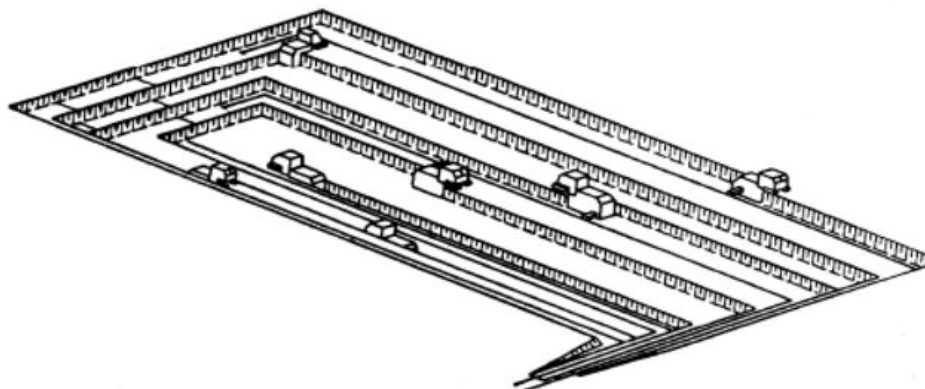


Рисунок 1.14 – Технологическая схема разработки горных пород машинами послойного фрезерования [61]

Комбайновая технология может предусматривать:

- погрузку пород непосредственно в автосамосвалы (рисунок 1.15);
- боковую отсыпку горной массы разгрузочным конвейером в штабель с последующей погрузкой погрузчиком в самосвалы (рисунок 1.16);
- формирование штабеля из разрушенного материала по ходу движения комбайна сзади с последующей погрузкой погрузчиком в самосвалы (рисунок 1.17).



Рисунок 1.15 – Погрузка непосредственно в автосамосвалы [83]



Рисунок 1.16 – Боковая отсыпка горной массы разгрузочным конвейером в штабель [83]



Рисунок 1.17 – Формирование штабеля из разрушенного материала по ходу движения комбайна [83]

Положительный опыт работы машин послойного фрезерования Wirtgen Surface Miner моделей 2100 SM и 2200 SM показан в работе профессора А.К. Райкова [75].

В исследованиях Н.С. Авраамовой [84] и Г.Д. Зайцева [68] доказана экономическая целесообразность разработки месторождений при применении машин послойного фрезерования.

Преимуществами послойного фрезерования являются:

- значительное снижение негативного воздействия горных работ на окружающую среду;
- возможность добычи полезных ископаемых вблизи жилых районов;
- совмещение процессов выемки и погрузки горной массы (поточно-циклическая технология);
- снижение потерь и разубоживания (селективная выемка) полезного ископаемого за счет точного контроля глубины резания при отработке горизонтальных и пологих залежей с углами падения до 15°;
- снижение затрат на дробление полезного ископаемого при дальнейшей переработке за счет измельчения породы в процессе фрезерования;
- автономность машин послойного фрезерования;
- быстрый ввод в эксплуатацию. Как правило, машины послойного фрезерования сконструированы модульно, что позволяет быстро производить их монтаж на предприятии;
- возможность обеспечения благоприятных для работы автосамосвалов условий движения. Создание ровной поверхности с заданными поперечными и продольными уклонами.

В качестве недостатков машин послойного фрезерования следует отметить:

- зависимость показателей эффективности применения машин послойного фрезерования от прочностных свойств горных пород;
- относительно малый срок службы машин послойного фрезерования. У машин KSM – 6–9 лет, WSM – 4–6 лет, а у экскаваторов ЭКГ – 15–18 лет;
- высокий износ породоразрушающего инструмента;
- ограничение по прочности обрабатываемых пород;
- сложность организации поточной технологии ведения горных работ;
- необходимость значительного опережения вскрышных работ для создания фронта работ (удаление вскрышных пород по всей площади обрабатываемого блока);
- низкая эффективность использования машин послойного фрезерования на породах, склонных к налипанию.

Выполненный анализ современного состояния технологий разработки бокситовых месторождений позволяет сделать вывод, что при открытой разработке месторождений для пород прочностью до 70–90 МПа буровзрывная технология имеет ряд недостатков и переход на безвзрывную технологию отработки бокситовых месторождений повышает эффективность добычи полезного ископаемого, уровень безопасности производственных процессов и обеспечивает снижение потерь и разубоживания, а также сокращение экологической нагрузки горного производства на окружающую среду.

Таким образом, при открытой разработке бокситовых месторождений целесообразно применение безвзрывной технологии с использованием машин послойного фрезерования.

1.4 Анализ современного состояния исследований влияния прочностных свойств бокситов на технологию, организацию и показатели работы машин послойного фрезерования

Эффективное применение машин послойного фрезерования при разработке месторождений зависит от множества факторов: технических характеристик используемого оборудования, геологических и горнотехнических условий, организации работ, требований к безопасности и экологичности производства и еще целого ряда факторов. Учет геологических особенностей месторождения и правильный выбор технологической схемы ведения работ позволяют достичь высокой производительности и добыть полезное ископаемое с качественными характеристиками, обеспечивающими конкурентоспособность конечной продукции.

Одним из основных факторов, определяющих возможность и эффективность применения машин послойного фрезерования при разработке бокситовых месторождений, является прочность бокситов.

Прочностные свойства бокситов существенно влияют не только на скорость и глубину фрезерования, износ резцов рабочего барабана и расход топлива, но и на технологию и организацию работы машин послойного фрезерования.

Исследованиям прочности бокситов и ее влияния на показатели работы машин послойного фрезерования посвящен целый ряд работ.

В работе Э.А. Карапетяна [85] приведены результаты исследований зависимости прочности бокситов от содержания SiO_2 . На основе этого исследования можно сделать вывод, что прочность бокситов зависит от содержания кремнезема. Чем выше процент кремнезема, тем прочнее порода (рисунок 1.18).

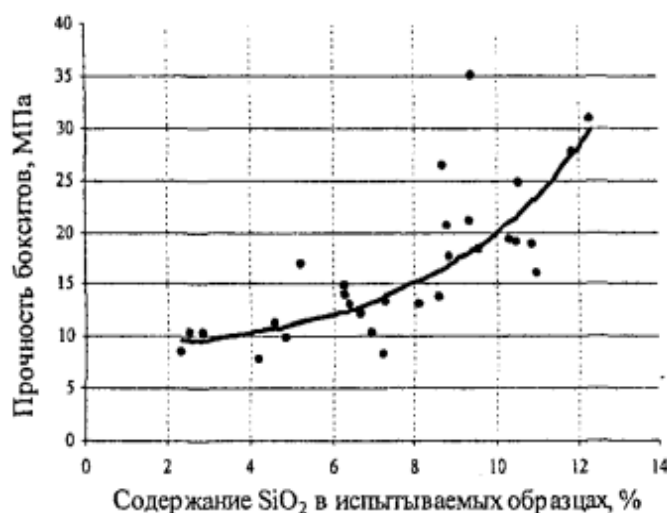


Рисунок 1.18 – График зависимости прочности бокситов от содержания SiO_2 [85]

В исследовании Э.А. Карапетяна [85] дано корреляционное уравнение, описывающее зависимость скорости фрезерования от прочности боксита, и представлен график зависимости скорости фрезерования от прочностных характеристик породы (рисунок 1.19).

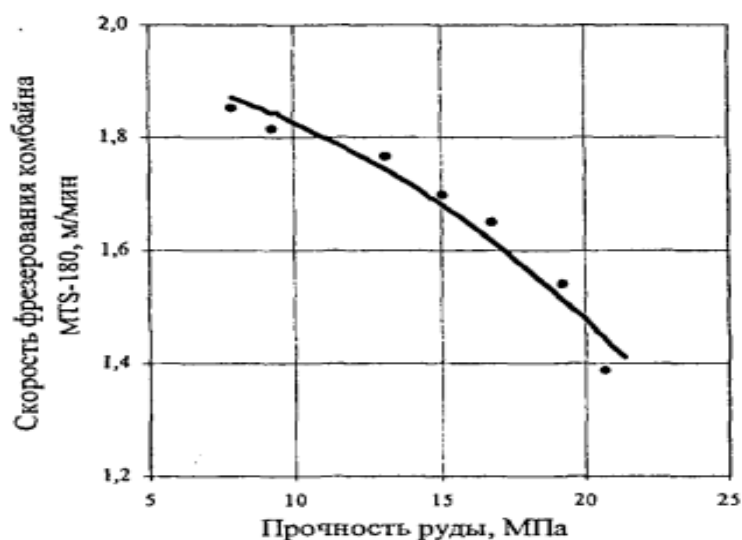


Рисунок 1.19 – Зависимости рабочей скорости комбайна от прочности боксита [85]

Из графика видно, что скорость фрезерования обратно пропорциональна прочности боксита. При увеличении прочности боксита скорость фрезерования уменьшается. Это связано с тем, что процесс послойного фрезерования требует больше силы резания и энергии для разрушения более твёрдых пород.

В работах [86–88] определена скорость фрезерования машин послойного фрезерования в зависимости от мощности машины и сопротивляемости резанию горных пород.

Изменение количества резцов, взаимодействующих с породой в процессе фрезерования, влияет на величину нагрузки на отдельный резец. Уменьшение количества резцов на барабане, взаимодействующих с породой, приводит к увеличению нагрузок на зубцы, что ускоряет износ резцов и может привести к аварийной ситуации. Изменение количества резцов, взаимодействующих с породой в процессе фрезерования, происходит в процессе изменения площади контакта барабана с поверхностью породы. При постоянных размерах барабана изменение площади контакта может происходить за счет изменения глубины фрезерования.

Глубина фрезерования – это параметр, который определяет, на какую глубину машина послойного фрезерования может эффективно разрушать породу

за один проход. Этот параметр зависит от прочности породы, а также от конструкции и мощности самой машины послойного фрезерования.

Более прочные бокситы требуют большей силы резания для фрезерования, что приводит к уменьшению глубины фрезерования. Это происходит потому, что резцы машины послойного фрезерования должны прилагать больше усилия для разрушения более прочных бокситов, что ограничивает их способность проникать глубоко в породу.

В своей работе W. Chenna [89] демонстрирует, что рабочая скорость фрезерования машины послойного фрезерования снижается с увеличением глубины фрезерования при различной крепости пород, даже при одинаковой скорости вращения барабана (рисунки 1.20–1.22). Это объясняется повышенным сопротивлением, оказываемым массивом.



Рисунок 1.20 – Зависимости рабочей скорости машины послойного фрезерования от глубины фрезерования при крепости $f=8$ [89]

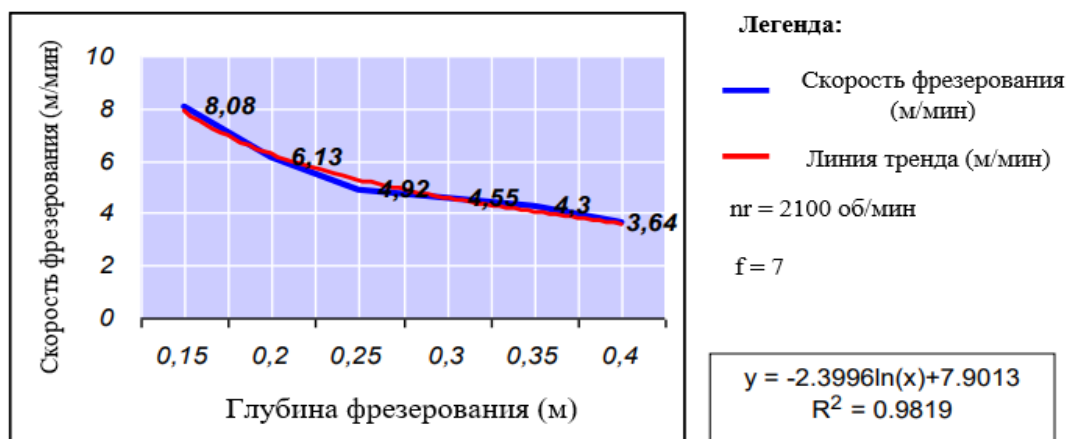


Рисунок 1.21 – Зависимости рабочей скорости машины послойного фрезерования от глубины фрезерования при крепости $f=7$ [89]

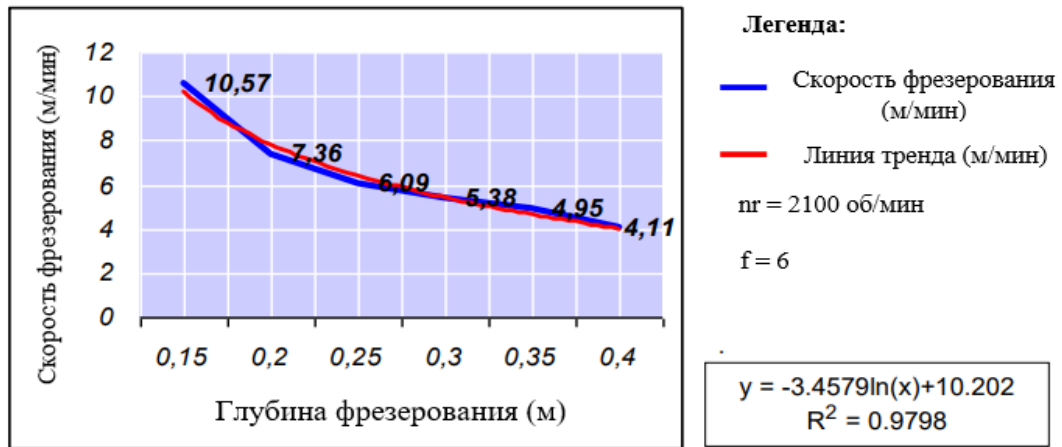


Рисунок 1.22 – Зависимости рабочей скорости машины послойного фрезерования от глубины фрезерования при крепости $f = 6$ [89]

В работе Ч. Кумара [90] представлен график для определения количества взаимодействующих с горной породой зубков (резцов), силы резания и скорости фрезерования при различных глубине фрезерования и пределе прочности породы (рисунок 1.23).

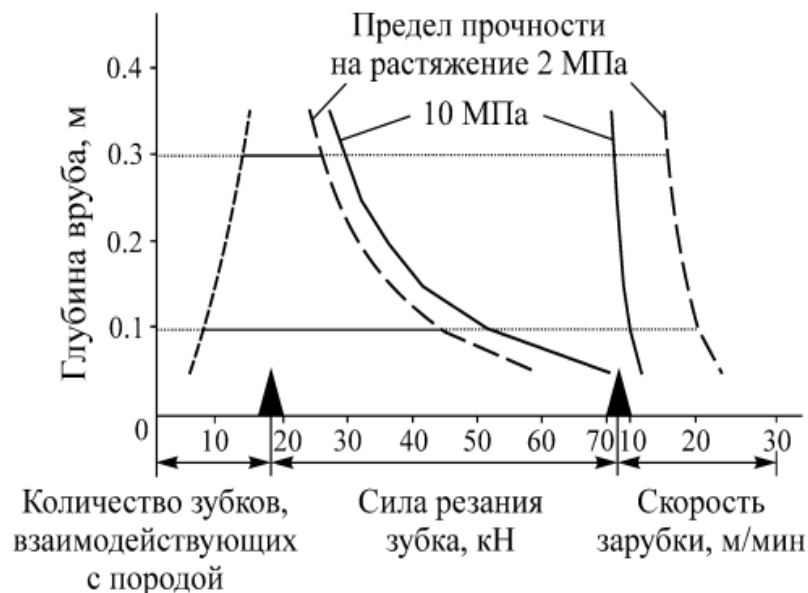


Рисунок 1.23 – График, отражающий скорость фрезерования, силу резания и количество зубков для установленной глубины фрезерования [90]

Из графика видно, что чем меньшее количество резцов взаимодействует с породой, тем больше будет сила резания для каждого резца, значение которой зависит от предела прочности на растяжение.

В работе Ч. Кумара [90] также представлен график зависимости скорости фрезерования и силы резания от прочности породы и при различной глубине фрезерования (рисунок 1.24).

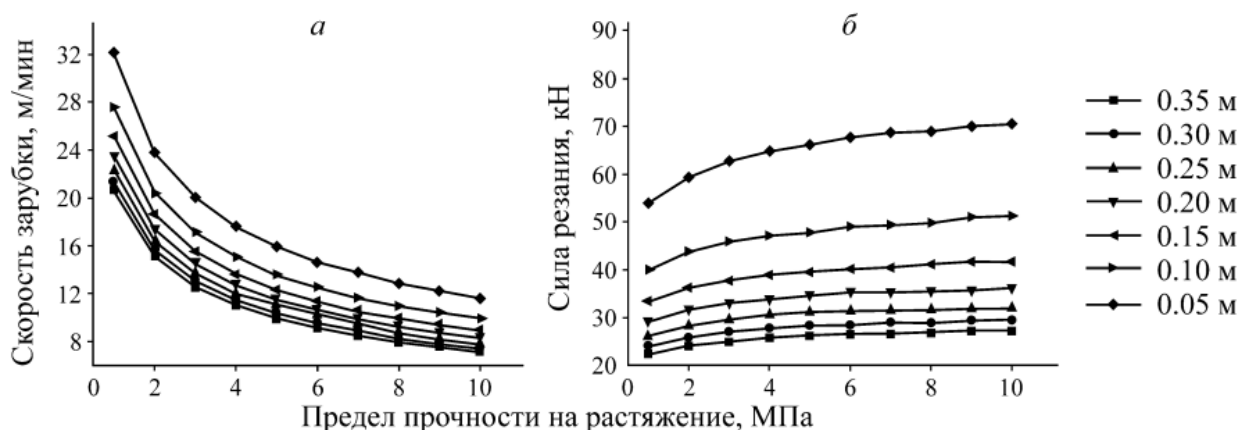


Рисунок 1.24 – График, отражающий скорость фрезерования (*а*) и силу резания (*б*) в зависимости от предела прочности породы и при различной глубине фрезерования [90]

Из графика видно, что скорость фрезерования машины послойного фрезерования обратно пропорциональна пределу прочности породы на растяжение.

С. Кумар в работе [91], основываясь на результатах экспериментов, разработал эмпирическую зависимость, учитывающую характеристики породы и параметры машины, для определения производительности:

$$П_{\text{ч}} = \frac{10,75P_0 \cdot b \cdot h + 225,88\sigma_c}{\sigma_c}, \quad (1.1)$$

где $П_{\text{ч}}$ – часовая производительность машины, т/ч; P_0 – мощность машины, кВт; b – ширина фрезерования, м; h – глубина фрезерования, м; σ_c – прочность пород, МПа.

Согласно формуле (1.1), чем больше прочность породы, тем меньше производительность машины послойного фрезерования.

В работе Э.А. Карапетяна [85] исследована зависимость скорости перемещения и производительности машины послойного фрезерования от глубины фрезерования (рисунок 1.25):

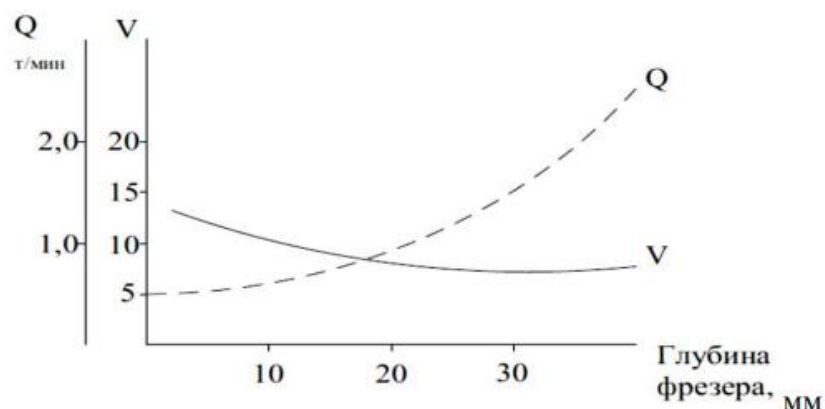


Рисунок 1.25 – Зависимость скорости перемещения и производительности комбайна от глубины фрезерования [85]

В работе Р. Amar [92] представлены результаты наблюдений на различных карьерах, согласно которым происходит увеличение расхода резцов с ростом производительности (рисунки 1.26 и 1.27).



Рисунок 1.26 – Соотношение между суточной производительностью машины послойного фрезерования и износом резцов [92]

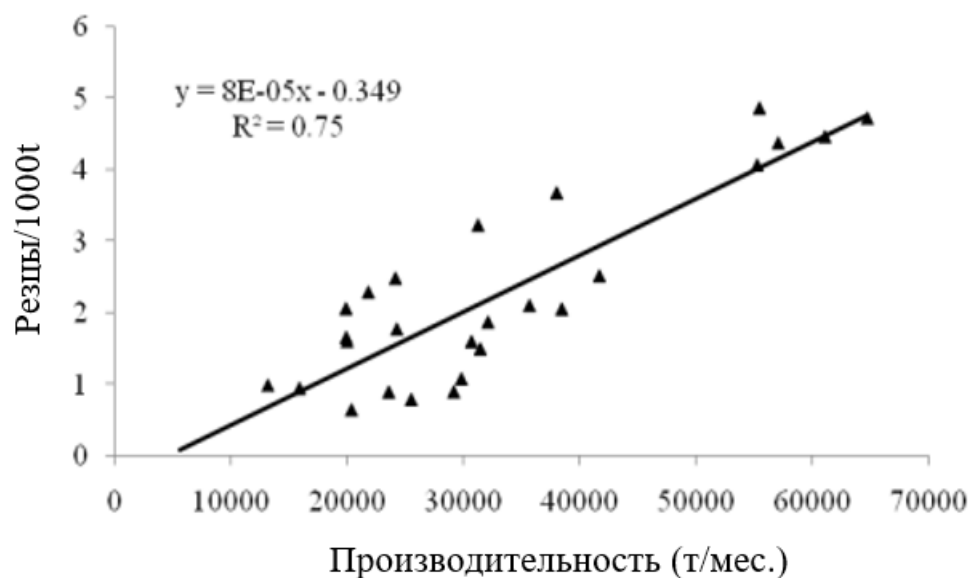


Рисунок 1.27 – Соотношение между месячной производительностью машины послойного фрезерования и износом резцов [92]

При работе с более прочными бокситами машины послойного фрезерования сталкиваются с увеличенным сопротивлением. Это может привести к необходимости уменьшения глубины фрезерования, чтобы избежать перегрузки машины и повышения износа режущих инструментов.

Поломка резцов обычно происходит, когда сила резания превышает прочность резцов при попытке увеличить добычу. Фактическая производительность для минимального расхода резцов должна определяться в зависимости от свойств породы. Неправильная синхронизация работы машины, а именно скорости фрезерования, оборотов в минуту и глубины фрезерования со свойствами породы часто приводит либо к поломке резца, либо к его износу [92].

В работе А. Prakash [93] на основе проведенных экспериментов построен график потребления резцов рабочего органа машины послойного фрезерования и график расхода топлива машины (рисунок 1.28). Автор в своем исследовании показал, что расход резца и дизельного топлива линейно зависят от производительности машины послойного фрезерования. Чем выше производительность машины послойного фрезерования, тем выше расход резца и дизельного топлива.

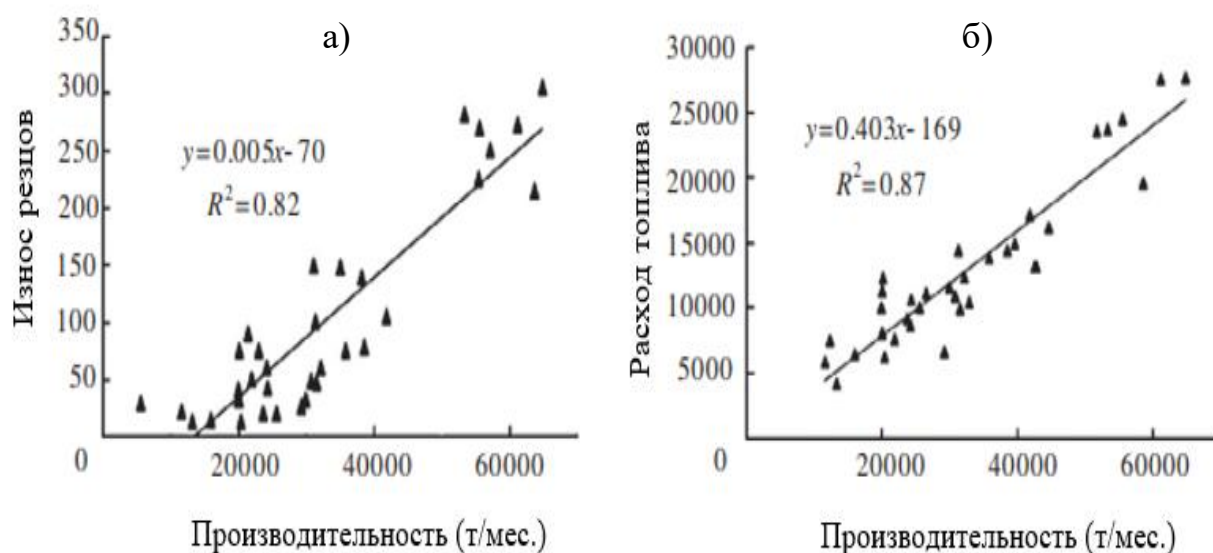


Рисунок 1.28 – График, отражающий износ резцов (а) и расход топлива (б) от месячной производительности [93]

При увеличении прочности бокситов возрастает и потребление энергии на их добычу, так как требуется больше топлива и ресурсов для выполнения работы.

Увеличение скорости и глубины резания машины послойного фрезерования для повышения производительности без учета прочности породы часто приводит к чрезмерному расходу резцов и дизельного топлива, вибрации машины, образованию пыли и т.д. [92–94]. Замена сломанных или изношенных резцов необходима для повышения эффективности резания, поскольку изношенные резцы шлифуют поверхность, а не режут. Производительность можно регулировать, контролируя скорость резания машины послойного фрезерования и глубину фрезерования с учетом прочностных свойств породы.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что при разработке бокситовых месторождений с помощью машин послойного фрезерования прочностные свойства бокситов оказывают значительное влияние на технологию и организацию работ и показатели работы машины.

Скорость фрезерования и производительность машины послойного фрезерования обратно пропорциональны прочности бокситов, а износ резцов рабочего органа и расход топлива пропорциональны прочности бокситов – и все

эти параметры зависят от глубины фрезерования и других факторов, таких как мощность машины и частота вращения рабочего барабана.

1.5 Анализ изменчивости прочностных свойств бокситовых месторождений

Изменчивость физико-механических свойств бокситов – это отклонения и колебания значений таких свойств, как прочность, плотность, пористость, ударная вязкость и другие параметры, которые могут наблюдаться в различных образцах бокситов. Другими словами, изменчивость физико-механических свойств бокситов обозначает изменение физических (плотность, пористость, влажность, структура, гранулометрия) и механических (прочность на сжатие, когезия, модуль упругости, твердость, поведение при разрушении) свойств бокситов от одной пробы к другой или в пределах одного и того же месторождения [95–98].

Эти свойства важны для выбора технологий добычи и переработки бокситов. Существенное изменение этих свойств приводит к неэффективности применения выбранных технологий. В данном исследовании особое внимание уделено прочностным свойствам, поскольку они оказывают значительное влияние на эффективность работы и производительность машины послойного фрезерования.

Прочностные свойства бокситов – это совокупность механических характеристик, которые определяют способность боксита выдерживать нагрузки без разрушения или необратимой деформации. Основополагающими характеристиками в большинстве исследований считаются пределы прочности при одноосном сжатии, одноосном растяжении и срезе со сжатием [99, 100].

Прочность бокситов может сильно изменяться не только от месторождения к месторождению, но даже в пределах одного и того же пласта. Эта изменчивость объясняется геологическими, минералогическими, структурными и экологическими факторами.

Прочностные свойства бокситов могут изменяться по ряду причин, включая [95,101–103]:

- **Геологическое происхождение:** бокситовые месторождения могут содержать слои боксита с различными минералогическими составами и структурой. В зависимости от условий образования состав бокситов может варьироваться, что, в свою очередь, влияет на его прочностные характеристики. В разных частях месторождения прочностные свойства бокситов могут значительно отличаться.

Бокситы образуются в очень разных геологических условиях: латеритные бокситы (тропические, пизолитические, пористые); карстовые бокситы (плотные, массивные, богатые беммитом/диаспором).

Условия образования определяют твердость, когезию и пористость, а значит, и прочностные свойства.

Бокситы могут содержать очень разные пропорции минералов: гиббсит ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – мягкий, обладает низкой прочностью; беммит ($\text{AlO}(\text{OH})$) – более твердый, средняя прочность; диаспор ($\text{AlO}(\text{OH})$) – очень твердый, высокая прочность; оксиды железа (гематит, гетит) повышают когезию; каолинит и глины значительно снижают прочность; кварц и анатаз локально изменяют твердость.

Чем больше в бокситах содержится твердых минералов (диаспора, гетита), тем выше их прочность.

- **Содержание примесей:** примеси, такие как оксиды железа, титана, силикатные минералы и другие компоненты, могут сильно влиять на прочность бокситов. Наличие таких примесей может как увеличивать, так и уменьшать прочностные характеристики.

- **Физические свойства:** на прочностные характеристики боксита также влияют пористость и плотность. Более пористые образцы часто имеют более низкую прочность из-за наличия пустот. Пористость является одним из основных факторов, объясняющих большую дисперсию значений прочности на сжатие бокситов.

На прочностные характеристики влияет содержание влаги. Вода снижает прочность бокситов путем: уменьшения когезии; увеличения межклеточного

давления, способствования распаду пизолитов. Изменение уровня грунтовых вод может приводить к изменению прочности бокситов.

- **Степень выветривания:** процесс выветривания влияет на изменение структуры и прочностных свойств бокситов. Чем сильнее выветривание, тем ниже прочность на сжатие. Разные участки месторождения бокситов могут сильно отличаться по степени выветривания, что создает изменчивость прочностных свойств.

- **Структура и текстура:** бокситы могут быть: пизолитическими (округлые формы со слабой связью); массивными (компактная, когезивная структура); вакуолярными (многочисленные полости); ламинированными или брекчиковыми.

Пизолитические и вакуолярные бокситы имеют гораздо меньшую прочность, чем массивные карстовые бокситы.

- **Геоморфологические условия:** местоположение бокситового месторождения (например, горные, равнинные или холмистые районы) может влиять на его стабильность и прочность.

- **Климатические условия:** условия окружающей среды, такие как температурные колебания и климатические условия (например, осадки), могут влиять на физическую структуру и прочностные свойства бокситов.

На сегодняшний день существуют несколько классификаций изменчивости прочностных свойств горных пород. Для анализа изменчивости месторождений бокситов была принята классификация по пространственному фактору. Согласно данной классификации, существует [104, 105]:

- **Горизонтальная изменчивость:** отличия в прочности бокситов в пределах одного горизонта или слоя.

- **Вертикальная изменчивость:** различия в прочности бокситов на различных глубинах месторождения.

Анализ позволил выявить достаточно большую группу месторождения бокситов с высокой изменчивостью. Изменения прочности бокситов ряда месторождений из данной группы приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Бокситовые месторождения, обладающие изменчивостью прочности пород (Анализ открытых литературных источников, проведённый автором.)

Бокситовые месторождения	Тип	Диапазон прочности на сжатие, МПа
СУБР (Россия)	Карстовый	20–120
Парнас (Греция)	Карстовый	5–90
Халимба (Венгрия)	Карстовый	10–70
Сангареди (Гвинея)	Латеритный	3–60
Киндия (Гвинея)	Латеритный	20– 90
Шаньси (Китай)	Карстовый	36–134
Шахта Голбини-Джаджарм (Иран)	Карстовый	5–70
Дарлинг-Рейндж (Западная Австралия)	Латеритный	5–90
Посудье (Босния и Герцеговина)	Карстовый	20–120
Заград, Никшич (Черногория)	Карстовый	15–80
Букит-Го (Малайзия)	Латеритный	5–55
Качх, Гуджарат (Индия)	Переотложенный	35–80
Чхаттисгарх / Мадхья-Прадеш (Индия)	Карстовый	40–90
Джаркханд (Ранчи, Лохардага) (Индия)	Латеритный	45–85

В качестве объекта для более детального исследования изменения прочности пород бокситового месторождения и влияния этой изменчивости на показатели работы машин послойного фрезерования и применяемого комплекса оборудования в целом было выбрано месторождение «Балая», расположенное в Республике Гвинея.

Для анализа изменения прочности бокситов были собраны пробы с трех участков месторождения бокситов «Балая» и проведены лабораторные испытания. На каждом из участков было взято по 15 проб. Для отбора проб применялся метод поверхностного отбора с видимых геологических обнажений на поверхности земли. Глубина отбора – до 30 см.

С целью определения горизонтальной изменчивости отбор проб осуществлялся в пределах одного фрезеруемого слоя.

Значения предела прочности при одноосном сжатии, полученные в результате исследований, приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения предела прочности при одноосном сжатии [94]

Предел прочности при одноосном сжатии (МПа)		
Участок 1	Участок 2	Участок 3
43	35	50
52	52	45
45	40	41
54	45	30
40	38	55
58	53	43
44	45	35
70	54	56
57	46	60
63	61	65
45	58	47
56	67	52
41	55	40
55	42	58
42	50	44

Были проведены расчеты для анализа изменения прочности бокситов [94]:

Среднее значение прочности $\sigma_{\text{ср}}$:

Участок 1:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_n}{n} = \frac{43+52+45+\dots+55+42}{15} = 51 \text{ МПа.} \quad (1.2)$$

Участок 2:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_n}{n} = \frac{35+52+40+\dots+42+50}{15} = 49,4 \text{ МПа.} \quad (1.3)$$

Участок 3:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_n}{n} = \frac{50 + 45 + 41 + \dots + 58 + 44}{15} = 48 \text{ МПа.} \quad (1.4)$$

Стандартное отклонение σ :

Участок 1:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_n - \sigma_{cp})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(43-51)^2 + \dots + (42-51)^2}{15-1}} = 8,98 \text{ МПа.} \quad (1.5)$$

Участок 2:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_n - \sigma_{cp})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(35-49,4)^2 + \dots + (50-49,4)^2}{15-1}} = 8,95 \text{ МПа.} \quad (1.6)$$

Участок 3:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_n - \sigma_{cp})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(50-48)^2 + \dots + (44-48)^2}{15-1}} = 9,72 \text{ МПа.} \quad (1.7)$$

Коэффициент вариации CV :

Участок 1:

$$CV = \frac{\sigma}{\sigma_{cp}} \times 100 = \frac{8,976}{51} \times 100 = 17,6\%. \quad (1.8)$$

Участок 2:

$$CV = \frac{\sigma}{\sigma_{cp}} \times 100 = \frac{8,95}{49,4} \times 100 = 18,12\%. \quad (1.9)$$

Участок 3:

$$CV = \frac{\sigma}{\sigma_{cp}} \times 100 = \frac{9,72}{48} \times 100 = 20,22\%. \quad (1.10)$$

В соответствии с приведенными результатами на изученных участках стандартное отклонение достигает 9,72 МПа при коэффициенте корреляции 20,22% [94].

Анализ результатов расчетов позволяет сделать вывод, что на месторождении бокситов «Балая» существуют участки, где прочностные свойства бокситов на небольших площадях существенно изменяются, так как диапазоны изменения прочности бокситов относительно среднего значения на этих площадях являются значительными [106,107].

При разработке таких участков с применением машин послойного фрезерования в результате разной глубины фрезерования пород различной прочности в пределах слоя на поверхности формируются неровности.

Выводы по первой главе и постановка задач исследования

1) В результате анализа опыта применения машин послойного фрезерования, а также анализа научных исследований, связанных с изучением влияния прочностных свойств горных пород на технологию, организацию и показатели работы машин послойного фрезерования выявлена актуальность научной задачи установления закономерностей формирования структуры комплекса оборудования и параметров технологических схем при применении машин послойного фрезерования в условиях пространственной изменчивости горных пород.

2) Для достижения цели работы поставлены следующие задачи исследования:

- анализ опыта применения машин послойного фрезерования при разработке горных пород в различных горно-геологических условиях;
- анализ научных исследований, связанных с изучением влияния прочностных свойств горных пород на технологию, организацию и показатели работы машин послойного фрезерования;

- изучение влияния неровностей и их параметров на безопасность движения и показатели работы автосамосвалов;
- установление аналитических зависимостей для расчета производительности машин послойного фрезерования, учитывающих факторы, связанные с повторным фрезерованием неровностей на поверхности слоя блока отработки;
- разработка математической модели фрезерования блока участка месторождения для определения технической и эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования и эксплуатационной производительности выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования в целом;
- установление закономерностей формирования структуры выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования и параметров технологических схем при применении машин послойного фрезерования, автосамосвалов и погрузчиков;
- разработка алгоритма выбора технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования.

2 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ И ИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАБОТУ АВТОСАМОСВАЛОВ

2.1 Виды неровностей, образующихся на поверхности блока при фрезеровании бокситов с изменчивостью прочности пород машинами послойного фрезерования, и их оценка

Отработка бокситов машинами послойного фрезерования осуществляется слоями и для нормального функционирования горнотранспортного оборудования требуется, чтобы поверхность каждого слоя оставалась ровной. При равномерной прочности бокситов глубина фрезерования сохраняется постоянной, и машина послойного фрезерования формирует ровную горизонтальную площадку.

Однако в случае резких изменений прочности бокситов в пределах обрабатываемого блока глубина фрезерования варьируется, что приводит к образованию на поверхности неровностей [94].

В целом понятие неровной поверхности применяется в различных областях, например, согласно стандарту ISO 25178-2 [108] поверхность имеет неровности, если ее топография содержит измеримые отклонения в высоте, текстуре или форме по отношению к номинальной поверхности. Схожие с ними определения изложены в стандартах ISO 16610-1 [109] и ISO 21920-2 [110].

Движение автосамосвалов, транспортирующих добытое полезное ископаемое, осуществляется по поверхности блока. В качестве терминологической и методической основы для описания и оценки неровностей были использованы понятия и подходы, применяемые в стандартах для автомобильных дорог. Целый ряд понятий, связанных с качеством дорожных покрытий, определен в стандарте ГОСТ 32825 [111]. Согласно стандартам неровной называется любая поверхность, которая на одном или нескольких уровнях наблюдения имеет геометрические разрывы, неравномерные изменения или отсутствие дифференциальной регулярности, что приводит к измеримому отклонению от идеальной, гладкой или заданной поверхности.

Исследования неровных поверхностей проводятся в различных областях деятельности, например: математике, компьютерной графике, архитектуре, гражданском строительстве, физике, механике, геологии, геоморфологии, медицине, материаловедении, металлургии и т. д.

В области автомобильного транспорта исследованием неровных поверхностей занималось большое количество специалистов и ученых. В работе L. Rapino [112] неровность рассматривается как измеримая геометрия поверхности (высотный профиль), которая влияет на динамику шины. Автор использует данные профиля для воссоздания топографии дороги. Это определение напрямую связывает неровность с механическими эффектами (вибрация, контакт) и моделирует ее влияние на шины с помощью моделей конечных элементов. В работе A. Douglas [113] неровная поверхность определяется как то, что генерирует измеримые вибрации в автомобиле, влияя на решения по техническому обслуживанию. В работе S. Richardson [114] неровность определяется как измеримый фактор, влияющий на «сопротивление качению» и потерю энергии. В этой работе неровность дороги связывается с расходом топлива грузовиков. Автор утверждает, что «неровность» – это не просто недостаток, а стратегический параметр, который можно измерить и оптимизировать.

Относительно уровня поверхности фрезеруемого участка высотная отметка неровности может быть выше или ниже.

Устранение неровности ниже уровня поверхности производится бульдозером путем ее засыпки породой (щебнем). Устранение неровностей выше уровня поверхности осуществляется машиной послойного фрезерования.

В данном исследовании неровность выше уровня поверхности, образовавшаяся в результате фрезерования горных пород машинами послойного фрезерования, высота которой не обеспечивает безопасное движение или изменяет скоростной режим движения автосамосвалов, далее будет называться бугром.

При фрезеровании участка с изменчивостью прочности пород после прохода машины послойного фрезерования образуются два вида бугров (рисунок 2.1):

- бугры в полосе фрезерования;

- бугры в смежных заходках (полосах фрезерования).

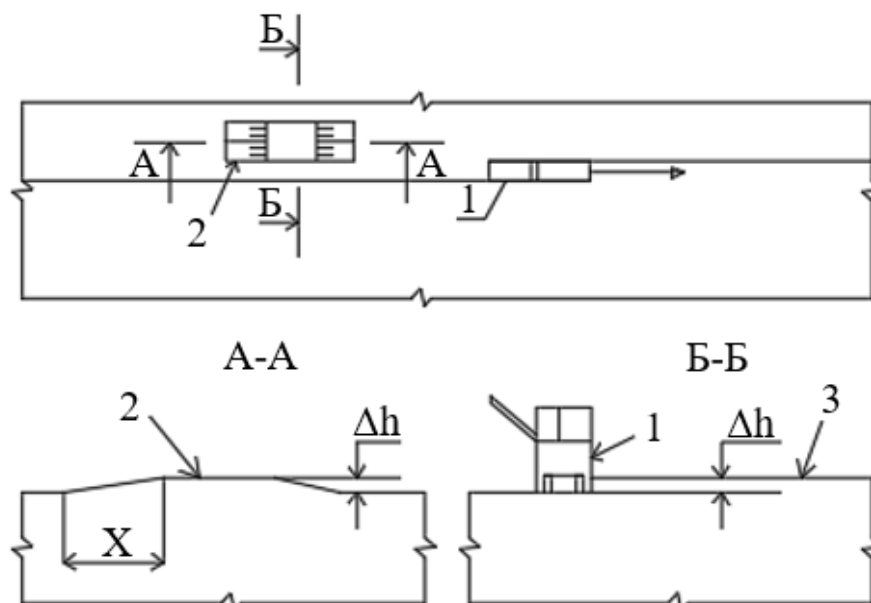


Рисунок 2.1 – Виды неровностей (бугров):

- 1 – машина послойного фрезерования; 2 – бугор в полосе фрезерования;
 3 – бугор в смежных полосах фрезерования; Δh – перепад высоты;
 X – заложение откоса бугра

Значения перепада высоты и заложение откоса бугра изменяются в зависимости от изменчивости прочности породы, и эти значения определяют различные формы, которые могут иметь бугры.

В рамках данного исследования были собраны данные о показателях работы машин послойного фрезерования на месторождении бокситов «Балая», на блоках участка месторождения со значительной изменчивостью прочности породы и параметрах формирующихся на поверхностях этих блоков неровностей.

Для отработки месторождения используются машины послойного фрезерования фирмы Wirtgen марки 2200 SM.

Данные о глубине и скорости фрезерования пород различной прочности машиной послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM представлены в таблице 2.1. Данные сгруппированы по интервалам значений прочности боксита, в пределах которых фрезерование осуществляется с одинаковой скоростью и глубиной.

Таблица 2.1 – Значения скорости и глубины фрезерования машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM в зависимости от прочности бокситов

Прочность бокситов, МПа	0–50	50–55	55–60	60–65	65–70	70 <
Скорость фрезерования, м/мин	15	13	10	8	6	4
Глубина фрезерования, см	20	17	15	12	8	5

Значение Δh , м, рассчитывалось по следующей формуле:

$$\Delta h = |h_1 - h_2|, \quad (2.1)$$

где h_1 и h_2 – глубина фрезерования пород до и после изменения соответственно, м.

Значение X , м, для машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM предложено рассчитывать по следующим эмпирическим формулам:

- при поднимании барабана:

$$X = \frac{\Delta h \cdot 0,33 \cdot V_{\phi}}{20}, \quad (2.2)$$

где V_{ϕ} – скорость фрезерования, м/мин.

- при опускании барабана:

$$X = \frac{\Delta h \cdot 0,5 \cdot V_{\phi}}{20}. \quad (2.3)$$

Значения перепада высоты и расстояния, пройденного между точкой, в которой машина послойного фрезерования начинает изменять глубину, и точкой, в которой машина достигает желаемой глубины (заложение откоса уступа), для различных вариантов изменения прочности в процессе фрезерования представлены в таблице 2.2. В строках таблицы указана прочность бокситов в точке начала

изменения глубины фрезерования. В столбцах таблицы указана прочность бокситов в точке завершения изменения глубины фрезерования.

Таблица 2.2 – Значения Δh и X при различных вариантах изменения глубины фрезерования пород в связи с изменчивостью прочности пород в полосе фрезерования

Прочность бокситов, МПа / Прочность бокситов, МПа	0–50	50–55	55–60	60–65	65–70	>70
0–50	$\frac{0^*}{0}$	$\frac{3}{0,65}$	$\frac{5}{0,83}$	$\frac{8}{1}$	$\frac{12}{1,2}$	$\frac{15}{1}$
50–55	$\frac{3}{1,13}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{2}{0,33}$	$\frac{5}{0,66}$	$\frac{9}{0,89}$	$\frac{12}{0,79}$
55–60	$\frac{5}{1,88}$	$\frac{2}{0,65}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{3}{0,40}$	$\frac{7}{0,69}$	$\frac{10}{0,66}$
60–65	$\frac{8}{3}$	$\frac{5}{1,63}$	$\frac{3}{0,75}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{4}{0,4}$	$\frac{7}{0,46}$
65–70	$\frac{12}{4,5}$	$\frac{9}{2,93}$	$\frac{7}{1,75}$	$\frac{4}{0,8}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{3}{0,2}$
>70	$\frac{15}{5,6}$	$\frac{12}{3,9}$	$\frac{10}{2,5}$	$\frac{7}{1,4}$	$\frac{3}{0,45}$	$\frac{0}{0}$

* В числителе приведены значения Δh в сантиметрах, в знаменателе – X в метрах.

При фрезеровании близких по прочностным характеристикам пород величина Δh постоянна. Изменение величины Δh в полосе фрезерования свидетельствует о том, что осуществлялось фрезерование пород с другой прочностью. Частое изменение Δh свидетельствует о высокой изменчивости прочности пород в полосе фрезерования.

Существует несколько способов измерения величины неровности. Для измерения неровностей используют: лазерные сканеры, дорожные профилографы, лидары, нивелиры, рейки, линейки, рулетки и т. д.

В данном исследовании для измерения размеров бугров использовалась трехметровая рейка. В качестве методологической основы был взят способ измерения, изложенный в стандарте ГОСТ 32825.

Принципиальные схемы проведения замеров размеров бугров различной формы представлены на рисунках 2.2, 2.3.

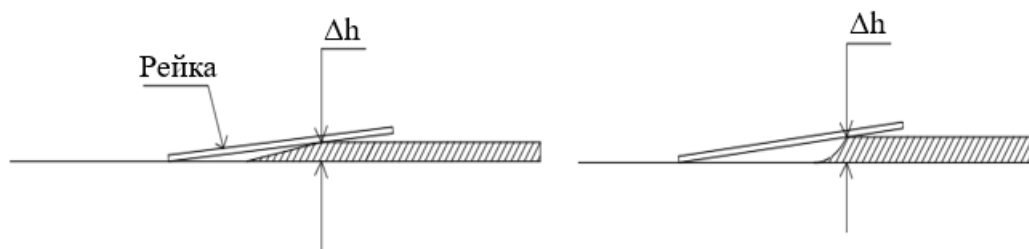


Рисунок 2.2 – Схема проведения измерений размеров бугра, образовавшегося в полосе фрезерования

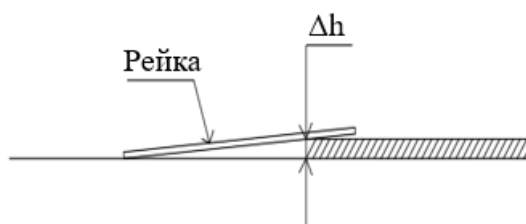


Рисунок 2.3 – Схема проведения измерений размеров бугра, образовавшегося в смежных заходках (полосах фрезерования)

2.2 Организация работы автомобильного транспорта и режим движения автосамосвалов

Организация работы автосамосвалов, обеспечивающих транспортировку добытого полезного ископаемого при применении машин послойного фрезерования, является важным вопросом при решении задачи повышения эффективности производственного процесса.

Движение автосамосвалов должно быть организовано таким образом, чтобы обеспечить максимальную синхронизацию с работой машины послойного фрезерования, избежать простоев, оптимизировать транспортные циклы, уменьшить затраты на единицу добытой массы, повысить производительность и соблюсти требования промышленной безопасности. Транспортный цикл включает несколько элементов: маневрирование (позиционирование) в зоне погрузки, непосредственная погрузка, движение к месту разгрузки, разгрузка и возвращение к машине послойного фрезерования.

Для обеспечения рациональной (максимальной) производительности машины послойного фрезерования требуется минимизировать затраты времени на его простои, для это необходимо: определить количество автосамосвалов, обеспечивающих непрерывную работу машины послойного фрезерования, организовать систему сигналов и диспетчерского управления, обеспечивающую точную координацию между комбайном и автосамосвалами, предусмотреть зоны ожидания и разворота, а также пути объезда на случай вынужденной остановки техники.

Состояние дорог в карьере может существенно повлиять на работу автосамосвалов, поэтому качество дорожного покрытия при работе автосамосвалов является важным вопросом для оптимизации работы автосамосвалов.

В работе А.Г. Журавлёва и др. [115] описан методический подход к оптимизации конструкции (толщины) дорожных одежд и определен экономический эффект от улучшения состояния автодорог. В работе Ю. И. Леля и др. [116] дана оценка роли дорожно-транспортных условий карьеров, приведён анализ влияния этих условий на показатели эксплуатации карьерного транспорта и предложены основные направления совершенствования дорожных условий в карьерах. В исследовании М. И. Ахметовой [117] установлены взаимосвязи прочности и долговечности несущих металлоконструкций большегрузных карьерных автосамосвалов с учётом горнотехнических характеристик отгружаемой взорванной горной массы, качества карьерных дорог. Выявлены факторы, влияющие на долговечность металлоконструкций автосамосвалов. Также

предложена комплексная оценка прогнозирования и планирования показателей качества эксплуатации карьерных автосамосвалов, что позволяет повысить эффективность их использования. В исследовании А.Г. Колчанова [118], посвящённом работе автономных самосвалов в карьерах, рассматриваются требования к геометрическим параметрам дорог, ровности проезжей части и конструкции дорожной одежды. Несоблюдение этих требований может привести к возникновению дорожно-транспортных происшествий, нарушению работы бортовой системы управления автомобилем, потерям связи с диспетчером карьера, что вызовет остановку движения самосвалов и снижение производительности.

По мнению Р. Bodziony [119], некачественное покрытие (неровности, дефекты, шероховатость, ямы, выбоины, волны, колеи) вызывает значительные ударные нагрузки на автосамосвалы: шасси, подвеску, шины, трансмиссию, что сокращает срок службы компонентов, увеличивает расходы на техническое обслуживание и даже приводит к серьёзным поломкам. Эти неровности увеличивают сопротивление качению, что приводит к чрезмерному расходу топлива, снижению производительности (увеличению времени рейса) и преждевременному износу шин. В работе В. Luan и др. [120] предложена методология классификации дорог по энергоэффективности: используя данные лидара для анализа неровности дорог и международный индекс неровности (IRI) для количественной оценки качества, авторы устанавливают линейную зависимость между IRI и расходом топлива для автосамосвалов с грузом и без груза. Они определяют пороговые значения IRI для классификации дорог по качеству: «хорошее», «среднее» или «плохое». Они показывают, что улучшение дороги с «плохого» до «среднего» качества позволяет снизить расход топлива.

Исследования в области здоровья и эргономики операторов автосамосвалов показывают, что плохое качество дорог, вызывающее вибрацию, приводит к эргономическим рискам для водителя (усталость, дискомфорт), что является дополнительным аргументом в пользу поддержания ровных поверхностей [113].

Приведенные результаты исследований подтверждают важность качества дорог для повышения эффективности добычи, обеспечения безопасности работ, увеличения срока службы оборудования и снижения эксплуатационных затрат.

При организации работы автосамосвалов на блоках со значительной изменчивостью прочности бокситов необходимо уделять особое внимание образованию бугров после прохода машины послойного фрезерования.

Результаты исследований движения автосамосвалов Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ на месторождении бокситов «Балая» позволили выделить два режима движения, обеспечивающие наибольшую эффективность и безопасность работы транспорта.

Наличие бугров высотой до 5 см в полосе фрезерования при движении по ним автосамосвалов Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ не оказывает существенного воздействия на безопасность движения и показатели работы автосамосвалов. В данных условиях скорость движения порожнего автосамосвала 30 км/ч, груженого – 20 км/ч. Это основной (первый) режим движения автосамосвалов.

При высоте бугров от 5 до 15 см ранее указанным условиям соответствует скорость 10 км/ч. Это второй режим движения автосамосвалов.

При высоте бугров 15 см и более автосамосвалам запрещается двигаться по таким буграм в целях безопасности, предотвращения несчастных случаев, чтобы избежать износа шин и серьезных поломок. Выступающие бугры необходимо повторно фрезеровать для обеспечения движения автосамосвалов, что приводит к увеличению времени отработки слоя блока и потере производительности машины послойного фрезерования.

В местах, где необходимо соблюдать ограничение скорости до 10 км/ч, а также в местах, где движение автосамосвалов запрещено, устанавливаются указательные знаки.

На предприятии реализован следующий алгоритм выбора режима движения автосамосвалов Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ при отработке блоков со значительной изменчивостью прочности бокситов (рисунок 2.4).

Бугры, движение по которым автосамосвалам запрещено, необходимо срезать машиной послойного фрезерования. Повторное фрезерование бугров увеличивает время отработки слоя блока и приводит к потере производительности машины послойного фрезерования [94].

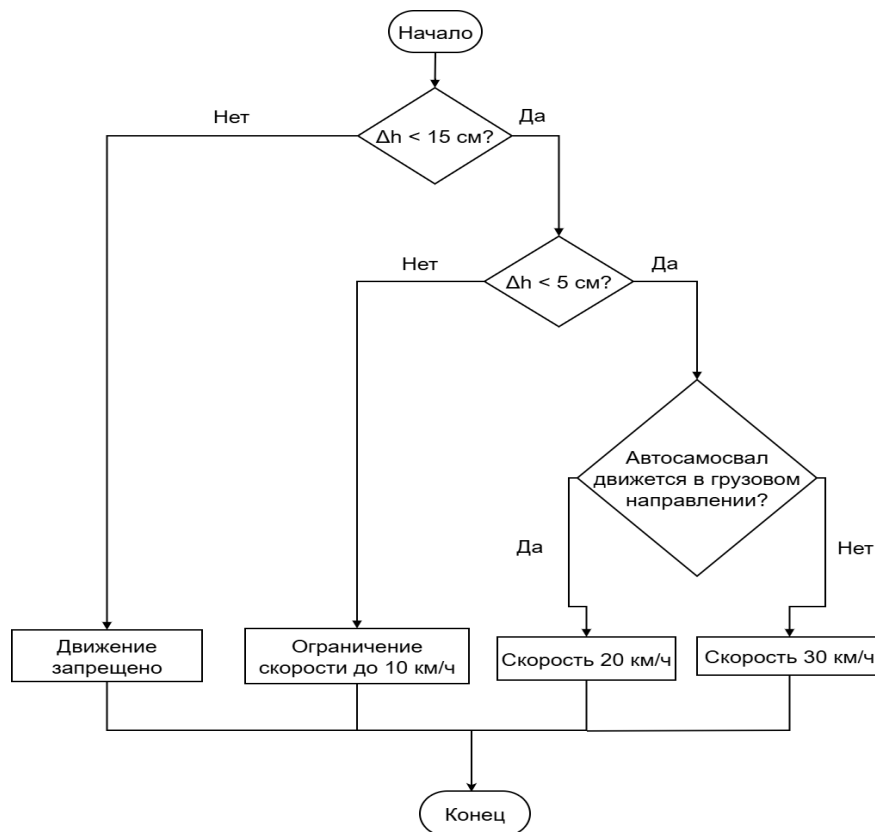


Рисунок 2.4 – Алгоритм выбора режима движения автосамосвалов Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ

2.3 Исследование влияния формы поверхности блока на технологические показатели работы автосамосвалов

Наличие бугров на поверхности обрабатываемого блока оказывает существенное влияние на показатели работы автосамосвалов, особенно на их скорость движения.

Для исследования влияния формы поверхности блока на время рейса автосамосвала были установлены эмпирические зависимости для скорости и времени движения автосамосвалов при различных режимах движения.

Средняя скорость движения автосамосвала в пределах блока определяется с учетом расстояния, проезжаемого со сниженной скоростью из-за бугров.

Формула для определения этой средней скорости имеет следующий вид, км/ч:

$$V_{\text{ср}}^{\text{бл}} = \frac{L_{\text{б}}}{\frac{L_{\text{ог}}}{V_{\text{ог}}} + \frac{(L_{\text{б}} - L_{\text{ог}})}{V_{\text{ср}}^{\text{дв}}}}, \quad (2.4)$$

где $L_{\text{б}}$ – длина блока, км; $L_{\text{ог}}$ – расстояние, проезжаемое со сниженной скоростью, км; $V_{\text{ог}}$ – скорость движения на участках с неровностями при втором режиме движения, км/ч; $V_{\text{ср}}^{\text{дв}}$ – средняя скорость движения автосамосвала при основном (первом) режиме движения, км/ч.

Были выполнены расчеты времени рейса автосамосвала с учетом его движения по поверхности обрабатываемого блока при различных вариантах ее формы.

Для автосамосвалов Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ скорость движения на участках с неровностями (второй режим движения) равна 10 км/ч (при высоте бугров от 5 до 15 см) и средняя скорость движения автосамосвала при основном (первом) режиме движения равна 24 км/ч (при высоте неровностей от 0 до 5 см). При этом скорость движения порожнего автосамосвала 30 км/ч, груженого – 20 км/ч.

Результаты расчетов средней скорости движения автосамосвала в пределах блока с учетом расстояния, проезжаемого со сниженной скоростью из-за бугров, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения средней скорости движения автосамосвала в пределах блока с учетом расстояния, проезжаемого со сниженной скоростью из-за бугров при различных длинах блока

Показатели	Средняя скорость, км/ч		
Расстояние движения по участку с неровностями, м	Длина блока 300 м	Длина блока 500 м	Длина блока 1000 м
50	19,46	21,05	22,43
100	16,36	18,75	21,05
150	14,12	16,9	19,83
200	12,41	15,38	18,75

График зависимости средней скорости движения автосамосвала в пределах блока от расстояния, проезжаемого со сниженной скоростью из-за бугров, для разных длин блока представлен на рисунке 2.5.

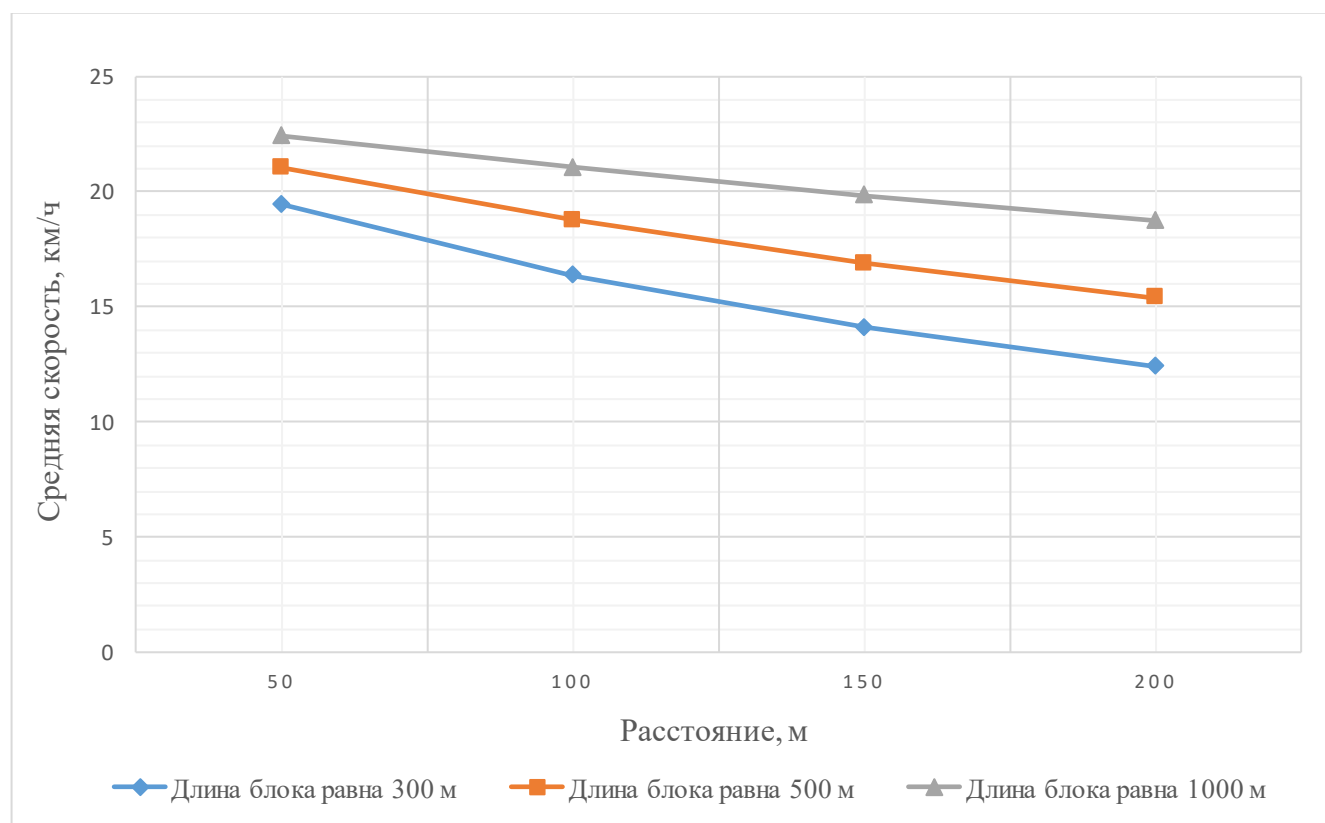


Рисунок 2.5 – График зависимости средней скорости движения автосамосвала в пределах блока от расстояния, проезжаемого со сниженной скоростью из-за бугров, для разных длин блока

Для моделирования работы автотранспорта был предложен показатель, учитывающий протяженность участков движения со сниженной скоростью, который позволяет определять среднюю скорость движения автосамосвала в пределах блока.

Показатель, учитывающий протяженность участков движения со сниженной скоростью, определялся по формуле:

$$П_{\text{сос}} = \frac{L_{\text{ог}}}{L_{\text{б}}} . \quad (2.5)$$

Значения показателя $П_{\text{сос}}$ варьируются от 0 до 1. Он равен 0, когда движение самосвала по поверхности блока осуществляется без снижения скорости. Если весь указанный путь из-за наличия бугров самосвал преодолевает со сниженной скоростью $П_{\text{сос}} = 1$.

Определение средней скорости движения автосамосвала в пределах блока в зависимости от показателя, учитывающего протяженность участков движения со сниженной скоростью, осуществлялось по следующей формуле, км/ч:

$$V_{\text{ср}}^{\text{бл}} = \frac{1}{\frac{П_{\text{сос}}}{V_{\text{ог}}} + \frac{(1 - П_{\text{сос}})}{V_{\text{ср}}^{\text{дв}}}} . \quad (2.6)$$

Значения средней скорости движения автосамосвала в пределах блока в зависимости от показателя $П_{\text{сос}}$ для ранее указанных условий представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения средней скорости движения автосамосвала в пределах блока в зависимости от показателя $P_{\text{сос}}$

Показатель $P_{\text{сос}}$	Средняя скорость, км/ч
0,1	21,05
0,2	18,75
0,3	16,90
0,4	15,38
0,5	14,12
0,6	13,04
0,7	12,12
0,8	11,32
0,9	10,62

График зависимости средней скорости движения автосамосвала в пределах блока от показателя $P_{\text{сос}}$ для указанных ранее условий представлен на рисунке 2.6.

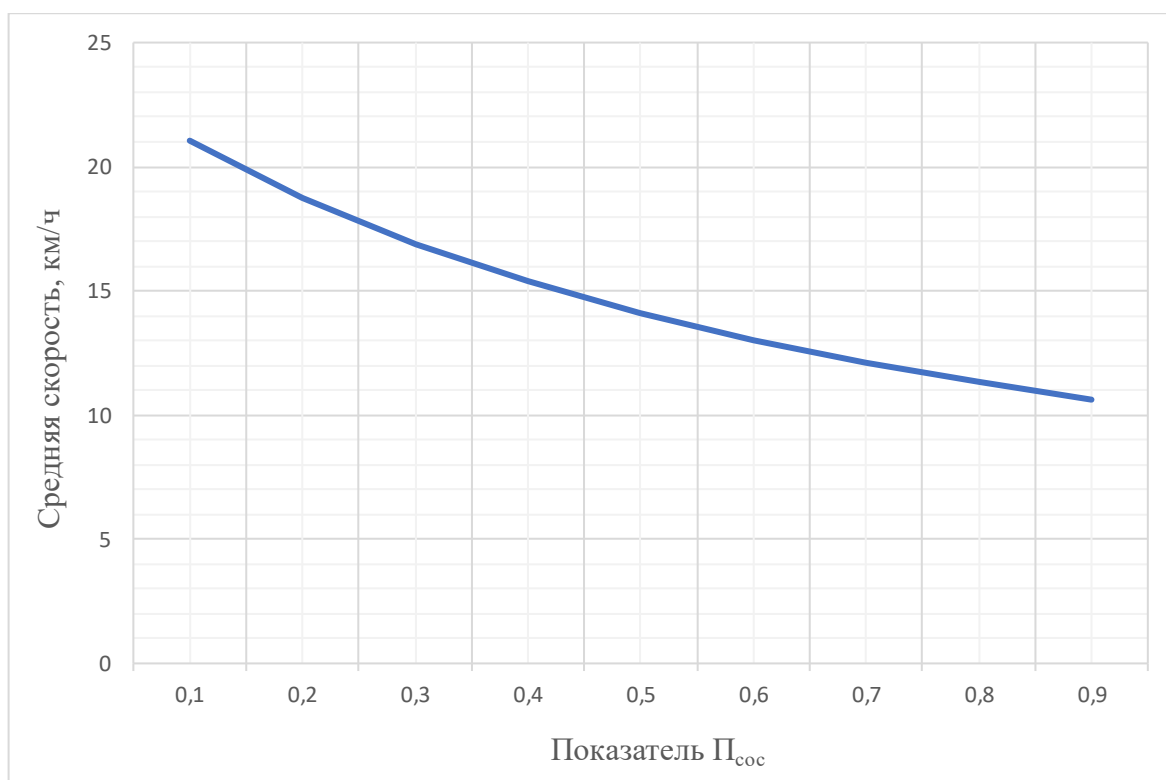


Рисунок 2.6 – График зависимости средней скорости движения автосамосвала в пределах блока от показателя $P_{\text{сос}}$

Время движения автосамосвала определялось по формуле, мин:

$$T_{\text{дв}} = 60 \cdot K_P \cdot \left(2 \cdot \frac{L_{TP}}{V_{\text{ср}}^{\text{тр}}} + \frac{L_6}{V_{\text{ср}}^{\text{бл}}} \right), \quad (2.7)$$

где K_P – коэффициент, учитывающий разгон и торможение машины; L_{TP} – расстояние транспортирования, км; $V_{\text{ср}}^{\text{тр}}$ – средняя скорость движения автосамосвала до места разгрузки, км/ч.

Значения времени движения автосамосвала в зависимости от показателя $\Pi_{\text{сос}}$ для указанных ранее условий представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Значения времени движения автосамосвала в зависимости от показателя $\Pi_{\text{сос}}$

Показатель $\Pi_{\text{сос}}$	Время движения, мин
0,1	39,93
0,2	40,1
0,3	40,28
0,4	40,45
0,5	40,63
0,6	40,8
0,7	40,98
0,8	41,15
0,9	41,33

График зависимости времени движения автосамосвала от показателя $\Pi_{\text{сос}}$ для указанных ранее условий представлен на рисунке 2.7.

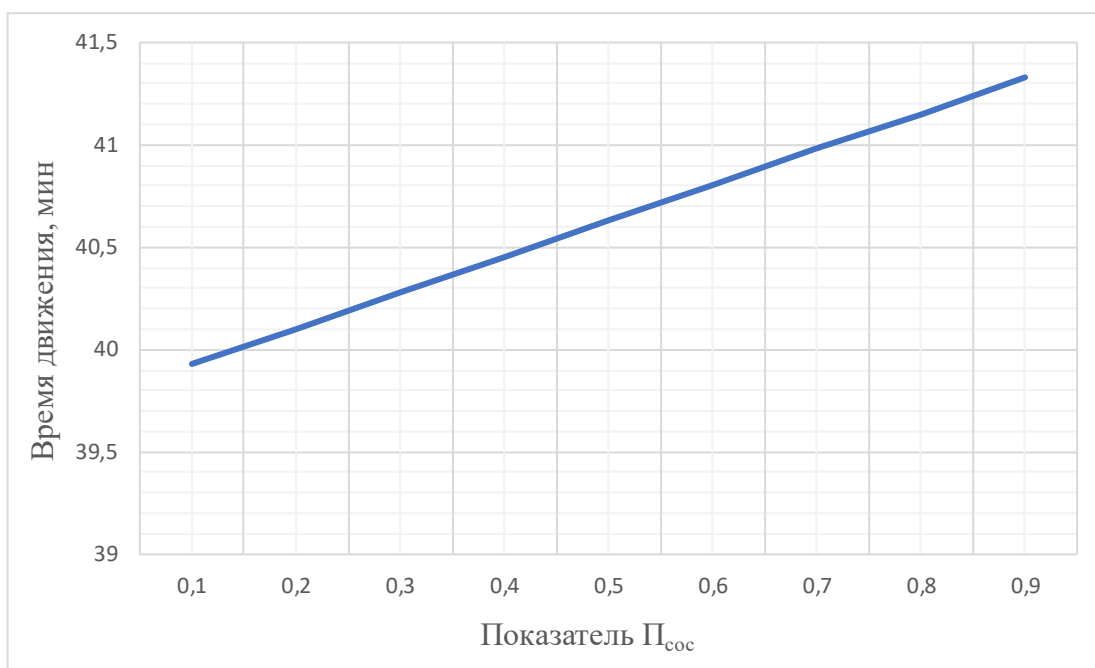


Рисунок 2.7 – График зависимости времени движения автосамосвала от показателя $P_{\text{сос}}$

Анализ результатов расчетов показывает, что чем выше показатель $P_{\text{сос}}$, тем ниже средняя скорость движения автосамосвала в пределах блока и, соответственно, тем больше время движения автосамосвала.

2.4 Анализ методик расчета производительности машин послойного фрезерования

Существует целый ряд методик для расчета производительности машин послойного фрезерования.

В работе В.М. Щадова [121] предложена формула для расчета часовой производительности машин послойного фрезерования, позволяющая учитывать особенности различных схем фрезерования слоя блока.

В работе С. Kumar [91], основываясь на результатах экспериментов, для расчета производительности автор предложил эмпирическую зависимость (1.1), учитывающую характеристики породы и параметры машины послойного фрезерования.

В работе Р. Amar [92] было предложено техническую производительность определять на основании показателей работы машины послойного фрезерования в конкретных условиях:

$$P_{\text{ч}} = n \cdot P_{\text{тео}} \cdot \frac{\text{Фактическая глубина фрезерования}}{\text{Максимальная глубина фрезерования}}, \quad (2.8)$$

где $P_{\text{ч}}$ – техническая производительность машины послойного фрезерования, $\text{м}^3/\text{ч}$; n – коэффициент использования машины, %; $P_{\text{тео}}$ – теоретическая производительность машины послойного фрезерования, $\text{м}^3/\text{ч}$.

В работе А.Ю. Чебана [122] предлагается определение технической производительности машины послойного фрезерования исходя из баланса мощности двигателя и мощностей, затрачиваемых на привод рабочего органа, конвейеров и механизма передвижения машины послойного фрезерования.

Также автор предлагает формулу для определения сменной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования, $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$P_{\text{э}} = P \cdot T_{\text{см}} \cdot k_{\text{маш}} \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{м}}, \quad (2.9)$$

где P – техническая производительность машины послойного фрезерования, $\text{м}^3/\text{ч}$; $T_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены, ч; $k_{\text{маш}}$ – коэффициент, учитывающий опыт машиниста машины послойного фрезерования; $k_{\text{об}}$ – коэффициент, учитывающий потери времени на обслуживание машины послойного фрезерования; $k_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий потери времени при ожидании и обмене автосамосвалов; $k_{\text{м}}$ – коэффициент, учитывающий потери времени на маневрирование машины послойного фрезерования.

В работе А. Prakash [93] предлагается методика расчета производительности машин послойного фрезерования в зависимости от их технологических схем работы. Формулы представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Определение производительности машины послойного фрезерования в различных технологических схемах работы, м³/смену [93]

Схема работы	Штабелирование	Погрузка непосредственно в автосамосвалы
Челноковая схема	$\Pi = \frac{L \cdot b \cdot h \left[\frac{T_{\text{см}} \cdot 60}{\frac{L}{v} + \frac{L}{v_e}} \right]}{1000}$	$\Pi = \frac{b \cdot h \left[\frac{T_{\text{см}} \cdot 60}{\frac{L}{v} + \frac{T_c}{L_t} + \frac{T_e}{L}} \right]}{1000}$
Схема с разворотом в конце рабочего хода и фрезерованием в обратном направлении	$\Pi = \frac{L \cdot b \cdot h \left[\frac{T_{\text{см}} \cdot 60}{\frac{L}{v} + T_t} \right]}{1000}$	$\Pi = \frac{b \cdot h \left[\frac{T_{\text{см}} \cdot 60}{\frac{1}{v} + \frac{T_c}{L_t} + \frac{T_t}{L}} \right]}{1000}$
Схема с непрерывным фрезерованием	$\Pi = \frac{b \cdot v \cdot h \cdot T_{\text{см}} \cdot 60}{1000}$	$\Pi = \frac{b \cdot h \left[\frac{T_{\text{см}} \cdot 60}{\frac{1}{v} + \frac{T_c}{L_t}} \right]}{1000}$

Здесь L – длина блока, м; h – заданная глубина фрезерования, мм; v – скорость машины послойного фрезерования во время фрезерования, м/мин; v_e – скорость машины послойного фрезерования во время холостого хода, м/мин; T_e – время холостого хода назад, мин; $T_{\text{см}}$ – количество рабочих часов в смене, ч; b – ширина режущего барабана, м; T_c – время обмена автосамосвалов, мин; L_t – длина фрезерования для заполнения одного автосамосвала, м; T_t – время поворота машины послойного фрезерования, мин.

Время холостого хода назад определяется по формуле:

$$T_e = \frac{L}{v_e}. \quad (2.10)$$

Длина фрезерования для заполнения одного автосамосвала определяется по формуле:

$$L_t = \frac{[\text{грузоподъемность автосамосвала (м}^3\text{)} \times \text{коэффициент заполнения}]}{(b \text{ (м)} \times h \text{ (мм)} \times \frac{\text{коэффициент разрыхления}}{1000})}. \quad (2.11)$$

Рассмотренные выше методики были разработаны для условий постоянной глубины фрезерования как в пределах слоя, так и полосы фрезерования и либо не могут быть применены для других условий, либо должны быть адаптированы. Часть методик предназначены только для расчета технической производительности машин послойного фрезерования и не позволяют рассчитать производительность всего комплекса оборудования, частью которого является машина послойного фрезерования. В методиках, которые учитывают особенности работы машин послойного фрезерования в комплексе с автосамосвалами, не учитываются особенности режима движения автосамосвалов по участкам поверхности, где формируются неровности в результате фрезерования пород различной прочности. Отсутствие методики расчета производительности комплекса оборудования, в состав которого входят машины послойного фрезерования и автосамосвалы, учитывающей особенности работы в условиях изменения глубины фрезерования в пределах слоя, не позволяет получить корректные результаты для обоснования параметров и выбора как схем фрезерования, так и технологических схем отработки блоков в целом в указанных условиях.

Для разработки методики расчета производительности машин послойного фрезерования в составе комплекса оборудования необходим инструмент для изучения и анализа особенностей работы данного комплекса, а также расчета показателей работы оборудования в различных условиях.

Выводы по второй главе

1) Установлено, что при изменении прочности горных пород в пределах полосы фрезерования происходит изменение глубины фрезерования. При увеличении прочности горных пород для уменьшения износа режущих зубьев рабочего барабана и во избежание чрезмерного расхода топлива машины послойного фрезерования уменьшают глубину фрезерования, что приводит к образованию неровных поверхностей (неровностей).

2) Установлено, что неровности, образовавшиеся после прохода машины послойного фрезерования при фрезеровании участков с изменчивостью прочности бокситов, когда они достигают определенной высоты, оказывают значительное влияние на безопасность движения и показатели работы карьерных автосамосвалов.

3) Предложен способ измерения параметров неровностей на основе метода измерения геометрических размеров повреждений дорожных покрытий, утвержденного в стандарте ГОСТ 32825 Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения геометрических размеров повреждений.

4) Предложено понятие «бугор». Бугор, это неровность выше уровня поверхности, образовавшаяся в результате фрезерования горных пород машинами послойного фрезерования, высота которой не обеспечивает безопасного движения или изменяет скоростной режим движения автосамосвалов. После прохода машины послойного фрезерования на поверхности формируются два вида бугров: бугры в полосе фрезерования и бугры в смежных заходках (полосах фрезерования).

5) Установлены аналитические зависимости:

- средней скорости движения автосамосвала в пределах блока с учетом наличия бугров на поверхности блока;
- времени движения автосамосвала с учетом длины блока и наличия бугров на поверхности блока.

6) Предложен показатель, учитывающий протяженность участков движения со сниженной скоростью, $P_{\text{сос}}$. Значения показателя $P_{\text{сос}}$ варьируются от 0 до 1. Чем выше значение показателя, тем ниже средняя скорость движения автосамосвала в пределах блока и, соответственно, тем больше время движения автосамосвала.

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ МАШИН ПОСЛОЙНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ БОКСИТОВ

3.1 Условия разработки месторождения бокситов «Балая»

При создании математических моделей работы машин послойного фрезерования и работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования необходимо учесть условия разработки месторождения бокситов «Балая». На месторождении имеются участки с изменчивостью прочности бокситов. Оно разрабатывается с помощью машин послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM. Принципиальные технологические схемы отработки блоков машиной послойного фрезерования показаны на рисунке 3.1. В процессе разработки месторождение бокситов «Балая» разбивается на блоки, которые имеют разные размеры. Длина блоков варьируется от 150 до 600 м, а ширина – от 50 до 250 м [94].

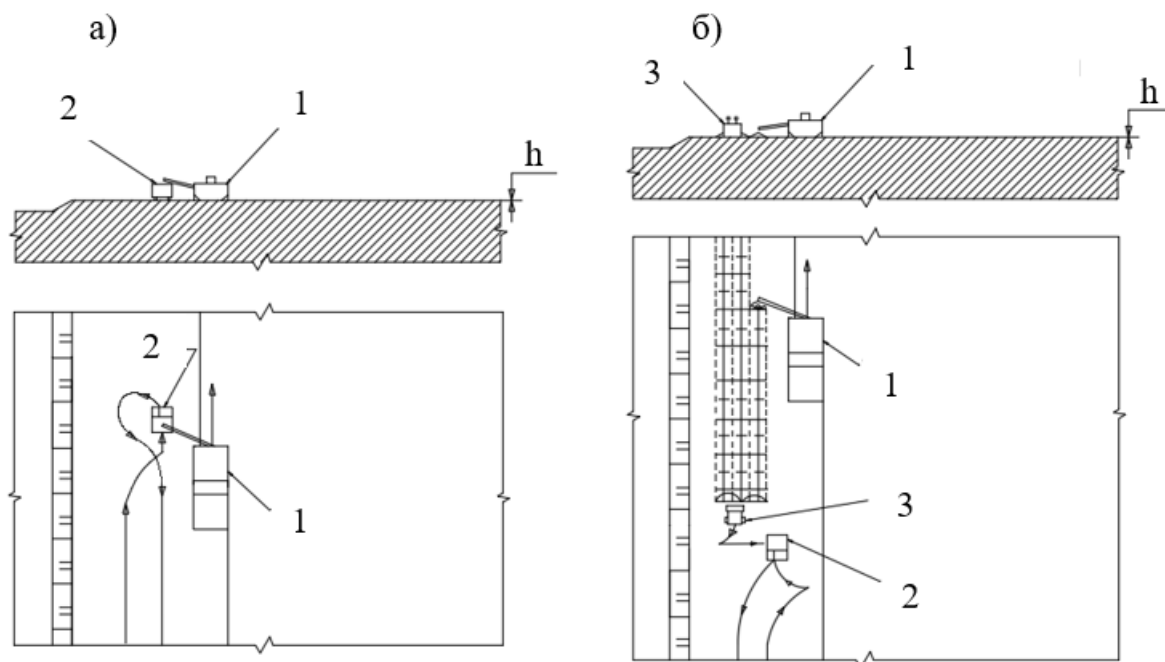


Рисунок 3.1 – Технологическая схема отработки блока машиной послойного фрезерования [94]:

а – с погрузкой непосредственно в автосамосвалы; *б* – с промежуточным штабелированием; *1* – Wirtgen 2200 SM; *2* – Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ; *3* – Komatsu WA500-3; *h* – толщина слоя

Для математического моделирования работы машин послойного фрезерования и работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования была использована группировка по интервалам значений прочности боксита, в пределах которых фрезерование осуществляется с одинаковой скоростью и глубиной, представленная в таблице 2.1.

Машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM на месторождении бокситов «Балая» работают по цикличной схеме с разворотом в конце рабочего хода и фрезерованием в обратном направлении.

3.2 Установление аналитических зависимостей для расчёта производительности машины послойного фрезерования

Установление аналитических зависимостей для расчёта производительности машин послойного фрезерования осуществлялось в следующей последовательности:

- анализ разработанных и применяемых на практике технологических схем работы машин послойного фрезерования;
- анализ и ранжирование факторов, влияющих на производительность машины послойного фрезерования и комплекса оборудования в целом;
- формирование аналитических зависимостей для расчета параметров, отдельных элементов и показателей технологических схем работы выемочно-транспортно-разгрузочных комплексов оборудования, включающих машины послойного фрезерования и автосамосвалы.

Существует два основных типа технологических схем работы машин послойного фрезерования: циклические и поточные. Циклические схемы делятся на три подгруппы: челноковая схема с обратным холостым ходом, схема с разворотом в конце рабочего хода и схема с непрерывным движением по передвигающейся петле [123].

При схеме с разворотом в конце рабочего хода машина послойного фрезерования осуществляет фрезерование слоя в двух направлениях, и машина должна развернуться для установки к началу смежной заходки.

На основе анализа опыта работы машин послойного фрезерования и научных исследований, а также с учетом необходимости формализации установленных зависимостей были выделены три варианта схемы разворота этих машин в конце рабочего хода (рисунки 3.2–3.4).

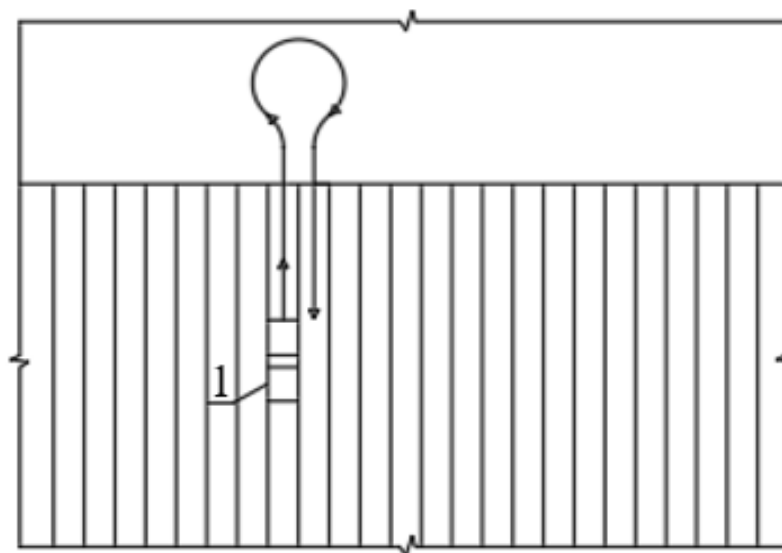


Рисунок 3.2 – Первый вариант схемы разворота машины послойного фрезерования [123]:

1 – машина послойного фрезерования

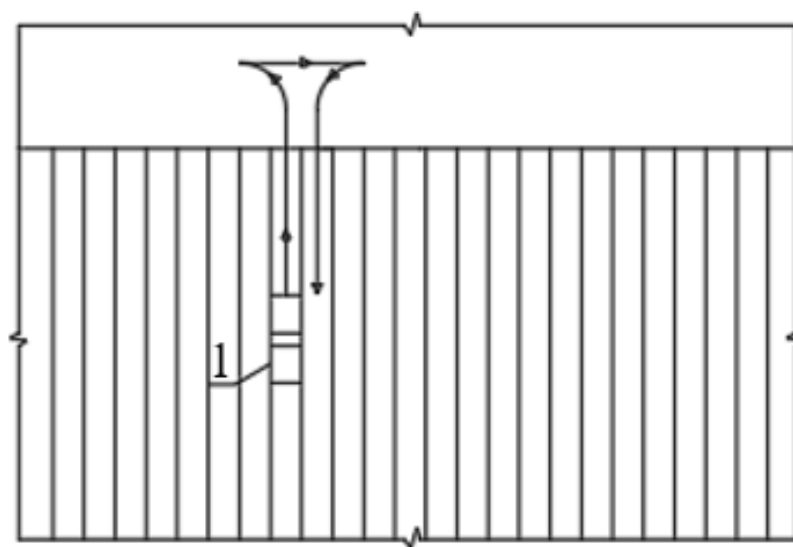


Рисунок 3.3 – Второй вариант схемы разворота машины послойного фрезерования [123]:

1 – машина послойного фрезерования

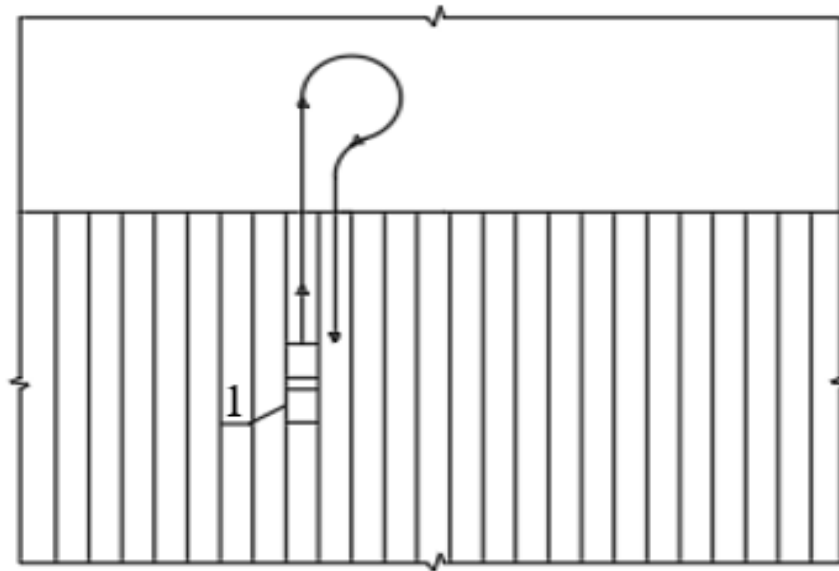


Рисунок 3.4 – Третий вариант схемы разворота машины послойного фрезерования [123]:

l – машина послойного фрезерования

Минимальная длина хода при развороте машины послойного фрезерования для каждого из этих вариантов рассчитывается по следующим формулам, м:

а) для первого варианта схемы разворота (рисунок 3.5, а):

$$L_{\text{раз}} = L_k + 2 \cdot \pi \cdot r \left(\frac{1}{2} + \frac{4 \cdot \alpha}{360^\circ} \right), \quad (3.1)$$

где L_k – длина машины послойного фрезерования, м; r – радиус поворота машины послойного фрезерования, м; α – угол поворота, град.

Угол поворота α связан с шириной фрезерования, b_ϕ :

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{2 \cdot r}{2 \cdot r + b_\phi} \\ \text{при } b_\phi \leq r \end{cases} \quad (3.2)$$

б) для второго варианта схемы разворота (рисунок 3.5, б):

$$L_{\text{раз}} = L_k + r \cdot (\pi + 2) + b_\phi, \quad (3.3)$$

где b_{ϕ} – ширина фрезерования, м.

с) для третьего варианта схемы разворота (рисунок 3.5, в):

$$L_{\text{раз}} = L_k + \sqrt{(2 \cdot r)^2 - b_{\phi}^2} + \pi \cdot r \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{90^\circ}\right). \quad (3.4)$$

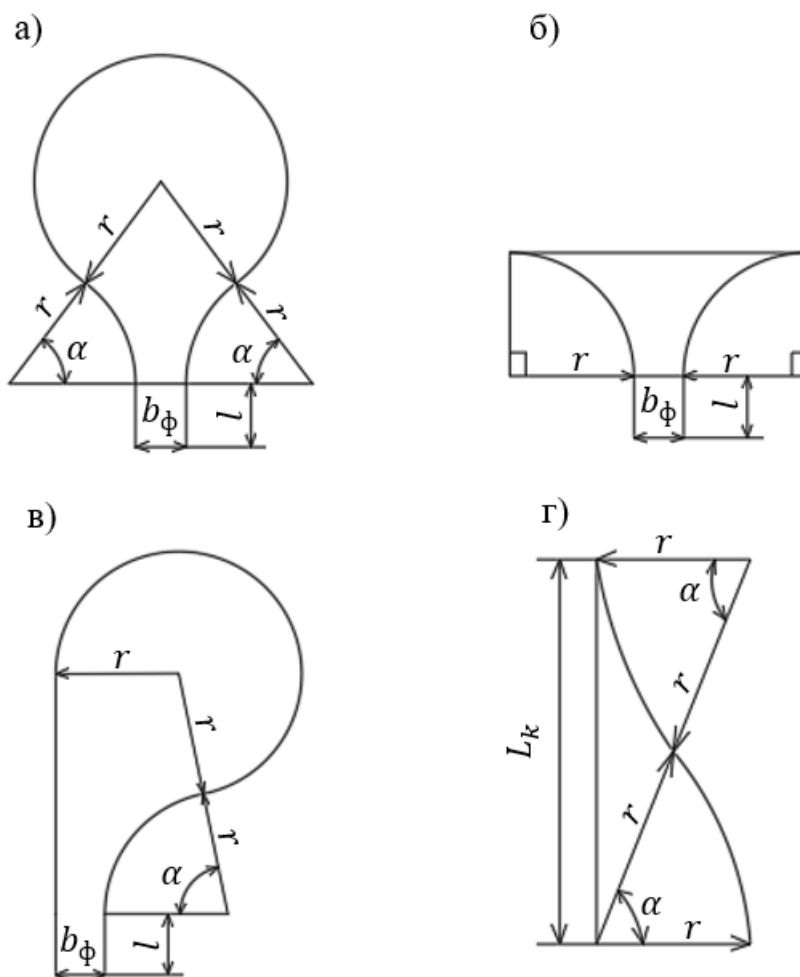


Рисунок 3.5 – Схемы для расчета длины хода при развороте и холостого хода машины послойного фрезерования:

a – для первого варианта схемы разворота; $б$ – для второго варианта схемы разворота; $в$ – для третьего варианта схемы разворота; $г$ – для челноковой схемы;

$$l = \frac{L_k}{2}$$

Время разворота машины послойного фрезерования рассчитывается по следующей формуле, мин:

$$T_{\text{раз}} = \frac{L_{\text{раз}}}{V_{\text{раз}}}, \quad (3.5)$$

где $L_{\text{раз}}$ – длина хода при развороте, м; $V_{\text{раз}}$ – скорость разворота, м/мин.

Длина хода и время разворота машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM для каждого варианта схемы разворота после расчетов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Длина и время разворота машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM для рассмотренных вариантов разворота

Показатели	Первый вариант	Второй вариант	Третий вариант
Длина хода при развороте, м	29,17	27,12	32,21
Время разворота, мин	4,17	3,87	4,60

Таким образом, на основании результатов расчетов, приведенных в таблице 3.1, можно сделать вывод, что при работе машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM по цикличной схеме с разворотом в конце рабочего хода и фрезерованием в обратном направлении наиболее оптимальным вариантом является второй вариант схемы разворота, поскольку машина разворачивается быстрее, чем в других вариантах.

При челноковой схеме работы машина послойного фрезерования осуществляет фрезерование слоя в одном направлении и для установки в начало новой заходки, не разворачиваясь, изменив направление движения, следует обратно холостым ходом к месту начала работ (рисунок 3.6). При схеме с непрерывным движением по передвигающейся петле фрезерование осуществляется в двух направлениях, но перемещение машины послойного фрезерования к началу следующей заходки осуществляется по дуге без смены направления движения (рисунок 3.7) [123].

Минимальная длина холостого хода машины послойного фрезерования рассчитывается (рисунок 3.5.г) по следующей формуле, м:

$$L_{xx} = L_k + \frac{\pi}{90^\circ} \cdot (\alpha \cdot r) + L_6, \quad (3.6)$$

где α – угол дуги поворота, град; L_6 – длина блока, м.

Время холостого хода машины послойного фрезерования при работе по челноковой схеме рассчитывается по следующей формуле, мин:

$$T_{xx} = \frac{L_{xx}}{V_{xx}}, \quad (3.7)$$

где L_{xx} – длина холостого хода, м; V_{xx} – скорость холостого хода, м/мин.

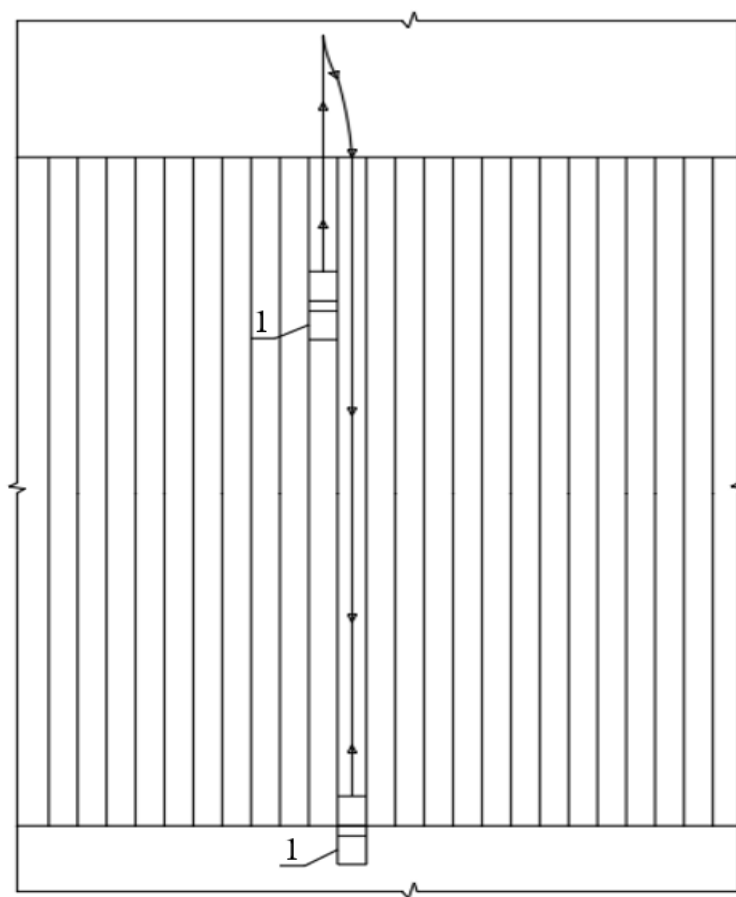


Рисунок 3.6 – Челноковая схема работы машины послойного фрезерования [123]

Общая длина хода при выполнении поворотов рассчитывается по следующей формуле, м:

- при нечетном количестве проходов:

$$L_{пов} = \frac{\pi}{4} \cdot Ш_6 \cdot (n_{про} - 1), \quad (3.8)$$

где Ш_6 – ширина фрезеруемого блока участка месторождения, м; $n_{\text{про}}$ – количество проходов.

- при четном количестве проходов:

$$L_{\text{пов}} = \pi \cdot \left[\frac{\text{Ш}_6}{4} \cdot (n_{\text{про}} - 1) + \frac{b_{\text{ф}}}{2} \cdot \left(\frac{n_{\text{про}}}{2} - 1 \right) \right], \quad (3.9)$$

где $b_{\text{ф}}$ – ширина фрезерования, м.

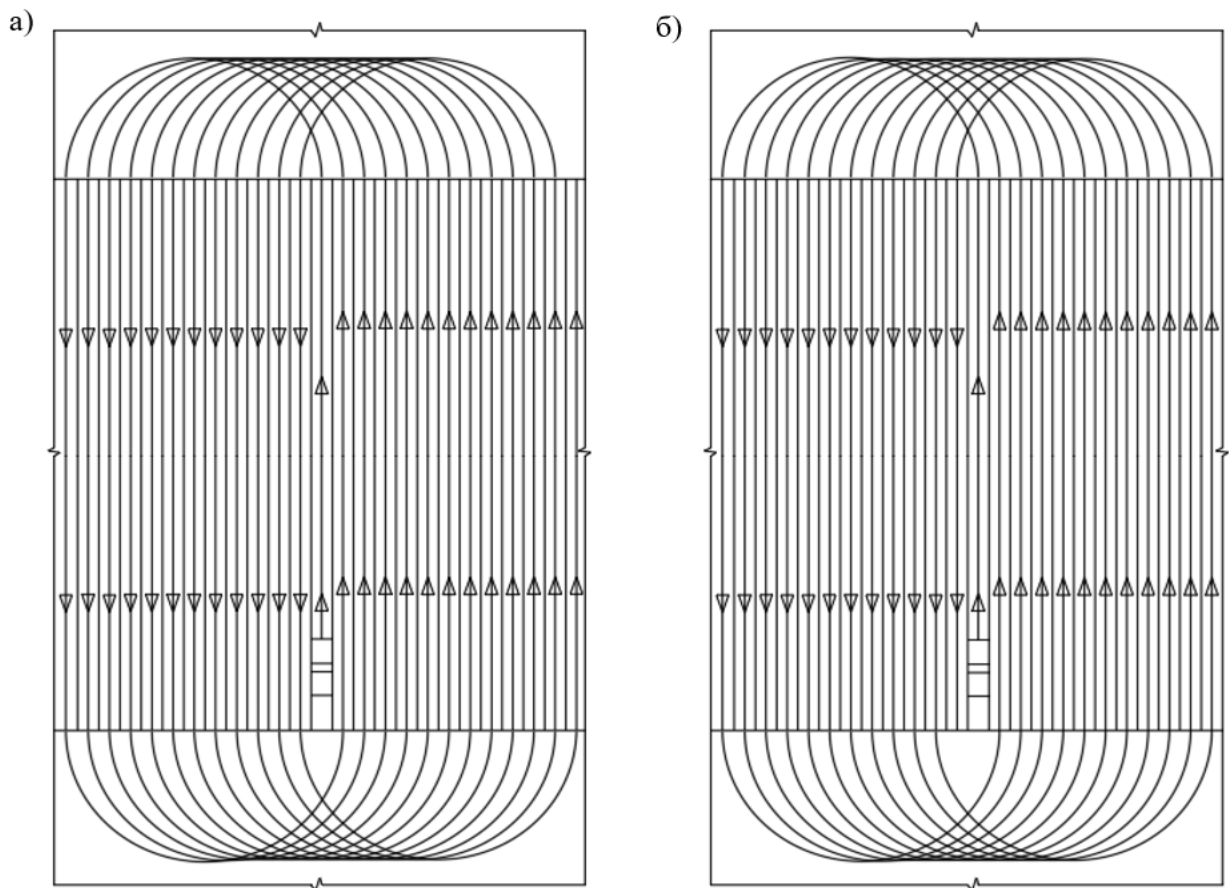


Рисунок 3.7 – Схема с непрерывным движением машины послойного фрезерования по передвигающейся петле [123]:

а – количество проходов нечетное число; *б* – количество проходов четное число

Важно отметить, что для того, чтобы машина послойного фрезерования могла работать по схеме с непрерывным движением по передвигающейся петле, необходимо, чтобы:

$$\begin{cases} r_{\min} \leq \frac{\text{Ш}_6}{4} - \frac{b_\phi}{4}, \text{ при нечетном количестве проходов} \\ r_{\min} \leq \frac{\text{Ш}_6}{4}, \text{ при четном количестве проходов} \end{cases}, \quad (3.10)$$

где $r_{\min}$ – минимальный радиус поворота машины послойного фрезерования, м.

Общее время, затраченное на движение при поворотах машины послойного фрезерования в схемах с непрерывным движением по передвигающейся петле, рассчитывается по следующей формуле, мин:

$$T_{\text{пов}} = \frac{L_{\text{пов}}}{V_{\text{пов}}}, \quad (3.11)$$

где $L_{\text{пов}}$ – общая длина хода, приходящаяся на выполнение машиной послойного фрезерования поворотов, м; $V_{\text{пов}}$ – скорость движения машины послойного фрезерования при выполнении поворота, м/мин.

На основе установленных аналитических зависимостей времени хода при развороте для разных вариантов схем разворота и холостого хода были выполнены расчеты времени разворота и холостого хода машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM при различных длинах блока.

Анализ результатов расчетов позволил установить ряд зависимостей. Например, на общее время непроизводительной работы машины послойного фрезерования (время разворота и холостого хода) длина блока оказывает влияние не во всех применяемых схемах (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Время разворота и холостого хода машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM в зависимости от длины блока [123]

Показатели	Общее время непроизводительной работы машины послойного фрезерования (время разворота и холостого хода), мин			
Длина блока, м	Первый вариант разворота	Второй вариант разворота	Третий вариант разворота	Челноковая схема
50	4,17	3,87	4,6	3,51
100	4,17	3,87	4,6	6,01
150	4,17	3,87	4,6	8,51
200	4,17	3,87	4,6	11,01
250	4,17	3,87	4,6	13,51
300	4,17	3,87	4,6	16,01
350	4,17	3,87	4,6	18,51
400	4,17	3,87	4,6	21,01
450	4,17	3,87	4,6	23,51
500	4,17	3,87	4,6	26,01

Зависимость времени разворота и холостого хода машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM от длины блока представлена на рисунке 3.8.

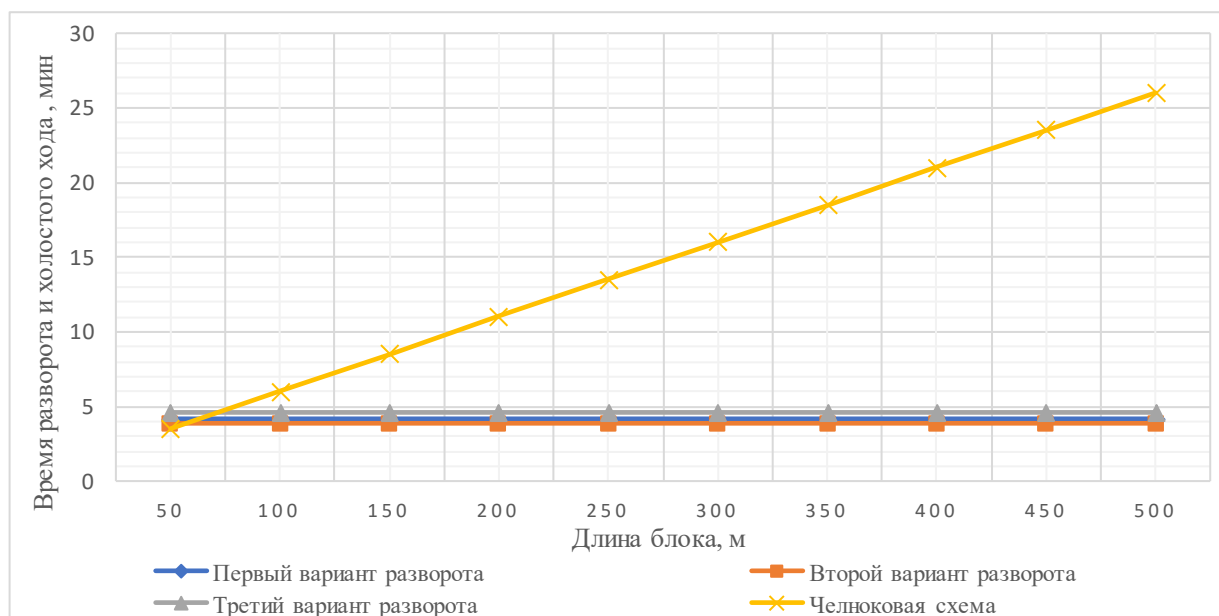


Рисунок 3.8 – График зависимости времени разворота и холостого хода машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM от длины блока [123]

Длина блока влияет на выбор схемы фрезерования. Из графика (см. рисунок 3.8) можно сделать вывод, что при длине блока, равной или меньшей 57 м, для работы машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM рекомендуется челноковая схема. При длине блока, превышающей 57 м, рекомендуется схема со вторым вариантом схемы разворота в конце рабочего хода.

Расчет производительности машин послойного фрезерования должен учитывать изменчивость прочности бокситов в пределах слоя блока [123]. Для реализации этой задачи были выделены два условия работы машины:

- **Условие 1:** машина послойного фрезерования работает в пределах блока, где прочность бокситов не изменяется.
- **Условие 2:** машина послойного фрезерования работает в пределах блока, где прочность бокситов изменяется.

Расчет эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования, работающей в пределах блока, где прочность бокситов остается постоянной, независимо от схемы работы и способа выгрузки породы (погрузка в автосамосвал или штабелирование), осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{сл}} = \frac{60 \cdot K_{\text{и}} \cdot L_{\text{б}} \cdot \text{Ш}_{\text{б}} \cdot h_{\text{ф}}}{(T_{\text{о}} + T_{\text{п}}) \cdot n_{\text{про}} + T_{\text{пр}} \cdot (n_{\text{про}} - 1) + n_{\text{про}} \cdot \left(\frac{L_{\text{б}}}{V_{\text{ф}}} \right) + T_{\text{ав}}}, \quad (3.12)$$

где $Q_{\text{сл}}$ – часовая производительность машины послойного фрезерования при отработке одного слоя, м³/ч; $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования машины; $L_{\text{б}}$ – длина блока, м; $\text{Ш}_{\text{б}}$ – ширина блока, м; $h_{\text{ф}}$ – глубина фрезерования, м; $T_{\text{о}}$ – время опускания барабана на забой, мин; $T_{\text{п}}$ – время поднятия барабана от забоя, мин; $n_{\text{про}}$ – количество проходов; $T_{\text{пр}}$ – время разворота, поворота и холостого хода машины послойного фрезерования при ее перемещении к началу новой заходки при отработке слоя блока, мин; $V_{\text{ф}}$ – скорость фрезерования, м/мин; $T_{\text{ав}}$ – время простоя машины послойного фрезерования в связи с отсутствием автосамосвала для погрузки, мин.

Время простоя машины послойного фрезерования в связи с отсутствием автосамосвала на погрузке определяется по формуле:

$$T_{ав} = \left[\frac{n_{про} \cdot \left(\frac{L_6}{V_{\phi}} \right)}{n_a \cdot t_{п}} - 1 \right] \cdot T_{ож} + \left[\frac{n_{про} \cdot \left(\frac{L_6}{V_{\phi}} \right)}{t_{п}} - 1 \right] \cdot t_{за}, \quad (3.13)$$

где n_a – количество автосамосвалов; $t_{п}$ – время погрузки автосамосвала, мин; $T_{ож}$ – время ожидания для машины послойного фрезерования, связанное с отсутствием автосамосвала на пункте ожидания погрузки, мин; $t_{за}$ – время обмена автосамосвалов при установке для погрузки, мин.

Время ожидания для машины послойного фрезерования, связанное с отсутствием автосамосвала на пункте ожидания погрузки, определяется по формуле, мин:

$$T_{ож} = (T_{дв} + t_{раз} + t_m) - (n_a - 1) \cdot (t_{п} + t_{за}), \quad (3.14)$$

где $T_{дв}$ – время движения автосамосвала, мин; $t_{раз}$ – время разгрузки автосамосвала, мин; t_m – время, затрачиваемое на маневрирование автосамосвала, мин.

Эксплуатационная производительность машин послойного фрезерования, работающих в пределах блока, где прочность бокситов остается постоянной, при разработке всего блока рассчитывается по формуле:

$$Q_{бл} = \frac{60 \cdot K_{и} \cdot L_6 \cdot Ш_6 \cdot M_6}{T_{осл} \cdot n_{сл} + T_{псл} \cdot (n_{сло} - 1)}, \quad (3.15)$$

где $Q_{бл}$ – часовая производительность машины послойного фрезерования при разработке всего блока, м³/ч; M_6 – мощность блока, м; $T_{осл}$ – время отработки одного слоя, мин; $n_{сл}$ – количество слоев фрезерования для отработки блока

участка; $T_{\text{псл}}$ – время перегона машины послойного фрезерования к началу первой заходки следующего слоя, мин.

Формула для расчета эксплуатационной производительности машин послойного фрезерования, работающих в пределах блока, где прочность бокситов изменяется, независимо от схемы работы и способа выгрузки:

$$Q_{\text{сл}} = \frac{60 \cdot K_{\text{и}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m (L_{il} \cdot h_{il} \cdot b_{il}) + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m (L_{jl}^{\text{б}} \cdot h_{jl}^{\text{б}} \cdot b_{jl}) \right)}{T_{\text{ф}}^{\text{сл}} + T_{\text{ф}}^{\text{б}} + T_{\text{ав}}}, \quad (3.16)$$

где $Q_{\text{сл}}$ – часовая производительность машины послойного фрезерования при отработке одного слоя с учетом затрат времени на фрезерование неровностей (бугров), м³/ч; $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования машины послойного фрезерования; L_{il} и h_{il} – сумма длин проходов и глубина фрезерования на i -х участках l -й ширины фрезерования в пределах слоя соответственно, м; $L_{jl}^{\text{б}}$ и $h_{jl}^{\text{б}}$ – сумма длин проходов и глубина фрезерования пород на j -х участках l -й ширины фрезерования бугров; n и k – общее количество выделенных групп пород и бугров в пределах слоя участка с различной глубиной фрезерования соответственно; b_{il} и b_{jl} – l -я ширина фрезерования на i -х и j -х участках фрезерования в пределах слоя и бугров, м; m – общее количество выделенных по ширине или условию работы полос фрезерования; $T_{\text{ф}}^{\text{сл}}$, $T_{\text{ф}}^{\text{б}}$ и $T_{\text{ав}}$ – время фрезерования слоя, фрезерования бугров и простоя машины послойного фрезерования в связи с отсутствием автосамосвала для погрузки соответственно, мин.

Время на фрезерование слоя рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{ф}}^{\text{сл}} = (T_{\text{о}} + T_{\text{п}}) \cdot n_{\text{про}} + T_{\text{пр}} \cdot (n_{\text{про}} - 1) + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \frac{L_{il}}{V_{\text{фил}}}, \quad (3.17)$$

где $T_{\text{о}}$ – время опускания барабана на забой, мин; $T_{\text{п}}$ – время поднятия барабана от забоя, мин; $n_{\text{про}}$ – количество проходов машины послойного фрезерования при отработке слоя; $T_{\text{пр}}$ – время разворота, поворота и холостого хода машины

послойного фрезерования при ее перемещении к началу новой заходки при отработке слоя блока, мин; $V_{\phi il}$ – скорость фрезерования i -х участков l -й ширины при фрезеровании слоя, м/мин.

При применении поточно-циклических схем, в которых длина холостого хода при отработке смежных ходов может быть различной, общее время разворота, поворота и холостого хода машины послойного фрезерования при ее перемещении к началу новой заходки определяется как сумма времени всех указанных видов ходов при отработке слоя участка [123].

Время на фрезерование бугров на поверхности участка при отработке слоя определяется по формуле:

$$T_{\phi}^b = (T_o + T_{\pi}) \cdot n_f + T_{\pi p}^b + \sum_{b=1}^{n_b-1} \frac{K_b}{V_{xx}} + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m \frac{L_{jl}^b}{V_{\phi jl}^b}, \quad (3.18)$$

где n_f – количество операций опускания и поднятия барабана при фрезеровании бугров (неровностей); $T_{\pi p}^b$ – общее время разворота, поворота и холостого хода машины послойного фрезерования при ее перемещении к началу новой заходки при отработке бугров, мин; n_b – количество фрезеруемых бугров на поверхности блока; K_b – расстояние между буграми (неровностями), м; V_{xx} – скорость холостого хода, м/мин; $V_{\phi j}^b$ – скорость фрезерования j -х участков l -й ширины при фрезеровании бугров, м/мин.

Время простоя машины послойного фрезерования в связи с отсутствием автосамосвала на погрузке определяется по формуле:

$$T_{ав} = \left[\left[\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \frac{\left(\frac{L_{il}}{V_{\phi il}} \right)}{\left(\frac{n_a \cdot E_k}{b_{il} \cdot h_{il} \cdot V_{\phi il}} \right)} + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m \frac{\left(\frac{L_{jl}^6}{V_{\phi jl}^6} \right)}{\left(\frac{n_a \cdot E_k}{b_{jl} \cdot h_{jl}^6 \cdot V_{\phi jl}^6} \right)} - 1 \right] \cdot T_{ож} + \left[\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \frac{\left(\frac{L_{il}}{V_{\phi il}} \right)}{\left(\frac{E_k}{b_{il} \cdot h_{il} \cdot V_{\phi il}} \right)} + \right. \\ \left. \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m \frac{\left(\frac{L_{jl}^6}{V_{\phi jl}^6} \right)}{\left(\frac{E_k}{b_{jl} \cdot h_{jl}^6 \cdot V_{\phi jl}^6} \right)} - 1 \right] \cdot t_{за} \right], \quad (3.19)$$

где E_k – емкость кузова автосамосвала, м³.

Время ожидания для машины послойного фрезерования, связанное с отсутствием автосамосвала на пункте ожидания погрузки, определяется по формуле (3.14).

Эксплуатационная производительность машин послойного фрезерования, работающих в пределах блока, где прочность бокситов изменяется, при разработке всего блока рассчитывается по формуле:

$$Q_{бл} = 60 \cdot K_{и} \cdot \frac{\sum_{z=1}^{n_{сл}} V_{слz}}{\sum_{z=1}^{n_{сл}} (T_{ослz} + T_{пслz-1})}, \quad (3.20)$$

где $Q_{бл}$ – часовая производительность машины послойного фрезерования при разработке всего блока, м³/ч; $n_{сл}$ – количество слоев фрезерования для отработки блока участка; $V_{слz}$ – объем горных пород z -го слоя, м³; $T_{ослz}$ – время отработки z -го слоя, мин; $T_{пслz-1}$ – время перегона фрезерного комбайна к началу первой заходки $z-1$ (следующего) слоя, мин.

Установленные аналитические зависимости для расчёта производительности машин послойного фрезерования являются основанием для создания математических моделей работы машин послойного фрезерования и работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования.

3.3 Математическое моделирование работы машины послойного фрезерования и анализ результатов

Исследование особенностей функционирования комплекса оборудования, в состав которого входят машины послойного фрезерования и автосамосвалы, осуществлялось поэтапно, на основе двух математических моделей.

На первом этапе была разработана математическая модель работы машины послойного фрезерования при фрезеровании слоя блока.

Апробация данной модели и установление аналитических зависимостей, связанных с технологией работы комплекса оборудования, в целом позволили разработать математическую модель для моделирования разработки блока участка месторождения в целом.

Математические модели были созданы на основе установленных аналитических зависимостей (формулы 3.1 - 3.20). В моделях были реализованы возможности учета целого ряда факторов, влияющих на показатели работы машины послойного фрезерования: длина, ширина, площадь и мощность блока, прочность пород и её изменение в пределах слоя, длина, ширина, площадь, периметр и количество бугров, и расстояние между ними, расстояние транспортирования, количество автосамосвалов, схемы фрезерования, способ выгрузки полезного ископаемого (погрузка в автосамосвал или штабелирование).

Обе модели были реализованы в программном пакете Microsoft Office Excel.

При моделировании работы машин послойного фрезерования при отработке слоя блока исследовалось влияние на производительность как отдельных факторов, так и их комбинация.

Диапазоны изменения параметров модели, рассмотренные варианты влияния отдельных факторов и их комбинации представлены в виде матрицы в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица количества вариантов моделирования работы машины послойного фрезерования

Варианты	Диапазон изменения	L_6	$Ш_6$	S_6	$b_{сж}$	$L_{бу}$	$Ш_{бу}$	$S_{бу}$	$P_{бу}$	n_6	K_6	$L_{ТР}$	n_a
L_6 – длина блока	От 50 до 1500 м	-	65	65	24	26	26	26	26	52	20	70	80
$Ш_6$ – ширина блока	От 25 до 500 м		-	65	24	26	26	26	26	52	20	70	80
S_6 – площадь блока	От 1250 до 750 000 м ²			-	24	26	26	26	26	52	20	70	80
$b_{сж}$ – прочность бокситов	От 5 до 120 МПа				-	40	40	40	40	80	32	105	120
$L_{бу}$ – длина бугров	От 0 до 600 м					-	26	26	26	52	20	70	80
$Ш_{бу}$ – ширина бугров	От 0 до 200 м						-	26	26	52	20	70	80
$S_{бу}$ – площадь бугров	От 0 до 120000 м ²							-	26	52	20	70	80
$P_{бу}$ – периметр бугров	От 0 до 1600 м								-	52	20	70	80
n_6 – количество бугров	От 0 до 5									-	20	70	80
K_6 – расстояние между буграми	От 0 до 50 м										-	70	80
$L_{ТР}$ – расстояние транспортирования	От 3 до 15 км											-	80
n_a – количество автосамосвалов	От 1 до 30												-

Установленные в результате моделирования зависимости производительности машин послойного фрезерования при отработке слоя блока от длины, ширины и площади блока, прочности бокситов, площади и периметра бугров представлены в виде графиков на рисунках 3.9–3.18.

- **Условие 1:** машина послойного фрезерования работает в пределах блока, где прочность боксита не изменяется.

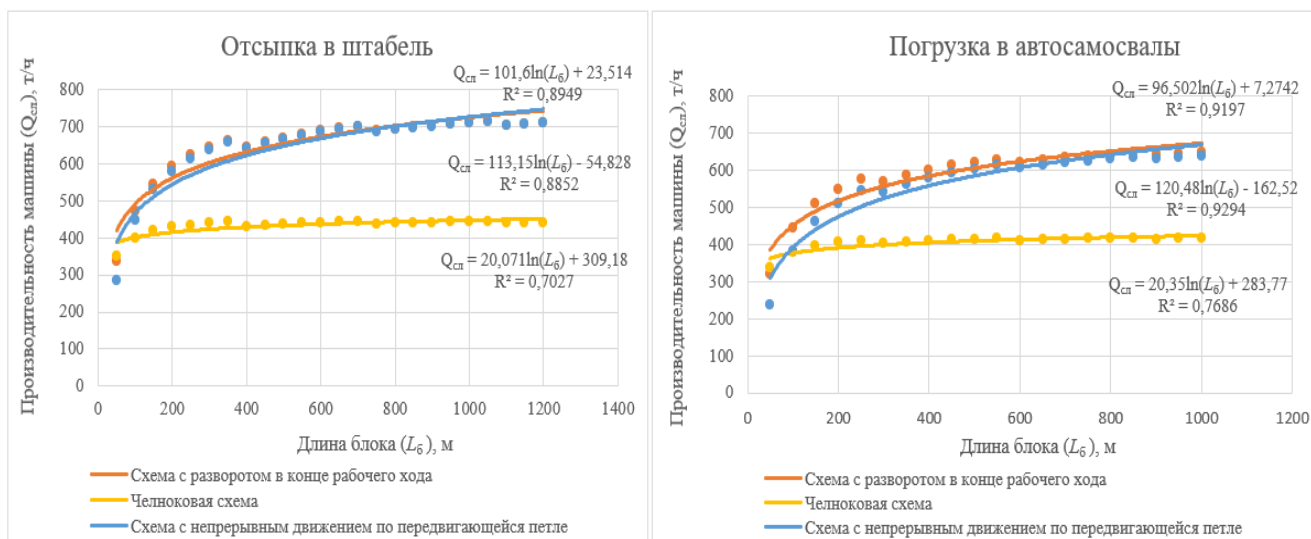


Рисунок 3.9 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от длины блока

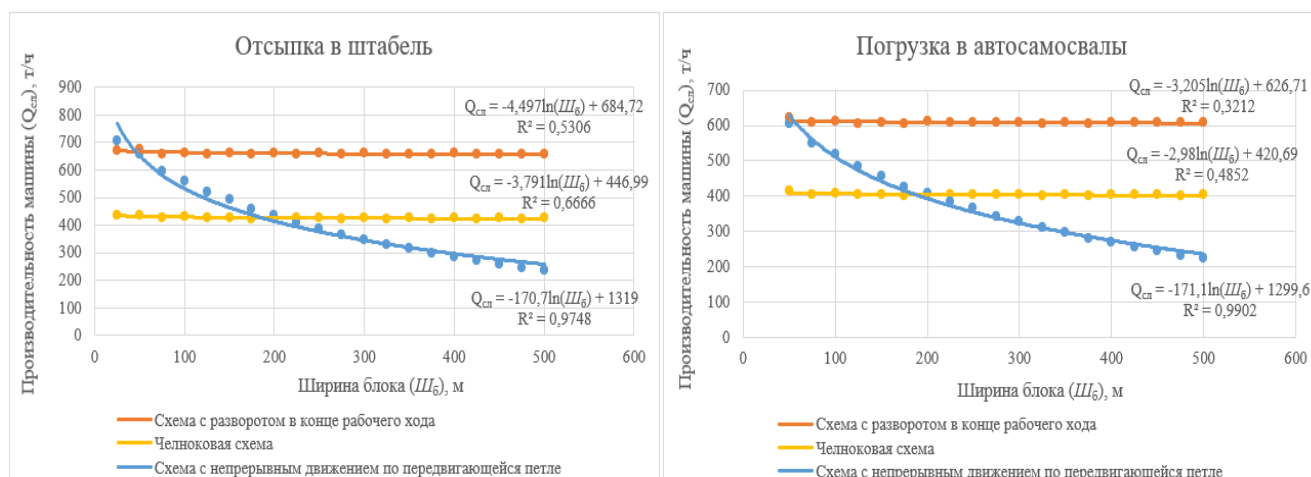


Рисунок 3.10 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от ширины блока

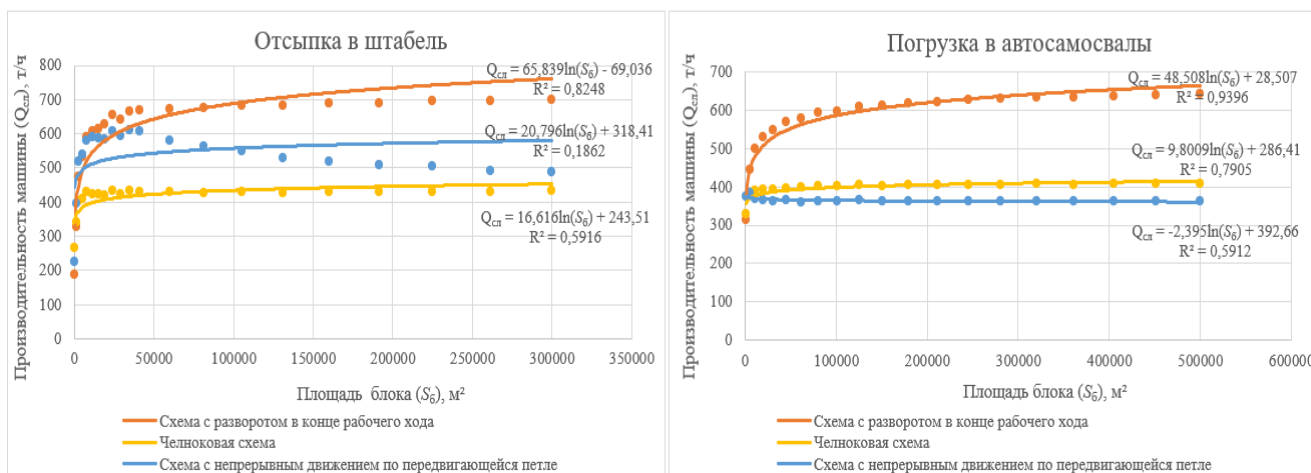


Рисунок 3.11 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от площади блока

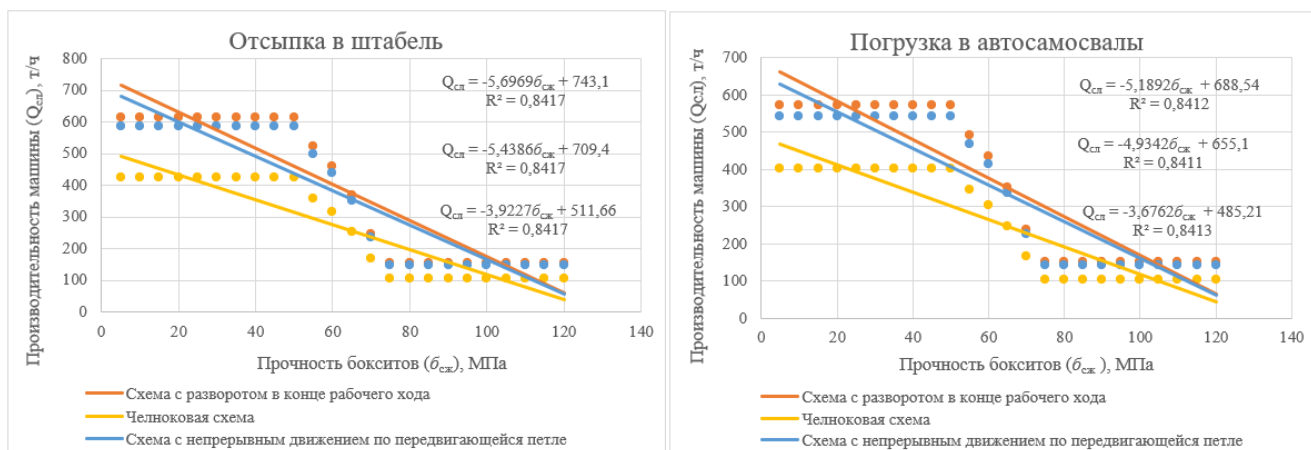


Рисунок 3.12 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от прочности бокситов

- **Условие 2:** машина послойного фрезерования работает в пределах блока, где прочность бокситов изменяется.

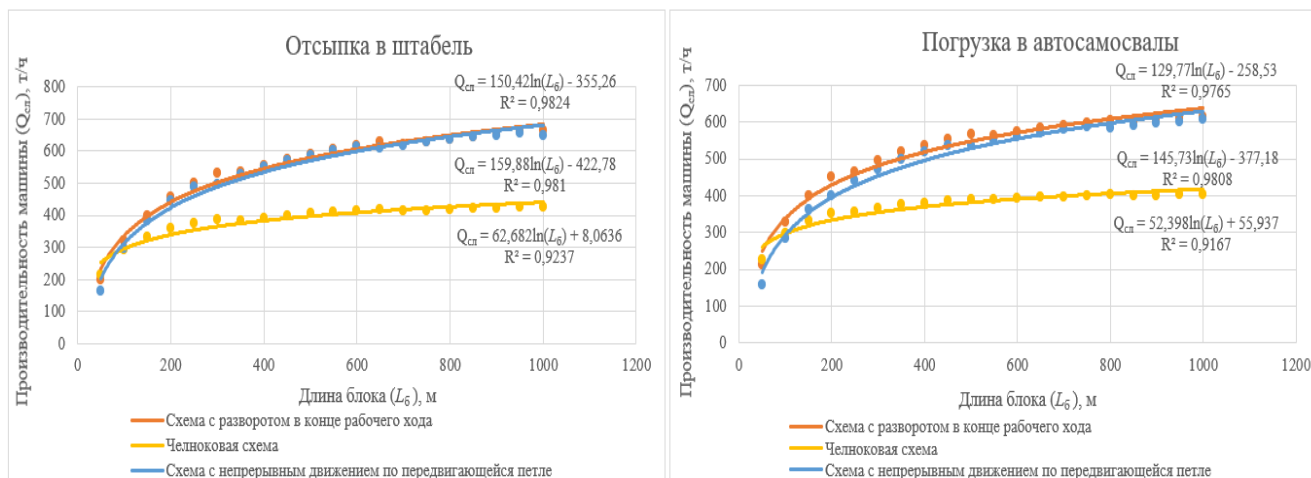


Рисунок 3.13 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от длины блока

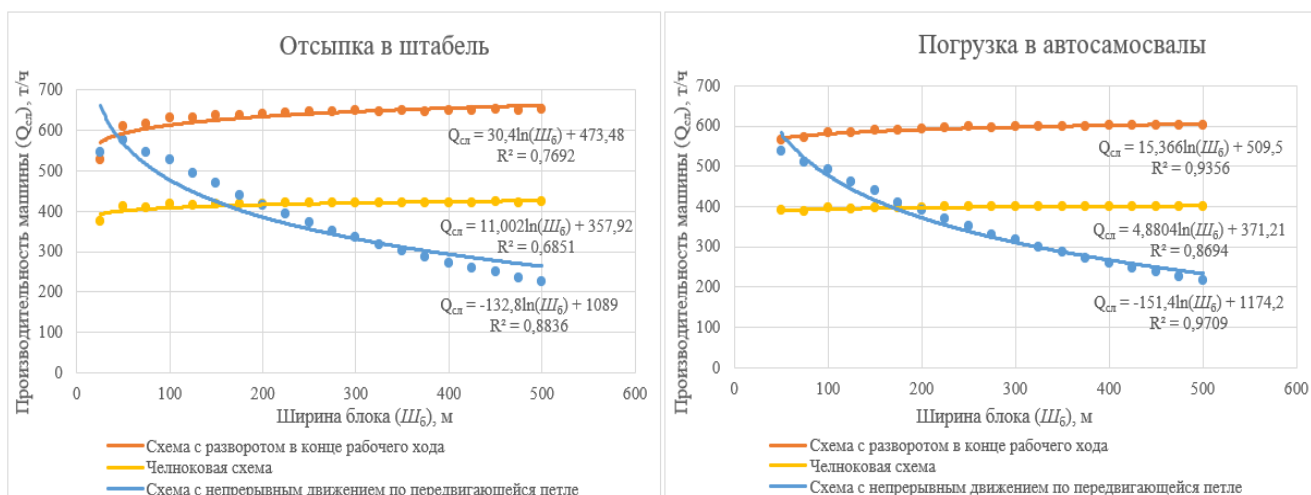


Рисунок 3.14 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от ширины блока

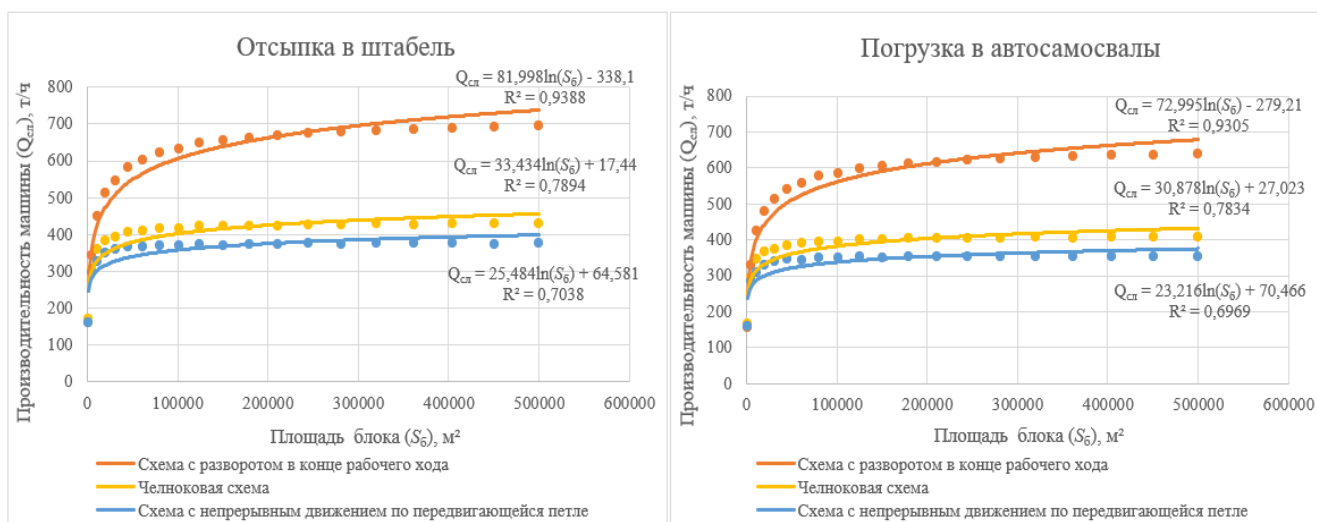


Рисунок 3.15 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от площади блока

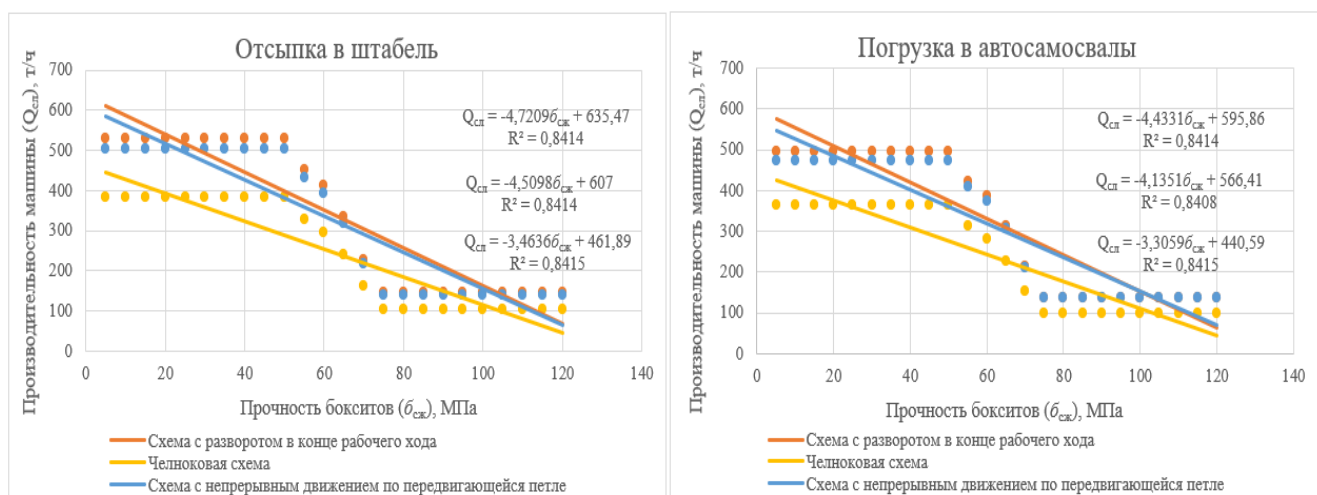


Рисунок 3.16 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от прочности бокситов

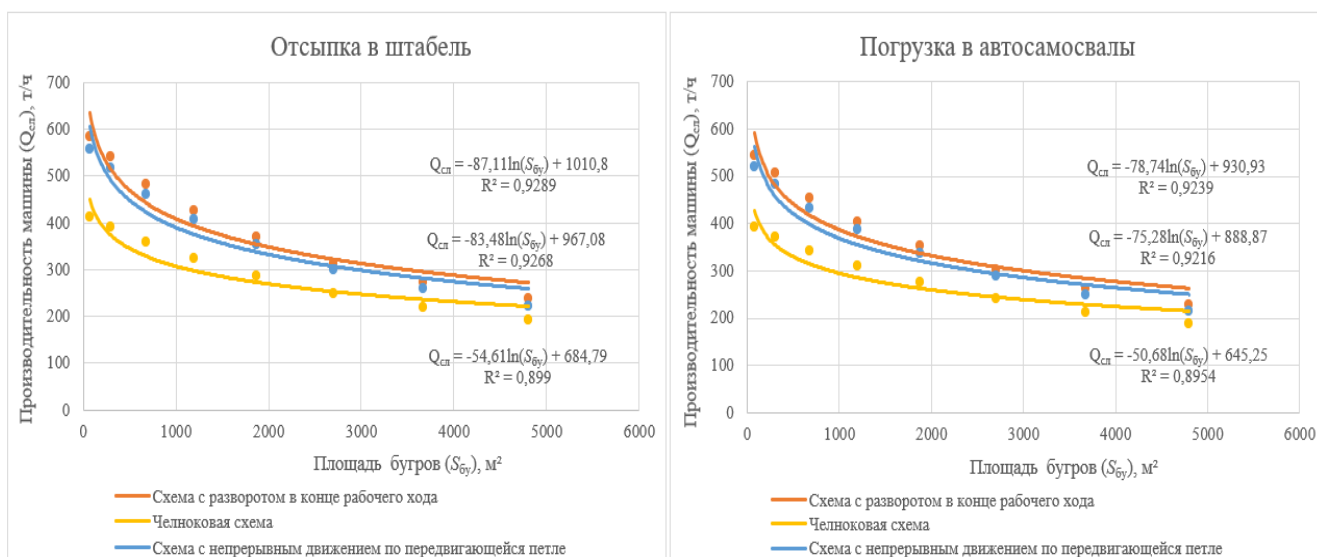


Рисунок 3.17 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от площади бугров

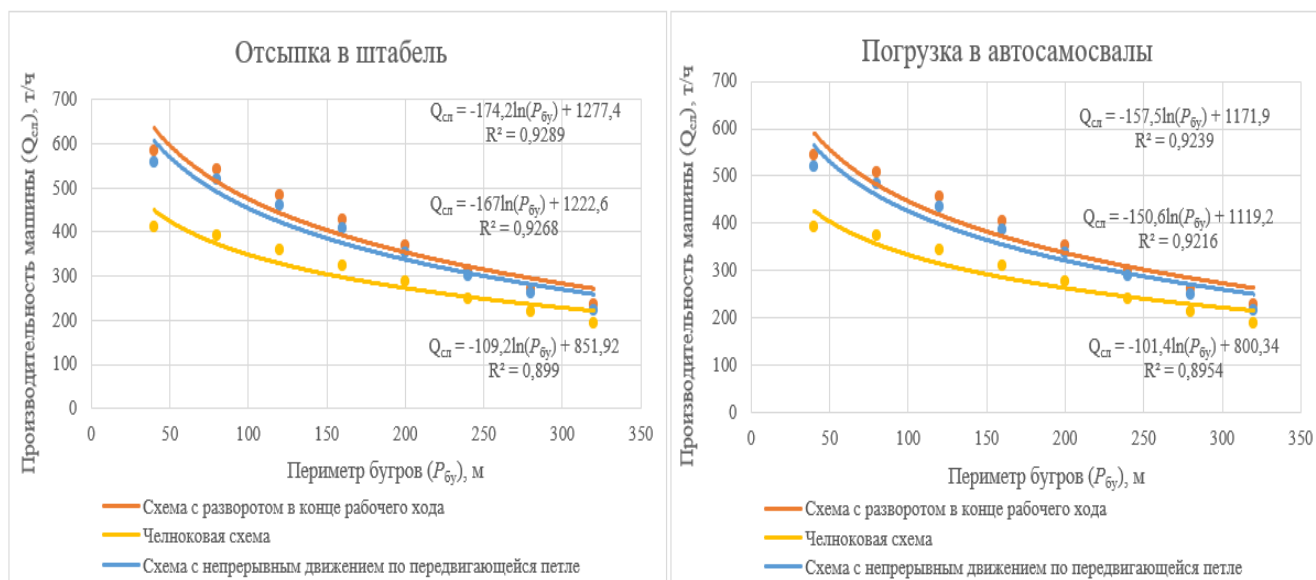


Рисунок 3.18 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от периметра бугров

Также было выполнено исследование влияния на производительность машины послойного фрезерования количества и размеров фрезеруемых бугров в слое и расстояние между ними.

Результаты расчета производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока от количества и размера фрезеруемых бугров, а также расстояния между этими буграми при отсыпке в штабель и при погрузке непосредственно в автосамосвалы представлены в таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4 – Производительность машины послойного фрезерования для различных схем при отработке слоя блока от количества и размера фрезеруемых бугров и от расстояния между этими буграми при отсыпке в штабель

L_6	$Ш_6$	n_6	L_{6y_1}	$Ш_{6y_1}$	K_1	L_{6y_2}	$Ш_{6y_2}$	K_2	L_{6y_3}	$Ш_{6y_3}$	K_3	L_{6y_4}	$Ш_{6y_4}$	K_4	L_{6y_5}	$Ш_{6y_5}$	Производительность машины послойного фрезерования, т/ч		
																	Схема с разворотом в конце рабочего хода	Челноковая схема	Схема с непрерывным движением по передвигающейся петле
300	50	1	120	40													237,09	192,37	222,87
300	50	2	60	40	10	60	40										209,41	176,01	197,29
300	50	2	120	20	10	120	20										232,7	187,23	218,82
300	50	4	120	10	10	120	10	10	120	10	10	120	10				238,54	194,21	224,2
300	50	2	120	40	10	120	40										141,39	118,36	135,37
300	50	2	120	40	20	120	40										141,36	118,34	135,34
300	50	1	105	35													271,8	218,2	260,02
300	50	3	105	10	20	105	10	20	105	15							275,08	221,78	263,16
300	50	2	105	20	20	105	15										267,35	213,67	255,78
300	50	2	105	35	20	105	35										169,45	141,32	162,21
300	50	2	45	15	10	45	15										386,37	305,33	369,37
300	50	2	45	15	20	45	15										386,18	305,21	369,19
300	50	3	45	15	20	45	15	20	45	15							336,7	274,04	313,99

Продолжение таблицы 3.4

300	50	2	30	10	20	30	10										474,83	359,83	453,69
300	50	2	30	10	50	30	10										473,98	359,34	452,88
300	50	2	30	10	100	30	10										472,56	358,52	451,53
300	50	2	30	10	150	30	10										471,16	357,72	450,19
300	50	1	75	25													369,88	287,08	353,64
300	50	5	75	5	10	75	5	10	75	5	10	75	5	10	75	5	368,05	285,97	351,9
300	50	5	75	5	20	75	5	20	75	5	20	75	5	20	75	5	367,37	285,56	351,24
300	50	4	75	5	30	75	5	30	75	5	30	75	5				399,03	305,16	381,45
300	50	2	30	10	50	45	15										425,63	330,97	406,81
300	50	2	15	5	50	60	20										422,12	328,36	403,46
300	50	1	90	30													314,09	249,13	300,4
300	50	2	90	15	20	90	15										305,92	242,02	292,6
300	50	3	90	10	20	90	10	20	90	10							315,52	250,55	301,77

где L_6 – длина блока, м; Π_6 – ширина блока, м; n_6 – количество фрезеруемых бугров на поверхности блока; L_{6y_i} – длина i -го бугра, м; Π_{6y_i} – ширина i -го бугра, м; K_i – расстояние между i -м и $i+1$ -буграми, м.

Таблица 3.5 – Производительность машины послойного фрезерования для различных схем при отработке слоя блока от количества и размера фрезеруемых бугров и от расстояния между этими буграми при погрузке в автосамосвалы

L_6	$Ш_6$	n_6	L_{6y_1}	$Ш_{6y_1}$	K_1	L_{6y_2}	$Ш_{6y_2}$	K_2	L_{6y_3}	$Ш_{6y_3}$	K_3	L_{6y_4}	$Ш_{6y_4}$	K_4	L_{6y_5}	$Ш_{6y_5}$	Производительность машины послойного фрезерования, т/ч		
																	Схема с разворотом в конце рабочего хода	Челноковая схема	Схема с непрерывным движением по передвигающейся петле
300	50	1	120	40													229,53	187,37	215,77
300	50	2	60	40	10	60	40										203,49	171,81	191,71
300	50	2	120	20	10	120	20										225,42	182,48	211,98
300	50	4	120	10	10	120	10	10	120	10	10	120	10				230,89	189,11	217,02
300	50	2	120	40	10	120	40										138,42	116,27	132,46
300	50	2	120	40	20	120	40										138,4	116,26	132,44
300	50	1	105	35													262,17	211,96	250,5
300	50	3	105	10	20	105	10	20	105	15							265,22	215,33	253,4
300	50	2	105	20	20	105	15										258,03	207,67	246,55
300	50	2	105	35	20	105	35										165,38	138,48	158,22
300	50	2	45	15	10	45	15										368,05	293,78	351,41
300	50	2	45	15	20	45	15										367,88	293,67	351,25
300	50	3	45	15	20	45	15	20	45	15							322,45	264,52	300,68

Продолжение таблицы 3.5

300	50	2	30	10	20	30	10										447,72	344,04	427,38
300	50	2	30	10	50	30	10										446,96	343,59	426,66
300	50	2	30	10	100	30	10										445,7	342,85	425,46
300	50	2	30	10	150	30	10										444,45	342,11	424,27
300	50	1	75	25													352,9	276,74	336,85
300	50	5	75	5	10	75	5	10	75	5	10	75	5	10	75	5	351,24	275,72	335,26
300	50	5	75	5	20	75	5	20	75	5	20	75	5	20	75	5	350,62	275,33	334,67
300	50	4	75	5	30	75	5	30	75	5	30	75	5				379,35	293,51	362,15
300	50	2	30	10	50	45	15										403,72	317,57	385,33
300	50	2	15	5	50	60	20										400,55	315,16	382,32
300	50	1	90	30													301,53	241,17	288,08
300	50	2	90	15	20	90	15										294	234,5	280,91
300	50	3	90	10	20	90	10	20	90	10							302,86	242,5	289,35

При моделировании работы машин послойного фрезерования при разработке в целом блока также исследовалось влияние на производительность как отдельных факторов, так и их комбинации. Было выполнено моделирование всех вариантов, рассмотренных ранее при моделировании работы фрезерования слоя, указанных в матрице вариантов, представленной в таблице 3.3, а также все эти варианты были рассмотрены с учетом фактора мощности блока.

Установленные в результате моделирования зависимости производительности машин послойного фрезерования при разработке блока от длины, ширины и площади блока, прочности бокситов, площади и периметра бугров представлены в виде графиков на рисунках 3.19–3.28.

- **Условие 1:** машина послойного фрезерования работает в пределах блока, где прочность боксита не изменяется.

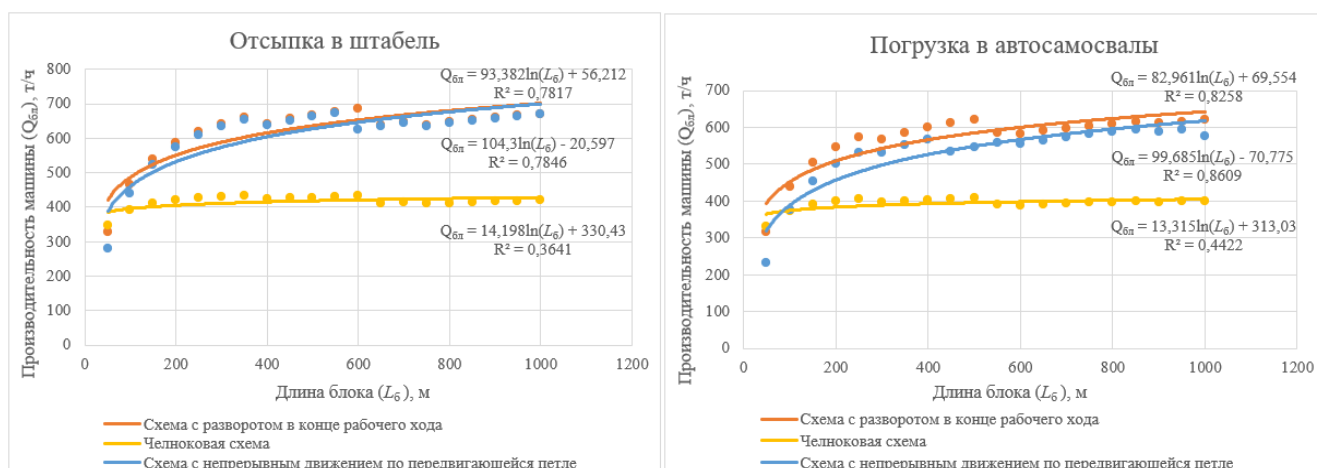


Рисунок 3.19 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от длины блока

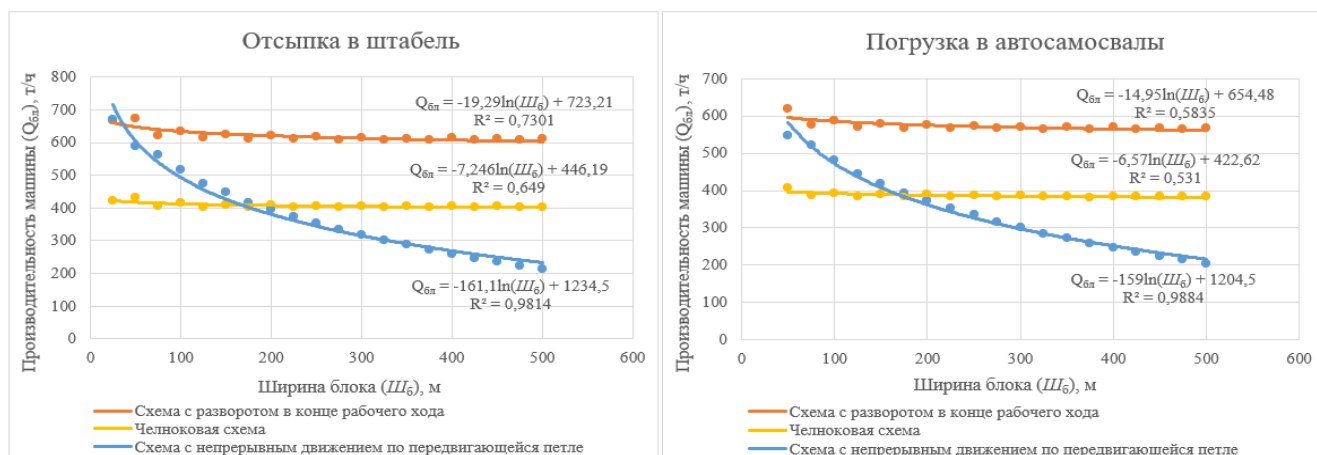


Рисунок 3.20 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от ширины блока

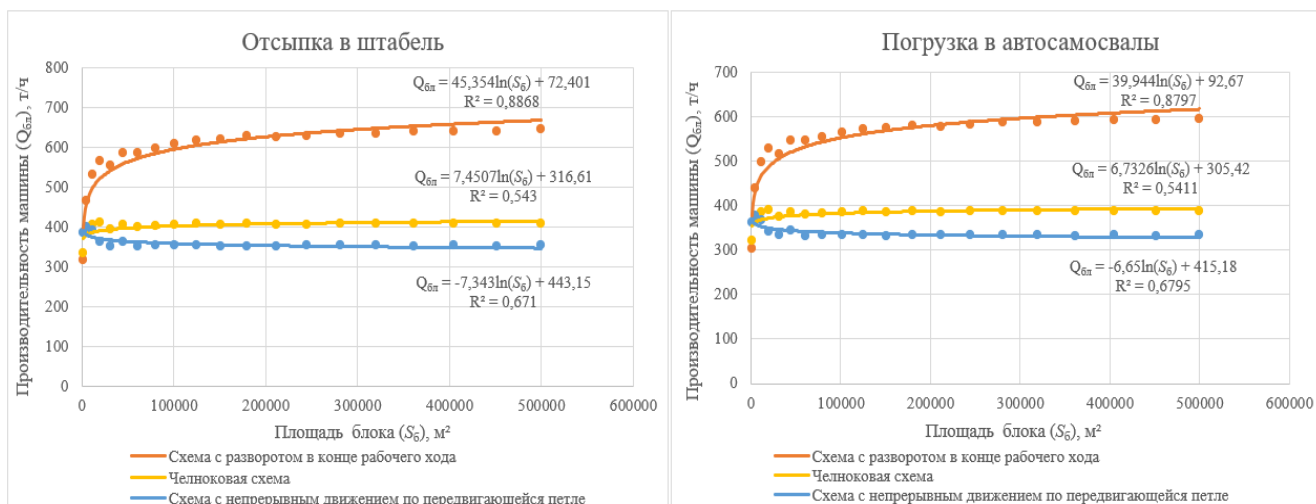


Рисунок 3.21 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от площади блока

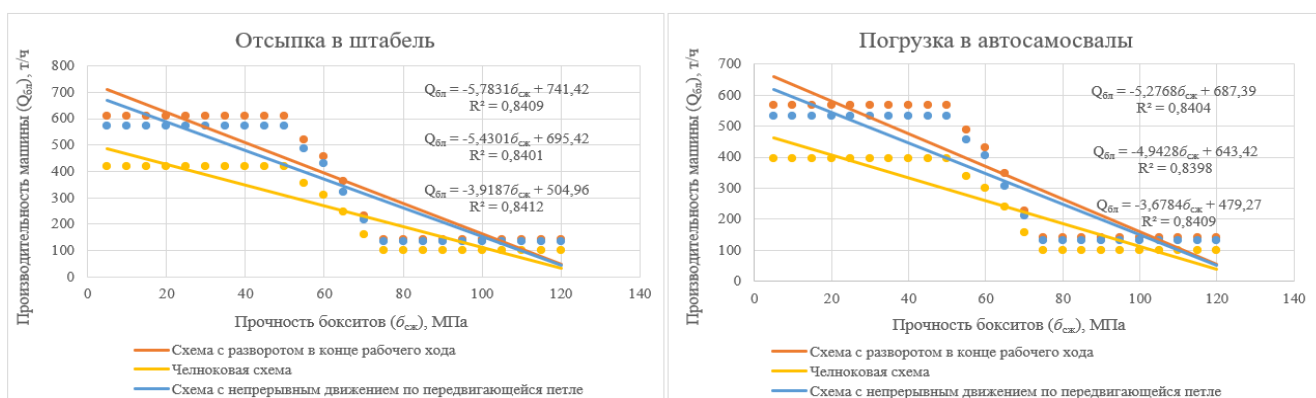


Рисунок 3.22 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке всего блока от прочности бокситов

- **Условие 2:** машина послойного фрезерования работает в пределах блока, где прочность бокситов изменяется.

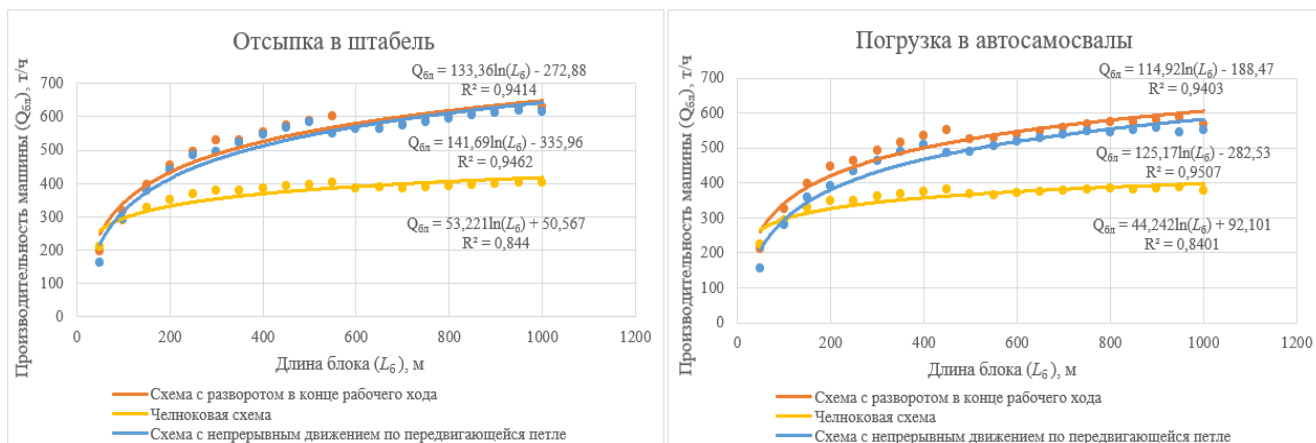


Рисунок 3.23 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от длины блока

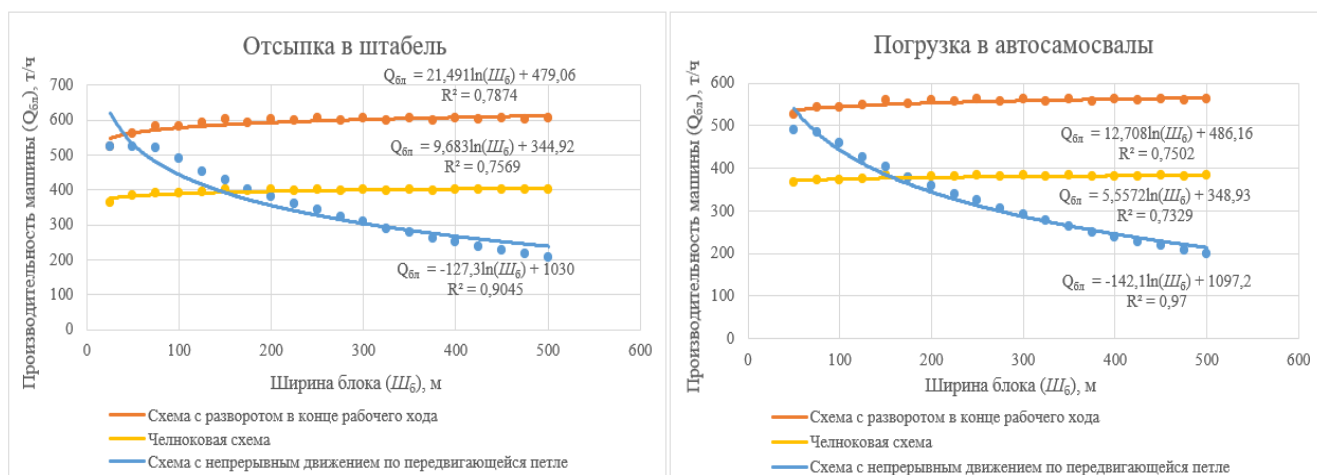


Рисунок 3.24 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от ширины блока

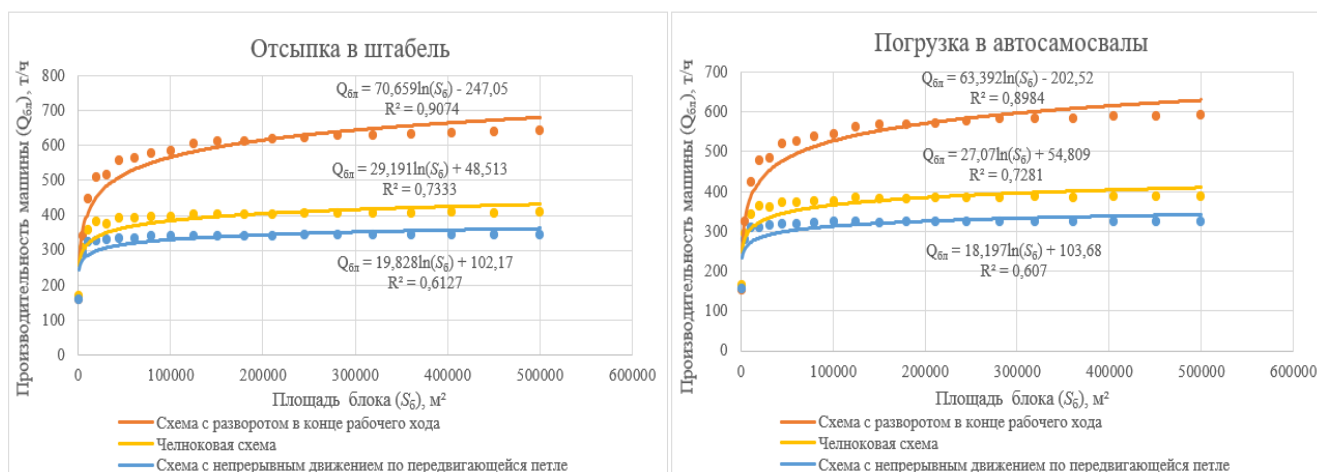


Рисунок 3.25 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от площади блока

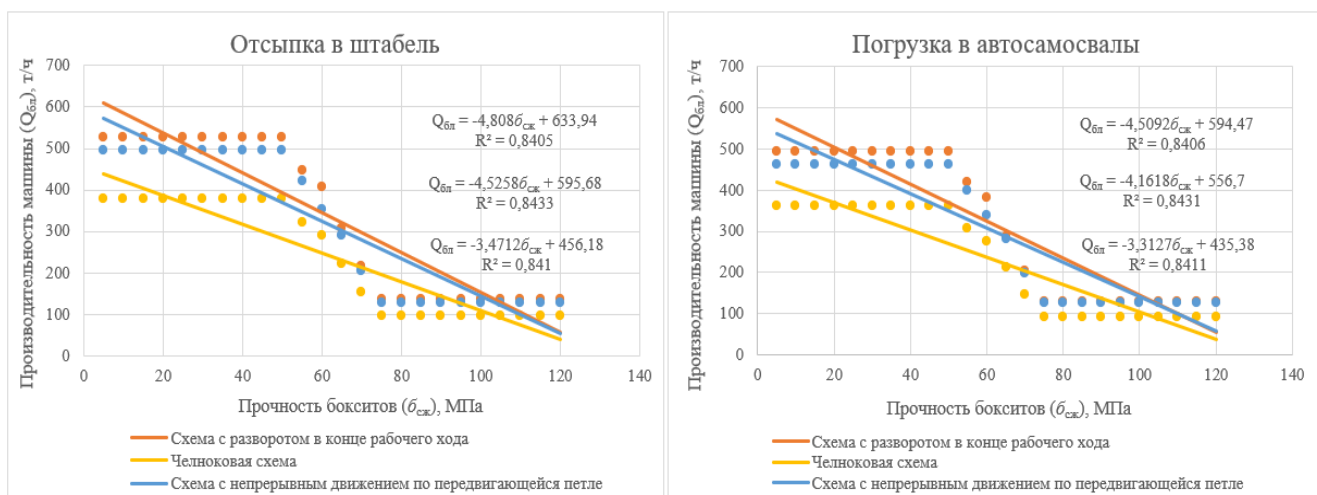


Рисунок 3.26 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при отработке всего блока от прочности бокситов

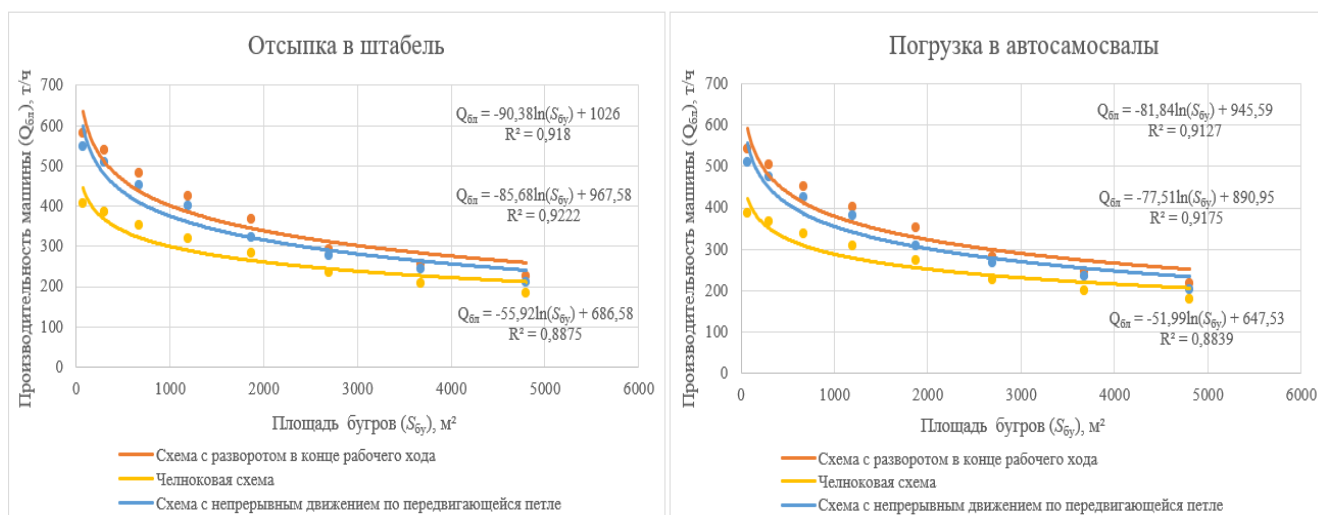


Рисунок 3.27 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от площади бугров

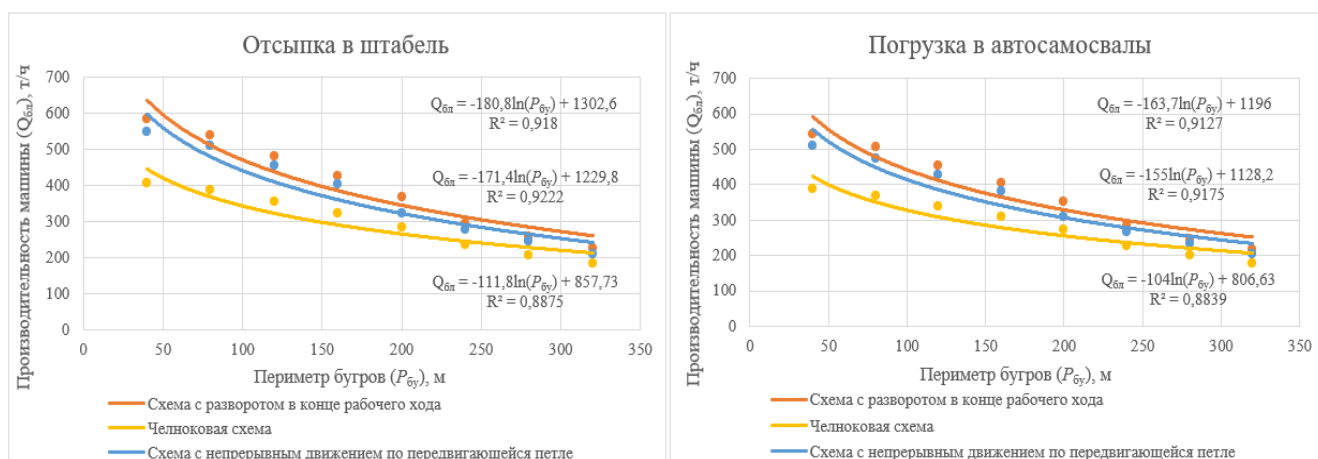


Рисунок 3.28 – Графики зависимости производительности машины послойного фрезерования при разработке всего блока от периметра бугров

На основании результатов моделирования работы машины послойного фрезерования в слое блока и отработки блока в целом можно сделать следующие выводы:

- с увеличением длины блока производительность машины послойного фрезерования при работе по схемам с разворотом в конце рабочего хода и с непрерывным движением по передвигающейся петле возрастает быстрее, чем при работе по челноковой схеме;
- влияние ширины блока на производительность машины послойного фрезерования при работе по схеме с разворотом в конце рабочего хода и челноковой схеме незначительно, а при работе по схеме с непрерывным движением

по передвигающейся петле увеличение ширины блока ведет к существенному уменьшению производительности машины послойного фрезерования;

- увеличение площади разрабатываемого блока ведет к увеличению производительности машины послойного фрезерования при работе по схеме с разворотом в конце рабочего хода, при этом при работе по схеме с непрерывным движением по передвигающейся петле и по челноковой схеме производительность машины послойного фрезерования увеличивается медленней;

- производительность машины послойного фрезерования обратно пропорциональна прочности бокситов при одноосном сжатии;

- увеличение площади, периметра бугров их количества, как и расстояния между буграми, ведет к уменьшению производительности машины послойного фрезерования.

3.4 Обоснование рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования в условиях изменчивости прочности бокситов

В процессе математического моделирования работы машин послойного фрезерования при отработке бокситов на участках с изменчивостью прочности бокситов рассматриваются все возможные варианты схем отработки слоя с заданными параметрами (длина, ширина и характеристика неровностей) и определяется производительность машины для каждого варианта.

На основе результатов расчета производительности выбирался лучший вариант схемы отработки слоя при заданных технологических условиях (ограничениях). Критерием выбора лучшего варианта является наибольшая (максимальная) производительность.

Метод вариантов не позволяет получить строгий минимум (максимум), поэтому в работе использовано понятие рациональная производительность.

В результате моделирования было сформировано множество решений, каждое из которых обеспечивает максимальную производительность машины послойного фрезерования при обработке слоя с заданными параметрами.

В целях определения факторов, влияющих на эксплуатационную производительность машины послойного фрезерования, и установления ее рационального значения был выполнен анализ полученного множества решений в статистическом пакете Statgraphics Centurion. Анализ проводился с применением следующих методов множественной регрессии: линейная, полиномиальная, экспоненциальная и мультипликативная степенная (таблица 3.6). Каждая зависимость этих регрессий была оценена на основе ее коэффициента детерминации (R^2) и средней абсолютной процентной погрешности (MAPE).

Таблица 3.6 – Значения R^2 и MAPE методов множественной регрессии при установке зависимости

Методы множественной регрессии	При отсыпке в штабель		При погрузке в автосамосвалы	
	R^2	MAPE	R^2	MAPE
Линейная	0,7506	21,91 %	0,7501	20,59 %
Полиномиальная	0,7942	19,03 %	0,7931	17,97 %
Экспоненциальная	0,8304	17,28 %	0,8271	16,34 %
Мультипликативная степенная	0,8954	13,64 %	0,8905	13,22 %

В результате была установлена математическая зависимость, которая наилучшим образом описывает рациональную эксплуатационную производительность машины послойного фрезерования при разработке слоя блока в условиях изменчивости прочности породы, зависящую от её технической производительности, длины, ширины фрезеруемого блока и площади фрезеруемых бугров на поверхности блока [123]:

- при отсыпке в штабель, $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$Q_{\text{сл}} = 0,561 \cdot Q_{\text{т}}^{0,705} \cdot \frac{L_{\text{б}}^{0,246} \cdot \text{Ш}_{\text{б}}^{0,491}}{S_{\text{буг}}^{0,277}},$$

где $Q_{\text{т}}$ – техническая производительность машины послойного фрезерования по породам с наименьшей прочностью в пределах фрезеруемого слоя, м³/ч; $L_{\text{б}}$ – длина блока, м; $\text{Ш}_{\text{б}}$ – ширина блока, м; $S_{\text{буг}}$ – площадь бугров (неровностей), м².

Для установленной зависимости: коэффициент детерминации 0,8954. Средняя абсолютная процентная погрешность = 13,64 %.

- при погрузке в автосамосвалы, м³/ч:

$$Q_{\text{сл}} = 0,592 \cdot Q_{\text{т}}^{0,698} \cdot \frac{L_{\text{б}}^{0,242} \cdot \text{Ш}_{\text{б}}^{0,459}}{S_{\text{буг}}^{0,264}}. \quad (3.22)$$

Коэффициент детерминации 0,8905, средняя абсолютная процентная погрешность = 13,22 %.

Данные величины коэффициента детерминации и средней абсолютной процентной погрешности свидетельствуют о высокой прогностической способности и хорошей точности модели [124,125].

Графики рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования представлены на рисунке 3.29.

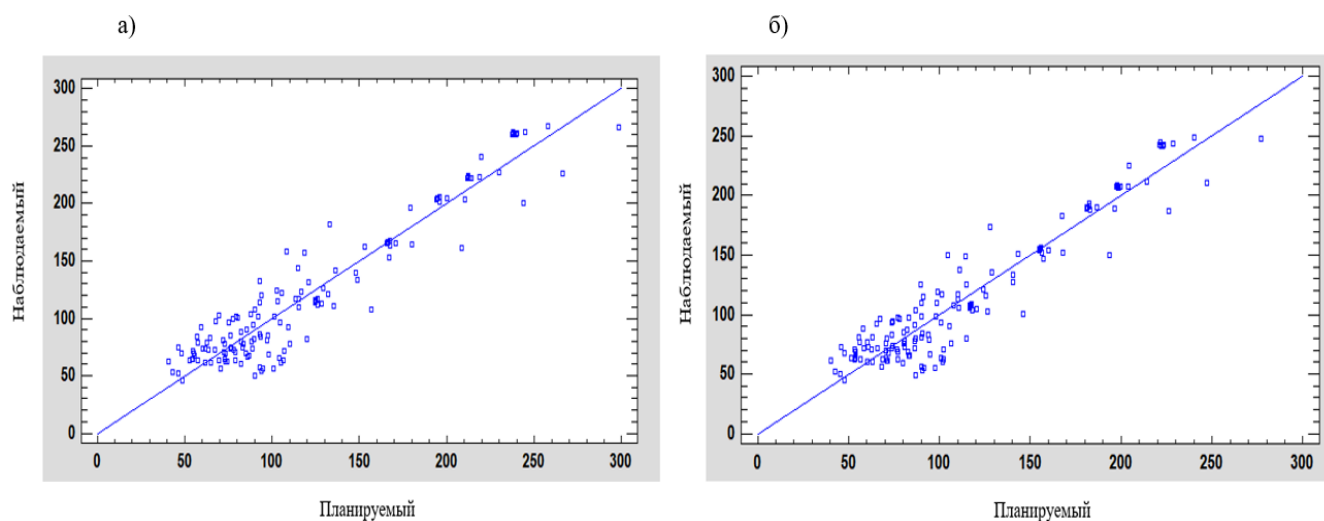


Рисунок 3.29 – Графики рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования:

а – при отсыпке в штабель; *б* – при погрузке в автосамосвалы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что методом мультипликативной степенной регрессии установлена нелинейная степенная зависимость рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования от её технической производительности, длины и ширины фрезеруемого блока, площади повторно фрезеруемых неровностей на поверхности блока.

Выводы по третьей главе

1) Установлены аналитические зависимости для расчёта производительности машин послойного фрезерования в различных условиях их работы.

2) Разработаны математические модели работы машин послойного фрезерования в различных условиях работы для определения их технической и эксплуатационной производительности при фрезеровании слоя блока и всего блока.

3) Установлены зависимости производительности машин послойного фрезерования при отработке слоя блока и разработке всего блока от длины, ширины и площади блока, прочности бокситов, площади и периметра бугров. Было установлено влияние на производительность машины послойного фрезерования при отработке слоя блока количества и размеров фрезеруемых бугров в слое и расстояния между ними.

4) Установлена зависимость рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования от её технической производительности, длины, ширины фрезеруемого блока и площади фрезеруемых бугров на поверхности блока.

5) Проведенные исследования и полученные результаты позволили сформулировать первое научное положение: методом мультипликативной степенной регрессии установлена нелинейная степенная зависимость рациональной эксплуатационной производительности машины послойного

фрезерования от её технической производительности, длины и ширины фрезеруемого блока, площади повторно фрезеруемых неровностей на поверхности блока.

4. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ БОКСИТОВЫХ РУД МАШИНАМИ ПОСЛОЙНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

4.1 Обоснование способа погрузки автосамосвала

При создании математической модели работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования была предусмотрена возможность моделирования двух способов погрузки автосамосвала.

- Первый способ заключается в погрузке пород в автосамосвал непосредственно машиной послойного фрезерования посредством разгрузочного конвейера. При реализации данного способа погрузки комплекс оборудования состоит из машины послойного фрезерования и автосамосвалов.

- Второй способ заключается в погрузке пород в автосамосвал погрузчиком из штабеля. Штабель формируется машиной послойного фрезерования либо боковой отсыпкой горной массы разгрузочным конвейером, либо по ходу движения комбайна сзади. При реализации данного способа погрузки комплекс оборудования состоит из машины послойного фрезерования, погрузчика и автосамосвалов.

Эксплуатационная производительность комплекса оборудования при первом способе погрузки автосамосвалов рассчитывалась по следующей формуле, т/ч:

$$Q_{\text{компл}} = \frac{60 \cdot q_a^{\Phi} \cdot n_a \cdot K_{\text{и}}}{t_p + (t_{\text{за}} + t_{\text{п}}) \cdot (n_a - 1)}, \quad (4.1)$$

где q_a^{Φ} – фактическая масса породы в кузове автосамосвала, т; n_a – количество автосамосвалов; $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования рабочего времени в течение смены; t_p – продолжительность рейса автосамосвала, мин; $t_{\text{за}}$ – время обмена автосамосвалов при установке для погрузки, мин; $t_{\text{п}}$ – время погрузки автосамосвала, мин.

Эксплуатационная производительность комплекса оборудования при втором способе погрузки автосамосвалов рассчитывалась по следующей формуле, т/ч:

$$Q_{\text{компл}} = \frac{60 \cdot q_a^\phi \cdot n_a \cdot K_{\text{и}}}{t_o + t_p + (t_{\text{за}} + t_{\text{п}}) \cdot (n_a - 1)}, \quad (4.2)$$

где t_o – время ожидания для погрузчика, связанное с его простоем в связи с созданием первоначального фронта работ по отгрузке из штабеля, мин.

Цель математического моделирования – установление аналитических зависимостей, позволяющих определять максимальную эксплуатационную производительность комплекса оборудования для заданных условий:

$$Q_{\text{компл}} = f(T_{\text{пр}}, T_{\text{пр}}^b, T_{\text{ож}}) \rightarrow \max, \quad (4.3)$$

где $Q_{\text{компл}}$ – эксплуатационная производительность выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования, т/ч; $T_{\text{пр}}$ – время разворота, поворота и холостого хода машины послойного фрезерования при ее перемещении к началу новой заходки при отработке слоя блока, мин; $T_{\text{пр}}^b$ – общее время разворота, поворота и холостого хода машины послойного фрезерования при ее перемещении к началу новой заходки при отработке бугров, мин; $T_{\text{ож}}$ – время ожидания для машины послойного фрезерования, связанное с отсутствием автосамосвала на пункте ожидания погрузки, мин.

Ограничительные условия модели:

$$\begin{cases} h_{\phi \min} \leq h_{\phi i} \leq h_{\phi \max} \\ b_{\phi \min} \leq b_{\phi i} \leq b_{\phi \max} \\ V_{\phi \min} \leq V_{\phi i} \leq V_{\phi \max}, \\ n_a \in N, 1 \leq n_a \leq n_a^{\text{pa}} \\ S_{6y} < S_6 \end{cases} \quad (4.4)$$

где $h_{\phi_{\min}}$ – минимальная глубина фрезерования машины послойного фрезерования, м; h_{ϕ_i} – глубина фрезерования i -го участка, м; $h_{\phi_{\max}}$ – максимальная глубина фрезерования машины послойного фрезерования, м; $b_{\phi_{\min}}$ – минимальная ширина фрезерования машины послойного фрезерования, м; b_{ϕ_i} – ширина фрезерования i -го участка, м; $b_{\phi_{\max}}$ – максимальная ширина фрезерования машины послойного фрезерования, м; $V_{\phi_{\min}}$ – минимальная скорость фрезерования машины послойного фрезерования, м/мин; V_{ϕ_i} – скорость фрезерования i -го участка, м/мин; $V_{\phi_{\max}}$ – максимальная скорость фрезерования машины послойного фрезерования, м/мин; n_a – количество автосамосвалов; $n_a^{\text{ра}}$ – рациональное количество автосамосвалов; $S_{\text{бу}}$ – площадь бугров, м²; $S_{\text{б}}$ – площадь блока.

Математическое моделирование работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования при отработке бокситов осуществлялось в программном пакете Microsoft Office Excel. Было выполнено исследование влияния всех факторов, указанных ранее в таблице 3.3, на производительность работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования при различных способах погрузки автосамосвалов.

В результате математического моделирования было установлено, что достижение максимальной производительности выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования при разном количестве автосамосвалов достигается при различных способах их погрузки. При низком обеспечении выемочной машины автосамосвалами максимальная производительность достигается при их погрузке машиной послойного фрезерования. При увеличении количества автосамосвалов в составе комплекса оборудования максимальная его производительность достигается при использовании погрузчика для погрузки автосамосвалов. В качестве примера на рисунках 4.1–4.6 представлены графики зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от количества автосамосвалов при различных длине блока, площади бугров и расстоянии транспортирования, подтверждающие установленную зависимость.

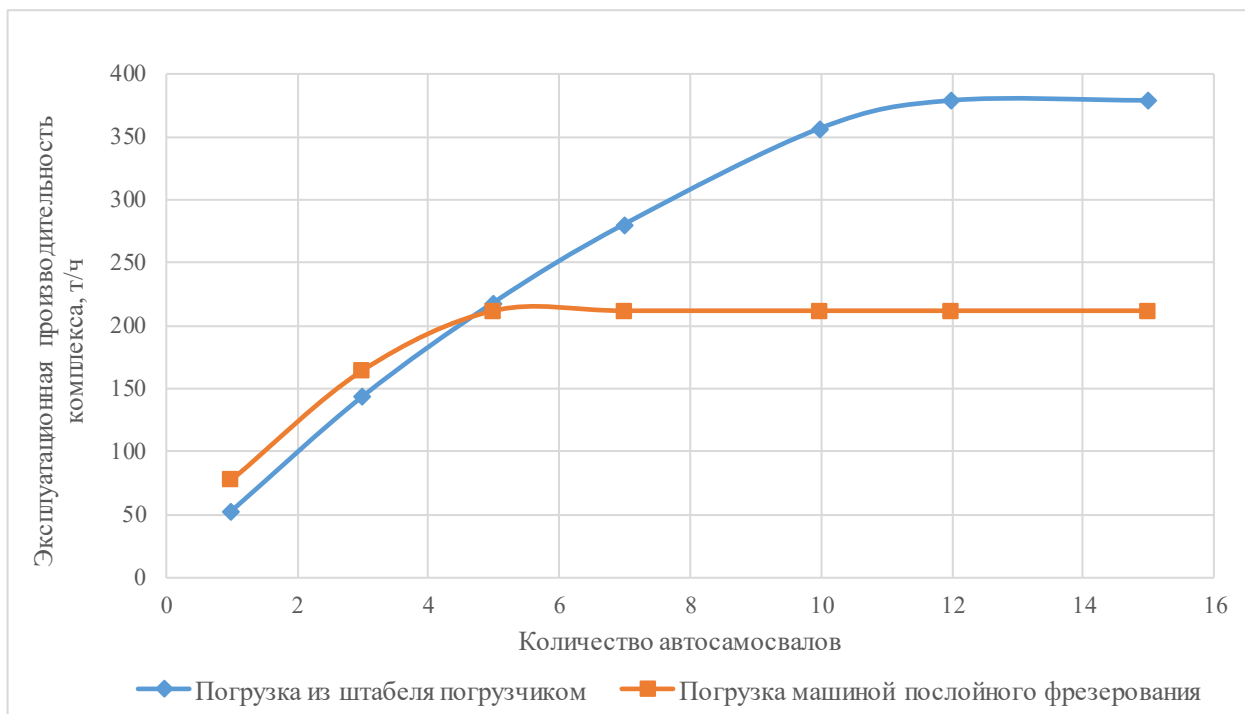


Рисунок 4.1 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от количества автосамосвалов при длине блока 250 м

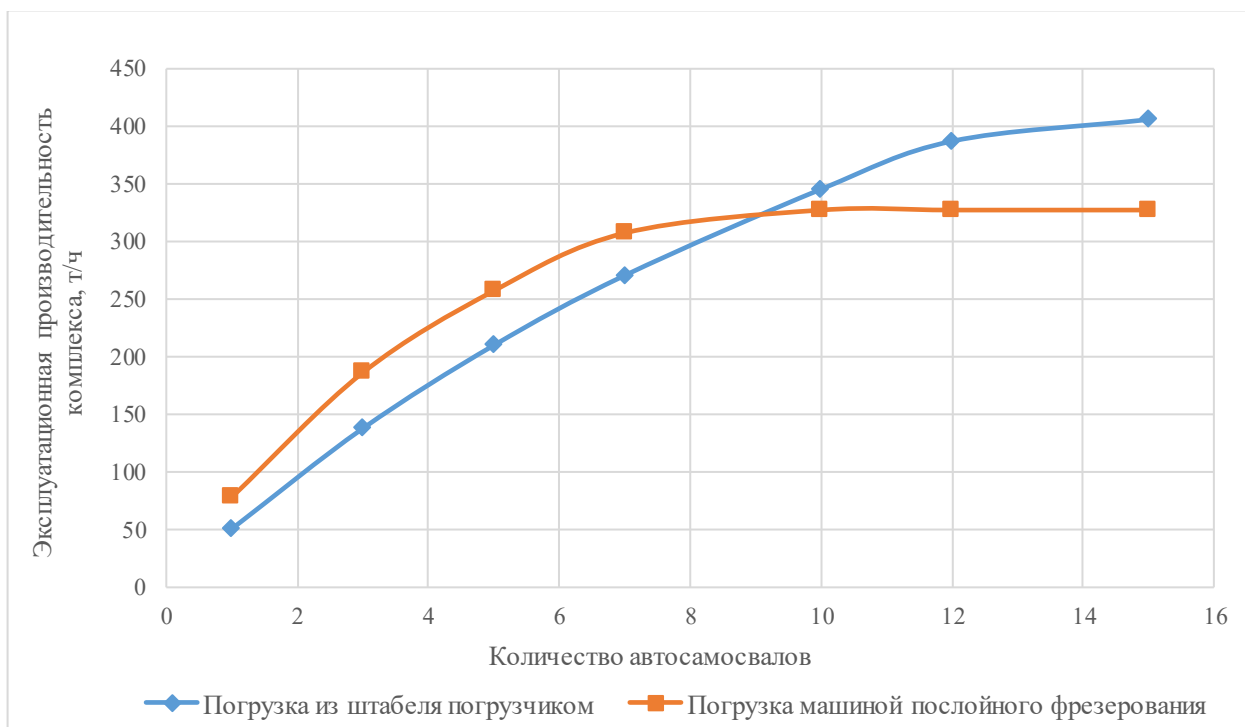


Рисунок 4.2 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от количества автосамосвалов при длине блока 1500 м

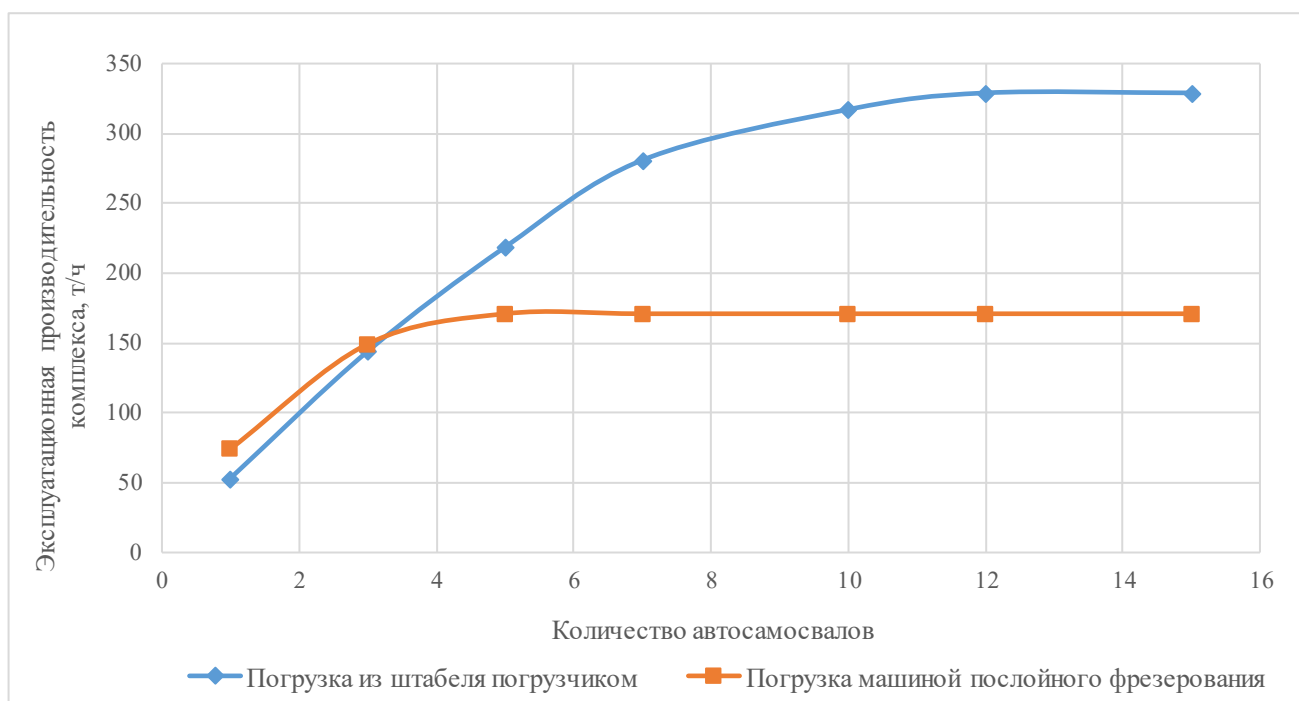


Рисунок 4.3 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от количества автосамосвалов при площади бугров 2700 м²

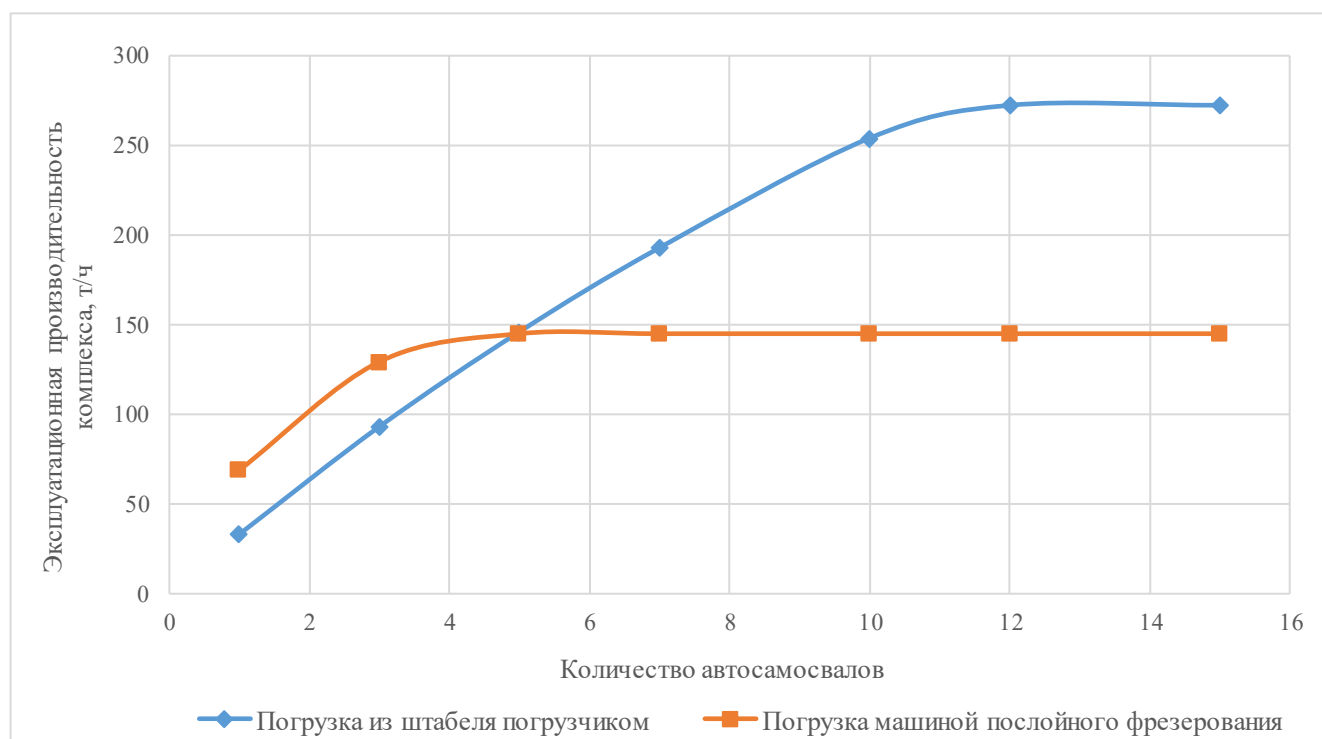


Рисунок 4.4 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от количества автосамосвалов при площади бугров 4800 м²

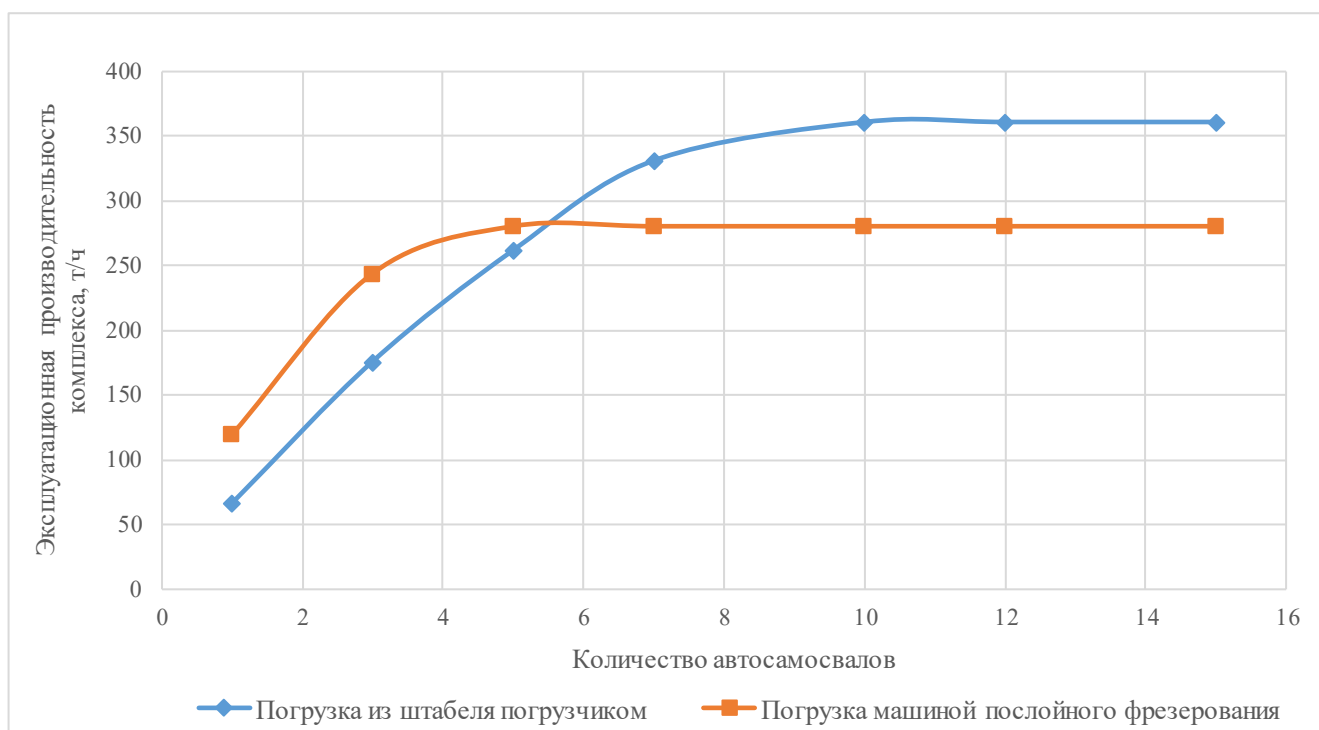


Рисунок 4.5 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от количества автосамосвалов при расстоянии транспортирования 4 км

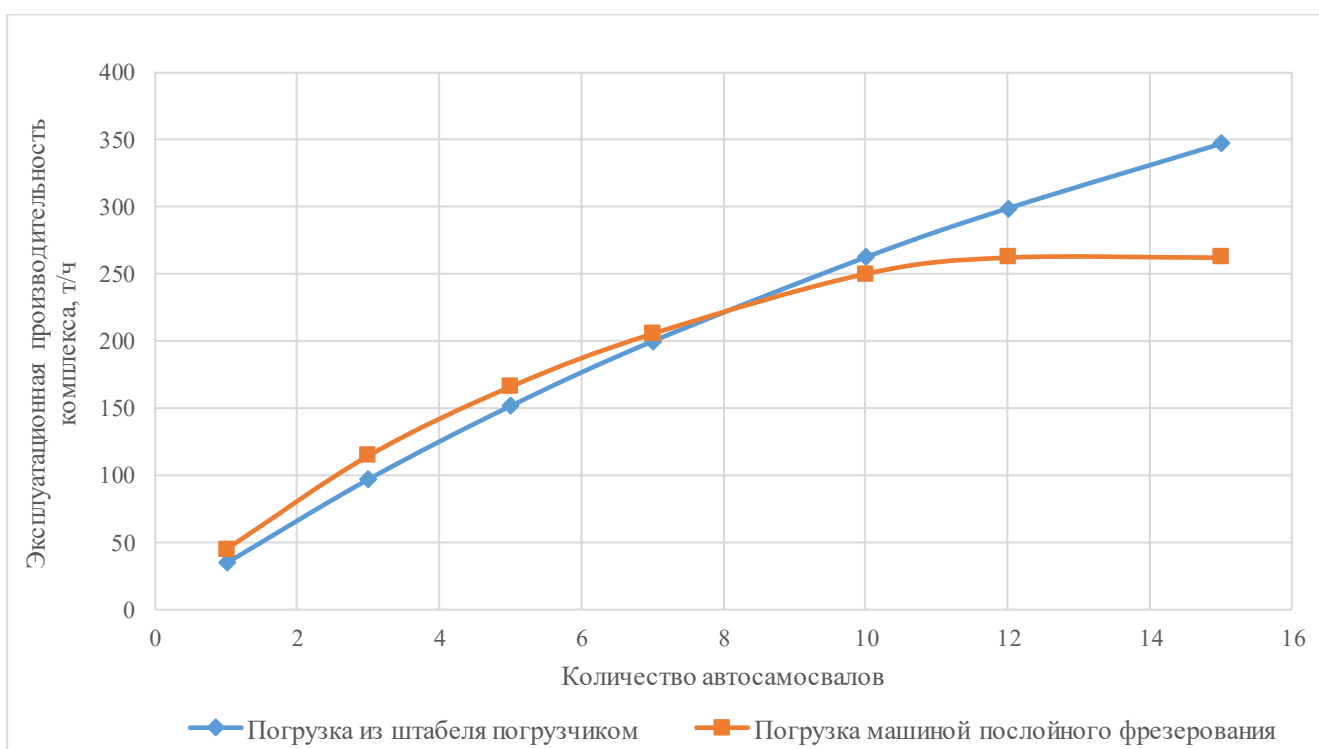


Рисунок 4.6 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от количества автосамосвалов при расстоянии транспортирования 15 км

На основании полученных результатов было предложено при расчете максимальной производительности комплекса оборудования использовать показатель способа погрузки $\Pi_{\text{в}}$, учитывающий установленную зависимость способа погрузки автосамосвала от продолжительности рейса автосамосвала, времени обмена автосамосвалов при погрузке, времени погрузки автосамосвала, ожидания погрузчика при создании первоначального фронта работ, количества автосамосвалов в комплексе оборудования.

Показатель рассчитывается по следующей формуле:

$$\Pi_{\text{в}} = \frac{[t_{\text{р}}^{\text{ав}} + (t_{3\text{а}}^{\text{ав}} + t_{\text{п}}^{\text{ав}}) \cdot (n_{\text{а}}^{\text{ав}} - 1)]}{[t_{\text{о}} + t_{\text{р}}^{\text{шт}} + (t_{3\text{а}}^{\text{шт}} + t_{\text{п}}^{\text{шт}}) \cdot (n_{\text{а}}^{\text{шт}} - 1)]} \cdot \frac{n_{\text{а}}^{\text{шт}}}{n_{\text{а}}^{\text{ав}}}, \quad (4.5)$$

где $t_{\text{р}}^{\text{ав}}$ и $t_{\text{р}}^{\text{шт}}$ – продолжительность рейса автосамосвала при погрузке пород непосредственно в автосамосвалы и погрузке из штабеля погрузчиком, мин; $t_{3\text{а}}^{\text{ав}}$ и $t_{3\text{а}}^{\text{шт}}$ – время обмена автосамосвалов при установке для погрузки, при погрузке горных пород в автосамосвал машиной послойного фрезерования и погрузчиком, мин; $t_{\text{п}}^{\text{ав}}$ и $t_{\text{п}}^{\text{шт}}$ – время погрузки автосамосвала машиной послойного фрезерования и погрузчиком, мин; $n_{\text{а}}^{\text{ав}}$ и $n_{\text{а}}^{\text{шт}}$ – количество автосамосвалов в комплексе оборудования при погрузке машиной послойного фрезерования и погрузчиком.

Значения $n_{\text{а}}^{\text{ав}}$ и $n_{\text{а}}^{\text{шт}}$ не должны превышать количество автосамосвалов, необходимое для непрерывной работы комплекса оборудования. То есть значения $n_{\text{а}}^{\text{ав}}$ и $n_{\text{а}}^{\text{шт}}$ должны быть меньше или равны рациональному числу автосамосвалов.

Рациональное количество автосамосвалов рассчитывается по следующей формуле:

$$n_{\text{а}}^{\text{ра}} = \frac{(T_{\text{дв}} + t_{\text{раз}} + t_{\text{м}})}{(t_{\text{п}} + t_{3\text{а}})} + 1. \quad (4.6)$$

Графики зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от показателя P_v при разных способах погрузки автосамосвалов представлены на рисунках 4.7 – 4.12.

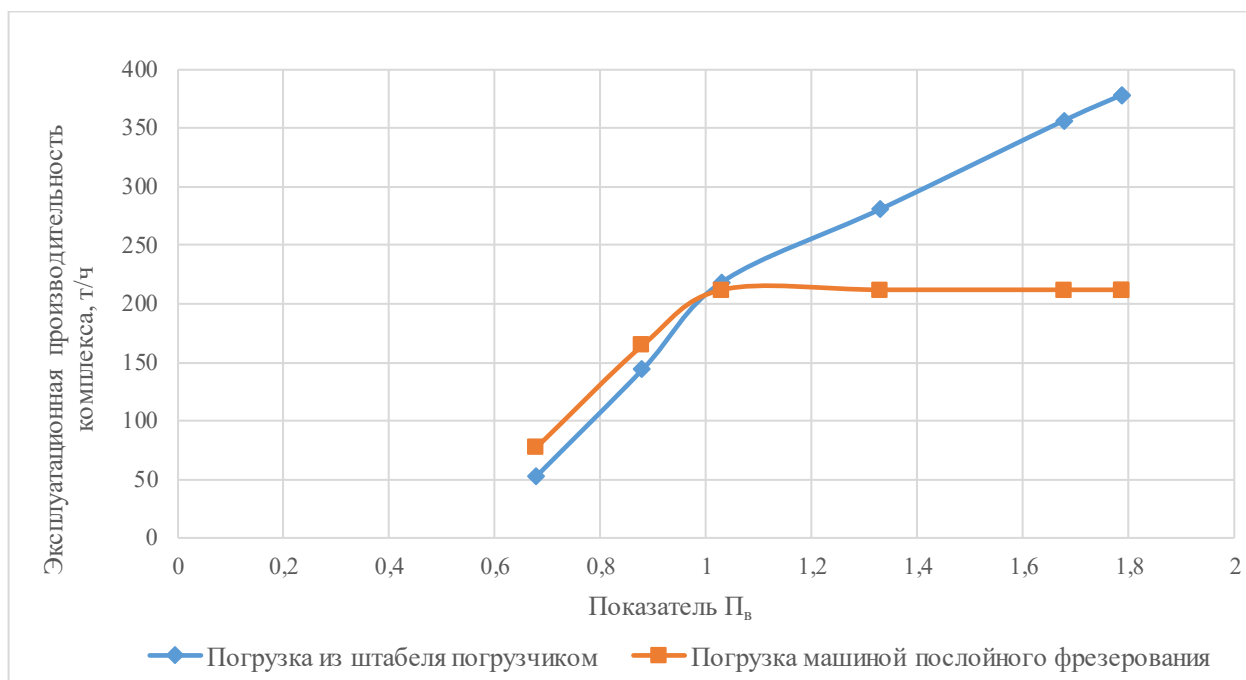


Рисунок 4.7 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от показателя P_v при длине блока 250 м

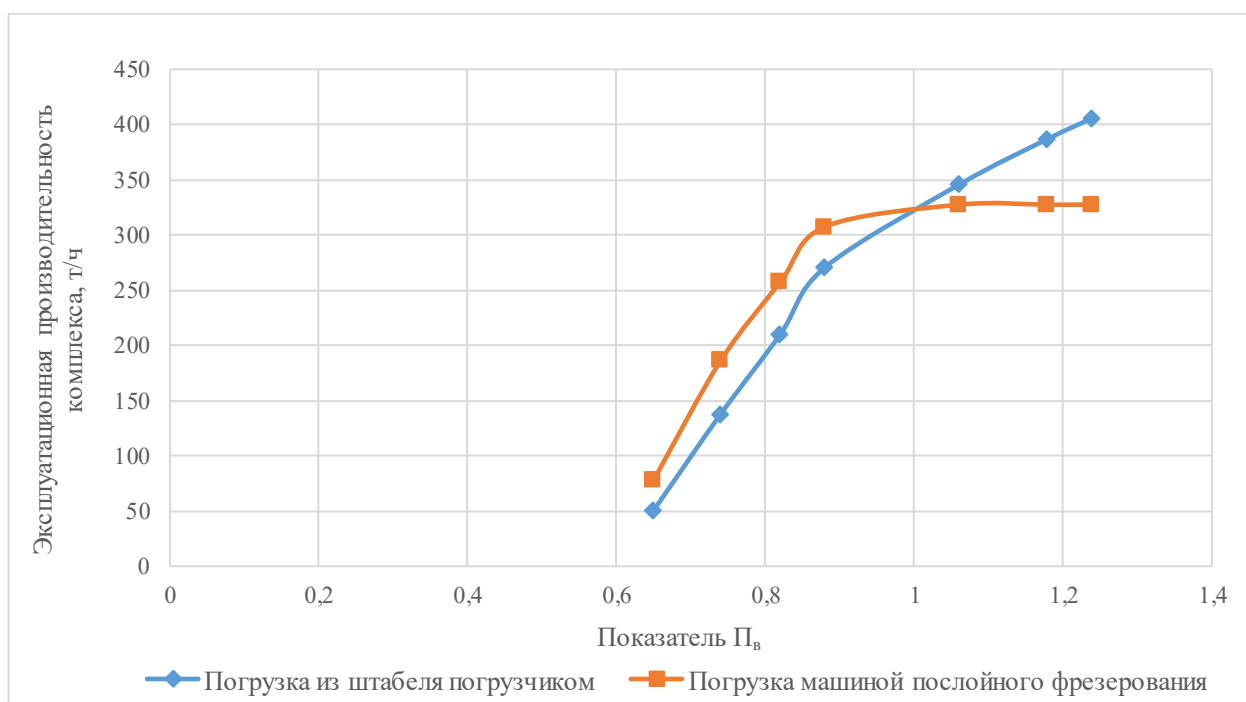


Рисунок 4.8 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от показателя P_v при длине блока 1500 м

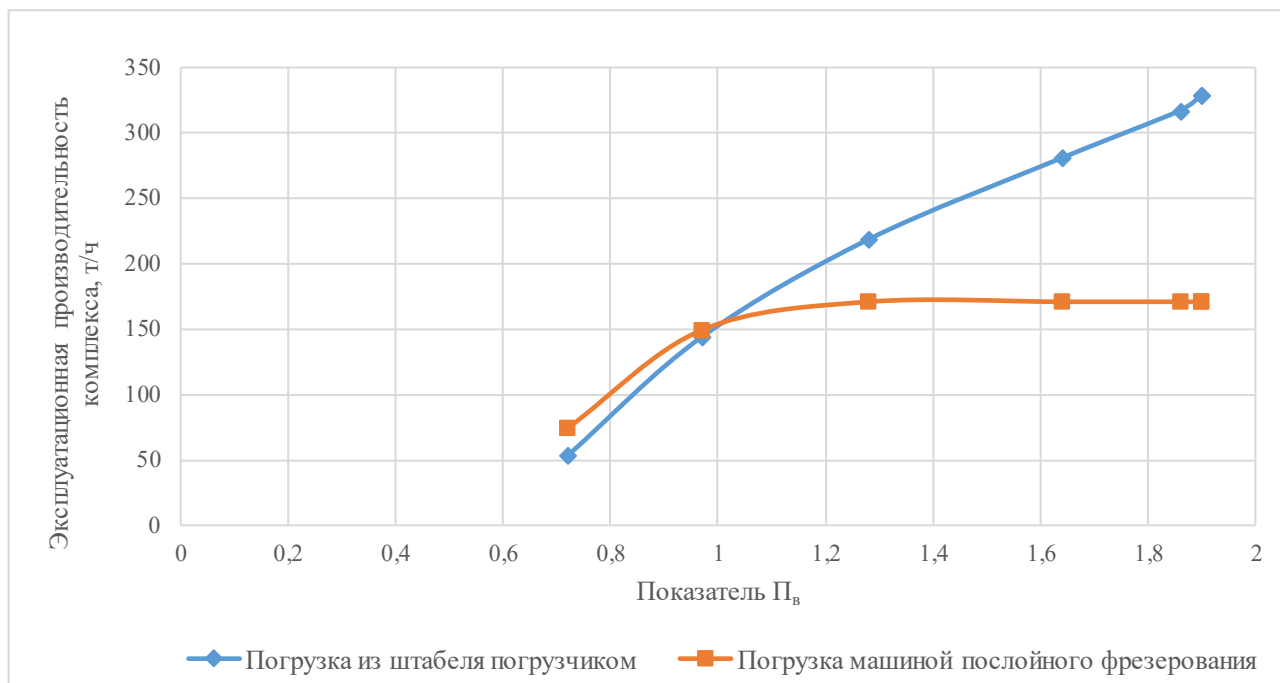


Рисунок 4.9 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от показателя P_v при площади бугров 2700 м²

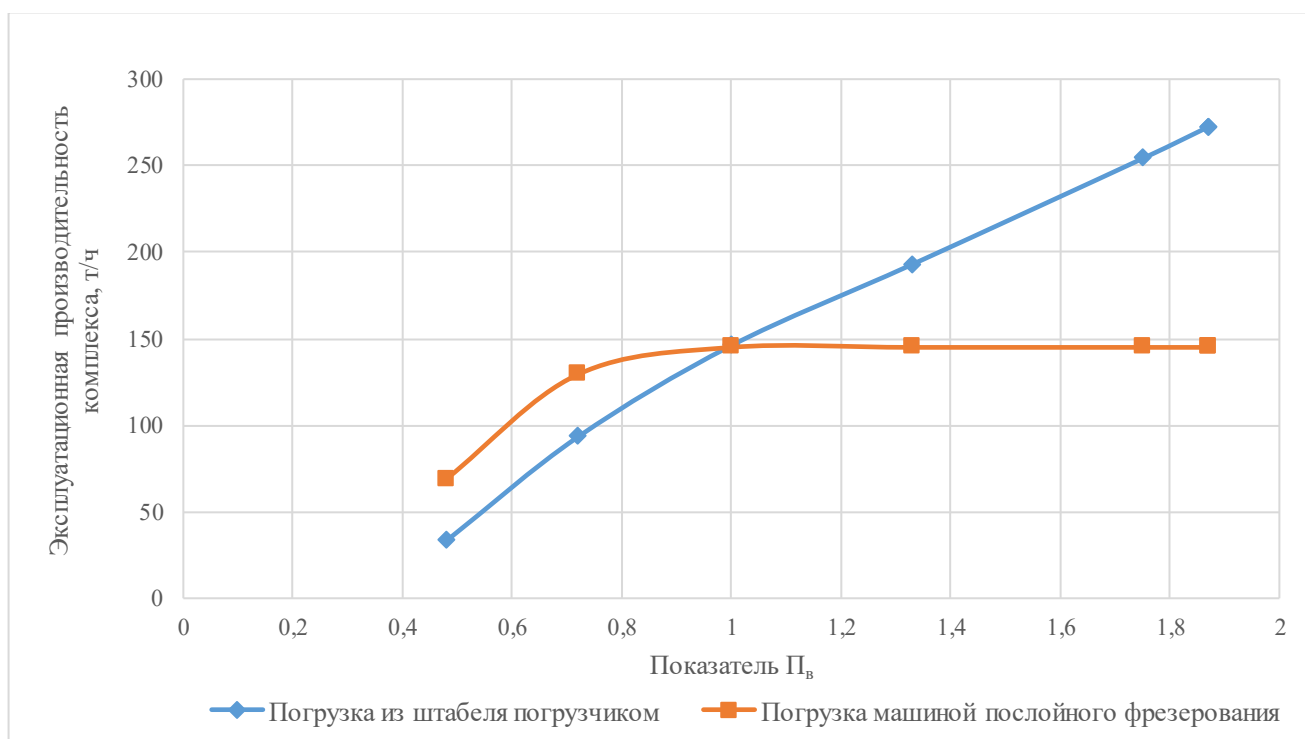


Рисунок 4.10 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от показателя P_v при площади бугров 4800 м²

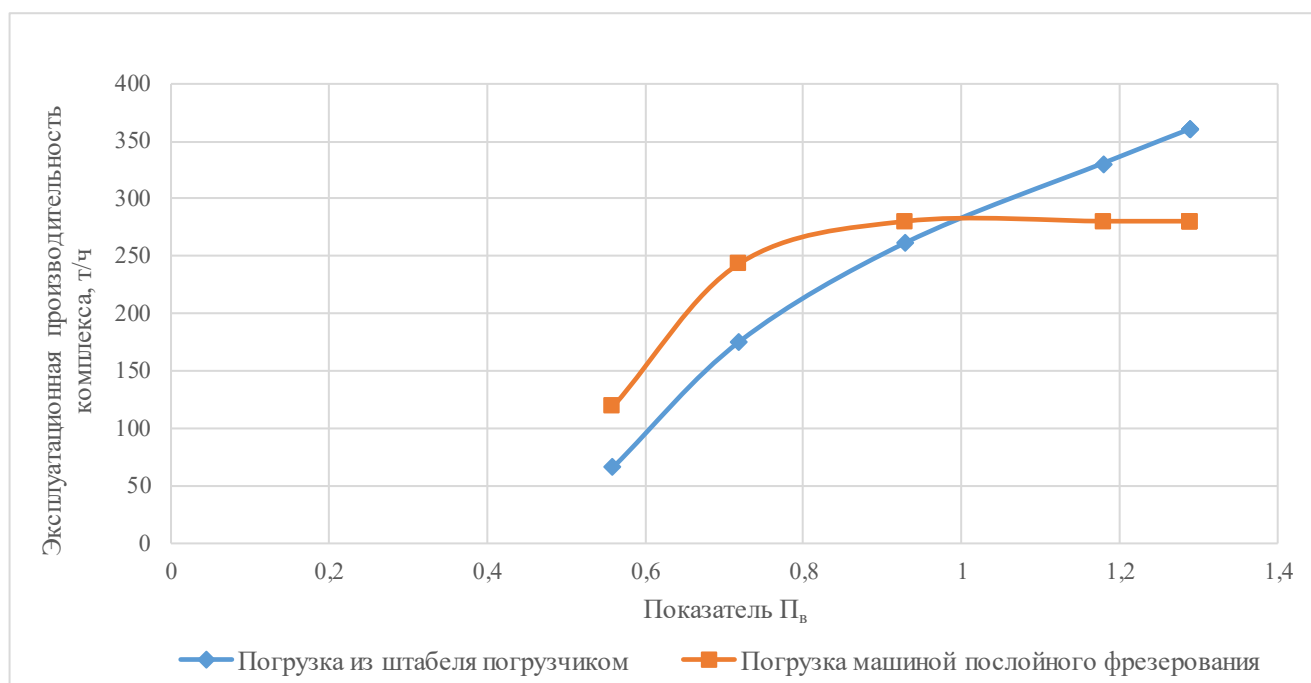


Рисунок 4.11 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от показателя P_v при расстоянии транспортирования 4 км

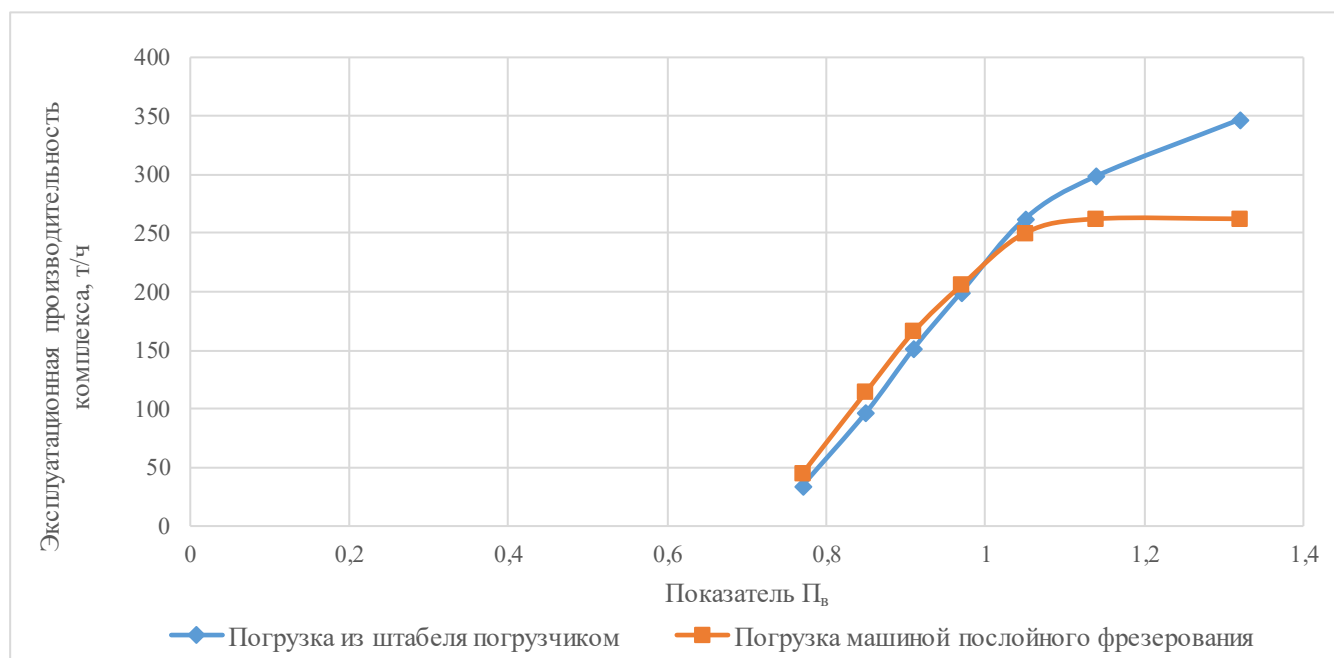


Рисунок 4.12 – График зависимости эксплуатационной производительности комплекса оборудования от показателя P_v при расстоянии транспортирования 15 км

Анализ графиков позволил сделать вывод, что при $P_v < 1$ погрузка автосамосвала должна осуществляться непосредственно машиной послойного

фрезерования, а при $P_b > 1$ – погрузчиком из сформированного машиной послойного фрезерования штабеля.

4.2 Выбор технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования

Установленные зависимости и полученные результаты позволили предложить следующую последовательность действий для выбора технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования, обеспечивающую максимальную эксплуатационную производительность [126]:

- выбирается схема отработки слоя блока;
- проверяется наличие бугров на поверхности блока после прохода машины послойного фрезерования;
- определяются пространственное распределение бугров на поверхности блока и их параметры;
- выбирается схема фрезерования бугров;
- рассчитываются показатели технологической схемы отработки блока;
- выбирается технологический комплекс (способ погрузки);
- рассчитываются удельные затраты на добычу полезного ископаемого для комплексов оборудования.

Выбор схемы отработки слоя блока зависит от общего времени непроизводительной работы машины послойного фрезерования [126]. Ее выбор осуществляется в следующей последовательности:

- определяется длина участка фрезерования, при которой время разворота в конце полосы фрезерования и время холостого хода машины послойного фрезерования для перемещения к началу новой полосы фрезерования равны;

- выбирается схема фрезерования слоя (разворот в конце полосы фрезерования или машина послойного фрезерования перемещается холостым ходом к началу новой полосы фрезерования);
- определяется ширина участка фрезерования на основе количества рабочих проходов машины послойного фрезерования;
- выбирается схема фрезерования слоя на основе сравнения затрат времени (из выбранной ранее схемы и схемы с непрерывным движением).

Длина участка фрезерования, при которой время разворота и время холостого хода машины послойного фрезерования равны, определяется по формуле, м:

$$L_{yf} = \frac{L_{раз}}{V_{раз}} \cdot V_{xx} - \left[L_k + \frac{\pi}{90^\circ} \cdot (\alpha \cdot r) \right], \quad (4.7)$$

где L_{yf} – длина участка фрезерования, при которой время разворота и время холостого хода машины послойного фрезерования равны, м.

При длине фрезеруемого блока больше, чем величина L_{yf} , выбирается схема с разворотом машины послойного фрезерования в конце рабочего хода. При длине фрезеруемого блока меньше, чем величина L_{yf} , выбирается челноковая схема отработки блока.

Сравнение схем работы с разворотом в конце рабочего хода и с непрерывным движением по передвигающейся петле осуществляется на основе сравнения общего времени, затраченного на движение при разворотах машины послойного фрезерования при работе по схеме с разворотом в конце рабочего хода и затраченного на движение при поворотах машины послойного фрезерования при работе по схеме с непрерывным движением по передвигающейся петле.

Из условия общего времени, затраченного на движение при разворотах машины послойного фрезерования при работе по схеме с разворотом в конце рабочего хода и затраченного на движение при поворотах машины послойного фрезерования при работе по схеме с непрерывным движением по передвигающейся петле, определяется ширина участка фрезерования, м:

- при нечетном количестве проходов:

$$\text{Ш}_{\text{уф}}^1 = \frac{4 \cdot L_{\text{раз}} \cdot V_{\text{пов}}}{\pi \cdot V_{\text{раз}}}, \quad (4.8)$$

где $\text{Ш}_{\text{уф}}^1$ – ширина участка фрезерования, при которой общее время, затраченное на движение при разворотах, и общее время, затраченное на движение при поворотах машины послойного фрезерования, равны, м.

- при четном количестве проходов:

$$\text{Ш}_{\text{уф}}^1 = \frac{4 \cdot L_{\text{раз}} \cdot V_{\text{пов}}}{\pi \cdot V_{\text{раз}}} - \frac{b_{\text{ф}} \cdot (n_{\text{про}} - 2)}{(n_{\text{про}} - 1)}. \quad (4.9)$$

При ширине фрезеруемого блока больше, чем величина $\text{Ш}_{\text{уф}}^1$, выбирается схема с разворотом в конце рабочего хода. При ширине фрезеруемого блока меньше, чем величина $\text{Ш}_{\text{уф}}^1$, выбирается схема с непрерывным движением по передвигающейся петле.

Сравнение схем работы с движением по челноковой схеме и с непрерывным движением по передвигающейся петле осуществляется на основе сравнения общего времени, затраченного на движение холостым ходом машины послойного фрезерования при работе по челноковой схеме и затраченного на движение при поворотах машины послойного фрезерования при работе по схеме с непрерывным движением по передвигающейся петле.

Из условия общего времени, затраченного на движение холостым ходом машины послойного фрезерования при работе по челноковой схеме и затраченного на движение при поворотах машины послойного фрезерования при работе по схеме с непрерывным движением по передвигающейся петле, определяется ширина участка фрезерования, м:

- при нечетном количестве проходов:

$$\Pi_{\text{уф}}^2 = \frac{4 \cdot L_{\text{хх}} \cdot V_{\text{пов}}}{\pi \cdot V_{\text{хх}}}, \quad (4.10)$$

где $\Pi_{\text{уф}}^2$ – ширина участка фрезерования, при которой общее время холостых ходов и общее время, затраченное на движение при поворотах машины послойного фрезерования, равны, м.

- при четном количестве проходов:

$$\Pi_{\text{уф}}^2 = \frac{4 \cdot L_{\text{хх}} \cdot V_{\text{пов}}}{\pi \cdot V_{\text{хх}}} - \frac{b_{\text{ф}} \cdot (n_{\text{про}} - 2)}{(n_{\text{про}} - 1)}. \quad (4.11)$$

При ширине фрезеруемого блока больше, чем величина $\Pi_{\text{уф}}^2$, выбирается челноковая схема. При ширине фрезеруемого блока меньше, чем величина $\Pi_{\text{уф}}^2$, выбирается схема с непрерывным движением по передвигающейся петле.

Алгоритм выбора схемы обработки слоя блока представлен в виде блок-схемы на рисунке 4.13.

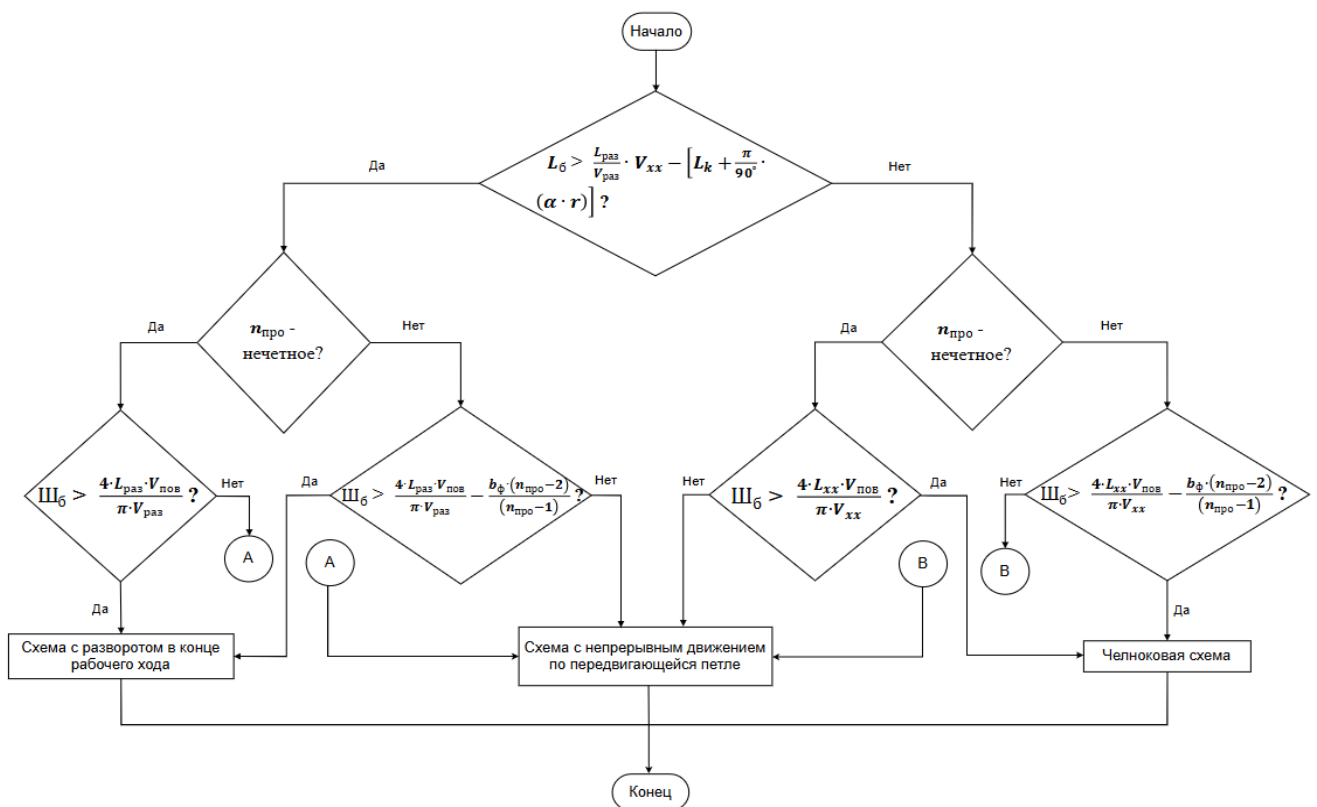


Рисунок 4.13 – Блок-схема алгоритма выбора схемы обработки слоя блока [126]

При моделировании фрезерования бугра были рассмотрены два варианта направления перемещения машины послойного фрезерования относительно направления фронта работ: продольно и поперечно.

Общее время непроизводительной работы машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM при фрезеровании бугра в зависимости от направления фрезерования приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Общее время непроизводительной работы машины послойного фрезерования Wirtgen 2200 SM при фрезеровании бугра в зависимости от направления фрезерования

Размеры бугра, м х м	Направление фрезерования	Время, мин
30х10	Продольно	65,74
30х10	Поперечно	80,7
60х20	Продольно	237,63
60х20	Поперечно	315,03
90х30	Продольно	483,05
90х30	Поперечно	599,15

Из результатов, представленных в таблице 4.1, можно сделать вывод, что при повторном фрезеровании рекомендуется фрезеровать бугор в продольном направлении.

Выбор схемы фрезерования бугров на поверхности блока, содержащего несколько бугров, зависит от параметров бугров, их расположения и расстояния между ними [126].

Для фрезерования двух и более бугров на поверхности слоя блока необходимо выбирать схему перемещения с минимальными затратами времени на все операции, связанные с перемещением машины послойного фрезерования между местами фрезерования бугров. При описании схемы перемещения машины послойного фрезерования по поверхности блока к следующему месту фрезерования бугра, согласно которой движение осуществляется по прямой, без маневрирования и изменения направления движения, далее будет использоваться

термин одновременное фрезерование бугров. Если для перемещения необходимы маневрирование, изменение направления движения и другие операции, увеличивающие время непроизводительной работы, будет использоваться термин – последовательное фрезерование бугров.

При небольших расстояниях между буграми одновременное фрезерование бугров позволяет повысить эксплуатационную производительность. Но при увеличении расстояния возрастает время на непроизводительную работу в каждом проходе машины и становится нецелесообразно применять одновременное фрезерование. Выбор одновременного фрезерования бугров при моделировании определяется условием:

$$T_{\text{пос}} > T_{\text{одн}}, \quad (4.12)$$

где $T_{\text{пос}}$ – общее время непроизводительной работы машины послойного фрезерования при фрезеровании бугров последовательно, мин; $T_{\text{одн}}$ – общее время непроизводительной работы при фрезеровании бугров одновременно, без изменения направления движения машины послойного фрезерования, мин.

Общее время непроизводительной работы машины послойного фрезерования при фрезеровании бугров последовательно рассчитывается по формуле, мин:

$$T_{\text{пос}} = \sum_{i=1}^{n_6^{\text{пос}}} \left[(T_o + T_{\text{п}}) \cdot n_{\text{про}i} + (n_{\text{про}i} - 1) \cdot T_{\text{пр}i} \right] + \sum_{i=1}^{n_6^{\text{пос}}-1} \frac{K_i}{V_{\text{xx}}}, \quad (4.13)$$

где T_o – время опускания барабана на забой, мин; $T_{\text{п}}$ – время поднятия барабана от забоя, мин; $n_{\text{про}i}$ – количество проходов машины послойного фрезерования при отработке i -го бугра; $T_{\text{пр}i}$ – время разворота, поворота и холостого хода машины послойного фрезерования при его перемещении к началу новой заходки при отработке i -го бугра, мин; $n_6^{\text{пос}}$ – количество фрезеруемых бугров на поверхности блока; K_i – расстояние между $i-1$ и i -м буграми, м.

Общее время непроизводительной работы при фрезеровании бугров одновременно рассчитывается по формуле, мин:

$$T_{\text{одн}} = (T_o + T_{\text{п}}) \cdot n_{\text{б}}^{\text{одн}} \cdot n_{\text{про}}^{\text{одн}} + (n_{\text{про}}^{\text{одн}} - 1) \cdot T_{\text{пр}}^{\text{одн}} + n_{\text{про}}^{\text{одн}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\text{б}}^{\text{одн}}-1} \frac{K_i}{V_{\text{xx}}} + T_{\text{до}}, \quad (4.14)$$

где $n_{\text{б}}^{\text{одн}}$ – количество фрезеруемых бугров одновременно; $n_{\text{про}}^{\text{одн}}$ – количество проходов машины послойного фрезерования при одновременной отработке бугров за один проход; $T_{\text{пр}}^{\text{одн}}$ – время разворота, поворота и холостого хода комбайна при его перемещении к началу новой заходки при одновременной отработке бугров; $T_{\text{до}}$ – общее время, необходимое для фрезерования оставшихся частей бугров, которые не были фрезерованы в процессе одновременного прохода через них, мин. Время для фрезерования бугров, которые не могут быть фрезерованы без изменения направления движения, рассчитывается по формуле (4.13).

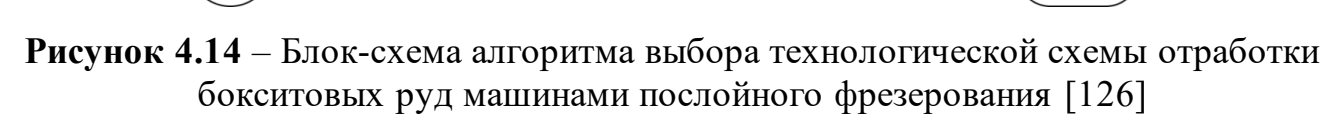
При $T_{\text{пос}} < T_{\text{одн}}$ выбирается последовательное фрезерование бугров.

При $T_{\text{пос}} = T_{\text{одн}}$ производительность комплекса при последовательном и одновременном фрезеровании одинаковая.

Выбор схем фрезерования бугра и фрезерования бугров одновременно также осуществляется на основе алгоритма, представленного на рисунке 4.13.

На основе выполненных исследований разработан алгоритм выбора технологической схемы отработки блока участка месторождения бокситовых руд машинами послойного фрезерования, основанный на минимизации затрат времени на выполнении непроизводительной работы и простои машины послойного фрезерования, использование которого за счет учета схемы повторного фрезерования неровностей на поверхности участка отработки и способа погрузки полезного ископаемого позволяет повысить эффективность разработки бокситовых месторождений.

Начало



118

4.3 Оценка эффективности предложенных решений

Оценка эффективности предложенных решений была проведена путем сравнения фактических показателей работы машин послойного фрезерования на трех различных участках разрабатываемого бокситового месторождения с расчетными показателями технологических схем, выбранных для отработки данных участков согласно разработанной методике и с учетом предложенных рекомендаций.

В таблице 4.2 представлены фактические данные по трем блокам на трех участках при отработке слоя блока.

Таблица 4.2 – Характеристика разрабатываемых блоков и применяемых технологических схем на участках месторождения [126]

Показатели	Блок а1 (Участок 1)	Блок с2 (Участок 2)	Блок с3 (Участок 3)
Размер блока, м х м	300 х 50	500 х 100	250 х 30
Модель машины	Wirtgen 2200 SM	Wirtgen 2200 SM	Wirtgen 2200 SM
Схема отработки слоя блока	Схема с разворотом в конце рабочего хода	Схема с разворотом в конце рабочего хода	Схема с разворотом в конце рабочего хода
Количество бугров	1	3	2
Размер бугров, м х м	60 х 10	30 х 10; 40 х 10; 60 х 15	20 х 6; 20 х 6
Расстояние между буграми, м	-	10 ; 20	10
Схема фрезерования бугров	Продольно; с разворотом в конце рабочего хода	Последовательно; продольно; с разворотом в конце рабочего хода	Последовательно; продольно; с разворотом в конце рабочего хода
Модель автосамосвала	Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ	Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ	Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ
Количество автосамосвалов	5	6	7
Расстояние транспортировки, км	7	7	7
Модель погрузчика	-	Komatsu WA500-3	-
Способ погрузки	Машина послойного фрезерования	Погрузчик	Машина послойного фрезерования
Производительность добычи, т/ч	242	255	260

Согласно разработанной методике и с учетом предложенных рекомендаций были выбраны технологические схемы и структура комплекса оборудования, обеспечивающие максимальную производительность.

Показатели выбранных технологических схем и промежуточные расчеты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Рекомендуемые технолого-организационные решения [126]

Показатели	Блок а1 (Участок 1)	Блок с2 (Участок 2)	Блок с3 (Участок 3)
Схема отработки слоя блока	Схема с разворотом в конце рабочего хода	Схема с разворотом в конце рабочего хода	Схема с непрерывным движением по передвигающейся петле
Изменение производительности машины послойного фрезерования, %	0	0	+7,1
Схема фрезерования бугров	Продольно; схема с разворотом в конце рабочего хода	Одновременное фрезерование; схема с разворотом в конце рабочего хода	Одновременное фрезерование; челноковая схема
Изменение времени фрезерования бугров, %	0	–16,09	–26,81
Способ погрузки	Машина послойного фрезерования	Машина послойного фрезерования	Погрузчик
Эксплуатационная производительность, т/ч	242	282	313
Изменение производительности комплекса оборудования, %	0	+6,67	+20,38

Экономическая оценка предложенных решений представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Экономическая оценка предложенных решений [126]

Показатели	Блок а1		Блок с2		Блок с3	
	Факт	Рекомендация	Факт	Рекомендация	Факт	Рекомендация
Затраты на топливо, \$/ч	301,4	301,4	358,94	317,84	334,28	375,38
Зарплата, \$/ч	30	30	40	35	40	45
Техническое обслуживание, \$/ч	125	125	175	140	155	190
Расходные материалы, \$/ч	34,6	34,6	39,6	39,6	44,6	44,6
Итого, \$/ч	491	491	613,54	532,44	573,88	654,98
Удельные затраты, \$/т	2,03	2,03	2,41	1,96	2,21	2,09
Изменение удельных затрат, %	0		–18,67		–5,43	

Выводы по четвёртой главе

1) На основании выполненных исследований предложены технологические организационные решения для повышения эффективности отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования в условиях изменчивости прочности пород.

2) Предложено при расчете максимальной производительности комплекса оборудования использовать показатель способа погрузки P_v . При $P_v < 1$ погрузка автосамосвала должна осуществляться непосредственно машиной послойного фрезерования, а при $P_v > 1$ – погрузчиком из сформированного машиной послойного фрезерования штабеля.

3) Предложены рекомендации по выбору технологической схемы отработки блока участка месторождения бокситовых руд машинами послойного фрезерования, основанные на минимизации затрат времени на выполнение непроизводительной работы и простоя машины послойного фрезерования, учете схемы повторного фрезерования неровностей на поверхности участка отработки и способе погрузки полезного ископаемого, позволяющие повысить эффективность разработки бокситовых месторождений.

4) В результате оценки результатов применения предложенных рекомендаций в условиях разрабатываемого бокситового месторождения установлено, что:

- применение предложенного подхода к выбору рациональной схемы отработки слоя блока позволило достигнуть повышения производительности машины послойного фрезерования на 7,1%;
- сокращение времени повторного фрезерования бугров достигло 26,81%;
- выбор рационального способа погрузки позволил достигнуть повышения эксплуатационной производительности выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования на 20,38%;

- наибольшее сокращение удельных затрат на добычу бокситовой руды составило 18,67%.

5) Проведенные исследования и полученные результаты позволили сформулировать второе и третье научные положения:

- Предложено при расчете максимальной производительности комплекса оборудования использовать показатель способа погрузки $\Pi_{\text{в}}$, учитывающий установленную зависимость способа погрузки автосамосвала от продолжительности рейса автосамосвала, времени обмена автосамосвалов при погрузке, времени погрузки автосамосвала, ожидания погрузчика при создании первоначального фронта работ, количества автосамосвалов в комплексе оборудования; при этом при $\Pi_{\text{в}} < 1$ погрузка автосамосвала должна осуществляться непосредственно машиной послойного фрезерования, а при $\Pi_{\text{в}} > 1$ – погрузчиком из сформированного машиной послойного фрезерования штабеля.

- Разработан алгоритм выбора технологической схемы отработки блока участка месторождения бокситовых руд машинами послойного фрезерования, основанный на минимизации затрат времени на выполнение непроизводительной работы и простои машины послойного фрезерования, использование которого за счет учета схемы повторного фрезерования неровностей на поверхности участка отработки и способа погрузки полезного ископаемого позволяет повысить эффективность разработки бокситовых месторождений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи установления закономерностей формирования структуры комплекса оборудования и параметров технологических схем при применении машин послойного фрезерования в условиях пространственной изменчивости прочности горных пород, что имеет существенное значение для повышения эффективности процессов разработки бокситовых руд.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. В результате анализа опыта применения машин послойного фрезерования, а также анализа научных исследований, связанных с изучением влияния прочностных свойств горных пород на технологию, организацию и показатели работы машин послойного фрезерования выявлена актуальность научной задачи установления закономерностей формирования структуры комплекса оборудования и параметров технологических схем при применении машин послойного фрезерования в условиях пространственной изменчивости горных пород.

2. Установлено, что при рациональных режимах фрезерования бокситовых руд, обладающих пространственной изменчивостью их прочности в пределах обрабатываемого блока, на поверхности формируются два вида неровностей (бугров), оказывающих влияние на показатели работы применяемого добычного комплекса оборудования – бугры в полосе фрезерования и бугры в смежных заходках (полосах фрезерования).

3. Предложен способ измерения параметров неровностей на поверхности блока фрезерования, основанный на методе измерения геометрических размеров повреждений дорожного покрытия.

4. Установлено, что неровности, образовавшиеся после прохода машины послойного фрезерования при фрезеровании участков с изменчивостью прочности бокситов, когда они достигают определенной высоты, оказывают значительное влияние на безопасность движения и показатели работы карьерных автосамосвалов.

5. Предложены формулы для расчета производительности машин послойного фрезерования, которые учитывают: скорость, ширину, глубину фрезерования пород различной прочности, время на непроизводительные операции с учетом схем фрезерования слоя блока и неровностей (бугров).

6. Установлены обратные корреляционные зависимости эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования при отработке слоя блока и всего блока от периметра и площади неровностей, количества неровностей (бугров) и расстояния между ними (буграми).

7. Методом мультипликативной степенной регрессии установлены нелинейные степенные зависимости рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования от ее технической производительности Q_T , длины L_6 и ширины $Ш_6$ фрезеруемого блока, площади повторно фрезеруемых неровностей (бугров) на поверхности блока S_{6y} при отсыпке

в штабель: $Q_{сл} = 0,561 \cdot Q_T^{0,705} \cdot \frac{L_6^{0,246} \cdot Ш_6^{0,491}}{S_{6y}^{0,277}}$ и при погрузке в автосамосвалы:

$$Q_{сл} = 0,592 \cdot Q_T^{0,698} \cdot \frac{L_6^{0,242} \cdot Ш_6^{0,459}}{S_{6y}^{0,264}}.$$

8. Установлено, что формирование структуры выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования, обеспечивающей его максимальную производительность, зависит от параметров используемых машин, входящих в комплекс оборудования (машина послойного фрезерования, автосамосвалы и погрузчик), размеров обрабатываемого блока, изменчивости прочности пород, параметров бугров на поверхности блока и расстояний между ними, расстояния транспортировки.

9. Предложено при расчете максимальной производительности комплекса оборудования использовать показатель способа погрузки P_v . При $P_v < 1$ погрузка автосамосвала должна осуществляться непосредственно машиной послыного фрезерования, при $P_v > 1$ – погрузчиком из сформированного машиной послыного фрезерования штабеля.

10. Разработана математическая модель работы машин послыного фрезерования, которая позволяет определить техническую и эксплуатационную производительность машины послыного фрезерования и эксплуатационную производительность выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования в целом при разработке всего блока.

11. Разработан алгоритм выбора технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послыного фрезерования. Применение данного алгоритма и рекомендаций в условиях бокситового месторождения позволило достигнуть повышения эксплуатационной производительности машины послыного фрезерования на 7,1% и выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования в целом на 20,38%.

Результаты диссертационного исследования были использованы АО «Коми Алюминий» при выборе технологии разработки новых участков Верхне-Щугорского месторождения бокситов (приложение А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардоши Д. Карстовые бокситы. М.: Мир, 1981. 450 с.
2. Bardossy G. And Aleva G.J.J. Lateritic Bauxites. *Developments in Economic Geology* 27, Elsevier Sci. Publ. 1990, 624 p.
3. Беляев В.В. Минералогия, распространение и использование бокситов // Российский химический журнал. 2010. Т. 54, №. 2. С. 29–37.
4. Бенеславский С.И. Минералогия бокситов: (Критерии оценки качества и технологических свойств бокситовых руд по их вещественному составу). – Госгеолтехиздат, 1963.
5. Портнов А.М. Алюминий везде... Где? // Природа. 2020. № 7. С. 57–65.
6. Gow, N.N., & Lozej, G.N. Bauxite. *Geoscience Canada*. 1993. № 20(1). P. 9–16.
7. Михайлов Б.М. Время и условия образования латеритных покровов современной тропической зоны Земли // Литология и полезные ископаемые. 1976. № 6. С. 96–104.
8. Goloubinov R. “Les bauxites de Tougue. French West Africa”. *Serv. Min.* No1; 1938.
9. Lapparent, J. De. Les hydroxydes d'aluminium des argiles bauxitiques de l'Ayrshire (Écosse). *J. Bulletin de Minéralogie*. 1935, 246–267.
10. Bardossy, G. Karst Bauxites, Bauxite Deposits on Carbonate Rocks, *Developments in Economic Geology*, Elsevier, Amsterdam. 1982. Vol. 14, p. 441.
11. Bogatyrev B.A. et al. Bauxite provinces of the world // *Geology of Ore Deposits*, 2009.
12. Боева Н.М., Макарова М.А., Шипилова Е.С., Слукин А.Д., Соболева С.В., Жегалло Е.А., Зайцева Л.В., Бортников Н.С. Гиббсит и бёмит в латеритизированных корах выветривания разного возраста: особенности условий нахождения и образования // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 2. С. 29-39. DOI: 10.31857/S2686739722060044

13. Богатырёв Б.А., Жуков В.В. Бокситорудные провинции Мира // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 5. С. 379–396.
14. Головкин П.П., Шпилова Е. С. Общемировые запасы бокситов. Сравнительная характеристика месторождений Республики Гвинея и Нижнего Приангарья // Новое в познании процессов рудообразования. 2018. С. 111–114.
15. Завёрткин В. Л. БОКСИТЫ // Большая российская энциклопедия. 2016. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://old.bigenc.ru/geology/text/3438740>
16. Statista Research Department. Countries with the world's largest bauxite reserves in 2024 //Statistics. 2025, available at: <https://fr.statista.com/statistiques/570891/pays-comptant-les-plus-grandes-reserves-de-bauxite-dans-le-monde/>
17. Центр Экономического Анализа и Экспертизы. 2010. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.ceae.ru/The-commodity-markets1.htm>
18. Statista Research Department. Leading bauxite producing countries in the world in 2024 //Statistics. 2025, available at: <https://fr.statista.com/statistiques/565292/principaux-pays-de-la-production-mondiale-mini%C3%A8re-de-bauxite/>
19. CM GROUP. An assessment of global megatrends and regional and market sector growth outlook for Aluminium demand. 2020. Available at: https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2024/03/cm_2050_outlook_for_al_demand_20200528_4wycD18.pdf
20. Mamedov V., Chausov A., Makarova M. Principal Conditions and Geochemical Trends in Formation of High-grade Bauxite Deposits, Republic of Guinea // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 98, pp. 1–5. DOI: 10.1051/e3sconf/20199807001.
21. Google. Карты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.google.com/maps>
22. Sabot J. Bauxite de la region de Kindia (Guinee Francaise). Rapport sur les travaux de recherches effectués au cours des campagnes 1950–52 an. – Conakry, 1953. – 128 p.

23. Mamedov, V. I. – Lissov, J. roudashevski, L.(1988) Rapport sur les résultats de l'étude de la composition chimique et minéralogique des propriétés technologiques des gisements de bauxites de Débéle et Balandougou.
24. Mamedov V., Zmeev V., Tokarlikov V., Samokhvalov M., Kopilov A. « Rapport final sur les résultats des travaux d'exploration du territoire de la concession HALCO (décembre 1997 – décembre 2000) », GEOCONSULT Ltd pour CBG; mai 2001, 116 p.
25. Mamedov V, Tokarlikov V, Dovydenko G, Seredkin M, Chausov A, Blankov Y « Rapport final sur les résultats de l'exploration effectuée dans l'interfluve Kogon – Tomine (mars 2001 – mars 2003), Март, 2003. GEOPROSPECTS Ltd pour CBG. 144 p.
26. «Алюминиевое сырьё Африки». [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.inafran.ru/node/58>
27. Mamedov V.I. Catalogue des gisements et des indices de minéralisation bauxitique de la République de Guinée. – 2003.
28. Богатырёв Б.А. Гвинейская бокситоносная провинция // Большая российская энциклопедия. Москва, 2006. Том 6. 461 с.
29. Горная энциклопедия / Гвинея. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/g/gvineya/>
30. Diaby F. Regard sur le secteur minier guinéen. – 2017. 273 p.
31. Kalil, Kourouma I., Baho H., Gbilimou A., Keita D. Assessment of the impact of blasting operations on the riparian environment of the Sangarédi bauxite mine (CBG mining concession) //African Scientific Journal. 2023, vol. 3, no. 17, pp. 39-49.
32. Traore A.S. L'exploitation minière en République de Guinée : Les problèmes de la planification minière et les perspectives. Revue Internationale du Chercheur. 2024, vol. 5, no. 4, pp. 91-101. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14219237>
33. Кожихметова, З.Ж, Кожихметов, О.С. О современных методах разработки бокситовых месторождений // Молодой ученый. 2017. № 17 (151). С. 95-98.

34. Пучков Л., Жежелевский Ю. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых. – ЛитРес, 2017. Том 2.
35. Скачков М.С. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых Норильского промышленного района. Справочное пособие // Норильский индустриальный институт. 2005.
36. Давыдов С.Я. и др. Обеспечение безопасности при разработке бокситовых рудников // Новые огнеупоры. 2022. №. 12. С. 3-6.
37. Matheus, P. Les techniques et conditions d'exploitation des mines aurifères // CAIRN.INFO : sciences, techniques et médecine. 2018, pp. 10-19. DOI: 10.3917/rindu1.184.0010.
38. Четверик М.С. Некоторые проблемы добычи полезных ископаемых на глубоких горизонтах недр // Геотехническая механика. 2012.
39. Жигалов В.И. Способ подземной разработки месторождений полезных ископаемых. – 2020. Патент на изобретение RU 2712848 C1, 31.01.2020. Заявка № 2019114444 от 08.05.2019.
40. Ломоносов Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений. – ЛитРес, 2017.
41. Татаринова О.А., Варфоломеев Е.Л. Влияние открыто-подземного (комбинированного) способа разработки угольных месторождений на окружающую среду // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. №. 4. С. 74–79.
42. Закалинский В.М. Перспективные взрывные технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №. 2. С. 301-307.
43. Ковалев А.В. Направления совершенствования взрывной технологии добычи блочного камня в массиве с интенсивной трещиноватостью // Горные науки и технологии. 2018. Т. 1. С. 23-34.
44. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. 2020. Т. 18. №. 1. С. 4-15.

45. Комащенко В.И. и др. Разработка технологии взрывных работ, уменьшающей вредное воздействие на окружающую среду // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. №. 8. С. 33–40.
46. Шевкун Е.Б., Лещинский А.В. Рассредоточение скважинных зарядов пенополистиролом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. №. 5. С. 116–123.
47. Комащенко В.И. и др. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №. 9. С. 293-304.
48. Галимьянов А.А., Мишнев В.И. Исследование эффективности конструкции скважинных зарядов при изменении расположении точки Т инициирования по высоте колонки заряда // Проблемы недропользования. 2024. №. 3 (42). С. 72–77.
49. Sidiki S. Bauxite Mining in the Boké Region (Western Guinea): Method Used and Impacts on Physical Environment // European Journal of Sustainable Development Research. 2019. Vol.3, no. 3. P. em0087. DOI: 10.29333/ejosdr/5735.
50. Ложников А.В. Перспективы применения безвзрывных способов разработки крепких горных пород на карьерах // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2015. №. 1 (2). С. 87–92.
51. Сапегин Ю.К. Техника и технологии для безвзрывной разработки горных пород в карьерах //Иновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. 2018. С. 145–148.
52. Чебан А.Ю. Совершенствование безвзрывных циклично-поточных технологий добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. 2016. Т. 14. №. 2. С. 5–9.

53. Schmieder P. Methodology for assessing the environmental effects during the mining of solid rock by taking into account non-explosive mining techniques // Записки Горного института. 2006, vol. 167, no. 2, pp. 165–174.
54. Al-Bakri A., Hefni M. A review of some nonexplosive alternative methods to conventional rock blasting // Open Geosciences. 2021, vol. 13, no. 1, pp. 431-442.
55. Traore A.S. L'expérience mondiale de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert. Revue Internationale du Chercheur. 2024, vol. 5, no. 4, pp. 1095-1123. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14476860>
56. Анистратов Ю.И., Семин А.П. Подготовка пород к выемке при применении на разрезах комбайнового способа разработки // Добыча угля открытым способом. 1970. № 11–12. С. 13–14.
57. Домбровский А.Н., Сидоренко И.А. Эффективность применения компактного и мобильного оборудования для открытых горных работ // Горный журнал. 1998. №1. С. 45–48.
58. Ермаков С.А., Хосоев Д.В. Оценка производительности комбайнов КСМ@2000Р при безвзрывной выемке горных пород и углей Эльгинского месторождения с учетом их физико-химического разупрочнения // Горный информационно–аналитический бюллетень. 2008. № 4. С. 88–93.
59. Комаров Е.И. Результаты испытаний рыхлителя активного действия при разрушении кимберлитовых руд // Горные машины и автоматика. 2003. № 1.
60. Пихлер М., Смагин В.П., Федорко П.В., Панкевич Ю.Б., Панкевич М.Ю. Применение комбайна WIRTGEN2200SM для разработки сложноструктурных угольных пластов // Горная Промышленность. №5 (81). 2008. С. 30
61. Ржевский В.В., Анистратов Ю.И. Разработка полускальных и скальных пород на карьерах комбайнами // Добыча угля открытым способом. 1967. № 8. С. 26–30.
62. Чебан А.Ю. Совершенствование оборудования и технологий безвзрывной выемки горных пород: моногр. // Хабаровск: ИГД ДВО РАН. 2017. 260 с.

63. Якименко Д. В. Технология разработки месторождений с применением фрезерных машин и усовершенствованных скреперов // Сб. трудов VII Международной научно-технич. конфер. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». УГГУ. Екатеринбург. 2018. С.182–186.
64. Анистратов Ю.И. Оценка эффективности безвзрывных технологий разработки крепких горных пород на карьерах // Горный журнал. 1997. №. 10. С. 37–39.
65. Анистратов Ю.И. Технологические процессы открытых горных пород. М.: Недра, 1995 .
66. Шевченко А.Г., Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Безвзрывная разработка бокситовых руд комбайнами Wirtgen Surface Miner расширяет сырьевую базу рудника Дебеле (Гвинея) // Горная промышленность. 2003. №. 2.
67. Абакумов И.В., Шадрин М.А. Перспективы внедрения безвзрывной тонкофрезерной технологии добычи бокситов на примере Средне-Тиманского рудника // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2007. №. 5. С. 102–107.
68. Зайцев Г.Д., Ческидов В.И. Оценка технологических и технических возможностей оборудования для безвзрывной добычи полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. № 2. С. 220–227.
69. Забегалов Г.В., Ронинсон Э.Г. Бульдозеры, скреперы, грейдеры // М.: Высшая школа, 1991. 334 с.
70. Латышев О.Г., Жилин А.С., Осипов И.С., Сынбулатов В.В. Выбор поверхностно-активной среды для управления свойствами пород в горной технологии // Горный журнал. 2004. № 6. С. 117.
71. Латышев О.Г., Иванов С.С., Суворов Б.И. Влияние поверхностно активных веществ на физические свойства горных пород // Горный журнал. 1985. № 12. С. 15.

72. Норов Ю.Д., Мардонов У.М., Тошев О.Э. Изучение влияния водных растворов ПАВ на изменение прочности горного массива // Горный журнал. 2005. № 3. С. 15.
73. Репин, Н.Я. Выемочно-погрузочные работы: Учеб. пособие. – 2-е изд., стер. Н.Я. Репин, Л.Н. Репин // М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 267 с.: ил. (Процессы открытых горных работ)
74. Макеев М.В. Принципы действия компактного роторного экскаватора особой мощности / М.В. Макеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № 12. С. 353–360.
75. Райков А.Б., Шевченко А.Б., Панченко А.М., Кожевников В.А., Власов Г.А., Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Новый карьерный комбайн Wirtgen 2200 SM в республике Гвинея // Горная промышленность. 2002. № 1. С. 5–7.
76. Pathak K., Rodkar P. Economic analysis and selection of continuous surface miner: L case study for a bauxite deposit // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2012, vol. 60, no. 11, pp. 279-286.
77. Чебан А.Ю. Применение фрезерных комбайнов в строительстве и на добыче строительных материалов // Вестник ТОГУ. 2012. № 3(26). С. 105–108.
78. Чебан А.Ю., Секисов Г.В., Хрунина Н.П. Совершенствование технологий открытой разработки сложноструктурных месторождений с применением машин послойного фрезерования // Сб. трудов VII Международной научно-технич. конфер. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». УГГУ. Екатеринбург. 2018. С. 176–181.
79. Пташник Ю.П. Обоснование технологии разработки месторождений для использования выработанных пространств известняковых карьеров в строительстве / Дисс. ... к.т.н. Красноярск. 2015. 137 с.
80. Швабенланд Е.Е. Обоснование параметров экологически сбалансированной горнотехнической системы открытой разработки сложноструктурных месторождений апатитовых руд / Дисс. ... к.т.н. Москва. 2020. 140 с.

81. Губенко, А.А., Ле Бинь Зыонг, Грабский А.А., Петров И.В. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послойной выемки прочных пород // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2010. № 7. С. 24–30.
82. Штейнцайг, Р.М., Анистратов К.Ю. Мировая горная промышленность история достижения, перспективы // М.: НТЦ «Горное дело». 2005. С. 298–318.
83. WIRTGEN GROUP. «Application and Planning Guide» -Wirtgen Surface Mining Manual. Available at: <https://www.wirtgen-group.com/fr-re/applications/mining/surface-mining/>
84. Аврамова Н.С. Обоснование технологических схем открытой разработки месторождений карбонатных горных пород с помощью машин послойного фрезерования // Дисс. ... к.т.н. СПб. СПбГГИ. 2006. 121 с.
85. Карапетян Э.А. Оптимизация параметров процесса выемки бокситов при разработке месторождений открытым способом в сложных горно-геологических условиях // Дисс. ... к.т.н. Екатеринбург. УГГУ. 2009. 170 с.
86. Ordin A.A., Schwabenland E.E. Evaluation of technological parameters for apatite extraction by surface miners //Journal of Mining Science. 2016, vol. 52, no. 2, pp. 293–299.
87. Ordin A.A., Metelkov A.A. Optimization of the fully-mechanized stoping face length and efficiency in a coal mine //Journal of Mining Science. 2013, vol. 49, no. 2, pp. 254–265.
88. Швабенланд Е.Е. О потенциале фрезерных комбайнов непрерывного действия при разработке месторождений открытым способом // Рациональное освоение недр. 2014, no. 1, pp. 54–60.
89. Chenna W. Etude du régime de fonctionnement du (surface miner 2500 sm) dans les conditions de la carrière de Ain-Touta : Mémoire de fin d'étude. Annaba. 2011. 94 p.
90. Кумар Ч. и др. Методология проектирования фрезерного барабана и выбор оптимальных эксплуатационных параметров карьерного комбайна в

различных горно-геологических условиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. №. 4. С. 60-69.

91. Kumar C. et al. Influence of cutting drum specifications on the production performance of surface miner under varied rock strength—some investigations //Journal of Mines, Metals and Fuels. 2016, pp. 181–186.

92. Amar P., Ramachandra M.V.M.S., Bahadur S.K. Performance simulaton of surface miners with varied machine parameters and rock conditions: Some investigations //Journal of Geology and Mining Research. 2013, vol. 5, no. 1, pp. 12–22.

93. Prakash A., Murthy V.M.S.R., Singh K.B. Rock excavation using surface miners: An overview of some design and operational aspects //International Journal of Mining Science and Technology. 2013, vol. 23, no. 1, pp. 33–40.

94. Траоре А.С. Особенности разработки месторождения бокситов «Балая» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. №. 10 (Специальный выпуск 19). С. 3–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_19_3.

95. Keita O., Diane M.A Model of Physico-Mechanical Characterization of Sangaredi Bauxites and Related Rocks Taking into Account Their Litho-Genetic Type //Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2024, vol. 12, no. 6, pp. 281–298.

96. Yalcin M.G. et al. Geochemical and mineralogical properties of karst types bauxite, Catkoy, Taurus Mountains, Turkey // Carbonates and Evaporites. 2025, vol. 40, no. 2, pp. 72.

97. Jiang J. et al. Study on the physical and mechanical properties of bauxite residue by laboratory and field in-situ tests // Environmental Earth Sciences. 2021, vol. 80, no. 10, pp. 377.

98. Шипилова Е.С. и др. Физико-механические свойства ферриплантитов провинции Фута Джалон-Мандинго // Новое в познании процессов рудообразования: Девятая Российская молодёжная научно-практическая Школа с международным участием. 2019. С. 470–472.

99. Ozkahraman H.T. Breakage mechanisms and an encouraging correlation between the Bond parameters and the friability value. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010, vol. 110, pp. 153–159.
100. Balde M.Y. et al. Physicochemical characterisation for potential uses as industrial mineral of Bauxite from Débélé, Guinea // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2021, vol. 9, no. 3, pp. 9–22.
101. Zaidan S.A., Omar M.H. The effects of bauxite, metakaolin, and porosity on the thermal properties of prepared Iraqi clays refractory mortars // *Applied Physics A*. 2018, vol. 124, no. 5, pp. 386.
102. Le Berre S., Goujon V., Banos V. Des «boues rouges» à la Bauxaline. Agentivité et fragilités d'une matérialité résiduelle // *Revue d'anthropologie des connaissances*. 2023, vol. 17. no. 17-4.
103. Martín D. et al. Evaluation of Ceramic Properties of Bauxitic Materials from SE of Iberian Range // *ChemEngineering*. 2024, vol. 8, no. 1, pp. 13.
104. Aboubakar A. et al. Correlation between mineralogical, chemical and geotechnical properties of lateritic soils of Ngaoundal: implication for road construction // *Discover Soil*. 2025, vol. 2, no. 1, pp. 30.
105. Fatoyinbo I.O. et al. Effect of multiple-compaction on laterite soil: geotechnical and geo-statistical analysis // *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 4067.
106. Aladejare A.E., Wang Y. Evaluation of rock property variability // *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2017, vol. 11, no. 1, pp. 22-41.
107. Mengler F.C. et al. Using instrumented bulldozers to map spatial variation in the strength of regolith for bauxite mine floor rehabilitation // *Soil and Tillage Research*. 2006, vol. 90, no. 1–2, pp. 126–144.
108. ISO 25178-2:2021: Geometrical product specifications (GPS). Surface Texture: Areal Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters // *Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*. 2021.

109. ISO 16610-1:2015; Geometrical Product Specifications (GPS) – Filtration Part 1: Overview and Basic Concepts //International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland. 2015.
110. ISO 21920-2:2021; Geometrical Product Specifications (GPS). Surface Texture: Profile Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters // International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland. 2021.
111. ГОСТ 32825-2014; Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения геометрических размеров повреждений // Стандартиформ. М. 2015.
112. Rapino L. et al. Measurement and processing of road irregularity for surface generation and tyre dynamics simulation in NVH context //International Journal of Pavement Research and Technology. 2024, vol. 17, no. 4, pp. 918–928. DOI: 10.1007/s42947-023-00277-z.
113. Douglas A. Haul Road roughness measurement using georeferenced truck vibration // New Trends in Production Engineering. 2019, vol. 2.
114. Richardson S., McIver J. Improving mine haul road roughness to reduce haul truck fuel consumption. – SAE Technical Paper. 2015, no. 01-0050.
115. Журавлев А.Г. и др. Рекомендации по эксплуатации и улучшению качества содержания карьерных автодорог Олимпиадинского и Благодатного горно-обогатительных комбинатов // Горная промышленность. 2023. №. 5. С. 88-95. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5-88-95.
116. Лель Ю.И., Стенин Ю.В., Колчанов А.Г. Карьерные автодороги их значимость и проблемы совершенствования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №. 3. С. 103–108.
117. Ахметова М.И. Комплексная оценка и способы повышения показателей качества эксплуатации карьерных автосамосвалов: дис.... докт. филос. (PhD) / Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева. Алматы. 2019.
118. Колчанов А.Г. и др. Особенности проектирования карьерных автомобильных дорог для автономных самосвалов // Недропользование и

транспортные системы. 2024. Т. 14. №. 4. С. 10-20. DOI: 10.18503/SMTS-2024-14-4-10-20.

119. Bodziony P., Patyk M. The influence of the mining operation environment on the energy consumption and technical availability of truck haulage operations in surface mines // *Energies*. 2024, vol. 17, no. 11, pp. 2654. DOI: 10.3390/en17112654.

120. Luan B. et al. Fuel-Efficient Road Classification Methodology for Sustainable Open Pit Mining // *Applied Sciences*. 2025, vol. 15, no. 11, pp. 6309. DOI: 10.3390/app15116309.

121. Щадов В.М. Открытая разработка сложноструктурных угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока. – ЛитРес, 2017.

122. Чебан А.Ю. К вопросу об определении производительности карьерных комбайнов в различных условиях эксплуатации // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. №. 3. С. 145–148.

123. Траоре А.С., Пастихин Д.В. Методика расчета производительности машин послойного фрезерования в условиях изменчивости прочности бокситов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026. №. 2 (Специальный выпуск 6). С. 3–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_6_3.

124. Hair J. F. et al. When to use and how to report the results of PLS-SEM // *European business review*. 2019, vol. 31, no. 1, pp. 2-24. DOI: 10.1108/EBR-11-2018-0203.

125. Lewis C.D. Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting //(No Title). 1982.

126. Траоре А.С. Разработка технолого-организационных решений для повышения эффективности отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования в условиях изменчивости прочности пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026. №. 3 (Специальный выпуск 11). С. 3–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_11_3.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

А. Справка об использовании результатов диссертационной работы



169300, Республика Коми,
г. Ухта, проспект Ленина, д. 26 «Б»

Тел.: (8216) 78-92-19
Факс: (8216) 78-92-19

Справка

Об использовании результатов диссертационной работы Траоре Абубакара Сидики «Обоснование параметров технологии выемки бокситовых руд машинами послойного фрезерования при изменчивости прочности пород», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины».

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты работы Траоре Абубакара Сидики «Обоснование параметров технологии выемки бокситовых руд машинами послойного фрезерования при изменчивости прочности пород» были использованы при выборе технологии разработки новых участков Верхне Щугорского месторождения бокситов

Полученные результаты и разработанные рекомендации представляют практический интерес и могут быть использованы при проектировании и планировании горных работ машинами послойного фрезерования.

Генеральный директор
АО «Коми Алюминий»

М.В. Дмитриев

