

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

ТРАОРЕ АБУБАКАР СИДИКИ

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

Специальность 2.8.8
«Геотехнология, горные машины»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент

Пастихин Денис Валерьевич

Москва 2026

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 который 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, приобретают 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 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 %. В связи с этим исследование технологии работ машин послойного фрезерования в комплексе с автомобильным транспортом в условиях изменчивости прочности бокситовых руд и обоснование технологических схем их выемки являются 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.

Задачи исследования: достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением следующих научно-практических задач:

- 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.

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_v , 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 $P_v < 1$ 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы по теме исследования.

Проанализированы бокситовые месторождения с акцентом на происхождение бокситов, их химический состав и физико-механические свойства горных пород. Отмечены страны с крупнейшими запасами бокситов в мире, а также страны-лидеры по добыче бокситов. Дана характеристика бокситовых месторождений в Гвинейской Республике, стране с крупнейшими запасами бокситов в мире. Описаны существующие технологии разработки бокситовых месторождений. Показано влияние прочностных свойств горных пород на параметры технологии и технологических схем, а также на показатели работы применяемого оборудования: производительность оборудования, скорость и глубину фрезерования, износ резцов зубьев рабочего барабана и расход топлива.

Проанализировано изменение прочности горных пород на бокситовых месторождениях. Выделена группа месторождений бокситов, на которых прочность горных пород существенно изменяется в пределах разрабатываемого участка. Выявлены причины этой изменчивости. Представлены результаты анализа прочности бокситов на трех участках месторождения бокситов «Балая», расположенного в Гвинейской Республике, согласно которым на изученных участках стандартное отклонение предела прочности на одноосное сжатие бокситов в пределах исследуемого участка достигает 9,72 МПа, при коэффициенте корреляции 20,22%.

На основании выполненного 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 показана актуальность работы и сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе рассмотрены метод измерения размеров неровностей, влияние наличия неровностей (бугров) на безопасность движения и показатели работы автомобильного транспорта, анализ методик расчета производительности машин послойного фрезерования.

Глубина фрезерования определяется параметрами машины послойного фрезерования и прочностными характеристиками горных пород. На основе научных исследований и опыта применения машин послойного фрезерования установлены рациональная глубина и скорость фрезерования для пород различной прочности.

При изменении прочности горных пород в пределах полосы фрезерования происходит изменение глубины фрезерования. Для уменьшения износа режущих зубьев рабочего барабана и во избежание чрезмерного расхода топлива машины послойного фрезерования при увеличении

прочности горных пород уменьшают глубину фрезерования, что приводит к образованию неровных поверхностей (неровностей).

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.

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 могут образовываться два вида бугров (рисунок 1):

- бугры в полосе фрезерования;
- бугры в смежных заходках (полосах фрезерования).

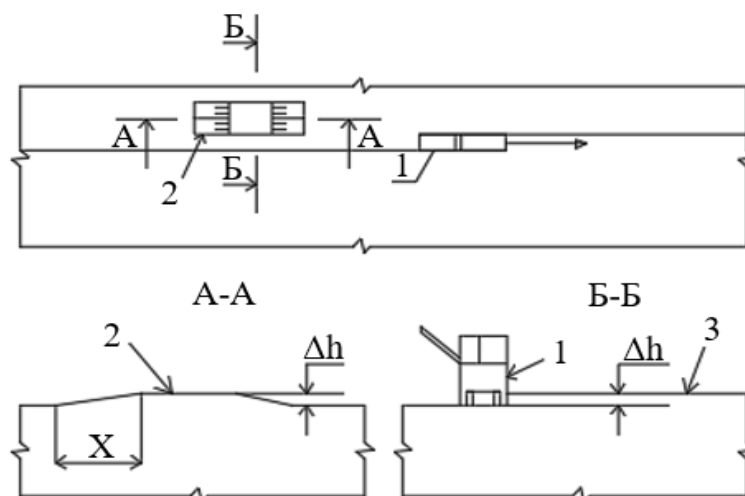


Рисунок 1 – Виды неровностей (бугров):

1 – фрезерный комбайн; 2 – бугор в полосе фрезерования; 3 – бугор в смежных полосах фрезерования; Δh – перепад высоты; X – заложение откоса бугра

Значения Δh и X зависят от глубины фрезерования горных пород в пределах полосы фрезерования и определяют форму бугров.

Для оценки параметров бугров был предложен способ измерения на основе метода измерения геометрических размеров повреждений дорожных покрытий, утвержденный в стандарте ГОСТ 32825 Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения геометрических размеров повреждений.

В результате анализа регламентов работы оборудования на предприятии, результатов измерения параметров бугров на поверхности участков и показателей работы автосамосвалов Howo Sinotruk ZZ5707S3840AJ на этих участках были установлены три режима движения

автосамосвалов в зависимости от параметров бугров, обеспечивающих эффективную и безопасную работу указанных автосамосвалов.

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.

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

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

Существующие методики расчета производительности машин послойного фрезерования предполагают постоянную глубину фрезерования на всей площади участка.

В качестве метода исследования особенностей разработки бокситовых месторождений с применением машин послойного фрезерования, погрузчиков и автосамосвалов на участках, позволяющего учесть изменение прочности горных пород в пределах участка отработки, было выбрано математическое моделирование.

В математических моделях средняя скорость движения автосамосвала в пределах блока с учетом расстояния, проезжаемого со сниженной скоростью из-за бугров, определяется по формуле:

$$V_{\text{ср}}^{\text{бл}} = \frac{1}{\frac{P_{\text{сос}}}{V_{\text{ог}}} + \frac{(1-P_{\text{сос}})}{V_{\text{ср}}^{\text{дб}}}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ср}}^{\text{бл}}$ – средняя скорость движения автосамосвала в пределах блока, км/ч; $P_{\text{сос}}$ – показатель, учитывающий протяженность участков движения со сниженной скоростью; $V_{\text{ог}}$ – скорость движения на участках с неровностями (второй режим движения), км/ч; $V_{\text{ср}}^{\text{дб}}$ – средняя скорость движения автосамосвала при основном (первом) режиме движения, км/ч.

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

$$\Pi_{\text{coc}} = \frac{L_{\text{ог}}}{L_6}, \quad (2)$$

где L_6 — длина блока, м; $L_{\text{ог}}$ — расстояние, проезжаемое со сниженной скоростью, м.

Значения показателя Π_{coc} 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, $\Pi_{\text{coc}} = 1$.

Время движения автосамосвала определяется по формуле:

$$T_{\text{дв}} = 60 \cdot K_p \cdot \left(2 \cdot \frac{L_{\text{TP}}}{V_{\text{ср}}^{\text{TP}}} + \frac{L_6}{V_{\text{ср}}^{\text{бл}}} \right), \quad (3)$$

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

В третьей главе представлены условия разработки месторождения бокситов «Балая», установлены аналитические зависимости для расчёта производительности машин послойного фрезерования, проведено математическое моделирование работы машины послойного фрезерования и установлены зависимости рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования в условиях изменчивости прочности бокситов.

При создании математических моделей работы машин послойного фрезерования и работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования были учтены условия разработки месторождения бокситов «Балая».

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.

Общая формула для расчета эксплуатационной производительности машин послойного фрезерования при отработке одного слоя блока участка месторождения, учитывающая изменения глубины и скорости фрезерования:

$$Q_{\text{сл}} = \frac{60 \cdot K_{\text{и}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m (L_{il} \cdot h_{il} \cdot b_{il}) + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m (L_{jl}^{\text{б}} \cdot h_{jl}^{\text{б}} \cdot b_{jl}) \right)}{T_{\text{ф}}^{\text{сл}} + T_{\text{ф}}^{\text{б}} + T_{\text{ав}}}, \quad (4)$$

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:

$$T_{\text{ф}}^{\text{сл}} = (T_o + T_{\text{п}}) \cdot n_{\text{про}} + T_{\text{пр}} \cdot (n_{\text{про}} - 1) + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \frac{L_{il}}{V_{\text{фил}}}, \quad (5)$$

где T_o – 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; $V_{\text{фил}}$ – 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 его перемещении к началу новой заходки определяется как сумма времени всех указанных видов ходов при отработке слоя участка.

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

$$T_{\text{ф}}^{\text{б}} = (T_o + T_{\text{п}}) \cdot n_{\text{ф}} + T_{\text{пр}}^{\text{б}} + \sum_{b=1}^{n_{\text{б}}-1} \frac{K_b}{V_{\text{хх}}} + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m \frac{L_{jl}^{\text{б}}}{V_{\text{фил}}^{\text{б}}}, \quad (6)$$

где n_f – количество операций опускания и поднятия барабана при фрезеровании бугров (неровностей); $T_{пр}^b$ – общее время разворота, поворота и холостого хода машины послойного фрезерования при ее перемещении к началу новой заходки при отработке бугров, мин; n_6 – 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:

$$T_{ав} = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \left(\frac{\left(\frac{L_{il}}{V_{\phi il}} \right)}{\left(\frac{n_a \cdot E_K}{b_{il} \cdot h_{il} \cdot V_{\phi il}} \right)} + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m \left(\frac{\left(\frac{L_{jl}^b}{V_{\phi jl}^b} \right)}{\left(\frac{n_a \cdot E_K}{b_{jl} \cdot h_{jl}^b \cdot V_{\phi jl}^b} \right)} \right) - 1 \right] \cdot T_{ож} + \left[\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \left(\frac{\left(\frac{L_{il}}{V_{\phi il}} \right)}{\left(\frac{E_K}{b_{il} \cdot h_{il} \cdot V_{\phi il}} \right)} + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^m \left(\frac{\left(\frac{L_{jl}^b}{V_{\phi jl}^b} \right)}{\left(\frac{E_K}{b_{jl} \cdot h_{jl}^b \cdot V_{\phi jl}^b} \right)} \right) - 1 \right] \cdot t_{за}, \quad (7)$$

где E_K – емкость кузова автосамосвала, м³; $T_{ож}$ – 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.

Эксплуатационная производительность машин послойного фрезерования при разработке блока рассчитывается по формуле, м³/ч:

$$Q_{бл} = 60 \cdot K_{и} \cdot \frac{\sum_{z=1}^{n_{сл}} V_{слz}}{\sum_{z=1}^{n_{сл}} (T_{ослz} + T_{пслz-1})}, \quad (8)$$

где $n_{сл}$ – 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.

В результате математического моделирования работы машины послойного фрезерования (при отработке слоя блока и разработке всего блока участка) на участках с изменчивостью прочности бокситов в программе Excel были построены графики (рисунки 2–7).

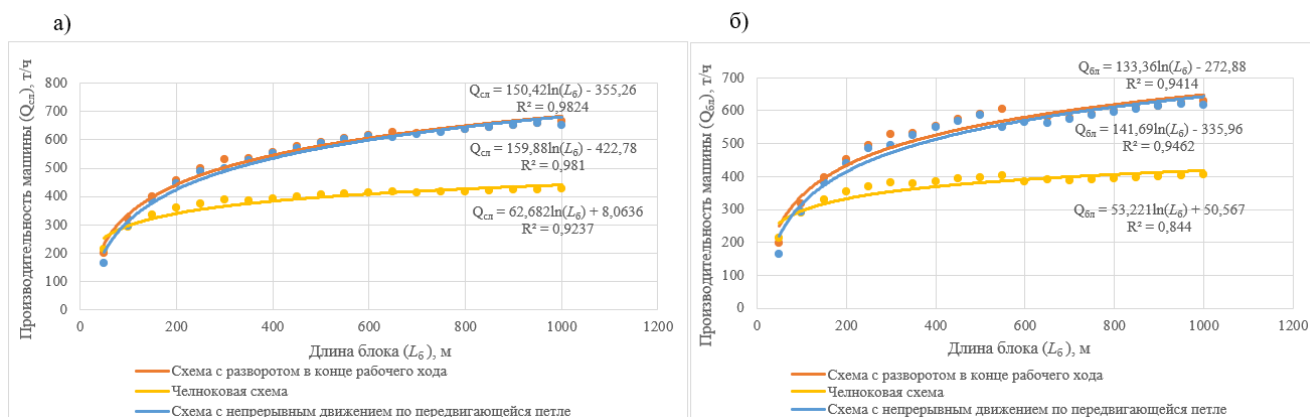


Рисунок 2 – График зависимости производительности машины послойного фрезерования от длины блока:

а – при отработке слоя блока; *б* – при разработке всего блока

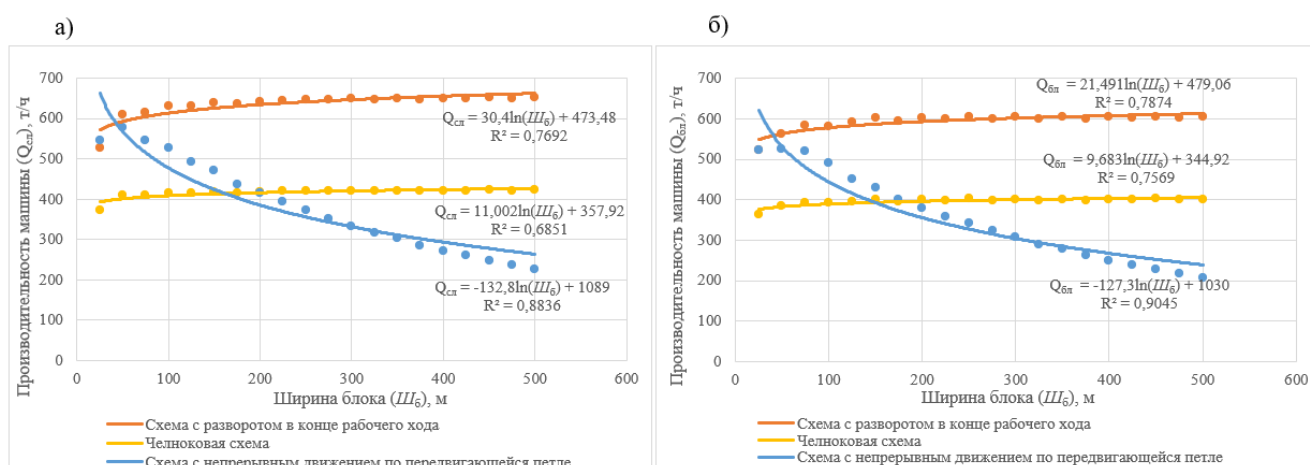


Рисунок 3 – График зависимости производительности машины послойного фрезерования от ширины блока:

а – при отработке слоя блока; *б* – при разработке всего блока

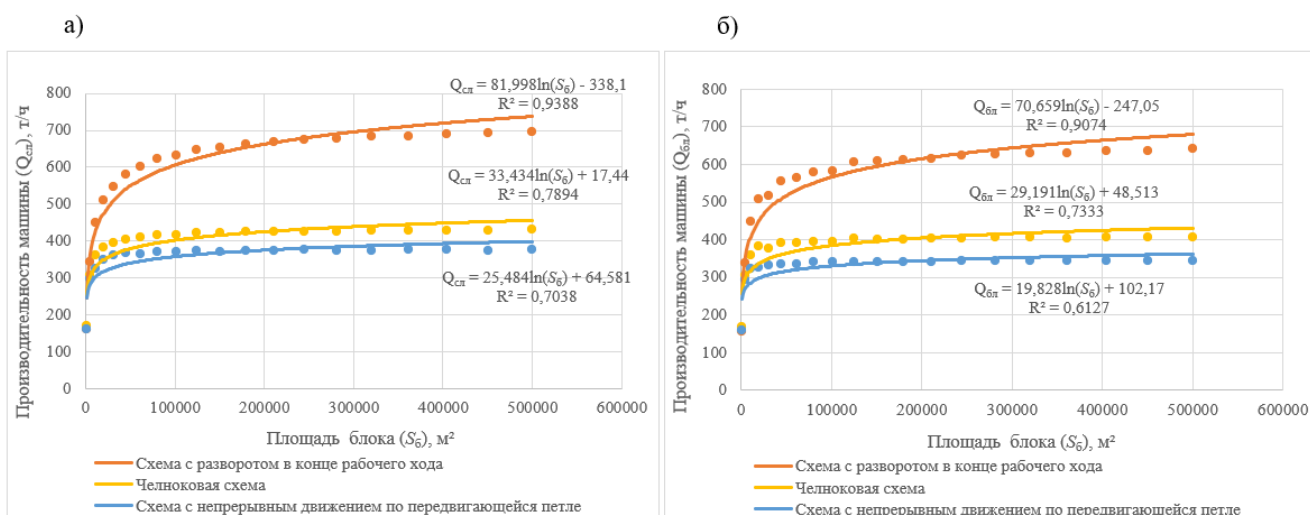


Рисунок 4 – График зависимости производительности машины послойного фрезерования от площади блока:

а – при отработке слоя блока; *б* – при разработке всего блока

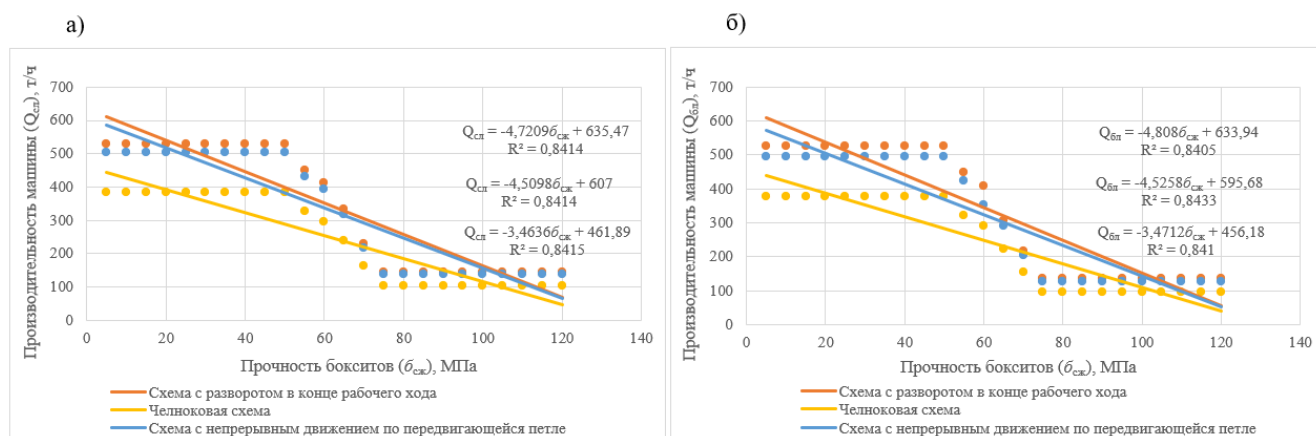


Рисунок 5 – График зависимости производительности машины послойного фрезерования от прочности бокситов:

а – при отработке слоя блока; *б* – при разработке всего блока

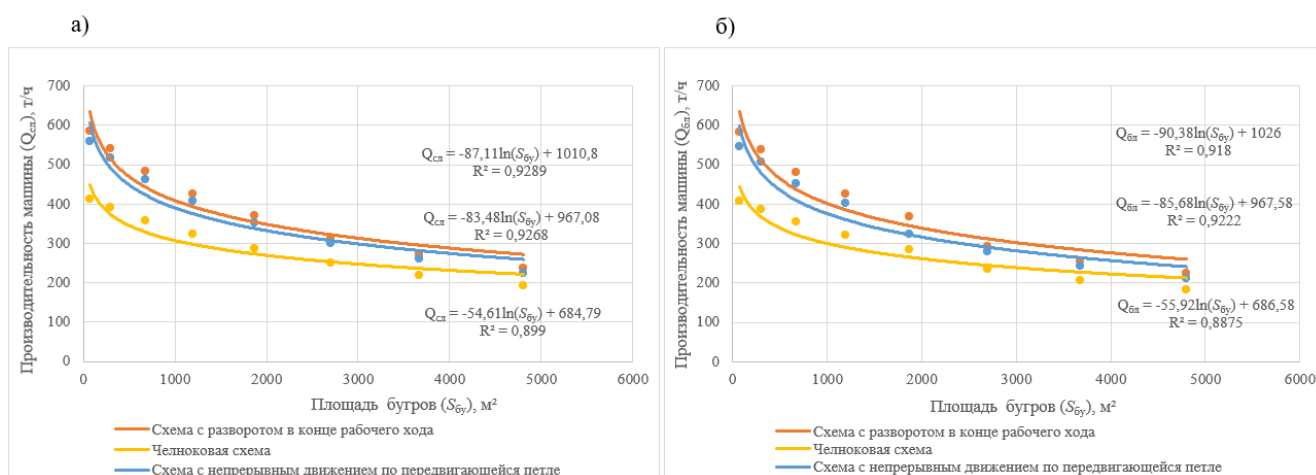


Рисунок 6 – График зависимости производительности машины послойного фрезерования от площади бугров:

а – при отработке слоя блока; *б* – при разработке всего блока

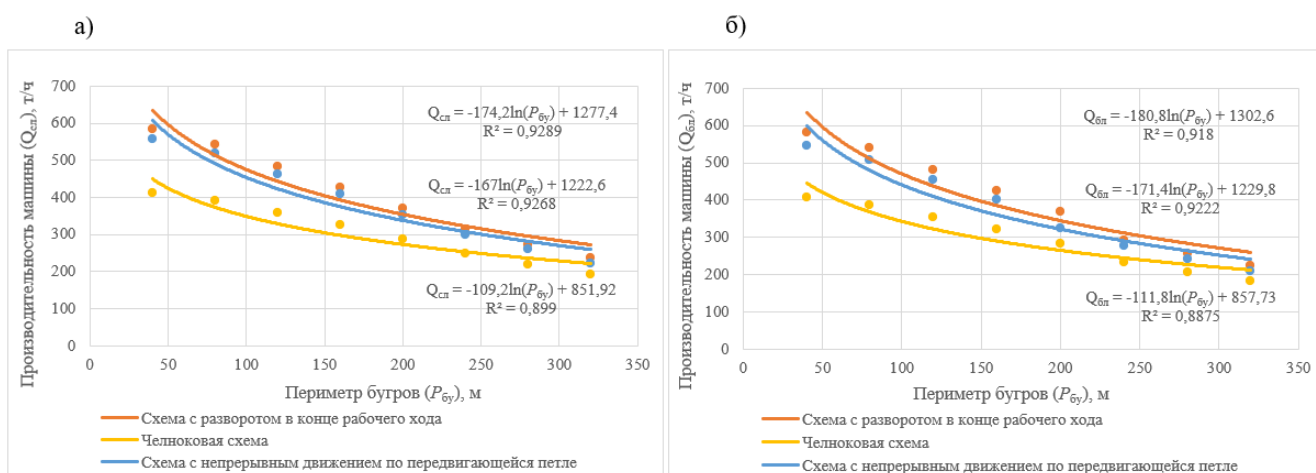


Рисунок 7 – График зависимости производительности машины послойного фрезерования от периметра бугров:

а – при отработке слоя блока; *б* – при разработке всего блока

Анализ результатов математического моделирования работы машины послойного фрезерования на участках с изменчивостью прочности бокситов позволил установить зависимость рациональной эксплуатационной производительности машины послойного фрезерования от её технической производительности, длины, ширины фрезеруемого блока и площади фрезеруемых бугров на поверхности блока.

Рациональная эксплуатационная производительность машины послойного фрезерования при разработке слоя блока в условиях изменчивости прочности породы, м³/ч:

- при отсыпке в штабель

$$Q_{\text{сл}} = 0,561 \cdot Q_{\text{т}}^{0,705} \cdot \frac{L_{\text{б}}^{0,246} \cdot \text{Ш}_{\text{б}}^{0,491}}{S_{\text{буг}}^{0,277}}, \quad (9)$$

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 равна 13,64 %.

- при погрузке в автосамосвалы

$$Q_{\text{сл}} = 0,592 \cdot Q_{\text{т}}^{0,698} \cdot \frac{L_{\text{б}}^{0,242} \cdot \text{Ш}_{\text{б}}^{0,459}}{S_{\text{буг}}^{0,264}}. \quad (10)$$

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

График зависимости наблюдаемого значения от планируемого значения установленной зависимости представлен на рисунке 8.

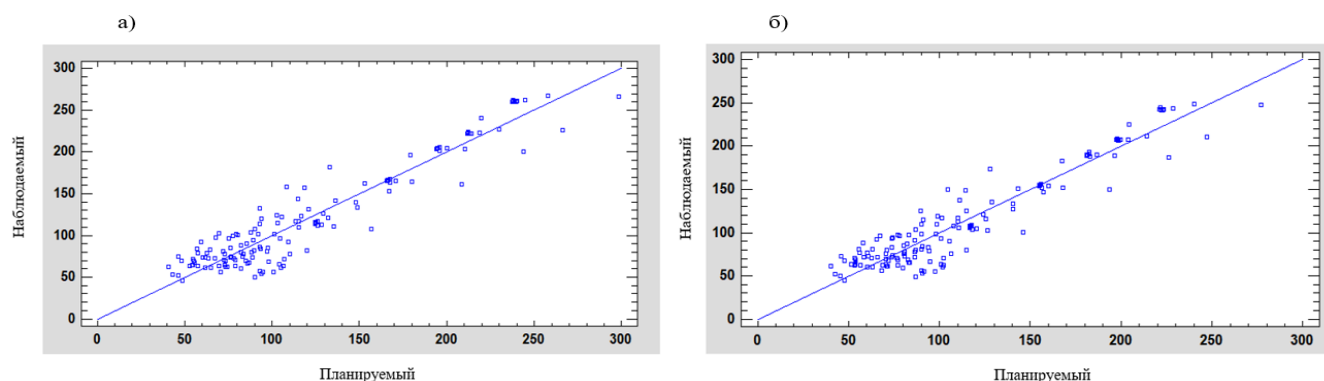


Рисунок 8 – График зависимости наблюдаемого значения от планируемого значения установленной зависимости:

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

В четвертой главе представлены математическое моделирование работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования, рекомендации по выбору способа погрузки автосамосвала, рекомендации по выбору технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования и оценка эффективности предложенных рекомендаций.

Целью моделирования работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования на участках с изменчивостью прочности бокситов является максимизация производительности комплекса оборудования путем минимизации затрат времени на выполнение непроизводительной работы (при фрезеровании слоя и бугров) и простоя машины послойного фрезерования.

В результате математического моделирования работы выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования, были построены графики зависимости эксплуатационной производительности выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования от количества автосамосвалов при различных длине блока, площади бугров и расстоянии транспортирования которые представлены на рисунках 9–11.

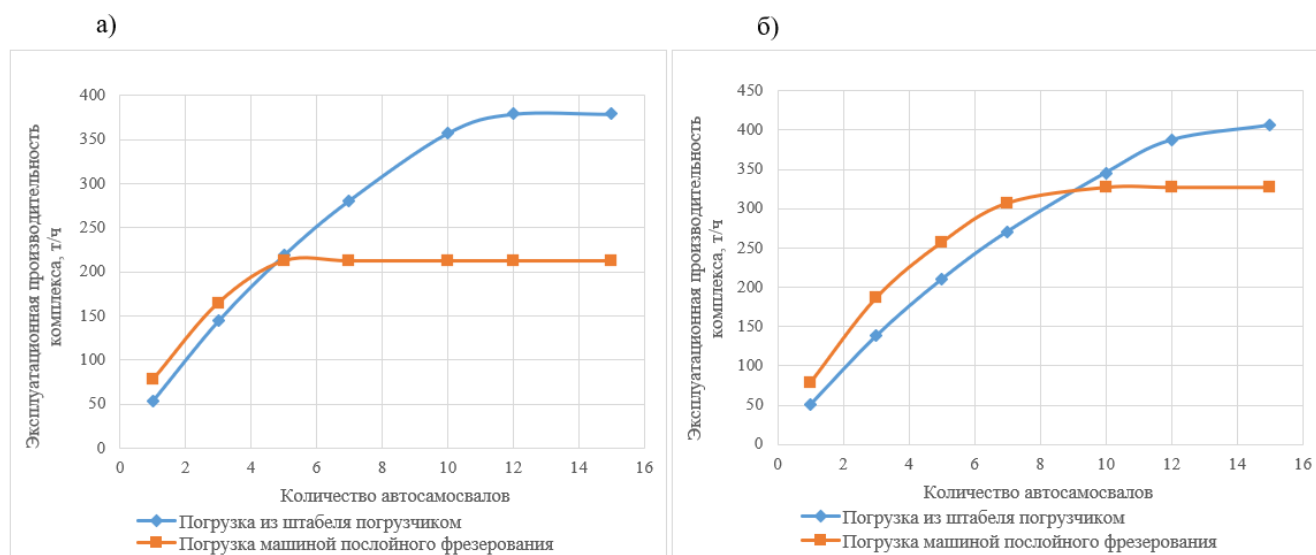


Рисунок 9 – Графики зависимости эксплуатационной производительности комплексов оборудования от количества автосамосвалов:

а – при длине блока 250 м; *б* – при длине блока 1500 м

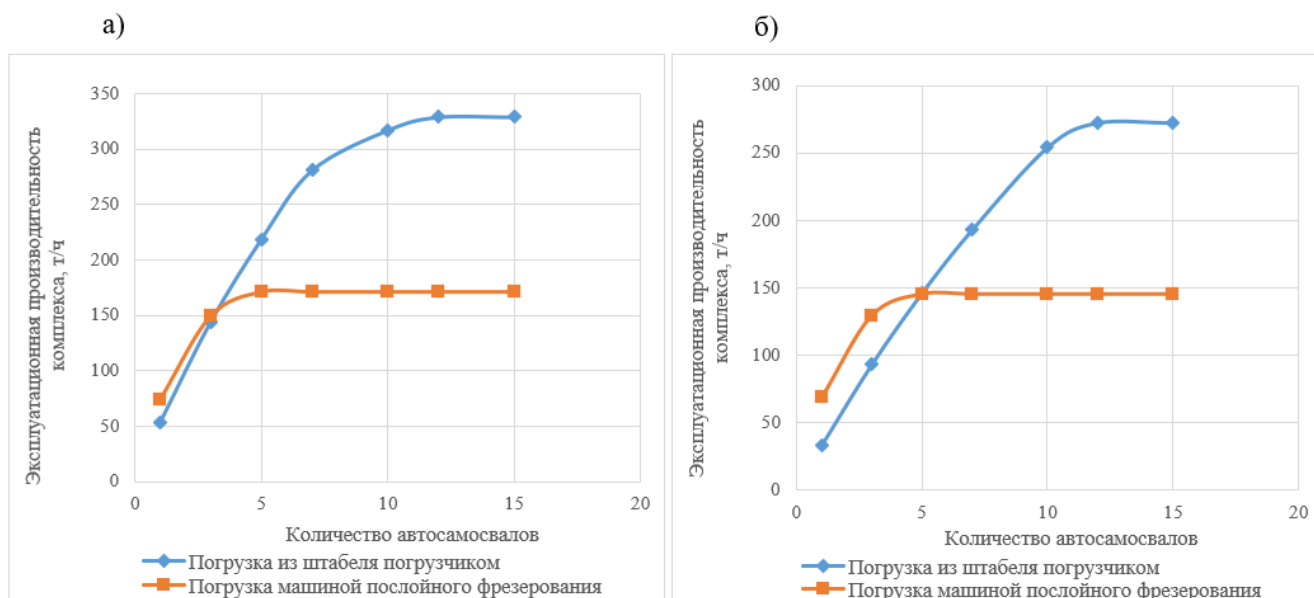


Рисунок 10 – Графики зависимости эксплуатационной производительности комплексов оборудования от количества автосамосвалов:

а – при площади бугров 2700 м²; *б* – при площади бугров 4800 м²

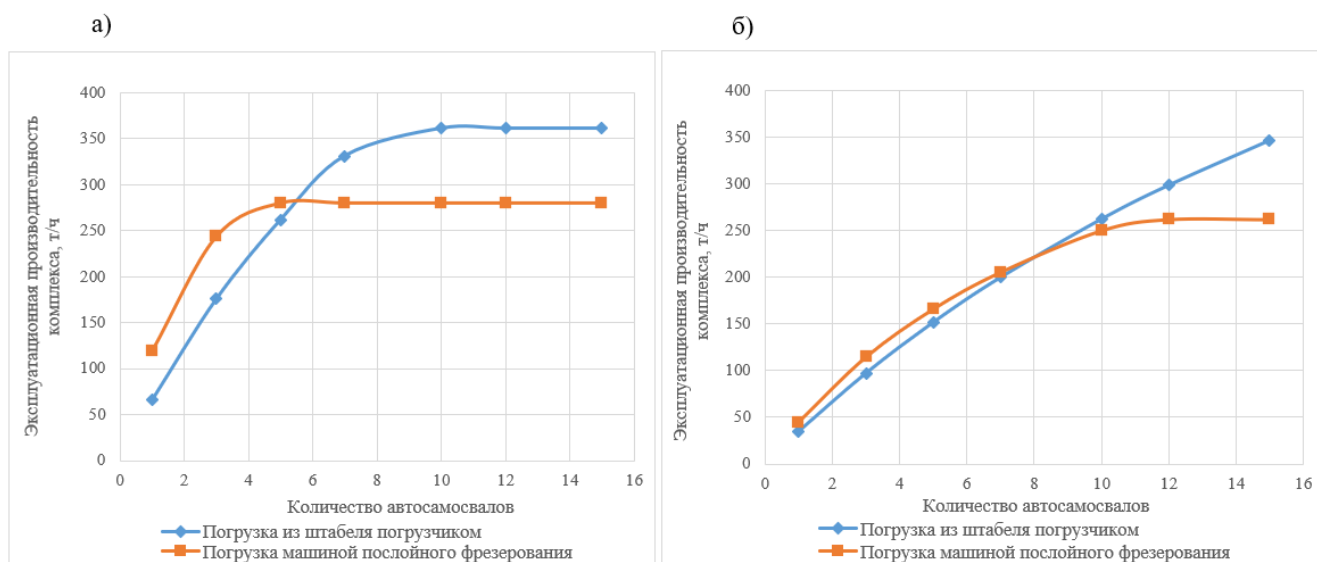


Рисунок 11 – Графики зависимости эксплуатационной производительности комплексов оборудования от количества автосамосвалов:

а – при расстоянии транспортирования 4 км; *б* – при расстоянии транспортирования 15 км

Из графиков можно сделать вывод, что выбор способа погрузки 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.

Таким образом, для выбора способа погрузки, рекомендуется использовать показатель P_v , который учитывает все эти факторы.

Показатель Π_b рассчитывается по следующей формуле:

$$\Pi_b = \frac{[t_p^{ab} + (t_{3a}^{ab} + t_{п}^{ab}) \cdot (n_a^{ab} - 1)]}{[t_o + t_p^{шт} + (t_{3a}^{шт} + t_{п}^{шт}) \cdot (n_a^{шт} - 1)]} \cdot \frac{n_a^{шт}}{n_a^{ab}}, \quad (11)$$

где t_p^{ab} и $t_p^{шт}$ — продолжительность рейса автосамосвала при погрузке пород непосредственно в автосамосвалы и погрузке из штабеля погрузчиком, мин; t_{3a}^{ab} и $t_{3a}^{шт}$ — время обмена автосамосвалов при установке для погрузки, при погрузке горных пород в автосамосвал машиной послойного фрезерования и погрузчиком, мин; $t_{п}^{ab}$ и $t_{п}^{шт}$ — время погрузки автосамосвала машиной послойного фрезерования и погрузчиком, мин; t_o — время ожидания для погрузчика, связанное с созданием первоначального фронта работ по отгрузке из штабеля, мин; n_a^{ab} и $n_a^{шт}$ — количество автосамосвалов в комплексе оборудования при погрузке машиной послойного фрезерования и погрузчиком.

При $\Pi_b < 1$ погрузка автосамосвала должна осуществляться непосредственно машиной послойного фрезерования, а при $\Pi_b > 1$ — погрузчиком из сформированного машиной послойного фрезерования штабеля.

Выбор технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования осуществляется в следующей последовательности:

- 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.

Рекомендации по выбору технологической схемы отработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования даны в виде блок-схемы алгоритма и представлены на рисунке 12.

Выбор схем отработки слоя блока и фрезерования бугров зависит от общего времени непроизводительной работы машины послойного фрезерования. Их 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).

Рекомендации по выбору схем обработки слоя блока и фрезерования бугров даны в виде блок-схемы алгоритма и представлены на рисунке 13.

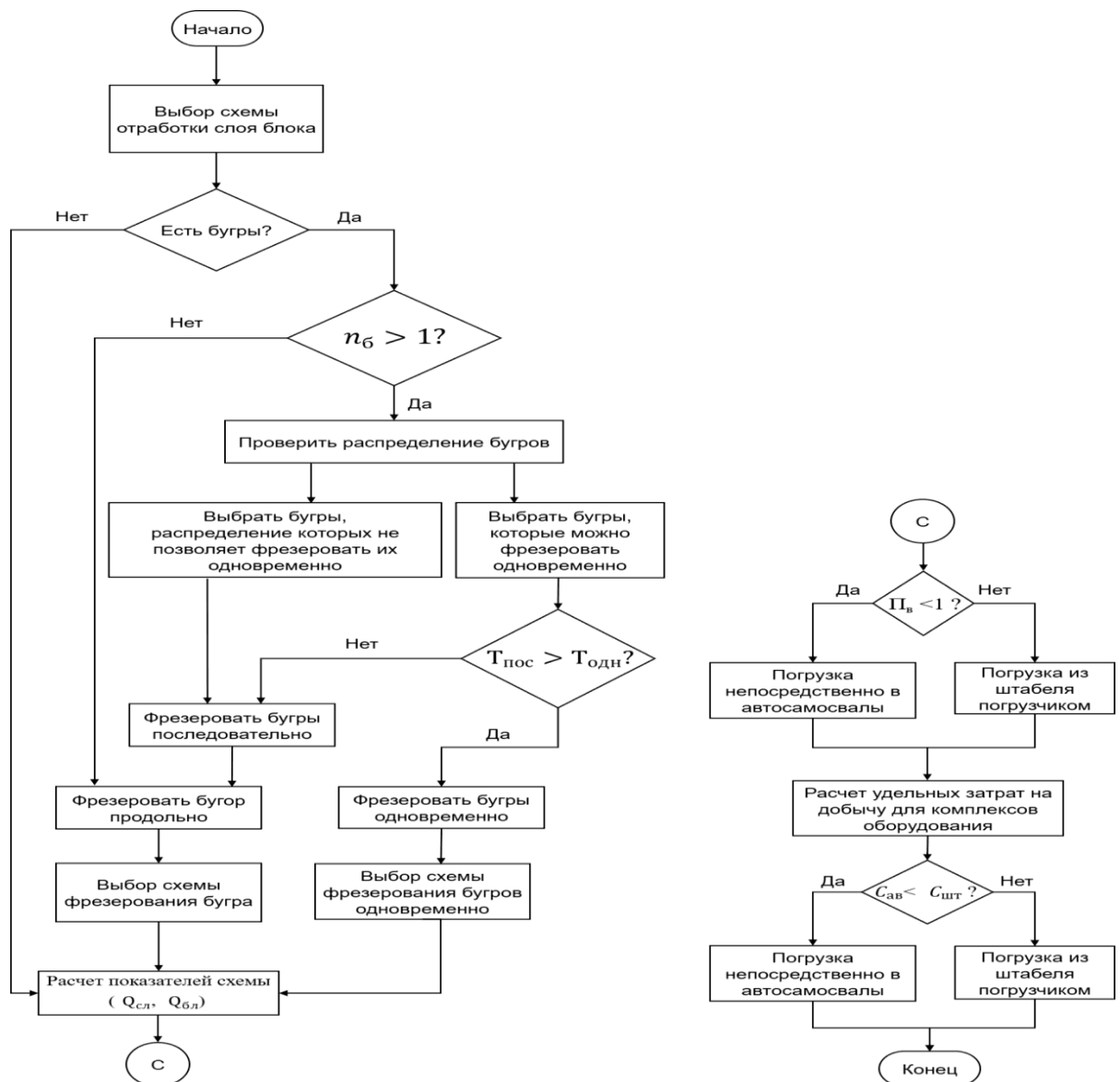


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма выбора технологической схемы обработки бокситовых руд машинами послойного фрезерования

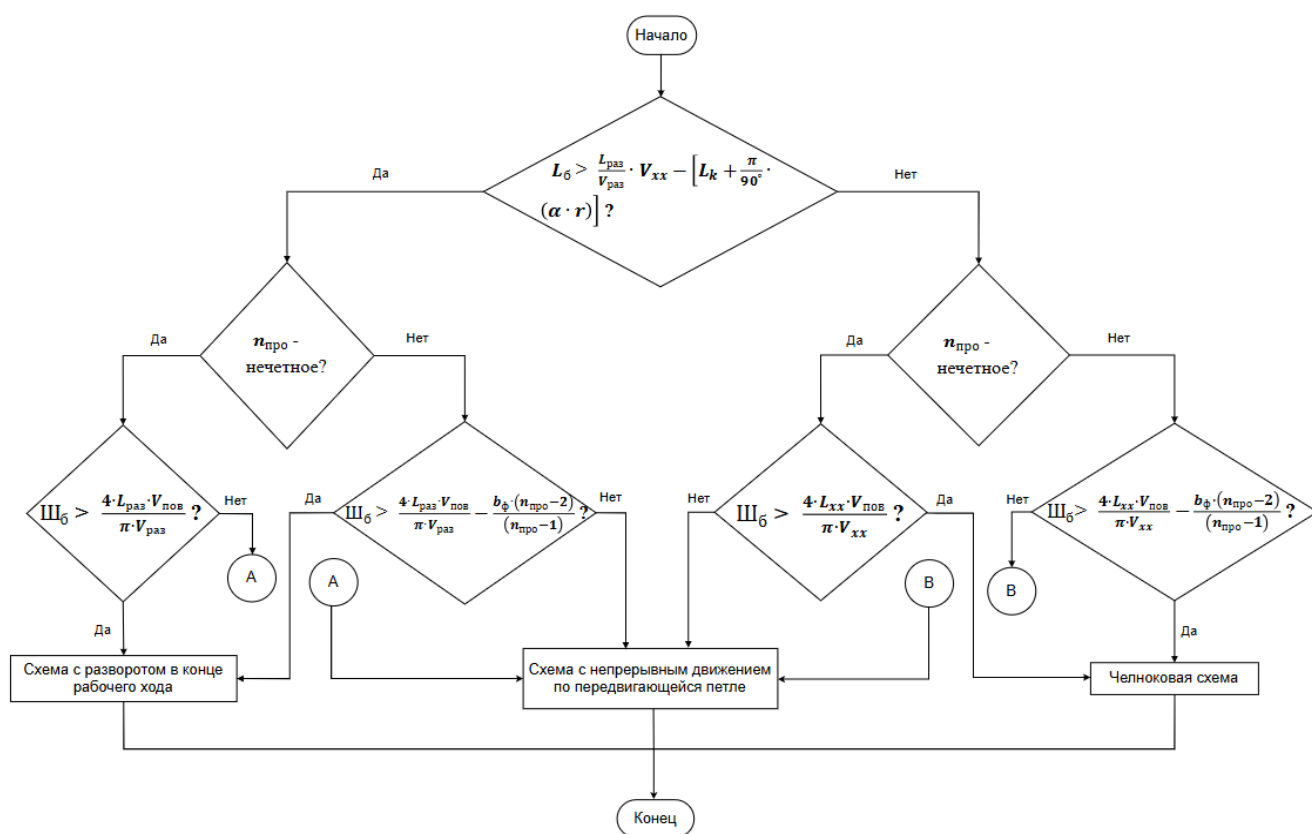


Рисунок 13 – Блок-схема алгоритма выбора схем отработки слоя блока, фрезерования бугра и фрезерования бугров одновременно

Здесь L_6 – длина блока или бугра (бугров, фрезеруемых без изменения направления движения машины послойного фрезерования), м; L_{xx} , $L_{раз}$ и $L_{пов}$ – длина холостого хода, хода при развороте и повороте машины послойного фрезерования, м; L_k – длина машины послойного фрезерования, м; r – радиус поворота машины послойного фрезерования, м; α – угол дуги поворота машины послойного фрезерования, град; $n_{про}$ – количество рабочих проходов; $Ш_6$ – ширина блока или бугра (бугров), м; V_{xx} , $V_{пов}$ и $V_{раз}$ – скорость движения машины послойного фрезерования холостым ходом, при выполнении поворота и разворота соответственно, м/мин; b_{ϕ} – ширина фрезерования, м; n_6 – количество бугров на поверхности блока после фрезерования слоя; $T_{пос}$ и $T_{одн}$ – общее время непроизводительной работы машины послойного фрезерования при фрезеровании бугров последовательно и при фрезеровании бугров одновременно, без изменения направления движения машины послойного фрезерования, мин; $Q_{сл}$ и $Q_{бл}$ – эксплуатационная производительность выемочно-транспортно-разгрузочного комплекса оборудования при фрезеровании слоя блока (и бугров) и разработки всего блока, м³/ч; $П_в$ – показатель, позволяющий выбрать способ погрузки; $C_{ав}$ и $C_{шт}$ – удельные затраты на добычу

полезного ископаемого при погрузке непосредственно в автосамосвалы и при погрузке из штабеля погрузчиком, \$/т.

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

$$T_{\text{пос}} = \sum_{i=1}^{n_6^{\text{пос}}} \left[(T_o + T_{\text{п}}) \cdot n_{\text{про}i} + (n_{\text{про}i} - 1) \cdot T_{\text{пр}i} \right] + \sum_{i=1}^{n_6^{\text{пос}}-1} \frac{K_i}{V_{\text{хх}}}, \quad (12)$$

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 без изменения направления движения машины послойного фрезерования, рассчитывается по следующей формуле, мин:

$$T_{\text{одн}} = (T_o + T_{\text{п}}) \cdot n_6^{\text{одн}} \cdot n_{\text{про}}^{\text{одн}} + (n_{\text{про}}^{\text{одн}} - 1) \cdot T_{\text{пр}}^{\text{одн}} + n_{\text{про}}^{\text{одн}} \cdot \sum_{i=1}^{n_6^{\text{одн}}-1} \frac{K_i}{V_{\text{хх}}} + T_{\text{до}}, \quad (13)$$

где $n_6^{\text{одн}}$ – количество фрезеруемых бугров одновременно; $n_{\text{про}}^{\text{одн}}$ – количество проходов машины послойного фрезерования при одновременной отработке бугров; $T_{\text{пр}}^{\text{одн}}$ – 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 (12).

Оценка эффективности предложенных рекомендаций 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. Были рассчитаны удельные затраты на добычу 1 т руды для фактических условий и рекомендуемых технолого-организационных решений и в результате установлено, что наибольшее сокращение удельных затрат на добычу бокситовой руды составило 18,67%.

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 отрабатываемого 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 Π_6 фрезеруемого блока, площади повторно фрезеруемых неровностей (бугров) на поверхности блока S_{6y} при отсыпке в штабель: $Q_{cl} = 0,561 \cdot Q_T^{0,705} \cdot \frac{L_6^{0,246} \cdot \Pi_6^{0,491}}{S_{6y}^{0,277}}$ и при погрузке в автосамосвалы: $Q_{cl} = 0,592 \cdot Q_T^{0,698} \cdot \frac{L_6^{0,242} \cdot \Pi_6^{0,459}}{S_{6y}^{0,264}}$.

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_b . При $P_b < 1$ погрузка автосамосвала должна осуществляться непосредственно машиной послойного фрезерования, при $P_b > 1$ – погрузчиком из сформированного машиной послойного фрезерования штабеля.

10. Разработана математическая модель работы машин послойного фрезерования, которая позволяет определить техническую и эксплуатационную производительность машины послойного 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 послойного фрезерования. Применение данного алгоритма и рекомендаций в условиях бокситового месторождения позволило достигнуть повышения эксплуатационной производительности машины послойного 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.

Публикации автора

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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>