

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук**

На правах рукописи



ГАДЖИЕВА ЛУИЗА АБДУ-САМАДОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОЛЯЦИИ
ПОДЗЕМНЫХ КАМЕР ДЛЯ СЕРНОКИСЛОТНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Специальность

2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доцент, кандидат технических наук
Д.Н. Радченко

Москва 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ	10
1.1. Анализ конструктивных особенностей блоков подземного выщелачивания в свете роста привлекательности физико-химических геотехнологий	10
1.2. Анализ этапов развития комбинированных геотехнологий, включающих выщелачивание руд при комплексном освоении рудных месторождений.....	23
1.3. Принципы изоляции блоков шахтного подземного выщелачивания.....	32
1.4. Перспективные идеи в области создания изолирующих материалов и конструкций на основе твердеющих массивов с заданными свойствами	44
1.5. Цель, задачи и методы исследований.	53
Глава 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД И ШАХТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.....	58
2.1. Концептуальные решения технологии подземного выщелачивания руд цветных металлов в изолированных камерах	58
2.2. Методики оценки вещественного состава некондиционных руд и вмещающих пород для возведения на их основе изолирующих оснований камер для подземного выщелачивания.....	66
2.3. Методики оценки свойств геополимерных материалов в свете реализации технологии подземного выщелачивания	73
2.4. Классификация и область применения вмещающих пород медно-колчеданных месторождений при реализации комбинированной подземной добычи руд и шахтного выщелачивания	77
Выводы по главе 2.....	85

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОДЗЕМНЫХ КАМЕР ДЛЯ СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ	87
3.1. Результаты исследований свойств вмещающих пород медно-колчеданных месторождений, определяющих возможность изоляции камер выщелачивания на основе геополимерных материалов.....	87
3.2. Исследование реологических свойств смесей на геополимерной основе и физико-механических характеристик формируемых массивов	93
3.3. Результаты испытаний кислото- и термостойкости массивов	100
3.4. Алгоритм обоснования параметров технологии изоляции камер выщелачивания.....	106
Выводы по главе 3.....	109
Глава 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ	112
4.1 Разработка технологических рекомендаций по выбору конструктивных параметров камер выщелачивания с учетом изоляции ответственных конструкций.....	112
4.2 Технология возведения днищ на основе геополимерных смесей в условиях подземного рудника	124
4.3. Анализ уровня риска при реализации традиционной технологии блочного выщелачивания.....	133
4.4. Разработка компенсирующих мероприятий.....	145
Выводы по главе 4.....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Сохраняющаяся мировая тенденция экстенсивного недропользования, переход на добычу руд в условиях сверхглубин, снижение содержания ценных компонентов в рудах определяют необходимость изыскания новых высокотехнологичных и малоотходных технологий добычи, обеспечивающих полноту и комплексность освоения недр. В значительной мере изложенным требованиям отвечает технология шахтного подземного выщелачивания.

Комбинированная геотехнология подземной добычи обогатимых руд и выщелачивания некондиционных, позволяет в значительной степени увеличить минерально-сырьевую базу обрабатываемых и перспективных месторождений, снизить эксплуатационные затраты на получение единицы товарной продукции, а также негативное воздействие на окружающую среду, ввиду отсутствия складирования отходов на поверхности. Экологичность технологии шахтного подземного выщелачивания обеспечивается, в первую очередь, обоснованным выбором параметров блоков выщелачивания в соответствии с горно- и гидрогеологическими условиями, а также эффективной изоляцией рабочего пространства блоков выщелачивания с целью недопущения миграции рабочих растворов. В связи с высокой агрессивностью выщелачивающих растворов к бетонам, высокой стоимостью кислотостойких цементов и иных добавок, перспективной задачей является изыскание геотехнологических решений по возведению изолирующих конструкций подземных блоков выщелачивания на основе обоснованного выбора новых доступных материалов, преимущественно, на основе отходов производства – пород от проходки выработок, зол ТЭЦ, отходов гидрометаллургического производства. Это определило выбор направления исследований – изучение параметров технологии изоляции подземных камер для последующего выщелачивания в них руд цветных металлов на базе

формирования горнотехнических конструкций на основе новых геополимерных материалов.

Целью работы является обоснование параметров технологии изоляции камер подземного сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов и состава геополимерных материалов, используемых при формировании изолирующих конструкций, обеспечивающих повышение полноты освоения недр и выполнение требований промышленной и экологической безопасности.

Идея работы состоит в том, что повышение полноты освоения недр, выполнение требований промышленной и экологической безопасности комбинированной технологии подземной добычи руд и выщелачивания достигается путем изоляции камер выщелачивания материалами с требуемыми прочностными, гидро-, термо-, кислотостойкими свойствами на основе соответствующих геополимерных материалов из отходов производства.

Достижение поставленной цели и реализация идеи связаны с решением следующих научно-практических задач:

- анализ современных подходов к проектированию и реализации геотехнологий, предусматривающих сочетание подземной добычи руд и выщелачивания;
- поиск путей и обоснование параметров технологии изоляции камер для подземного выщелачивания в них руд цветных металлов на основе научно обоснованного выбора геополимерных материалов, характеризующихся требуемыми прочностными, гидро-, термо-, кислотостойкими свойствами;
- исследование закономерностей формирования технологических свойств геополимеров на основе отходов производства и обоснование последовательности технологических процессов, обеспечивающих достижение требуемых свойств;
- обоснование параметров технологии формирования изолирующих конструкций камер для сернокислотного выщелачивания в них руд цветных

металлов с обеспечением требований промышленной и экологической безопасности;

- разработка технологических рекомендаций, оценка риска технологии шахтного подземного выщелачивания с разработкой мероприятий, компенсирующих повышенный риск реализации физико-химической геотехнологии.

Объект исследования: технология формирования изолирующих конструкций камер выщелачивания для сернокислотного выщелачивания в них руд цветных металлов.

Предмет исследования: параметры технологии формирования изолирующих конструкций камер выщелачивания, состав и свойства геополимерных материалов для ее реализации.

Положения, выносимые на защиту.

1. Повышение полноты и комплексности освоения месторождений руд цветных металлов обеспечивается созданием в подземном руднике камер выщелачивания с формированием в их основании изолирующих конструкций, характеризующихся требуемыми прочностью, термо- и кислотостойкостью, низким водопоглощением, состоящих из вмещающих пород месторождений с добавлением алюмосиликатных материалов и жидкой фазы, представленной водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия.

2. Формирование изолирующих конструкций в основании подземных камер выщелачивания, характеризующихся набором прочности на одноосное сжатие свыше 20 МПа, низким водопоглощением, устойчивостью в сернокислом растворе концентрацией до 10% с сохранением начальной массы и прочности и термостойкостью при нагреве до 600⁰С обеспечивается технологией приготовления в подземном руднике геополимерной смеси на основе вмещающих пород месторождений, расход компонентов которой определяется, исходя из содержания аморфных оксидов кремния и алюминия во вмещающих породах.

3. При комбинированной геотехнологии подземной добычи руд и выщелачивания выбор направлений использования вмещающих пород, в том числе, с участков проходки горных выработок, должен осуществляться после оценки содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии изоляции подземных камер для выщелачивания руд цветных металлов.

4. Технология формирования изолирующих конструкций в основании камер выщелачивания должна базироваться на применении подземных передвижных закладочных комплексов для подготовки пород с высоким содержанием аморфной фазы требуемой крупности, шихтовки твердых компонентов, перемешивания с водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия с протеканием реакции геополимеризации, а также подачи геополимерной смеси с требуемыми реологическими характеристиками в изолируемую камеру.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена представительным объемом исходных данных, достоверной сходимостью теоретических расчетов состава геополимерных материалов и результатов лабораторных исследований, использованием современного оборудования и апробированных методик, получением в лабораторных условиях нового геополимерного материала, сходимостью результатов лабораторных исследований.

Научную новизну работы составляет разработанная методика выбора параметров технологии, включая материалы для изоляции камер выщелачивания, отличающаяся тем, что выбор направлений использования вмещающих пород месторождений, преимущественно, пород от проходки выработок, сопровождается оценкой содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии выщелачивания руд цветных металлов. Получены новые знания о технологических свойствах геополимеров на основе вмещающих пород,

представленных дацитами в свете обеспечения условий выщелачивания руд в подземных камерах.

Практическая значимость работы состоит в разработке технологии формирования изолирующих конструкций в основании подземных камер для сернокислотного выщелачивания в них руд цветных металлов с выполнением требований промышленной и экологической безопасности.

Реализация результатов. Результаты исследований использованы при подготовке отчетов по программе базового бюджетного финансирования ИПКОН РАН «Разработка научно-методических основ устойчивого развития горнотехнических систем на базе установления закономерностей взаимодействия природных и инновационных технологических процессов в условиях интенсивного комплексного освоения недр Земли» в 2018-2022 гг. и вошли в перечень важнейших результатов ИПКОН РАН за 2023 г.

Апробация работы. Основные результаты, положения и выводы докладывались и обсуждались на XXIX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2017); на Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 100-летию РГГРУ им. С. Орджоникидзе «Новое в геологическом изучении недр» (2018); 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS (Кемерово, 2018) на Международном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2021, 2022 и 2023); на X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (Магнитогорск, 2019); на Научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Севастополь, 2019); на 14-й Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2019); на Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, 2020 и 2022); на II Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы.

XXI век» (Челябинск, 2020), на 15 Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2021); на XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр» (Магнитогорск, 2021); на III Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век: Устойчивое развитие» (Челябинск, 2022); на IV Международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» (Магнитогорск, 2022); на XII Международной конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» (Магнитогорск, 2023).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 16 работах, 6 из которых – в изданиях, рекомендуемых ВАК, и 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора заключается в формулировании задач исследований, соответствующих поставленной цели и идее работы, разработке программы и методик исследований, включая методики оценки пригодности вмещающих пород месторождения в качестве компонентов геополимерных смесей и получаемых на их основе искусственных массивов для целей подземного выщелачивания, разработке состава геополимерной смеси на основе дацитов, обосновании параметров конструкций оснований подземных камер для сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов.

Объем и структура работы. Диссертация представлена на 168 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 55 рисунков, 30 таблиц, список источников из 147 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

1.1 Анализ конструктивных особенностей блоков подземного выщелачивания в свете роста привлекательности физико- химических геотехнологий

Анализ практики освоения рудных месторождений свидетельствует о продолжающейся тенденции экстенсивного недропользования, базирующегося на извлечении наиболее богатых участков рудных тел с оставлением значительных объемов полезных компонентов в недрах.

В мире уже эксплуатируют золотодобывающие рудники на глубинах более 3 км, в России глубина отработки месторождений твердых полезных ископаемых достигает 2,5 км (табл. 1.1) [131]. Очевидно, что при добыче достаточно бедных руд на больших глубинах в будущем обеспечить рентабельность производства будет невозможно. В этой связи, растет привлекательность технологии шахтного подземного выщелачивания, которая позволяет обеспечить возможность извлечения ценных компонентов из руд, исключая высокие затраты на транспортирование рудной массы на поверхность.

Таблица 1.1 - Рудники отрабатывающие месторождения руд цветных металлов на больших глубинах [131]

п/п	Название рудника	Страна	Глубина, м	Вид минерального сырья
1.	Мпоненг	ЮАР	3800 (план - 4270)	Золото
2.	Дриифонтейн	ЮАР	3420 (план - 4121)	Золото
3.	Кусасалету	ЮАР	3390	Золото
4.	Клууф	ЮАР	3352 (план - 4020)	Золото
5.	Бамбанани	ЮАР	3680	Золото
6.	Булианхулу	Танзания	3910	Золото
7.	Моаб-Хотсонг	ЮАР	3052	Золото

Продолжение таблицы 1.1

8.	Ла-Ронде	Канада	3008	Золото
9.	Кидд-Крик	Канада	3000	Медноколчеданное м-е
10.	Сайс-Дип	ЮАР	2998	Золото
11.	Таргет 1	ЮАР	2945	Золото
12.	Грейтон	Канада	2490	Никель, медь
13.	Факиса	ЮАР	2426	Золото
14.	Хоумстейк	США	2500	Золото
15.	Керкленд-Лейк	Канада	2200	Золото
16.	Бушвельд	ЮАР	2200	Металлы платиновой группы
17.	Ред-Лейк	Канада	2000	Золото
18.	Гвалия-Дип	Австралия	1800	Золото
19.	Скалистый, Норникель	Россия	2056	Никель, медь, золото
20.	Кэм-Мотор	Зимбабве	1900	Золото
21.	Хемло	Канада	1524	Золото
22.	Глоб-Феникс	Зимбабве	1460	Золото

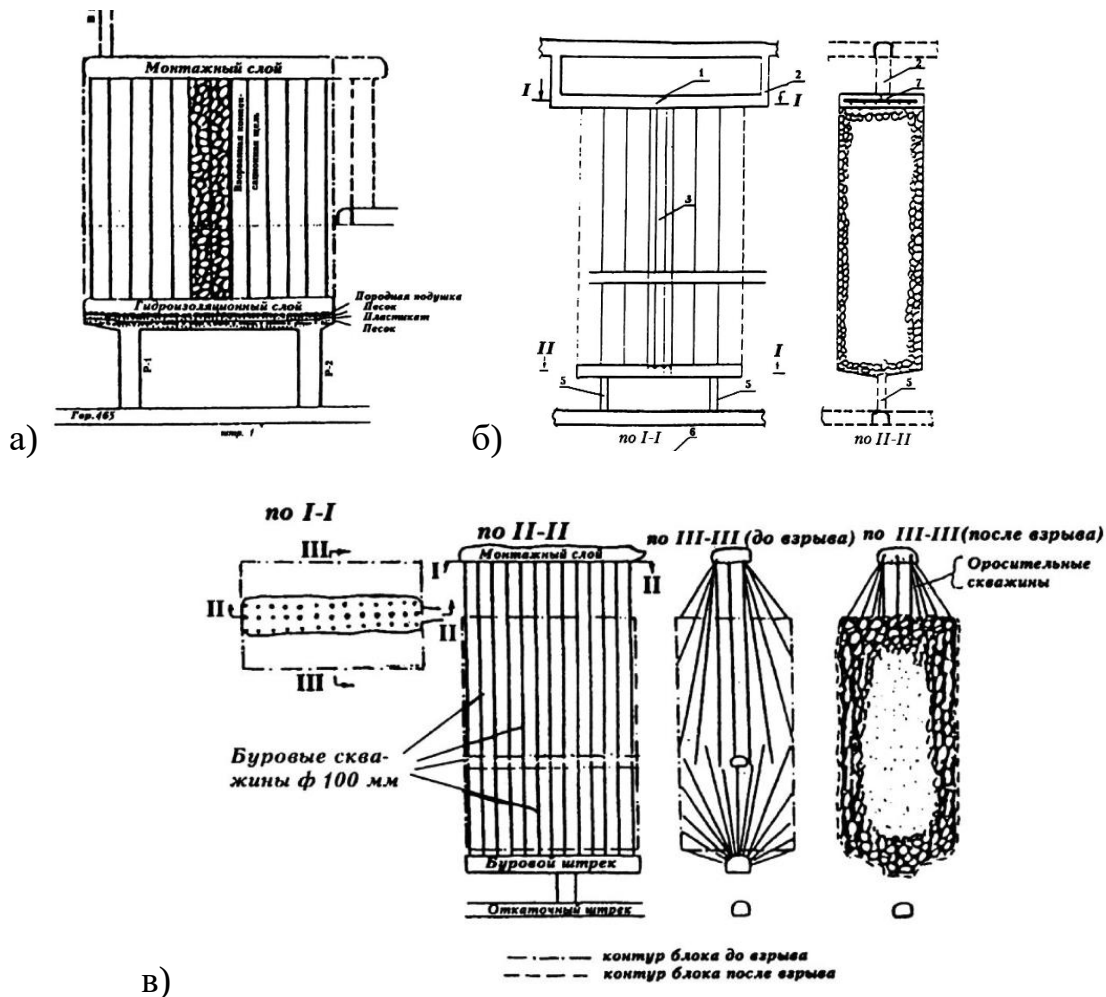
Кроме того, на рудных месторождениях отрабатываются достаточно богатые запасы руд по фактору обогатимости на обогатительных фабриках. Огромное количество забалансовых запасов так и остается в недрах. Например, при подземной разработке жильных золоторудных месторождений извлекаются запасы с содержанием золота до 0,5 г/т, тогда как в прирезках остаются значительные запасы металла [138,139]. На медно-колчеданных месторождениях за контуром рудных тел навсегда потеряны запасы с содержанием меди до 0,5% [70, 133]. На свинцово-цинковых месторождениях не извлекаются запасы руд с содержанием цинка менее 1,5% [58]. Наиболее перспективной технологией извлечения металлов из таких руд является подземное выщелачивание, исключаящее выдачу на поверхность многомиллионных объемов горной массы, и главное - складирование хвостов обогащения. При разработке месторождений цветных металлов технология

подземного блочного выщелачивания не получила широкого применения ввиду известных ограничений. В этой связи данные о практике выщелачивания меди на отечественных и зарубежных предприятиях весьма ограничены. Мелкомасштабные испытания по выщелачиванию меди на рудниках США [1], Чили [34], Японии [23], Перу [7], Южной Африки [30], Австралии [8], Румынии [43] и Замбии [45] производились в большинстве случаев для доработки оставленных в недрах запасов и не предусматривали значительных работ по подготовке блоков, за исключением бурения орошающих скважин, установки орошающих устройств и организации растворосборников из ранее пройденных выработок.

Появление и развитие технологии блочного подземного выщелачивания связано в первую очередь с необходимостью доработки забалансовых запасов месторождений меди и урана. Традиционно блоки выщелачивания представляли собой предварительно взорванную и замагазинированную рудную массу с оформленными различными способами оросительными и раствороулавливающим горизонтами. Система орошения должна была обеспечивать однородное орошение материала, а также постоянную концентрацию выщелачивающего раствора внутри блока [5]. Доступ воздуха обеспечивал необходимый кислород для усиления окисления некоторых минералов и повышения активности выщелачивающих микроорганизмов [18,26]. Подобный эффект наблюдался на руднике Майами (Аризона, США), где поддержание эффективной системы вентиляции в значительной степени способствовало извлечению меди [21].

Впервые технология блочного подземного выщелачивания урана забалансовой руды была применена на Лермонтовском горно-химическом рудоуправлении при отработке Быкогорского месторождения [92]. За весь период освоения месторождения шахтным подземным выщелачиванием подготовка блоков велась четырьмя вариантами: с полной подсечкой монтажного и гидроизоляционного слоев; с полной подсечкой монтажного и

частичной гидрослоя; с оставлением целика между монтажным слоем и отбитой рудой в блоке; без гидрослоя с оформлением днища блока взрывными скважинами [88]. В первом варианте блок подземного выщелачивания в конструктивном отношении представлял собой вертикальную камеру, равную по высоте геологическому контуру, а по ширине - мощности рудного тела. В выработках верхней подсечки монтировалась оросительная система, а в нижней части блока проводился комплекс работ для сбора продуктивных растворов (рис. 1.1а). Гидроизоляционный и монтажный слои производились из горно-подготовительных выработок основных горизонтов. Вариант 2 (рис. 1.1б) отличался тем, что нарезка днища производилась путем проходки из рудоспусков горизонтальной выработки на уровне нижней части контура рудного тела, из которой проводилось бурение подсечных скважин и проходилась отрезная восстающий и оформлялась отрезная щель.



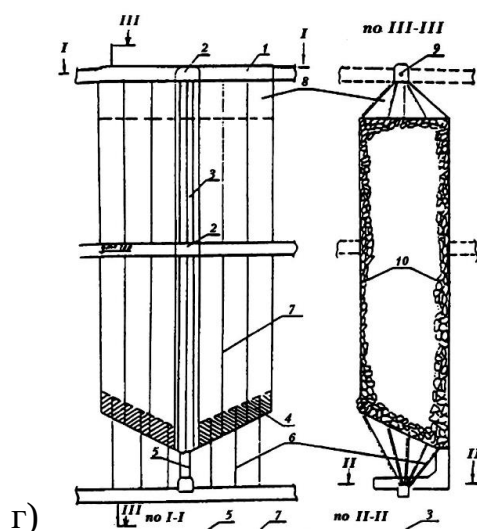


Рисунок 1.1 - Схемы подготовки блоков, применяемые на Быкогорском месторождении: А - с полной подсечкой монтажного и гидроизоляционного слоев; Б - с полной подсечкой монтажного и частичной гидрослоя; В - с оставлением целика между монтажным слоем и отбитой рудой в блоке; Г - без гидрослоя с оформлением днища блока взрывными скважинами.

Третий вариант отличался тем, что горизонт орошения состоял из бурового штрека и выработки, подсекающей отрезную щель и отрезной восстающий (рис. 1.1в). Вариант 4 предусматривал подготовку днища блока с помощью взрывных скважин, пробуренных из выработок, находящихся выше верхней геологической границы блока и с основного горизонта, расположенного под блоком. В табл. 1.2 представлены достоинства и недостатки каждого из 4 способов подготовки блоков подземного выщелачивания на Быкогорском месторождении.

Третий способ подготовки блоков получил наибольшее распространение на месторождении, вплоть до его ликвидации.

Анализ показал, что работы по гидроизоляции днищ блоков выщелачивания являются наиболее трудоемкими, но необходимыми. Решение вопросов управляемого подземного выщелачивания будет способствовать развитию этой прогрессивной технологии.

Таблица 1.2 - Достоинства и недостатки типовых схем подготовки блоков к подземному выщелачиванию на Быкогорском месторождении

Достоинства	Недостатки
<i>Схема подготовки блока с полной подсечкой монтажного и гидроизоляционного слоев</i>	
возможность наиболее полного улавливания продуктивных растворов при отсутствии на месторождении необходимого водоупора	значительный объем нарезных работ по оформлению выработок верхней и нижней подсечек
исключение разубоживания продуктивных растворов шахтными и грунтовыми водами	большая трудоемкость и высокая стоимость по устройству гидроизоляции
незначительные энергетические затраты на улавливание и откачку растворов	неблагоприятные и опасные условия труда при осуществлении работ по оформлению нижнего и верхнего слоев подсечки, особенно при производстве работ по гидроизоляции, монтажу и обслуживанию оросительной системы
	при наличии повышенной трещиноватости вмещающих пород возможны потери растворов за счет бокового растекания
<i>Схема подготовки блока с полной подсечкой монтажного и частичной гидрослоя</i>	
сокращение объемов нарезных работ при оформлении горизонта-растворосборника	сооружение монтажного слоя, требующее значительных затрат на его возведение
исключение трудоемких, дорогостоящих и относительно опасных работ по возведению гидроизоляционного слоя	обслуживание при неблагоприятных санитарно-гигиенических и опасных условиях труда
<i>Схема подготовки блока с оставлением целика между монтажным слоем и отбитой рудой в блоке</i>	
сокращение затрат на поддержание монтажного слоя в период выщелачивания блока	
<i>Схема подготовки блока без гидрослоя с оформлением днища блока взрывными скважинами</i>	
незначительный объем нарезных работ, осуществляемых мелкошпуровым способом	увеличение объема отбойки пустой породы за счет дополнительной проходки отрезного восстающего и увеличения сечения откаточного штрека
упрощение схемы откатки, выпускаемой из отрезной щели руды	отсутствие подсечки отрезной щели на уровне гидрослоя

Широкое распространение получила апробация подземного блочного выщелачивания на Стрельцовском рудном поле, где по результатам комплекса лабораторных и опытно-промышленных исследований была доказана возможность достаточно высокого извлечения урана при применении системы блочного магазинирования со скважинной отбойкой и последующим инфильтрационным выщелачиванием. Принимались, как правило, следующие параметры блока: длина – 120–150 м; ширина – 30-40 м; высота – 40-60 м.

Подготовка блока осуществлялась путем проходки подэтажных штреков на всю длину камеры с последующей отбойкой руды веерами скважин в отступающем порядке на отрезную щель. В процессе отбойки производился частичный выпуск взорванной руды для формирования компенсационного пространства. На 10–15 м выше контура рудного тела проводился оросительный горизонт с бурением скважин до верхнего уровня отбитой руды. Ниже камеры с замагазинированной рудой проводился дренажный горизонт с оборудованием приемного зумпфа для сбора продуктивных растворов. Схема подготовки блока представлена на рис. 1.2.

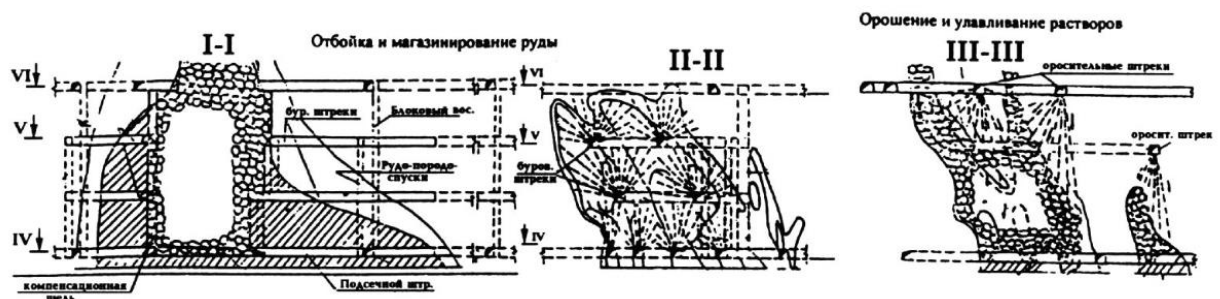


Рисунок 1.2 - Схема подготовки блока к отработке выщелачиванием на месторождении Юбилейное Стрельцовского рудного поля

Всего за время эксплуатации блоков подземного выщелачивания на месторождениях Юбилейное, Весеннее, Новогоднее, Лучистое было получено около 400 тыс. кг урана, однако извлечение при добыче этим методом составляло в среднем 59%, что связано с переуплотнением рудной массы и низкой степенью аэрации [103]. Кроме этого, на месторождения Стрельцовского рудного поля происходило обрушение днищ блоков камер выщелачивания, ввиду разупрочнения слабых неустойчивых пород агрессивными растворами. Это указывает на необходимость изыскания решений, направленных на изоляцию днищ блоков выщелачивания в случае реализации технологий шахтного подземного выщелачивания.

На месторождении урана Чаркесар-II, расположенном в Чустском районе Узбекистана, подготовка блоков забалансовых запасов к отработке методом подземного выщелачивания производилась аналогично схеме,

применяемой на Быкогорском месторождении (рис. 1.1а) с той лишь разницей, что в роли компенсационного пространства выступали выработки, образованные при добыче балансовых запасов традиционным способом [87]. Данное направление – многофункциональное использование выработанного пространства при переходе от одной технологии к другой следует учитывать при обосновании технологий шахтного подземного выщелачивания.

На урановом месторождении Кызыл-Сай в Джамбульской области Казахстана были приняты три основные конструкции блоков подземного выщелачивания забалансовых урановых руд [104]. Общий конструктив первого опытного блока был выполнен аналогично схеме, представленной на рис. 1.1г. Оросительная система блоков представляла собой магистральный полиэтиленовый трубопровод с отводами из перфорированных полиэтиленовых труб или труб из нержавеющей стали с подключенными к ним патрубками, по которым растворы через скважины-оросители поступали в камеры с замагазинированной рудой. Продуктивные растворы улавливались системой дренажных скважин с перепуском растворов в сборный штрек (для первого и второго вариантов) или системой дренажных выработок, расположенных в днище блока и соответствующим образом отперемыченных (для третьего варианта). Вариант устройства дренажного горизонта путем создания единой сети сборных скважин должен быть учтен при формировании камер выщелачивания. При этом необходимо решение вопросов исключения потерь руды в рудных основаниях камер выщелачивания.

Схема подготовки блоков подземного выщелачивания на месторождении урана Восток (Северный Казахстан) отличалась от описанных ранее тем, что горизонт орошения расположен непосредственно над замагазинированной рудой в блоке и представлял собой насос, трубопровод и набор форсунок, с помощью которых раствор подавался на рудную массу (рис.1.3) [104].

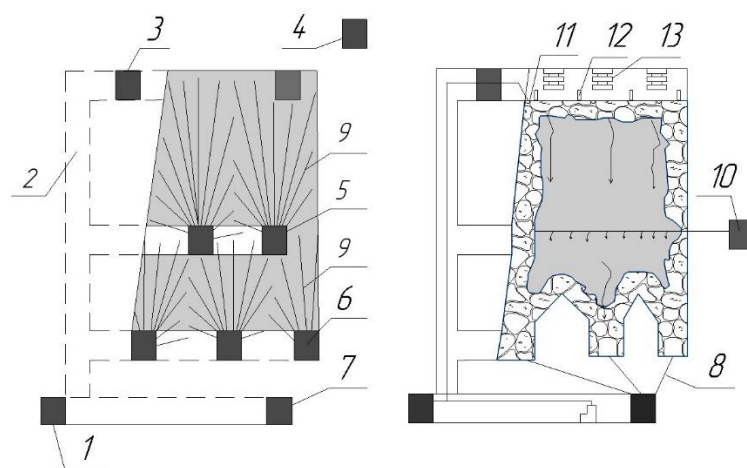


Рисунок 1.3 - Подготовка и нарезка блока выщелачивания на месторождении Восток (Северный Казахстан): 1 — принимающий растворы штрек; 2 — восстающий; 3 — подающий растворы штрек; 4 — выработка; 5 — буровые штреки; 6 — дренажно-буровые штреки; 7 — дренажный штрек; 8 — дренажные скважины; 9 — взрывные скважины; 10 — промежуточный горизонт орошения; 11 — штрек орошения; 12 — верхняя подсечка; 13 — костровая крепь

Кроме того, для предотвращения утечки продуктивных растворов на почву откаточной выработки был уложен гидроизоляционный слой из пластика, покрытого слоем бетона толщиной 10 см с уклоном в сторону сборного зумпфа. Анализ схемы на рис. 1.13 позволяет утверждать, что при проектировании и реализации технологии не были учтены требования по изоляции камер выщелачивания.

Технология подземного блочного выщелачивания получила также широкое применение на урановых месторождениях Германии. Технологии подготовки блоков к выщелачиванию не имели принципиальных отличий от применяемых в России и странах СНГ схем. Так, на рудниках Шмирхау и Пайцдорф, расположенных в пределах Ронненбургского рудного поля (Тюрингия, ФРГ) применялись схемы подготовки блоков с полной подсечкой монтажного и гидроизоляционного слоев [88]. Подача растворов осуществлялась через перфорированные полиэтиленовые трубы, уложенные на поверхности замагазинированной руды или через систему нагнетательных скважин. Отвод продуктивных растворов осуществлялся через встроенные в

глухие перемычки трубы. Затем с целью интенсификации процесса выщелачивания, конструкция перемычки была изменена и возводилась на половину высоты дренажного штрека для обеспечения доступа кислорода к выщелачиваемому массиву, что должно быть учтено при совершенствовании параметров технологии создания камер выщелачивания.

На месторождении Кенингштайн выщелачивание производилось системой камер с замагазинированной рудой и целиками, отделяющими их друг от друга, что влекло огромные потери ценных компонентов. При формировании блоков раствороподающие трубы монтировались в блок с помощью лебедки, обеспечивая безопасность ведения работ по монтажу. Очевидно, что отсутствие изоляции камер выщелачивания не способствовало достижению высоких экологических показателей и обеспечению требований промышленной безопасности.

Совершенствованию конструкций блоков с целью повышения эффективности технологии подземного блочного выщелачивания посвящены труды ученых как в России, так и за рубежом. В работе [70] предложена технологическая схема доработки забалансовых запасов медно-колчеданных месторождений физико-химическим методом, адаптированная к условиям Узельгинского и Октябрьского месторождений. Технология предусматривает перевод на месте залегания полезного компонента, содержащегося в донорских рудных телах, в раствор и последующую подачу продуктивных рассолов на предварительно раздробленные в камере акцепторные рудные тела для осаждения ионов меди. Анализ вышеуказанной работы позволяет утверждать, что ее эффективность снижается, ввиду отсутствия решений по изоляции взорванных блоков рудной массы от вмещающего массива горных пород.

Авторами [114] предложено бурение закачных скважин из выработок дренажного горизонта через предохранительный целик до нижней границы замагазинированной руды, подачу через восстающие закачные скважины

выщелачивающего раствора в замагазинированную руду в смеси с воздухом в режиме гидродинамической кавитации, сбор продуктивных растворов в выработках дренажного горизонта. На рис. 1.4 представлена закачная скважина и расположение в них вихре-кавитационного устройства.

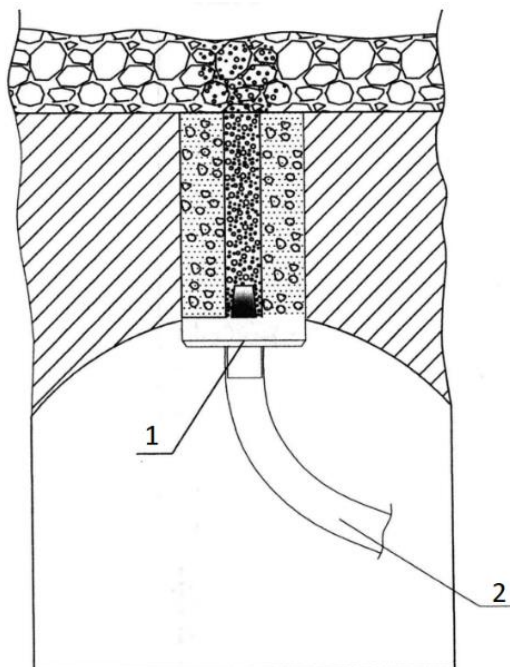


Рисунок 1.4 - Конструкция восстающей закачной скважины: 1 - вихре-кавитационное устройство; 2 - гибкий нагнетательный шланг

В ходе аналитического обзора выявлены наиболее перспективные известные технологии и способы блочного выщелачивания скальных руд, лишенные недостатков скважинного выщелачивания с поверхности [55,100]. Такие геотехнологии блочного подземного выщелачивания при отработке залежей полезных ископаемых предусматривают, что для подачи выщелачивающих растворов в блок обрушенных руд бурят нисходящие оросительные скважины в верхнюю часть замагазинированной в блоке руды через надштрековый целик, оставляемый над выработками сборного горизонта, либо выщелачивающий раствор в замагазинированную руду подают по пробуренным восстающим закачным скважинам в смеси с воздухом в режиме гидродинамической кавитации [108]. При этом скважины бурят по руде, а целик руды, в котором бурят нагнетающие скважины, оставляют на

месте залегания в виде потерь, что является естественным способом сохранения целостности горнотехнической конструкции. В остальных случаях, чаще всего, раствор подают в режиме орошения или нагнетания сверху [109].

Недостатками описанных в литературе способов является их высокая экологическая опасность ввиду риска неконтролируемой и, тем более, массовой утечки растворов за пределы блоков подземного выщелачивания, следовательно, дренажа растворов в окружающую среду [76]. Кроме этого, недостатком является то, что блочное выщелачивание влечет огромные потери ценных компонентов, так как блок выщелачиваемой руды окружен содержащими ценные компоненты вмещающими породами и рудами, являющимися естественным ограничителем блоков взорванной горной массы, причем объем вмещающих руд и пород достигает 60 % от объема выщелачиваемых руд.

Для минимизации влияния указанного фактора рядом авторов разработаны геотехнологии, предусматривающие герметизацию камеры до создания в ней условий, аналогичных автоклавному режиму выщелачивания [110], прокладку в пространстве камеры трубопроводов для подачи воздуха и воды под давлением, загрузку сырья и проведение автоклавного выщелачивания такого сырья.

Необходимо отметить, что развитие физико-химических способов добычи при эксплуатации систем шахтного подземного выщелачивания заключалось в том, что значительная часть работ была направлена на обоснование параметров воздействия на блоки выщелачивания различными внешними энергетическими воздействиями, газами, изменением гидродинамических режимов и повышение уровня извлечения ценных компонентов путем совершенствования способов рудоподготовки. Данный положительный опыт необходимо учитывать при развитии технологии шахтного подземного выщелачивания.

Однако, в ходе аналитического обзора определено, что недостатками описанных в литературе способов является их высокая экологическая опасность ввиду риска неконтролируемой и, тем более, массовой утечки растворов за пределы блоков подземного выщелачивания, следовательно, дренажа растворов в окружающую среду [76]. Кроме этого, установлено, что недостатком является то, что блочное выщелачивание влечет огромные потери ценных компонентов, так как блок выщелачиваемой руды окружен содержащими ценные компоненты вмещающими породами и рудами, являющимися естественным ограничителем блоков взорванной горной массы, причем объем вмещающих руд и пород достигает 60 % от объема выщелачиваемых руд. Несмотря на известные преимущества систем шахтного подземного выщелачивания металлов, до настоящего времени можно выделить несколько нерешенных задач, связанных с выявленными недостатками (табл. 1.3).

Таблица 1.3 - Достоинства и недостатки существующих систем шахтного подземного выщелачивания и их комбинаций с технологиями подземной добычи руд

Преимущества	Недостатки
Заполнение образованных при отбойке руд пустот раздробленной горной массой, обеспечивающее дополнительную устойчивость выработанных пространств	Высокие потери руд в целиках (межблоковые целики, потолочины, днища блоков), достигающие 50% от общего объема запасов.
Выдача на земную поверхность для переработки части горной массы по условию обеспечения компенсационного пространства для отбойки руд	Гидрогеохимическое воздействие агрессивных растворов на окружающую среду за пределами блоков подземного выщелачивания
Вовлечение в разработку разнородных, в том числе забалансовых, руд в недрах	Практическая невозможность взрывной подготовки рудной массы до крупности -50 (40) +0 мм, необходимой для достижения высокого извлечения металлов

Продолжение таблицы 1.3

Экономичность и безопасность работ	Отсутствие решений, обеспечивающих эффективное высоко-, либо низкотемпературное бактериальное окисление рудной массы
Возможность отрабатывать считавшиеся безвозвратно потерянными в охранных целиках, зонах обрушения, горелых рудах и т. п. запасы	Отсутствие решений, обеспечивающих улавливание и отвод газов, что особенно актуально при выщелачивании сульфидных руд
Сопоставимая нагрузка на окружающую природную среду, меньшая нагрузка на объекты поверхности	Эффективность извлечения даже при оптимальных схемах взрывной отбойки не превышает 45%.

Для решения проблемы эффективного подземного выщелачивания наиболее перспективны комбинированные физико-технические и физико-химические геотехнологии, основанные на многофункциональном использовании выработанных пространств подземных камер, изолированных от вмещающих пород искусственными массивами, возводимыми, преимущественно на основе твердеющих закладочных смесей. Это позволяет реализовать экологически щадящие варианты шахтного подземного выщелачивания руд.

1.2 Анализ этапов развития комбинированных геотехнологий, включающих выщелачивание руд при комплексном освоении рудных месторождений

Комбинированные геотехнологии освоения месторождений предполагают не только сочетание открытого и подземного способов разработки, но и совместное использование физико-технических и физико-химических технологий, основанных на сочетании открытого, подземного способов с подземным и кучным выщелачиванием. В мировой практике известны технологии, которые заключаются в комбинированной разработке скальных месторождений с извлечением поверхность наиболее богатых

участков залежей и подземным выщелачиванием в камерах предварительно взорванной бедной руды [80,84,140].

Теоретические основы и широкая промышленная апробация комбинации технологий добычи руд физико-техническими и физико-химическими способами были заложены и реализованы ведущими учеными СССР и США в свете развития технологий разработки месторождений меди, урана, а затем руд цветных металлов, золота, серебра [54,56,57,60,94]. В работе [81] приведена классификация способов комбинированной технологии освоения месторождений, учитывающая вариации, последовательность выполнения технологических процессов открытого, подземного и физико-химических методов добычи и возможность совмещения их в пространстве и во времени, а также направление развития фронта работ и состояние массива (рис. 1.5). Эффективность применения горнотехнических систем комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологии связана со специфическими природными и техногенными условиями и отличается целым рядом особенностей. В большинстве случаев использование физико-химических геотехнологий зависит от результатов развития в той или иной мере на определенном участке месторождения физико-технических геотехнологий и применение физико-химических методов в комбинации с традиционными зачастую связано с доработкой потерянных забалансовых руд, о чем свидетельствует мировой опыт [3,33,36,44,81].

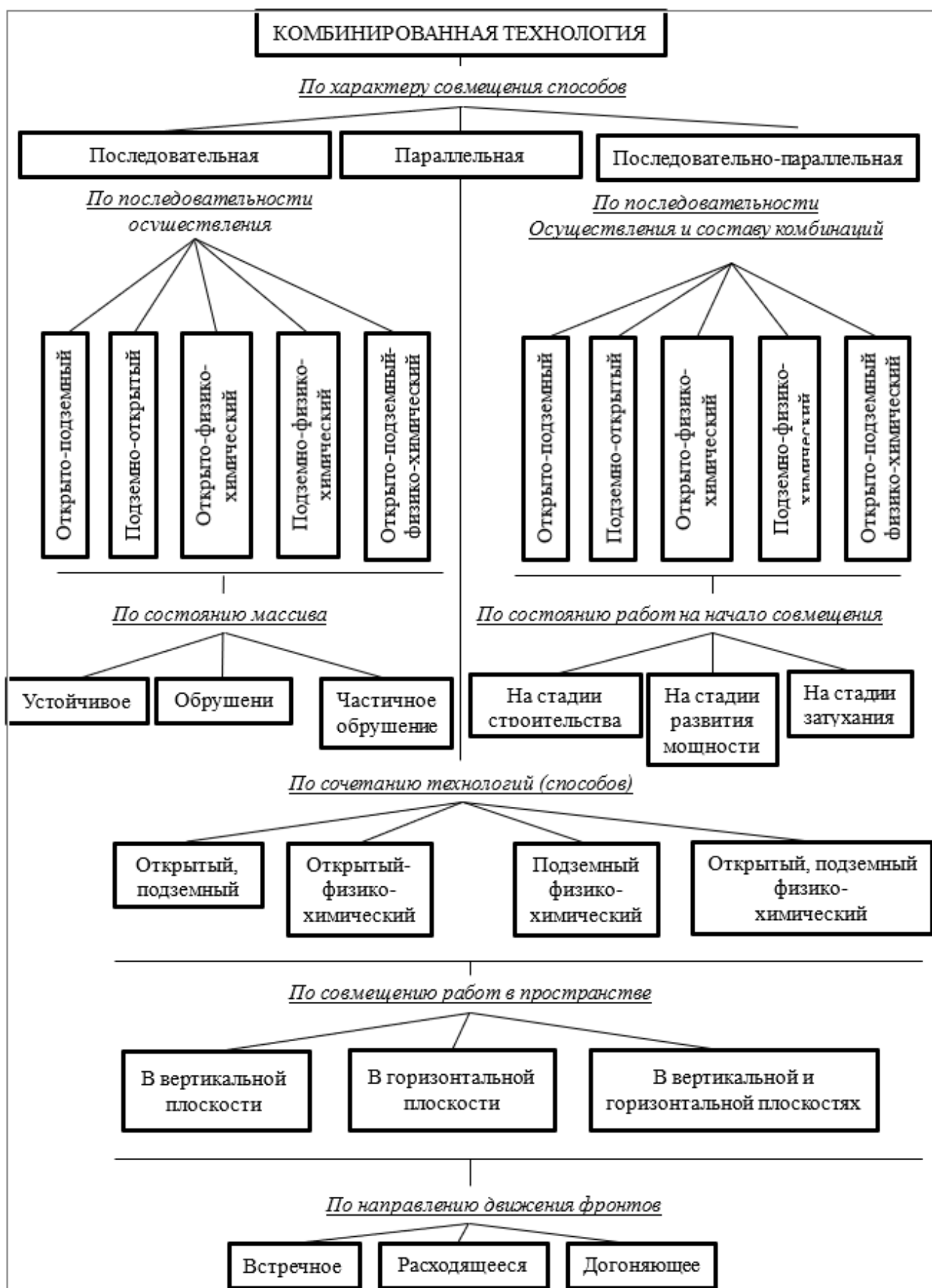


Рисунок 1.5 – Классификация комбинированной геотехнологии [85]

Метод подземного выщелачивания для обработки медно-колчеданных руд был впервые применен в 1922 году на руднике в Огайо, США. В СССР впервые возможность отработки методом подземного выщелачивания была высказана в 1956 году для отработки месторождений урановых руд, однако ввиду отсутствия эффективных реагентов для извлечения урана, не получила распространения. И лишь в 1958 году на промплощадке рудника 2 Быкогорского месторождения были проведены опытные работы по подземному и кучному выщелачиванию добытых руд ввиду неблагоприятной обстановки с обеспеченностью балансовыми запасами. Среднее содержание урана в растворе при реализации технологии подземного выщелачивания составило 0,006%, основные технико-экономические показатели представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4 - Техничко-экономические показатели переработки руды на ГМЗ и при ШПВ

Показатели	Переработка руды на ГМЗ	Шахтное выщелачивание
Содержание в руде, %	0,015	0,015
Себестоимость единицы, %	100	40-45
Производительность труда по конечной продукции, %	100	115-120
Расход серной кислоты, %	100	30-35
Извлечение урана из недр, %	73-76	64-65

В 1971 году ПВ было применено на руднике “Биг Майк” (штат Невада) для доработки законтурных запасов карьера, которые составляли около 475 тысяч тонн смешанной медной руды с концентрацией меди примерно в 2%, главным образом состоящей из халькозина. Подготовка к выщелачиванию включала в себя массовый взрыв руды, проводившийся в различных участках карьера. В результате было раздроблено около 600 тысяч тонн руды, с размерами кусков до 230 мм. Для выщелачивания использовался водный раствор серной кислоты с рН от 1,5 до 2. Продуктивные растворы собирались в нижней части карьера и откачивались через скважины (рис. 1.6). Ирригация

проводилась раз в неделю. Процесс извлечения меди из растворов осуществлялся на цементационной установке. В течение всего периода работы по подземному выщелачиванию было добыто 7267,5 тонн меди, при себестоимости 31,5 центов за килограмм, что значительно дешевле по сравнению с традиционными методами добычи [96].



Рисунок 1.6 – Выщелачивание меди на руднике Биг Майк

В 1939–1941 гг. на Урале проведен ряд испытаний ПВ меди из пышминских, белореченских и новолевинских руд. В 1954 проведены испытания ПВ на Гумешевском месторождении. В 1959–1960 гг. на Дегтярском руднике методом подземного выщелачивания получено 1074 т меди. Обработке подвергалась нижняя выклинка месторождения с запасами меди около 2300 т. Отработанный участок орошали водой через пробуренные с поверхности скважины и через трещины зоны обрушения. Продолжительность орошения для выщелачивания составляла 15 дней. Среднее содержание меди в рудничных водах изменилось с 0,3 до 0,8 г/л. Среднее содержание меди в продуктивных растворах составило 6 г/л [142].

В 1964 г. на Дегтярском руднике была создана опытно-промышленная установка ШПВ с бактериальной регенерацией растворов. Затем, начиная с 1971 года, проведены испытания ШПВ на блоках, раздробленных буровзрывными работами из целиков медно-колчеданной руды. Извлечение меди составило 6 % в год [145].

В 1971 году начались работы по освоению ШПВ руд, оставшихся после отработки Блявинского месторождения, медные минералы на котором были представлены халькопиритом и ковелином. Подготовка к выщелачиванию включала обустройство рудного массива скважинами с поверхности глубиной до 95 м. Для увеличения извлечения меди применялся метод иммерсионного выщелачивания (затопления), а для интенсификации процесса – аэрация растворов орошения [99]. На Блявинском месторождении из подземных объектов выщелачивания медных руд получены сотни тонн меди. Однако, неизученность процесса, сырьевой базы и экстенсивный путь развития промышленности в целом послужили причиной того, что ПВ не нашло промышленного применения.

Развитию научно-методических основ комбинированной подземной добычи руд и шахтного выщелачивания посвящены труды многих Российских ученых. В работе [135] предложена классификация технологий подземного выщелачивания при доработке месторождений, разрабатываемых традиционными способами, с установлением условий применения каждого варианта комбинации и параметров выщелачивания (табл. 1.5).

Широкое развитие получила концепция многоярусных горнотехнических систем, где ярус – это участок месторождения, в пределах нижней и верхней отметки вскрываемый и подготавливаемый определенным способом - открытым, подземным, открыто-подземным, выщелачиванием или их сочетанием [59,137,141,144].

Комбинированная геотехнология, включающая физико-технические и физико-химические способы добычи становятся все более актуальной в условиях истощающейся отечественной минерально-сырьевой базы. Кроме того, применение такой технологии позволяет в значительной мере снизить объемов выдаваемых на поверхность отходов, которые за годы и десятилетия складирования наносят непоправимый ущерб экосистемам горнопромышленных регионов [40].

Таблица 1.5 - Классификация технологических схем подземного выщелачивания при доработке месторождений

Система разработки по типу выработки	Способ подачи и сбора раствора	Условия применения
Скважинная с поверхности	Подача растворителя с земной поверхности и сбор продуктивного раствора скважинами И1 карьера	Запасы в бортах карьера близко к земной поверхности, руды рыхлые, пористые, легкорастворимые
Скважинная из карьерного пространства	Подача растворителя и сбор раствора скважинами из карьера	Запасы в основании бортов и в дне карьера, руды те же
Скважинная из подземных выработок	Подача и сбор раствора скважинами из подземных выработок	Руды те же, а также массивные, трещиноватые низкой ценности
Скважинная с использованием подземных выработок	Подача растворителя по скважинам с земной поверхности, сбор продуктивного раствора в подземной выработке	Вблизи оставшихся запасов отсутствуют подземные выработки
Подземными выработками	Орошение с поверхности замагистинированной руды со сбором раствора в нижерасположенных выработках	Руды устойчивые, не склонные к самовозгоранию, средней ценности
	Орошение из верхнего штрека (орта), сбор продуктивного раствора в выработке в основании блока	Руды неустойчивые, низкой и средней ценности
	Подача растворителя под давлением по скважинам из нижней выработки и сбор продуктивного раствора в той же выработке	Руды высокой ценности
Скважинная из карьерного пространства и подземных выработок	Подача растворителя скважинами из карьера и сбор продуктивного раствора скважинами в подземную выработку нижнего горизонта	Запасы вблизи контура карьера, руды пористые, рыхлые, хорошо растворимые
	Подача и сбор раствора скважинами из подземных выработок	Запасы, удаленные от контура карьера, руды низкой ценности
Карьером с подземными выработками	Орошение из карьера, а сбор раствора в подземные выработки	Внутренние и внешние прикарьерные запасы, руды средней и высокой ценности
	Орошение из карьера и подземных выработок верхнего горизонта, сбор раствора в подземной выработке нижнего горизонта	Залежи значительного простираения от контура карьера в массив

Так, в информационно-технический справочнике по наилучшим доступным технологиям [72] в качестве одной из наиболее перспективных технологий добычи руд представлены комбинированные технологии на основе традиционного (ТС) способа переработки руд с использованием методов подземного (ПВ) выщелачивания полезных компонентов.

Одноярусные горнотехнические схемы предполагают возможность развития горных работ в пределах одного яруса - открытого или подземного. При этом реализуются сочетания этих базовых способов добычи с выщелачиванием в подземных камерах второй очереди или в зоне обрушения, с подземным выщелачиванием бедных либо маломощных прибортовых рудных залежей. Примеры одноярусных горнотехнических систем представлены на рис. 1.7.

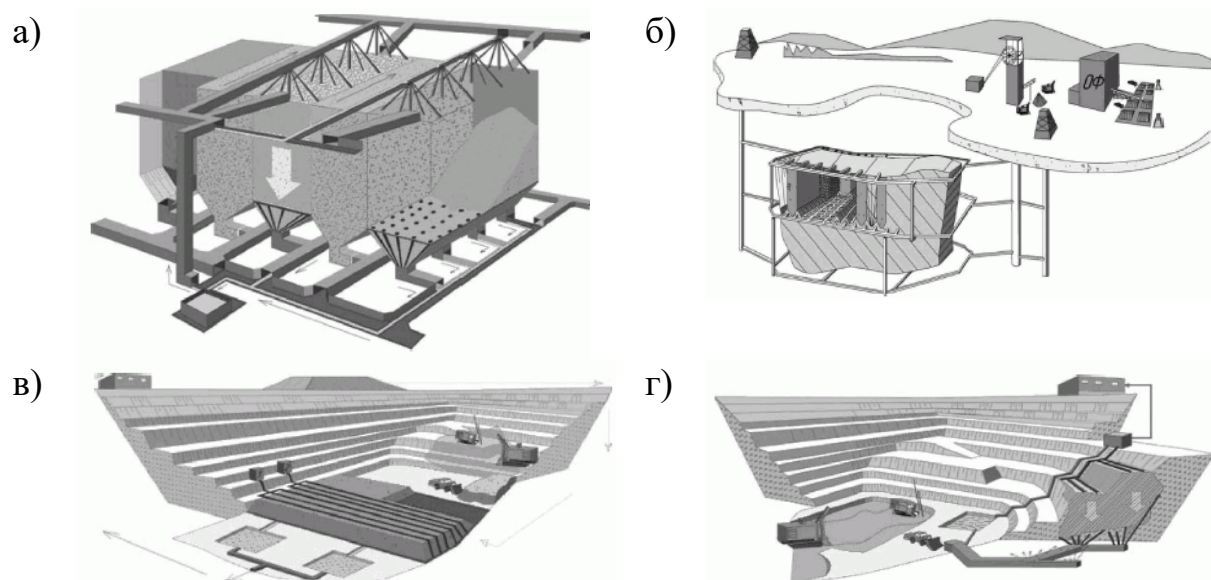


Рисунок 1.7 - Одноярусные горнотехнические системы: а - с твердеющей закладкой и выщелачиванием техногенного сырья в камерах второй очереди; б - с выщелачиванием отходов обогащения в камерах второй очереди; в - с выщелачиванием бедных руд или отходов обогащения в карьере; г - с выщелачиванием прикарьерных запасов

Применение двухъярусной горнотехнической системы возможно при совмещенной отработке месторождения открытым и подземным способом. Нижележащие запасы обрабатываются традиционно подземным способом или с применением технологий выщелачивания в камерах второй очереди. По мере их отработки в очистном пространстве остаются отходы выщелачивания,

которые выполняют роль закладки. Днище камер оборудуют скважинами для сбора продуктивных растворов. Подача растворов в камеру осуществляется через сеть скважин, пройденных из подземных горных выработок вентиляционно-закладочного горизонта (рис. 1.8).

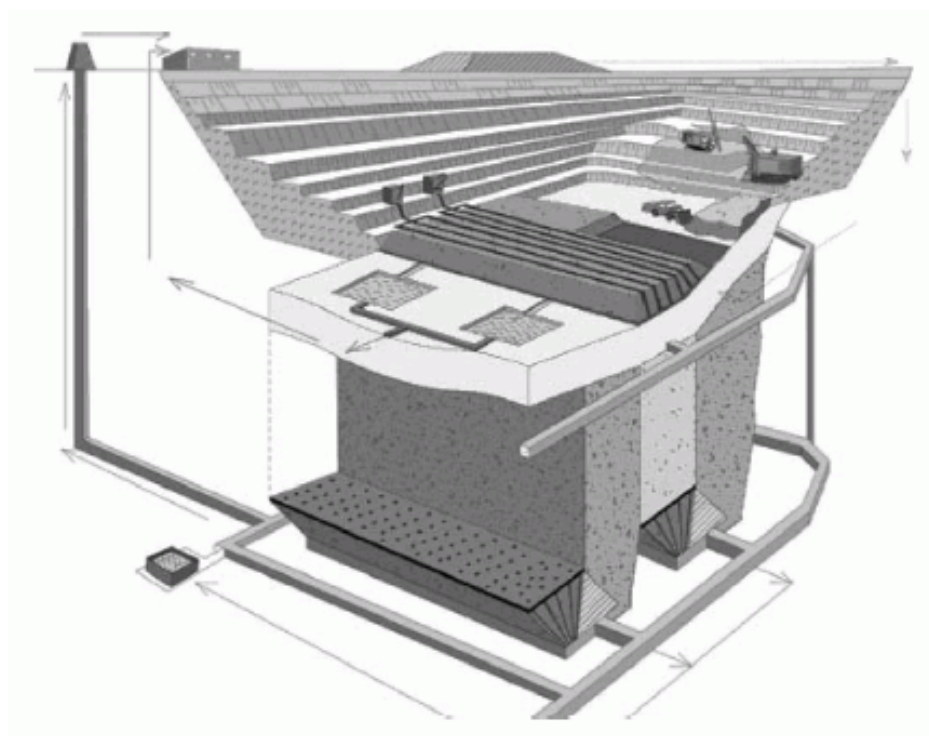


Рисунок 1.8 - Двухъярусная открыто-подземная горнотехническая система с выщелачиванием в подземных камерах II очереди

В представленной на рис. 1.9 четырехъярусной горнотехнической системе отработка запасов мощного месторождения с большой глубиной распространения ведется карьером, открыто-подземным ярусом, подземным способом системами разработки с твердеющей закладкой. Доработка выклинивающих вниз запасов осуществляется с нижнего подземного горизонта с использованием системы откачных и закачных скважин. По закачным скважинам в рудный массив подается растворитель, а по откачным с помощью насосов выдается продуктивный раствор.

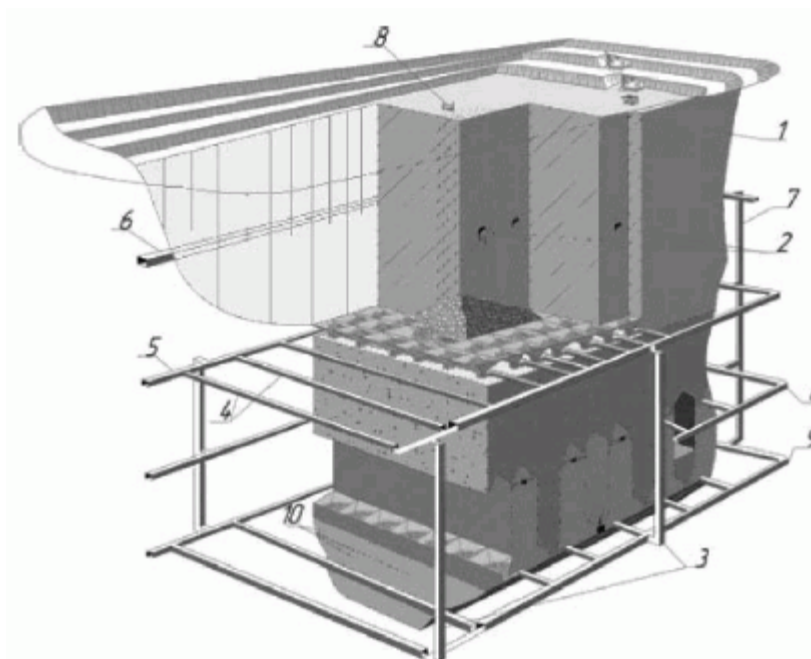


Рисунок 1.9 - Четырехъярусная горнотехническая система с последовательной отработкой запасов открытого, открыто-подземного, подземного и скважинного ярусов: 1 - дно карьера; 2 - выработки бурового горизонта в открыто-подземном ярусе (ОПЯ); 3 - рудоспуски; 4 - вентиляционно-закладочный орт; 5 - кольцевой штрек в основании ОПЯ; 6 - подэтажный штрек ОПЯ; 7 - вентиляционно-ходовой восстающий; 8 - кольцевые штреки верхнего и нижнего горизонта шахты

Предложенные комбинированные геотехнологии подземной добычи руд и выщелачивания в камерах второй очереди, образуемые закладкой выработанного пространства, является весьма перспективным решением, способным обеспечить загрузку камеры для выщелачивания сырьем требуемой крупности, избежать необходимости оставления целиков, вместе с тем, обеспечивая устойчивость участка за счет искусственных массивов в камерах первой очереди. Однако, несмотря на указанные преимущества нерешенным остается вопрос изоляции таких камер, исключающей миграцию агрессивных растворов выщелачивания за ее пределы.

1.3. Принципы изоляции блоков шахтного подземного выщелачивания

Существующая на сегодняшний день тенденция развития принципов проектирования горнотехнических систем подземной добычи руд и

выщелачивания связана с применением искусственных массивов в качестве более надежного способа и средства поддержания выработанного пространства с обеспечением наиболее полного извлечения полезного компонента. Анализ мирового опыта свидетельствует, что системы разработки с закладкой выработанного пространства применяются на более чем 55% добывающих предприятий.

На разных этапах развития техники и технологии закладка выработанного пространства классифицировалась по различным признакам. В основу классификации принимались различные критерии, такие как отсутствие или наличие вяжущих компонентов, агрегатное состояние закладки в процессе транспортирования и распределения в выработанном пространстве и т.д. [75,130].

Обоснование составов твердеющих смесей для различных вариантов систем разработок производится зачастую с учетом: заданной прочности, стоимости возведения искусственного массива, времени достижения заданных прочностных характеристик материала, определяющих возможную интенсивность очистных работ; способа транспортирования смеси. Несмотря на определенную привлекательность технологии выщелачивания руд в камерах второй очереди, образованных после выемки богатых руд системами с твердеющей закладкой выработанного пространства, среди требований к закладочным смесям и массивам отсутствуют такие, которые отвечают требованиям к технологии шахтного подземного выщелачивания. Такие требования, ввиду агрессивных растворов выщелачивания, должны определяться дополнительно.

Компонентные составы твердеющей закладки, применяемые на рудных месторождениях СНГ представлены в табл. 1.6. Реологические свойства твердеющих смесей должны обеспечивать устойчивое их транспортирование по трассе закладочного трубопровода, равномерное без расслоения растекание по камере и необходимую глубину проникновения в породу при использовании комбинированного способа закладки камер. Прочностные и

компрессионные свойства возведенного искусственного массива должны соответствовать принятым нормативным показателям.

Таблица 1.6 - Компонентные составы твердеющей закладки на рудниках СНГ

Наименование рудника	Состав твердеющей закладки, кг/м ³		Прочность закладки, МПа
	Вяжущий материал	Инертный наполнитель	
Запорожский железорудный комбинат	Доменный граншлак - 450	Порода - 500 Отходы флюса -1050	6-7
Риддер-Сокольный рудник	Цемент - 140	Хвосты обогащения - 1195	4-5
Гайский рудник	Цемент-40, Молотый шлак - 360	Песок - 1260, Примесь глины 30 %	5-6
Яковлевский рудник	Цемент - 50, Сталеплавильный шлак -450	Кварцевый песок-1250	4,5-5
Норильский ГМК	Цемент - 100 - 120, Ангидрит молотый - 180— 220, Граншлак никелевого завода - 280 - 320	Песок - 800, Щебень - 600	2-4,5
Урановые рудники ГП "ВостГОК"	Граншлак - 200 - 300	Карьерный песок-1200	3-5
Горнообогатительны й комбинат Химрудтех	Доменный граншлак-400	Песок - 1200	6-7
Малеевский рудник	Цемент - 70, Доменный шлак - 280	Порода - 1125	4
Североуральский бокситовый рудник	Шлак - 360, известь - 190	Песок - 1400	5-6
Ярегский горнохимический комплекс	Цемент - 30 - 200, Шлак - 200 - 370	Песок (хвосты обогащения) - 1200	1,7-7
Джезказганские рудники	Портландцемент М 400 -120, Зола ТЭЦ- 280	Порода -1100, Отвальные хвосты обогащения - 300	4-8
Красногвардейский рудник	Цемент - 90, Молотый шлак - 1200	-	3-4
Орловский рудник	Цемент - 250	Хвосты - 1290, Порода - 220	4
Шахта «Магнетитовая»	Цемент - 40 - 65, Граншлак- 360	Известняк - 600, Хвосты - 600.	3-6
Рудник «Северный»	Цемент - 165	Местный песок-1180	1,5-1,9

Как отмечалось ранее, применение систем подземного блочного выщелачивания связано с высоким риском миграции маточных и продуктивных растворов и, как следствие, загрязнением значительных зон за пределами блоков, потерями полезного компонента [29]. Однако, традиционно применяемые в горнодобывающей практике цементные смеси и закладочные массивы на их основе не могут в нужной степени обеспечить изоляцию камер подземного выщелачивания.

В практике блочного выщелачивания решение указанной проблемы осуществлялось за счет возведения гидроизоляционных конструкций различного назначения, способствующих организованному улавливанию и перенаправлению потоков: целики, перемычки, противofильтрационные завесы и изолированные выработки. Наиболее распространенными в практике подземного блочного выщелачивания способы сбора и улавливания растворов приведены на рис. 1.10. В большей мере этот вопрос проработан при добыче скальных руд на урановых месторождениях. Традиционно подошву растворосборных выработок покрывают гидроизоляционным слоем (бетоном или пластиком), а предотвращение утечки продуктивных растворов по трещинам в боковых стенках блоков производится путем тампонажа их твердеющими смесями [112]. Различие способов изоляции выработанного пространства камер выщелачивания определяет перспективу развития классификации способов изоляции, которая, в зависимости от риска миграции растворов в окружающую среду, разрушения горнотехнических конструкций и других направлений будет способствовать выбору направлений создания изолирующих конструкций.

Авторами [76] на примере АО «ППГХО» рассмотрен вариант совершенствования подготовки блока подземного выщелачивания путем проходки первичных заходок по простиранию залежи и образованием на их почве гидроизоляционного слоя из полиэтиленовой пленки и пластика, затем пустоты от отработанных заходок заполняют твердеющей закладкой. Под защитой искусственных целиков проходят вторичные заходки, на почву

которых настилают полиэтиленовую пленку и затем отсыпают слой тонкодробленной породы толщиной 0,5 м.

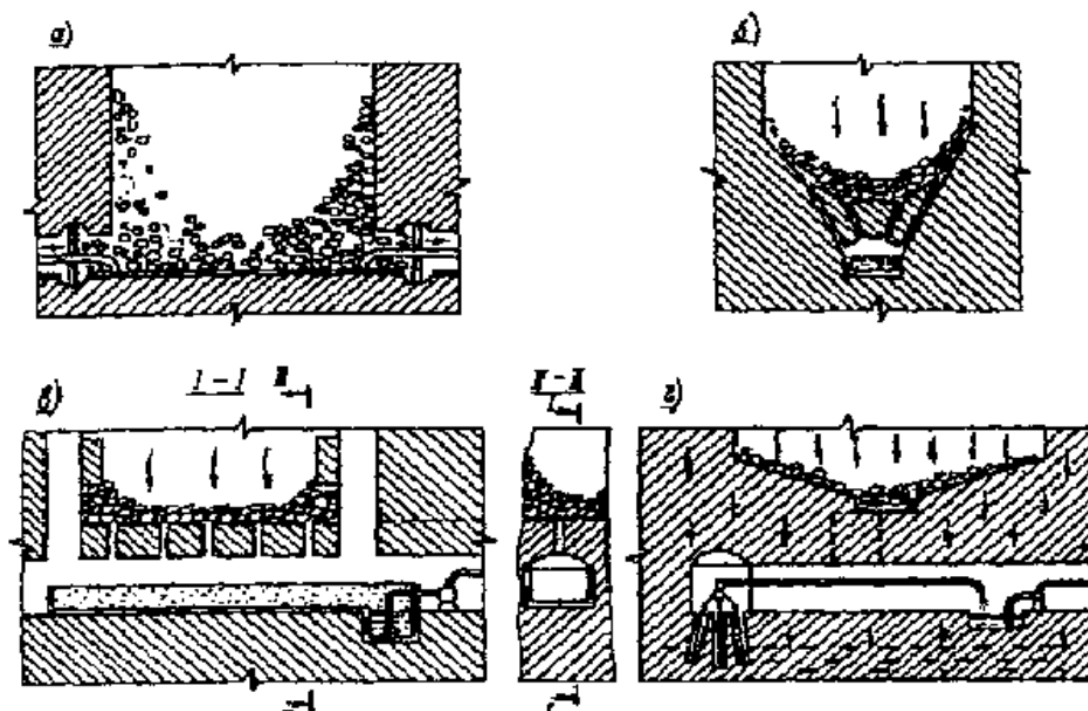


Рисунок 1.10 – Способы улавливания растворов при подземном блочном выщелачивании: а – со сбором растворов в дренажные выработки; б – с помощью дренажных скважин, пробуренных в днище блока из кровли дренажной выработки; в – с дренажной выработкой со слоем мелкодробленной породы на гидроизоляционном слое; г – с дренажными скважинами, пробуренными в почву выработки нижней подсеки под зеркало подземных вод [102]

Рассмотренная на рис. 1.10 технологии изоляции блоков выщелачивания является наиболее надежной, но является весьма трудоемкой, требуя защиты закладочного массива от воздействия агрессивных растворов выщелачивания. Перспективным направлением является изыскание материалов для изоляции, совмещающих функции закладки и гидронепроницаемого кислотостойкого слоя.

Это подтверждается высокой трудоемкостью работ на уран-молибденовом месторождении Восток (Северный Казахстан), где изоляция блоков подземного выщелачивания осуществлялась путем формирования подсечного слоя под уклоном к центру блока, который затем застилался

поливинилхлоридной пленкой, защищенной деревянным настилом и рудной подушкой [68].

В работе [93] предложено 2 метода гидроизоляции раствороприемного днища. Первый метод заключается в укладке на него пластика с засыпкой его слоем песка. Второй метод характеризуется созданием локальных завес под раствороприемным днищем. При обнаружении в нем участков с повышенной трещиноватостью пород их изолируют путем нагнетания в скважины, пробуренные в массив трещиноватых зон с нижнего горизонта горных выработок, твердеющих смесей на основе цемента или растворов синтетических смол.

Авторами [15] в качестве средства изоляции сборного горизонта выщелачивающих растворов предложено использование глиняного слоя, а граница смежного слоя оборудуется железобетонными перемычками (рис. 1.11).

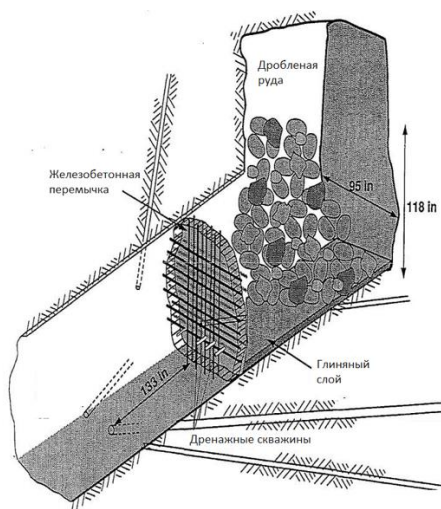


Рисунок 1.11 – Способ изоляции горизонта выщелачивания

В патенте [115] предложена схема формирования блока выщелачивания, где массив полезного ископаемого по высоте блока дробят на куски крупностью, уменьшающейся пропорционально снижению градиента концентраций извлекаемого полезного ископаемого между подовым раствором и общим объемом растворителя, при этом предварительно гидроизолируют днище блока с укладкой на него перфорированных труб и

возводят бетонные перемычки на границе смежных блоков для поблочного сбора и повторного использования продуктивного раствора. Кроме того, азрацию раздробленного массива полезного ископаемого осуществляют через перфорированные трубы для сбора продуктивного раствора. Недостатком способа является применения бетона, требующего использования высоких расходов дорогостоящих кислотостойких цементов. Это указывает на актуальность изыскания альтернативных вариантов изоляции блоков выщелачивания.

На Быкогорском месторождении улавливание продукционных растворов электровакуумными установками позволило ликвидировать трудоемкие работы по гидроизоляции. Опасность боковых утечек технологических растворов предупреждается использованием экранов из веществ, способных к активной полимеризации под воздействием ударных волн (эфиры акриловой или метакриловой кислот) [69].

Во Франции на руднике «Бружо» был успешно проведен опыт по выщелачиванию забалансовой руды в количестве 1200 т в специальном подземном блоке. Для сбора и циркуляции раствора нижний штрек под магазином был перегороден стенкой из бетона, в результате чего образовалась емкость в 100 м³ [95].

Авторами [143] предложен способ подземного выщелачивания забалансовой медной руды Жезказганского месторождения, при котором после выемки компенсационного пространства производится гидроизоляция. В первую очередь бетонируется сульфатостойким бетоном днище блока, а затем боковые стенки компенсационного пространства.

В патенте [113] описывается создание герметичного днища блока и поверхности смежного целика, состоящего из двух слоев. Первый слой представляет собой набрызг-бетон толщиной 300 мм с прочностью не ниже С20. Второй слой - непроницаемая геомембрана, обладающая антикоррозийными свойствами. Процесс начинается с нанесения слоя бетона на поверхность дна и целика, при этом толщина нанесения соответствует

требованиям предварительной прочности целика. Такое покрытие обеспечивает максимальную устойчивость к воздействию химических реагентов выщелачивающих растворов. Однако, нанесение гидроизолирующего покрытия таким способом является весьма трудоемким и небезопасным.

В работе [116] рассмотрено три варианта подготовки днища блоков подземного выщелачивания. Первый – создание гидроизоляционного слоя (на основе пластиката или бетона), но потери раствора всё же достигают 15- 40% за счёт растекания по бортам и по трещинам, минуя гидроизоляционный слой. Другой вариант подготовки днища предусматривает вместо оформления дорогостоящего гидроизоляционного слоя перепуск раствора на нижний горизонт и откачивается из депрессионной воронки на уровне трещинных вод. Третий вариант подготовки днища блока и снижения потерь продуктивного раствора заключается в создании в днище блока пневмобарьера за счёт подачи сжатого воздуха (импульсов высокого давления) в скважины, пробуренные перпендикулярно направлению преобладающих трещин из дренажного штрека до границ предполагаемого ореола растекания раствора, аналогичным образом можно создать и гидрозавесу (заграждение-барраж). Данный способ значительно снизит риск миграции растворов за пределы блока выщелачивания, однако оставление междукammerных целиков определяет высокие потери полезного компонента в них.

В работе [120] предложена следующая схема подготовки камеры при комбинации подземной добычи руд и выщелачивания: после выемки запасов руды сопряженных камер производится их закладка твердеющей смесью на основе отходов выщелачивания. По завершению выемки запасов камер второй очереди производится изоляция их очистного пространства путем установления перемычек в заездах. В этом случае днище камеры на высоту несущего слоя 5 метров заполняется твердеющей смесью на основе отходов кучного выщелачивания и кислотостойкого цемента. После набора прочности днищем камеры его обустривают системой наклонных скважин, веера скважин

располагаются через 5 метров по всей длине камеры. Основными недостатками предложенного способа являются высокие эксплуатационные затраты на возведения кислотостойкого днища размером 15 м × 40 м и высотой 5 м.

Для минимизации перемещения минерально-сырьевых потоков в ходе процессов добычи и интенсивной закладки выработанного пространства при подготовке блоков выщелачивания возможно применение передвижных закладочных комплексов (ПЗК).

В научных исследованиях [83,86,118] рассматриваются факторы и параметры, определяющие возможность использования подземных передвижных закладочных комплексов (ПЗК) в процессе закладочных работ, предложены математические модели для определения оптимального местоположения этих комплексов. Было выявлено, что внедрение технологии использования ПЗК сказывается на рентабельности производства за счет сокращения затрат на строительство капитальных горных выработок, избегая излишних расходов на выдачу на поверхность руды и пород проходки горных выработок. В работах [107,126,128] описаны варианты принципиальных схем компоновки ПЗК (рис. 1.12).

Причем, эффективное применение передвижных закладочных комплексов базируется на применении в качестве компонентов смесей отходов добычи, что достигается путем внутрирудничного разделения потоков в зависимости от содержания полезных компонентов. Богатую руду следует отправлять на поверхность для дальнейшего обогащения, в то время как отходы добычи и руду с низким содержанием целесообразно направлять напрямую к подземному передвижному закладочному комплексу (ПЗК).

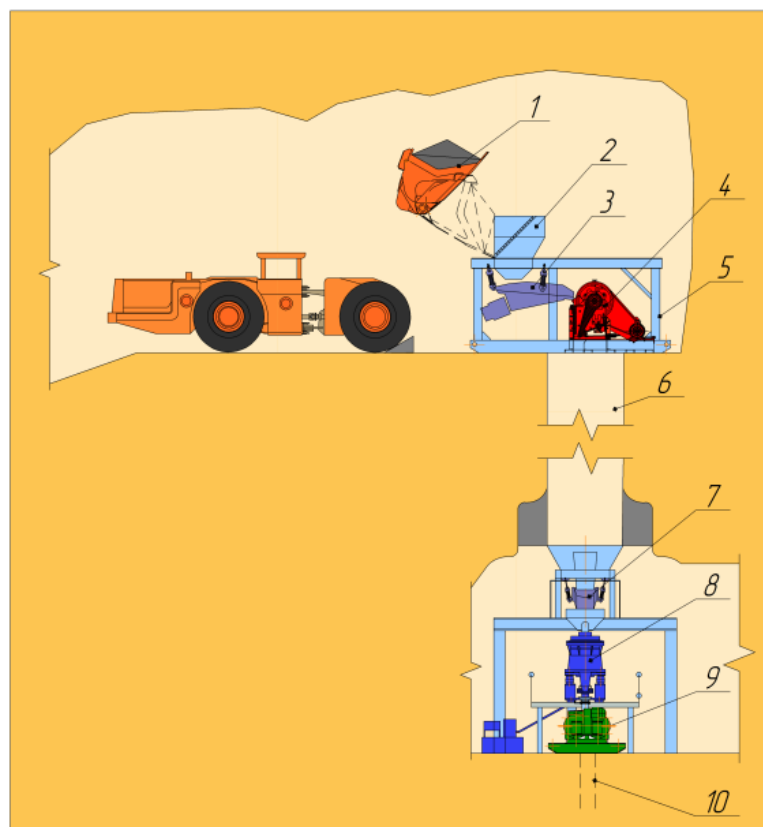


Рисунок 1.12 - Вариант компоновки оборудования подземного передвигного закладочного комплекса модульного типа: 1 – ПДМ; 2 – бункер-дозатор; 3 – питатель; 4 – дезинтеграция 1-й стадии; 5 – рама модуля I стадии дезинтеграции; 6 – породоспуск; 7 – питатель; 8 – дезинтеграция 2-й стадии; 9 – смеситель; 10 – закладочная скважина [127]

В трудах [101,129,147] представлены результаты обоснования требований для предварительного разделения типов руды на сорта по содержанию полезного компонента и выбор наиболее эффективной технологии сепарации техногенно измененных руд Жезказганского месторождения. В ходе исследований были проанализированы различные методы сепарации, такие как оптический (фотометрический), индукционный радиорезонанс, рентгенорадиометрический (рентгено-флуоресцентный) и рентгено-абсорбционный методы. В результате анализа выявлена технология рентгенорадиометрической сортировки с разделением продуктов на ленте конвейера как наиболее предпочтительная, что доказывает возможность применения комплексов внутрирудничной сепарации в режиме реального

времени с выделением потока материала для последующей его закладки в выработанное пространство [66, 119].

Ввиду того, что методом блочного выщелачивания в мире производилось менее 2% всего добытого урана [97] и еще меньше при добыче руд цветных металлов, данные о параметрах технологии и принципах формирования камер весьма ограничены. В значительно большей степени указанная проблема проработана при ведении работ по кучному выщелачиванию (КВ).

Для промышленного применения разработаны и рекомендованы три основных метода возведения изоляции при КВ, отличающиеся между собой организацией основных и вспомогательных работ, конструкцией гидротехнических сооружений промышленного комплекса и характером общеинженерных мероприятий (табл. 1.7) [105].

Таблица 1.7 - Методы изоляции площадок кучного выщелачивания

Параметр	Первый метод	Второй метод	Третий метод
Основные черты	Долговременные площадки многоразового использования	Гидроизоляционные площадки однократного использования	Отвальное выщелачивание с дамбой
Подготовка основания	Устройство высокопрочного гидроизоляционного основания из бетона или асфальта	Подготовка основания для укладки мягких изолирующих покрытий; использование местных глин	Подготовка устойчивого основания для дамбы
Укладка гидроизоляционного покрытия	Укладка твердых гидроизоляционных покрытий для многоразового использования	Укладка мягких изолирующих покрытий (полиэтиленовые, поливинилхлоридные пленки, листовая резина)	Не применимо
Строительство хвостохранилища (при необходимости)	Строительство хвостохранилища для обеспечения пространства для хвостов	Не применимо	Строительство дамбы вокруг укладываемой руды
Дренаж растворов	Не указано	Нет	Да

Данная классификация может быть применена для создания соответствующей классификации методов изоляции при шахтном подземном выщелачивании. Для обеспечения экологической безопасности и предотвращения загрязнения почв и подземных вод в процессе эксплуатации участка кучного выщелачивания принимаются соответствующие природоохранные инженерные меры по гидроизоляции. Одним из таких решений является размещение противифльтрационного экрана в основании штабеля, в некоторых случаях — многослойного противифльтрационного экрана.

Применение указанных методов особенно актуально при осуществлении кучного выщелачивания золоторудных месторождений. Для этого используются два основных вида гидроизоляционных площадок: долговременные площадки многоразового использования и гидроизоляционные площадки одноразового использования. В табл. 1.8 представлен анализ методов возведения гидроизоляционных площадок многоразового и одноразового использования.

Таблица 1.8 - Методы возведения гидроизоляционных площадок многоразового и одноразового использования [105]

Метод возведения гидроизоляционного основания	Материал	Преимущества	Недостатки
Глиняные экраны	Природные материалы (глина)	Низкая проницаемость	Трудоемкость возведения Ограниченное применение из-за сложности строительства и природно-климатических факторов
ПФЭ из полимерных материалов	Полимерные мембраны (ПНД, ПВД, LLDPE, EPDM, ПВХ-PVC)	Сокращение сроков строительства Уменьшение объема материаловозатрат	Не полностью водопроницаемы: Возможность нарушения целостности гидроизоляции из-за различных факторов Ограничения при низких температурах и влажных условиях монтажа

Продолжение таблицы 1.8

Бентонитовые маты	Бентонит-содержащие геосинтетические материалы	Не требуют сварки швов: Укладка внахлест с просыпкой гранулами бентонита Эффективность при высоких и низких температурах: не подвержены ограничениям в применении в различных климатических условиях	Неустойчивость к механическим повреждениям
--------------------------	--	--	--

Анализ известных способов предотвращения растекания продуктивных и маточных растворов при блочном и кучном выщелачивании показал необходимость создания более материалоемких и экономически эффективных методов гидроизоляции, причем, условия протекания процессов выщелачивания в подземных условиях определяют дополнительные требования к свойствам изоляционных конструкций -газо и термостойкость, а также устойчивость к агрессивным средам. Причем, включение в состав смесей для формирования изолирующих конструкций пустых пород позволит в значительной степени повысить привлекательность технологии за счет снижения объемов рудной массы, выдаваемой на поверхность.

1.4. Перспективные идеи в области создания изолирующих материалов и конструкций на основе твердеющих массивов с заданными свойствами

Известно, что в природных условиях невозможно встретить полностью водонепроницаемых и химически стойких монолитных массивов горных пород, в связи с чем встает необходимость в формировании специальных горнотехнических конструкций на основе искусственных материалов в выработанном подземном пространстве для эффективного применения физико-химической геотехнологии. Следует отметить, что в настоящее время обоснование составов смесей для формирования различных горнотехнических конструкций при различных вариантах систем разработок основывается, в

первую очередь, на требованиях формирования заданной прочности, приемлемой стоимости возведения искусственного массива, достаточного времени для достижения требуемых прочностных характеристик материала. В меньшей степени в литературе уделяется внимание химической и термостойкости закладочных материалов, газонепроницаемости и иным свойствам, необходимым для надежного течения процессов выщелачивания в подземных условиях.

Возведение изолирующих конструкций в выработанном подземном пространстве широко известно в мировой практике в качестве основного защитного барьера в условиях захоронения отработанного ядерного топлива, способного снизить уровень радиационного воздействия в зоне его хранения [98].

В данном направлении разработаны подходы для обеспечения долговременной изоляции радионуклидов с высоким периодом полураспада, превышающим тысячи лет в пунктах глубинного захоронения радио активных отходов (ПГЗРО). Этот процесс требует дополнительной защиты от внутреннего разрушения и воздействия внешних факторов [77,89,90].

Основные требования к материалам защиты включают химическую стойкость, гидроизоляцию, высокую адгезию к бетону и металлам, а также возможность технологичного нанесения. В данном контексте полиэтилен и полипропилен представляют собой оптимальные варианты, так как они обладают химической инертностью, водостойкостью и доступны по стоимости.

В работах [132,133] исследовались возможности формирования твердеющей закладки на основе отходов переработки урановых руд, направленной на снижение эманирования радона, с использованием цементных связующих (ПЩ 400 ДО) до 10% и золы в количестве до 50%. Для обеспечения подвижности и удобства транспортировки использовались добавки, позволяющие достичь прочности на сжатие до 1,6 МПа.

В трудах [134,136] рассмотрены полимерные композиты, предназначенные для создания защитных антикоррозионных покрытий на поверхности бетонных и стальных конструкций, которые могут контактировать с водой, кислотами, щелочами, солями, ПАВ и биологическими соединениями. Эти композиты обладают стабильностью в условиях резких изменений влажно-температурных условий и обеспечивают высокую степень электрической изоляции. Также рассмотрены возможности применения других полимерных покрытий, таких как эпоксидные, полиолефиновое и полиуретановые. Сравнительная таблица с характеристиками покрытий приведена ниже.

Таблица 1.9 - Сравнительные эксплуатационные характеристики полимерных покрытий [78]

Покрытие Показатели	Полиуретановое	Эпоксидное	Полиолефиновое (ПЭ, ПП)
Химическая стойкость	Снижена стойкость к щелочам, не стойки в органических растворителях	Высокая стойкость общекилотная, углекислотная, сульфатно-хлоридная, щелочная, нефтехимическая, электрохимическая, водо(паро)непроницаемость	
Температура эксплуатации	(50...30)..+(80...120)°С	-60...+ (60...100)°С	(60...30)...+ (60...80)°С
Возгораемость	Горят при контакте с открытым пламенем		
Дымообразование	Высокое	Высокое, с копотью	Низкое
Токсичные продукты окисления/горения	Угарный газ, цианистый водород, пары изоцианата	Угарный газ, эфирные, фенольные, аминные соединения	Угарный газ. Возможны формальдегид, ацетальдегид
Трещиностойкость к удару	Высокая	Хорошая	Высокая (ПЭ), хорошая (ПП)
Температура ухудшения электросопротивления	≥40	Данные отсутствуют	>80°С
Скорость эрозии при воздействии ВЧ-травления	Скорость эрозии/окислительно деструкции увеличивается в ряду ПЭ<ПП<ЭП<ПУ		
Время от нанесения до начала эксплуатации	24 часа	Не менее 48 часов	24 часа

Основной состав покрытия включает полиэтилен в объеме 80—90%, формируя тем самым основную массу материала. Дополнительные 10—20%

представляют функциональные добавки, такие как пигменты, стабилизаторы, наполнители и компатибилизаторы. Эти добавки играют ключевую роль в улучшении адгезивных и прочностных свойств композитов, а также обеспечивают их стойкость в течение времени.

Сложность технологии производства заключается в необходимости смешивания полимера с функциональными добавками при высокой температуре, получения гранул сложного состава, измельчения до порошка и последующее напыление на поверхности бетона или металла в один или несколько слоев. Толщина покрытия может варьироваться в пределах 1–5 мм.

Основными преимуществами этих композитов являются надежная гидроизоляция, хорошая адгезия с бетоном и металлами, а также простота технологии нанесения (табл. 1.10). Эти качества делают композиты эффективными для применения в целях увеличения сроков изоляции модульных сооружений пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО), таких как поверхности стен, перекрытий, днища, а также бетонных и металлических контейнеров с радиоактивными отходами. Однако, для условий блочного выщелачивания применение таких способов нецелесообразно ввиду их высокой стоимости и низкой безопасности проведения работ.

Таблица 1.10 - Преимущества и недостатки применения композитов для изоляции пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППРЗО)

Применение композитов для изоляции ППРЗО	
Недостатки	Преимущества
Смешивание и обработка компонентов	Надежная гидроизоляция
Получение гранул сложного состава	Хорошая адгезия с бетоном и металлами
Измельчение до порошка	Простота технологии нанесения

Помимо гидроизоляции выработанного пространства для захоронения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) предлагается возводить монолитные закладочные массивы для их захоронения. Так, авторами работ [90] предложен метод использования

глубоких камер подземных рудников для захоронения РАО 2 и 3 классов. Он включает в себя изоляцию контейнеров с помощью материалов переработки урановых руд, образующих высоко радиационностойкую пастовую закладку, а также укрепление трещиноватых пород в монолитные конгломераты через инъекционное упрочнение. Конструкция таких камер приведена на 1.13.

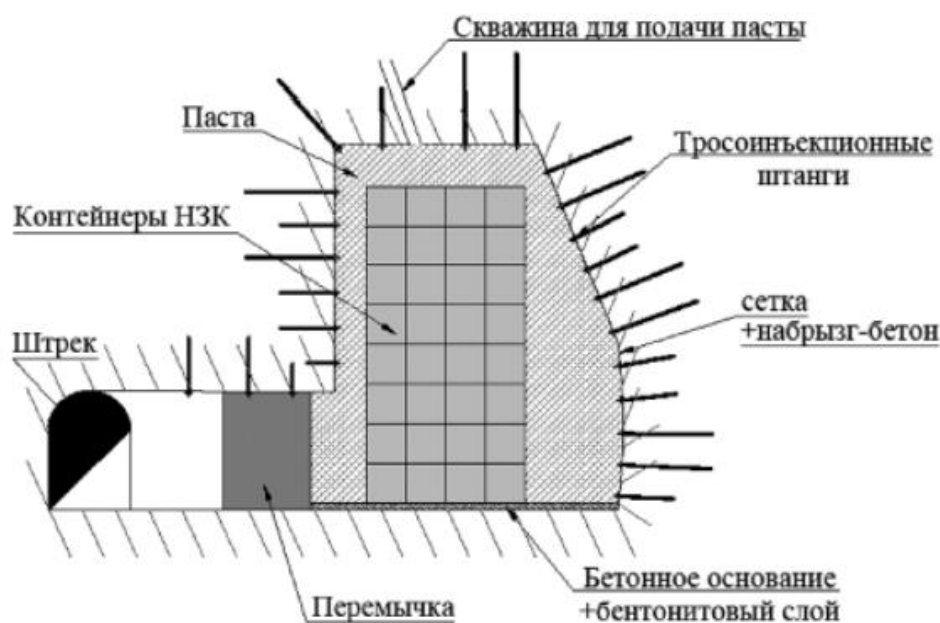


Рисунок 1.13 - Конструкция камеры захоронения контейнеров НЗК-150-1,5П с РАО 2 и 3 классов с заполнением пустот пастовой закладкой.

Предполагается размещение радиоактивных отходов (РАО) в камерах урановых рудников через создание четырех изолирующих барьеров, таких как:

1. Основные изоляционные барьеры - контейнеры из металла или железобетона.
2. Пастовая закладка, заполняющая пустоты между стенками камер и контейнерами. Основана на материалах из переработки урановых руд (РАО 6 класса) и с добавлением флокулянтов и упрочняющих добавок (цемент, зола уноса, песчано-гравийная смесь (ПГС), дробленая порода).
3. Укрепление стен и кровли камер инъекционными составами для их упрочнения.

4. Размещение РАО на глубине до 1000 метров и более: в массиве налегающих пород, таких как граниты, фельзиты, конгломераты и другие горные образования.

Несомненный интерес представляют минеральные вяжущие, получаемые в ходе щелочной активации алюмосиликатного сырья природного и техногенного происхождения ввиду доступности исходных материалов и возможности включения в состав отходов производств [124].

В 1957 г. профессором В.Д. Глуховским были разработаны бесцементные шлакощелочные вяжущие и бетоны [67]. Вяжущие щелочной активации состоят из двух компонентов: щелочного активатора твердения и цементирующего минерального порошка, который может быть представлен доменным гранулированным шлаком, пуццоланом, смесью известь-пуццолан/шлак, алюминатами кальция и портландцементом с минеральной добавкой [79]. В результате гидратации раствор взаимодействует со шлаком в следствие катионного обмена между растворенной солью и окисью кальция, содержащейся в шлаке. Щелочи, содержащиеся в шлакощелочном вяжущем, из катализатора превращаются в компонент вяжущего, в результате чего в составе гидратных новообразований, наряду с гидросиликатами кальция в значительных количествах, кристаллизуются щелочные гидроалюмосиликаты, участвующие в синтезе прочности бетона (рис. 1.14) [91].

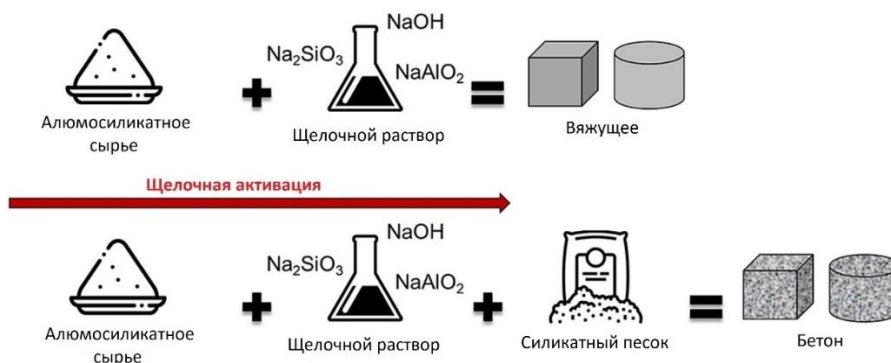


Рисунок 1.14 - Схематическое изображение цепочки производства щелочноактивированных материалов [48]

Результаты научных исследований, появившихся за последние несколько лет, указывают на то, что корректно подобранный состав щелочноактивированного вяжущего приводит к созданию прочных и долговечных строительных материалов [9,27,31,39], однако производство щелочноактивированных бетонов связано с использованием едких щелочей, низкомодульных растворимых силикатов и других опасных компонентов, что ограничивает возможность применения его в подземных условиях. Кроме того, в ходе протекания реакции щелочной активации катионы K^+ или Na^+ не соединены химически и не зафиксированы физически в структуре получаемого материала, что влечет за собой их свободное движение и возможность формирования свободной щелочности KOH или $NaOH$, которая проявляется в виде высолообразования на поверхности образца (рис. 1.15) [14], которая свидетельствует о возможности вымывания их водной или кислотной средой.



Рисунок 1.15 - Высолообразование на поверхности шлакощелочного бетона [73]

Указанных недостатков лишены другие минеральные вяжущие, применяемые для производства композиционных материалов и изделий, - геополимеры, поскольку в продолжение щелочной активации происходит

формирование трехмерной структуры с повторяющимися атомами кремния и алюминия (рис. 1.16) [38].

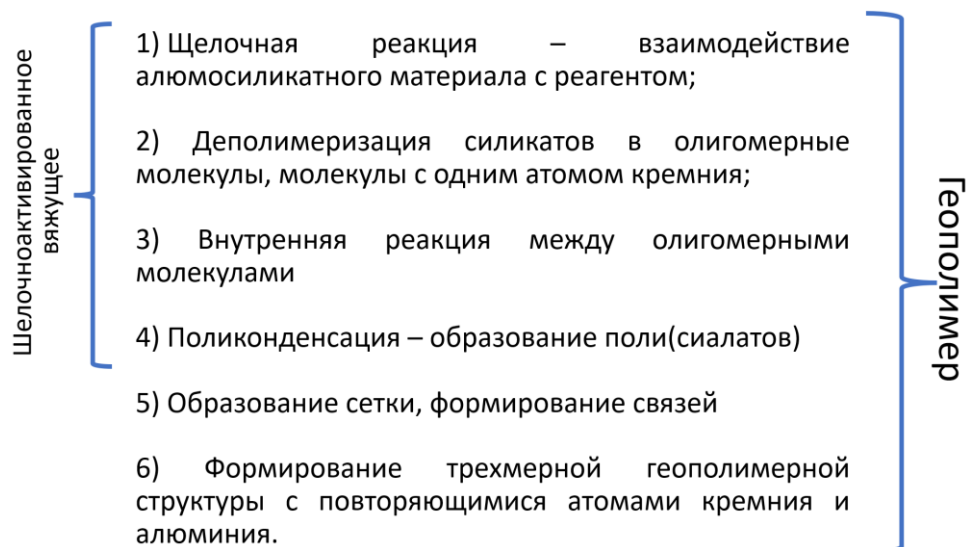


Рисунок 1.16 - Механизм протекания процесса геополимеризации с формированием трехмерной структуры

Термин геополимеры был введен Джозефом Давидовицем в начале 1970-х годов для описания неорганических материалов, получаемых в результате химической реакции алюмосиликатных оксидов с щелочными силикатами с образованием полимерных связей Si-O-Al [13]. Сеть состоит из тетраэдров SiO₄ и AlO₄, связанных попеременно общим кислородом. Al³⁺ в 3D структуре требует присутствия в каркасе катионов для уравнивания отрицательного заряда. Согласно Давидовицу [12], эмпирическая формула геополимеров, известных также как поли(сиалаты), имеет вид согласно уравнению:



где M - катион, например K⁺, Na⁺ или Ca²⁺; n - степень поликонденсации, z - 1, 2 или 3. Могут присутствовать и другие катионы, такие как Li⁺, Ba²⁺, NH⁴⁺ и H₃O⁺ [24].

Учитывая физические характеристики конечного продукта, геополимеризация стала перспективной технологией, предлагающей привлекательные возможности для коммерческого применения, а именно: быстрое затвердевание, высокую и раннюю прочность на сжатие,

оптимальную кислотостойкость и долговечность [11]. Синтез геополимерных матриц оказался оптимальным и целесообразным вариантом стабилизации некоторых металлических и радиоактивных отходов [17,19,20] или промышленных сточных вод [46].

Физические, химические, механические, гидравлические и термические свойства геополимеров напрямую зависят от сырья, из которого они были получены [16]. Значительные исследовательские усилия в области совершенствования состава и реологических свойств материалов позволили эффективно применять в качестве прекурсоров реакции получения геополимеров золу-уноса, [28,51], доменный шлак [6, 49], шлаки цветной металлургии [4], измельченные отходы производства натриевого стекла [2], отработанную футеровку электролизеров производства алюминия [35], метакраин, различные типы горных пород, вулканические агломераты, кремнеземы и др.

Ключевыми параметрами, влияющими на ценность сырья как исходного материала для формирования геополимеров, являются содержание активных оксидов кремния и алюминия, Fe_2O_3 и CaO , а также содержание стекловидной фазы и гранулометрический состав. Отношение кремния к алюминию является решающим фактором, влияющим на формирование геополимерной структуры и области его применения [52].

Использование в составе таких высокореактивных некальцированных материалов как летучая зола и метакраин в значительной степени позволяет увеличить прочность получаемых на их основе геополимерных материалов [47]. Так, в работе [50] отмечено, что с увеличением содержания метакраина с 0 до 50% прочность на сжатие увеличилась с 2 до 15,5 МПа за счет образования большего количества гидратационных гелей [37], это связано с тем, что введение некальцированных добавок позволяет варьировать соотношение Si/Al в исходном сырье для достижения оптимальных значений [41].

Свойства полученного геополимера также в значительной степени зависят от условий его приготовления, таких как температура отверждения, концентрация и тип щелочи, а также соотношение вода/твердое вещество. Жидкий реагент для приготовления геополимера условно состоит из двух компонентов, а именно щелочи: NaOH , KOH , Na_2CO_3 и K_2CO_3 , и силикатного затворителя, такого как Na_2SiO_3 и K_2SiO_3 [53], оптимальное сочетание которых обеспечивает требуемые эксплуатационные характеристики получаемых геополимерных материалов.

Первоочередной проблемой, мешающей широкому распространению геополимеров в строительной практике, является высокая стоимость силиката натрия, используемого для его приготовления. За рубежом, в Европе и в Китае получило развитие новое направление производства дешевого жидкого стекла, которое состоит в использовании отходов добычи калийных солей и рисовой шелухи, что позволяет на порядок снизить стоимость его производства. Объединяя два продукта с помощью низкотемпературного гидротермального метода, получают растворимый технический силикат натрия, который применяется для производства геополимеров.

1.5. Цель, задачи и методы исследований.

В ходе аналитического обзора определено, что привлекательность технологии шахтного подземного выщелачивания, которая позволяет обеспечить возможность извлечения ценных компонентов из руд, исключая высокие затраты на транспортирование рудной массы на поверхность, а также вовлекать в разработку многомиллионные запасы некондиционных руд, возрастает. Определены недостатки технологии шахтного подземного выщелачивания, к которым, в первую очередь, отнесена высокая экологическая опасность технологии – риск миграции растворов за пределы блоков выщелачивания, требующая изоляции блоков выщелачивания. Также

технология связана с высокими потерями руд в ограничивающих целиках и сложностью управления гранулометрическим составом рудной массы при взрывной подготовке блоков. Наиболее привлекательными являются технологии подземного выщелачивания в камерах второй очереди. Данное направление – многофункциональное использование выработанного пространства при переходе от одной технологии к другой следует учитывать при обосновании технологий шахтного подземного выщелачивания.

Несмотря на определенную в ходе выполненного анализа литературы привлекательность технологии выщелачивания руд в камерах второй очереди, образованных после выемки богатых руд системами с твердеющей закладкой выработанного пространства, среди требований к закладочным смесям и массивам отсутствуют такие, которые отвечают требованиям к технологии шахтного подземного выщелачивания. Такие требования, ввиду агрессивных растворов выщелачивания, должны определяться дополнительно. При этом определено, что для формирования искусственных массивов наиболее привлекательным исходным компонентом закладочных смесей являются отходы добычи руд – породы от проходки выработок. Это необходимо учитывать при выборе материалов для создания камер выщелачивания и их изоляции в целях повышения экологической безопасности данной технологии.

Выявлен фактор риска технологии блочного подземного выщелачивания - обрушения днищ блоков камер выщелачивания, ввиду разупрочнения слабых неустойчивых пород агрессивными растворами. Это указывает на необходимость изыскания решений, направленных на изоляцию днищ блоков выщелачивания в случае реализации технологий шахтного подземного выщелачивания.

Установлено, что работы по гидроизоляции днищ блоков выщелачивания являются наиболее трудоемкими, но необходимыми. Решение вопросов управляемого подземного выщелачивания будет способствовать развитию этой прогрессивной технологии.

Различие способов изоляции выработанного пространства камер выщелачивания определяет перспективу развития классификации способов изоляции, которая, в зависимости от риска миграции растворов в окружающую среду, разрушения горнотехнических конструкций и других направлений будет способствовать выбору направлений создания изолирующих конструкций.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изыскание технологий изоляции камер выщелачивания, снижающих рассмотренные выше риски реализации технологии. Это позволит снизить экологическую опасность и обеспечить выполнение требований промышленной безопасности.

В связи с высокой агрессивностью выщелачивающих растворов к бетонам, высокой стоимостью кислотостойких цементов и иных добавок, перспективной задачей является изыскание геотехнологических решений по возведению изолирующих конструкций подземных блоков выщелачивания на основе обоснованного выбора новых доступных материалов, преимущественно, на основе отходов производства – пород от проходки выработок, зол ТЭЦ, отходов гидрометаллургического производства. Это определило выбор направления исследований и позволило сформулировать идею работы, приведенную во вводной части диссертации, связанную с изучением параметров технологии изоляции подземных камер для последующего выщелачивания в них руд цветных металлов на базе формирования горнотехнических конструкций на основе новых геополимерных материалов.

В соответствии с вышеизложенным, целью работы является обоснование параметров технологии изоляции камер подземного сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов и состава геополимерных материалов, используемых при формировании изолирующих конструкций, обеспечивающих повышение полноты освоения недр и выполнение требований промышленной и экологической безопасности.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением ряда научно-практических задач:

- анализ современных подходов к проектированию и реализации геотехнологий, предусматривающих сочетание подземной добычи руд и выщелачивания;
- поиск путей и обоснование параметров технологии изоляции камер для подземного выщелачивания в них руд цветных металлов на основе научно обоснованного выбора геополимерных материалов, характеризующихся требуемыми прочностными, гидро-, термо-, кислотостойкими свойствами;
- исследование закономерностей формирования технологических свойств геополимеров на основе отходов производства и обоснование последовательности технологических процессов, обеспечивающих достижение требуемых свойств;
- обоснование параметров технологии формирования изолирующих конструкций камер для сернокислотного выщелачивания в них руд цветных металлов с обеспечением требований промышленной и экологической безопасности;
- разработка технологических рекомендаций, оценка риска технологии шахтного подземного выщелачивания с разработкой мероприятий, компенсирующих повышенный риск реализации физико-химической геотехнологии.

Решение поставленных задач базируется на комплексировании методов исследований. Среди первоочередных - анализ состава и условий залегания вмещающих пород медно-колчеданных, медно-никелевых месторождений Южного Урала, свинцово-цинковых Северного Кавказа и других, для выявления вмещающих пород, потенциально пригодных для производства геополимерных смесей. Оптико-минералогические исследования, направленные на оценку текстуры вмещающих пород проведены с использованием микроскопа OlympusBX 51 с программным комплексом «Минерал С7» для анализа изображений на основе методических

рекомендаций НСОММИ ФНМЦ ВИМС. Минеральный состав вмещающих пород определялся методом порошковой рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра XRD-6000 («SHIMADZU») с Cu-анодом. Количественный химический анализ осуществлялся с использованием фотометрических, титриметрических и гравиметрических методов по стандартным нормативным методикам НСАМ ФНМЦ «ВИМС». Прочность материала на одноосное сжатие определялись согласно ГОСТ 10180—2012 с использованием лабораторного гидравлического пресса Instron с программным обеспечением Instron Bluehill Universal; по результатам испытания рассчитывался модуль деформации при одноосном сжатии. Химическая стойкость оценивалась путем измерения прочности на одноосное сжатие до и после погружения образцов в агрессивные среды в динамике, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58896-2020, водопоглощение по ГОСТ 12730.3-2020. Термостойкость определялась сопоставимыми испытаниями образцов на одноосное сжатие до и после термического воздействия до 600⁰С.

Учитывая высокий риск реализации технологии подземного выщелачивания, расчет фактора риска реализации технологии и разработка компенсирующих мероприятий выполнены с использованием методологии многоуровневой оценки риска в соответствии с руководством по безопасности "Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах", утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 ноября 2022 г. N 387.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД И ШАХТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

2.1. Концептуальные решения технологии подземного выщелачивания руд цветных металлов в изолированных камерах

В условиях истощения минерально-сырьевой базы комплексное освоение георесурсов разрабатываемых и разведываемых месторождений становится задачей первостепенного значения. Как было отмечено в 1 главе, увеличение глубины разработки и снижение содержания полезных компонентов в руде предопределяет развитие геотехнологий, исключающих выдачу на поверхность многомиллионных объемов горной массы. Выполненный в главе 1 анализ показал, что наиболее перспективным решением указанной проблемы является применение в комбинации с подземной добычей физико-химических методов, позволяющих вовлекать в разработку руды, нерентабельные для переработки на обогатительной фабрике. Кроме того, установлено, что подземное блочное выщелачивание предусматривает выдачу на поверхность только продуктивных растворов, сокращая тем самым площади размещения отходов и затраты на их транспортировку.

Анализ систем подземного выщелачивания и конструкций блоков позволил выявить ряд проблем, решение которых в значительной мере будет способствовать расширению области применения технологии, повышению ее экологической и эффективности и промышленной безопасности. Применение физико-химических методов добычи полезного ископаемого, основанных на переводе их в жидкое состояние, связано в первую очередь с высокой экологической опасностью, ввиду риска неконтролируемой миграции растворов в окружающую среду с подземными водами. Другой характерной особенностью традиционно применяемой в мировой практике технологии

подземного блочного выщелачивания является высокий риск потерь ценных компонентов как в оставляемых целиках, так и при утечке продуктивных растворов.

Меры, направленные на повышение эффективности технологии, должны базироваться на достижении в подземном пространстве условий, максимально приближенным к условиям кучного и даже чанового выщелачивания с обеспечением изоляции рабочего пространства и обеспечением целостности горнотехнических конструкций, исключающих растекание растворов за пределы выемочных участков и разупрочнение возведенных искусственных массивов. Сложность реализации такой технологии связана с практической невозможностью обеспечения требуемых условий в случае формирования блоков выщелачивания «in-situ» взрывным способом ввиду природных и техногенных факторов, рассмотренных в 1 главе.

Основные требования к технологическим характеристикам искусственных массивов, ограничивающих камеры подземного выщелачивания представлены на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - Требования к свойствам искусственных массивов для реализации технологии подземного выщелачивания

Прочностные свойства элементов горных конструкций определяются дифференцированно на основе оценки напряженного-деформированного состояния массива горных пород. Наиболее ответственной конструкцией с позиции блочного выщелачивания является днище блока ввиду постоянного

разрушающего воздействия агрессивных растворов и размещаемой в камере рудной массы. Дополнительное негативное влияние на устойчивость конструкции днищ оказывают дренажные выработки, проводимые с целью организации сбора продуктивных растворов. Установлено, что нормативная прочность массива днища блока (прочность при одноосном сжатии), необходимая для обеспечения его устойчивости и безопасности ведения горных работ должна составлять 7,8 МПа [106]. Выполнение данного условия может обеспечиваться применением традиционных цементных закладочных материалов, однако такие материалы не отвечают ряду требований, предъявляемых технологией подземного выщелачивания. Использование для извлечения ценных компонентов агрессивных кислотных или щелочных растворов обуславливает необходимость создания химически стойких и растворонепроницаемых конструкций. В соответствии с ГОСТ Р 58895–2020 под химической стойкостью понимается свойство материала или изделия выдерживать воздействие химически агрессивных сред без недопустимого ухудшения практически важных свойств [71]. В условиях реализации технологии блочного выщелачивания к практически важным свойствам целесообразно отнести растворонепроницаемость и прочность массива, формирование которых невозможно с использованием закладочных смесей на бетонной основе.

Риск саморазогрева сульфидных руд определяет важное требование обеспечения термостойкости изолирующих конструкций [125]. Действительно, реализация подземного блочного высокотемпературного выщелачивания, а также гипотетически, окислительного обжига, определяется, в том числе, возможностью создания условий его безопасного протекания на основе создания термостойких и газонепроницаемых ограничивающих массивов.

Причем, выполненный аналитический обзор методов изоляции камер выщелачивания и оценку современных технологических возможностей, включая применение дистанционного оборудования для доступа в подземные

камеры позволил предложить классификацию способов изоляции подземных камер. Классификация возможных способов изоляции рабочего пространства при реализации комбинированной технологии подземной добычи и выщелачивания представлена в табл. 2.1. Первый класс предусматривает изоляцию рабочего пространства камеры путем возведения искусственных массивов – днищ, смежных конструкций и потолочин камеры. Следующим методом является формирование защитных оболочек путем заблаговременного создания защитного слоя на ранее возведенном днище требуемой прочности, инфузионного возведения маломощных конструкций для защиты смежных блоков и набрызга изолирующего материала в дистанционном режиме. Изоляция всего участка выщелачивания обеспечивается путем создания сплошных завес и барражных скважин. Тампонаж применяется для заполнения локальных водопроводящих трещин и зон нарушенности массива. Так, эффективная реализация технологии подземного блочного выщелачивания возможна лишь при изоляции рабочего пространства камеры оптимальным для конкретных горно-геологическим и гидрогеологическим условиям способом или обоснованным сочетанием.

Проведенный анализ материалов и конструкций с заданными свойствами показал, что существующие сегодня материалы либо частично отвечают указанным требованиям, либо обладают весьма высокой стоимостью, делающей технологию подземного выщелачивания нерентабельной. Кроме того, выбор материала должен быть обусловлен, кроме прочего, возможностью снижения объемов выдаваемых на поверхность отходов за счет утилизации их в выработанном пространстве недр.

Таким образом, необходим поиск соответствующих композитов из доступных местных материалов и отходов производства с целью формирования в выработанном пространстве подземного рудника изолирующих оснований камер для подземного выщелачивания, характеризующихся требуемыми прочностными, гидро-, термо-, кислотостойкими свойствами.

Таблица 2.1 - Классификация способов изоляции подземных камер выщелачивания

Класс	Способ изоляции	Группа		Способ реализации
I	Возведение искусственных массивов	1.1	Возведение изолирующего днища	Возведение устойчивых конструкций в днище камеры на основе изолирующего материала
		1.2	Возведение непроницаемых конструкций в смежных блоках	Создание в смежных камерах искусственных конструкций на основе изолирующего материала
		1.3	Возведение изолирующих потолочин	Заблаговременное возведение устойчивых конструкций на основе изолирующего материала
II	Формирование защитных оболочек	2.1	Возведение защитного слоя в основании камеры	Создание защитного слоя на ранее возведенном днище требуемой прочности
		2.2	Инфузионное возведение маломощных конструкций для защиты смежных блоков	Заблаговременное возведение изолирующей стенки на контакте с обрабатываемой камерой
		2.3	Набрызг изолирующих материалов на смежные конструкции	Обеспечение набрызга изолирующего материала в камере в дистанционном режиме
III	Создание завес	3.1	Сплошная завеса	Создание искусственных конструкций, обеспечивающих изоляцию всего участка
		3.2	Бражные скважины	Создание заполнения, путем заполнения пробуренных скважин изоляционным материалом
IV	Тампонаж	4.1	Тампонаж локальных водопроводящих трещин	Нагнетание через специальные скважины и шурфы быстротвердеющих растворов для заполнения пустот и трещин в горных породах
		4.2	Тампонаж зон нарушенности массивов	Нагнетание через специальные скважины и шурфы быстротвердеющих растворов для заполнения пустот и трещин в горных породах
V	Комбинированный	5.1	Сочетание двух и более способов изоляции, определяемых гидрогеологическими и горно-геологическими условиями участка месторождения и принятой технологией выщелачивания	

Как показал анализ в разделе 1.4 в наибольшей степени указанным требованиям отвечают геополимерные материалы, получаемые из отходов добычи и подземной сепарации. Причем, еще на стадии проектирования должна обеспечиваться дифференциация вмещающих пород месторождения в зависимости от требований к искусственным массивам для подземного выщелачивания, и, следовательно, исходным материалам [62].

Кроме того, требуется совершенствование существующих принципов проектирования горнотехнических систем, включающих подземное выщелачивание, которое должно базироваться на принципах комплексного освоения георесурсов в замкнутом цикле с исключением необходимости выдачи на поверхность бедных и забалансовых руд. Обеспечение указанных результатов достигается путем применения комбинированной геотехнологии, основанной на многофункциональном использовании выработанных пространств подземных камер при возможности изоляции их от вмещающих пород непроницаемыми конструкциями (рис. 2.2) [111]. Здесь реализуется загрузка сырья требуемой крупности, организована подача, сбор и циркуляция выщелачивающих растворов и отвод отходящих газов.

В геотехнологическом плане камера для подземного выщелачивания выполняется в виде горнотехнической конструкции, включающей стенки на основе твердеющей смеси состава А, упрочненное днище на основе твердеющей смеси состава Б, обустроенное веерами скважин для подачи газов и отвода растворов (рис. 2.3).

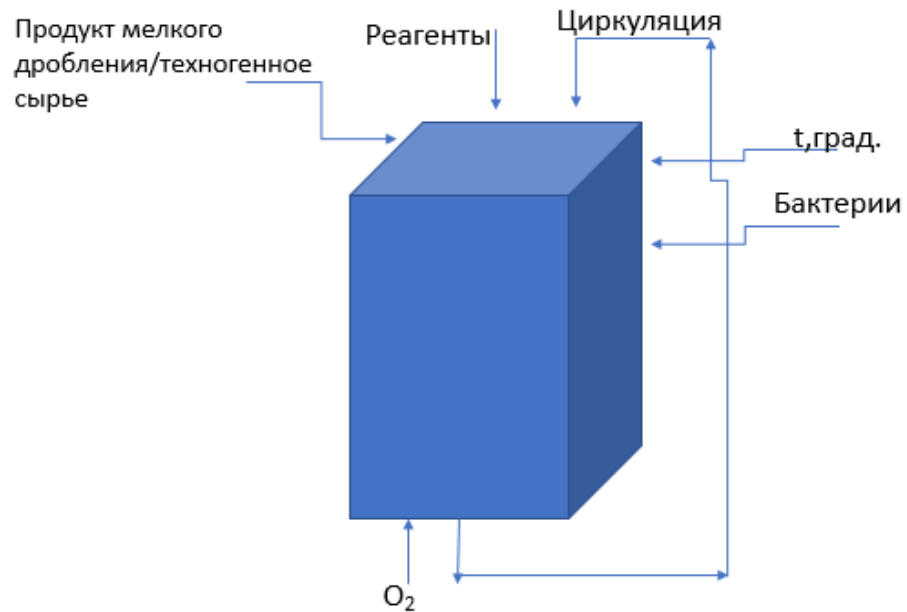


Рисунок 2.2 - Принцип организации выщелачивания в подземном пространстве, исключая взаимосвязь блоков выщелачивания с окружающей средой

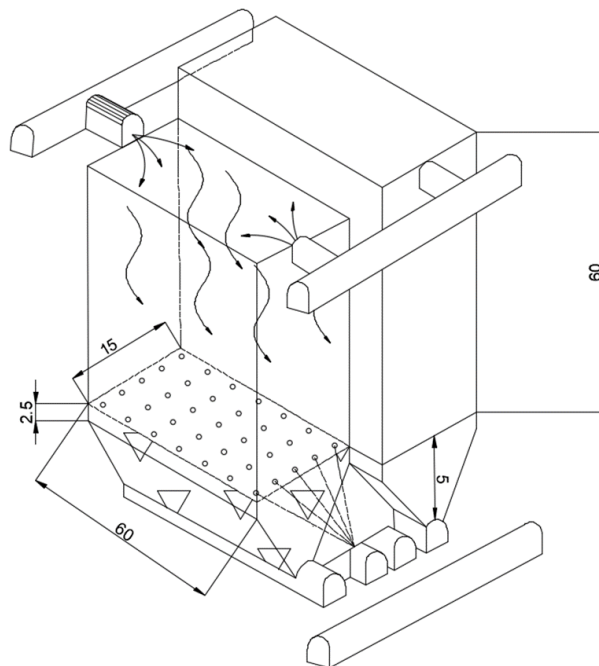


Рисунок 2.3 – Пример конструктивного оформления загружаемых камер высотой 60 м, шириной 15 м и длиной 60 м для подземного выщелачивания руд на мощных рудных месторождениях

Создание в недрах в ходе подземной разработки месторождений камер для выщелачивания при этом обеспечит все условия для эффективной

переработки бедных руд, не кондиционных по экономическим условиям (например, добыча на глубоких горизонтах), либо труднообогащаемых.

Получение необходимой крупности загружаемого сырья обеспечивается путем взрывной отбойки некондиционных руд и их дроблением в руднике на передвижных комплексах дробильного оборудования. Дробленое сырье требуемой для выщелачивания крупности подлежит загрузке в подготовленные камеры путем перепуска с вышележащего (вентиляционно-закладочного) горизонта.

В систему управления качеством рудопотоков рудника при реализации данной технологии возможно включение комплекса внутрирудничной сепарации, основанного на репрезентативном элементном анализе транспортируемой руды в ковше или потоке в режиме реального времени [22,24,33,42]

В ходе многостадийной сепарации формируются следующие потоки: богатая руда, направляемая на поверхность для переработки на обогатительной фабрике; бедная руда, загружаемая в камеру для последующего выщелачивания; вмещающие породы, используемые для создания материалов с требуемыми свойствами; вмещающие породы, не пригодные для использования (рис. 2.4).

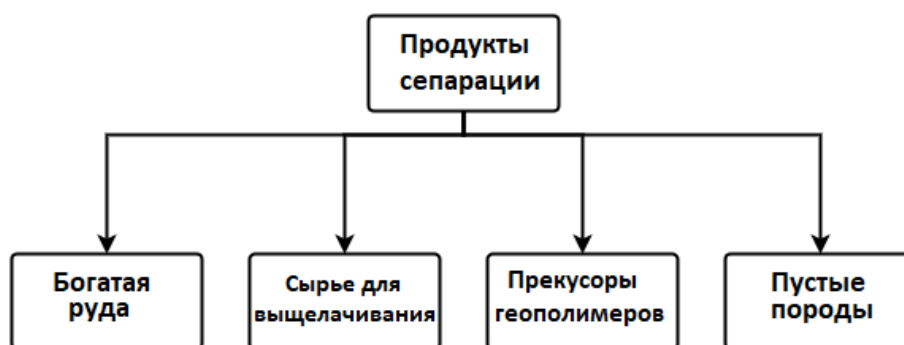


Рисунок 2.4 - Минерально-сырьевые потоки, формируемые в ходе многостадийной подземной сепарации

Для реализации указанных требований потребуется разработка комплексной методологии подбора состава соответствующих материалов из

доступных местных материалов и отходов производства, формирования свойств техногенных массивов и обоснования последовательности технологических процессов для достижения указанных свойств.

2.2. Методики оценки вещественного состава некондиционных руд и вмещающих пород для возведения на их основе изолирующих оснований камер для подземного выщелачивания

Для проведения работ по обоснованию и выбору изолирующих конструкций на геополимерной основе были специально разработаны программа и соответствующие методики исследований, включающие:

- исследование вещественного состава вмещающих пород месторождений для оценки возможности формирования на их основе геополимерных материалов;
- расчет оптимальных составов, обеспечивающих формирование монолитных массивов с требуемыми свойствами;
- исследование прочностных и гидроизоляционных характеристик, химической и термической стойкости полученных массивов на основе пород месторождений.

Комплекс работ по оценке возможности использования вмещающих пород месторождения в качестве компонентов геополимерных смесей включал в себя несколько последовательных этапов (рис. 2.5). В первую очередь, предусмотрено проведение детального изучения геологоразведочных данных с получением наиболее полной информации о горно-геологических характеристиках рудовмещающей толщи с отбором представительных проб. На основе укрупненного анализа состава и условий залегания вмещающих пород, распространенных на месторождении, произведена отбраковка образцов, представленных в минеральном отношении преимущественно кварцем и другими кристаллическими формами кремнезема, ввиду их слабой реакционной способности в щелочной среде, а также пород с низким

содержанием SiO_2 . В дальнейшем полученные данные были учтены при формулировании рекомендаций о необходимости учета вещественного состава вмещающих пород, включая породы от проходки горных выработок, при обосновании параметров изоляции камер выщелачивания.

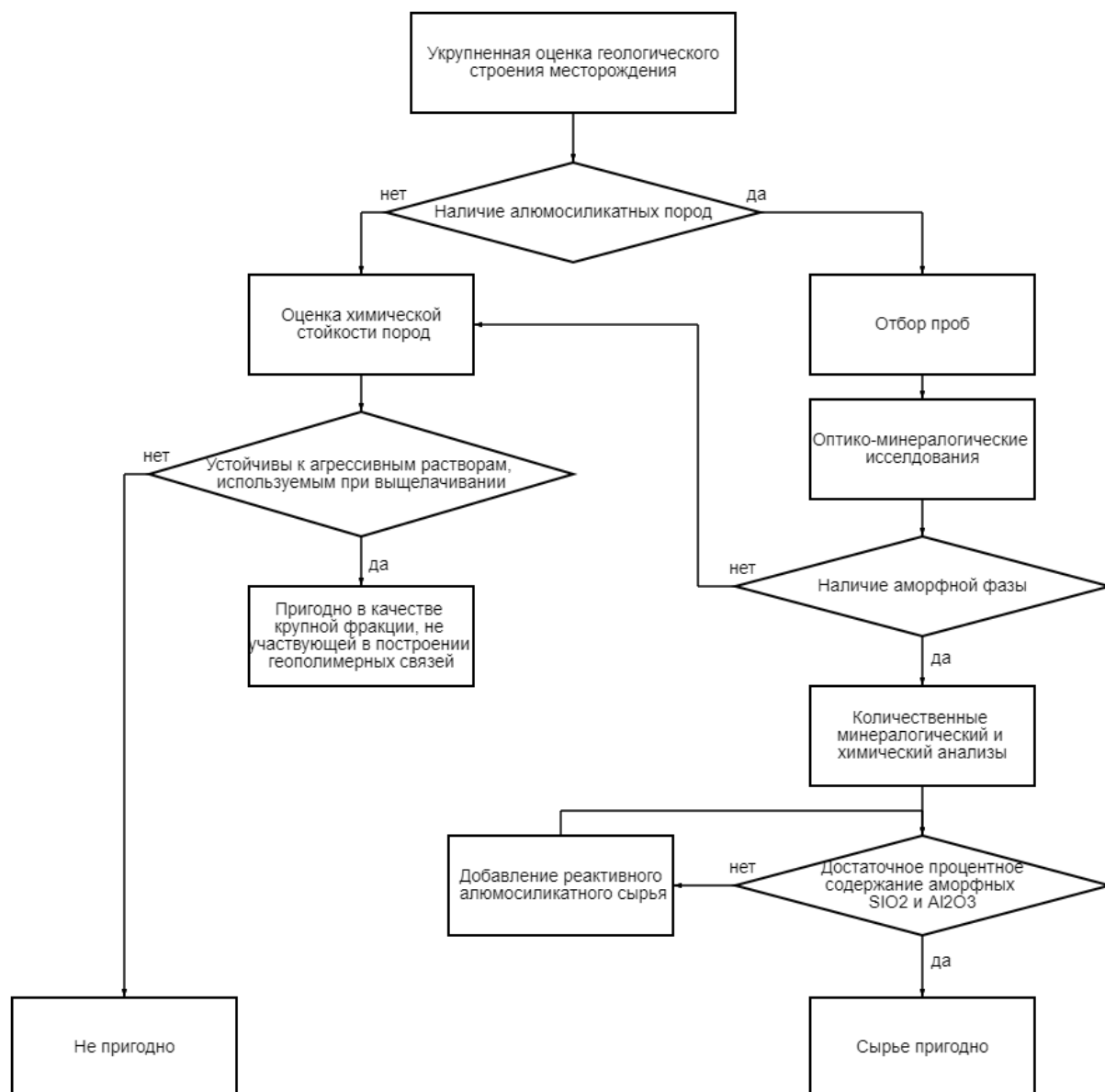


Рисунок 2.5 - Блок-схема реализации программы исследований по выбору направлений использования вмещающих пород месторождений, включая отходы добычи руд.

В соответствии с представленной на рис. 2.5 блок-схемой, проведены оптико-минералогические исследования, для оценки наличия в образцах аморфного кремнезема, являющегося базовым условием формирования трехмерной структуры геополимера. В рамках проведения диссертационного

исследования в лабораторных условиях анализ вмещающих пород медно-колчеданных месторождений производился на основе методологии, разработанной ФГБУ ВИМС и представленной в методиках №31 «Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ», №194 «Минераграфическое изучение руд». Анализ текстуры пород в прозрачно-полированных шлифах выполнялся на микроскопе Olympus BX 51 в комбинированном отраженно-проходящем свете с применением программного комплекса по анализу изображений «Минерал С7». На базе укрупненной оценки вмещающих пород золоторудных и медно-колчеданных месторождений создавались образцы прозрачно-полированных шлифов, для выявления микрофельзитовой аморфной составляющей, проведения анализа морфологии свободных зёрен и сростков, выявление особенностей взаиморасположения минеральных агрегатов, количественного соотношения аморфной и кристаллической составляющей.

В соответствии с методикой, схема подготовки прозрачно-полированных шлифов состоит из 8 этапов.

- пробоотбор: материал для изготовления шлифов отобран из разных частей выбранных образцов;
- обрезка образцов: из тела образцов вырезаны образцы размером 8х20х30 мм с помощью алмазных кругов на машине Discoplan-TS для без сколов;
- доводка образца: обработка на шлифовально-полировальном станке FORCIPOЛ 300-1V, регулирование скорости вращения образцов и использование порошка карбида кремния с глицерином;
- выбор предметного стекла: Размеры предметного стекла играют роль, но основное внимание уделяется его толщине;
- приклеивание образца: образец приклеивается к предметному стеклу после промывки без предварительной импрегнации;
- обрезка излишков: излишки обрезаны до достижения толщины 0,02-0,03 мм, общая толщина образца составила 1,5 мм;

- доводка и шлифовка тонкого среза: Выполнены на тех же установках и средствах, толщина образца и стекла составила 1,25 мм, используя установку FORCIPOЛ 300-1V;

- полировка тонкого среза - завершающий этап на той же установке, снимается слой до 10 мкм, обеспечивая требуемую толщину образца в 0,02 мм (20 мкм).

На основе полученных данных произведена углубленная оценка минерального состава проб пород методом порошковой рентгеновской дифрактометрии с установлением количественного содержания аморфных фаз SiO_2 и Al_2O_3 . Отобранные на первом этапе образцы дацитов, серицит-кварцевых метасоматитов, метаморфизированных туфов дацитов, туфов андезитов, а также лежалых хвостов золоторудного месторождения подвергались анализу методом порошковой рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра XRD-6000 («SHIMADZU») (рис. 2.6) с использованием Cu-анода. Расчет содержания минералов в этих образцах был выполнен в программном продукте SIROQUANT V4.



Рисунок 2.6 - Рентгеновский дифрактометр XRD 6000 («SHIMADZU») для определения фазового минерального состава медно-колчеданного золотосодержащего сырья

Процесс подготовки образцов пород для испытаний предусматривал:

- измельчение породы с помощью лабораторной щековой дробилки до фракции -5-0 мм;
- измельчение полученного материала до крупности -1-0 мм в лабораторной конусной дробилке ВКМД10;
- подготовку с помощью просеивающей машины EML 200 фракции, крупностью менее 1мм. Для этого материал загружался в сито просеивающей машины, диаметром 200 мм, размер ячеек сетки которой 1 мм. Время просеивания составляло 40 мин, интервал просеивания – 10 минут, амплитуда – 2 мм. По истечении 40 минут остаток на сите, при его наличии, снова помещался в конусную дробилку ВКМД10. Процесс повторялся до полного исключения остатка на сите. Фракции -1-0 мм подготавливались для каждого типа руд и пород. Затем материал усреднялся.
- отбор из усредненного материала навески, массой 30 г, для анализа.

Аналогичным образом производилась пробоподготовка для проведения количественного химического анализа образцов в соответствии с нормативными документами № 138-Х, № 50-Х, № 172-С, № 502-С, № 120-Х, № 118-Х, № 197-Х и № 3-Х, разработанными ФНМЦ «ВИМС». Эти методики включали определение содержания различных элементов, таких как кремний, титан, алюминий, железо, кальций, магний, марганец, калий, натрий, водород, фосфор и сера, а также анализ потерь при прокаливании. Например, метод № 138-Х основан на ускоренных фотометрических и титриметрических методах, в то время как № 3-Х использует гравиметрический подход для измерения общего содержания серы.

В качестве жидкого компонента смеси применяется водный щелочной раствор силикатов натрия и (или) калия. Для получения устойчивого геополимера необходимо выполнение следующих условий: при использовании силиката калия молярное соотношение $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$ - от 1,5 до 1,7, при использовании силиката натрия соотношения $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ должно находиться в диапазоне 1,7 до 1,9 [10]. При использовании строительного

жидкого стекла с молярным соотношением 3,32, необходимые условия достигаются путем добавления в раствор гранулированных КОН или NaOH в соответствии с зависимостями, представленными на рис. 2.7 – 2.8.

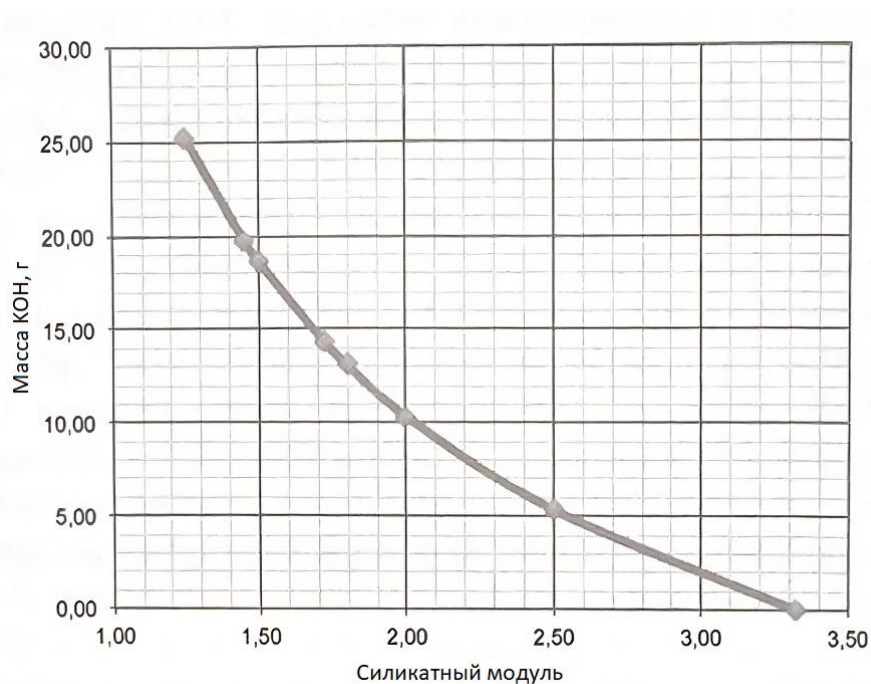


Рисунок 2.7 - Зависимость молярного отношения $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$ в растворе от количества добавляемого чистого гранулированного КОН в калиевое жидкое стекло с силикатным модулем 3,32

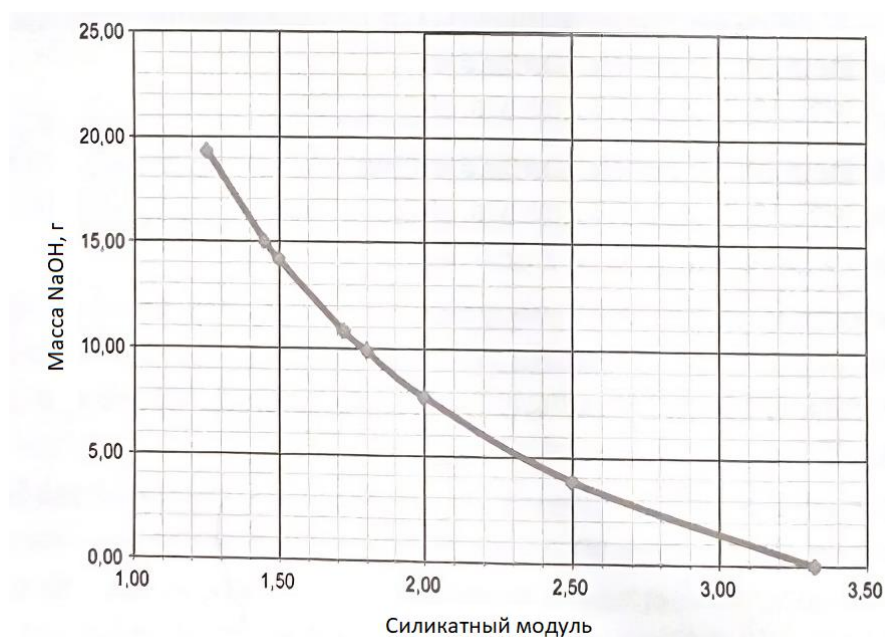


Рисунок 2.8 - Зависимость молярного отношения $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ в растворе от количества добавляемого чистого гранулированного NaOH в натриевое жидкое стекло с силикатным модулем 3,32

При выборе жидкого компонента необходимо учитывать, как экономическую составляющую, так и свойства калиевого и натриевого раствора. Так, различные условия и исходные материалы получения сырья способны влиять на формируемый тип молекулярной структуры и прочностные характеристики получаемых геополимеров. В связи с чем, необходимо проведение лабораторных исследований в части подбора оптимального варианта жидкого компонента, обеспечивающего геополимеризацию.

Далее в зависимости от области применения и требуемых свойств изолирующих конструкций, в соответствии с данными (рис. 2.9), согласно методике, выбирается соотношение $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ в смеси.

Согласно данным рис. 2.9., низкие соотношения $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ (1–3) в смеси способствуют созданию жесткой трехмерной структуры, тогда как высокие соотношения образуют материал с линейным полимерным характером.

На основе полученных данных о твердом алюмосиликатном сырье и жидком компоненте производится количественный расчет компонентов смеси. Для получения геополимерных материалов со свойствами, отвечающими технологии подземного выщелачивания, при расчете компонентов должны выполняться следующие условия:

- мольное соотношение в смеси $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O}):\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$;
- мольное соотношение в смеси $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$.

В случае недостаточного содержания аморфных фаз во вмещающих породах месторождения обеспечение необходимого соотношения достигается путем дополнительного добавления в состав смеси алюмосиликатного сырья, преимущественно отходов производства, таких как метакаолин, золы ТЭЦ, гранулированный шлак и т.д.

Снижение расхода компонентов возможно за счет включения в состав крупных фракций пород, процентное содержание которых должно определяться экспериментально с учетом требуемых технологических характеристик формируемых изолирующих конструкций.

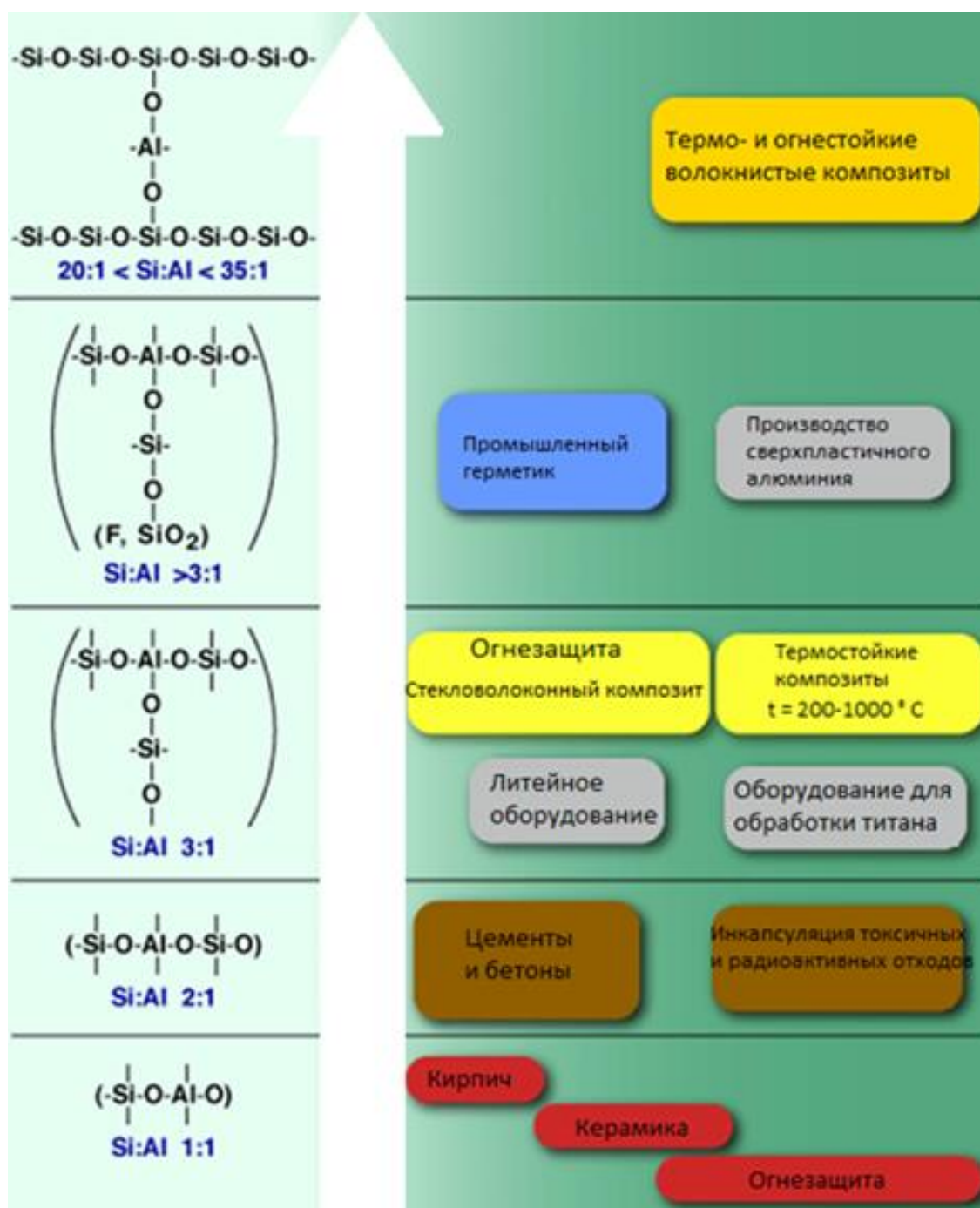


Рисунок 2.9 - Принцип выбора соотношения в смеси $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от области применения геополимеров

2.3. Методики оценки свойств геополимерных материалов в свете реализации технологии подземного выщелачивания

Приготовление смеси выполняется согласно схеме, представленной на рис. 2.10.



Рисунок 2.10 - Процесс приготовления геополимера

Согласно схеме, представленной на рис. 2.10, твердое сырье измельчается до крупности 50% класса -0,074 мкм. На первом этапе жидкий компонент перемешивается с наименее реактивным алюмосиликатным сырьем, после отстаивания 5-10 минут в смесь вводится в расчетном количестве высокореактивный компонент, такой как зола уноса или метакраин. В ходе перемешивания добавляются породы крупной фракции. При необходимости, для достижения требуемых реологических характеристик в смесь вводится вода, оптимальное количество которой определяется исходя из требований к изолирующему материалу. Оптимальные время и температура твердения устанавливаются эмпирическим путем ввиду разнообразия химической активности минералов, слагающих породы месторождений.

Условия проведения испытаний по оценке свойств геополимерных изолирующих материалов, применяемых в качестве основных при реализации комбинированной геотехнологии, включающей подземную добычу руд и выщелачивание, должны выбираться индивидуально с учетом режима выщелачивания. Испытания должны включать оценку гидроизоляционных характеристик, химической стойкости, термостойкости при максимально возможных температурах в ходе окисления руд, прочностных характеристик,

определяемых нормативной прочностью несущих конструкций с учетом возможного разупрочнения в динамике.

Реологические свойства смеси определяет перспективу ее «удобоукладываемости» в заполняемых камерах. Растекаемость геополимерной смеси, в соответствии с методикой, определялась с помощью прибора Суттарда, представляющего собой полый цилиндр, и градуированную стеклянную площадку (рис. 2.11). Транспортабельность смеси не определялась ввиду того, что приготовление геополимерной смеси для изоляции днища блока выщелачивания предусмотрено на передвижных закладочных комплексах, которые исключают необходимость ее транспортирования с поверхности. Применение передвижных закладочных комплексов принято ввиду небольших объемов смеси для изоляции, что делает ее приготовление на поверхности и транспортирование в подземное пространство нецелесообразным



Рисунок 2.11 - Стандартный вискозиметр Суттарда для определения растекаемости смеси

В технологии формирования изолирующих конструкций решающее значение имеет прочность материала на одноосное сжатие, достигнутая к

определенному сроку после их возведения, которая обеспечивает безопасность производства горных работ в конкретных условиях. Ввиду отсутствия нормативных документов, регламентирующих порядок и методы испытаний геополимерных материалов, определение прочности на одноосное сжатие выполнено по ГОСТ 10180—2012. «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Контрольные образцы изготавливались в форме куба с длиной ребра 70 мм, число образцов в серии принималось равным 3. Испытание на одноосное сжатие производилось на лабораторном гидравлическом прессе Instron, обработка результатов выполнена в программном обеспечении Instron Bluehill Universal.

Химическая стойкость материала определялась фактически установленным сохранением требуемых свойств под воздействием агрессивных кислот, Метод определения химической стойкости бетона заключается в измерении прочности на одноосное сжатие в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58896-2020 до и после погружения в агрессивную среду, Гидроизоляционные характеристики определялись путем оценки водопоглощения образцов до и после выдержки в агрессивной среде, определяемой технологией сернокислотного выщелачивания.

Для этого были использованы образцы, погруженные в 10%-й раствор серной кислоты в течение 60 суток. Всего было подготовлено 24 образца. После каждого из четырех временных интервалов - через 7, 14, 28 и 60 суток - из раствора извлекалось по 6 образцов, которые подвергались сушке в сушильном шкафу до достижения постоянной массы. Таким образом, каждый образец проходил через последовательно увеличивающиеся временные интервалы контакта с агрессивной средой, что позволило оценить их поведение и стабильность в условиях воздействия кислоты в динамике.

Затем проводились испытания на одноосное сжатие прочности трех образцов, согласно описанной ранее методике.

Отдельные образцы, выдержанные в кислоте, подвергались проверке на гидронепроницаемость методом сравнения масс до и после насыщения водой.

Для этого была измерена масса высушенных образцов после выдержки в кислоте (m_1), которые затем погружались в емкость с водой до достижения постоянной массы. После извлечения образцов они протирались фильтровальной бумагой, их масса была замерена в насыщенном состоянии водой (m_2), и затем рассчитывалось увеличение массы в процентном отношении по формуле 1.

$$\frac{(m_2 - m_1)}{m_2} \times 100\% \quad (1) \quad (2.1)$$

Кроме того, выполнялась оценка убыли массы образцов до и после их погружения в раствор серной кислоты.

2.4. Классификация и область применения вмещающих пород медно-колчеданных месторождений при реализации комбинированной подземной добычи руд и шахтного выщелачивания

Оценка возможности использования вмещающих месторождений в технологии изоляции подземных камер геополимерными материалами производилась, в первую очередь, на основе их укрупненной геологической оценки (см. рис. 2.5). В работе был проведен анализ условий формирования медно-колчеданных месторождений Южного Урала и сделаны выводы о применимости распространенных на площади Магнитогорского мегасинклинория пород для использования их при реализации комбинированной подземной добычи руд и подземного выщелачивания в свете исходных материалов для изоляции камер выщелачивания [63].

Определено, что колчеданные месторождения распространены на площади, охватывающей почти всю эвгеосинклинальную область Южного Урала. Они находятся в районах, сложенных горными породами разного состава и возраста, в различной геолого-структурной обстановке. Однако, несмотря на это разнообразие, все колчеданные залежи размещаются среди вулканогенных пород. Вулканогенные образования, обособляющиеся в

геологическом разрезе и по площади, т. е. возникающие на определенном этапе развития региональных геологических структур, характеризуются общими петрографическими и петрохимическими особенностями. Рудовмещающий комплекс колчеданных месторождений, развитых в пределах Магнитогорского мегасинклинория, приурочен преимущественно к спилит-кератофировой формации. Комплекс условно подразделяется на две части: нижнюю — базальтовую и верхнюю — сложного состава с участием кислых или умереннокислых вулканитов в лавовых, субвулканических или экструзивных фациях.

Среди основных пород рассматриваемой формации встречаются как настоящие спилиты, характеризующиеся присутствием полностью альбитизированного плагиоклаза, так и обычные диабазы и другие эффузивные породы базальтового состава.

Крупные месторождения известны только в связи с риолит-базальтовой формацией. На Южном Урале месторождения, залегающие среди серпентинитов или базальтов, имеют существенно меньшие размеры (табл. 2.2).

Таблица 2.2 - Рудовмещающие формации Магнитогорского мегасинклинория (по данным [73]).

Типы месторождений	Месторождения	Запасы руды и металлов			Рудовмещающая формация и комплекс	Подстилающие породы
		руда, млн.т	медь, тыс.т	цинк, тыс.т		
Ивановский	Ивановское				офиолитовая	серпентиниты
Домбаровский	Летнее				базальтовая	базальты
	Осеннее					
Уральский I	Юбилейное				риолит-базальтовая	базальты, к.в.
Уральский II	Сибайское					контрастный комплекс
	Учалинское					
	Ново-Учалинское					
Уральский III	Молодежное					к.в.
	Им. XIX партсъезда					
	Октябрьское					Андезитбазальты, в.-о.п.
	Узельгинское					
	Подольское					к.в.
	Гайское					
					непрерывный комплекс	

Продолжение таблицы 2.2.

Баймакский	Бакр-Тау				риолит- базальтовая	непрерывный комплекс	к.в.
	Майское						
	Балта-Тау						
	Таш-Тау						андезитбазальты к.в.
	Восточно- Семеновское						к.в.

Типовой литолого-стратиграфический разрез колчеданных рудных районов представлен следующими разностями (снизу-вверх): 1) подстилающие вулканы базальтового состава; 2) рудоносный вулканогенный комплекс с участием пород основного и кислого составов; 3) покрывающие вулканомиктовые отложения; 4) завершающие терригенные образования (рис. 2.12).

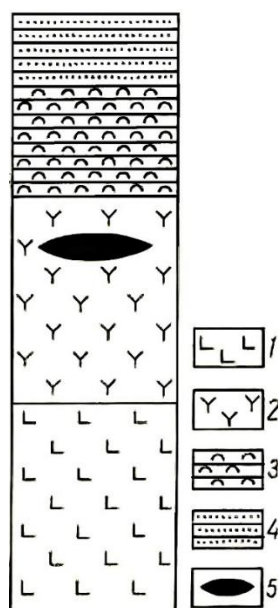


Рисунок 2.12 - Типовой геологический разрез рудных районов: 1 - подстилающие основные эффузивы; 2 - рудовмещающие дифференцированные вулканы с участием пород кислого состава; 3 - покрывающие вулканомиктовые отложения; 4 - завершающие обломочные (терригенные) породы; 5 - колчеданная залежь

В табл. 2.3 систематизированы медно-колчеданные месторождения Южного Урала с указанием рудовмещающих пород, которые зачастую представлены спилитами, липарит-дацитовыми кварцевыми порфирами, серицит-кварцевыми породами, дацитами, андезит-базальтовыми и базальтовыми порфирами, габбро-диабазы и туфами этих пород.

Таблица 2.3 - Систематизация вмещающих пород медно-колчеданных месторождений Южного Урала [64].

Рудный район	Название месторождения	Типы горных пород
Бурибайский	Бурибайское	спилиты, туфы, субвулканические брекчии, серицит-хлорит-кварцевые породы, габбро-диабазы
	Маканское	серицит-кварцевые породы, туфы дацитовых порфиритов, андезит-базальтовые порфириты, диабазы
	Октябрьское	серицит-кварцевые метасоматиты, андезитовые порфириты, дацитовые порфириты
Домбаровский	Летнее	спилиты, базальтовые порфириты
	Весеннее	граниты, спилиты, базальтовые порфириты, липаритовые порфиры
Средне-орский	Приорское	базальтовые порфириты, спилиты, дацитовые и липарит-дацитовые порфиры, туфы кислого состава, серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты
	Месторождение им. 50-летия Октября	базальтовые афириты амфиболитизированные, эффузивы андезит-базальтового состава, антофиллитизированные эффузивы основного состава, кордиеритизированные вулканыты и кордиерит-кварцевые породы, биотит-хлоритовые и кварц-хлоритовые породы, антофиллит-кордиеритовые породы, серицит-кварцевые породы, кварц-альбитовые породы, дайки кислого состава
Сибайский	Сибайское	спилиты, дациты, кварцевые порфиры и их туфы, кварцевые порфиры серицитизированные, кварцевые порфиры гематитизированные и окварцованные, спилиты гематитизированные, метасоматиты серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые, серицит-кварц-хлоритовые породы, кварц-хлоритовые породы
Гайский	Гайское	вулканыты основного состава, туфы кислого состава, брекчии дацитовых порфиритов, диабазы субвулканические, кислые породы субвулканические, метасоматиты серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые
Теренсайский	Джусинское	дацитовые порфириты и туфы, серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые сланцы, дайки диабазов и габбро-диабазов, дайки гранодиорит-порфиров
Учалинский	Учалинское	базальтовые порфириты, слоистые туфы основного состава, габбро, серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты
Медногорский	Блявинское	базальтовые порфириты, афириты, вариолиты, среднезернистые диабазы, крупнокварцевые липаритовые порфиры
	Комсомольское	базальтовые порфириты, афириты, вариолиты, туффиты, яшмы, углисто-глинистые сланцы, мелкокварцевые липаритовые порфиры, дацитовые порфириты, кварц-хлорит-серицитовые метасоматиты

К спилитам относятся основные эффузивные породы со средним химическим составом: SiO_2 46,20-55,17; TiO_2 0,55-0,63; Al_2O_3 17,33-19,95; Fe_2O_3 0,61-4,02; FeO 4,45-6,04; MnO 0,06-0,77; MgO 6,30-7,24; CaO 1,45-8,69; Na_2O 4,85-5,96; K_2O 0,012-0,16; H_2O^- 0,73-0,75; H_2O^+ 3,45-9,41; CO_2 0,61- 2,69. Главными породообразующими минералами распространенных на территории Южного Урала спилитов являются: 1) плагиоклаз, представленный как обычным для спилитов альбитом, так и сохранившимся первичным основным плагиоклазом, 2) моноклинный пироксен, имеющий всегда заметную буроватую окраску, и 3) стекло, полностью разложенное в тонкочешуйчатый агрегат хлоритовых минералов. Акцессорный магнетит иногда довольно обилен [117].

Липарит-дацитовые кварцевые порфиры представляют собой кислые эффузивные горные породы, с включениями в основную массу вулканического стекла или продуктов его девитрификации (тонкозернистый кварц-полевошпатный агрегат) порфировых вкрапленников, представленных кварцем, калиевыми полевыми шпатами, кислым плагиоклазом, ортопироксеном. Химический состав липарит-дацитовых порфиров Сибайского месторождения: SiO_2 72,98%; TiO_2 0,35 %; Al_2O_3 11,21 %; Fe_2O_3 1,06 %; FeO 5,87 %; MgO 1,17 %; CaO 1,42 %; Na_2O 4,44 %; K_2O 0,52 %.

Часто встречающийся на рудоносных площадях Южного Урала дацит является магматической эффузивной горной порода кислого состава, состоящей из порфировых вкрапленников, представленных плагиоклазом, ортопироксеном, клинопироксеном, роговой обманкой, биотитом, иногда кварцем. Основная масса состоит из микролитов плагиоклаза, цветных минералов, кислого вулканического стекла. Средний химический состав: SiO_2 65-68 %; TiO_2 0,5-0,8 %; Al_2O_3 13-16 %; Fe_2O_3 1-2,5 %; FeO 0,5-4 %; MgO 0,5-3 %; CaO 2-4 %; Na_2O 2-4 %; K_2O 1-3,5 %.

Габбро-диабазы. Интрузивная мелко- или среднекристаллическая горная порода основного состава, состоящая из плагиоклаза, авгита, титаномagnetита, пироксенов и амфиболов. Характеризуется отсутствием в

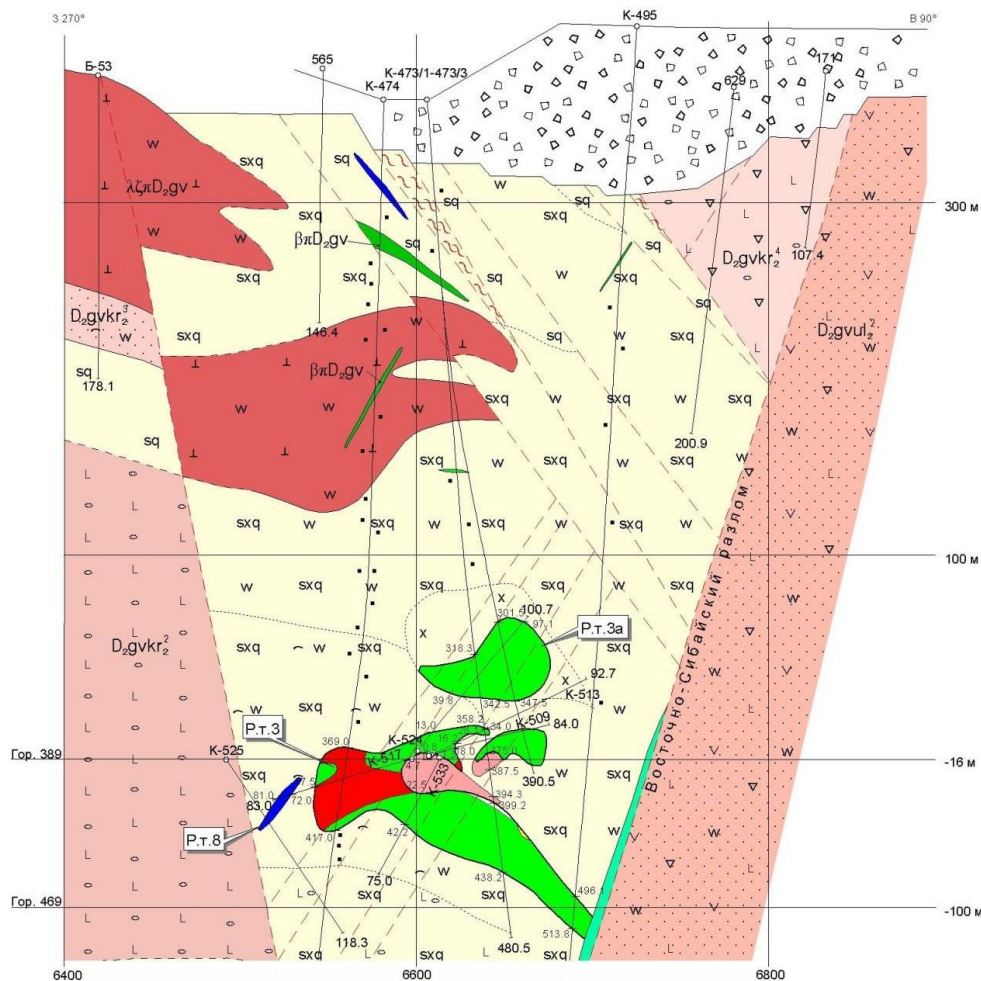
составе вулканического стекла. Является переходной между габбро и диабазом. Палеотипный аналог полнокристаллических базальтовых пород. Химический состав: SiO_2 43-52 %; Al_2O_3 8-27 %; Fe_3O_4 1,8-25 %; CaO 8-18 %; MgO 3-15 %.

Андезит-базальтовые и базальтовые порфириды. Эффузивные горные породы основного состава, основная масса состоит из микролитов плагиоклаза, пироксенов, магнетита, титаномagnetита, вулканического стекла. Вкрапленники представлены плагиоклазом, оливином, пироксеном, иногда роговой обманкой. Химический состав базальтовых порфиритов характеризуется следующими показателями: SiO_2 50,7–53,1%; Al_2O_3 16,4–16,47%; $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO}$ 12,81–14,34%; MgO 1,73–2,23%; K_2O 1,45–1,77%; Na_2O 5,0–5,34%.

В условиях Южного Урала все рудные тела сопровождаются характерными изменениями боковых пород с широким развитием серицит-кварцевых и серицит-хлорит-кварцевых метасоматитов. Метасоматиты развиты в лежащем боку рудных тел. На эрозионных срезах крупных месторождений тела массивных руд обычно расположены на флангах зон метасоматитов. Так, Учалинское и Сибайское месторождения находятся на южных флангах мощных зон метасоматических пород. Над рудными телами установлены зоны эпидотизации, окварцевания и гематитизации. Мощные зоны окварцевания и гематитизации установлены в висячем боку Сибайского (рис. 2.13), Юбилейного и Учалинского месторождений. В надрудных зонах некоторых крупных месторождений вдоль разрывных нарушений развиты оригинальные “пестрые” брекчии, состоящие из зеленых эпидотизированных, белых окварцованных и красных гематитизированных обломков размерами 2–20 см. Минеральный состав зон окolorудных гидротермально-измененных пород на колчеданных месторождениях Южного Урала представлен в табл. 2.4.

Таблица 2.4 - Минеральный состав зон околорудных гидротермально-измененных пород на колчеданных месторождениях Южного Урала

Зона	Основные минералы	Второстепенные и локально развитые минералы	Акцессорные минералы
Метасоматические породы			
Серицит-кварцевая	Кварц, серицит	Пирит, корунд, диаспор, пирофиллит	Рутил, апатит, молибденит
Кварц-хлоритовая	Хлорит, кварц	Пирит, карбонат, халькопирит	Рутил, анатаз
Серицит-карбонат-кварцевая	Кварц, серицит, карбонат	Пирит, гипс	Рутил, анатаз
Серицит-хлорит-кварцевая	Кварц, серицит, хлорит	Пирит, карбонат, каолинит, халькопирит, сфалерит, галенит, гипс	Рутил, анатаз, лейкоксен, апатит
Частично измененные породы			
Баритизации	Альбит, кварц, серицит, хлорит, барит	Карбонат, бариевый, алюмосиликат, альбит, цеолит, пирит, сфалерит, галенит	Лейкоксен, апатит
Серицитизации	Альбит, кварц, хлорит, серицит	Карбонат, вторичный альбит, пирит	Лейкоксен, сфен, апатит
Гематитизации	Альбит, кварц, хлорит, гематит	Эпидот, карбонат, халцедон, вторичный альбит	Лейкоксен, сфен, апатит
Эпидотизации	Альбит, кварц, эпидот, хлорит	Пумпеллиит, пренит	Лейкоксен, апатит



СТРАТИГРАФИЯ

ГРАНИЦЫ, КОНТУРЫ

- | | |
|---------------------|---|
| Q-J | Нерасчлененные четвертичные отложения и кора выветривания юрского возраста: делювиальные глины, пески, галечники, супеси, суглинки, элювиальные глины |
| D ₂ gvul | Улутаская свита. Частое переслаивание алевролитовых, псаммитовых туффитов, туфопесчаников, туфоаргиллитов |
| D ₂ gvul | Улутаская свита. Переслаивание алевролитовых, псаммитовых, псефитовых туффитов, преимущественно андезизабазальтового состава |
| D ₂ gvul | Улутаская свита. Частое переслаивание кремнистых, алевролитовых, псаммитовых, псефитовых туффитов преимущественно дацитового состава с прослоями туфогравелитов и агломератовых туффитов, туфоконгломератов с обломками известняков, яшм, метасоматитов |
| D ₂ gvbg | Бугульгирский горизонт. Яшма вишнево-серая, красноато-коричневая с редкими прослоями кремнистых туффитов и туфов смешанного состава |
| D ₂ gvkr | Карамалытаская свита. Дацинты, андезидацинты, риолиты, риодациты, их туфы и брекчи |
| D ₂ gvkr | Карамалытаская свита. Спилиты, базальты, андезизабазальты, их туфы и брекчи |

-  Геологические: достоверные
 предполагаемые
 Разрывные нарушения: главные
 второстепенные
 Контур метасоматических изменений
 Сульфидная вкрапленность
 Контур карьера

ТИПЫ РУД НА РАЗРЕЗАХ

-  Медные
 Медно-цинковые
 Серные
 Магнетитовые

ИНТРУЗИВНЫЕ И СУБВУЛКАНИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| $v\delta C_1$ | Габбро, габбро-диабазы |
| $\alpha\delta\pi D_2gv$ | Диориты |
| $\lambda\zeta\pi D_3gv$ | Риодациты |

ЛИТОЛОГИЯ

- | | | | |
|---|--------------------------|---|------------------------|
|  | Глинистые отложения |  | Спилиты |
|  | Кремнистые туффи́ты |  | Базальты |
|  | Туфопесчаники |  | Андезибазальты |
|  | Известковистые песчаники |  | Туфы |
|  | Дациты |  | Брекчии |
|  | Риодациты |  | Габбро, габбро-диабазы |

МЕТАСОМАТИТЫ

- | | |
|-----|---------------------------|
| sqx | Серицит-хлорит-кварцевые |
| sq | Серицит-кварцевые |
| xq | Хлорит-кварцевые |
| x | Хлоритовые |
| cxq | Карбонат-хлорит-кварцевые |

Рисунок 2.13 - Геологический разрез Сибайского медно-цинково-колчеданного месторождения

Анализ наиболее распространенных вмещающих пород на рудных площадях медно-колчеданных месторождений Южного Урала показал, что эффузивные породы кислого состава, развитые на значительных площадях, требуют проведения дополнительных исследований в связи с высоким содержанием в составе оксидов кремния и алюминия и, вместе с тем, кристаллических вкрапленников, снижающих реакционную способность. Метасоматически измененные породы не представляют интереса с позиции формирования геополимерных связей ввиду низкой реакционной способности таких минералов, как кварц, серицит, хлорит, однако могут быть рассмотрены в качестве крупнокусовой фракции, не участвующей в построении геополимерных связей. Возможность использования магматических пород основного состава может быть рассмотрена при включении в состав смеси значительного количества высокореактивного алюмосиликатного сырья, способного обеспечить протекание реакции геополимеризации.

Выводы по главе 2

1. Предложена концепция выщелачивания руд цветных металлов в специально создаваемых в недрах камер выщелачивания. Обеспечение результатов технологии выщелачивания, приближенных к кучному выщелачиванию, достигается путем применения комбинированной геотехнологии, основанной на многофункциональном использовании выработанных пространств подземных камер при возможности изоляции их от вмещающих пород непроницаемыми конструкциями. Здесь реализуется загрузка сырья требуемой крупности, организована подача, сбор и циркуляция выщелачивающих растворов и отвод отходящих газов.

2. Определены требования к технологическим характеристикам искусственных массивов, ограничивающих камеры подземного выщелачивания. К ним относятся кислото-, термо-, биостойкость, прочность.

Определено, что таким требованиям соответствуют геополимерные материалы.

3. С учетом особенностей технологии производства геополимеров (формирование конструкций из приготовленной смеси) предложена классификация способов изоляции подземных камер выщелачивания, включающая 4 основных класса. Классификационным признаком является способ возведения изолирующей конструкции – искусственный массив, изолирующая оболочка, завеса, тампонаж.

4. В связи с перспективой использования в качестве основного наполнителя геополимерной смеси вмещающих пород месторождений определено, что еще на стадии проектирования должна обеспечиваться дифференциация вмещающих пород месторождения в зависимости от требований к искусственным массивам для подземного выщелачивания, и, следовательно, исходным материалам.

5. Для проведения работ по обоснованию и выбору изолирующих конструкций на геополимерной основе были специально разработаны программа и соответствующие методики исследований, включающие: исследование вещественного состава вмещающих пород месторождений для оценки возможности формирования на их основе геополимерных материалов; расчет оптимальных составов, обеспечивающих формирование монолитных массивов с требуемыми свойствами; исследование прочностных и гидроизоляционных характеристик, химической и термической стойкости полученных массивов на основе пород месторождений.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОДЗЕМНЫХ КАМЕР ДЛЯ СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

3.1. Результаты исследований свойств вмещающих пород медно-колчеданных месторождений, определяющих возможность изоляции камер выщелачивания на основе геополимерных материалов

Оценка усредненных химического и минерального составов горных пород, слагающих рудовмещающую толщу месторождений медно-колчеданных руд Южного Урала, позволили выделить перспективные прекурсоры для формирования геополимерных смесей по факту наличия в составе растворимых в щелочной среде минералов и высокого процентного содержания SiO_2 и Al_2O_3 . Однако ввиду того, что высокие содержания оксидов кремния и алюминия в составе рассмотренных ранее пород не являются единственно определяющим фактором возможности протекания процесса геополимеризации, следующим этапом выполнены оптико-минералогические исследования для установления факта наличия микрофельзитовой аморфной составляющей и ее объемного соотношения к кристаллической фазе в образцах выбранных пород - дацитов, туфов дацитов и серицит-кварцевых метасоматитов

Результаты оптико-минералогических исследований позволили установить, что основная масса образца кварц-серицитового метасоматита сложена микрокристаллическим агрегатом хлорит-полевошпат-кварцевого состава среди отдельных таблитчатых зерен кварца (рис.3.1а) [121]. На рисунке 3.1б представлена стекловатая микрокристаллическая структура туфов дацита с порфиробластами плагиоклаза и его метасоматическим замещением кальцитом и калиево-полевым шпатом. Дациты характеризуются микрофельзитовой структурой, основная масса которого представлена материалом преимущественно хлорит-полевошпат-кварцевого состава (рис.3.1в).

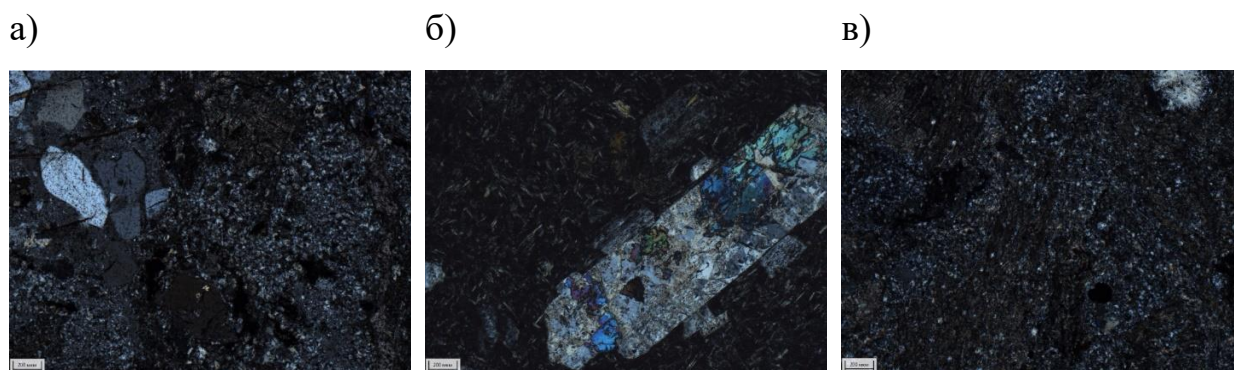


Рисунок 3.1 - Изображения шлифов горных пород в проходящем свете: а – серицит-кварцевые метасоматиты; б – туфы дацитов; в – дациты.

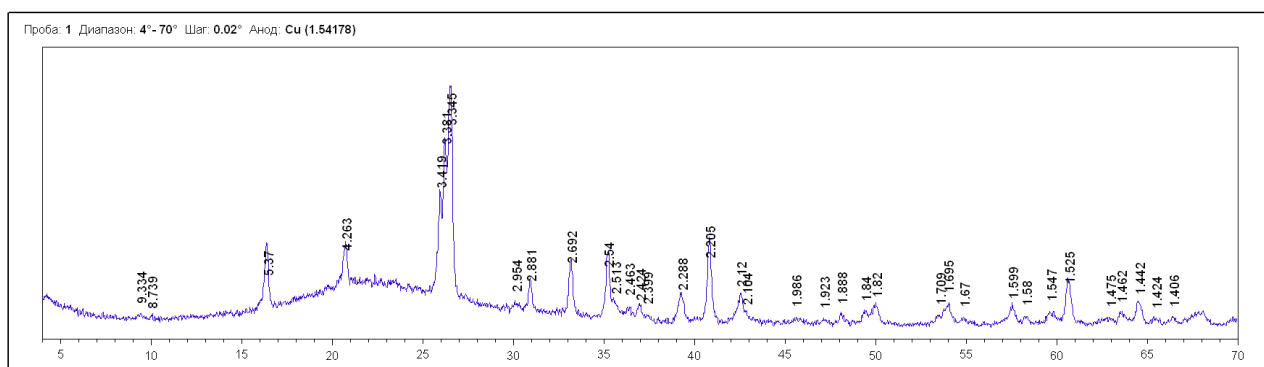
Количественное определение породообразующих элементов в породах свидетельствует о преимущественно кислом составе пород, с преобладанием SiO_2 в составе (табл. 3.1). Другим важным показателем, определяющим возможность формирования на их основе геополимерных изолирующих материалов, является содержание Al_2O_3 . Наибольший показатель характерен для дацитов (ДЦ) и составляет 15,15%. Примерно равное количество содержится в серицит-кварцевых метасоматитах (СКМ), тогда как в туфах дацитов (ТД) этот показатель незначительно ниже – 13,62%.

Таблица 3.1 - Содержание породообразующих элементов во вмещающих породах медно-колчеданных месторождений Южного Урала

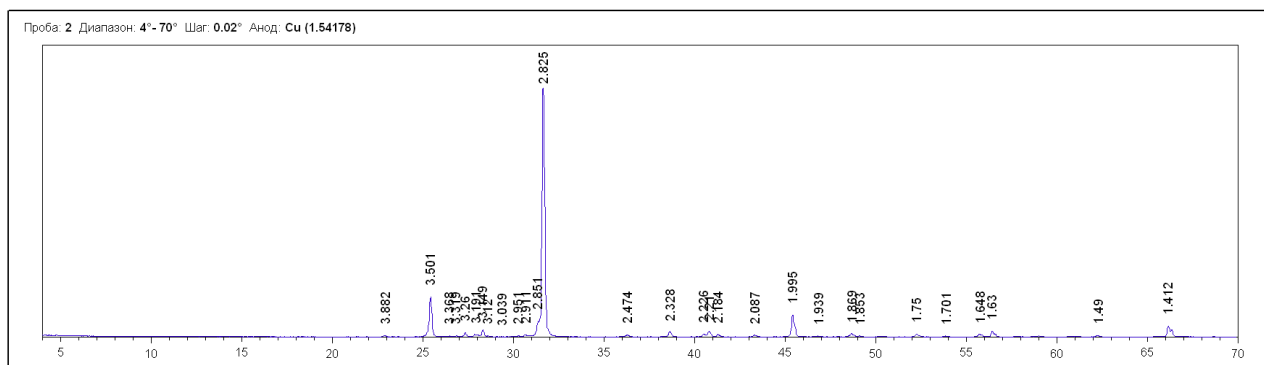
Элемент, %	ДЦ	СКМ	ТД
1	2	3	4
Si в пересчете на SiO_2 , %	60,64	61,65	67,26
Ti в пересчете на TiO_2 , %	0,81	0,35	0,27
Al в пересчете на Al_2O_3 , %	15,15	15,14	13,62
Fe в пересчете на Fe_2O_3 , %	2,22	1,64	1,64
Ca в пересчете на CaO, %	3,40	4,66	3,22
FeO, %	3,77	4,40	3,20
Mn в пересчете на MnO, %	0,17	0,14	0,07
Mg в пересчете на MgO, %	2,66	2,16	2,34
Na/ Na_2O , %	1,64/ 2,21	0,14/ 0,19	0,80/ 1,08
K/ K_2O , %	4,09/ 4,95	2,56/ 3,10	1,94/ 2,35
H_2O -, %	0,40	0,26	0,32
п.п.п. , %	3,06	5,74	4,90
P в пересчете на P_2O_5 , %	0,25	0,12	0,08
Сумма	99,89	99,55	100,25

Наличие в дацитах аморфной фазы в наибольшем количестве подтверждено результатами проведенного дифрактометрического анализа. Сравнение дифрактограмм, представленных на рис. 3.2, показало наличие наибольшего нелинейного фона, характеризующего аморфную фазу, в образцах дацитов (рис. 3.2а), тогда как образцы серицит-кварцевых метасоматитов и туфов дацитов более окристаллизованы и однородны по параметрам решетки.

а)



б)



в)

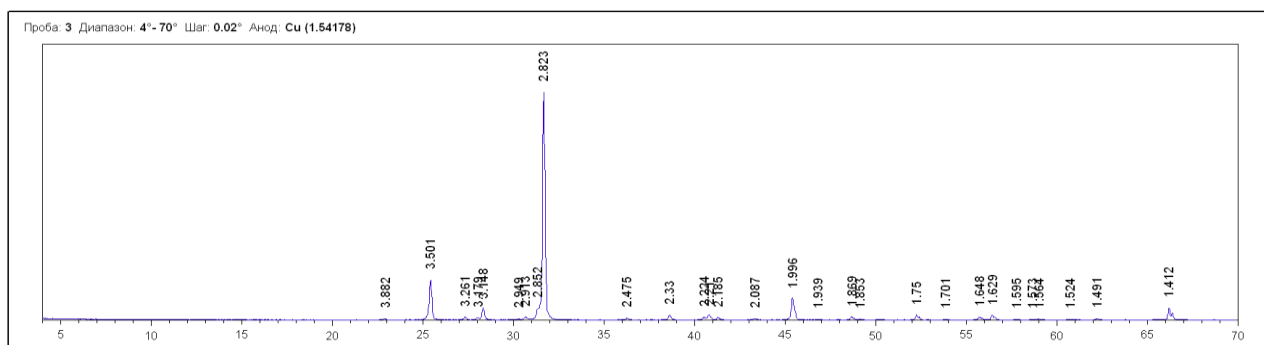


Рисунок 3.2 – Дифрактограммы проб исследуемых вмещающих пород: 1 – дацитов, 2 – серицит-кварцевых метасоматитов, 3 – туфов дацитов.

В ходе количественного анализа фазового состава образцов установлено, что дациты сложены преимущественно такими минералами, как кварц и калиево-полевой шпат в равном количестве - 24%, плагиоклаз - 22% и хлорит – 15%. Содержание аморфного кремнезема в составе дацитов исследуемой пробы составляет 11%. Серицит-кварцевые метасоматиты представлены в большей степени кварцем и слюдой в количестве 42% и 32%, соответственно. Туфы дацитов характеризуются наибольшим процентным содержанием в составе породы кварца – 46%, также в составе присутствуют слюда – 32% и в незначительных количествах хлорит, кальцит и пирит (табл. 3.2) [61, 122, 123]. Аморфный SiO_2 в составе серицит-кварцевых метасоматитов и туфов дацитов содержится в меньшем количестве, чем в дацитах, и составляет 7% и 6%, соответственно, что доказывает необходимость идентификации фаз и проведения количественного анализа фазового состава образца, так как высокие содержания оксида кремния в составе пород не гарантируют протекания процесса геополимеризации ввиду того, что в кристаллическом состоянии он не обладает требуемой реакционной способностью

Таблица 3.2 - Результаты количественного рентгеноструктурного анализа вмещающих пород месторождений Южного Урала

Порода	Минеральный состав (прибл. вес. %)							Ам. SiO_2
	кварц	плагиоклаз	КПШ	кальцит	пирит	хлорит	слюда	
Д	24	22	24	2	1	15	-	11
СКМ	42	-	-	8	1	10	32	7
ТД	46	7	-	9	1	10	22	6

Несмотря на то, что в дацитах содержится наибольшее количество аморфной составляющей, количества ее все же недостаточно для формирования на их основе с соблюдением следующих пропорций:

- мольное соотношение в смеси $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$;

- мольное соотношение в смеси $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$.

Этим вызвана необходимость добавления в состав смеси высокореактивного компонента. Совместно со специалистами компании RENCA, первым в России производителем изделий из геополимерных материалов, выполнен подбор оптимальной высокореактивной добавки - золы уноса с высоким содержанием аморфной фазы – 63%. На рис. 3.3 представлена дифрактограмма золы, отношение интенсивности линии кристаллической фазы и гало на которой свидетельствует о преобладании доли аморфной фазы.

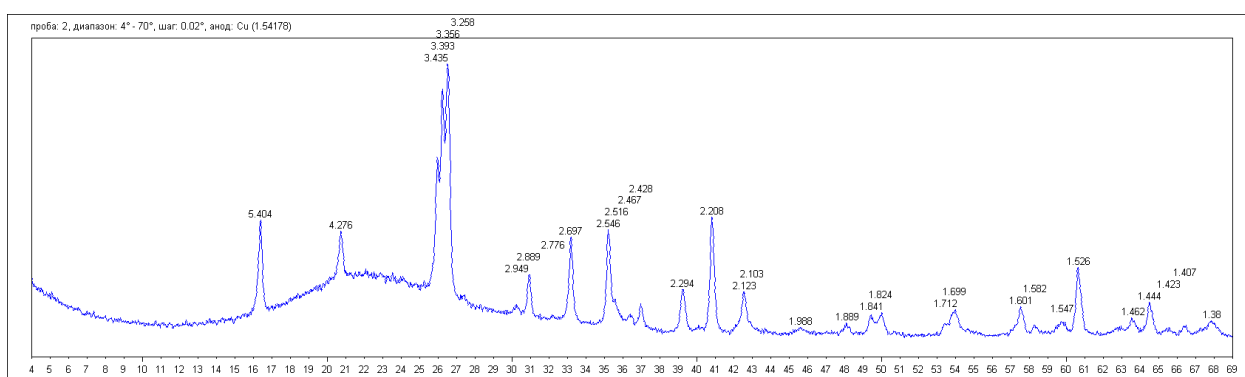


Рисунок 3.3 – Дифрактограмма пробы высокореактивной золы-уноса

Количество компонентов смеси, содержащей дациты, золу-уноса и К, Na-жидкое стекло, приготовленное в соответствии с [10], рассчитывалось исходя из приведенных выше пропорций по формулам:

$$\frac{x \times a\% \text{ Na}_2\text{O} \times 101.96 \text{ г/моль Al}_2\text{O}_3}{y \times 61.98 \text{ г/моль Na}_2\text{O} \times b\% \text{ Al}_2\text{O}_3} = 1 \quad (3.1)$$

$$\frac{101.96 \text{ г/моль Al}_2\text{O}_3 (x \times d\% \text{ SiO}_2 + y \times e\% \text{ SiO}_2 + z \times f\% \text{ SiO}_2)}{94.19 \text{ г/моль SiO}_2 (y \times b\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + z \times c\% \text{ Al}_2\text{O}_3)} = 2, \quad (3.2)$$

где x – масса силикатного раствора, г; y – масса золы уноса, г; z – масса вмещающих пород, г; a – содержание Na_2O в растворе, %; b – содержание Al_2O_3 в золе уноса, %; c – содержание Al_2O_3 во вмещающих породах, %; d – содержание SiO_2 в растворе, %; e – содержание SiO_2 в золе, %; f – содержание SiO_2 во вмещающих породах, %;

Содержания Na_2O , K_2O и SiO_2 в растворе определены в результате количественного анализа и представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 - Результаты количественного химического анализа жидкого компонента, обеспечивающего реакцию геополимеризации

Элемент, %. Вещество	SiO ₂ , %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %
Жидкий компонент	17,42	2,33	13,284

Расчетным путем определен оптимальный состав геополимерной смеси, изолирующие конструкции на основе которой способны обеспечить требуемые для технологии блочного подземного выщелачивания свойства со следующим составом компонентов: дациты - 1457 кг/м³, зола - 350 кг/м³, жидкий компонент - 709 кг/м³.

В рамках работы экспериментальным путем были подтверждены требования к углубленной оценке свойств компонентов смеси и соблюдения указанных выше соотношений, рассчитываемых по формулам 3.1, 3.2. Так, изменение состава с отклонением от оптимального не обеспечивало возможность получения геополимеров, в результате чего экспериментальные образцы были подвержены появлению трещин и вздутий после выдержки в агрессивной среде (рис. 3.4). Составы экспериментальных смесей представлены в табл. 3.4.

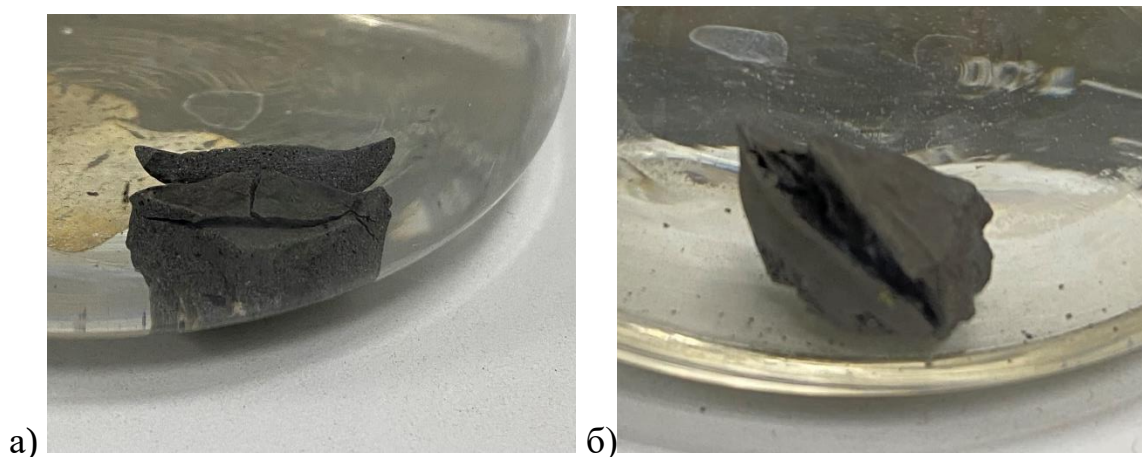


Рисунок 3.4 – Трещины и вздутия на образцах, полученных в ходе изменения расчетного состава смеси

Таблица 3.4 - Составы изученных смесей, подбираемых методом научного поиска с отклонением от оптимального

№ п/п	СЦ, г	ДЦ, г	ЛЗ, г	NaOH, мл	Na ₂ SiO ₃ , мл	NaOH+Na ₂ SiO ₃ по Д. Давидовицу, мл	m ₁ , г
1	0	2	2,4	0	0	2,7	1,33
2	0	2	3,54	0	0	2,7	1,33

На основе выполненного комплекса аналитических и экспериментальных исследований выполнено обоснование оптимального состава геополимерной смеси на основе дацитов, отклонение от которого ведет к значительному ухудшению свойств полученных массивов, свидетельствующее об отсутствии геополимерной реакции.

3.2. Исследование реологических свойств смесей на геополимерной основе и физико-механических характеристик формируемых массивов

Смесь перемешивалась в соответствии с рецептурой до достижения полной однородности (гомогенности). Исследование проводилось при температуре 25 °С.

Проведенные лабораторные исследования показали, что смеси на основе геополимера составляют регламентируемые 160 мм (рис. 3.5). Этот показатель указывает на достаточную текучесть и способность смеси заполнять формы и распространяться в пределах заданных параметров днищ камер выщелачивания.

Растекаемость закладочных смесей служит косвенной характеристикой их подвижности и может являться экспресс-методом стабильности выдерживания данного параметра в процессе распределения в камере после приготовления на передвижном закладочном комплексе (ПЗК). Смеси пригодны для распределения с помощью ПЗК по трубопроводам при подвижности 9–14 см (полное погружение эталонного конуса). Такая подвижность соответствует пятну растекаемости 15–20 см. Таким образом, полученная геополимерная смесь, отвечает технологическим требованиям к

формированию литых массивов и может быть приготовлена с их помощью и подана в выработанное пространство.

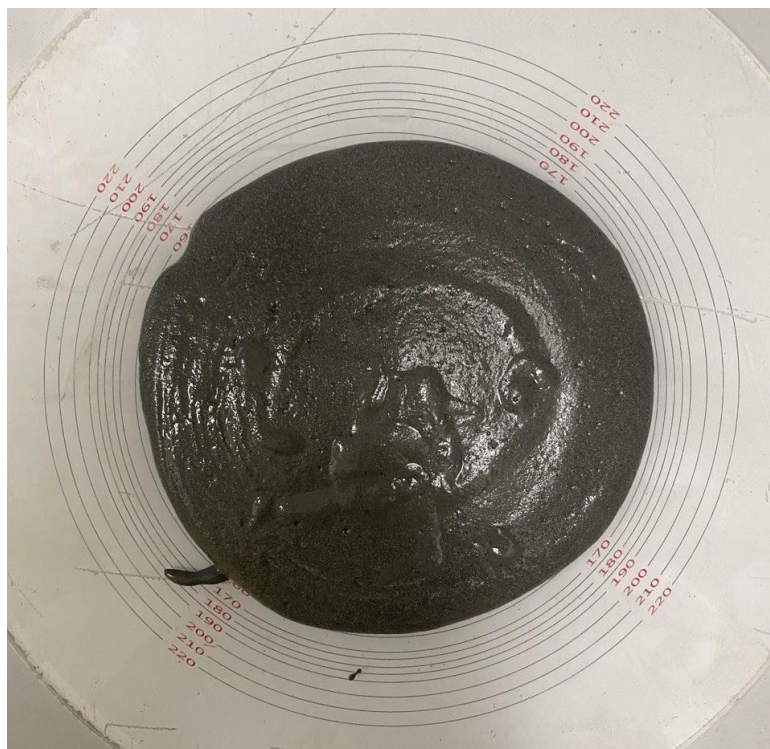


Рисунок 3.5 – Результаты определения растекаемости геополимерной смеси.

Для оценки устойчивости изолирующих массивов решающее значение имеет прочность слагающего его материала на одноосное сжатие, достигнутая к определенному сроку после их возведения и деформационные характеристики, которые обеспечивают саму возможность создания камер выщелачивания и безопасность производства горных работ в конкретных условиях.

На первом этапе были выполнены исследования образцов на основе геополимерных смесей, которые позволили оценить в динамике в возрасте 7, 14, 30, 60 суток и характер разрушения при сжатии. Кривые нагружения образцов на различных сроках твердения представлены на рисунках 3.6-3.9.

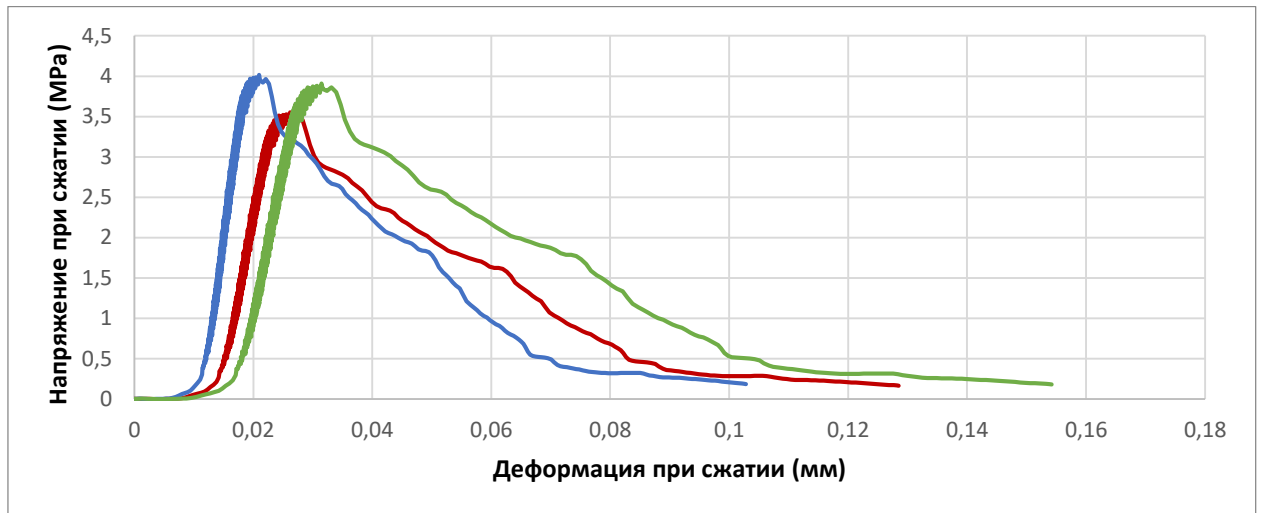


Рисунок 3.6 - Характер разрушения образцов геополимера возрастом 7 суток.

Установлено, что на седьмые сутки набора прочности образцы характеризуются пределом прочности на одноосное сжатие до 4 МПа в пластическом типе деформации, указывая на первоначальное упругое поведение материала до достижения критического предела, после чего начинается плавное пластическое искажение, ведущее к разрушению. Это свидетельствует о том, что материалу не хватило времени для полного схватывания и набора максимальной прочности.

При увеличении возраста до 14 суток предел прочности на сжатие удваивается по сравнению с образцом в возрасте 7 суток, возрастая с 4 до 8 МПа (рис. 3.7).

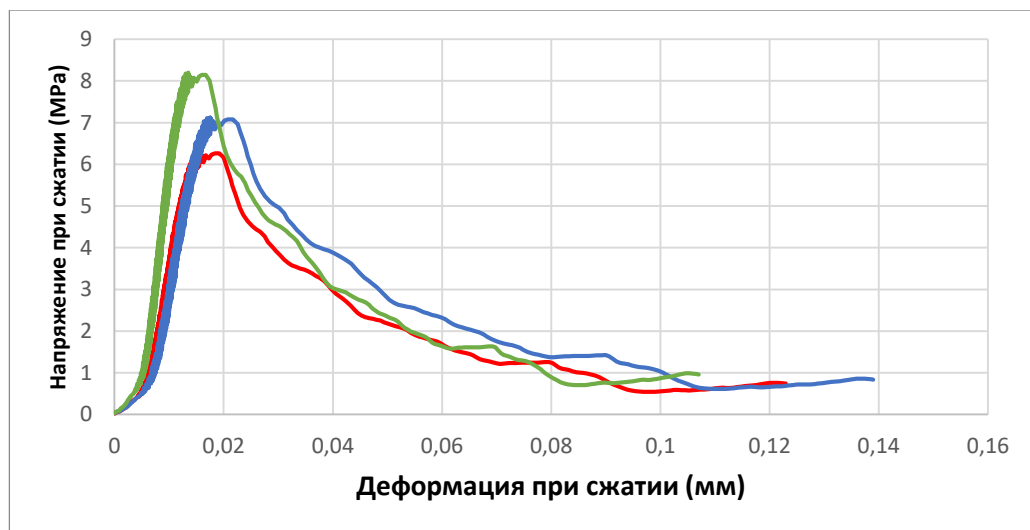


Рисунок 3.7 - Характер разрушения образцов геополимера на 14 сутки набора прочности

Это свидетельствует о положительной динамике в наборе прочностных свойств со временем. Изменения и тенденции, ставшие очевидными после двух недель, подтверждаются визуальным сравнением: на рисунке 3.7, в отличие от рисунка 3.6, заметно, что разрушение образцов, выдержанных 14 суток, демонстрирует переход от пластичного к хрупкому характеру.

На 30 сутки набора прочности образцами значение предела прочности составляет 15,9 МПа. Характер и форма разрушения кубических образцов с образованием конусов (трещин скалывания), испытанных на 30 сутки набора прочности, свидетельствует о хрупком механизме разрушения (рис. 3.8), что также подтверждается кривыми нагружения, представленными на рис. 3.9.

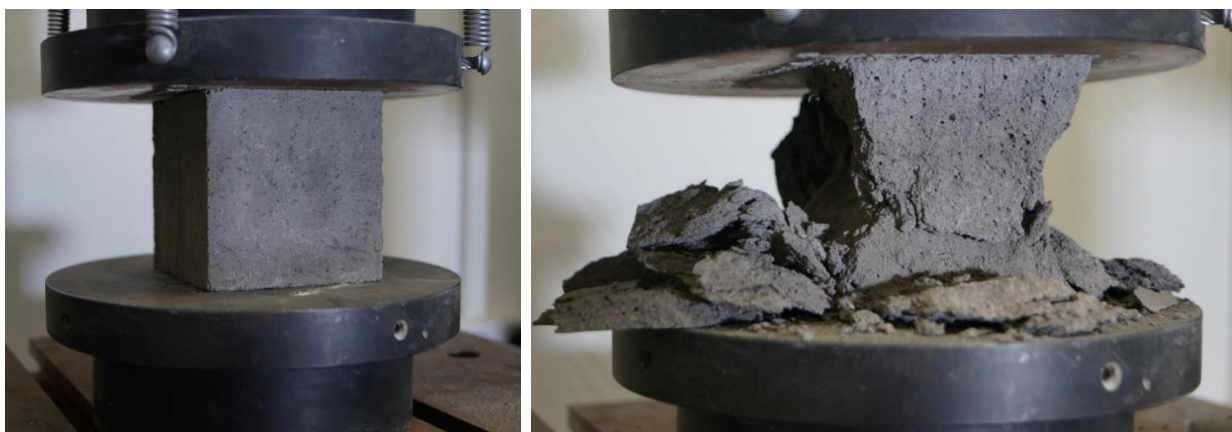


Рисунок 3.8 - Характер разрушения кубического образца при одноосном сжатии на 30 сутки твердения

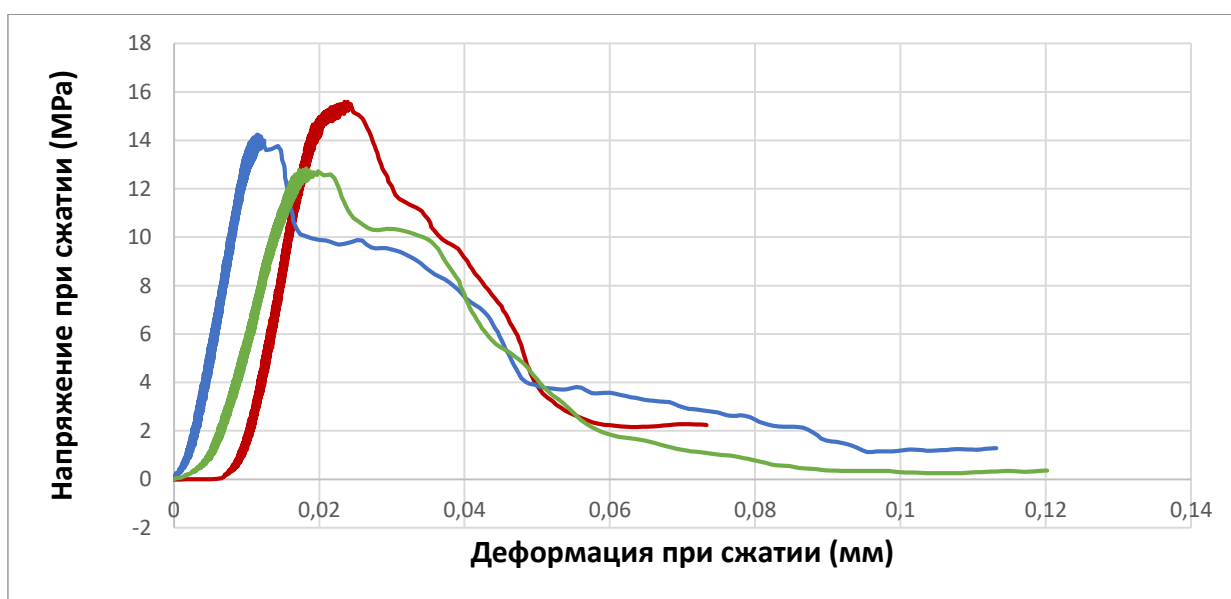


Рисунок 3.9 - Кривые нагружения образцов геополимера в возрасте 30 сут.

Последующие испытания образцов геополимерных составов на сжатие были проведены по истечению 60 и 90 суток после замешивания. График деформирования образцов под нагрузкой в возрасте 60 сут. приведен на рисунке 3.10. По истечению 90 сут. прочность образцов аналогична 60 сут.

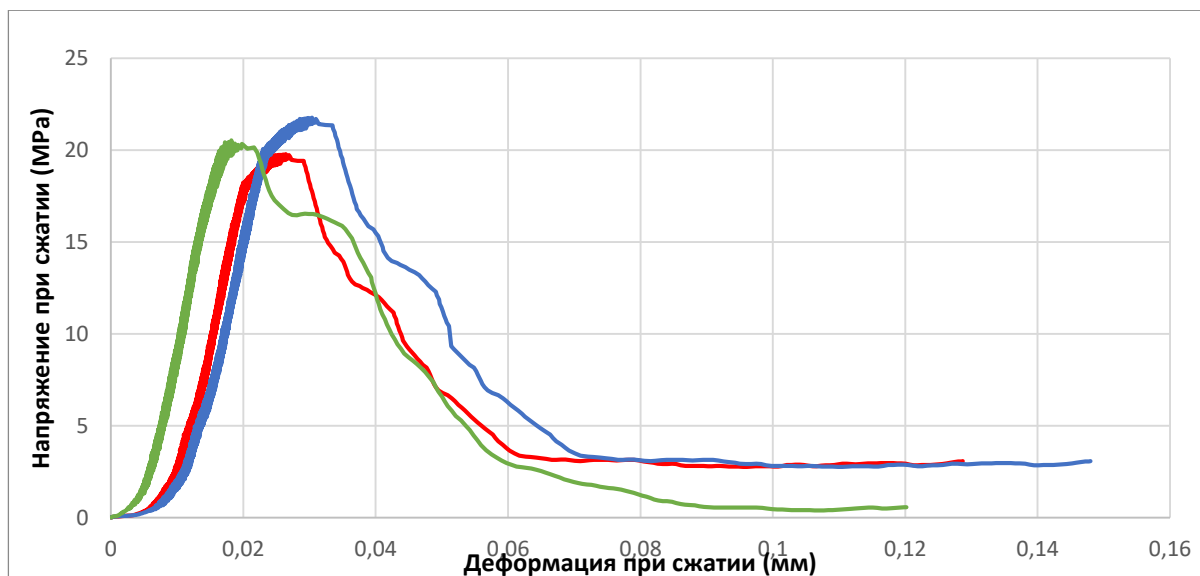


Рисунок 3.10 - Кривые нагружения образцов геополимера в возрасте 60 сут.

Анализ данных рис. 3.10 свидетельствует, что пиковое значение, соответствующее максимальному напряжению при сжатии, составляет 21,76 МПа.

В целом, уже с 14 сут. наблюдается хрупкий характер деформирования образцов. Такое разрушение характеризуется незначительной деформацией до момента разрушения и внезапным разрушением после достижения предела прочности, что свидетельствует о достаточной степени набора прочности для формирования прочных горнотехнических конструкций.

В целом, прочность образцов в возрасте 60 суток является сверх достаточной для формирования изолирующих конструкций, однако изучение максимальных возможных показателей требуют дополнительной длительной серии экспериментов. Модуль деформации для образцов на основе рассчитанного состава на 7 сутки составил 135 МПа, а на 60 сутки достигал 775 МПа.

Эксперимент, направленный на определение предельного объема добавления крупнокусковой фракции, который можно интегрировать в геополимерный состав без существенного снижения прочности и на деформационных характеристиках, требуемых по фактору устойчивости днищ камер при реализации технологии подземного блочного выщелачивания некондиционных руд, показал, что для образцов с длиной ребра 70 мм максимальный размер крупнокусковой фракции для проведения испытаний не должен превышать 20 мм в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», в связи с чем для приготовления смеси была отсеяна фракция +20мм. Гранулометрический состав крупнокускового заполнителя, используемого для приготовления смеси представлен на рисунке 3.11.

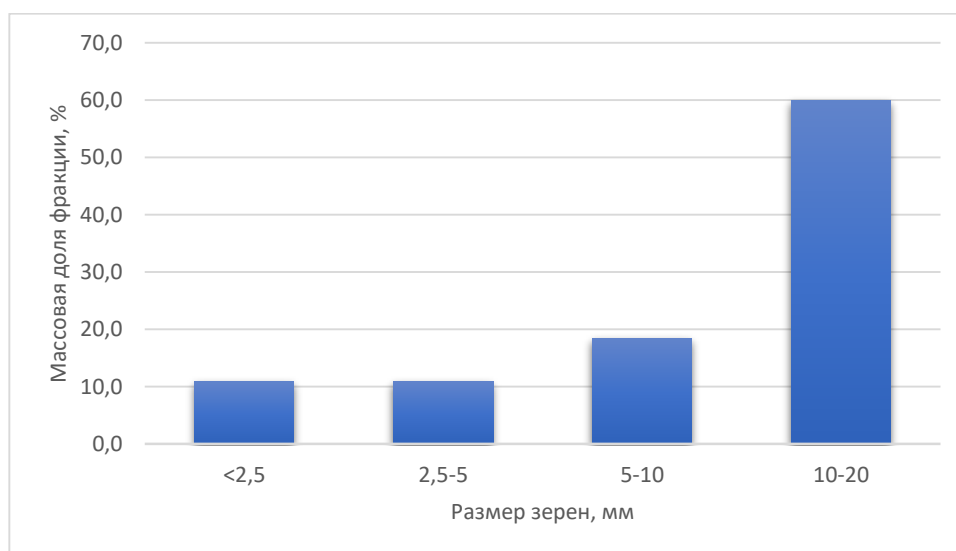
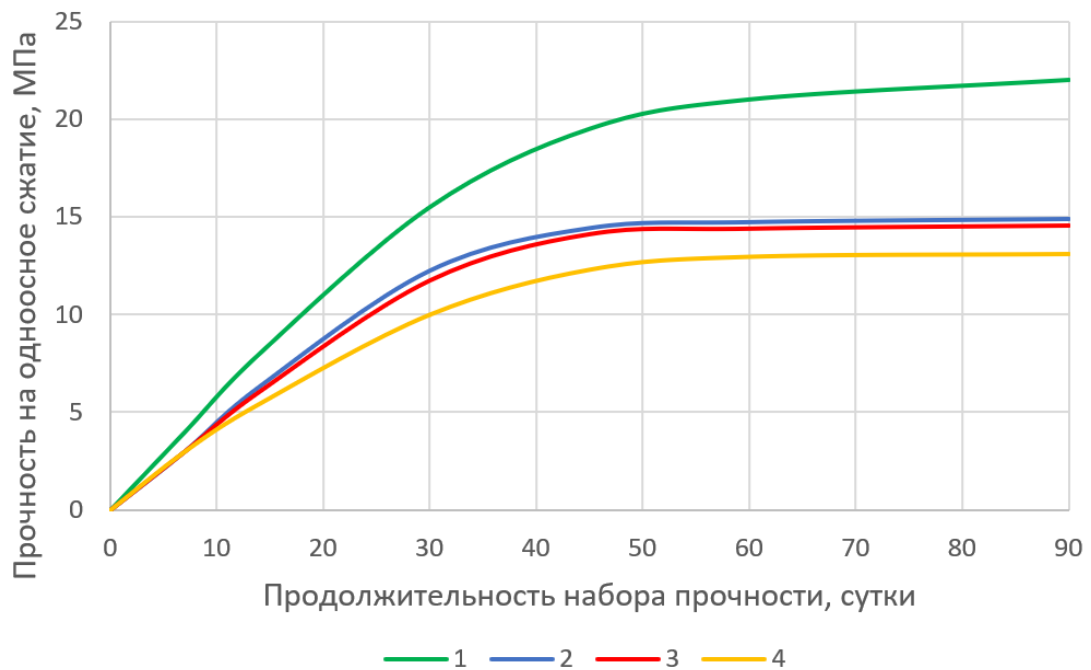


Рисунок 3.11 - Гистограмма распределения зерен крупнокусковой фракции по размерам.

В результате эксперимента установлено, что добавление в геополимерный состав крупнокусковой фракции, представленной вмещающими породами-дацитами, в объёмном отношении 10, 25, 50 %, ведет к снижению прочности образцов в возрасте 14 суток в 1,4 раза, а в возрасте 60 суток в 1,5 по сравнению с составами на основе геополимера без крупнокусковой фракции (только рецептурный состав), который характеризуются прочностью 19,8-22 МПа в возрасте 60 суток. (рис. 3.12)

а)



б)

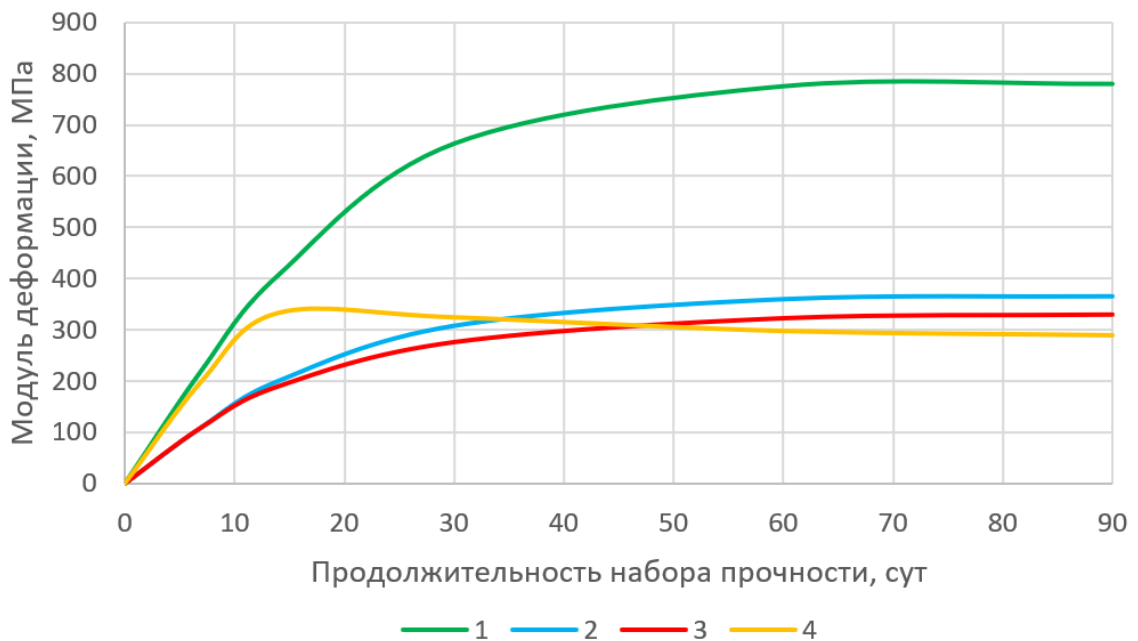


Рисунок 3.12 - Динамика набора прочности образцами геополимера на основе дацитов(а) и средние значения модуля деформации при одноосном сжатии (б): 1 – геополимерный массив; образцы с содержанием крупнокусковой фракции: 2 – 10%; 3 – 25%; 4 – 50%.

Установлено, что добавление крупнокусковой фракции оказывает значимое влияние на прочностные и деформационные характеристики, требуемые по фактору устойчивости днища камеры при реализации

технологии выщелачивания в камерах (рис. 3.12,б). Вместе с тем, добавление до 50% крупнокусковой фракции от объёма позволяет получить высокие прочностные характеристики формируемых конструкций, свыше 13 МПа и модуль деформации, свыше 290 МПа (рис. 3.12,а), что достаточно для формирования и эксплуатации днищ камер из геополимеров.

Вопрос долговременной прочности, особенно в условиях воздействия агрессивных сред, например, серной кислоты, является основным в технологии изоляции камер выщелачивания, в связи с чем проведены отдельные исследования оценки устойчивости материала к воздействию агрессивных сред.

3.3. Результаты испытаний кислото- и термостойкости массивов

Как было отмечено в главе 2, кислотостойкость изолирующих материалов, применяемых при реализации технологии подземного блочного выщелачивания, определяется сохранением требуемых прочностных и гидроизолирующих свойств в условиях влияния агрессивных сред. Важное значение при эксплуатации камер-реакторов имеет сохранность первоначальной структуры днищ блоков, исключающей формирование открытых пор и растворопроводящих трещин. В связи с чем выполнено исследование убыли массы образцов геополимерных материалов на основе дацитов в условиях длительной выдержки в 10%-ом растворе серной кислоты. Согласно методике, извлеченные на 14, 30 и 60 сутки из раствора образцы высушивались до постоянной массы. Установлено, что все образцы характеризуются незначительной убылью массы, не превышающей 0,7% даже на длительных сроках выдержки в кислоте (табл. 3.5). Анализ данных свидетельствует, что с течением времени изменение массы и водонасыщение образцов не прогрессируют, что свидетельствует о формировании на

поверхности образцов защитного слоя, который препятствует проникновению кислоты в материал.

Таблица 3.5 - Результаты оценки убыли массы образцов после выдержки в растворе H_2SO_4 в динамике

№ п/п	T, сут	m ₁ , г	m ₂ , г	Убыль массы, %
1	14	28,56	28,43	0,455
2	14	24,52	24,43	0,367
3	14	27,01	26,87	0,518
4	30	22,81	22,71	0,438
5	30	26,35	26,24	0,418
6	30	16,67	16,56	0,660
7	60	18,5	18,39	0,595
8	60	16,26	16,16	0,615
9	60	18,9	18,82	0,423

Важное значение, определяющее эффективное функционирование камер выщелачивание, играет прочность изолированных днищ блоков, определяющая их способность выдерживать динамические нагрузки при загрузке камеры рудной массой и ее длительном функционировании в условиях влияния агрессивных сред. Проведенное в соответствии с методикой исследование прочностных характеристик образцов, выдержанных на протяжении одного, двух и трех месяцев в серной кислоте концентрацией 57 г/л показало, отсутствие негативного разупрочняющего воздействия на образцы (рис. 3.13). Данные на фото убедительно свидетельствуют о сохранении первоначальной формы и структуры образцов.



Рисунок 3.13 - Образцы геполимеров на основе дацитов после выдержки в 10% H_2SO_4 в течение 90 суток

Установлено, что прочность на одноосное сжатие образцов, выдержанных в 10% H_2SO_4 на протяжении 30 суток, составила 22,4 МПа, что даже превышает значения, полученные для образцов, не подверженных воздействию агрессивных сред. Увеличение прочности может быть связано с процессами рекристаллизации или полимеризации материала под действием кислоты, что требует дополнительных исследований. Анализ кривых нагружения свидетельствует о значительном снижении под воздействием серной кислоты развития пластических деформаций в образцах под нагрузкой с повышением прочности на одноосное сжатие (рис. 3.14).

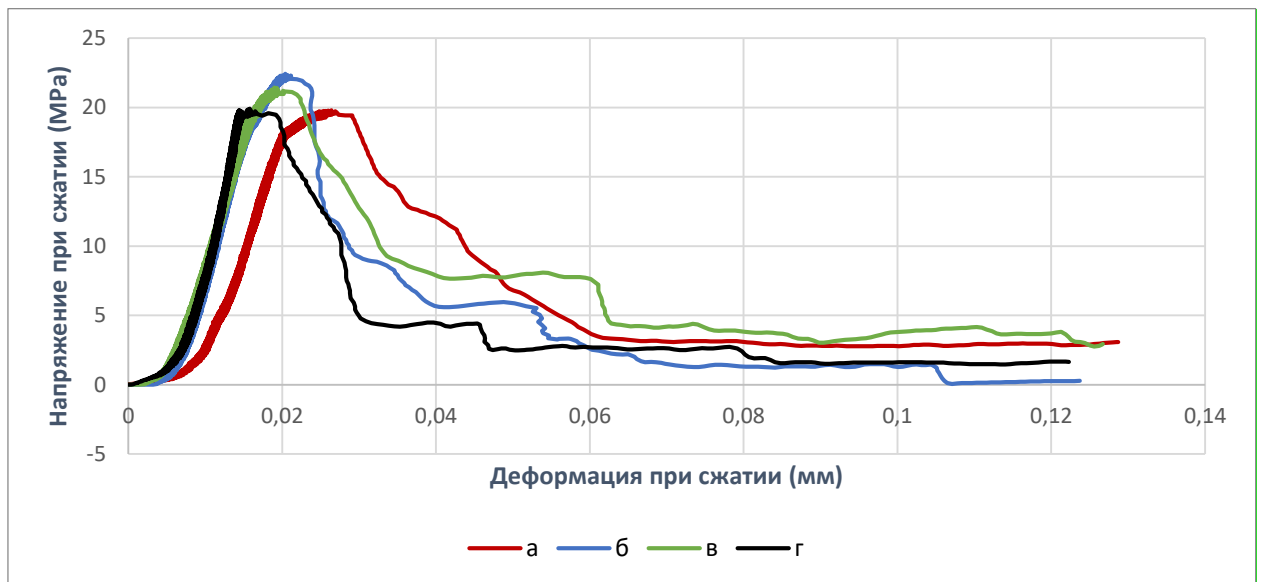


Рисунок 3.14 - Кривые нагружения образцов: а – не подверженного воздействию H_2SO_4 ; после выдержки в H_2SO_4 в течение: б – 30 суток; в – 60 суток; г – 90 суток.

Анализ данных рис. 3.14 позволяет сделать вывод, что все образцы достигают сопоставимой прочности (19,9–22,4 МПа), что свидетельствует о высокой устойчивости материала к воздействию агрессивной среды. Данные рис. 3.14 демонстрируют схожий общий вид кривых, указывая на однородность материала и его поведение под нагрузкой.

Изучение влияния воздействия раствора серной кислоты на гидроизоляционные свойства геполимерного материала, исключаящие

негативное гидрогеохимическое воздействие растворов выщелачивания на окружающую среду, производилось методом сравнения характера водонасыщения образцов, подверженных и не подверженных воздействию агрессивных сред. (табл. 3.6)

Таблица 3.6. Результаты оценки водонасыщения образцов

№п/п	Продолжительность выдержки в растворе H_2SO_4 , сут	Средние значения, г		Водопоглощение, %
		m_1	m_2	
1	Без выдержки	606,35	611,24	0,8
2	30	589,75	595,14	0,91
3	60	552,85	558,39	0,99
4	90	575,56	579,89	0,75

Исследованиями доказано, что даже при выдержке образцов в растворе H_2SO_4 концентрацией 10% в динамическом режиме в течение 30, 60, 90 сут значительного снижения их прочности не происходит, а водонасыщение составляет менее 1%, что говорит о высокой кислотостойкости и пригодности таких конструкций для условий подземного блочного выщелачивания.

Риск саморазогрева массива сульфидных руд, а также возможность реализации в подземных камерах высокотемпературного режима выщелачивания во многом определяется устойчивостью изолирующих конструкций камер воздействию высоких температур.

Обжиг образцов в возрасте 60 суток в соответствии с приведенной в главе 2 диаграммой задания режима работы печи при температуре $600^{\circ}C$ показал отсутствие снижения их начальной исходной прочности на одноосное сжатие. В среднем, значение прочности для образцов, подверженным воздействию высоких температур, составило 22МПа. Пиковые значения напряжения лежат в пределах от 19,9 до 22,4 МПа, что соответствует среднему значению прочности в 22 МПа для образцов, которые не подвергались воздействию высоких температур в течение 60 суток (рис. 3.15).

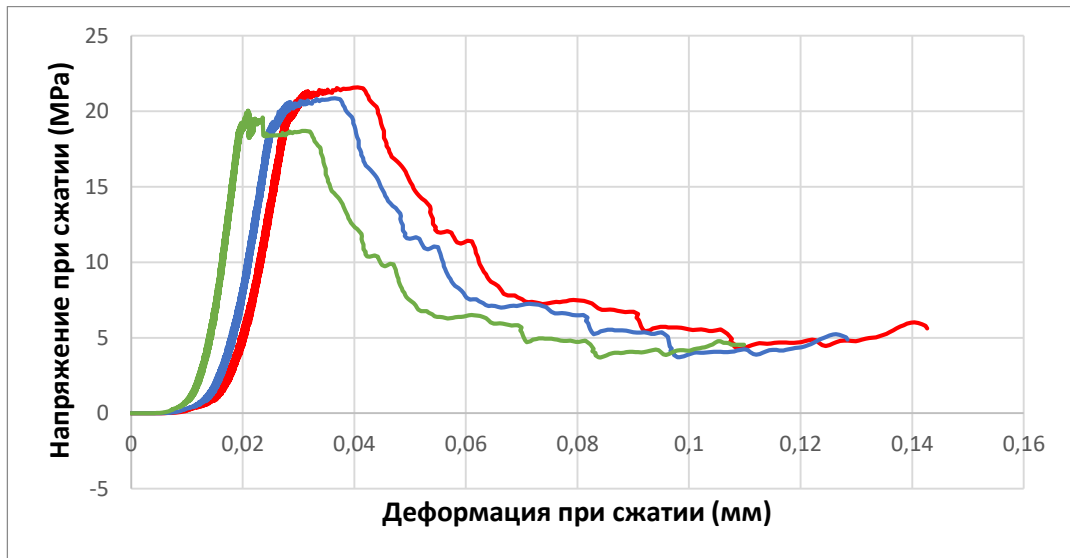


Рисунок 3.15 - Влияние температуры обжига на предел прочности при одноосном сжатии образцов в возрасте 60 суток

Таким образом доказано, что процесс высокотемпературного обжига не приводит к снижению прочности материала, подтверждая его термостойкость, что может быть важным фактором в условиях эксплуатации, где требуется высокая устойчивость к температурным воздействиям. Более того, анализ характера разрушения образцов не подверженных термообработке и после обжига свидетельствует об упрочняющем эффекте термического воздействия

Разрушение образцов происходит по трещинам скола с вертикальными трещинами, что указывает на малую пластичность материала. Характер разрушения — конусообразный выход трещин в центральной части образца, что является характерным для хрупких материалов при сжатии (рис. 3.16). Такой тип разрушения свидетельствует о том, что сопротивление материала деформации преимущественно обусловлено его прочностью на сжатие, а не способностью к пластическому течению.



Рисунок 3.16 - Характер разрушения кубического образца при одноосном сжатии на 60 сутки твердения после обжига при температуре 600⁰С

В целом, выполненные исследования позволяют утверждать, что геополимерные закладочные массивы в достаточно короткие сроки, 60 суток, обеспечивают набор прочности свыше 20 МПа. Кроме того, они устойчивы к воздействию кислоты и практически не подвержены термическому воздействию. Это свойство делает их подходящим для использования в условиях агрессивных сред, так как сохраняется их структурная целостность и функциональные характеристики. В технологическом плане это означает возможность своевременного планирования и подготовки камер выработанного пространства с сохранением структурной целостности для выщелачивания без конвергенции. Обязательным условием при этом является максимально возможное сокращение сроков отставания закладочных работ от очистных, что позволит вести работы по возведению геополимерного массива в максимально безопасных условиях. Однако возможность комбинации традиционной подземной добычи и выщелачивания требует детальной проработки еще на этапе проектирования таких горнотехнических систем.

3.4. Алгоритм обоснования параметров технологии изоляции камер выщелачивания

Перспектива реализации технологии блочного выщелачивания руд в специальных камерах в комбинации с традиционной камерной подземной добычей системами разработки с закладкой выработанного пространства возможна при принципиально новом подходе к первоначальной оценке и проектированию таких горнотехнических систем, рассматривающем вмещающие породы месторождений не в качестве отходов производства, а одного из основных материалов для производства изолирующих конструкций камер выщелачивания. Алгоритм обоснования параметров технологии изоляции камер для сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов представлен на рис. 3.17.

Так, на этапе геологической оценки необходимо выделение вмещающих пород, распространенных в границах участка, отвечающих требованиям к прекурсорам для формирования геополимерных массивов с подсчетом их объемов и отбором проб для лабораторных исследований. В лабораторных условиях производится исследование вмещающих пород месторождения для оценки возможности формирования на их основе геополимерных массивов, включая оптико-минералогические исследования с установлением наличия в составе аморфной фазы и количественным ее определением в ходе количественных химического и минералогического анализа в соответствии с методикой, представленной в главе 2. На следующих этапах производится расчет состава геополимера, оценка свойств получаемых массивов, требования к которым определяются планируемой технологией выщелачивания: исследование прочностных характеристик, гидронепроницаемости, устойчивости к агрессивным средам в соответствии с характеристиками применяемых при выщелачивании растворителей и режимами выщелачивания, термостойкости. Возможность получения геополимерных массивов на основе вмещающих пород месторождения имеет

определяющее значение при оценке целесообразности реализации технологии блочного выщелачивания.

При недостаточной реакционной способности вмещающих пород в качестве добавки-активатора необходимо рассмотреть возможность применения местного алюмосиликатного сырья (глины, песок, метакеолинит) или отходов близлежащих производств, такие как золы-уноса, гранулированный шлак и т.д. При значительных объемах производства смеси требуется изыскание возможности производства дешевого реагента в условиях промышленной площадки рудника.

Кроме того, меняются требования к качеству полезного ископаемого при выделении рудных зон с учетом возможности вовлечения в эксплуатацию низкосортных руд. На этапе подсчета запасов производится дифференциация рудных зон по сортам в зависимости от наиболее эффективной технологии их отработки: традиционным подземным способом с последующим обогащением или технологией камерного выщелачивания. Объем рудной массы, подвергаемой в дальнейшем подземному выщелачиванию, является ключевым показателем, определяющим необходимые объемы рабочего пространства камер-реакторов, геометрические параметры которых устанавливаются по факторам устойчивости обнажений и требуемой производительности. С учетом напряженного состояния массива в области ведения работ производится расчет требуемых прочностных характеристик днищ камер, которые учитываются, в том числе, для подсчета объемов геополимерной смеси с оценкой возможности ее частичного замещения крупнокусовой фракцией.

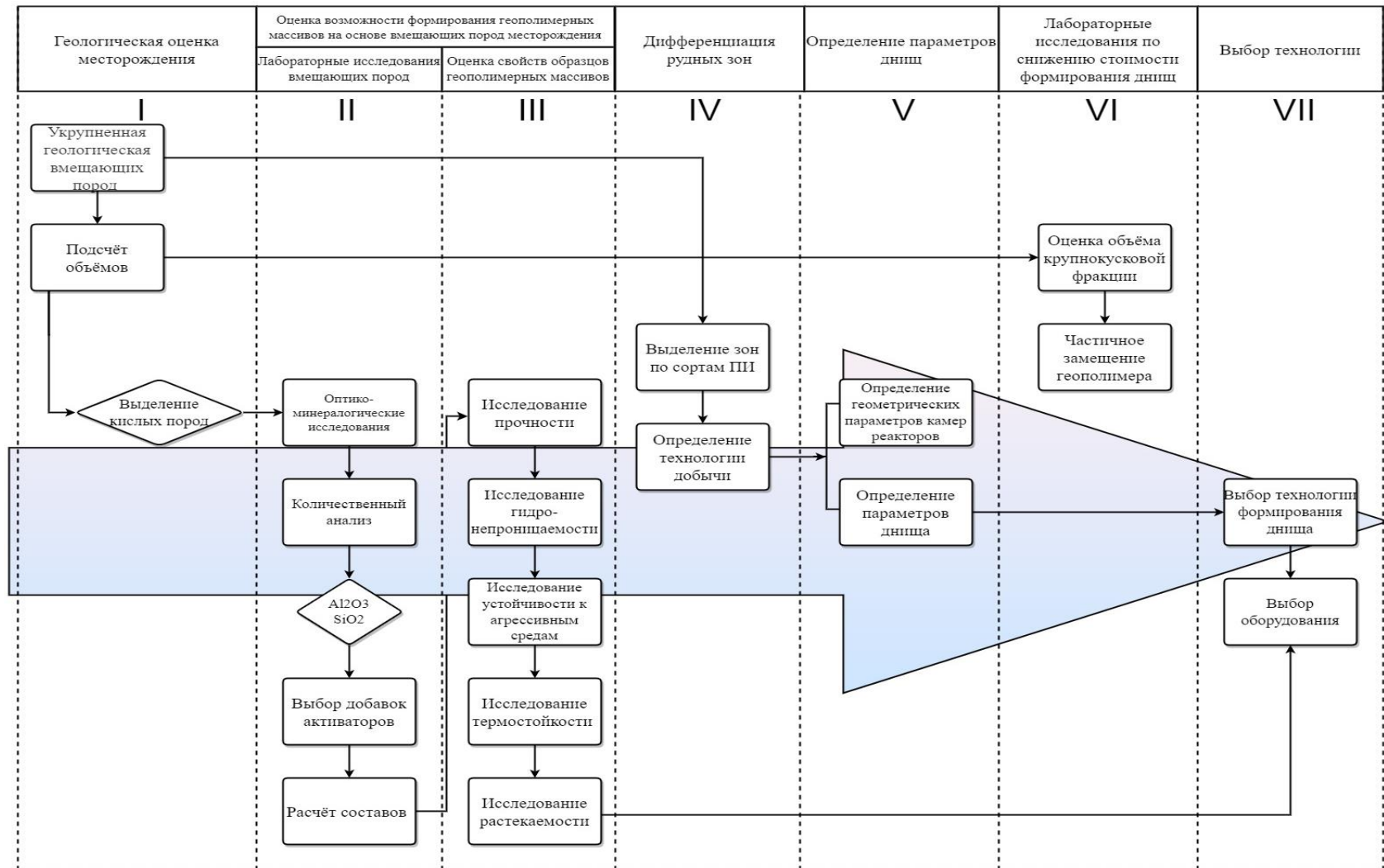


Рисунок 3.17 - Алгоритм обоснования параметров технологии изоляции камер для сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов

Проведенная оценка требуемых объемов днищ камер и их прочностных свойств ложится в основу лабораторных исследований возможности снижения стоимости возведения днища путем частичного замещения геополимерной смеси крупнокусковой фракцией. Определяется максимально возможный объем крупнокусковой фракции в составе массива с сохранением требуемых прочностных характеристик и свойств, определяемых применяемой технологией выщелачивания. Следующим этапом производится расчет всех компонентов смеси для заполнения требуемых объемов: вмещающих пород для геополимерной смеси и крупнокускового заполнителя, жидкого реагента и, при необходимости, высокореактивного алюмосиликатного сырья.

Обеспечение требуемых объемов пород для создания непосредственно геополимерной смеси обеспечивается в ходе подготовительно-нарезных работ и может, при необходимости, быть увеличено за счет выбора направлений проходки выработок по определенным породам и намеренной прирезки пустых пород с целью использования их в качестве компонентов смеси. Крупнокусовая фракция в составе смеси может быть представлена как породами, участвующими в геополимеризации, так и другими породами месторождения с предварительной оценкой характера их взаимодействия с геополимерной смесью и выщелачивающими реагентами.

Выводы по главе 3

1. На основе комплекса аналитических и экспериментальных исследований выполнено обоснование оптимального состава геополимерной смеси на основе дацитов, отклонение от которого ведет к значительному ухудшению свойств полученных массивов, свидетельствующее об отсутствии геополимерной реакции. Обеспечена сходимость результатов теоретических расчетов состава геополимера с результатами экспериментальных исследований.

2. Для оценки возможности использования геополимерной смеси на основе дацитов при создании камер выщелачивания с применением передвижных закладочных комплексов были изучены показатели растекаемости, измеряемые по диаметру пятна расплыва на вискозиметре Суттарда. Определено, что полученная геополимерная смесь, отвечает технологическим требованиям к формированию литых массивов и может быть приготовлена с их помощью и подана в выработанное пространство.

3. Доказано, что прочность геополимерных образцов в возрасте 60 суток является сверх достаточной для формирования изолирующих конструкций, однако изучение максимальных возможных показателей требуют дополнительной длительной серии экспериментов.

4. Установлено, что добавление в геополимерный состав крупнокусковой фракции, представленной вмещающими породами-дацитами, в объёмном отношении 10, 25, 50 %, ведет к снижению прочности образцов в возрасте 14 суток в 1,4 раза, а в возрасте 60 суток в 1,5 по сравнению с составами на основе геополимера без крупнокусковой фракции (только рецептурный состав), который характеризуются прочностью 19,8-22 МПа в возрасте 60 суток. Добавление крупнокусковой фракции оказывает значимое влияние на прочностные и деформационные характеристики, требуемые по фактору устойчивости днища камеры при реализации технологии выщелачивания в камерах. Вместе с тем, добавление до 50% крупнокусковой фракции от объёма позволяет получить высокие прочностные характеристики формируемых конструкций, свыше 13 МПа и модуль деформации, свыше 290 МПа, что достаточно для формирования и эксплуатации днищ камер из геополимеров.

5. Установлено, что прочность на одноосное сжатие образцов, выдержанных в 10% H_2SO_4 на протяжении 30 суток, составила 22,4 МПа, что даже превышает значения, полученные для образцов, не подверженных воздействию агрессивных сред. Увеличение прочности может быть связано с

процессами рекристаллизации или полимеризации материала под действием кислоты, что требует дополнительных исследований.

6. Исследованиями доказано, что даже при выдержке образцов в растворе H_2SO_4 концентрацией 10% в динамическом режиме в течение 30, 60, 90 сут значительного снижения их прочности не происходит, а водонасыщение составляет менее 1%, что говорит о высокой кислотостойкости и пригодности таких конструкций для условий подземного блочного выщелачивания.

7. Доказано, что обжиг образцов в возрасте 60 суток при температуре $600^{\circ}C$ показал отсутствие снижения их начальной исходной прочности на одноосное сжатие. В среднем, значение прочности для образцов, подверженным воздействию высоких температур, составило 22 МПа. Пиковые значения напряжения лежат в пределах от 19,9 до 22,4 МПа, что соответствует среднему значению прочности в 22 МПа для образцов, которые не подвергались воздействию высоких температур в течение 60 суток. Это снижает риск разупрочнения массива в ходе саморазогрева сульфидных руд, а также обеспечивает возможность реализации в подземных камерах высокотемпературного режима выщелачивания.

8. Определено, что при комбинированной геотехнологии подземной добычи руд и выщелачивания выбор направлений использования вмещающих пород, в том числе, с участков проходки горных выработок, должен осуществляться после оценки содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии изоляции подземных камер для выщелачивания руд цветных металлов.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

4.1 Разработка технологических рекомендаций по выбору конструктивных параметров камер выщелачивания с учетом изоляции ответственных конструкций

Создание в недрах земли в ходе подземной разработки месторождений гидроизолированных камер на основе геополимерных материалов, устойчивых к агрессивным средам, обеспечивает все условия для эффективной переработки бедных руд, не кондиционных по экономическим условиям (например, добыча на глубоких горизонтах), либо труднообогатимых. Причем, загрузка камер дробленным продуктом, например, с использованием оборудования подземных передвижных закладочных комплексов, обеспечивает возможность высокого извлечения ценных компонентов даже из весьма бедного сырья.

В варианте разработки мощных рудных месторождений системами разработки с закладкой выработанного пространства камера для подземного выщелачивания выполняется в виде горнотехнической конструкции, включающей стенки на основе твердеющей смеси, упрочненное днище полностью на основе геополимера или в качестве изолирующего слоя, обустроенное веерами скважин для подачи газов и отвода растворов, процесс создания которых представлен на рис. 4.1.

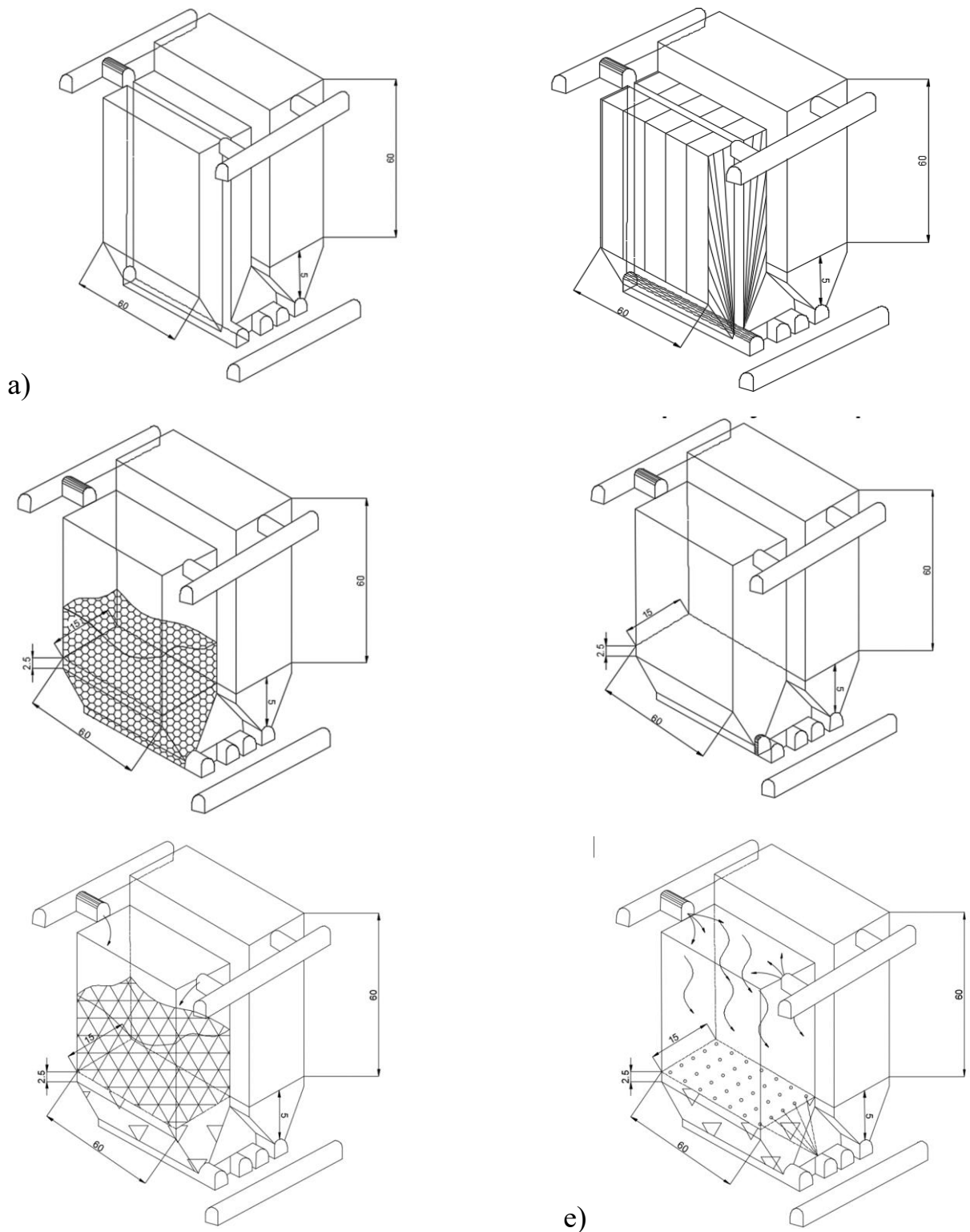


Рисунок 4.1 – Последовательность создания камер выщелачивания с формированием изолирующей конструкции в днище: а - подготовительно-нарезные работы; б – отбойка руды; в - выпуск и доставка руды; г - установка перемычек и возведение упрочненного днища; д - загрузка камеры дробленой рудой; е - ввод камеры в эксплуатацию.

Требования к составам смесей и формируемых на их основе ограждающих (изолирующих) конструкций дифференцируются на этапе

проектирования в зависимости от применяемых агрессивных сред выщелачивания, конструктивных параметров систем подземной разработки и напряженно-деформированного состояния массива на конкретном участке создания горнотехнической конструкции. Выбор способа изоляции днища камеры определяется экономическим обоснованием.

Вариант системы разработки, применяемой для выемки балансовых запасов, является главным критерием при выборе конструкции камеры для выщелачивания. Так, на мощных рудных месторождениях, разрабатываемых камерными системами разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства, после выемки руды и закладки камер 1 очереди, производят выемку камер второй очереди (рис. 4.2). Сформированное выработанное пространство на месте извлеченных запасов камер 2 очереди должно рассматриваться как побочный полезный эффект. Для его многофункционального использования выработанных пространств в камерах второй очереди возводят упрочненное днище камеры путем подачи закладочной или геополимерной смеси из заездов вышележащего горизонта. Камеру загружают рудой, подлежащей выщелачиванию. В зависимости от задаваемых режимов работы камеры-реактора выделяются высоко-, либо низкотемпературные режимы предварительного окисления и один режим активного выщелачивания.

При низкотемпературном окислении днище камеры обушивается скважинами для подачи в массив окисляющих газов (воздуха) и сбора растворов. Скважины, либо только устья скважин, обсаживают. В камеру-реактор после предварительного возведения и изоляции днищ подают:

- снизу – необходимое количество окисляющего газа, главным образом, воздуха. Возможна, либо предпочтительная подача сжатого воздуха из общешахтной сети сжатого воздуха;
- сверху – выщелачивающий раствор необходимой температуры, содержащий интенсифицирующие химические добавки, либо биохимические

(штаммы бактерий, архей и т.п.), способствующие интенсификации процесса выщелачивания, либо комплекс методов воздействия.

Преимуществом комбинации подземной добычи с камерным выщелачиванием является возможность длительного, исчисляемого годами, предварительного окисления. Ввиду длительности низкотемпературного окисления, работу камеры-реактора могут осуществлять в дискретном режиме. Дискретными могут быть такие технологические процессы, как: подогрев растворов, промывка, подача растворов иного химического состава для растворения пленок, подача культур микроорганизмов, подача окисляющих газов, подача горячих газов, подача иных газов. После длительного низкотемпературного окисления сульфиды, например, переходят, преимущественно, во вторичные сульфиды и сульфатные формы, являющиеся легкорастворимыми.

В режиме высокотемпературного окисления в камера-реактор работает в «сухом» режиме, с подачей в сформированный в камере массив окисляющих газов, как правило, кислородсодержащих. При этом температура в камере поддерживается 200⁰С и выше для обеспечения интенсивности фазовых переходов. По мере высокотемпературного окисления из верхней части камеры (заезды) осуществляют отвод отходящих газов, содержащих серу с получением серной кислоты известными способами. Серную кислоту в дальнейшем используют при работе камеры-реактора в режиме выщелачивания. Работа камеры-реактора при этом непрерывна, до достижения требуемой степени окисления минералов и фазовых переходов.

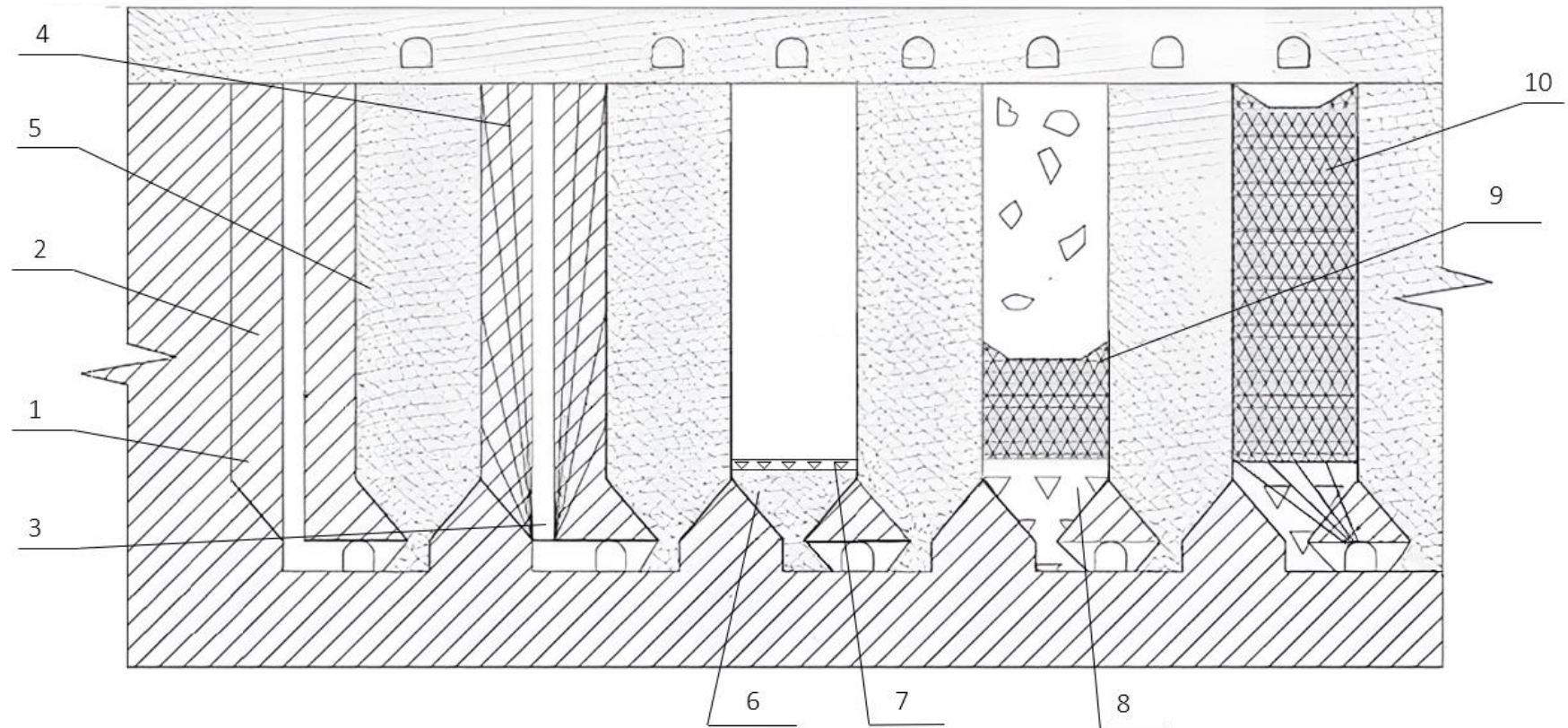


Рисунок 4.2 – Последовательность формирования камер выщелачивания с различными вариантами оформления изолирующих конструкций в их основании. 1 – рудный массив; 2 – отрезной восстающий; 3 – отрезная щель; 4 – веера скважин; 5 – закладочный массив; 6 – днище на основе закладочного материала, изолированного геополимером 7 (см. кл. II, группа 1, табл. 2.1); 8 – изолирующая конструкция на основе геополимера (см. кл. I, группа 1, табл. 2.1); 9 – дробленая рудная масса, загружаемая в камеру; 10 – камера, загруженная рудной массой для выщелачивания с дном, обустроенным технологическими скважинами

В режиме низкотемпературного окисления (до 200⁰С) подача окисляющих газов осуществляется снизу, а растворов требуемого состава, содержащих интенсифицирующие окисление химические, либо биохимические добавки – сверху, из заездов вышележащего горизонта. Температура и интенсивность подачи окисляющих газов в массиве окисляемой руды определяется требованиями к протеканию химических реакций, либо обеспечения нормальной жизнедеятельности микроорганизмов в аэробном, либо анаэробном режиме. Ввиду длительности низкотемпературного окисления работа камеры-реактора может осуществляться в дискретном режиме (периодический подогрев растворов, промывка, подача растворов иного химического состава для растворения пленок, подача культур микроорганизмов, подача окисляющих газов, подача горячих газов, подача иных газов).

В режиме активного выщелачивания осуществляют интенсивную подачу в массив сверху выщелачивающих растворов со сбором по системе скважин в днище богатых по металлам продуктивных растворов, которые являются товарной продукцией подземного выщелачивания. После прекращения выщелачивания камера-реактор либо дозакладывается под кровлю твердеющей смесью и, таким образом консервируется, либо разгружается. В последнем случае осуществляют взрывание днища и извлечение отходов после выщелачивания, причем для размещения зарядов взрывчатого вещества в днище используются ранее скважины, пробуренные для подачи газов и сбора растворов.

При разработке маломощных жильных рудных месторождений камеры выщелачивания предпочтительно формировать на вертикальных и крутонаклонных залежах. Предпочтительно создание более мощных камер выщелачивания путем прирезки вмещающих пород и отбойки разубоженной горной массы (рис. 4.3).

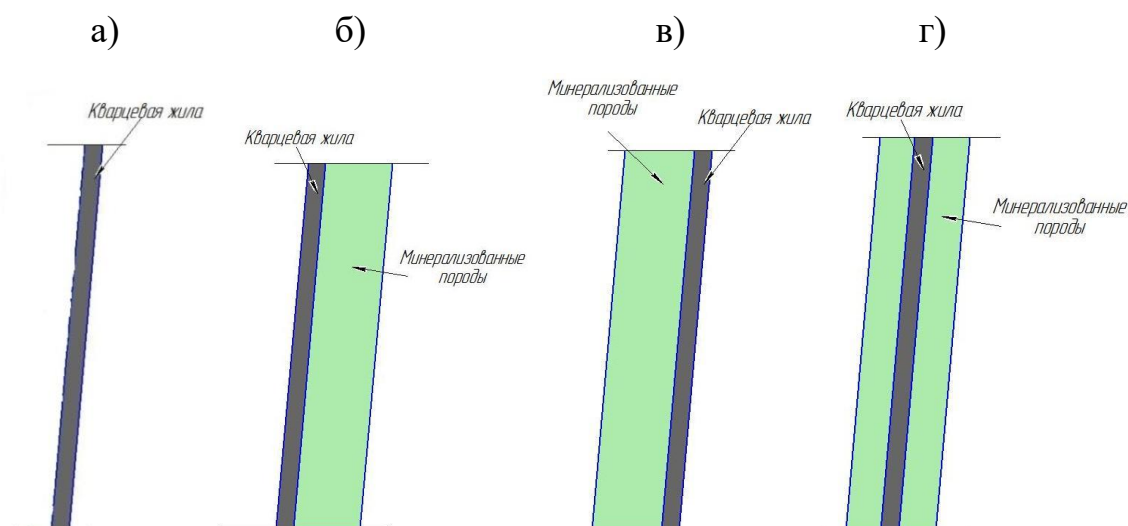


Рисунок 4.3 – Принцип создания мощных вертикальных камер для загрузки выщелачиваемым сырьем на жильных месторождениях путем прирезки минерализованных пород: а) жила без минерализованных вмещающих пород; б) в лежачем боку; в) в висячем боку; г) в висячем и лежачем боках.

В результате технология разработки месторождений состоит в отработке балансовых запасов и выдаче кондиционных руд на поверхность. Сформированное при этом выработанное пространство является компенсационным для отбойки минерализованных вмещающих жилу пород. Отбиваемые таким образом бедные некондиционные руды доставляются к заранее созданной камере для выщелачивания, куда загружаются после предварительного дробления до требуемой крупности на передвижном закладочном комплексе. В представленном на рис. 4.4. варианте отработка запасов ведется в восходящем порядке в пределах этажа. После отработки слоя системой подэтажных штреков проводятся закладочные работы и возводится разделительный целик. На нижнем этаже запасы отрабатываются с формированием выработанного пространства камеры для выщелачивания. В камере возводится упрочненное днище и после набора нормативной прочности камера загружается бедными некондиционными рудами из полевых заездов для последующего выщелачивания. Скважины для аэрации сформированного массива и сбора растворов проводятся из полевых выработок.

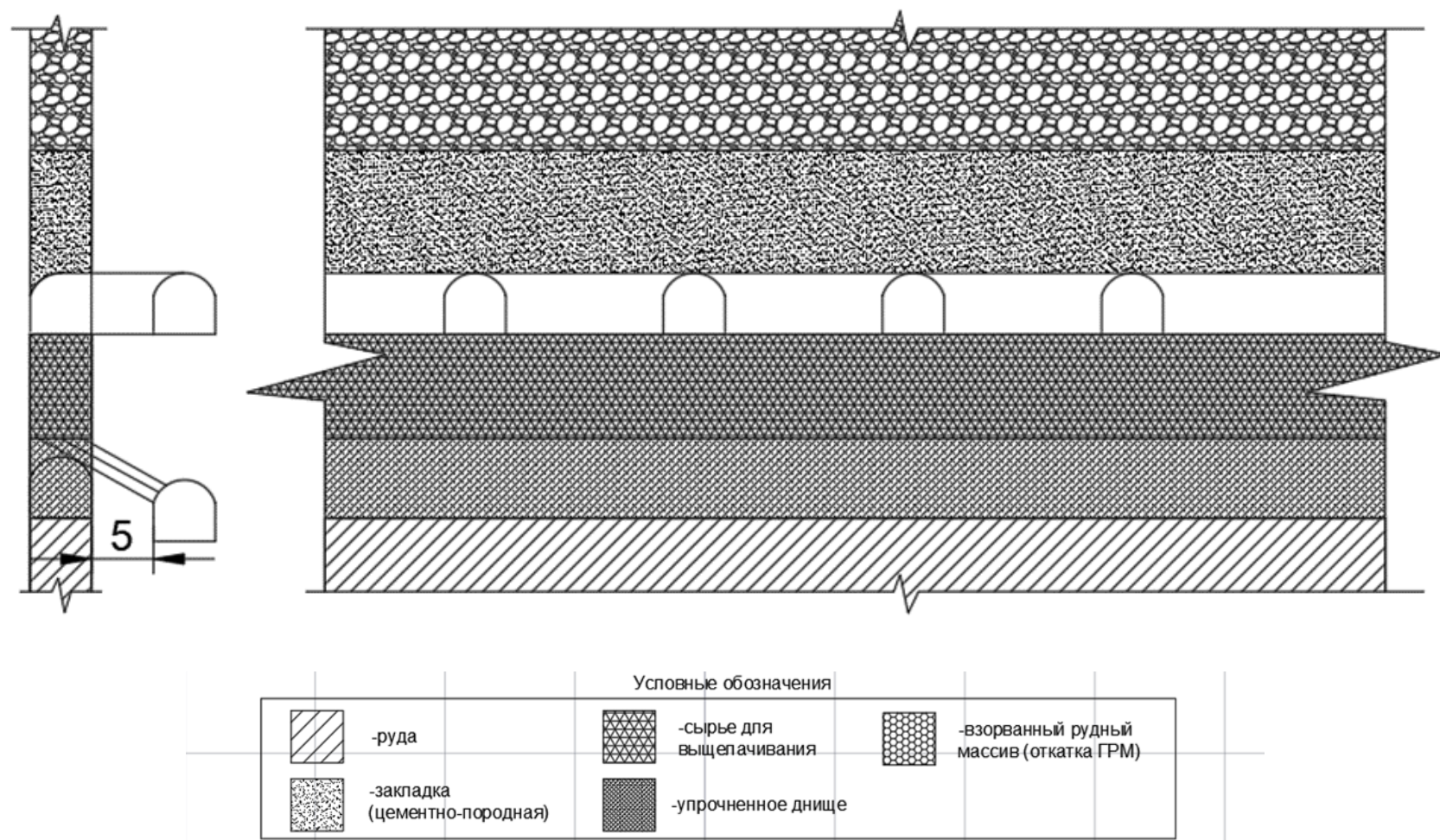


Рисунок 4.4 – Типовой вариант создания камер при разработке маломощных месторождений системами с закладкой

Последовательность ввода камер выщелачивания в эксплуатацию определяется стратегией, определенной на стадии проектирования. Предусмотрены параллельный или последовательный режимы ввода в эксплуатацию. Последний предусматривает ввод камер выщелачивания после отработки балансовых запасов при этом возможен условно-безлюдный режим работы рудника, когда орошение, сбор, циркуляция и выдача на поверхность продуктивных растворов осуществляются в автоматическом режиме. При этом очевидно, что необходима разработка комплексных решений к цифровизации технологий, сбору, анализу и обработке данных.

В условиях стремительной трансформации горного производства в сторону цифровизации, разработка и внедрение новых технологий и методов добычи полезных ископаемых должны производиться на базе диспетчеризации, цифровизации и оптимизации элементов этих систем и их взаимоувязки. Так, в результате проведенных исследований выделены и систематизированы наиболее значимые и требующие оперативного контроля параметры процессов подземного выщелачивания при комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологии (табл. 4.1).

Представленная в табл. 4.1 систематизация основана на выделении основных элементов горнотехнической системы, включающих наиболее важные физические объекты и процессы, способные выдавать большие объемы данных для анализа и обеспечения связи между ними, включая: природные и техногенные массивы, технологическую среду, технологическое оборудование и выработанное пространство.

Таблица 4.1 – Источники цифровых данных физико-химической геотехнологии

Источники данных	Массивы	Природные	Массив горных пород	Качество полезного ископаемого
		Техногенные	Сформированный массив для выщелачивания	Степень заполнения камеры рудной массой
				Температура массива
				pH раствора (в процессе выщелачивания
				Окислительно-восстановительный потенциал
				Состояние атмосферы в камере
				Степень уплотнения
			Днище камеры	Напряженно-деформированное состояние
			Целостность воздухоподающих и отводящих скважин	
		Искусственные целики, ограничивающие камеру выщелачивания	Целостность обнажений	
Источники данных	Технологическая среда	Шахтный воздух	Состав шахтного воздуха	
		Шахтные воды	Состав вод	
		Рудопотоки	Качество рудной массы	
			Гранулометрический состав	
		Маточные растворы	Химический состав	
		Продуктивные растворы	Химический состав	
	Оборудование	Погрузо-доставочные машины		
		Автосамосвалы		
		Орошающие устройства	Техническое состояние скважин и оборудования	
			Интенсивность орошения	
		Оборудование нагнетания воздуха в камеру	Дебит воздуха	
			Скорость движения воздуха	
			Технические показатели работы оборудования (давление, ...)	
		Система сбора и транспортирования продуктивных растворов	Дебит отводящих скважин	
			Техническое состояние скважин и оборудования	
	Выработанное пространство	Выработанное пространство камеры	Полнота выпуска	
		Вспомогательные горные выработки	Состояние горных выработок	

Оперативное получение данных об основных параметрах изолированных камер достигается путем внедрения в физические объекты датчиков различного назначения и конструкций, а также бесконтактных измерительных приборов.

Существенное значение при проектировании и эксплуатации системы подземной добычи руд и блочного выщелачивания ценных компонентов имеет оценка свойств, характеризующих такие техногенные массивы, как замагазинированная в камере руда, искусственное днище и стенки камеры

Продолжительность процесса и степень извлечения ценных компонентов из некондиционных руд и техногенного сырья определяют, в первую очередь, скорость и глубина проникновения реагента в массив рудной массы. Данные показатели в большей степени зависят от крупности руды, подаваемой в камеру-реактор, и количества металла в ней.

Существующее сегодня оборудование способно в полной мере обеспечить системы управления качеством минерального сырья необходимым набором данных о подаваемой в камеры рудной массе. Так, активно происходит внедрение в горнодобывающую промышленность репрезентативного элементного анализа транспортируемой руды в режиме реального времени [147]. Кроме анализаторов качества и минеральных особенностей рудной массы, существует также оборудование, способное определять размер куска, транспортируемого по конвейерной ленте с использованием новейших технологий 3D-камер, а также влажность движущейся массы.

Такие показатели функционирования камеры выщелачивания, как температура массива, pH раствора, окислительно-восстановительный потенциал, состав газов должны определяться путем внедрения в рудную массу и пространство камеры датчиков различного назначения. Также должно осуществляться наблюдение за характером контакта раствора реагента с рудой

с помощью приборов-влажномеров различных конструкций в специально оборудованных режимных скважинах.

Степень усадки рудной массы, во многом определяющая растворопроводимость массива, устанавливается с использованием технологий БПЛА и 3D-сканирования. Использование аналогичных технологий целесообразно, в том числе, при оценке целостности обнажений техногенных массивов, ограничивающих камеры выщелачивания. Оценка состояния воздухоподающих и растворотводящих скважин в днище камеры должна производиться с использованием промышленных видеоэндоскопических комплексов. Необходимо внедрение систем контроля напряженно-деформированного состояния таких конструктивных элементов систем разработки, как днище и стенки камер в режиме реального времени. Существующие приборы с кольцевыми чувствительными элементами, включая скважинные фотоупругие датчики, плоскостные кольцевые фотоупругие датчики, тензодатчики, которые фиксируют изменения на обнаженной поверхности массива в процессе деформирования при изменении напряжений в массиве горных пород. Для контроля состояния днища и стенок камеры расположение датчиков возможно в специально оборудованных скважинах и на поверхности обнажений.

При реализации комбинированной технологии подземной добычи руд и технологии выщелачивания в изолированных камерах требуется учет ранее известного набора параметров, характеризующих динамическое состояние технологических сред горнотехнической системы (жидкой, твердой и газообразной) с позиции влияния их на режим функционирования системы подземного выщелачивания. Контроль состава шахтного воздуха традиционно осуществляется с целью соблюдения газового режима. Применение поточных газоанализаторов с более широким спектром определяемых веществ позволит с необходимой точностью контролировать процессы, протекающие в камере

выщелачивания на основе контроля состава и концентрации выделяемых газов.

Таким образом, выбор оптимального технологического режима функционирования системы подземного выщелачивания невозможен без оперативного учета наиболее полного набора параметров, характеризующих процессы, протекающие на различных этапах функционирования камер подземного выщелачивания. Такой функционал обеспечивается путем создания цифрового двойника горнотехнической системы, формирование которого основано на математическом представлении протекающих процессов с использованием большого объема данных, характеризующих эти процессы и получаемых путем внедрения измерительных устройств и датчиков различного назначения в горнотехнические объекты.

4.2 Технология возведения днищ на основе геополимерных смесей в условиях подземного рудника

Технология формирования камер подземного выщелачивания с использованием для изоляции днища (либо, при необходимости, стенок) вмещающих пород в качестве исходных материалов для геополимерных смесей базируется на частичном переносе технологических процессов их приготовления в подземное пространство рудника для исключения перемещения больших объемов пород от проходки горных выработок на поверхность. Технологическая схема приготовления геополимерной смеси представляет собой комбинацию поверхностного и подземного комплексов. Поверхностный комплекс включает модули хранения и, в случае обеспеченности местным необходимым сырьем, подготовки жидкого реагента и высокореактивного алюмосиликатного сырья. В подземных условиях реализуются процессы подготовки вмещающих пород требуемой крупности и перемешивание всех компонентов, что возможно только на основе

применения передвижных закладочных комплексов [83], разработанных в ИПКОН РАН.

Принципиальная схема технологического процесса приготовления геополимерной смеси представлена на рис. 4.5 и заключается в следующем. Породы от проходки горных выработок с содержанием аморфной фазы направляются на I стадию дробления в ЩДС 250х400, где происходит сокращение их крупности до 35 мм. Далее дробленый материал транспортируется на II стадию дробления в КИД-450, где происходит интенсивная дезинтеграция материала в «сухом» режиме до крупности менее 4 мм, после чего измельченная порода направляется на операцию смешения. Другой компонент смеси – высокореактивное алюмосиликатное сырье, – направляется на операцию смешивания с заполнителем и жидким компонентами. Продукт смешения – готовая геополимерная смесь – подается в возводимую камеру выщелачивания по скважинам или заездам вышележащего горизонта.

Качественные и количественные показатели технологического процесса, представленные на рис. 4.5 и 4.6, определены по результатам сведения баланса технологической схемы в соответствии с методами расчетов технологических схем, приведенными в «Проектирование обогатительных фабрик» К.А. Разумов. М., Недра, 1970 г.

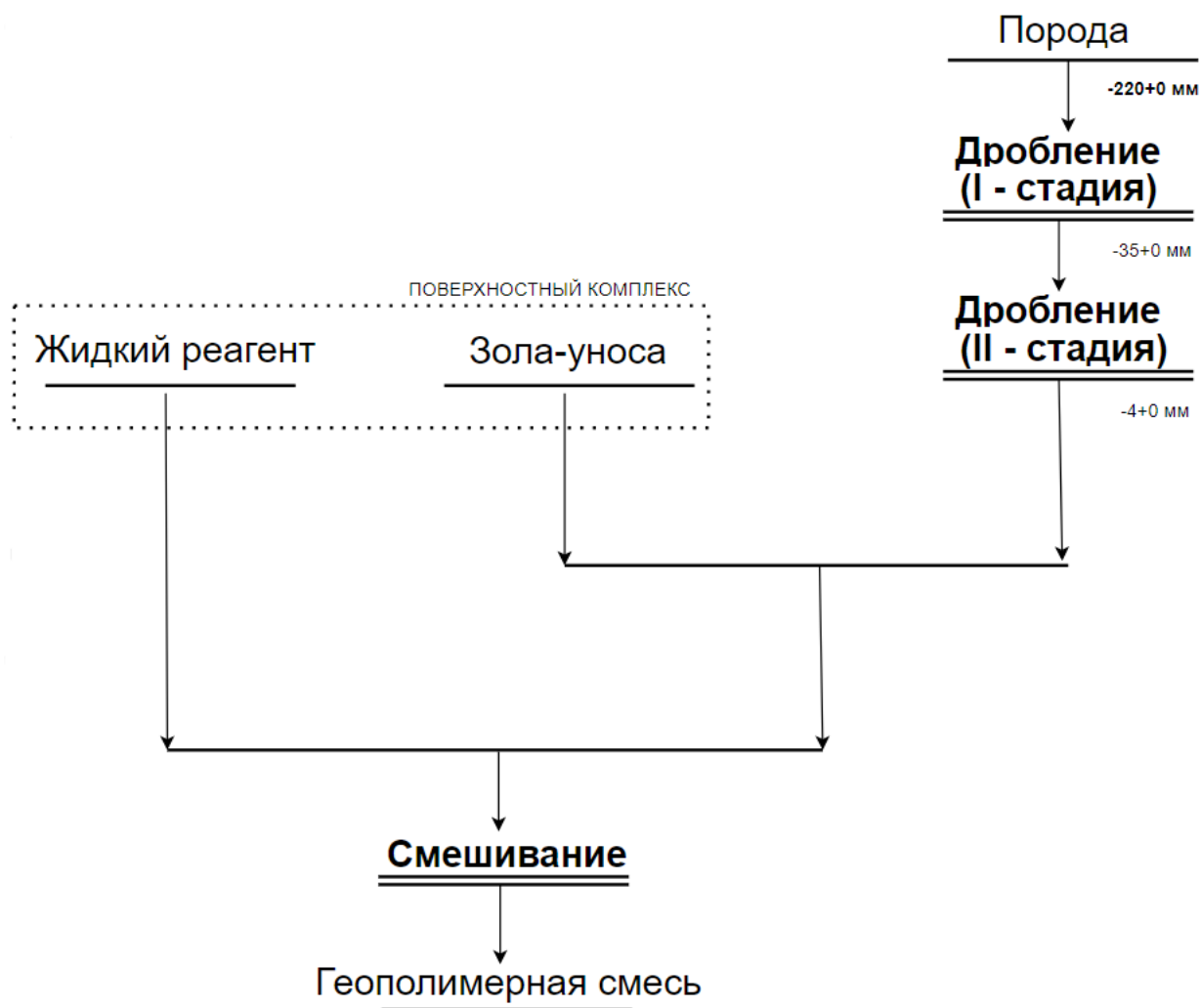


Рисунок 4.5 - Принципиальная технологическая схема приготовления геополимерной смеси

Технологический баланс схемы — это расчетный способ определения показателей потоков материала в технологической схеме по известным или относительно легкоизмеряемым величинам. Основными расчетными показателями потоков материала являются:

- выход (γ_i) i -потока технологической схемы в процентах или долях единиц от исходного материала, поступающего в процесс (или суммы исходных), или конечного продукта (или суммы конечных), выходящего из технологического процесса. Эти данные получены по результатам лабораторных исследований (см. гл.3);

- содержание (β_i) какого-либо компонента в i -потоке материала в процентах, отличающегося по своим характеристикам от других компонентов потока.

Расчеты γ_i , β_i проводятся с использованием уравнений материального баланса. Расчеты уравнений материального баланса выполнены для всех потоков материала. При этом сложные схемы разбиваются на простые двух- или трехпродуктовые подсхемы и последовательно рассчитываются с использованием следующих уравнений баланса, применяемых в зависимости от конфигурации схемы, параметров рассчитываемого потока и известных исходных данных, поэтому:

уравнение баланса по выходам для трехпродуктовой подсхемы, включающей породы от проходки выработок, золы-уноса и жидкий компонент, представляется в виде:

$$\gamma_i = \gamma_{i+1} + \gamma_{i+2} + \gamma_{i+3}; \quad (4.1)$$

уравнение баланса по i -му компоненту для трехпродуктовой подсхемы:

$$\beta_i \cdot \gamma_i = \beta_{i+1} \cdot \gamma_{i+1} + \beta_{i+2} \cdot \gamma_{i+2} + \beta_{i+3} \cdot \gamma_{i+3}; \quad (4.)$$

Таким образом, для двухпродуктовой или трехпродуктовой подсхемы может быть составлено много уравнений материального баланса, каждому из которых описываемая схема должна соответствовать.

Основным является решение системы, число неизвестных в которой равно числу уравнений. Для подсхемы с двумя выходами таких уравнений два. Большее число уравнений приводит к переопределенной системе, которая не имеет точного решения.

Как правило, составляется система уравнений, включающих баланс по выходам и одному из компонентов:

$$\beta_i \begin{cases} \gamma_i = \gamma_{i+1} + \gamma_{i+2} \\ \gamma_i = \beta_{i+1} \cdot \gamma_{i+1} + \beta_{i+2} \cdot \gamma_{i+2} \end{cases}$$

Задавая производительность по исходному продукту Q и его влажность %вл. определяются абсолютные значения показателей:

Производительность потока по сухому материалу:

$$Q_i = \frac{Q \cdot \gamma_i}{100}, \text{ т/ч};$$

За основу расчета показателей процесса производства закладочных смесей принята производительность вибрационной дробилки КИД-450 (3,62 т/ч по сухому веществу).

Расчеты по вышеописанной методике выполнены с помощью программного обеспечения Microsoft Excel. На рис. 4.6 представлена качественно-количественная схема технологического процесса для геополимерной смеси следующего состава: дациты - 1457 кг/м³, зола - 350 кг/м³, жидкий компонент - 709 кг/м³.

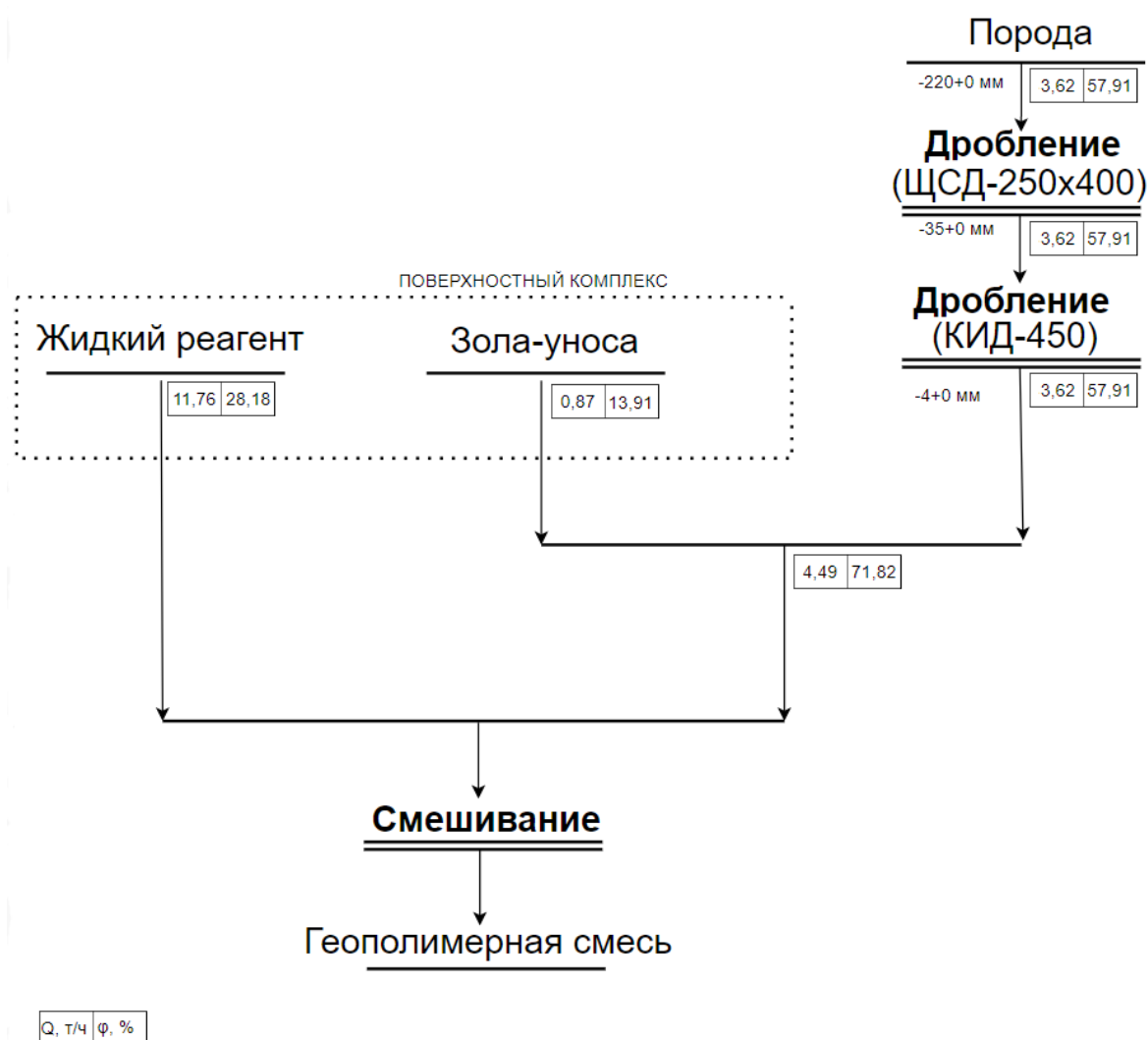


Рисунок 4.6 - Качественно-количественная схема технологического процесса: Q - производительность по сухому материалу; γ - выход продукта.

По расчетным качественно-количественным показателям технологического процесса произведен выбор основного технологического оборудования. Спецификация технологического оборудования комплекса приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Спецификация технологического оборудования

Поз.	Наименование	Обозначение	Установл. мощность, кВт	Кол-во	Примечание
Модуль подготовки заполнителей 1-ой стадии					
1	Приемный бункер, $V=2 \text{ м}^3$, не менее		-	1	Нестандартное
2	Питатель	ПЭ 5х12	1	1	
3	Щековая дробилка	ЩДС-250×400	18,5	1	
Модуль подготовки заполнителей 2-ой стадии					
4	Приемный бункер, $V=2 \text{ м}^3$, не менее		-	1	Нестандартное
5	Питатель	ПЭ 5х16	1	1	
6	Расходный бункер, $V=1 \text{ м}^3$, не менее		-	1	Нестандартное
7	Дробилка конусная инерционная	КИД-450	37	1	
8	Маслостанция КИД-450			1	
9	Конвейер винтовой	КВ-2 (Г1-20-16П)	5	1	
Модуль смешения компонентов геопалимерной смеси					
10	Смеситель непрерывного действия		5,5	1	
11,12	Станция растаривания биг-бэгов с конвейером	СР-1000	9	2	
13	Емкость «Еврокуб» 1 м^3	МХ 600 пп	-	2	

Схема цепи аппаратов приведена на рис. 4.7.

Модуль подготовки заполнителей 1-ой стадии

Оборудование модуля (бункер, питатель, дробилка, участковый ленточный конвейер) располагается в выработках вышележащего горизонта камеры выщелачивания. Порода исходной крупностью не более 220 мм загружается погрузчиком в приемный бункер (1). Над бункером установлена наклонная колосниковая решетка 220х220 мм.

Из бункера (1) порода вибрационным питателем (2) подается в щековую дробилку со сложным качанием щеки ЩДС-250×400 (3). В щековой дробилке порода дробится в открытом цикле до крупности менее 35 мм, дробилка разгружается на питатель и далее в бункер (4). Изменение расхода подачи материала дробилки осуществляется регулированием частоты питателя (5).

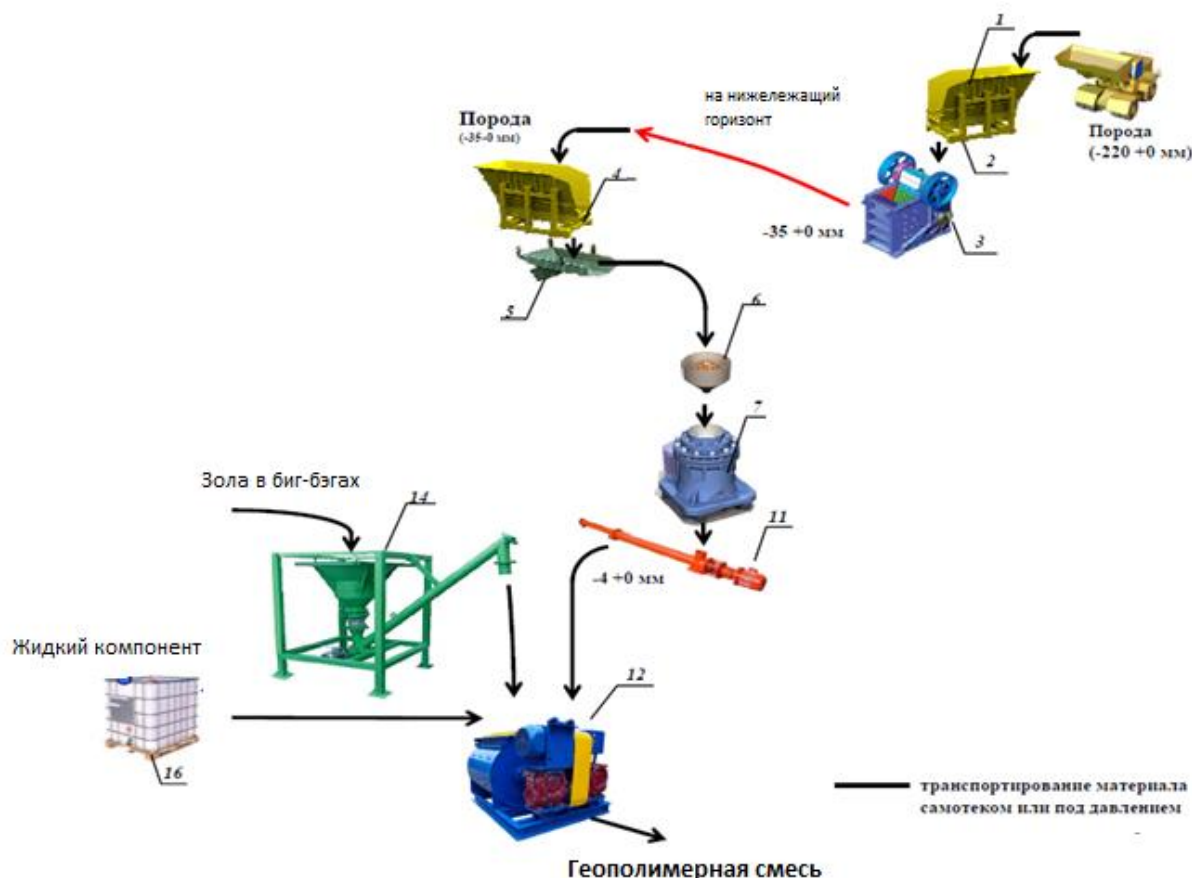


Рисунок 4.7 - Схема цепи аппаратов комплекса оборудования для приготовления геополимерной смеси (см. табл. 4.2)

Для этого из бункера (4) порода вибрационным питателем (5) подается в расходный бункер (6), создающий необходимый для работы дробилки КИД-450 подпор материала, откуда самотеком поступает в конусную инерционную дробилку КИД-450 (7).

Дробленая до крупности менее 4 мм порода, содержащая не менее 45% класса -0,074 мм, конвейером (8) направляется в горизонтальный двухвальный смеситель циклического действия БП-2Г-185 (9).

Зола-уноса доставляется в биг-бэгах погрузчиком с расходного склада и устанавливается грузоподъемным механизмом станции растаривания (10) на раму станции. После вскрытия биг-бэга материал шнековым транспортером, входящим в состав станции растаривания, дозируется в смеситель (11).

Жидкий реагент доставляется от поверхностного или подземного расходного склада в емкостях типа «Еврокуб» объемом 1 м³ (12), дозирование в смеситель осуществляется самотеком. Регулирование расхода осуществляется путем задания времени подачи.

Смеситель непрерывного действия (9) обеспечивает планомерное приготовление геополимерной смеси.

Дозирование золы-уноса осуществляется по продолжительности работы транспортера станции растаривания (11).

Система управления комплексом должна предусматривать режимы работы:

- автоматический
- ручной дистанционный
- ручной.

Режим работы комплекса оборудования принят круглогодовой, трехсменный при семидневной рабочей неделе:

число рабочих дней в год.....	365
число рабочих смен в неделю.....	21
число рабочих смен в сутки.....	3
число часов работы в смену.....	8

Календарный фонд времени работы — 8760 ч.

Эффективный фонд чистого времени работы оборудования определяется по формуле:

$$T_{\text{ч}} = T \cdot K_{\text{с}}$$

где: T - календарный фонд рабочего времени, ч;

$T = 8760$ ч;

K_g - коэффициент использования оборудования по времени.

$$K_g = 0,7.$$

$$T_q = 8760 \cdot 0,7 = 6132 \text{ ч.}$$

Исходя из этого, рассчитаны производительность и материальный баланс технологического процесса. Результаты расчета представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Материальный баланс и производительность комплекса оборудования при приготовлении геополимерных смесей

Наименование	Удельная плотность, т/м ³	Насыпная плотность, т/м ³	Выход, %	Производительность			
				т/ч	т/год	м ³ /ч	м ³ /год
Заполнитель (скальная порода – дацит) -220+0 мм	2,63	1,52	57,91	3,62	22197	2,38	14604
Высокреактивное алюмосиликатное сырье (зола-уноса) -0,01 мм	2,26	1,01	13,91	0,87	5335	0,86	5282
Жидкий компонент (К, Na жидкое стекло и NaOH)	1,38	-	28,18	1,76	10792	1,28	7821
Итого: Геополимерная смесь	1,96	-	98,1	6,25	38325	3,19	19554

Таким образом, средняя производительность комплекса по геополимерным смесям составляет:

- 3,19 м³/час;
- 19554 м³/год;
- 6,25 т/час;
- 38325 т/год;

В ходе опытно-промышленных испытаний возможно формирование конструкции днища в 2 вариантах (рис. 4.8). Первое – днище полностью формируется на основе геополимерных композитов для обеспечения повышенных прочностных характеристик. Во втором варианте на основе низкопрочных закладочных смесей формируется устойчивое днище требуемой прочности с формированием над ним изолирующего геополимерного слоя с учетом растекаемости смеси. В дальнейшем

сформированное днище обустраивается дренажными скважинами, обсаживаемыми ПВХ трубами, соединяемыми в единую сеть.

Принципиальные особенности двух вариантов формирования кислотостойкого днища камер выщелачивания приведены на рис. 4.8.

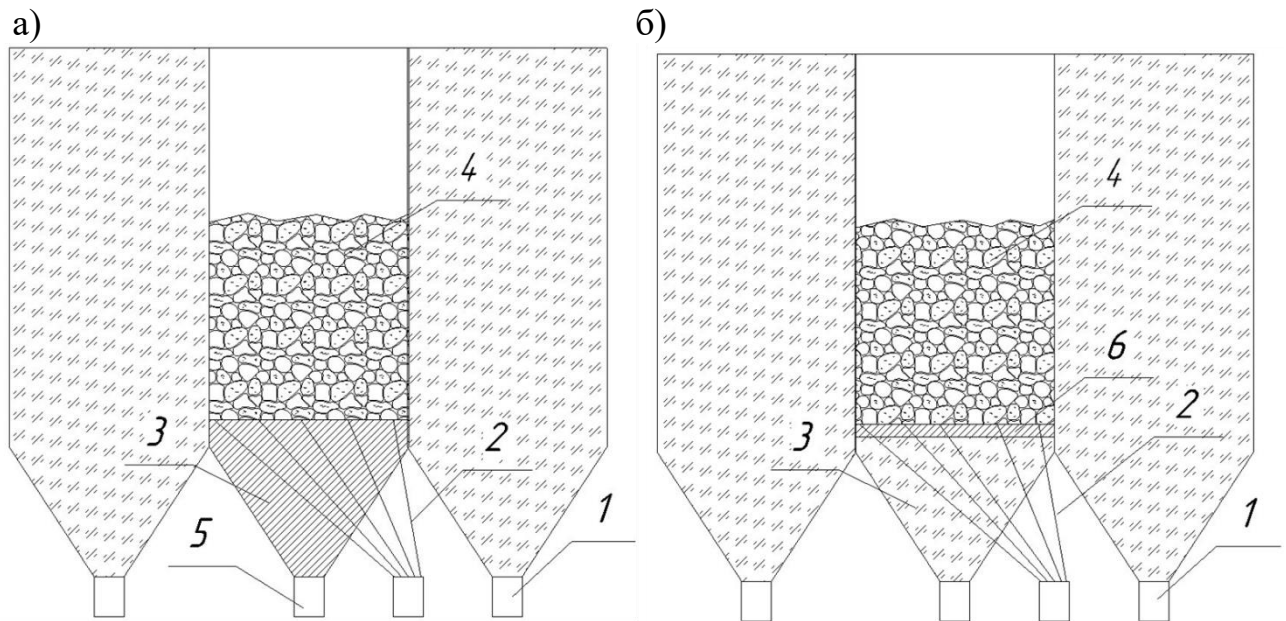


Рисунок 4.8 - Конструкция днища камер подземного выщелачивания: а) вариант формирования днища полностью из геополимерного материала; б) вариант формирования днища на основе традиционной твердеющей закладочной смеси с экранирующим геополимерным слоем: 1 - заезды для прокладки трубопроводов подачи газа и сбора растворов; 1 – выработки вентиляционно-закладочного горизонта; 2 – веера скважин для подачи окисляющего газа и сбора продуктивного раствора; 3 – возведенное на основе закладочной смеси днище; 4 – массив руды; 5 – заезды для прокладки трубопроводов подачи газа и сбора растворов; 6 - массив на основе геополимерных материалов.

Выбор предпочтительного варианта конструкции днища производится на основе технико-экономической оценки с учетом параметров камер.

4.3. Анализ уровня риска при реализации традиционной технологии блочного выщелачивания

Традиционная технология блочного выщелачивания, предусматривающая взрывную подготовку рудной массы без изоляции выемочного пространства, сопровождается рядом экологических, социальных и технологических проблем, ограничивающих область ее применения.

Идентификация опасностей, возникновение которых связано с реализацией технологии подземного выщелачивания, оценка вероятностей и последствий их возникновения необходимы для определения приоритетных векторов развития технологии.

Оценка риска при реализации традиционной технологии блочного выщелачивания выполнена в соответствии с методологией многоуровневой оценки риска (рис. 4.9).



Рисунок 4.9 – Процесс многоуровневой оценки риска

Оценка риска включает три уровня:

- уровень 1 – предварительный анализ риска, основанный на качественной оценке последствий и частоты реализации исходных событий аварии;
- уровень 2 – углубленный анализ риска ключевых опасностей, частично качественный, использующий определение опасностей и сосредоточенный на определении ключевых рисков;

– уровень 3 – количественный анализ рисков, основанный на детализированном определении степени риска и сравнении уровня риска с приемлемыми значениями и выбор мероприятий, направленных на достижение приемлемого уровня риска.

Критерии качественной оценки риска были разработаны с учетом положений ГОСТ Р ИСО 31000:2010 (ISO 31000:2009) «Менеджмент риска. Принципы и руководство» и ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения».

Для проведения качественной оценки риска необходимо определить значения вероятностей исходных событий аварии и этапов реализации и вероятность развития аварии.

На основе полученных значений присваиваются качественные оценки вероятности (табл. 4.4) и тяжести последствий (табл. 4.5). Согласно матрице оценки риска (табл. 4.6) определяют уровень риска.

Таблица 4.4 - Качественная оценка вероятности событий

Обозначение уровня	Наименование уровня	Описание	Численная оценка вероятности, 1/год
A	высокая вероятность, возможны повторные события	вероятно, произойдет на объекте	более 10^{-3}
B	возможный	события происходили на аналогичных объектах	от 10^{-4} до 10^{-3}
C	вероятный	может произойти	от 10^{-5} до 10^{-4}
D	маловероятный	может произойти, но не ожидается	от 10^{-6} до 10^{-5}
E	крайне маловероятный	произойдет при исключительных обстоятельствах	менее 10^{-6}

Таблица 4.5– Качественная оценка последствий событий

Обозначение уровня	Наименование уровня (последствия)	Воздействие на людей	Воздействие на окружающую среду	Экономический ущерб
5	катастрофическое	многочисленные несчастные случаи	чрезвычайный экологический ущерб	более 150 млн. рублей
4	существенные	невосстанавливаемая полная нетрудоспособность, единичные несчастные случаи	существенный экологический ущерб	от 30 до 150 млн. рублей
3	умеренные	существенные травмы или ущерб здоровью, например, потеря рабочих дней	умеренный экологический ущерб	от 15 до 30 млн. рублей
2	малозначительные	небольшие травмы или ущерб здоровью	локальный экологический ущерб	от 1,5 до 15 млн. рублей
1	незначительные	незначительный ущерб для здоровья	минимальный экологический ущерб	менее 1,5 млн. рублей

Таблица 4.6 – Матрица оценки риска

Уровень вероятности событий	Оценка последствий событий				
	Незначительные	Малозначительные	Умеренные	Существенные	Катастрофические
	1	2	3	4	5
А (Высоко вероятный)	R _в	R _н	R _н	R _н	R _н
В (Возможный)	R _{пр}	R _в	R _в	R _н	R _н
С (Вероятный)	R _{пр}	R _{пр}	R _в	R _в	R _н
Д (Маловероятный)	R _{пр}	R _{пр}	R _{пр}	R _в	R _в
Е (Крайне маловероятный)	R _{пр}	R _{пр}	R _{пр}	R _{пр}	R _в
Обозначения в таблице: R _{пр} – приемлемый риск; R _в – практически возможный риск; R _н – требуется исследование и снижение уровня риска.					

На предварительном этапе оценки риска определён общий перечень опасностей, связанных с эксплуатацией блоков подземного выщелачивания [65, 125]. Идентификация основных видов опасностей выполнена на основе анализа практического опыта применения технологии блочного выщелачивания.

При разработке месторождений технологией подземного блочного выщелачивания наиболее вероятны сценарии, оказывающие неблагоприятное воздействие на окружающую среду и население, т.к. в технологическом процессе добычи руды указанным способом используются кислородные и бескислородные кислоты, водные растворы солей и другие токсичные вещества. В результате сложных химических, массообменных и гидродинамических процессов возможно выделение углекислого газа, сероводорода, сернистого газа. Образуюсь в процессе выщелачивания, эти газы могут мигрировать вместе с растворами или в воздушном пространстве. Систематизация опасностей, возникновение которых возможна при отработке месторождений способом подземного выщелачивания, приведена в табл. 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты систематизации опасностей

№ п\п	Наименование возможной аварии
1	Миграция агрессивных растворов за пределы контура выемочных участков
2	Загазованность подземных горных выработок
3.	Пожар
4.	Завалы и обрушения

Анализ таблицы показывает, что главным видом опасностей, связанным с реализацией технологии подземного блочного выщелачивания, является миграция агрессивных растворов за пределы контура выщелачивания по различным причинам, что может повлечь за собой серьезные экологические и социально-экономические риски. Этот процесс может привести к загрязнению окружающей среды различными токсичными веществами, используемыми в процессе выщелачивания. Когда растворы проникают в прилегающие к руднику породы или подземные водные ресурсы, это может вызвать загрязнение почвы, подземных вод и поверхностных водных источников. В результате этого возникает угроза для здоровья человека через контакт с загрязненной водой или почвой, а также через возможное заражение питьевой

воды. Кроме того, миграция растворов может нанести ущерб местной флоре и фауне, что влечет за собой и серьезный экономический ущерб.

Вторым по значимости видом аварии является загазованность подземных выработок в результате поступления вредных веществ в воздушное пространство из продуктивных растворов при их транспортировании, орошении горной массы, при движении растворов в подготовительных выработках, в зумпфах и сборных бассейнах.

Отдельным видом аварийности при разработке месторождений цветных металлов является возникновение пожара в условиях подземного рудника, связанное с самовозгоранием сульфидных руд. Самовозгорание сульфидных руд может привести к масштабным потерям производства, что является одной из наиболее значимых экономических проблем в процессах добычи, транспортировки и хранения руд. Также большое количество токсичных газов и интенсивное выделение тепла, образующихся в процессе окисления руд, приводит к нарушению здоровья людей и их гибели. В этой связи такой тип пожарной опасности считается одним из самых разрушительных стихийных бедствий в горнодобывающей промышленности.

Вероятности реализации сценариев аварии определены как последовательности исходных событий и вероятностей этапов реализации, возникновение которых в определенном порядке и сочетании может привести к созданию и развитию аварийной ситуации. Условия возникновения аварий, связанных с видами опасностей при реализации технологии подземного блочного выщелачивания, условия их возникновения и последствия представлены в табл. 4.8.

В ходе проведения анализа риска 1-го уровня определен общий перечень опасностей, связанных с эксплуатацией блоков подземного выщелачивания (табл. 4.7). На основе полученных сведений, для каждой из четырех групп общих видов опасностей определены сценарии развития аварии, включая

исходные события, способные привести к их возникновению, этапы реализации аварий и их последствия.

Качественные оценки тяжести последствий аварии включают оценку причинения вреда персоналу рудника, ущерба сооружениям и технологическому оборудованию (материальные убытки предприятия) и оценку размера вреда, причиняемого окружающей среде.

Далее рассмотрим общие характеристики, причины и условия реализации соответствующих сценариев.

С.1 – Миграция агрессивных растворов за пределы контура выемочных участков

Миграция растворов за пределы блоков подземного выщелачивания может быть вызвана рядом факторов, связанных как с технологическими особенностями процесса выщелачивания, так и с геологическими условиями месторождения. К ним относятся: - неправильный расчет параметров выщелачивания (ошибки в расчетах объемов и скорости вводимых растворов, их концентрации или скорости подачи могут привести к избыточному насыщению блоков и вытеснению растворов за их пределы); нарушение герметичности (повреждения в системах изоляции или в отделке скважин могут стать причиной утечек растворов); геологические разломы и трещины (естественные геологические разломы и трещины могут служить каналами для миграции растворов, особенно если они не были должным образом учтены при проектировании процесса выщелачивания); ошибки в проектировании гидрогеологической изоляции (неправильное проектирование или исполнение изоляционных барьеров может привести к проникновению растворов за пределы выщелачиваемого блока); колебания уровня грунтовых вод (изменения уровня грунтовых вод могут изменить условия потока растворов и способствовать их миграции); химические реакции (химические взаимодействия между раствором и породой могут изменять физические свойства породы (например, проницаемость), что в свою очередь может

способствовать миграции раствора); антропогенные факторы (человеческая деятельность, такая как бурение скважин в непосредственной близости к зоне выщелачивания, также может способствовать миграции растворов).

Оценка вероятности реализации аварии производится исходя из следующей совокупности:

$$P_{C.1} = (P_1 + P_2 + P_3) + P_4 \times P_5 \times P_6 \times P_7 \text{ (1/год)}, \quad (4.1)$$

где P_1 – вероятность ошибки при расчете параметров выщелачивания;

P_2 – вероятность ошибки в проектировании гидрогеологической изоляции;

P_3 – вероятность ошибки при проведении технологических операций;

P_4 – вероятность нарушения герметичности;

P_5 – вероятность раскрытия геологических разломов и трещин;

P_6 – вероятность колебания уровня грунтовых вод;

P_7 – вероятность возникновения химических реакций с изменением свойств пород.

С.2 – Загазованность.

Нарушение рудничной атмосферы, превышение сильнодействующих ядовитых веществ сверх ПДК в рудничной атмосфере при реализации технологии блочного выщелачивания цветных металлов возможно по причине нарушения режима проветривания, возникновения эндогенного пожара, длительного отключения электроэнергии и чрезмерного выделения вредных веществ в результате химических реакций раствора выщелачивания с породами. Нарушение рудничной атмосферы, загазирование может привести к интоксикации (отравлению) рабочего персонала вредными веществами и может привести к затруднению эвакуации пострадавших. Вероятность аварии, связанной с аэрологическим риском, определяется исходя из следующей совокупности вероятностей:

$$P_{C.2} = P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \text{ (1/год)}, \quad (4.2)$$

где P_1 – вероятность нарушения режима проветривания;

P_2 – вероятность возникновения эндогенного пожара;

P_3 – вероятность длительного отключения электроэнергии;

P_4 – вероятность чрезмерного выделения вредных веществ в результате химических реакций раствора выщелачивания с породами.

С.3 – Пожары.

Основными предпосылками возникновения аварий, связанных с подземными пожарами, являются: нарушение технологической дисциплины при разработке склонных к самовозгоранию пород, высокая эксплуатационная нагрузка на технические устройства, используемые в технологическом процессе, высокий уровень износа основных и производственных фондов и систем защиты, сложные горно-геологические условия при добыче полезных ископаемых, выраженные тектоническими нарушениями, недостаточный контроль за ранними стадиями возникновения эндогенных пожаров.

$$P_{C.3} = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \times P_6 \text{ (1/год)}, \quad (4.3)$$

где P_1 – вероятность нарушения технологической дисциплины при разработке склонных к самовозгоранию пород;

P_2 – вероятность высокой эксплуатационной нагрузки на технические устройства, используемые в технологическом процессе;

P_3 – вероятность высокого уровня износа основных и производственных фондов и систем защиты;

P_4 – вероятность умышленного поджога;

P_5 – вероятность отказа системы пожаротушения;

P_6 – вероятность несвоевременного обнаружения очага эндогенного пожаров персоналом.

С.4 – Обрушения и завалы

Основными факторами, способствующими развитию критических деформаций, являются: некорректная оценка геомеханических характеристик массивов; изменение геомеханического состояния породы в процессе выщелачивания (выщелачивание может изменять структуру породы,

уменьшая ее прочность и способствуя образованию трещин, что может привести к ослаблению породы и ее последующему обрушению); динамические нагрузки от взрывных работ или других горных операций могут спровоцировать обрушения, особенно в неустойчивых или уже ослабленных породах; эрозия породы растворами (химическое воздействие растворов может привести к растворению цементирующих веществ в породе, что делает ее более подверженной обрушению); недостаточная или неправильная поддержка выработок (неправильный выбор или установка креплений может не обеспечить достаточную поддержку для пород, особенно в зонах с высокой степенью ослабления); ошибки в проектировании и планировании (неправильное расположение выработок, недооценка нагрузок на породу или ошибки в расчете параметров выработок могут способствовать возникновению завалов.

Оценка вероятности реализации аварии производится, исходя из следующей совокупности:

$$P_{C.4} = (P_1 + P_5 + P_6) \times P_2 \times P_3 \times P_4 \text{ (1/год)}, \quad (4.4)$$

где P_1 – вероятность некорректной оценки геомеханических характеристик массивов;

P_2 – изменение геомеханического состояния породы в процессе выщелачивания;

P_3 – вероятность возникновения предельных динамических нагрузок от взрывных работ или других операций;

P_4 – вероятность эрозии ограничивающих массивов растворами;

P_5 – вероятность выбора некорректного способа поддержания выработок;

P_6 – вероятность ошибки в проектировании и планировании.

Для сценариев развития аварии, связанных с общими видами опасностей при эксплуатации блоков подземного выщелачивания, на предварительном этапе оценки риска были определены уровни риска реализации основных сценариев опасностей.

Таблица 4.8– Возможные причины инцидентов и оценка вероятности их возникновения

№	Инцидент	Исходные события, этапы реализации аварии	Вероятности реализации исходных событий, 1/год	Риск индивидуальный, 1/год	Качественный показатель уровня вероятности	Качественный показатель тяжести последствий	Уровень риска
1	2	3	4	5	6	7	8
С.1	Миграция агрессивных растворов за пределы контура выемочных участков	Ошибки при расчете параметров выщелачивания (Р ₁)	10 ⁻³	1,2 × 10 ⁻³	А (высокая вероятность)	3 (Умеренные)	R _н
		Ошибки в проектировании гидрогеологической изоляции (Р ₂)	10 ⁻²				
		Ошибки при проведении технологических операций (Р ₃)	10 ⁻²				
		Нарушение герметичности (Р ₄)	10 ⁻³				
		Раскрытие геологических разломов и трещин (Р ₅)	10 ⁻³				
		Колебания уровня грунтовых вод (Р ₆)	10 ⁻⁴				
		Возникновение химических реакций с изменением свойств пород (Р ₇)	10 ⁻⁴				
С.2.	Загазованность подземных горных выработок	Нарушение режима проветривания (Р ₁)	10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁸	Е (крайне маловероятный)	4 (Существенные)	R _{пр}
		Эндогенный пожар (Р ₂)	10 ⁻³				
		Длительное отключение электроэнергии (Р ₃)	10 ⁻³				
		Чрезмерное выделение вредных веществ в результате химических реакций раствора выщелачивания с породами (Р ₄)	10 ⁻⁴				

1	2	3	4	5	6	7	8
С.3.	Пожар	Нарушение технологической дисциплины при разработке склонных к самовозгоранию пород (P ₁)	10 ⁻³	3,02 × 10 ⁻⁶	D (маловероятный)	4 (Существенные)	R _B
		Чрезмерно высокая эксплуатационная нагрузка на технические устройства, используемые в технологическом процессе (P ₂)	10 ⁻³				
		Высокий уровень износа основных и производственных фондов и систем защиты (P ₃)	10 ⁻³				
		Умышленный поджог (P ₄)	10 ⁻⁵				
		Отказ системы пожаротушения (P ₅)	10 ⁻⁵				
		Несвоевременное обнаружение очага эндогенного пожаров персоналом (P ₆)	10 ⁻⁴				
С.4.	Обрушения и завалы	Некорректная оценка геомеханических характеристик массивов (P ₁)	10 ⁻³	1,02 × 10 ⁻³	B (Возможный)	3 (Умеренные))	R _B
		Изменение геомеханического состояния породы в процессе выщелачивания (P ₂)	10 ⁻³				
		Возникновение предельных динамических нагрузок от взрывных работ или других операций (P ₃)	10 ⁻³				
		Эрозия ограничивающих массивов растворами (P ₄)	10 ⁻⁴				
		Выбор некорректного способа поддержания выработок (P ₅)	10 ⁻⁵				
		Ошибка в проектировании и планировании (P ₆)	10 ⁻⁵				

Установлено, что для сценариев развития аварии, связанных эксплуатацией блоков подземного выщелачивания, уровни вероятности возникновения и развития аварий характеризуются как «приемлемый риск» (табл. 4.8).

4.4. Разработка компенсирующих мероприятий

В целях обеспечения приемлемого уровня риска при применении технологии подземного блочного выщелачивания необходимо применение системы организационно-технических компенсирующих мероприятий, направленных на его снижение.

Для каждого сценария развития аварии, с учётом принятых компенсирующих мероприятий, в соответствии с матрицей оценки риска определен уровень риска. Результаты оценки риска с учетом компенсирующих мероприятий представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Компенсирующие мероприятия и оценка уровня приемлемости риска

Тип аварии	Описание инцидента	Предлагаемые меры по снижению риска	Риск индивидуальный, 1/год	Вероятность	Последствие	Риск
2	3	4	5	6	7	8
Инциденты, связанные с общими видами опасностей	С.1. Миграция агрессивных растворов за пределы контура выемочных участков	1. Внедрение системы автоматического управления технологическими процессами, обеспечивающей своевременный непрерывный контроль за процессами выщелачивания и условиями их протекания с возможностью дистанционного управления. 2. Возведение изолирующих конструкций из материалов, устойчивых к воздействию агрессивных сред, определяемых технологией выщелачивания. 3. Создание системы мониторинга распространения растворов за пределы выемочных участков. 3. Принятие схемы проветривания, исключающей возможность попадания загрязняющих веществ в атмосферу рудника. 4. Непрерывный контроль концентрации загрязняющих веществ в руднике. 5. Организация сбора продуктивных растворов системой скважин, исключающей их движение по выработкам	$1,2 \times 10^{-6}$	D	3	Rпр
	С.2. Загазованность подземных горных выработок		$2,8 \times 10^{-10}$	E	4	Rпр
	С.3. Пожар		$2,4 \times 10^{-7}$	E	4	Rпр
	С.4. Завалы и обрушения		$3,02 \times 10^{-6}$	D	3	Rпр

Выводы по главе 4

1. Разработаны технологические рекомендаций по выбору конструктивных параметров камер выщелачивания при системах разработки с закладкой выработанного пространства, где камера выполняется в виде горнотехнической конструкции, включающей стенки на основе твердеющей смеси, упрочненное днище полностью на основе геополимера или в качестве изолирующего слоя, обустроенное веерами скважин для подачи газов и отвода растворов

2. Обоснована возможность применения передвижных закладочных комплексов в составе виброщековой дробилки, конусной инерционной дробилки, питателей, растаривателей, шнековых конвейеров и смесителей, обеспечивающих условия для мобильного формирования изолирующих оснований камер подземного выщелачивания, обеспечивая подготовку вмещающих пород до требуемого гранулометрического состава, шихтовку твердых компонентов, перемешивание с водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия

3. Выполненная идентификация опасностей, показала, что основными сценариями аварий, связанными с применением технологии подземного блочного выщелачивания, являются: миграция агрессивных растворов за пределы контура выемочных участков, загазованность подземных горных выработок, пожар, завалы и обрушения. Для выделенных опасностей рассмотрены инициирующие события, приводящие к возможному возникновению поражающих факторов аварий.

4. В результате выполненной количественной углубленной оценки риска ключевых опасностей, связанных с реализацией технологии подземного блочного выщелачивания, выполненного в соответствии с методологией многоуровневой оценки риска, установлено, что для основных сценариев аварий уровень риска характеризуется как «Возможный».

5. В целях обеспечения приемлемого уровня риска разработаны организационные и технические мероприятия, направленные на снижение вероятности возникновения и тяжести последствий аварии. При соблюдении компенсирующих мероприятий, для указанных сценариев аварии обеспечивается уровень риска «Приемлемый».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, решена актуальная научно-практическая задача - обоснованы параметры технологии изоляции подземных камер для сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов. Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана методика выбора параметров технологии и материалов для изоляции камер выщелачивания, отличающаяся тем, что выбор направлений использования вмещающих пород месторождений, включая отходы добычи руд, сопровождается оценкой содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии выщелачивания руд цветных металлов.

2. Обоснована и запатентована технология формирования изолированных камер выщелачивания заключающейся в выемке руды, формировании стенок на основе твердеющей смеси и днища камеры с изолирующим слоем, загрузке минерального сырья, бурении в возведенном днище скважин для подачи окисляющего газа и, по окончании процесса окисления, скважин для отвода продуктивного раствора, причем, оформление изолирующего слоя в основании камеры может осуществляться путем возведения устойчивых конструкций в днище камеры из изолирующего материала на весь объем или создания защитного слоя на ранее возведенном днище требуемой прочности.

3. Определены требования к параметрам конструкций в основании днищ камер подземного выщелачивания и материалам для их формирования, исключающих утечку растворов за пределы блока. Установлено, что наиболее перспективным материалом для изоляции днищ камер выщелачивания являются геополимеры, обладающие высокой прочностью,

гидронепроницаемостью и устойчивостью к воздействию агрессивных растворов и высоких температур.

4. Установлено, что содержание аморфного кремнезема – ключевого показателя сырья, свидетельствующего о возможности формирования на его основе геополимеров, во вмещающих породах медно-колчеданных месторождений Южного Урала составляет от 6 до 11%: для дацитов – 11%, серицит-кварцевых метасоматитов – 7% и туфов дацитов – 6%. а требуемое содержание аморфной фазы в составе смеси может быть обеспечено добавлением отходов сжигания углей, требующих утилизации

6. Исследование закономерностей формирования технологических свойств геополимеров на основе отходов производства показало, что геополимер следующего состава: дациты - 1457 кг/м^3 , зола - 350 кг/м^3 , жидкий компонент - 709 кг/м^3 характеризуется высокими прочностными характеристиками. Пределы прочности на одноосное сжатие для полученных образцов на 7, 14, 30, 60 сутки составили 4, 8, 15,9, 21,75 МПа, соответственно.

6. Выполненная оценка свойств массивов, полученных на основе разработанных смесей, свидетельствует об их высокой кислото- и термостойкости. Прочность на одноосное сжатие образцов в возрасте 60 сут, погруженных в 10% раствор H_2SO_4 на 30 сут, составила 22,4 МПа, а для образцов, подверженным воздействию высоких температур - 22МПа. Достижение указанных свойств в подземных условиях обеспечивается применением передвижных закладочных комплексов в составе виброщековой дробилки, конусной инерционной дробилки, питателей, растаривателей, шнековых конвейеров и смесителей обеспечивает условия для мобильного формирования изолирующих оснований камер подземного выщелачивания, обеспечивая подготовку вмещающих пород до требуемого гранулометрического состава, шихтовку твердых компонентов, перемешивание с водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия

7. Выполненный анализ опасностей и оценка уровня риска возникновения и развития аварий, связанных с применением технологии подземного блочного выщелачивания, показал, что риски миграции агрессивных растворов за пределы блоков выщелачивания превышают допустимый уровень, вероятность инцидента составляет $1,2 \times 10^{-3}$ ед/год. В связи с чем разработаны организационные и технические мероприятия, реализация которых позволила снизить риск возникновения и развития аварии до уровня «Приемлемый».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahlness, J.K., Pojar, M.G. In situ copper leaching in the United States: case histories of operations. - 1983. – 37 p.
2. Archibald, J.F., Degagne, D.O., Lausch, P., De Souza, E.M., 1995. Ground waste glass as a pozzolanic consolidation agent for mine backfill // CIM Bull. – 1995. - pp. 80-87.
3. Argui J. O. Leaching dams to recover more Southwest copper at tower cost. - Mining World, 1963. - Vol. 25. - No 11. - P. 22
4. Atkinson, R.J., Hannaford, A.L., Harris, L., Philip, T.P. Using smelter slag in mine backfill. // Mining Mag. – 1989. - pp. 118-123
5. Bahamòndez, C., Arancibia, E., Castro, R., Vargas, T. In situ mining through leaching: Experimental methodology for evaluating its implementation and economic considerations // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. - 2016. - Vol. 116. - Pp. 689-698.
6. Benzaazoua, M., Belem, T., Bussière, B., Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill // Cem. Concr. - 2002.- Res. 32 (7) – pp. 1133-1144
7. Bernal, R.L., Venero, O.D. Origin and treatment of underground waters from Cero de Pasco Mine, Peru // Fernández-Rubio, R. (Ed.). 2nd International Mine Water Congress. International Mine Water Association, Granada, Spain. - 1985. - pp. 27-40.
8. Brock, J.G., Chomley, J.C., Richmond, G.D. Copper leaching at Gunpowder // AusIMM '98 - The Mining Cycle. Eds.: Australian Institute of Mining and Metallurgy. Mount Isa, Australia. - 1998. - pp. 281–284.
9. Croymans T. , Schroeyers W., Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A. Radiological characterization and evaluation of high volume bauxite residue alkali activated concretes // J. Environ. Radioact. - 2017. - Vol.168- pp. 21-29
10. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications, 4th edition, Institut Gopolymure. – Saint-Quentin, France (2015)

11. Davidovits, J. Geopolymeric reactions in archaeological cements and in modern blended cements // Proceedings of the First International Conference on Geopolymer. - 1988. - vol. 1. - pp. 93–106.
12. Davidovits, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials // J. Therm. Anal. - 1991. - Vol. 37. - pp. 1633–1656.
13. Davidovits. J, SPE PACTEC '79, Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, USA, - 1979, - p. 151.
14. Davidovits. J. Why Alkali-Activated Materials (AAM) are Not Geopolymers, Technical Paper #25, Geopolymer Institute Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.geopolymer.org. Дата обращения 24.03.2023.
15. Djahanguiri, F.D. F.D. and Abel, J.F. Design and Construction of a Bulkhead for a Simulated Underground Leaching Stope. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.911metallurgist.com/design-construction-bulkhead-underground-leaching-stope/>. Дата обращения 16.02.2023.
16. Du, Y.-J., Yu, B.-W., Liu, K., Jiang, N.-J., Liu, M.D. Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer // Journal of Materials in Civil Engineering. - 2017. - Vol. 29, Issue 2. - Article 04016217.
17. Fernández Pereira, C., Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., & Vale, J. Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers // Fuel. - 2009. - Vol. 88, Issue 7. - pp. 1185–1193.
18. Ghorbani, Y., Becker, M., Mainza, M., Franzidis, J.-P., Petersen, J. Large-particle effects in chemical/biochemical heap leach processes – a review // Minerals Engineering. - 2011. - Vol. 24. - Pp. 1172–1184.
19. Hanzlicek, T., Steinerova, M., Straka, P. Radioactive metal isotopes stabilized in a geopolymer matrix: determination of a leaching extract by a radiotracer method // J. Am. Ceram. Soc. - 2006. - Vol. 89. - pp. 3541–3543.
20. Hermann, C., Kunze, R., Gatzweiler, R., Kieig, G., Davidovits, J. Solidification of various radioactive residues by Géopolimère® with special

emphasis on long-term stability // Proceedings of the Second International Conference on Geopolymer '99. - 1999. - pp. 211–228.

21. Herrera, D. Estudio de lixiviación in situ en mina El Teniente. Thesis, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, University of Santiago, Chile. - 1987.

22. Hilscher, B., Nayak, P., Lorio, L., Yoon, N. (2017). Technical review and evaluation of ore sorting technologies on precious metal operations. Presentation at a conference held from August 27-30, Vancouver, Canada.

23. Ito, I. Present status of practice and research works on in-place leaching in Japan // Meeting. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Denver, CO. - 1976. - pp. 349–364.

24. Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H., & Fernández-Pereira, C. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching // Journal of Hazardous Materials. - 2009. - Vol. 166, Issue 1. - pp. 561–566.

25. Knapp, H., Neubert, K., Schropp, C., Wotruba, H. (2014). Viable applications of sensor based sorting for the processing of mineral resources. ChemBioEng Rev, 1, 86–95.

26. Lorca, C. Bioleaching study for low grade primary sulfides at Collahuasi // Hydro-Sulfides 2004. Proceedings of the International Colloquium on Hydrometallurgical Processing of Copper Sulfides, Universidad de Chile, Santiago, 16–19 April 2004. - 2004.

27. Lu, C., Zhang, Z., Shi, C., Li, N., Jiao, D., & Yuan, Q. Rheology of alkali-activated materials: a review // Cement Concrete Compos. - 2021. - Vol. 121. - Article 104061.

28. Manca, P.P., Massacci, G., Massidda, L., Rossi, G. Mill tailings and various binder mixtures for cemented backfill: analysis of properties related to mining problems // Proceedings 3rd International Symposium on Mining with Backfill. - 1983. - pp. 39-47.

29. Miller, N.C., Schmuck, C.H. Use of a tracer for in situ stope leaching solution containment research. Bureau of Mines Report of Investigations RI-9583, 43. - 1995.
30. Miller, P.C. Large scale bacterial leaching of a copper zinc ore in situ // Lawrence, R., Branion, R., Ebner, H. (Eds.). Fundamental and Applied Biohydrometallurgy: Proceedings of the Sixth International Symposium on Biohydrometallurgy. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. - 1986. - pp. 215–239.
31. Mundra, H., Panchmatia, P., Juenger, M., van Oort, E. Rheological properties of Class F fly-ash based alkali-activated materials (AAMs) for oil and gas well cementing applications // CEMENT. - 2023. - Vol. 12.
32. Musgrove, P. Mining technology and policy issues, 1983 // Session paper. Mining convention. American Mining Congress, San Francisco, Sept. 12-14, 1983. - Washington: D.C., 1983.
33. Nadolski, S., Samuels, M., Klein, B., Hart, C. J. R. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation. Minerals Engineering. – 2018. – Vol. 121. - pp. 169-179.
34. Ovalle, A. In place leaching of a block caving mine // Copper 87. Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. - 1987. - pp. 17–37.
35. Peyronnard, O., Benzaazoua, M.,. Estimation of the cementitious properties of various industrial by-products for applications requiring low mechanical strength // Resour. Conserv. Recycl. – 2011. – Vol. 56. - pp. 22-33.
36. Pojar, M. In place leaching of a copper sulfide deposit // 47th Annual Meeting Mining Section, American Society of Mechanical Engineers and 35th Annual Mining Symposium, Dallas. Mining. - 1974.
37. Ponzoni, C., Lancellotti, I., Barbieri, L., Spinella, A., Saladino, M.L., Martino, D.C., Caponetti, E., Armetta, F., Leonelli, C. Chromium liquid waste inertization in an inorganic alkali activated matrix: leaching and NMR multinuclear approach // J. Hazard. Mater - 2015. - 286, 474e483.

38. Provis, J. L., van Deventer, J. S. J. Introduction to geopolymers. In *Geopolymers Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, J. L. Provis and J. S. J. van Deventer (Eds.). -UK: Wookhead publishing limited, 2009, - pp. 1–11.
39. Provis, J.L. Alkali-activated materials // *Cement Concr Res.* - 2018. - Vol. 114. - pp. 40-48.
40. Radchenko, D.N., Gadzhieva, L.A., Gavrilenko, V.V. Research of Concentrations of Ultrafine and Finely Dispersed Aerosols in the Atmosphere of a Southern Urals Mining Region. // *3rd International Innovative Mining Symposium. IIMS 2018; E3S Web of Conferences.* - 2018. - V. 41. - article number 01035.
41. Reig, L. & Soriano, Lourdes & Tashima, Mauro & Borrachero, M. & Monzo, J. & Payá, Jordi. (2018). Influence of calcium additions on the compressive strength and microstructure of alkali-activated ceramic sanitary-ware. *Journal of the American Ceramic Society.*
42. Robben, C. (2014). Characteristics of sensor-based sorting technology and implementation in mining. PhD thesis dissertation. RWTH Aachen, Germany.
43. Sand, W., Hallmann, R., Rohde, K., Sobotke, B., Wentzien, S. Controlled microbiological in-situ stope leaching of a sulphidic ore // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 1993. – Vol. 40. – Pp. 421–426.
44. Sinclair, L., Thompson, J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // *Hydrometallurgy.* - 2015. - Vol. 157. - Pp. 306-324.
45. Steven, N. Potential in situ leach exploitation of back-filled Witwatersrand gold mines: parameters and flow-rate calculations from a Zambian Copperbelt analogue // *World Gold Conference.* Eds.: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Johannesburg, South Africa. - 2009. - Pp. 193–196.
46. Tavor, A., Wolfson, A., Shamaev, A., Shvarzman, A. Recycling of industrial wastewater by its immobilization in geopolymer cement // *Ind. Eng. Chem. Res.* - 2007. - Vol. 46. - pp. 6801–6805.

47. Tian, X., Xu, W., Song, S., Rao, F., Xia, L., 2020. Effects of curing temperature on the compressive strength and microstructure of copper tailing-based geopolymers // *Chemosphere*. – 2020. - Vol. 253. – Art. 126754.
48. Tositti, L., Masi, G., Morozzi, P., Zappi, A., Bignozzi, M.C. Cleaner, sustainable, and safer: Green potential of alkali-activated materials in current building industry, radiological good practice, and a few tips // *Construction and Building Materials*. - 2023. - Vol. 409. – pp.1-9.
49. Uusitalo, R., Seppanen, P., Nieminen, P., The use of blast furnace slag as a binder // *Symposium Presented at the Fifth International Symposium on Mining with Backfill*. - 1993. - pp. 169-172.
50. Wan, Q., Rao, F., Song, S., Leon-Patino, C.A., Ma, Y., Yin, W., Consolidation of mine tailings through geopolymerization at ambient temperature// *J. Am. Ceram. Soc.* - 2019a. – Vol.102. – pp. 2451–2461.
51. Weaver, W.S., Luka, R. Laboratory studies of cemented-stabilized mine tailings // *CIM Bull.* - 1970. - Vol. 701. - pp. 988-1001.
52. Xu, H. and van Deventer, J. S. J., Geopolymerisation of multiple minerals // *Minerals Engineering*. – 2002. - Vol. 15. - pp. 1131–1139.
53. Xu, H., and van Deventer, J. S. J. Effect of source materials on geopolymerization // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 200342. - pp. 1698–1706.
54. Абрамов А.В. и др. Подготовка месторождений скальных руд для выщелачивания. - М.: Цветметинформация, 1975. – 45 с.
55. Авт. св. СССР №705819. Способ подземного выщелачивания.
56. Аренс В.Ж. Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых. – М.: Недра, 1975. - 263 с.
57. Бахуров В.Г. и др. Подземное выщелачивание урановых руд. – М.: Атомиздат, 1969. - 151 с.
58. Белов С.В., Скрипниченко В.А., Ушакова В.А. Горно-геологическая и экономическая характеристика месторождений свинцово-цинковых руд в Российской Арктике // *АиС*. - 2022. - № 48. - С. 5-28

59. Бочаров В.А., Юшина Т.И., Игнаткина В.А. и др. Технологическая оценка основных направлений комплексной переработки упорных полиметаллических руд и промпродуктов // Горный информационно-аналитический журнал. - 2014. - № 7. - С. 81-91.

60. Бубнов В.К. и др. Актуальные вопросы добычи цветных, редких и благородных металлов. - Акмола: Изд-во «Жана-Арка», 1995. - 601 с.

61. Гаджиева Л.А. Оценка свойств вмещающих пород месторождений для формирования на их основе горнотехнических конструкций специального назначения // Материалы 5 Международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» - М.:ИПКОН РАН. - 2022. - С. 190–193

62. Гаджиева Л.А. Повышение надежности эксплуатации горнотехнических конструкций при комбинировании подземной добыче руд и выщелачивании // Материалы XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» - Магнитогорск: МГТУ. -2021. - С.72-74.

63. Гаджиева Л.А. Повышение эффективности комбинированного способа подземной добычи руд и выщелачивания путем формирования горнотехнических конструкций на основе геополимерных композитов // Материалы научно-практической конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2023. - С. 74–76.

64. Гаджиева Л.А., Гавриленко В.В. Результаты исследований состава и свойств геокомпозитов для формирования в недрах прочных кислотостойких гидроизолирующих конструкций в камерах выщелачивания // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «ЗОЛОТО. ПОЛИМЕТАЛЛЫ. XXI ВЕК: УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ» - М.: ИПКОН РАН. - 2022. - С. 103–105

65. Гаджиева Л.А., Рыльников А.Г., Власов А.В., Кливер С.Я. Оценка промышленных рисков при внедрении циклично-поточной технологии на глубоких горизонтах карьера // Известия Тульского государственного университета "Науки о земле". - 2020. - № 4. - С. 99 – 111.

66. Гаджиева Л.А., Юн Ю.А., Рыльников А.Г. Современные технологии управления качеством рудной массы при вовлечении в разработку бедных руд комбинированными геотехнологиями. // Материалы X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу». – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 165-167

67. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны - Киев : Будівельник, 1978. - 184 с.

68. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И. Совершенствование схем подготовки месторождений к подземному выщелачиванию металлов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. - 2017. - № 3. - С.124-135.

69. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Чжун Ч. Анализ опыта подготовки руд к подземному выщелачиванию // Горные науки и технологии. - 2017. - № 4. - С. 13-22.

70. Горбатова Е.А. Обоснование физико-химической геотехнологии освоения забалансовых запасов медно-колчеданных месторождений Урала : На примере Узельгинского и Октябрьского месторождений: // Дис. ... канд. техн. наук. - Магнитогорск, 2003. - 160 с.

71. ГОСТ Р 58895-2020 Бетоны химически стойкие. Технические условия

72. Добыча и обогащение руд цветных металлов. ИТС 23-2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям// Бюро НДТ, Москва, 2017 г., 335 стр.

73. Дудников А.Г., Дудникова М.С., Реджани А. Технологии шлакощелочных и геополимерных вяжущих и бетонов// Строительство, Материалы, Оборудование, Технологии: электронный журнал. [Электронный

ресурс]. – Режим доступа: https://stroymat.ru/2023/01/11/tb-1-2023_35-44/ (дата обращения: 04.02.2023).

74. Зайков В. В., Масленников В. В., Новоселов К. А. и др. Материалы к путеводителю по колчеданным месторождениям Южного Урала. - Миасс: Институт металлургии УрО РАН, 1998. - 81 с.

75. Закладочные работы в шахтах: Справочник/ 3-11 Под ред. Д.М. Бронникова, М.Н. Цыгалова. – М.: Недра, 1989. – 400 с.

76. Иванов В.Г., Камнев Е.Н., Смагин А.П. Физико-химическая геотехнология урана на скальных месторождениях. - М.: Атомная энергетика, 2009. – 375 с.

77. Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Кузьмин Е. В., Трофимова Ю. В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации // Радиоактивные отходы. - 2022. - № 3 (20). - С. 50—60.

78. Игин И. М., Минин А. В., Кузьмин Е. В., Бамборин М. Ю., Зубков А. А., Трофимова Ю. В. Возможности изоляции модульных сооружений ППЗРО термопластичными полимерами // Радиоактивные отходы. - 2023. - № 1 (22). - С. 28—37.

79. Казанская, Л. Ф. Основные технические характеристики бетонов на основе цемента щелочной активации / Л. Ф. Казанская, О. М. Смирнова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 42-47.

80. Казикаев Д.М. Комбинированная разработка рудных месторождений: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Подземная разработка месторождений полезных ископаемых" направления подготовки "Горное дело". - М: Горная книга, 2008. - 359 с.

81. Калабин А. И. Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием и другими геотехнологическими методами. - М.: Атомиздат, 1981. – 302 с.

82. Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Комбинированная геотехнология. - М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. - 560 с.
83. Каплунов Д.Р. и др. Передвижные закладочные комплексы в системах разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств // Горный журнал. - 2013. - № 2. - С. 101-104.
84. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная геотехнология. - М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. - 560 с.
85. Каплунов Д.Р., Рыльникова Д.Р. Комбинированная разработка рудных месторождений: Учебное пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2012. — 344 с
86. Корнеев Ю.В. Обоснование условий применения передвижных закладочных комплексов при подземной разработке медноколчеданных месторождений // Дис. ... канд. техн. наук. - Москва, 2013. - 129 с.
87. Котенко Е.А. Горное дело и атомная энергия / Е.А. Котенко. — М.: Изд-во МГГУ, 2001. — 197 с.
88. Кротков В. В. и др. Горно-химическая технология добычи урана / В. В. Кротков, Д. П. Лобанов, Ю. В. Нестеров, И. Г. Абдульманов; под ред. акад. В. В. Кротова. — м. : геос, 2001. — 368 с.
89. Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Морозов А. А. Технология захоронения радиоактивных отходов в пространстве подземных рудников // Радиоактивные отходы. - 2021. - № 2 (15). - С. 49—62.
90. Кузьмин Е. В., Маянов Е. П., Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Калакуцкий А. В., Морозов А. А., Каманин А. Н., Трофимова Ю. В. Обоснование параметров технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в пространстве подземных рудников ПАО «ППГХО» // Радиоактивные отходы. - 2022. - № 1 (18). - С. 62—76.
91. Ларсен, О. А. Состав, свойства и применение бетона на шлакощелочном вяжущем и заполнителе из стекольного боя / О. А. Ларсен, К.

А. Бутенко // Научная школа "Зеленое будущее" для молодых ученых, аспирантов и студентов : Тезисы докладов Научной школы, Новочеркасск, 28 мая – 02 2023 года. – Новочеркасск: "НОК", 2023. – С. 119-123

92. Лизункин В. М., Морозов А. А., Гаврилов А. А. Перспективы применения подземного выщелачивания урана на «Приаргунском производственном горно-химическом объединении» // ГИАБ. - 2011. - № 8. - С.123-127.

93. Лунев Л.И. Подземные системы выщелачивания металлов [Текст] : Учеб. Пособие – М.: МГРИ, 1979. - 86 с

94. Лунев Л.И. Шахтные системы разработки месторождений урана подземным выщелачиванием. – М.: Энергоиздат, 1982. – 128 с.

95. Луценко И. К., Белецкий В. И., Давыдова Л. Г. Бесшахтная разработка рудных месторождений. - М.: Недра, 1986. – 176 с.

96. Луценко И. К., Белецкий В. И., Давыдова, Л. Г. Бесшахтная разработка рудных месторождений. – М.: Недра, 1986. – 176 с.

97. Машковцев Г. А. и др. Уран российских недр / [Машковцев Г. А., Константинов А. К., Мигута А. К., Шумилин М. В., Щеточкин В. Н.]; под ред. Г. А. Машковцева; ФГУП «ВИМС». — М.: ВИМС, 2010. — 855 с.

98. Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А. Развитие научных основ радиогеоэкологии подземных объектов долговременного хранения и захоронения ядерных и радиационно опасных материалов в геологических формациях Европейского Севера России // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2009. - №1. – С.45-51.

99. Митрофанов С. И. и др. Комбинированные методы переработки окисленных и смешанных медных руд – М.: Изд-во «Недра», 1970. – 288 с.

100. Мосинец В.Н. и др. Строительство и эксплуатация рудников подземного выщелачивания. - М.: Недра, 1987. – 303 с.

101. Овсейчук В. А., Морозов А. А., Кутузов И. В., Подопригра В. Е. Алгоритм повагонеточной сортировки урановых руд на шахтных стволах

ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» // Вестник ЗабГУ. - 2014. - № 12. - С. 22-28

102. Овсейчук В.А. Геотехнологические методы добычи и переработки урановых и золотосодержащих руд: учеб. пособие. / В.А. Овсейчук, Ю.Н. Резник, В.П. Мязин. - Чита: ЧитГУ, 2005. - 328 с. С 7-65

103. Овсейчук В.А., Зозуля А.М. Совершенствование процесса блочного подземного выщелачивания в условиях Стрельцовского рудного поля // ГИАБ. - 2021. - № 3-1. - С.

104. Опыт выщелачивания урана на горнодобывающих предприятиях бывшего СССР : отчет о НИР / исполн.: ГУП НПО «Экогеоцентр». — М.: 2000.

105. Основные аспекты технологии кучного выщелачивания из золотосодержащего сырья [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/373>. Дата обращения 24.03.2022.

106. Отчет о НИР «Разработка научно-методических основ устойчивого развития горнотехнических систем на базе установления закономерностей взаимодействия природных и инновационных технологических процессов в условиях интенсивного комплексного освоения недр земли (промежуточный, этап 2)» / рук. К.Н. Трубецкой. – Москва: ИПКОН РАН, 2021. – 189 с.

107. Патент 1 800 063 (RU). Передвижной закладочный комплекс: заявка на патент № 1800063 / (RU) 1 800 063 A1; Международная классификация патентов (МПК): E21F 15/02 (2006.01). 1993.03.07

108. Патент 2232823 RU. Способ получения рудоугольных окатышей / Павловец В.М.; опубл. 20.07.2004.

109. Патент 2247834 RU. Способ разработки урановых руд, залегающих в устойчивых породах, подземным выщелачиванием в камерах / Головин В. Ф., Литвиненко В. Г., Морозов А. А., Шелудченко В. Г., Филоненко В. С., Андреев И. Ю., Горбунов В. А., Корнеев В. Б.; опубл. 10.03.2005.

110. Патент 2429303 RU. Способ подземного выщелачивания полезных компонентов из сырья / Борисков Ф. Ф.; опубл. 20.09.2011.

111. Патент 2747275 C1. Способ подземного выщелачивания металлов из сульфидсодержащего минерального сырья / Д. Р. Каплунов, Д. Н. Радченко, Л.А. Гаджиева [и др.]: опубл. 04.05.2021

112. Патент CN106448411B. Экспериментальное устройство для моделирования выемки руды из шахты / Лю Яньчжан, Чжан Куй, У Эньцяо, Йе Ичэн, Ке Лихуа, Сюй Цзяньлун, Ван Циху, Йе Зуюян, Чэнь Сяочян, Пань Шихуа, Зоу Сяотянь, Лю Юнтао, Ван Вэньцзе; опубл 30.08.2022

113. Патент CN113202471B. Способ подземного блочного выщелачивания полезных ископаемых / Сунь Цзянь, Чжань Цзинь, Оу Реньцзе, Линь Вэйсин, Чжоу Ли, Чжу Чэньди; опубл. 01.04.2022.

114. Патент RU2506423 C1. Способ подземного блочного выщелачивания полезных ископаемых / Тедеев М. Н., Гнучева А. И.; опубл. 10.02.2014.

115. Патент SU883445A1. Способ подземного выщелачивания полезных ископаемых / Бубнов В. К., Баранов В. М., Чернецов Г. Е., Потапов В. П., Кулагин А. И., Киселев Г. И., Пономаренко С. А., Фоменко В. М.; опубл. 23.11.1981.

116. Порцевский А.К. Геомеханическое обоснование выбора технологии подземной добычи руды с последующим использованием пустот // Дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2006. – 258 с.

117. Прокин В.А. Закономерности размещения колчеданных месторождений на Южном Урале. - М., «Недра», 1977. - 176 с.

118. Радченко Д. Н., Корнеев Ю. В., Лавенков В. С. Оценка эффективности работы передвижных закладочных комплексов в подземных условиях // ГИАБ. - 2014. - № S1-1. - С.150-163

119. Радченко Д.Н, Лавенков В.С., Гаджиева Л.А. Закономерности формирования технологических свойств минерально-сырьевых потоков как база имитационного моделирования нового технологического уклада развития

подземных рудников. // Материалы X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу», - Магнитогорск: МГТУ - 2019. - С.288-300

120. Радченко Д.Н. Разработка комбинированной геотехнологии освоения месторождений медно-колчеданных руд с комплексным использованием отходов их переработки: // Дис. ... канд. техн. наук. - Магнитогорск, 2004. - 155 с.

121. Радченко Д.Н., Гаджиева Л.А. Результаты исследований свойств вмещающих пород месторождений многокомпонентных руд Урала для формирования на геополимерной основе горнотехнических конструкций в системах подземного выщелачивания // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» - Магнитогорск.: Издательство «Перо». - 2022. - С. 95–98

122. Радченко Д.Н., Гаджиева Л.А. Состав и свойства закладочных смесей при формировании горнотехнических конструкций для подземного выщелачивания // Материалы к конференции Международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» - М.: ИПКОН РАН. - 2020. - С. 310–313

123. Радченко Д.Н., Гаджиева Л.А., Гавриленко В.В. Сравнительный анализ свойств закладочных массивов на цементной и геополимерной основе в свете перспектив формирования камер для шахтного подземного выщелачивания // Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 25–28 октября 2021 г. – М: ИПКОН РАН. - 2021. - С. 207–209.

124. Рахимова Н. Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // Строительные материалы. - 2008. - № 9. - С. 77-80.

125. Рыльникова М. В., Айнбиндер Г. И., Митишова Н. А., Гаджиева Л. А. Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при

комбинированной разработке месторождений // Известия Тульского государственного университета "Науки о земле". - 2020. - № 2. - С. 341–356.

126. Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Разработка комбинированных геотехнологий полного цикла комплексного освоения месторождений с формированием систем управления потоками природного и техногенного сырья // Проблемы недропользования. - 2014. - № 3. - С. 105-112.

127. Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Разработка комбинированных геотехнологий полного цикла комплексного освоения месторождений с формированием систем управления потоками природного и техногенного сырья // Проблемы недропользования. - 2014. - № 3. - С. 105-112.

128. Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Лавенков В. С. Обоснование условий применения передвижных закладочных комплексов при разработке месторождения «Озерное» // ГИАБ. - 2013. - № 54. - С. 39-44

129. Рыльникова М. В., Юн А. Б., Терентьева И. В., Есина Е. Н. Восполнение выбывающих мощностей действующих рудников на стадии доработки балансовых запасов месторождения - условие экологически сбалансированного развития Жезказганского региона // Маркшейдерский вестник. - 2016. - № 5. - С. 6-10.

130. Савич И. Н., Зенько Д. К., Айнбиндер И. И., Савич О. И. К вопросу о классификации технологий и составов закладки // ГИАБ. - 2000. - № 1. - С. 186-187.

131. Самые богатые месторождения золота и самые глубокие подземные рудники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/13025>. Дата обращения 24.03.2022.

132. Святецкий В. С., Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Морозов А. А., Филоненко В. С., Бодров А. С. Прочность пастовой закладки на основе хвостов переработки урановых руд ПАО "ППГХО" // ГИАБ. - 2017. - № 6. - С. 333-341

133. Святецкий В. С., Кузьмин Е. В., Морозов А. А., Марковец В. В., Калакуцкий А. В. Определение коэффициентов эманации и диффузии радона

из пастовой закладки на основе хвостов ГМЗ ПАО "ППГХО" // ГИАБ. - 2017. - № 5. - С. 5-15

134. Старостина И. А. Кислотно-основные взаимодействия полимеров и металлов в адгезионных соединениях // Дисс. ... докт. хим. наук. — Казань, 2011. - 315 с.

135. Старостина Н.Н. Разработка физико-химической технологии освоения медьсодержащих месторождений Урала: на примере месторождений Сибайской группы // Дис. ... канд. техн. наук. - Магнитогорск, 2002. - 181 с.

136. Стоянов О. В., Старостина И. А. Развитие методов оценки поверхностных кислотно-основных свойств полимерных материалов // Вестник технологического университета. - 2010. - № 4. - С. 58—68.

137. Трубецкой, К.Н. Чантурия В.А., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья - М.: Наука, 2010. - 437 с.

138. Федосеев В.В., Гаджиева Л.А. Опыт и результаты переоценки золоторудных месторождений Челябинской области для открытой разработки и выщелачивания путем понижения бортового содержания // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 328–339.

139. Федосеев В.В., Рябов Ю.И., Гаджиева Л.А. Переоценка золоторудных месторождений Челябинской области –основа развития минерально-сырьевой базы АО «ЮГК» // Известия Тульского государственного университета "Науки о земле". - 2020. - № 4. - С. 547–560.

140. Халезов Б.Д. и др. Историческая справка и обзор зарубежной практики кучного и подземного выщелачивания // Горн, информ.-аналит. бюл. 2002. - №4. -С. 57-61.

141. Халезов, Б.Д. Кучное выщелачивание медных и медно-цинковых руд (отечественный опыт). - Екатеринбург: УрО РАН, 2013. - 348 с.

142. Христофоров Б. С. , Скворцова Л. И., Бирюкова Р. Ф. и др. Химия минералов меди – Новосибирск, Наука. – 1975. – 93 с.

143. Цой С. В., Катков Ю. А., Цой Д. Ю. Проектный эскиз подземного выщелачивания забалансовой медной руды Жезказганского месторождения и переработки продуктивных растворов // Изв. НТО "Кахак". - 2016. - С. 5-10.

144. Чантурия В.А., Козлов А.П., Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г. Приоритетные направления развития поисковых и прикладных научных исследований в области использования в промышленных масштабах отходов добычи и переработки полезных ископаемых // Горн. промышленность. - 2014. - № 1. - С. 54-61.

145. Шадрунова И. В., Рыльникова М. В. История горного дела: Учебное пособие. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И.Носова, 1999. – 80с.

146. Юн А. Б. Разработка и обоснование параметров горнотехнической системы комплексного освоения Жезказганского месторождения в условиях восполнения выбывающих мощностей рудников // Дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2016. – 333 с.

147. Юн Ю. А., Есина Е. Н., Рыльников А. Г., Гаджиева Л. А. Обоснование параметров рудничной сепарации рудничной массы при разработке медных месторождений Жезказганского региона // Известия Тульского государственного университета «Науки о земле». - 2019. - № 3. - С. 203-211.