

На правах рукописи

Лелен Алекса



**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
БЕЗВЗРЫВНОЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ
СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ КАРБОНАТНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ (РЕСПУБЛИКА СЕРБИЯ)**

*Специальность 2.8.7. Теоретические основы проектирования гор-
нотехнических систем*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Фомин Сергей Игоревич

Официальные оппоненты:

Рыльникова Марина Владимировна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, отдел Теории проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр, главный научный сотрудник.

Рославцева Юлия Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра разработки месторождений полезных ископаемых, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Защита диссертации состоится **18 сентября 2025 г. в 10:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При разработке месторождений цементного сырья, как правило, используется буровзрывной метод подготовки горных пород к выемке и погрузке. Хотя этот метод имеет свои преимущества, он также связан с определёнными недостатками: опасность возникновения сейсмических явлений при ведении горных работ; повышенное выделение загрязняющих веществ; риск разлёта кусков взорванной горной массы; значительные эксплуатационные затраты на ведение буровзрывных работ.

Применительно к горно-геологическим условиям отработки сложноструктурных месторождений цементного сырья наиболее полно удовлетворяет требованиям обеспечения эффективной разработки безвзрывная технология тонкослойной выемки с применением фрезерных машин (горных комбайнов), зарекомендовавшая себя на многих горнодобывающих объектах.

Основные аргументы в пользу применения безвзрывной фрезерной технологии при разработке месторождений цементного сырья с использованием горных комбайнов: снижение потерь и разубоживания; возможность селективной выемки разнородных пластов известняков, а также отработки запасов маломощных участков (мощностью до 0,3 м); возможность переоценки промышленной значимости и отработки запасов маломощных рудных тел; уменьшение числа технологических операций и количества основных и вспомогательных механизмов, сроков их монтажа; снижение потребностей в запчастях, уменьшение численности обслуживающего персонала; исключение повышенного пыле- и газовыделения, разлёта кусков; повышение безопасности ведения горных работ; упрощение процесса управления качеством, так как забоем является горизонтальная (либо слабонаклонная) поверхность, а не точечный забой (группа забоев); сведение к минимуму экологических рисков при отработке запасов в природоохранных зонах; исключение процесса крупнокускового дробления на шихтовальном складе и среднего дробления на заводе.

Степень разработанности темы исследования. Отдельные методы проектирования, а также технологические схемы для карьеров по добыче цементного сырья для горнотехнических условий разработки карбонатных месторождений, отрабатываемых с использованием технологий послойного фрезерования, были рассмотрены в трудах таких учёных, как Трубецкой К.Н., Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю., Пихлер М., Панкевич Ю.Б., Авраамова Н.С., Подэрни Р.Ю., Чебан А.Ю., Маттис А.Р., Набока Н.В. и ряд других.

Однако методы определения параметров и показателей открытой разработки сложноструктурных месторождений цементного сырья карьеров с использованием машин послойного фрезерования в процессе проектирования до сих пор не получили достаточного развития, нуждаются в совершенствовании и адаптации к современным реалиям.

Таким образом, обоснование методов проектирования безвзрывной открытой разработки сложноструктурных месторождений цементного сырья с применением технологий послойного фрезерования является актуальной научной и практической задачей.

Объект исследования - процесс безвзрывной фрезерной технологии при разработке месторождений цементного сырья с использованием горных комбайнов послойного фрезерования.

Предмет исследования – метод проектирования безвзрывной открытой разработки сложноструктурных месторождений цементного сырья с применением технологий послойного фрезерования.

Цель работы – обоснование и разработка методов проектирования безвзрывной открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений цементного сырья с учётом горнотехнических особенностей использования машин послойного фрезерования, позволяющих повысить эффективность и достоверность проектных решений.

Идея работы заключается в том, что параметры и показатели открытой разработки с использованием машин послойного фрезерования должны определяться на основе разработанных методов и технологических схем, учитывающих горнотехнические и горно-геологические условия отработки сложноструктурных месторождений

цементного сырья Республики Сербия, позволяющих повысить безопасность, эффективность и достоверность проектных решений.

Поставленная в диссертации цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ методологии проектирования открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений.

2. Обоснование развития методов определения параметров карьеров при проектировании отработки машинами послойного фрезерования, учитывающих горнотехнические и горно-геологические условия сложноструктурных месторождений цементного сырья Республики Сербия.

3. Разработка и обоснование технологических решений при проектировании и планировании развития горных работ с применением машин послойного фрезерования на карьерах по добыче сырья для производства цемента.

4. Изучение зависимостей параметров и показателей системы открытой разработки сложноструктурных месторождений цементного сырья от горнотехнических факторов применения горных комбайнов послойного фрезерования.

5. Разработка методики определения производительности карьеров по добыче сырья для производства цемента с использованием горных комбайнов послойного фрезерования, для горно-геологических и горнотехнических условий открытой разработки карбонатных месторождений Республики Сербия.

6. Анализ влияния относительного изменения различных горнотехнических параметров открытой разработки сложноструктурных месторождений с использованием горных комбайнов послойного фрезерования на производительность карьеров по добыче цементного сырья.

Научная новизна:

1. Установлена степень воздействия параметров и показателей системы разработки на производительность карьеров по добыче сырья для производства цемента с учетом геологических, горнотехнических и организационных аспектов использования машин послойного фрезерования при разработке сложноструктурных карбонатных месторождений Республики Сербия: глубина и ширина

полосы фрезерования, коэффициент использования, длина фронта работ, скорость фрезерования.

2. Установлена параболическая зависимость рациональной протяжённости рабочей зоны горных комбайнов Surface Miner от суммарных удельных затрат при транспортировании горной массы карьерным автомобильным транспортом для горнотехнических условий карьеров, разрабатывающих сложноструктурные карбонатные месторождения Республики Сербия.

3. Определена аналитическая зависимость, позволяющая установить производительность горнотехнической системы для карьеров, разрабатывающих сложноструктурные месторождения цементного сырья Республики Сербия с использованием технологии послойного фрезерования, учитывающая скорость движения фронта горных работ, скорость движения заходки по длине фронта, мощность обрабатываемого слоя горных пород, ширину полосы фрезерования, длину фронта горных работ, вид принятой технологической схемы обработки.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем по следующим подпунктам пункта 2: выбор способа разработки месторождения или его части; обоснование параметров горнотехнических систем на базе сочетаний различных геотехнологий, выбор области их применения на месторождении и в региональном масштабе; установление производственной мощности горных предприятий и последовательности строительства и ввода в эксплуатацию.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложены и аргументированы технологические схемы разработки месторождений с применением горных комбайнов послойного фрезерования для горнотехнических условий карьеров по добыче цементного сырья.

2. Разработана программа для определения факторов, оказывающие значительное воздействие на производительность карьеров по добыче цементного сырья, разрабатываемых с использованием горных комбайнов послойного фрезерования. Программа защищена

свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660377.

3. Сформулированы ключевые принципы формирования горнотехнической системы и определены области использования технологических схем разработки месторождений на карьерах по добыче цементного сырья, реализуемые с использованием фрезерных горных комбайнов.

Методики и рекомендации, полученные на основе результатов исследований, могут быть применены на горнодобывающих предприятиях цементной промышленности, где при разработке месторождений применяются горные комбайны послойного фрезерования, в проектных организациях, при проектировании и планировании горных работ на цементном заводе ООО «Lafarge BFC (СРБ)» в Сербии и карьерах и месторождениях-аналогах.

Получены 2 акта о внедрении результатов кандидатской диссертации на профильных предприятиях АО «Гипронеруд» от 26.11.2024 г. и АО «Гипроцветмет» от 29.01.2025 г.

Методология и методы исследований

В рамках поставленных задач исследования был реализован системный подход, включающий в себя рассмотрение и анализ научных работ авторов, посвящённых проектированию карьеров, технологиям открытой разработки месторождений цементного сырья, а также обобщение опыта реализации проектов. Основными методами исследования являлись: мониторинг реализации проектов карьеров по добыче цементного сырья; системный анализ элементов системы-карьер и характеристик технологических схем карьеров, отрабатывающих сложноструктурные карбонатные месторождения с применением горных комбайнов послойного фрезерования; математическая статистика; компьютерное моделирование, а также классические экономические подходы.

Положения, выносимые на защиту:

1. При проектировании открытой разработки с использованием машин послойного фрезерования рациональную протяженность рабочей зоны, приходящейся на комбайн, следует определять по разработанной методике, учитывающей горно-геологические и

горнотехнические условия сложноструктурных месторождений цементного сырья Республики Сербия, обеспечивающей повышение эксплуатационной производительности фрезерных комбайнов Surface Miner на 8-12 % и экономическую эффективность результатов реализации проектных решений.

2. Величина производительности карьера по добыче цементного сырья должна определяться на основе выявленной аналитической зависимости с учетом горно-геологических и горнотехнических особенностей отработки сложноструктурных месторождений, позволяющей определять степень влияния параметров и показателей системы разработки (скорость перемещения фрезерного горного комбайна, мощность и ширина полос фрезерования, протяженность рабочей зоны, приходящейся на комбайн, и коэффициент потерь) на конечный результат реализации проектных решений.

3. Для повышения эффективности применения горных комбайнов типа «Continuous Surface Miner» (CSM) на карьерах по отработке сложноструктурных месторождений цементного сырья следует проектировать циклично-поточные или поточные технологические схемы отработки эксплуатационного блока параллельными заходками с минимальным количеством вспомогательных технологических операций и холостых ходов.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением положений методологии проектирования карьеров, компьютерным моделированием, использованием материалов оценки результатов реализации отечественных и зарубежных проектов, привлечением информации о ситуации на рынках цементного сырья, внедрением результатов исследований в проектную документацию.

Апробация результатов. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: XII Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» (2-3 ноября 2022 г., г. Тула); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их осво-

ение» (26 апреля 2023 г., г. Санкт-Петербург); XXVII Международный молодёжный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (3-7 апреля 2023 г., г. Томск); XIV Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». (22-23 апреля 2025 г., г. Междуреченск).

Личный вклад автора заключается в проведении анализа методологии проектирования открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений; разработке и обосновании технологических решений при проектировании и планировании развития горных работ с применением машин послойного фрезерования на карьерах по добыче цементного сырья; установлении зависимостей параметров и показателей системы открытой разработки сложноструктурных месторождений цементного сырья от горнотехнических факторов применения горных комбайнов послойного фрезерования; разработке методики определения производительности карьеров по добыче сырья для производства цемента с использованием горных комбайнов для горно-геологических и горнотехнических условий открытой разработки карбонатных месторождений; анализе влияния относительного изменения параметров открытой разработки с использованием горных комбайнов на производительность карьеров по добыче цементного сырья; технико-экономической оценке результатов разработки месторождения «Муталь» в составе цементного завода в Беочине ООО «Lafarge BFC (СРБ)».

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения,

списка литературы, включающего 111 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 155 страниц машинописного текста, содержит 29 рисунков и 30 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены защищаемые положения.

В первой главе представлен анализ горнотехнических и горно-геологических условий отработки месторождений осадочных карбонатных пород; анализ методологии проектирования открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений; обоснование развития методов определения параметров карьеров при проектировании и отработке сложноструктурных карбонатных месторождений машинами послойного фрезерования.

Во второй главе рассмотрена оценка надежности работы технологических комплексов карьеров по добыче цементного сырья; обоснование технологических схем открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений с использованием машин послойного фрезерования; определение потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послойного фрезерования.

В третьей главе представлена методика определения рациональной длины фронта работ при открытой разработке сложноструктурных карбонатных месторождений с использованием машин послойного фрезерования с погрузкой в транспортные средства; анализ чувствительности параметров и показателей системы открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений с использованием машин послойного фрезерования; разработана методика определения производительности карьеров цементной промышленности, разрабатываемых с использованием комбайнов послойного фрезерования.

В четвертой главе отражены результаты технико-экономической оценки разработки месторождения «Муталь» цементного завода «Беочин», отрабатываемого карьером ООО «Lafarge (СРБ)».

Обоснован выбор технологии обработки месторождения, вид применяемых технологических схем и методика определения параметров и показателей системы открытой разработки месторождения «Муталь» на основе сравнения результатов реализации базового и проектного вариантов обработки месторождения.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. При проектировании открытой разработки с использованием машин послойного фрезерования рациональную протяженность рабочей зоны, приходящейся на комбайн, следует определять по разработанной методике, учитывающей горно-геологические и горнотехнические условия сложноструктурных месторождений цементного сырья Республики Сербия, обеспечивающей повышение эксплуатационной производительности фрезерных комбайнов Surface Miner на 8-12 % и экономическую эффективность результатов реализации проектных решений.

Увеличение производительности машин послойного фрезерования достигается при рациональных параметрах эксплуатационного блока, обеспечивающих поточную или циклично-поточную технологию обработки, при минимальном количестве вспомогательных операций и холостых проходов фрезерного горного комбайна Surface Miner (SM).

Определение рациональных параметров эксплуатационного блока при открытой разработке месторождений цементного сырья сложного строения с использованием машин послойного фрезерования с учётом удельных эксплуатационных затрат позволит оптимизировать систему обработки и снизить эксплуатационные затраты на добычу полезных ископаемых.

В процессе замеров продолжительности работы комбайна при фрезеровании горных пород определялось время каждой загрузки автосамосвала, время на маневры и обмен автосамосвалов под погрузку. Фиксировалась продолжительность простоев по технологическим и организационным причинам, в том числе из-за отсутствия транспортных средств, а также время на ежесменное обслуживание,

включающее заправку дизельным топливом, плано-профилактические и ремонтные работы.

Рациональная длина блока при работе горного комбайна определяется с учётом обеспечения установленной в проектной документации производственной мощности карьера при минимизации эксплуатационных затрат. Годовая производительность карьера по добыче цементного сырья определяется как (1):

$$A_d = V_{\phi} \cdot L_B \cdot h_y, \text{ м}^3/\text{год} \quad (1)$$

где V_{ϕ} - скорость перемещения фронта горных работ, м/год; L_B - длина эксплуатационного блока, м; h_y - высота уступа, м.

При карьерном автомобильном транспорте горной массы общие удельные эксплуатационные затраты, зависящие от длины эксплуатационного блока фрезерного горного комбайна, следует рассчитывать по формуле (2):

$$Z_o = Z_T + Z_C + Z_{\Pi}, \text{ руб./т} \quad (2)$$

где Z_T - удельные затраты на транспортирование цементного сырья, руб./т; Z_{Π} - удельные затраты на эксплуатацию автодорог, руб./т.; Z_C - удельные затраты на возведение автодорог, руб./т.

Средняя дальность транспортирования цементного сырья определяется как (3):

$$L_{TCP} = \left[\frac{L_B + V_{\phi}}{2} \right] + L_{ЗР}, \text{ м} \quad (3)$$

где $L_{ЗР}$ - расстояние транспортирования от начала заходки фрезерного комбайна до места разгрузки, м.

Производительность автосамосвала за смену (4):

$$Q_A = \frac{G_A \cdot V_{CP} \cdot T_{CM}}{L_B + V_{\phi} + 2 \cdot L_{ЗР}}, \text{ т/смен.} \quad (4)$$

где G_A - вес перевозимого груза, т; V_{CP} - средняя скорость перемещения автосамосвала, м/ч; T_{CM} - время работы автотранспорта, ч/смен.

Удельные затраты при транспортировании (5):

$$Z_{TA} = \frac{C_{MC} \cdot (L_B + V_{\phi} + 2 \cdot L_{ЗР})}{G_A \cdot V_{CP} \cdot T_{CM}}, \text{ руб./т} \quad (5)$$

где C_{MC} - стоимость машино-смены работы автосамосвала, руб./смен.

Удельные затраты на возведение автодороги (6):

$$Z_{CA} = Z_{\Pi M} \cdot \frac{Z_{CM} \cdot V_{\phi}}{Q_{ЭФ}}, \text{ руб./т} \quad (6)$$

где Z_{CM} - эксплуатационные затраты на возведение 1 м автодороги, руб.; $Q_{ЭФ}$ - производительность горного комбайна, т/год.

Удельные затраты на техническое поддержание карьерной автодороги в рабочем состоянии (7):

$$З_{ПД} = \frac{З_{ПМ} \cdot V_{\Phi}}{2 \cdot Q_{ЭФ}}, \text{руб./т} \quad (7)$$

где $З_{ПМ}$ - затраты на содержание 1 м автодороги, руб.

Суммарные удельные затраты на перемещение автосамосвалами цементного сырья, зависящие от длины эксплуатационного блока (8):

$$З_{ОА} = \frac{C_{МС} \cdot (L_{Б} + V_{\Phi} + 2 \cdot L_{ЗР})}{G_{А} \cdot V_{СР} \cdot T_{СМ}} + \frac{V_{\Phi}}{Q_{ЭФ}} (З_{СМ} + 0,5 \cdot З_{ПМ}), \text{руб./т} \quad (8)$$

Скорость перемещения фронта горных работ (9):

$$V_{\Phi} = \frac{Q_{ЭФ}}{L_{Б} \cdot h \cdot \gamma_{Р}}, \text{м/год} \quad (9)$$

где $\gamma_{Р}$ - плотность сырья, т/м³.

Постановка (8) и (9) позволяет получить (10) и (11):

$$З_{ОА} = \frac{C_{МС} \cdot L_{Б}}{G_{А} \cdot V_{СР} \cdot T_{СМ}} + \frac{C_{МС} \cdot Q_{ЭФ}}{G_{А} \cdot V_{СР} \cdot T_{СМ} \cdot L_{Б} \cdot h \cdot \gamma_{Р}} + \frac{2 \cdot C_{МС} \cdot L_{ЗР}}{G_{А} \cdot V_{СР} \cdot T_{СМ}} + \frac{З_{СМ} + 0,5 \cdot З_{ПМ}}{L_{Б} \cdot h \cdot \gamma_{Р}}, \text{руб./т} \quad (10)$$

$$\frac{dЗ_{ОА}}{dL_{Б}} = \frac{C_{МС}}{G_{А} \cdot V_{СР} \cdot T_{СМ}} - \frac{C_{МС} \cdot Q_{ЭФ}}{G_{А} \cdot V_{СР} \cdot T_{СМ} \cdot L_{Б}^2 \cdot h \cdot \gamma_{Р}} - \frac{З_{СМ} + 0,5 \cdot З_{ПМ}}{L_{Б}^2 \cdot h \cdot \gamma_{Р}} \quad (11)$$

Вторая производная $\frac{d^2З_{ОА}}{dL_{Б}^2} > 0$, таким образом, зависимость (10) имеет минимум.

На основе приведенных зависимостей установлено в конечном виде выражение для получения рациональной длины эксплуатационного блока для фрезерного комбайна Surface Miner (12):

$$L_{Б} = \sqrt{\frac{C_{МС} \cdot Q_{ЭФ} + G_{А} \cdot V_{СР} \cdot T_{СМ} \cdot (З_{СМ} + 0,5 \cdot З_{ПМ})}{C_{МС} \cdot h \cdot \gamma_{Р}}}, \text{м} \quad (12)$$

Анализ полученной зависимости (12) позволил установить, что при увеличении длины эксплуатационного блока со 150 до 250 м эксплуатационная производительность фрезерных комбайнов Surface Miner возрастает на 8-12 %

На рисунке 1 представлен график зависимости суммарных удельных затрат от длины эксплуатационного блока фрезерного комбайна.

Таким образом, рациональное значение длины эксплуатационного блока для фрезерного комбайна Surface Miner при автотранспорте цементного сырья составит 210 - 230 м.

2. Величина производительности карьера по добыче цементного сырья должна определяться на основе выявленной аналитической зависимости с учетом горно-геологических и горно-технических особенностей отработки сложноструктурных месторождений, позволяющей определять степень влияния параметров и показателей системы разработки (скорость перемещения фрезерного горного комбайна, мощность и ширина полос фрезерования, протяженность рабочей зоны, приходящейся на комбайн, и коэффициент потерь) на конечный результат реализации проектных решений.

Определённое изменение одного из параметров или показателей системы разработки месторождения приводит к изменению производительности карьера A_k (млн м³/год). В целях оценки степени влияния различных параметров системы разработки месторождения цементного сырья на производительность карьера:

а) при использовании челноковой технологической схемы послойного фрезерования воспользуемся полученной аналитической формулой (13):

$$A_1 = \frac{60 \cdot h \cdot b \cdot l_{\text{ФР}} \cdot K_{\text{И}} \cdot T_{\text{СМ}} \cdot K_{\text{БЛ}} \cdot N_{\text{СМ}}}{t_0 + \frac{l_{\text{ФР}}}{V_{\text{Р}}} + t_{\text{П}} + \frac{l_{\text{ФР}}}{V_{\text{Х}}}} \cdot \frac{1-\eta}{1-\rho} + m \cdot K_{\text{У}} \cdot K_{\text{ТО}} \cdot K_{\text{ОСМ}} \cdot K_{\text{ОЖ}} \quad (13)$$

б) при использовании технологической комбайна с разворотом в конце рабочей заходки и рабочим ходом в обратном направлении воспользуемся полученной аналитической формулой (14):

$$A_2 = \frac{60 \cdot h \cdot b \cdot l_{\text{ФР}} \cdot K_{\text{И}} \cdot T_{\text{СМ}} \cdot K_{\text{БЛ}} \cdot N_{\text{СМ}}}{t_0 + \frac{l_{\text{ФР}}}{V_{\text{Р}}} + t_{\text{П}} + t_{\text{РОВО}}} \cdot \frac{1-\eta}{1-\rho} + m \cdot K_{\text{У}} \cdot K_{\text{ТО}} \cdot K_{\text{ОСМ}} \cdot K_{\text{ОЖ}} \quad (14)$$

в) при использовании поточной технологической схемы послойного фрезерования воспользуемся полученной аналитической формулой (15):

$$A_3 = 60 \cdot h \cdot b \cdot l_{\text{ФР}} \cdot K_{\text{И}} \cdot T_{\text{СМ}} \cdot K_{\text{БЛ}} \cdot N_{\text{СМ}} \cdot \frac{1-\eta}{1-\rho} + m \cdot K_{\text{У}} \cdot K_{\text{ТО}} \times K_{\text{ОСМ}} \cdot K_{\text{ОЖ}} \quad (15)$$

В приведенных формулах: h – мощность слоя отработки горным комбайном, м; b – ширина заходки комбайна, м; $K_{И}$ – коэффициент использования оборудования во времени; $K_{БЛ}$ – коэффициент блочности массива обрабатываемых горных пород; η – нормативный коэффициент потерь; ρ – нормативный коэффициент разубоживания; V_P – скорость рабочего хода горного комбайна, м/мин.; V_X – скорость холостого хода фрезерного агрегата, м/мин.; t_o – продолжительность опускания рабочего органа на забой, мин.; $t_{п}$ – продолжительность подготовки рабочего органа к фрезерованию забоя, мин.; m – количество горных комбайнов, обрабатывающих уступ, шт.; K_y – количество уступов, находящихся в отработке, шт.; $K_{ТО}$ – коэффициент технической готовности горного комбайна; $K_{ОСМ}$ – коэффициент обслуживания рабочего органа комбайна; $K_{ОЖ}$ – коэффициент, учитывающий продолжительность ротации автосамосвалов при погрузке горной массы горным комбайном; $l_{ФР}$ – протяжённость рабочей зоны, м; $N_{СМ}$ – количество смен работы горного комбайна в год, смен.; $T_{СМ}$ – продолжительность рабочей смены, ч; t_{POW} – время на поворот комбайна для фрезерования в обратном направлении, мин.

Результаты расчётов представлены на рисунках 2, 3, 4.

По степени влияния параметров системы разработки месторождения цементного сырья можно выделить 3 категории параметров: высокая степень влияния – длина эксплуатационного блока ($l_{ФР}$), мощность слоя отработки горным комбайном (h); средняя степень влияния – ширина заходки комбайна (b), скорость перемещения горного комбайна по длине заходки; низкая значимость (V_P) – нормативный коэффициент потерь (η), скорость перемещения горного комбайна холостым ходом (V_X).

3. Для повышения эффективности применения горных комбайнов типа «Continuous Surface Miner» (CSM) на карьерах по отработке сложноструктурных месторождений цементного сырья следует проектировать циклично-поточные или поточные технологические схемы отработки эксплуатационного блока параллельными заходками с минимальным количеством вспомогательных технологических операций и холостых ходов.

Челноковая технологическая схема работы комбайна реализуется при небольшой длине эксплуатационного блока (менее 150 м),

определяемой временем поворота в конце заходки, которое превышает продолжительность обратного хода.

Применение технологической схемы работы горного комбайна без холостых проходов по фронту горных работ является эффективной в случае большой протяжённости рабочей зоны карьера. При отработке эксплуатационного блока параллельными заходками целесообразно реализовывать циклично-поточную или поточную технологию отработки с возвращением агрегата холостым ходом в начало рабочей заходки с организацией опережающей проходки врубовых выработок (рисунок 5).

Эксплуатационная производительность комбайна послойного фрезерования уменьшается при увеличении крепости разрабатываемых горных пород, уменьшении трещиноватости разрабатываемого массива, увеличивается с ростом скорости движения комбайна по фронту горных работ и мощности слоя фрезерования.

При определении продолжительности одного рабочего хода горного комбайна необходимо учитывать особенности применения различных технологических схем отработки месторождения.

На рисунке 6 представлен график зависимости производительности фрезерного комбайна Terrain Leveler от длины эксплуатационного блока для горнотехнических условий карьера, разрабатывающего месторождение цементного сырья.

Анализ результатов применения машин послойного фрезерования позволил установить, что рациональная производительность фрезерного комбайна достигается при реализации поточных технологических схем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой излагаются методы для определения параметров и показателей системы открытой разработки с использованием машин послойного фрезерования, учитывающие горнотехнические и горно-геологические условия разработки сложноструктурных месторождений цементного сырья, позволяющих повысить безопасность, эффективность и достоверность проектных решений.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. На основе анализа методологии проектирования открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений установлено, что месторождения цементного сырья, характеризующиеся сложным строением разнокачественных пластов карбонатных пород, целесообразно отрабатывать послойной технологией, позволяющей избежать загрязнения полезного ископаемого и производить его селективную выемку.

2. Методы определения параметров карьеров при проектировании отработки машинами послойного фрезерования, учитывающие горнотехнические и горно-геологические условия сложноструктурных месторождений цементного сырья Республики Сербия, нуждаются в совершенствовании и корректировке. Существующая теоретическая база не позволяет принять во внимание стохастический характер исходной геологической информации качества полезного ископаемого, возможные изменения проектной базы данных во времени отработки карбонатных месторождений.

3. Разработана и обоснована методика определения параметров и показателей открытой разработки с использованием машин послойного фрезерования, учитывающая горно-геологические и горнотехнические условия сложноструктурных месторождений цементного сырья Республики Сербия, обеспечивающая повышение эксплуатационной производительности фрезерных комбайнов Surface Miner на 8-12 % и экономическую эффективность результатов реализации проектных решений.

4. На основе разработанной методики для определения параметров и показателей открытой разработки предложены технологические схемы ведения горных работ при использовании фрезерных горных комбайнов, позволяющие повысить эффективность и достоверность проектных решений.

5. При небольшой длине эксплуатационного блока комбайна SM (менее 150 м) рекомендуется челноковая схема отработки. В противном случае следует использовать технологические решения по реализации циклично-поточной или поточной технологии отработки.

6. Эксплуатационная производительность фрезерного комбайна представляет собой комплексную функцию, зависящую от множества переменных:

а) скорость перемещения комбайна в режиме активной отработки или холостого хода напрямую влияет на общее время, затраченное на выполнение технологической задачи, с учётом эффективности и безопасности, и является ключевым фактором повышения производительности;

б) более широкая заходка теоретически увеличивает производительность комбайна SM, однако требует большей мощности и может быть ограничена физико-механическими свойствами разрабатываемой породы;

в) мощность обрабатываемого слоя, то есть глубина, на которую комбайн проникает в породу за один проход, является еще одним важным параметром. Увеличение глубины среза также повышает нагрузку на оборудование и требует адекватной мощности;

г) твердость, абразивность и трещиноватость породы оказывают прямое воздействие на скорость выработки, износ режущего инструмента и общую стабильность работы комбайна;

д) организация горных работ, включая логистику, планирование и координацию действий различных единиц оборудования, оказывает значительное влияние на эксплуатационную производительность фрезерного комбайна. Эффективная организация позволяет минимизировать простои, оптимизировать маршруты и обеспечить непрерывный поток горной массы.

В совокупности все эти факторы определяют общую эффективность работы фрезерного комбайна, их учет и оптимизация являются необходимым условием для достижения максимальной производительности.

7. Производительность карьеров по добыче цементного сырья, разрабатывающих сложноструктурные месторождения Республики Сербия с использованием технологии послойного фрезерования, следует определять по разработанной методике, учитывающей скорость движения фронта горных работ, скорость движения заходки по длине фронта, мощность обрабатываемого слоя горных пород, ширину полосы фрезерования, длину фронта горных работ, вид принятой технологической схемы отработки.

8. Среди параметров системы разработки месторождения цементного сырья можно выделить 3 категории значимости: высокая

степень влияния – длина эксплуатационного блока, мощность слоя отработки горным комбайном; средняя степень влияния – ширина заходки комбайна, скорость перемещения горного комбайна по длине заходки; низкая значимость – нормативный коэффициент потерь, скорость перемещения горного комбайна холостым ходом.

9. Карбонатные месторождения цементного сырья в Республике Сербия отличаются сложным строением, преимущественно представлены разнородными пластами известняков и мергеля с пропластками вскрышных пород. Выявленные особенности требуют предложения новых методологических и технологических решений, обеспечивающих повышение безопасности, эффективности и достоверности проектных решений.

10. Условиям эксплуатации карьера ООО «Lafarge BFC (СРБ)» месторождения «Муталь» удовлетворяют комбайны: Wirtgen 2500 SM и Wirtgen 2200 SM при работе параллельными проходами по поточной схеме с прямой погрузкой известняка в самосвалы. Внедрение безвзрывной технологии на карьере ООО «Lafarge BFC (СРБ)» позволит снизить себестоимость добычи и транспортировки известняка по сравнению с уже применяющимся на карьере вариантом технологии ведения горных работ на 8 % и получить дополнительную прибыль в размере 56 млн руб. в год.

Результаты работы могут использоваться при проектировании карьеров, планировании и организации горных работ на карьерах, отработывающих месторождения цементного сырья с использованием горных комбайнов послойного фрезерования.

Перспективным направлением дальнейшей работы следует считать развитие методологии проектирования карьеров по добыче цементного сырья в связи с совершенствованием безвзрывной техники для разработки сложноструктурных месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Материалы диссертации применены в учебном процессе при подготовке студентов специальности «Открытые горные работы».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Фомин С.И. Обоснование параметров эксплуатационного блока при разработке месторождений цементного сырья комбайнами

послойного фрезирования / С.И. Фомин, **А. Лелен** // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 3(65). – С. 20-25. DOI 10.26121/RON.2022.73.20.001.

2. Фомин, С.И. Определение производительности карьеров цементной промышленности, разрабатывающих минеральное сырье с использованием комбайнов послойного фрезирования SM / С.И. Фомин, **А. Лелен** // Маркшейдерия и Недропользование. – 2024. – № 3 (131). – С 122-127. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_122_127.

3. Фомин, С.И. Оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений / С.И. Фомин, **А. Лелен**, А.С. Говоров // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 5(133). – С. 60-66. DOI 10.56195/20793332_2024_5_60_66.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

4. Фомин, С.И. Определение потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послойного фрезирования / С.И. Фомин, **А. Лелен** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 2. С. 202-208. DOI 10.18799/24131830/2024/2/4203.

5. Фомин, С.И. Анализ опыта применения комбайнов послойного фрезирования при открытой разработке месторождений цементного сырья / С.И. Фомин, **А. Лелен** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 128–140. DOI 10.25018/0236_1493_2025_1_0_128.

Свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660377 Российская Федерация. Программа для вычисления чувствительности параметров и показателей системы открытой разработки сложноструктурных карбонатных месторождений с использованием машин послойного фрезирования. Заявка № 2025618660: заявл. 15.04.2025; опубли. 23.04.2025 / С.И. Фомин, **А. Лелен**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 16,3 КБ.

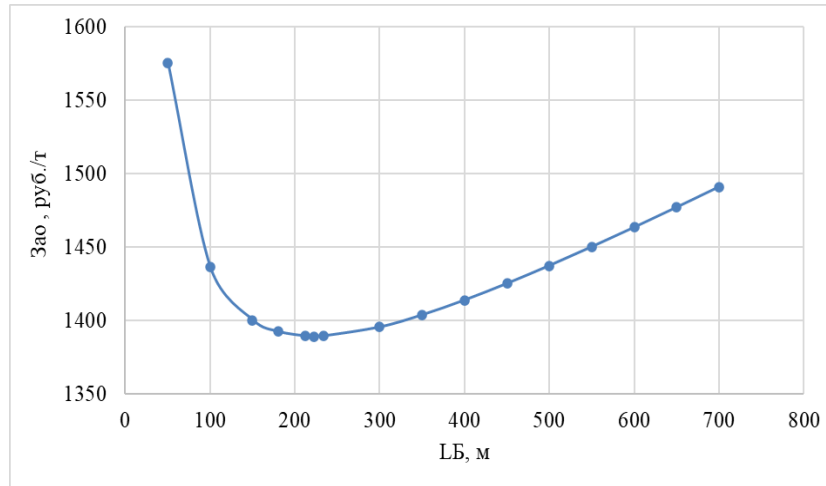


Рисунок 1 - График зависимости суммарных удельных затрат от длины эксплуатационного блока фрезерного комбайна Surface Miner

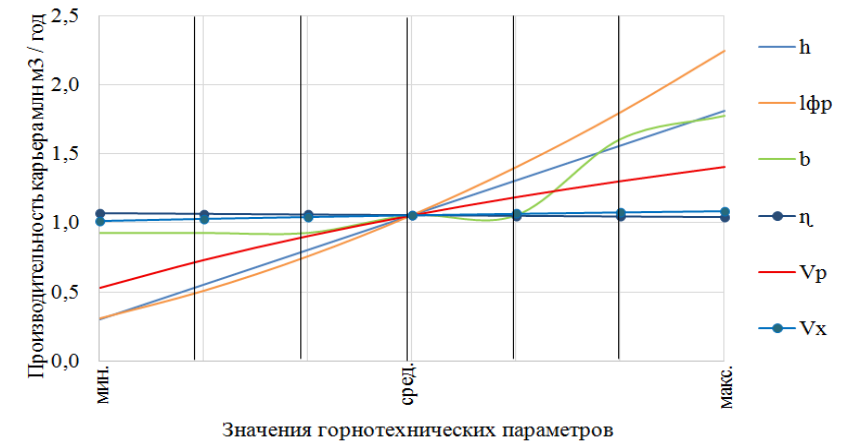


Рисунок 2 - График зависимости производительности карьера по добыче цементного сырья от относительно изменения параметров системы разработки месторождения, при использовании челноковой технологической схемы (обозначения параметров приведены в тексте)

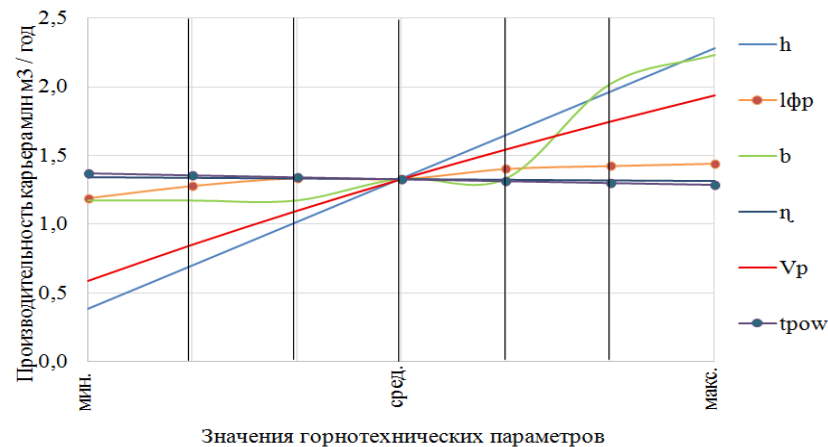


Рисунок 3 - График зависимости производительности карьера по добыче цементного сырья от относительно изменения параметров системы разработки месторождения, при технологической схеме работы с поворотом и фрезерованием в обратном направлении (обозначения параметров приведены в тексте)

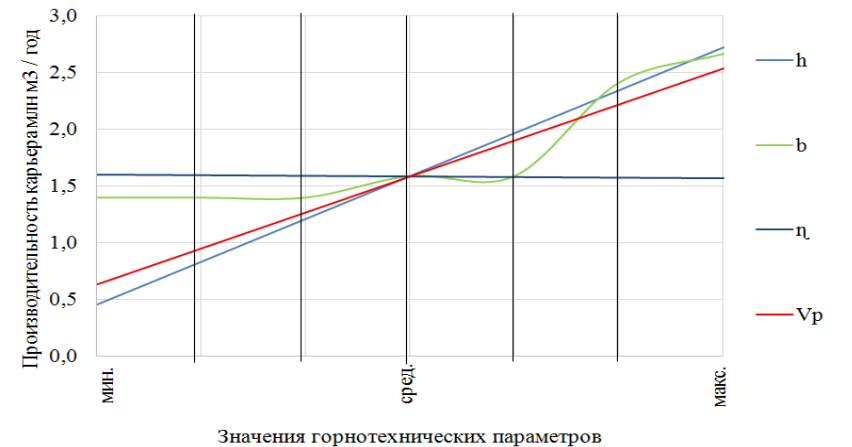


Рисунок 4 - График зависимости производительности карьера по добыче цементного сырья от относительно изменения параметров системы разработки месторождения, при поточной технологической схеме (обозначения параметров приведены в тексте)

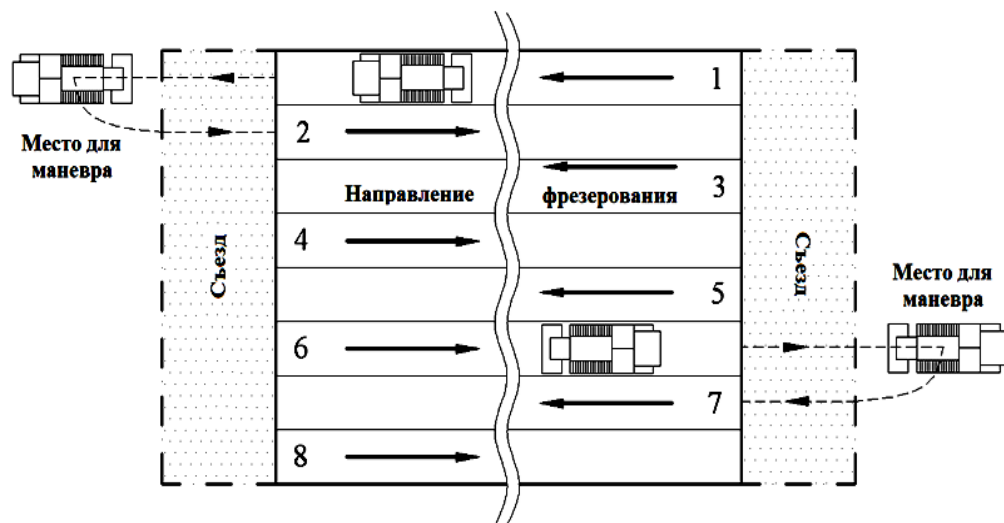


Рисунок 5 - Технологическая схема отработки эксплуатационного блока фрезерным комбайном Terrain Leveler параллельными заходками

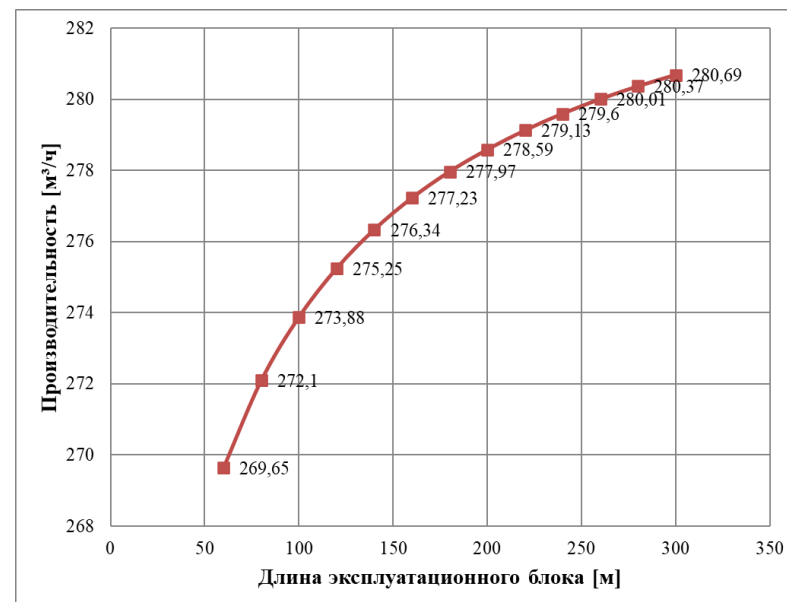


Рисунок 6 - График зависимости производительности фрезерного комбайна Terrain Leveler от длины эксплуатационного блока для горнотехнических условий карьера, разрабатывающего месторождение цементного сырья