

На правах рукописи

Конгар-Сюрюн Чейнеш Буяновна



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ
ПОЛОГОЗАЛЕГАЮЩИХ КАЛИЙНЫХ ПЛАСТОВ НА
БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ
СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Ковальский Евгений Ростиславович

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 Моделирования и управления горнотехническими системами (отдел №3), главный научный сотрудник.

Кузьмин Сергей Владимирович

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Глубокий Инжиниринг», генеральный директор.

Ведущая организация – общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **17 сентября 2026 г. в 09:45** 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 № 1171.**

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

Автореферат разослан 17 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КАРАСЕВ
Максим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Средне- и долгосрочные перспективы развития калийной отрасли РФ связаны с освоением глубоких пологозалегающих или слабонаклонных пластов. Так, на руднике Гремячинского ГОКа, находящемся в настоящий момент на стадии промышленного освоения запасов, продуктивный пласт расположен на глубине ~1100 м, практически такие же порядки глубин наблюдаются на перспективных участках Непского, Ново-Гремячинского, Западно-Петриковского, Нивенского и Северо-Красноборского месторождений калийных солей, находящихся на разных стадиях предпроектных, горно-подготовительных и разведочных работ.

Специфика разработки калийных месторождений связана с высокой растворимостью соленосных пород и необходимостью предотвращения проникновения надсолевых вод в выработанное пространство рудников, что предопределяет применение на калийных рудниках камерной системы разработки. В связи с этим рост глубины разработки на рудниках РФ неразрывно связан с увеличением эксплуатационных потерь калийной руды в целиках, которые для больших глубин могут составлять более 80% по блоку.

При этом известные текущие варианты камерной системы разработки, принимаемые в качестве основных в проектах освоения перечисленных месторождений, исчерпали свои возможности по увеличению степени извлечения руды. Следовательно, существует насущная необходимость изыскания более совершенных технологий извлечения запасов калийной руды с больших глубин, без применения которых существенные объемы руды в целиках, оцениваемые в сотни миллионов тонн, будут либо безвозвратно утрачены в недрах, либо окажутся расположенными в техногенно-нарушенном массиве, что крайне усложнит их последующую доработку.

Степень разработанности темы исследования.

Существенный вклад в создание эффективных технологий разработки пологозалегающих калийных пластов и способов снижения потерь руды внесли такие ученые как Проскуряков Н.М., Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л., Борзаковский Б.А., Папулов Л.М., Андреичев А.Н., Пермяков Р.С., Соловьев В.А., Рыльникова М.В., Зубов В.П. и другие. Вместе с тем недостаточно изученными являются вопросы, связанные с обоснованием параметров доизвлечения запасов и условий, требуемых для реализации технологий, направленных на снижение потерь в условиях больших глубин.

Объект исследования. Технологии разработки пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах.

Предмет исследования. Способы снижения эксплуатационных потерь калийной руды.

Цель работы. Снижение эксплуатационных потерь руды при выемке пологозалегающих калийных пластов на большой глубине с применением камерной системы разработки, включающей периодическое оставление опорных целиков между выемочными участками.

Идея работы. Для достижения поставленной цели производят отработку опорных межучастковых целиков после выемки запасов на смежных участках с оставлением междукammerных целиков переменной ширины и закладкой очистных камер с параметрами, ограничивающими рост горного давления на опорные целики.

Основные задачи исследования:

1. Анализ горнотехнических условий разработки пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах.
2. Разработка типового варианта выемки пологозалегающих калийных пластов, обеспечивающего снижение эксплуатационных потерь полезного ископаемого.
3. Исследование горно-геомеханических процессов в массиве горных пород в окрестности зон ведения очистных и закладочных работ и определение на этой основе зависимости изменения величины напряжений в опорном целике от параметров разработки смежных с ним выемочных участков.
4. Разработка методики обоснования параметров технологии отработки пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах, обеспечивающей снижение потерь полезного ископаемого.
5. Разработка рецептуры твердеющей закладки на основе солеотходов, способствующей снижению потерь при доизвлечении опорных целиков.
6. Технико-экономическая оценка эффективности разработанных решений.

Научная новизна работы:

1. Установлена прямая зависимость коэффициента опорного давления в опорном целике от величины опускания кровли пласта над центром выемочного участка.
2. Установлена функциональная зависимость величины напряжений в опорном целике от вынимаемой мощности пласта, степени заполнения камер первой очереди и типа закладочного материала.

3. Установлена полиномиальная зависимость второй степени прочности закладочного массива от вида и процентного содержания его компонентов согласно разработанным рецептурам.

Соответствие паспорту специальности.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по п. 5 «Способы вскрытия шахтных (карьерных) полей, их подготовки, системы разработки, комплексная механизация, технологические процессы добычи твердых полезных ископаемых»; п. 7. «Способы управления состоянием подрабатываемых породных массивов, исключая критические деформации земной поверхности и опасные проявления горного давления при разработке месторождений твердых полезных ископаемых и освоении подземного пространства, в том числе с использованием крепей различных конструкций».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлена рациональная область применения камерной системы разработки калийных пластов в варианте с периодическим оставлением опорных межучастковых целиков.

2. Обоснованы параметры технологии доизвлечения запасов из опорных целиков, расположенных между выемочными участками, а также разработан способ одновременного ведения очистных и закладочных работ в блоке, позволяющий снизить потери полезного ископаемого. Разработанные варианты технологий защищены заявками на регистрацию патента на изобретение № 2025136780 от 18.12.2025; № 2025136783 от 18.12.2025.

3. Разработана методика обоснования параметров технологии выемки пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах, обеспечивающей снижение потерь полезного ископаемого.

4. Разработаны и запатентованы рецептуры закладочных смесей, обеспечивающие формирование закладочных массивов, способствующих снижению потерь полезного ископаемого в опорных целиках на величину до 63% в предложенных вариантах технологии разработки (патент на изобретение № 2834564 от 11.02.2025).

5. Результаты диссертационных исследований используются в проектных и научных работах, выполняемых ООО «ПроТех Инжиниринг» для условий рудника Гремячинского ГОКа, что подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертации от 17.03.2025 г.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач применены следующие методы: анализ специфики горно-геологических и горнотехнических условий разработки пологозалегающих калийных пластов и опыта разработки месторождений России и мира; численное моделирование геомеханических процессов в зонах ведения очистных и закладочных работ; визуально-инструментальные наблюдения за процессами деформирования междукамерных целиков и очистных камер в натурных условиях; лабораторные испытания физико-механических свойств образцов закладочных массивов с целью разработки состава многокомпонентной твердеющей закладочной смеси на основе солеотходов; статистические методы обработки результатов моделирования и лабораторных испытаний.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предпочтительным способом снижения потерь руды в блоках при выемке пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах с использованием известных камерных систем разработки является отработка опорных целиков, оставленных между смежными выемочными участками и содержащих до 45% балансовых запасов блока.

2. Безопасная выемка опорных целиков, расположенных между отработанными участками, по фактору исключения возникновения водопроводящих трещин достигается при рекомендованных параметрах системы разработки и создании в выработанном пространстве закладочных массивов, ограничивающих рост напряжений в опорных целиках за счет минимизации величины оседаний пород над выемочными участками.

3. Использование разработанной технологии выемки калийных пластов, включающей периодическое оставление в выработанном пространстве опорных целиков, закладку выработанного пространства по предлагаемой рецептуре и последующее доизвлечение опорных целиков, позволяет снизить эксплуатационные потери в опорных целиках в условиях Гремячинского месторождения на величину до 63%.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается применением комплексного метода, включающего анализ и сопоставление результатов работы с предметными исследованиями ученых РФ и мира; использованием современных апробированных методов исследований, включающих компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния массива и лабораторные испытания на поверенном оборудовании; удо-

влетворительной сходимостью результатов лабораторных и численных исследований; подтверждением основных выводов и рекомендаций с данными натурных наблюдений и экспертными оценками ведущих специалистов в области разработки калийных месторождений.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства, Минск, 2022; Международный научный симпозиум «Неделя Горняка», Москва, 2023, 2024, 2025; Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение», Санкт-Петербург, 2023, 2024; Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», Москва, 2023, 2025; IX Международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика – 2023: актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования», Пермь, 2023.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; анализе зарубежных и отечественных научно-технических источников; проведении численных исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород при реализации предлагаемой технологии; проведении лабораторных исследований физико-механических свойств образцов закладочных массивов по предложенным рецептурам; установлении зависимости изменения величины давления на опорный целик от параметров отработки смежных участков и параметров закладочного массива; разработке вариантов технологических схем и методики определения параметров рекомендуемой технологии разработки пологозалегающих калийных пластов, обеспечивающей снижение потерь полезного ископаемого; анализе результатов шахтных исследований; формулировании защищаемых положений; подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 1 статье – 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, в 8 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение и 1 свидетельство о госу-

дарственной регистрации программы для ЭВМ, зарегистрированы 2 заявки на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 128 наименований. Диссертация изложена на 115 страницах, содержит 36 рисунков и 11 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность коллективу кафедры разработки месторождений подземным способом за помощь в выборе направления для исследований и сотрудникам лаборатории Научного центра геомеханики и проблем горного производства за помощь в проведении лабораторных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ отечественного и мирового опыта разработки пологозалегающих калийных пластов и перспективных способов снижения потерь полезного ископаемого, приведен типовой вариант способа разработки калийных пластов на больших глубинах.

Во второй главе выведена зависимость изменения напряжений в опорном целике от параметров системы разработки и закладочного массива. Предложен вариант технологической схемы разработки пологозалегающего калийного пласта, позволяющий снизить потери руды за счет отработки запасов из опорных целиков.

В третьей главе приведены результаты исследований по разработке новых рецептур закладочных смесей, позволяющих добиться максимального снижения эксплуатационных потерь.

В четвертой главе изложены рекомендации по применению и технико-экономическое обоснование варианта технологической схемы разработки пологозалегающих пластов для конкретных горно-геологических условий.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные при проведении исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Предпочтительным способом снижения потерь руды в блоках при выемке пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах с использованием известных камер-

ных систем разработки является отработка опорных целиков, оставленных между смежными выемочными участками и содержащих до 45% балансовых запасов блока.

При выемке пологозалегающих калийных пластов на рудниках России и мира в основном применяется камерная система разработки, при этом наиболее распространен вариант с оставлением в выработанном пространстве, как правило, жестких протяженных междуканальных целиков (МКЦ, рисунок 1а). Такой способ управления кровлей направлен на обеспечение условий безопасной подработки водозащитных толщ и характеризуется высокими потерями руды, особенно в условиях перехода горных работ на большие глубины (для перспективных калийных месторождений РФ – порядка 900÷1150 м).

Как показывает выполненный анализ, определенного снижения потерь на больших глубинах можно добиться за счёт периодического оставления в выработанном пространстве опорных междучастковых целиков (ОЦ) повышенной ширины (рисунок 1б). В этом варианте системы разработки блоки делятся на выемочные участки, между которыми оставляют ОЦ.

С привлечением метода Монте-Карло было проведено сравнение двух вариантов систем разработки и определена вероятность того, что система 2 (с оставлением в пределах блока МКЦ и ОЦ) имеет большие эксплуатационные потери, чем система 1 (с оставлением в пределах блока только МКЦ) при следующих варьируемых показателях: глубина (200÷1300 м с шагом 100 м), вынимаемая мощность (5÷20 м с шагом 1 м), ширина выемочного участка для второй системы (50÷200 м с шагом 50 м). Было сгенерировано 10 000 различных сценариев и для каждого сценария рассчитана величина потерь для обеих систем (рисунок 2).

Результаты сравнения показывают, что при глубинах залегания продуктивных пластов до 500 м целесообразно применение системы разработки с оставлением МКЦ одинаковой ширины по всему блоку. С дальнейшим увеличением глубины вероятность превосходства второй системы (МКЦ + ОЦ) возрастает, что доказывает целесообразность применения на перспективных калийных месторождениях РФ варианта отработки с периодическим оставлением опорных целиков между выемочными участками. В последнем случае в условиях больших глубин второй вариант демонстрирует преимущество по объему извлечения на ~8-12%.

Таким образом, исходя из результатов сравнения двух систем, можно сделать вывод, что рациональной областью применения си-

стемы разработки с оставлением опорных целиков является глубина ведения горных работ 500÷1300 м.

Необходимо подчеркнуть, что в ОЦ может быть заключено до 45% балансовых запасов блока в зависимости от конкретных условий разработки. Рисунок 3 иллюстрирует изменение средней доли запасов в опорных целиках в зависимости от глубины залегания пласта. Увеличение глубины приводит к росту ширины опорных целиков, о чем свидетельствует основная линия средней доли запасов. Светло-голубая зона характеризует разброс данных вокруг основной линии, возникающий из-за варьируемых параметров горно-геологических условий.

Таким образом, система разработки с оставлением ОЦ и МКЦ является предпочтительной для больших глубин, однако в целиках при этом сосредотачиваются существенные объемы эксплуатационных потерь. Изыскание путей дальнейшего снижения потерь следует производить за счёт решения вопроса о вовлечении в отработку запасов, сосредоточенных в оставляемых целиках, путем внедрения двустадийной выемки, реализующей принцип доизвлечения запасов из оставленных МКЦ и/или ОЦ (вторая стадия) после отработки запасов участка (первая стадия) с обеспечением необходимых мер охраны подрабатываемых водоносных горизонтов в виде закладки выработанного пространства.

В целях геомеханической оценки возможности доизвлечения МКЦ в программном комплексе FLAC разработана численная модель, включающая междукammerный целик и смежные с ним заложённые камеры и учитывающая реологическое поведение соляных пород и компрессионные свойства закладочного массива. Показано, что наличие закладочного массива в камерах в первый продолжительный период существования МКЦ приводит к повышенному уровню его напряженного состояния в силу наличия сил бокового отпора закладочного массива (рисунок 4). Это обстоятельство негативно скажется на безопасности горных работ при доизвлечении МКЦ в этот период.

Разгрузка МКЦ от напряжений до естественного состояния наступает только через продолжительный отрезок времени, оцениваемый в 25-35 лет после отработки камер, что физически объясняется вязкопластическим поведением соляных пород и постепенным закрытием полостей недозаклада в кровле камер и началом передачи нагрузки от вышележащих пород собственно на закладочный массив.

При этом, как показывают опытно-поисковые работы по отработке запасов, оставленных более 40 лет назад запасов на рудниках

Старобинского месторождения, а также некоторые результаты исследований физико-механических пород техногенно-сформированных пластов Верхнекамского месторождения, выполненных специалистами ИГД УрО РАН спустя 37 лет после окончания добычных работ, доизвлечение запасов из МКЦ сопровождается рядом геомеханических проблем, к числу которых относятся повышенные нагрузки в целиках, а также наличие полостей, трещин, расслоений, приводящих к вывалам, динамическим просядкам, снижению устойчивости массива, что сказывается на безопасности проведения выработок на этих участках.

Кроме того, при отложенном во времени доизвлечении МКЦ возникают технико-экономические проблемы. В основном экономический ущерб от откладывания сроков разработки на отдалённую перспективу возникает из-за необходимости восстановления старых или проведения новых подготовительных выработок, о чем свидетельствуют результаты визуально-инструментальных наблюдений за процессами деформирования междукammerных целиков и очистных камер на Гремячинском месторождении, где выработки приходят в неэксплуатационное состояние уже через 1-2 года после окончания очистных работ. Укрупнённая оценка экономического ущерба, рассчитанная в виде разницы в приведённой стоимости сравниваемых вариантов, показала, что выемка опорных целиков в 1,5 раза прибыльнее отложенного доизвлечения запасов из МКЦ.

Из сказанного следует, что рационального решения вопроса снижения потерь за счёт доизвлечения МКЦ достичь в период срока службы блока невозможно – в частности, из-за того, что не обеспечиваются разумные сроки отставания работ по извлечению запасов МКЦ от основных работ по выемке запасов участка. В связи с этим предложено снижать потери в выемочных блоках за счёт отработки ОЦ, так как их выемку возможно осуществлять параллельно с ведением добычных работ в пределах одного блока.

Возможность одновременного ведения очистных работ на выемочных участках и в ОЦ в пределах блока обеспечивается за счёт предотвращения роста нагрузки на ОЦ (опорного давления) путём ограничения максимальных оседаний пород кровли на смежных с ним выемочных участках, что достигается определённой конфигурацией МКЦ и параметрами ведения закладочных работ при отработке камер первой очереди.

2. Безопасная выемка опорных целиков, расположенных между отработанными участками, по фактору исключения возникновения водопроводящих трещин достигается при

рекомендованных параметрах системы разработки и создании в выработанном пространстве закладочных массивов, ограничивающих рост напряжений в опорных целиках за счет минимизации величины оседаний пород над выемочными участками.

Степень возможного доизвлечения запасов из опорных целиков (рисунок 1б) и безопасность работ по доизвлечению зависит от степени нагружения ОЦ. Для оценки действующих в ОЦ напряжений при разных горнотехнических и горно-геологических условиях разработан ряд конечно-элементных моделей (плоскодеформированная постановка, упруго-пластический закон деформирования), в которых в представительных диапазонах варьировались параметры: ширина ОЦ, ширина выемочного участка, мощность пласта, ширина МКЦ, физико-механические свойства пород и закладочных массивов, глубина ведения горных работ.

На первом этапе исследований оценивался уровень нагружения ОЦ после выемки смежных участков. С привлечением результатов наблюдений за состоянием МКЦ и камер на руднике Гремячинского ГОКа установлено, что благодаря ярко выраженным реологическим свойствам соляных пород, процесс деформирования пласта происходит продолжительно во времени.

Установлена прямая зависимость коэффициента опорного давления в опорном целике от величины опускания кровли пласта над центром выемочного участка (рисунок 5).

На втором этапе оценивалось распределение напряжений в ОЦ при следующих вариантах конфигурации МКЦ на смежных с опорным целиком выемочных участках: при оставлении МКЦ одинаковой ширины, т.е. при классической схеме (вариант А, «базовый», рисунок 6а); при оставлении МКЦ с увеличением их ширины от центра к краям выемочного участка (вариант Б, «сравнимый», рисунок 6б); при оставлении МКЦ с уменьшением их ширины от центра к краям выемочного участка (вариант В, «сравнимый», рисунок 6в).

При этом коэффициент извлечения на участке оставался во всех вариантах одинаковым, а влияние закладочных работ не оценивалось.

На основе численного анализа установлено, что при прочих равных условиях, вариант Б обеспечивает наибольшее снижение напряжений в опорных целиках (рисунок 7) за счет выполаживания кривой оседаний по ширине выемочного участка.

Дополнительно сравниваемые варианты были проверены по коэффициенту запаса прочности (Strength Factor), на основе которого

установлено, что вариант Б не снижает запас прочности несущих элементов системы разработки, т.е. удовлетворяет условиям безопасности ведения горных работ (рисунок 8). В связи с этим вариант Б конфигурации МКЦ был принят как основной для предлагаемого типового варианта технологии разработки пологозалегающих каменных пластов.

Переменная ширина МКЦ $b_{\text{МКЦ}}^i$ на выемочном участке увеличивается линейно от центра к границам выемочного участка, при этом средняя степень нагружения МКЦ на выемочном участке $C_{\text{ср}}$ должна соответствовать разрешенному нормативной документацией значению (1):

$$C_{\text{ср}} = \frac{\sum b_{\text{МКЦ}}^i \cdot C_i}{\sum b_{\text{МКЦ}}^i} \quad (1)$$

На третьем этапе исследований моделировалось влияние параметров закладочных массивов, возводимых на выемочных участках в камерах первой стадии, на напряженное состояние ОЦ в варианте конфигурации Б. Изменялись степень закладки камер первой стадии, вынимаемая мощность и деформационные свойства закладочных массивов.

Действующие напряжения в опорном целике для диапазона исследованных условий при ведении закладочных работ в предлагаемом варианте Б можно найти по формуле (2):

$$\sigma_{\text{ОЦ}} = k \cdot \sigma_{\text{ест}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ОЦ}}$ - действующие напряжения в ОЦ, МПа; $\sigma_{\text{ест}}$ - естественный уровень напряжений на глубине ведения горных работ, МПа; k - коэффициент концентрации напряжений, вычисляемый по полученным на основе численных моделей зависимостям (рисунок 9) (3):

$$k = A \cdot x^{-B}, \quad (3)$$

где x - степень заполнения камер закладочным массивом; A и B - эмпирические коэффициенты, зависящие от конкретных параметров разработки смежных участков (A - функция от деформационных свойств закладочных массивов; B - функция от вынимаемой мощности пласта).

Коэффициент A выражается полиномиальной функцией второй степени, зависящей от модуля упругости E (МПа) закладочного массива (4):

$$A = 0,000002 \cdot E^2 - 0,0042 \cdot E + 2,8386 \quad (4)$$

Показатель степени B может быть выражен следующей функцией, зависящей от вынимаемой мощности пласта m (м) (5):

$$B = X \cdot m^{-0,33} \quad (5)$$

где X – коэффициент, зависящий от типа закладки (2,3 – для твердеющей; 1,81 – для гидравлической; 0,68 – для сухой).

В частности, для типовых условий разработки калийных месторождений при залегании продуктивных пластов на глубине 1100 м и средней вынимаемой мощности 9 м, расчетное значение эмпирической функции при оставлении МКЦ по варианту B и применении твердеющей закладки составит $k = 1,27$, а без реализации данных технологических решений $k = 3,25$.

Безопасность технологии по фактору исключения возникновения водопроводящих трещин может быть обоснована на основе оценки (расчета) следующих показателей и сравнения их с критериальными значениями: предельного прогиба слоев ВЗТ; разности максимальных опусканий слоев ВЗТ над выемочным участком и над доизвлекаемым опорным целиком; степени нагружения опорных и междуканнерных целиков первой и второй очереди; горизонтальных и сдвиговых деформаций; кривизны оседания пород ВЗТ.

В работе показано, что ОЦ, представляющие собой жесткие элементы, оставляемые в выработанном пространстве, приводят к возникновению периодических изгибов слоев ВЗТ. За счет выемки каннер второй очереди предлагаемый способ обеспечивает выполаживание кривой оседаний пород водозащитной толщи, что при прочих равных условиях снижает интенсивность развития водопроводящих трещин над каннерными частями ОЦ.

Основываясь на результатах численного моделирования и на требованиях действующих нормативно-технических документов, регламентирующих ведение горных работ на калийных рудниках, разработана методика определения параметров предлагаемой технологии разработки пологозалегających калийных пластов на больших глубинах со сниженными потерями руды, алгоритм которой приведен на рисунке 10.

3. Использование разработанной технологии выемки калийных пластов, включающей периодическое оставление в выработанном пространстве опорных целиков, закладку выработанного пространства по предлагаемой рецептуре и последующее доизвлечение опорных целиков, позволяет снизить эксплуатационные потери в опорных целиках в условиях Гремячинского месторождения на величину до 63%.

Технология выемки калийного пласта со сниженными эксплуатационными потерями заключается в следующем (рисунок 11). Технология выемки калийного пласта со сниженными эксплуата-

ционными потерями заключается в следующем. Применяют панельно-блоковый способ подготовки шахтного поля. Панель разделяют на отдельные выемочные блоки, расположенные по обе стороны от оси панели. Отработка запасов осуществляется камерной системой разработки с периодическим оставлением опорных целиков между выемочными участками. Выемочный участок отрабатывают камерами первой очереди с оставлением междуканнерных ленточных целиков с увеличением их ширины от центра к краям выемочного участка.

По мере отработки камер первой очереди производят их закладку. Для этого предусматривают ведение очистных работ с оси блока, закладочных – с границ. Закладку камер производят сразу после завершения проходки камеры или с минимальным технологически необходимым отставанием. Одновременное ведение очистных и закладочных работ на участке замедляет скорость деформирования отработанных пространств и предотвращает возрастание напряжений в опорном целике.

После закладки двух смежных выемочных участков производят выемку оставленного между ними опорного целика камерами второй очереди. Отработку камер второй очереди осуществляют аналогично отработке камер первой очереди. Решение о закладке камер второй очереди принимается на основе оценки безопасных условий подработки водозащитной толщи.

Учитывая влияние компрессионных и прочностных свойств закладочных массивов, возводимых в камерах первой очереди, на напряженное состояние ОЦ, на базе Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II были проведены исследования по оценке данных свойств для сухой и гидравлической закладки на основе солеотходов, традиционно применяемых на калийных рудниках. На основе численных моделей и разработанной методики установлено, что применение данных типов закладки не позволяет полностью реализовать потенциал предлагаемой технологии по величине извлечения руды из ОЦ.

В связи с этим предложены новые рецептуры закладочных смесей в форме многокомпонентных составов, направленных на повышение прочностных и компрессионных свойств возводимых закладочных массивов и включающих вяжущее (доменные металлургические шлаки) и армирующий компонент (фибра). В качестве затворителя использовался насыщенный соляной раствор.

Результаты лабораторных испытаний показывают, что однокомпонентный состав из солеотходов набирает прочность до 1 МПа, когда предлагаемые трехкомпонентные рецептуры обеспечивают прочность до 12 МПа, что обеспечивает формирование закладочных массивов с повышенными прочностными характеристиками. Экспериментально установлена зависимость прочностных свойств закладочного массива из трехкомпонентной рецептуры от вида и объемного содержания шлаков и базальтовой фибры (БФ), выражающаяся полиномиальной функцией второй степени (рисунок 12). Кроме того, разработанный состав обеспечивает усадку закладочного материала не более 5% (рисунок 13).

В целях повышения технологичности предлагаемой системы разработки, твердеющую закладочную смесь, приготовляемую по предложенным вариантам рецептур, предлагается транспортировать частями, а именно, путем отдельной доставки сухой и жидкой частей конвейерным и трубопроводным транспортом соответственно до установки приготовления закладочной смеси. Установку приготовления закладочной смеси устанавливают непосредственно у закладываемой камеры или в нижней камере блока относительно падения пласта. Установка представляет из себя смеситель для смешивания сухой и жидкой фаз и отжима рассолов. Закладка камеры осуществляется комплексом оборудования в составе бункера-дозатора для загрузки самоходного вагона и закладочной установки с метателем. В целях дозаклада камер в кровле монтируется трубопровод и подается закладочная смесь бетононасосом под давлением.

Эффективность предлагаемых решений оценена посредством рассмотрения их технико-экономических показателей для характерных условий отработки блоков на Гремячинском месторождении.

Оценивался вариант состава «шлаки 20%; базальтовая фибра 0,7%; солеотходы 79,3%» при конфигурации МКЦ по варианту Б с доизвлечением ОЦ. Сравнение проводилось с технологической схемой с конфигурацией МКЦ по варианту А с применением сухой закладки без доизвлечения ОЦ (базовая схема на месторождении).

Рассматривался выемочный блок, расположенный на глубине 1100 м. Ширина выемочного участка составила 160 м, ширина ОЦ – 54 м, вынимаемая мощность пласта – 9 м. Применение рекомендуемого варианта позволило провести доизвлечение ОЦ и снизить потери в опорных целиках на величину до 47%, что соответствует 16,2% эксплуатационных потерь в блоке. При этом максимальное снижение потерь достигается при применении предлагаемой технологии при отработке пластов минимальной вынимаемой мощности

(5 м). Расчет параметров системы разработки показал, что в последнем случае представляется возможным снизить потери в опорных целиках на 63% (рисунок 14).

Расчеты экономической эффективности проводились сравнением укрупненных эксплуатационных затрат. Сравнительная эффективность от дополнительной добычи запасов, оцениваемая по величине относительного NPV, равная разнице выручки от реализации продукции и всех затрат, приведенных по коэффициенту дисконтирования на срок реализации проекта, составляет 7 465 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований обоснованы параметры камерной системы разработки с закладкой выработанного пространства, обеспечивающей существенное (на величину до 63%) снижение эксплуатационных потерь руды в опорных целиках, что имеет важное значение для калийной отрасли РФ. Основные научные и практические результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Горно-геологические и горнотехнические условия большинства месторождений РФ и мира предопределяют необходимость применения камерной системы разработки с удержанием кровли на рудных целиках, в которых заключена существенная часть балансовых запасов. Дальнейшее развитие калийной промышленности РФ в ближайшие годы связано с резким переходом глубин залегания разрабатываемых пластов от текущих средних значений ~350 м к значениям порядка ~1000 м, что в случае отсутствия адекватных технологических решений приведёт к соответствующему увеличению потерь калийной руды (до 80%).

2. Установлено, что в условиях перехода горных работ на большие глубины (более 500 м) к наиболее целесообразным технологиям разработки пологозалегающих калийных пластов следует отнести варианты камерной системы разработки с периодическим оставлением в выработанном пространстве опорных межучастковых целиков. Данные варианты показывают увеличение объемов извлечения руды по сравнению с вариантами без опорных целиков в среднем на ~8-12% процентов.

3. Показано, что дальнейшее экономически эффективное и безопасное повышение коэффициента извлечения при разработке калийных пластов возможно обеспечить путем выемки запасов из опорных целиков с применением закладки выработанного пространства, при этом обоснована технологическая возможность организации совместного ведения основных добычных работ и работ по

доизвлечению запасов опорных целиков в пределах одного блока. Показано, что варианты с доизвлечением междукammerных целиков менее целесообразны по факторам наличия недозаклада и повышенной нагрузки на междукammerные целики, сохраняющейся в течение 25-35 лет после образования целиков.

4. Разработан типовой вариант системы разработки полого-залегающего калийного пласта, позволяющий снизить потери в опорных целиках на 63% и предусматривающий отработку запасов блока камерной системой разработки с оставлением в пределах выемочного участка междукammerных целиков переменной ширины и опорных целиков между участками, ведение закладочных работ и последующее доизвлечение опорных целиков.

5. На основе численного моделирования определена зависимость действующих напряжений в опорном целике от параметров отработки смежных выемочных участков с учетом ведения на них закладочных работ при реализации предложенного варианта системы разработки.

6. В результате серии лабораторных экспериментов получен состав закладочной смеси, включающий солеотходы 78,5 масс.%, металлургические шлаки 21 масс.%, базальтовую фибру 0,5 масс.%, соляной раствор, позволяющий снизить потери в опорных целиках на величину до 63% при реализации предложенного варианта системы разработки и получить экономический эффект в размере 7 465 млн руб.

7. Разработана методика обоснования параметров технологии разработки пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах, обеспечивающих безопасное снижение потерь полезного ископаемого, учитывающая фактор ограничения роста напряжений в опорных целиках за счет управления параметрами разработки смежных выемочных участков.

Перспективное направление дальнейшего развития темы диссертации связано с разработкой технологии выемки калийной руды со сниженными потерями для условий отработки двух и более смежных взаимовлияющих пластов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Голик, В.И. Использование вяжущих на основе металлургических шлаков в составе закладочных смесей / В.И. Голик, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, Ю.С. Тюляева, А.М. Хайрутдинов // Известия тульского государственного университета. – 2020. - № 4. – С. 389-400

2. Хайрутдинов, М.М. Повышение безопасности при извлечении водорастворимых руд путем оптимизации параметров закладочного массива / М.М. Хайрутдинов, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, А.М. Хайрутдинов, Ю.С. Тюляева // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 53–59. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-53-59.
3. Рыбак Я. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой / Я. Рыбак, М.М. Хайрутдинов, Д.А. Кузиев, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, Н.В. Бабырь // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 61-70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2
4. Ковальский, Е.Р. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений / Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, Д.Н. Петров // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 349–364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.
5. Конгар-Сюрюн, Ч.Б. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённно-деформированное состояние массива / **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, Е.Р. Ковальский // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – 13(4). – С.177-187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.
6. Ковальский, Е.Р. Моделирование реологических процессов деформирования несущих элементов камерной системы разработки для условий Верхнекамского месторождения калийных солей / Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, Ю.Г. Сиренко, Н.А. Миронов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – №3. – С. 1017–1030. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030.
7. Kovalsky, E. Backfill for Advanced Potash Ore Mining Technologies / E. Kovalsky, **С. Kongar-Syuryun**, A. Morgoeva, R. Klyuev, M. Khayrutdinov // Technologies. – 2025. – №13. – 60. DOI:10.3390/technologies13020060.
8. Ковальский, Е.Р. Снижение потерь полезного ископаемого при разработке калийных пластов на больших глубинах / Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 1852–1862. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1852-1862.
9. Ковальский, Е.Р. Извлечение запасов из опорных целиков при разработке калийных пластов на больших глубинах / Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн** // Горные науки и технологии. – 2026. – №11(1). – С. 5-15. DOI: 10.17073/2500-0632-2026-02-1107.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661684 Российская Федерация. Программа для расчета условий безопасной подработки водозащитной толщи. Заявка № 2024618573; заявл. 19.04.2024; опубл. 21.05.2024/ Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с.

11. Патент № 2834564 Российская Федерация, МПК E21F 15/00 (2006.01); СПК E21F 15/005 (2024.08); B09B 3/00 (2024.08). Состав закладочной смеси. Заявка № 2024114126; заявл. 24.05.2024; опубл. 11.05.2025 / Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 7 с.

12. Заявка на регистрацию патента № 2025136780 Российская Федерация, МПК. E21C 41/20 (2006.01), E21F 15/00 (2006.01). Способ разработки калийных пластов на больших глубинах: заявл. 18.12.2025 / Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, Ю.Г. Сиренко, Г.Н. Карпов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

13. Заявка на регистрацию патента № 2025136783 Российская Федерация, МПК E21C 41/20 (2006.01), E21F 15/00 (2006.01). Способ разработки калийных пластов на больших глубинах: заявл. 18.12.2025 / Е.Р. Ковальский, **Ч.Б. Конгар-Сюрюн**, Ю.Г. Сиренко, Г.Н. Карпов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

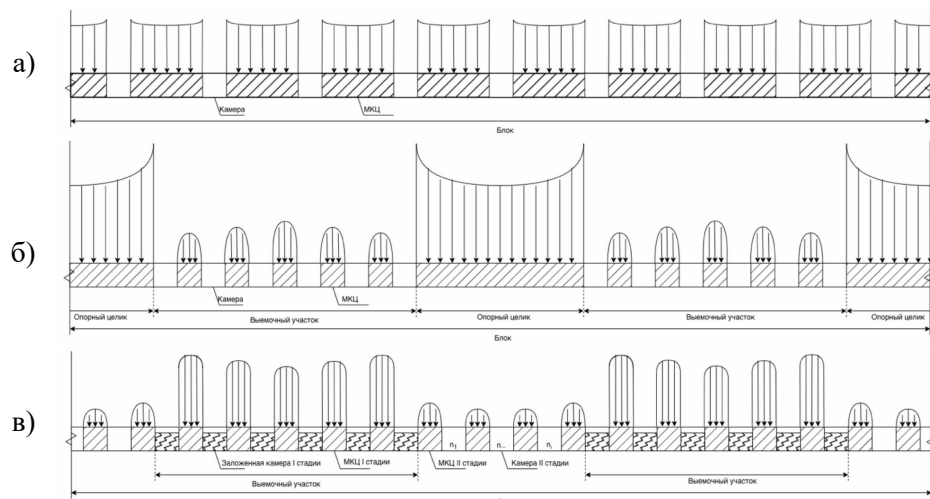


Рисунок 1 – Варианты камерных систем разработки калийных пластов (эпюры горного давления показаны схематично): а) с оставлением МКЦ; б) с оставлением МКЦ и ОЦ в) с оставлением МКЦ и ОЦ и доизвлечением ОЦ

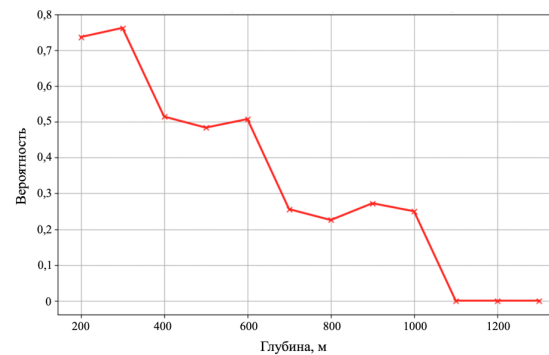


Рисунок 2 – Вероятность преобладания потерь в системе 2 (МКЦ+ОЦ) по сравнению с системой 1 (МКЦ) в зависимости от глубины разработки

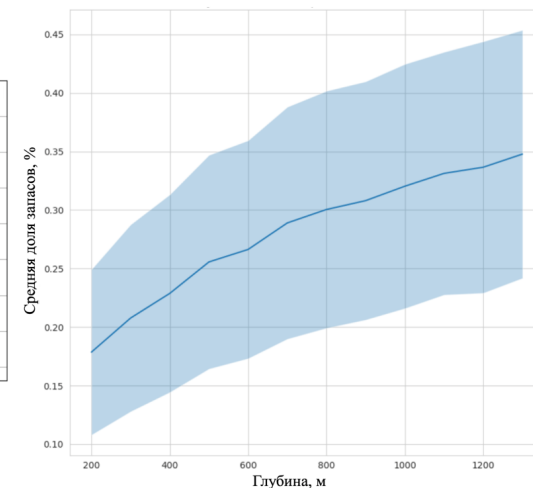


Рисунок 3 – Доля запасов, оставленных в опорных целиках, в зависимости от глубины разработки

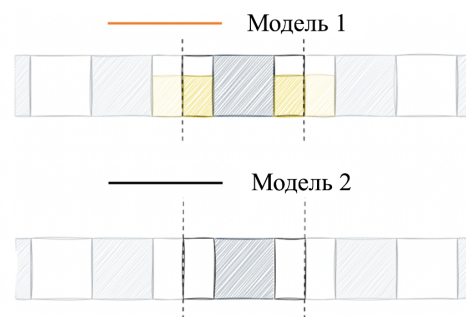
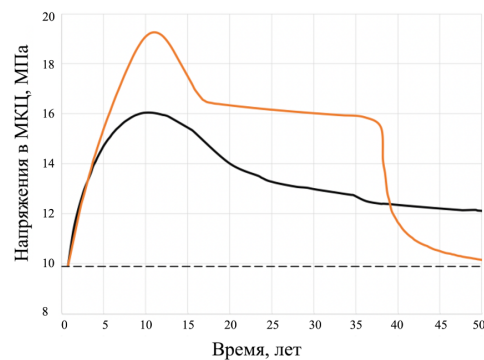


Рисунок 4 – Характерная кривая изменения напряжений в поперечном сечении МКЦ с течением времени (модель 1 – с закладкой камер; модель 2 – без закладки камер)

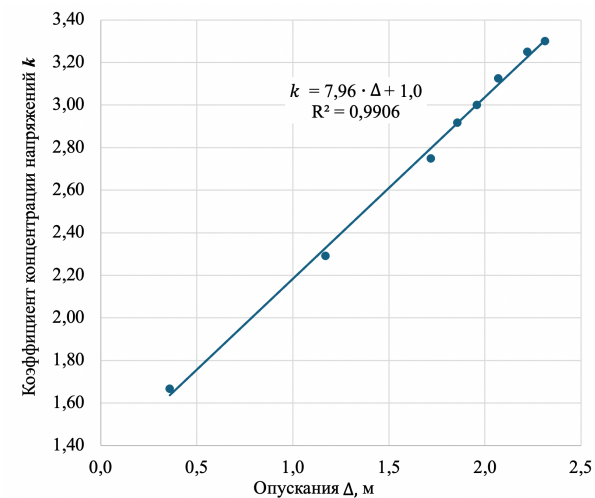


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от опусканий кровли в центре выемочного участка

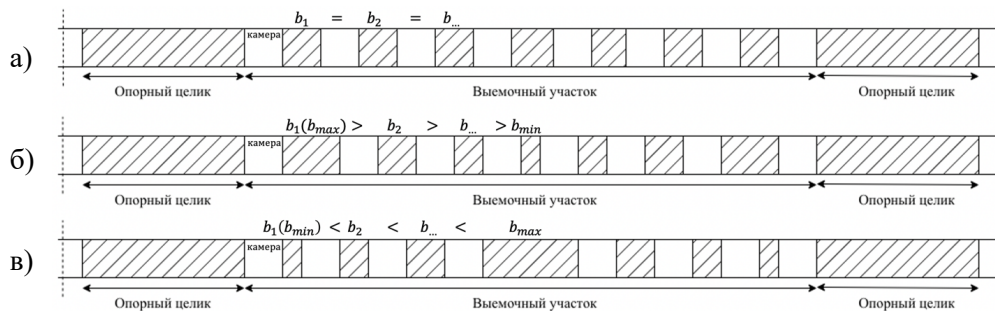


Рисунок 6 - Варианты конфигурации МКЦ при отработке камер первой очереди на выемочных участках:
 b_n – ширина МКЦ на выемочном участке; b_{min} – минимальная ширина МКЦ; b_{max} – максимальная ширина МКЦ

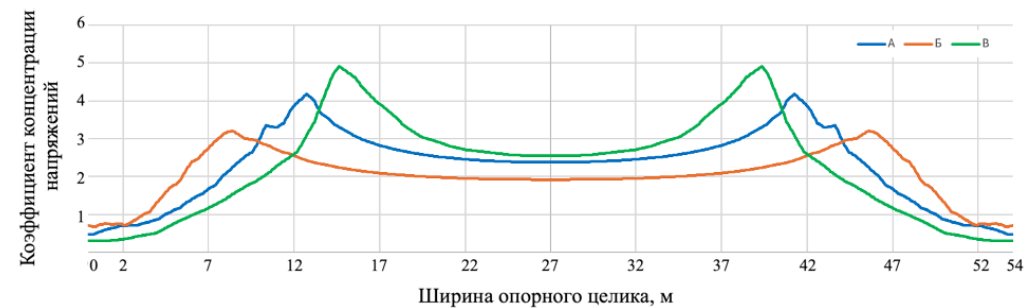


Рисунок 7 – Пример распределения напряжений по ширине опорного целика при разных вариантах конфигурации МКЦ

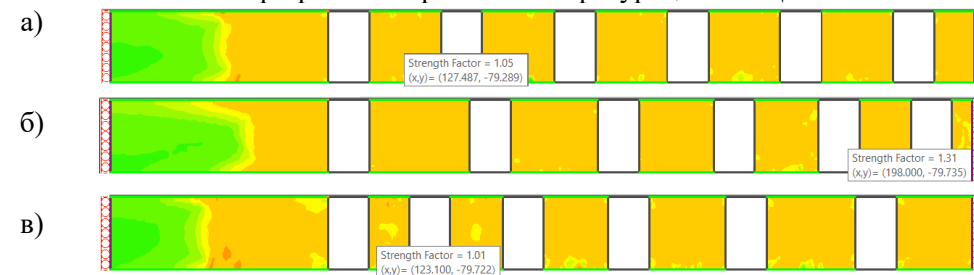


Рисунок 8 – Поле коэффициента запаса прочности при разных вариантах конфигурации МКЦ

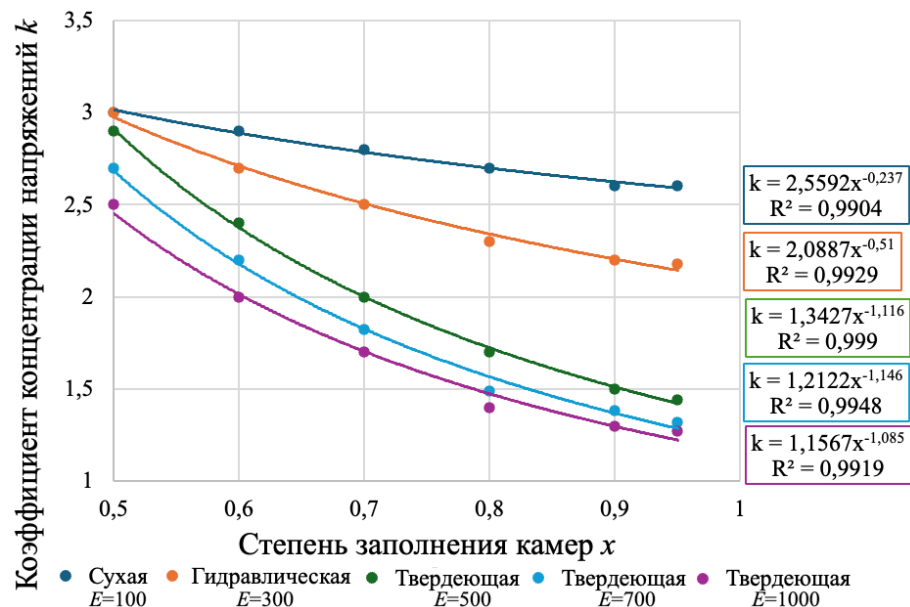


Рисунок 9 – Влияние закладки камер первой очереди на напряженное состояние опорного целика

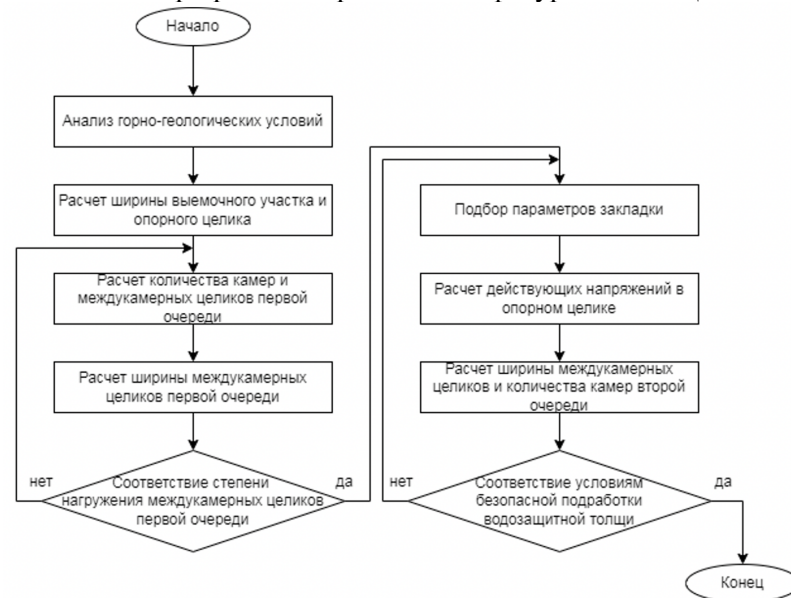


Рисунок 10 - Алгоритм определения параметров технологии разработки пологозалегающих калийных пластов на больших глубинах

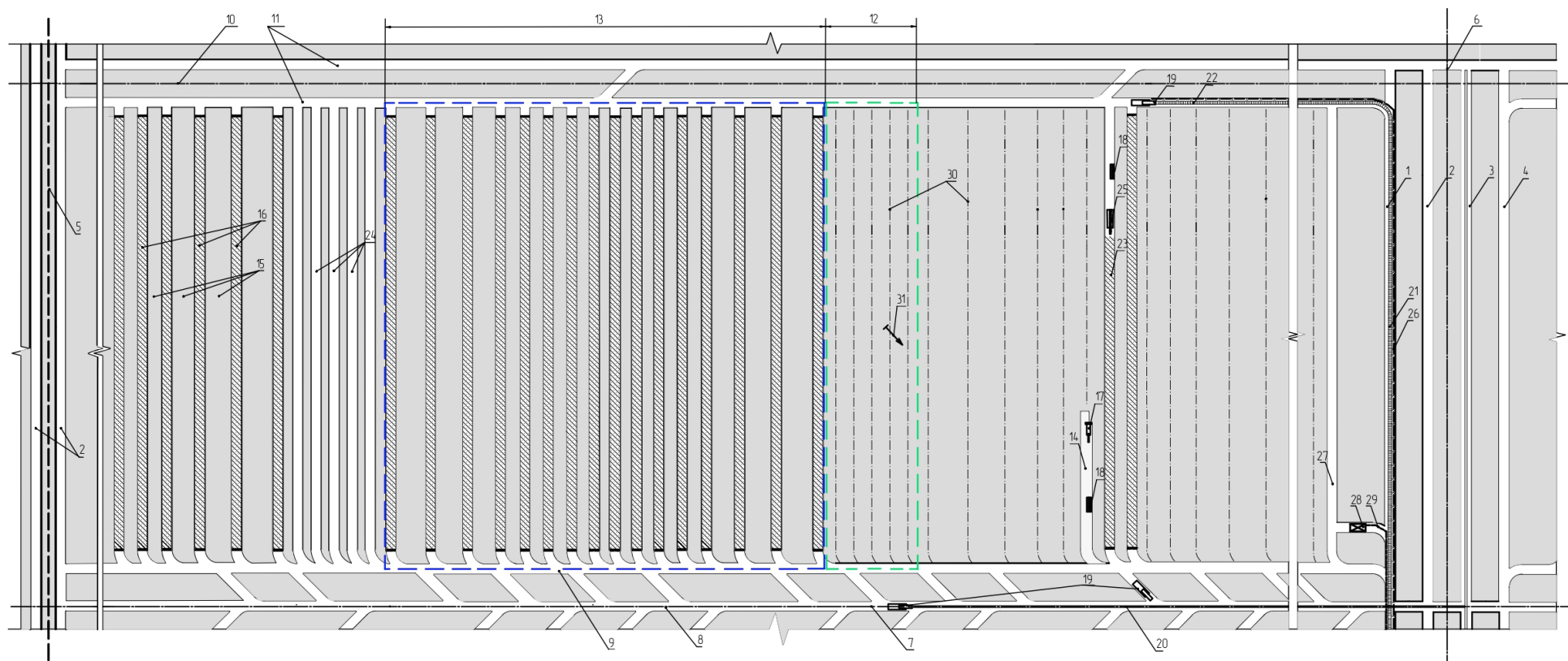


Рисунок 11 - Типовой вариант камерной системы разработки с доизвлечением запасов из опорных целиков

1 – панельный закладочный штрек; 2 – панельный вентиляционный штрек; 3 – панельный конвейерный штрек; 4 – панельный транспортный штрек; 5 – границы панели; 6 – ось панели; 7 – ось блока; 8 – блоковый конвейерный штрек; 9 – блоковый выемочный штрек; 10 – границы блока; 11 – блоковый вентиляционно-транспортный штрек; 12 – опорный целик; 13 – выемочный участок; 14 – камера первой очереди; 15 – междукammerный ленточный целик; 16 – заложённая камера; 17 – проходческо-очистной комбайн; 18 – самоходный вагон; 19 – бункер перегружатель; 20 – блоковый конвейер; 21 – панельный закладочный конвейер; 22 – блоковый закладочный конвейер; 23 – закладываемая камера; 24 – камера второй очереди; 25 – метатель; 26 – пульпопровод; 27 – камера служебного назначения; 28 – рассолоборник блоковой насосной станции; 29 – рассолопровод; 30 – ось будущей камеры; 31 – направление падения пласта.

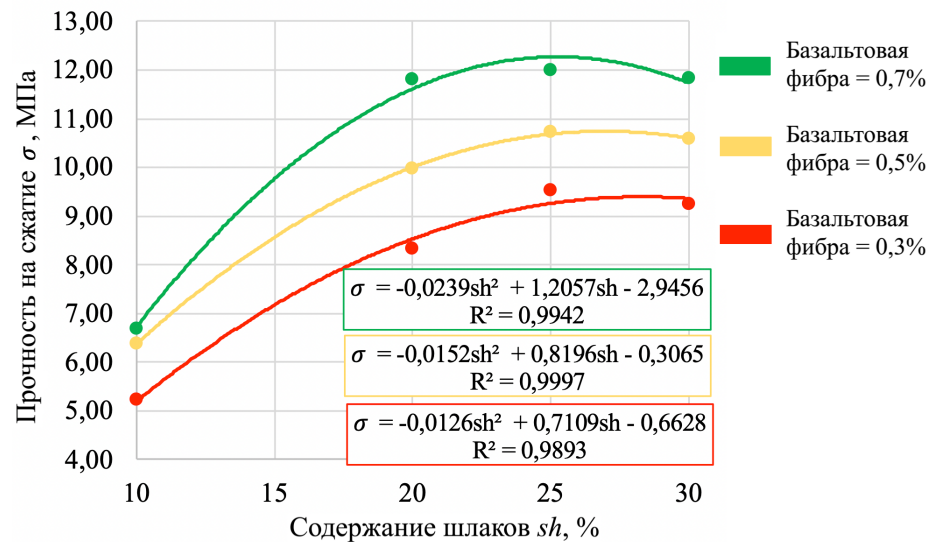


Рисунок 12 – Результаты лабораторных исследований прочностных свойств образцов закладочного массива, изготовленных по трехкомпонентной рецептуре

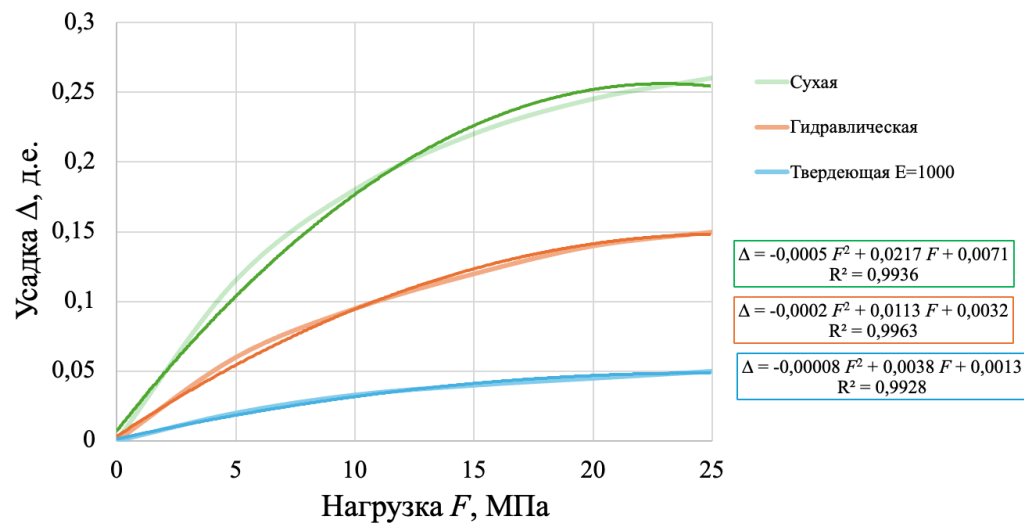


Рисунок 13 – Результаты лабораторных исследований компрессионных свойств образцов закладочного массива

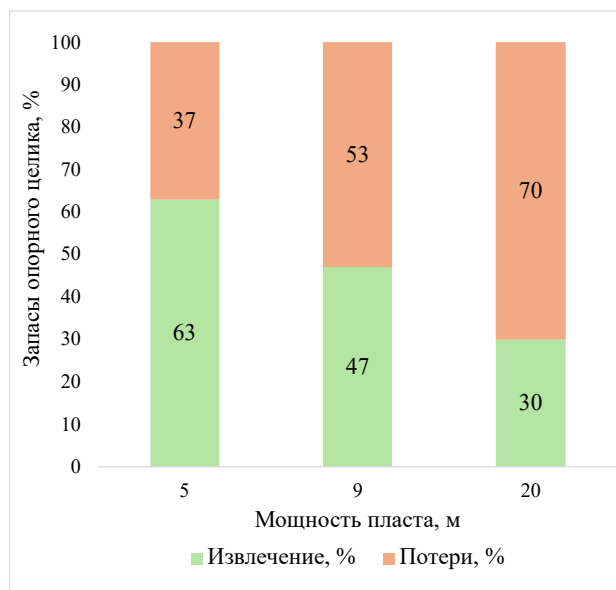


Рисунок 14 – Соотношение извлечения и потерь в опорных целиках для минимальной, средней и максимальной вынимаемой мощности пласта