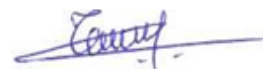


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ (РУДН)



На правах рукописи

ТЧАРО ХОНОРЕ

**РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА**

Специальность

25.00.13. – «Обогащение полезных ископаемых»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент
Чекушина Татьяна Владимировна

Москва

2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.....	12
1.1. Факторы, определяющие распределение выщелачивающих растворов.....	13
1.2. Факторы, определяющие испарение технологических растворов.....	17
1.3. Факторы, определяющие разбавление технологических растворов	26
1.4. Факторы, определяющие образование малопроницаемых слоев в штабеле КВ	32
1.5. Факторы, определяющие потери нанозолота при выщелачивании золотосодержащих руд.....	34
1.6. Выводы.....	45
2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА	48
2.1. Объект и предмет исследования.....	48
2.2. Методы исследования предотвращения испарения с применением кремнийорганических соединений	49
2.2.1. Экспериментальные исследования эффективности кремнийорганических соединений	49
2.2.2. Компьютерное моделирование движения кислорода в штабеле кучного выщелачивания.....	51
2.3. Методы математического расчета фильтрации технологических растворов в штабеле КВ	52
2.3.1. Метод расчета гидравлической проницаемости при создании вертикальных каналов	54

2.3.2. Метод расчета гидравлической проницаемости при создании наклонных каналов	57
2.4. Компьютерное моделирование для изучения процессов фильтрации .	59
2.5. Методы лабораторного исследования фильтрационных характеристик штабеля КВ	61
2.6. Математическое моделирование взаимодействия между наночастицами золота	64
2.7. Выводы	65
3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД.....	67
3.1 . Исследование эффективности применения кремнийорганических соединений на объектах кучного выщелачивания	67
3.1.1. Результаты экспериментальных исследований предотвращения испарения с применением кремнийорганических соединений.....	67
3.1.2. Технология предотвращения испарения технологических растворов при кучном выщелачивании металлов на основе применения нанопленочного материала	76
3.2. Интенсификация кучного выщелачивания золотосодержащих руд на основе регулирования фильтрационных характеристик штабеля КВ...	87
3.2.1. Разработка специализированного робота, предназначенного для работы в несвязанной среде	87
3.2.2. Технология повышения фильтрации технологических растворов в штабелях кучного выщелачивания с помощью роботов	95
3.2.3. Результаты математического моделирования фильтрации.....	101
3.2.4. Результаты компьютерного моделирования исследований до и после восстановления проницаемости штабеля КВ	104
3.2.5. Результаты экспериментального исследования процессов фильтрации растворов	106

3.3. Исследование извлечения нанозолота в процессе кучного выщелачивания.....	109
3.3.1. Изучение механизма образования и потерь «островков» и пленок плавучего золота	109
3.3.2. Результаты математического моделирования потенциала взаимодействия между наночастицами	115
3.3.3. Технология выщелачивания «плавучих» нанозолотин из технологических растворов	117
3.4. Выводы.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время в практике золотодобычи все большее внимание уделяют технологиям кучного выщелачивания (КВ), т.к. они с высокой степенью эффективности позволяют извлекать золото из довольно бедных (0,5-1,2 г/т) руд. При этом технология кучного выщелачивания имеет довольно значительные перспективы в золотодобывающей промышленности в большинстве стран Африки, а также Юго-Восточной Азии и Латинской Америке.

Степень разработанности темы. Научные исследования по совершенствованию технологии кучного выщелачивания проводят во многих ведущих научно-исследовательских и образовательных организациях, таких как ЦНИГРИ, ВНИИХТ, ВНИИЦВЕТМЕТ, ВНИПИпромтехнология, ГИНЦВЕТМЕТ, ИПКОН РАН, ИГД им. Д. Кунаева (Республика Казахстан), РГГРУ (МГРИ), НИТУ МИСиС, ОАО «Иргиредмет», ПромНИИпроект, ТОМС, Узгеолити (Республика Узбекистан), Уралмеханобр, Унипромедь, ЧитГУ, ЦНИЛ НГМК, НГГУ и др. Значительный вклад в решение вопросов повышения эффективности кучного выщелачивания металлов из бедного минерального сырья внесли многие ученые: академик РАН Чантурия В.А., Седельникова Г.В., Курков А.В., Морозов Ю.П., Бочаров В.А., Воробьев А.Е., Войлошников Г.И., Дементьев В.Е., Зеленов В.И., Игнаткина В.А., Крылова Г.С., Санакулов К.С., Секисов А.Г., Фазлуллин М.И., Федотов К.В., Чантурия Е.Л., Шадрунова И.В., Шумилова Л.В., Щелкин А.А., Чекушина Т.В., Breitenbach A.J., Daniel W. Kappes и др.

Наиболее актуальные задачи, стоящие перед горнодобывающими предприятиями, связаны с разработкой эффективных способов интенсификации технологии кучного выщелачивания.

Одной из важнейших задач оптимизации процесса кучного выщелачивания является повышение эффективности режимов обработки

технологическими растворами, т.к. существенным недостатком является их испарение из штабеля КВ, или же наоборот – их разбавление атмосферными осадками.

При испарении или миграции за пределы площадки КВ растворы выщелачивания оказывают отрицательное влияние на окружающую среду, биоту, людей и применяемую технику практически в 99 % случаев. Объем таких растворов, как правило, варьируется в зависимости от применяемой системы орошения и свойств технологических растворов, климатических условий, рельефа местности и др. Орошение штабеля при кучном выщелачивании золота из руд осуществляется чаще всего с помощью открытой укладки системы оросителей (шлангов, трубопроводов и канав).

Решением этих технологических и геоэкологических проблем является применение различных видов пленочных покрытий поверхности штабеля КВ, используемых с целью уменьшения испарения технологических растворов в окружающую среду в засушливый период времени, а также управления потоками воды во время дождей (для предотвращения разбавления технологических растворов и их проникновения в природные поверхностные и подземные воды).

Целенаправленное управление вышеуказанными аспектами позволяет обеспечить необходимое качество технологических растворов – оптимальных значений концентрации цианидов ($0,6-0,8 \text{ г/дм}^3$), рН (9–11), Eh (в пределах – 610 мВ) и поверхностного натяжения ($<0,04 \text{ Н/м}$), во многом обуславливающих возникновение и продолжительность «жизни» плавучих островков из нанозолота, которые при миграции зачастую теряются в сборочных бассейнах с илом или уходят в «хвосты» переработки.

Выявление наночастиц золота (НЧ-Au) на большинстве золотосодержащих (рудных и россыпных, геогенных и техногенных) месторождений позволяет существенно расширить существующую минерально-сырьевую базу этого металла, а также на этой основе обеспечить

разработку весьма эффективных технологий его извлечения (выщелачивания).

Интенсификация технологии КВ возможна за счет обеспечения необходимого уровня равномерной проницаемости массива штабелей КВ при выщелачивании заскладированных золотосодержащих руд, разрушения малопроницаемых слоев, образующихся из-за закупоривания их порового пространства тонкодисперсными частицами (шламом, пылью и глинистыми частицами), и освобождения для выщелачивающих растворов частиц золота, заключенных в рудах зоны кольтатации.

Цель исследования – разработка способов интенсификация кучного выщелачивания золота из руд, за счет экранирования штабеля КВ, контролируемого изменения характеристик технологических растворов и разрушения малопроницаемых слоев.

Объект исследования – установки и массивы штабелей КВ.

Предмет исследования – технологические растворы кучного выщелачивания и факторы, влияющие на их эффективность.

Основная идея работы заключается в обосновании возможности стабилизации свойств выщелачивающих растворов путем их сохранения и/или изменения с одновременным улучшением фильтрационных характеристик штабеля кучного выщелачивания.

Задачи исследования:

1. Установить условия эффективного применения различных покрытий штабеля КВ.

2. Разработать технологию интенсификации кучного выщелачивания золота из руд, позволяющую решить проблему испарения, потерь и разбавления технологических растворов.

3. Разработать технологию равномерной обработки штабеля КВ выщелачивающими растворами, обеспечивающую интенсификацию переработки золотосодержащих руд.

4. Изучить механизмы потерь наноразмерного золота с

технологическими растворами и разработать соответствующий способ его извлечения.

Поставленные задачи были решены путем:

- установления эффективных областей использования различных покрытий;
- разработки нового, эффективного способа экранирования поверхности штабеля КВ;
- разработки роботизированного устройства, способствующего более эффективной обработке выщелачивающими растворами штабелей КВ;
- выявления механизмов потерь нанозолота, на основе формирования «островков» и пленок плавучего золота, что позволяет обосновать принципиально новые технологии для извлечения такого металла при обработке штабеля КВ.

Методы исследования: системно-структурный анализ процессов, определяющих испарение, разбавление, просачивание технологических растворов в штабелях КВ; приборно-аналитические и экспериментальные методы исследований в лабораторных и натуральных условиях; методы математического и компьютерного моделирования.

Практическая значимость работы:

1. Разработана технология покрытия поверхности штабеля КВ силиконовой пленкой.
2. Разработаны новое роботизированное устройство и технология равномерной обработки массива КВ выщелачивающими растворами для предотвращения образования в них малопроницаемых закольматированных слоев.
3. Предложен способ снижения потерь нанозолота с технологическими растворами, обеспечивающий целенаправленное его извлечение из штабеля кучного выщелачивания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение силиконовой нанопленки, сохраняющей оптимальное значение концентрации цианидов в технологических растворах в заданном диапазоне 0,6-0,8 г/дм³, рН – 9-11 и E_h в пределах –610 мВ, обеспечивает снижение негативных последствий испарения или разбавления технологических растворов.

2. Разработанная технология обеспечения оптимальных гидродинамических характеристик штабеля КВ путем введения в него мобильного малогабаритного роботизированного устройства позволяет увеличить область переработки золотосодержащих руд на 12 % и более, эффективность фильтрации растворов – на 15 % и более (от начальных значений этих параметров).

3. Режимы обработки продуктивных растворов веществами, снижающими их поверхностное натяжение до 0,04 Н/м и менее, обеспечивают повышение извлечения «островков» и пленок плавучего нанозолота (общие потери, которых приходится на нанозолото размером от 5 до 120 нм).

Научная новизна результатов исследований:

1. Установлены области применения геомембранных покрытий в практике кучного выщелачивания золота и разработана принципиально новая, эффективная технология экранирования с использованием нанопокрывтия на основе кремнийорганических соединений.

3. Разработаны роботизированное устройство и технология его применения в массиве штабеля КВ, позволяющие обеспечить качественное и количественное повышение извлечения золота из руд.

3. Предложено применение ПАВ для снижения поверхностного натяжения технологических растворов и улавливания «плавучего золота».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на VIII международной научно-практической конференции (Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Владикавказ, 2015 г.);

международном интеллектуальном конкурсе студентов и аспирантов «University Stars – 2016»; Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» в 2017 г. и 2020 г. (МИСиС, г. Москва); X Международной научной конференции «Инновации в технологиях и образовании» (КузГТУ, г. Белово, 2017 г.); XXIII Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (Россия, 2018 г.); XVII Уральской горнопромышленной декаде (УГГУ, Екатеринбург, 2018 г.); VIII международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (КузГТУ, г. Кемерово, 2019 г.); X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (г. Магнитогорск, 2019 г.); 14-ом Международном конгрессе по прикладной минералогии - ICAM-2019 (БГТУ, г. Белгород, 2019 г.); Международной мультидисциплинарной научной геоконференции – SGEM (2019 г.), Международном совещании Плаксинские чтения 2020 «Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (г. Апатиты, 2020); V Всероссийской конференции «Химия и химическая технология: достижения и перспективы» (г. Кемерово, 2020 г.).

Личный вклад автора состоит в анализе и обобщении мирового опыта использования технологии кучного выщелачивания золотосодержащих руд; постановке задач и проведении экспериментальных исследований по выявлению эффективности кремнийорганических соединений при герметизации штабеля КВ и по разрушению малопроницаемых заcolmатированных слоев внутри штабеля КВ; адаптации среды SVOffice для выполнения поставленных задач и создания математических и компьютерных моделей изменения фильтрационных характеристик штабелей кучного выщелачивания.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ, 4 статьи в изданиях, входящих в

информационно-аналитические системы международного цитирования: Scopus – 3 статьи, Web of Science (изд-во Springer) – 1 статья. Получен Евразийский патент на изобретение и 3 положительных решения о выдаче евразийских патентов на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованной литературы из 140 наименований, содержит 142 страницы, 22 таблицы, 60 рисунков.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и благодарность моему научному руководителю доценту Т.В. Чекушиной за помощь на всех этапах выполнения диссертации. Огромная признательность профессору А.Е. Воробьеву за многолетнюю совместную научную деятельность, поддержку и неоценимый вклад в работу над диссертацией. Спасибо профессору Каки К. за заботу и помощь во время учебы в России.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Технология кучного выщелачивания в промышленной практике широко применяется в различных странах мира с начала 1970-х годов.

Технология отличается простотой реализации, низкими капитальными и эксплуатационными затратами, однако эффективность ее применения снижается из-за определенных природных и технологических факторов.

На африканском континенте большинство установок КВ расположено на открытых площадках.

Часто штабели КВ подвергаются негативному влиянию различных климатических факторов (рис. 1.1): испарению, вызванному повышением температуры [67], усиленному ветродую, негативному воздействию выпадающих атмосферных осадков (рис. 1.2), что существенно осложняет управление технологическими растворами и водными ресурсами и влечет за собой нарушение технологических процессов.

Анализ указанных факторов позволил оценить основные проблемы КВ золота из руд, решение которых позволит увеличить эффективность работы установок КВ (рис. 1.3).

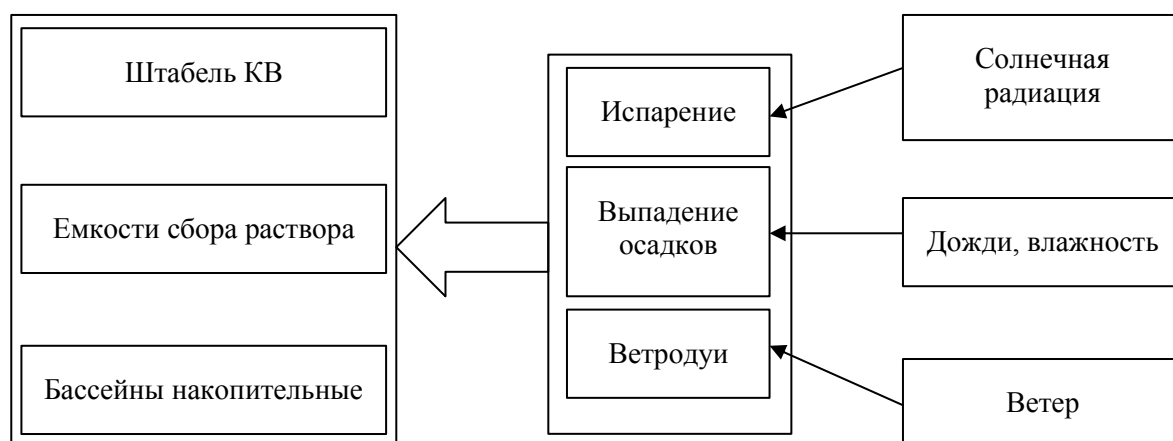


Рис. 1.1. Схема влияния климатических факторов на технологические элементы КВ

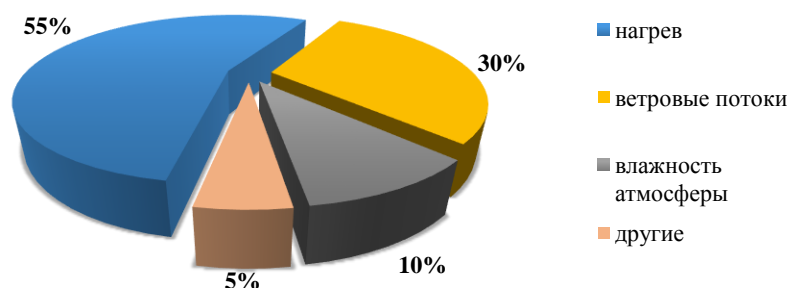
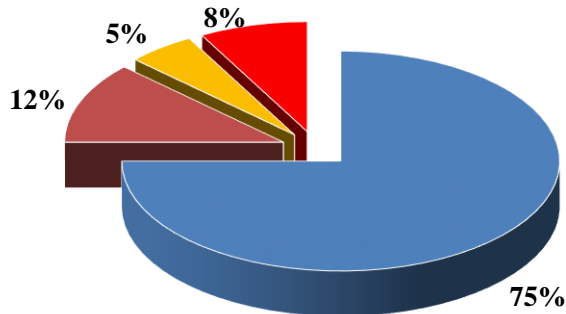


Рис. 1.2. Процентное соотношение природных факторов, определяемых показателями испарения технологических растворов



- Самопроизвольное испарение и разбавление технологических растворов
- Низкая эффективность наружных антифильтрационных покрытий штабеля КВ
- Наличие потерь ультрадисперсных золотин
- Снижение значения фильтрации технологических растворов

Рис. 1.3. Анализ факторов, влияющих на эффективность выщелачивания руд

На эффективность обработки массивов штабелей кучного выщелачивания влияют следующие факторы: испарение и разбавление технологических растворов (75 %), качество антифильтрационных наружных покрытий (8 %), потери ультрадисперсных золотин в штабеле и с растворами (5 %), снижение фильтрационной способности штабеля (12 %).

1.1. Факторы, определяющие распределение выщелачивающих растворов

Наиболее важным для более эффективного выщелачивания металлов является равномерное распределение выщелачивающих растворов внутри штабеля КВ [5, 9, 59, 60], осуществляемое для обеспечения полной и

эффективной обработки кусков выщелачиваемой руды по всему штабелю КВ (рис. 1.4). При этом в процессе распределения технологических растворов на поверхности штабеля руды, наибольший контакт получают относительно небольшие (не более 20-30 мм) куски.

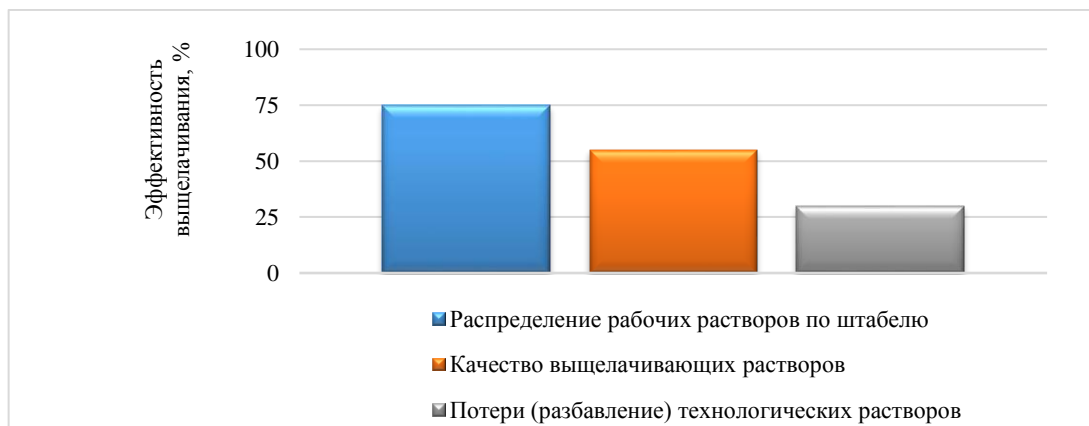


Рис. 1.4. Влияние характеристик технологических растворов на эффективность выщелачивания штабеля КВ

Для эффективной обработки кусков руды в технологических растворах штабеля КВ необходимо поддерживать постоянное значение требуемой концентрации реагентов (0,6-0,8 г/дм³), рН = 9-11 и Eh = -610 мВ.

Необходимо отметить, что при кучном выщелачивании показатели извлечения благородных металлов из руд [48, 77,102,108,112] напрямую зависят от многих переменных факторов.

В основном распределение рабочих растворов по штабелю КВ зависит от применяемого способа орошения.

В результате анализа имеющихся предприятий КВ, в реальной практике кучного выщелачивания способы подачи технологических растворов на штабель делятся на (рис. 1.5): гидростатические, фильтрационные, инфильтрационные и импульсные.

Гидростатический процесс протекает таким образом: поровое пространства массива штабеля КВ заполняется при просачивании технологическими растворами. При этом образуются силы, удерживающие их в массиве штабеля КВ в течение определенного времени.


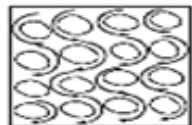
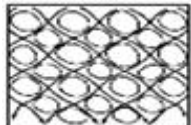
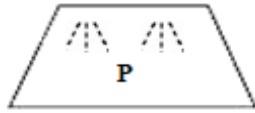

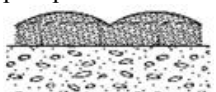

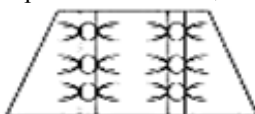
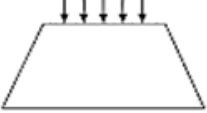
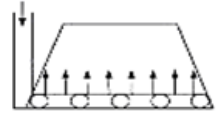
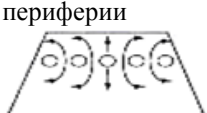
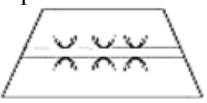
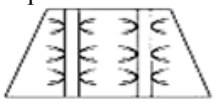

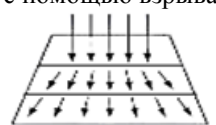
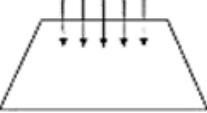
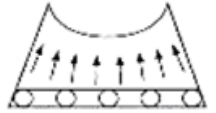
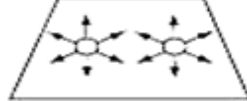
- 1. Способ подачи растворов**
 гидростатический 
 фильтрационный 
 инфильтрационный 
 импульсный 
- 2. Вид обработки технологическими растворами**
 распыление 
 разбрызгивание 
 затопление 
 обработка с помощью взрыва 
- 3. Поступление растворов в выщелачиваемый массив**
 сверху вниз 
 снизу-вверх 
 из центра к периферии 
от боков к центру, комбинированный способ
- 4. Расположение устройств, подающих растворы внутри массива**
 горизонтальное 
 вертикальное 
на поверхности массива с помощью спринклеров и капельных шлангов
- 5. Способ распределения технологических растворов**
 обычный 
 рассредоточенный с помощью взрыва 
с обволакиванием кусков руды
- 6. Используемые покрытия**
 слоем горнорудной массы, полимерные, водо- и растворонепроницаемые светопрозрачные, силиконовые
- 7. Силы, определяющие миграцию технологических растворов**
 гравитация 
 термоградиент 
 градиент концентрации (осмос) 
давление, гидродинамический напор, наложение электромагнитных полей, возбуждение различных колебаний, радиоактивное излучение
- 8. Способ интенсификации процесса выщелачивания**
 подогрев, насыщение кислородом, предварительная активация, электромагнитное воздействие, бактерии, *отсасывание раствора вакуумным насосом, введение окислителей, наложение электромагнитных полей, возбуждение различных колебаний, радиоактивного излучения*
- 9. Тип активных агентов**
 кислоты, щелочи, бактерии, органические соединения, *комплексные соединения*
- 10. Режим орошения**
 напорный, безнапорный
- 11. Время воздействия выщелачивающих растворов**
 постоянно, периодически

Рис. 1.5. Типизация способов орошения штабелей КВ (по Воробьеву А.Е. с добавлениями и изменениями)

При гидростатическом способе продуктивные металлоносные растворы выпускаются через нижнюю часть штабеля КВ, за счет их удельного веса, когда силы притяжения превышают силы удерживающие, в результате происходит фильтрация и выпуск продуктивных металлоносных растворов.

Наиболее широкое применение в геотехнологической практике нашел инфильтрационный способ. Под фильтрационным способом орошения понимают непрерывное перемещение выщелачивающих растворов в штабеле КВ через систему открытых пористых каналов и трещин при его полном насыщении [78].

Инфильтрационный способ предусматривает просачивание выщелачивающих растворов с поверхности внутрь массива штабеля КВ при неполном его насыщении под воздействием гравитационных сил, тянущих растворы вертикально вниз независимо от вида их поступления в штабель через поры, пустоты и трещины самых различных форм и размеров [70].

При инфильтрационном процессе КВ горная масса обрабатывается в процессе разбрызгивания рабочих растворов на ее поверхности, при затоплении (с помощью канавок, прудков или траншей) матрицы горных пород технологическими растворами, подаче их через перфорированные оросительные трубопроводы, обработке с помощью взрыва или сочетанием различных способов. Выщелачивающие растворы могут поступать в штабели КВ сверху вниз под действием сил гравитации; перемещаться снизу-вверх при создании гидравлического замка; мигрировать из центра к периферии [24] или с боковых поверхностей к центру.

По способу распределения рабочих растворов выделяют распределение обычное и с рассредоточением потока. Для рассредоточения потока в массиве штабеля формируют, по меньшей мере, один слой мелкозернистого материала высотой 50-120 мм. В результате обеспечивается распределение гидродинамического потока по всему сечению штабеля.

Исходя из мировой практики применения технологии КВ, основываясь

на физико-химической гидродинамике механизма массопереноса [40], доказано, что наиболее эффективное орошение штабелей, обеспечивающее минимальные потери, испарение и расход технологических растворов, достигается при подаче их через перфорированные оросительные трубопроводы, установленные внутри штабеля. Чтобы уменьшить потери от испарения, следует избегать чрезмерно высоких рабочих давлений, так как площадь покрытия и однородность подачи технологических растворов будут одновременно снижаться. Перфорированные трубы вертикально вводят в штабель КВ с шагом 5-10 м между ними. Через них подают выщелачивающие растворы и воздух под давлением внутри штабеля КВ. Вытекающие из отверстий вертикальных труб струи создают замкнутое движение растворов в пределах зон выщелачивания, что и способствует распределению их в разные зоны штабеля и тем самым облегчается интенсификация просачивания и выщелачивания.

Система орошения вертикальными перфорированными трубами относится к закрытой системе укладки оросителей и имеет преимущество применения, особенно в засушливых районах, за счет возможности предотвращения потерь (за счет испарения) технологических растворов [61, 66]. Тем не менее, практически любой из представленных методов орошения связан с потерей определенного количества технологических растворов или снижением их качества, в основном за счет влияния природных факторов (действия солнечных радиации, ветровых потоков, выпадения осадков).

1.2. Факторы, определяющие испарение технологических растворов

На испарение технологических растворов из штабелей КВ влияют существующие атмосферные условия (нагрев, влажность атмосферы, ветровые потоки и др.), тепловые и гидравлические свойства выщелачиваемой руды (теплопроводность и гидравлическая проводимость, пористость и т.д.),

влияние которых довольно сложно вычислить.

На рис. 1.6 показаны значения годовой степени радиации по территории Африки, которые изменяются в диапазоне от 1600 до 2400 и более кВтч/м². Среднее 24-часовое падающее солнечное излучение на плоской горизонтальной поверхности колеблется от 800 до ~2000 калл на 1 м² (в условиях пустыни), что может способствовать испарению 5-12 л растворов в день [90]. Среднемесячная максимальная температура в большинстве стран Африки колеблется в диапазоне 25-42 °С, минимальная температура находится в интервале 8-27 °С.

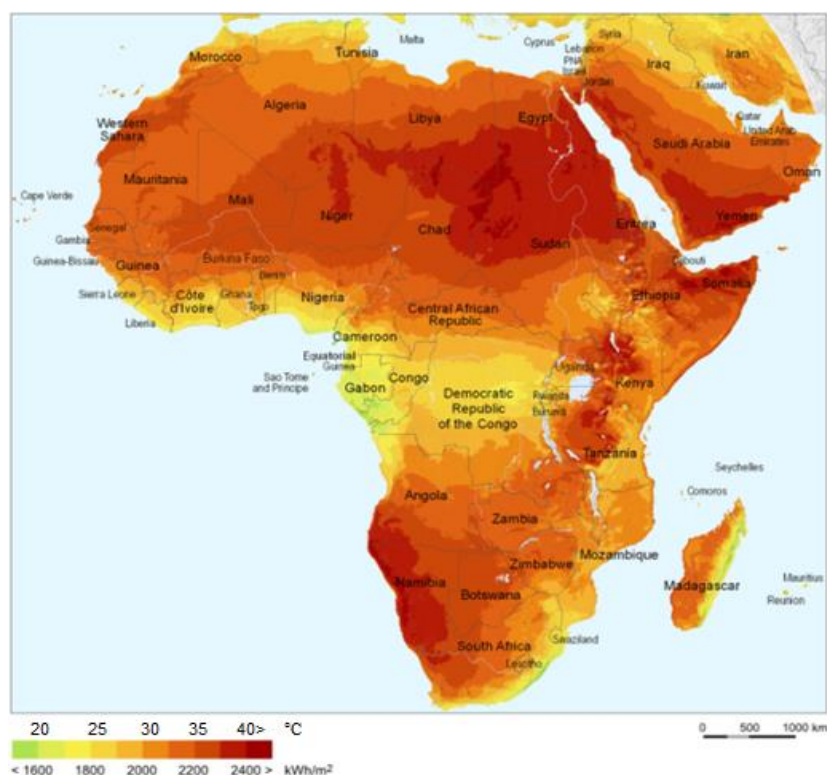


Рис. 1.6. Распределение солнечной радиации по территории Африки

Испарение технологических растворов более выражено в сухих районах Африки (например, в восточных районах Сахары), в частности в Буркина Фасо, где в летние месяцы температура днем обычно находится в пределах 40-45°С и выше летом (при том, что ежегодное количество осадков в этих местах обычно не превышает 100-200 мм). При этом уровень испарения технологических растворов зависит от применяемого способа орошения.

Орошение с помощью спринклера связано с более значительным количеством потерь воды и реагентов на испарение и сток, что усиливает негативное воздействие на окружающую среду [39].

Базируясь на аэродинамических испытаниях потерь на испарения от спринклера, Майерс и др. пришли к выводу о вероятности потерь более 5 % капель растворов на испарение в пути от спринклера до поверхности штабеля (при типичной системе орошения разбрызгиванием в условиях климатических условий Африки).

Установлено, что испарение растворов, независимо от механизма его функционирования, происходит при тепловой вместимости ≥ 580 калорий на грамм испаряемой жидкости. При типичной загрузке штабеля КВ $10 \text{ дм}^3/\text{м}^2/\text{ч}$, поступающая солнечная радиация приводит к испарению 2-5 % применяемого технологического раствора при использовании спринклеров. Во время работы спринклера растворы испаряются из капель, распыляемых по воздуху.

Испарение растворов в основном зависит от 3-х факторов:

- 1) климатических условий (температуры, влажности и т.д.);
- 2) времени, необходимого для испарения;
- 3) площади поверхности капель растворов.

Действие ветра особо выражено при применении в технологии КВ спринклерного орошения. Это обусловлено тем, что во время работы спринклера поток технологических растворов поступает в атмосферу с большой скоростью и на некоторую высоту (рис. 1.7).

Трение между воздухом и потоком выбрасываемых из спринклера растворов способствует их разрушению на отдельные капли. В результате ветровые потоки могут вызывать перенос капель растворов за пределы орошаемого штабеля КВ [43]. Чем выше скорость ветра и меньше размеры капель растворов, тем больше их потери за счет воздушной транспортировки. При более высоких скоростях ветра большие капли технологического раствора могут переноситься ветром на значительные расстояния.



Рис. 1.7. Фото спринклерного орошения руды

Ветер также увеличивает испарение, перенося более теплый или сухой воздух из окружающих областей, чтобы вытеснить влажный, прохладный воздух над орошаемой поверхностью.

В засушливые периоды объемы обрабатываемых растворов могут значительно уменьшаться за счет интенсивного испарения технологических растворов с поверхности рудного штабеля, а также из различных водосборников, предусмотренных для хранения продуктивных и маточных растворов.

Таким образом, в суровых сухих климатических условиях и при воздействии сильных ветровых потоков прямые потери от спринклера могут составлять примерно 40-60 % и даже больше от общего объема перекачиваемого технологического раствора.

На рис. 1.8 представлены установленные общие потери от испарения, включающие потери спринклера, конвективные потери от воздуха, протекающего через штабеля КВ.

Потери на испарение из оросительной системы спринклера могут быть уменьшены путем изменения рабочих условий спринклера для создания более крупных размеров капель технологических растворов или путем орошения, когда климатическое воздействие будет незначительным [98].

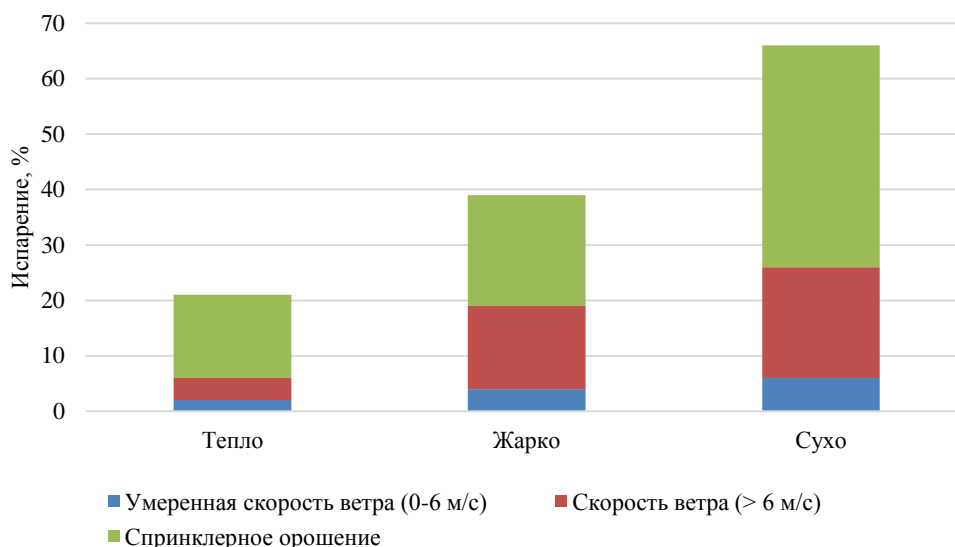


Рис. 1.8. Потери растворов при орошении штабелей КВ в зависимости от интенсивности ветра и температурных условий [21]

Потери уменьшаются путем изменения одного или обоих следующих условий работы спринклеров: увеличения диаметра сопла; уменьшения рабочего давления.

Оба эти условия позволяют увеличить долю крупных капель, тем самым уменьшая испарение с площади разбрызгивания. В противном случае будут возникать неэффективные схемы распределения, что уменьшит однородность применения технологических растворов.

Чтобы предотвратить чрезмерной потери технологических растворов от ветра, системы орошения не должны эксплуатироваться при высоких скоростях ветра.

В настоящее время капельное орошение является предпочтительным методом орошения: оно обеспечивает более точную скорость нанесения и равномерное распределение раствора на штабель КВ, сохраняя при этом целостность и высокие показатели проницаемости его поверхности, значительно уменьшая испарение растворов. Применение такого технологического решения, как капельное орошение (рис. 1.9) позволяет увеличить время просачивания и обеспечить насыщение штабеля КВ более

равномерно, что уменьшает потенциал перенасыщения и канализации, что часто наблюдается в системах орошения с помощью спринклеров [12]. Однако было установлено, что при использовании капельного орошения показатели испарения будут несколько меньше (1-4 %) [90].



Рис. 1.9. Применение капельного орошения

Для решения этих проблем DRTS предлагает новый продукт - капельный излучатель Minogo™, специально предназначенный для капельного орошения в кучном выщелачивании [116].

Применение системы напорных эмиттеров (капельное орошение) является более экономичным способом орошения рудного штабеля, позволяющее уменьшить испарение с последующим сокращением количества используемых воды и реагента.

Однако несмотря на то, что капельное орошение является эффективным методом распределения раствора в штабель КВ из-за низкой скорости потока раствора на единицу площади, типичные низкотоочные излучатели часто забиваются и заклинивают слишком легко подвешенными и растворенными твердыми частицами и требуют замены несколько раз в течение всего цикла выщелачивания, тем самым увеличивая операционные расходы. Излучатель Minogo™ имеет технологию Omni-Flow Labyrinth, которая устраняет мертвые зоны орошения для поддержания постоянной турбулентности, уменьшая осаждение взвешенных частиц, что предотвращает засорение и тем самым уменьшает испарение растворов.

При применении прудкового орошения (рис. 1.10), интенсивное тепловое воздействие может привести к суточному испарению более 5-10 мм/сут. технологических растворов из пруда (при средней температуре 35 °С и скорости ветра 4 км/ч).



Рис. 1.10. Применение прудкового орошения штабеля КВ

Орошение штабелей КВ путем затопления (с помощью канавок, прудков или траншей) имеет ряд других недостатков:

- неравномерное распределение выщелачивающих растворов по всему массиву;
- слабое и недостаточное орошение откосов штабелей КВ, в которых теряется не охватываемый растворами металл;
- вероятное заиливание, что уменьшит инфильтрацию, тем самым увеличит уровень испарения растворов с поверхностей штабеля КВ.

Если в процессе КВ можно заменить систему капельного выщелачивания на систему прудкового орошения (практический опыт

имеется на руднике «Еловый» - Северная Хакасия, РФ), то после запуска процесса кучного выщелачивания с прудковым орошением, переход к другим методам обработки руды экономически будет не выгодным. Для уменьшения испарения необходимо на поверхностях технологических растворов прудков установить плавучие покрытия и по возможности параллельно покрыть откосы для избегания утечки растворов [83].

Существуют механические плавучие покрытия (дерево, бамбук или ветви пальмы, пленки и т.п.) и покрытия с использованием химических веществ [86, 87, 99, 113]. Использование последних обеспечивает уменьшение испарения примерно на 70-90 % [122].

Недостатком покрытый из материалов сельскохозяйственного происхождения является возможность их применения только для небольших площадей в связи с доступностью материалов и короткого срока службы (около 3-х месяцев). Для больших площадей лучше применять другие виды покрытия, а именно тонкие пленки из масел и мономолекулярные пленки, т.к. они экономически более выгодны для решения проблемы испарения [101].

Для создания данной однослойной пленки применяют амфифильные вещества, обладающие как гидрофильными, так и гидрофобными свойствами: преимущественно гексадеканол (цетиловый спирт) - $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_2\text{OH}$ и октадеканол (стеариловый спирт) - $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_2\text{OH}$) [134]. Их получают из кокосового или пальмового масла, спирты не токсичны, характерной особенностью является отсутствие вкуса, запаха и токсичности [106, 117].

Недостатком подобных пленок при кучном выщелачивании является маленький срок службы (около 1-3 дней) за счет испарения, разрыв под воздействием химических веществ выщелачивающих растворов, бактерий, сил атмосферного ветра, посторонних веществ (различных тяжелых примесей: пыльников, песков и т.п.) и фотодегградации под УФ-излучением [51].

Таблица 1.1

Типизация факторов, влияющих на испарение выщелачивающих растворов при КВ [21]

Фактор	Эффективность фактора	Фактор	Эффективность фактора
Гранулометрический состав руды		Применяемый способ орошения	
Ветровое усилие		Скорость выпуска растворов	
Климатические условия Африки		Экранирование штабеля КВ	

Недостатком подобных пленок при кучном выщелачивании является маленький срок службы (около 1-3 дней) за счет испарения, разрыв под воздействием химических веществ выщелачивающих растворов, бактерий, сил атмосферного ветра, посторонних веществ (различных тяжелых примесей: пыльников, песков и т.п.) и фотодеградациии под УФ-излучением [51].

С целью интенсификации процесса прудкового выщелачивания [36] необходимо применять технико-технологические решения, связанные с уменьшением негативного воздействия радиации и выпадающих осадков, а также с устранением перечисленных недостатков, что является сложной задачей.

Для эффективной оценки испарения технологических растворов была проведена типизация основных факторов, влияющих на их испарение при кучном выщелачивании (табл. 1.1).

В ходе исследования было установлено, что при уменьшении размера кусков руды от 150 до 0,1 см, а также скорости фильтрации от 2 до 20 см/с происходит увеличение уровня испарения выщелачивающих растворов от 0,3 до 10 % и более.

При разбрызгивании потери технологических растворов возрастают от 5 до 25 % (при увеличении скорости ветра от 4 до 10 м/с). Причем данная величина испарения может увеличиться до 40-60 % в жарких и сухих регионах.

1.3. Факторы, определяющие разбавление технологических растворов

Атмосферные осадки, такие как обильные дожди, ливни и, в редких случаях, снег (рис. 1.11) могут привести к [10, 42, 44]:

- разбавлению технологических растворов при орошении штабеля КВ;
- стоку токсичных технологических растворов за пределы штабеля КВ;
- разрушению целостности штабелей КВ из-за образования в их массиве трещин, способствующих обрыву их боковых поверхностей;

- увеличению уровня продуктивных и маточных растворов в бассейнах с последующим их переливом;
- охлаждению штабелей технологических растворов и использованного в процессе КВ оборудования (шланги, трубы и пр.) в течение холодных ночей (редко) и дождей.

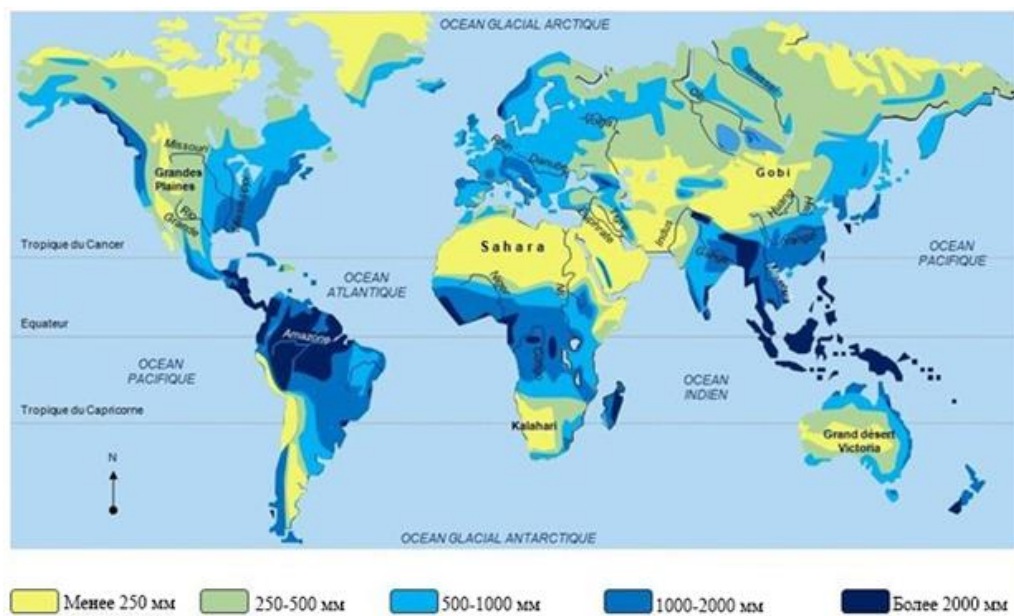


Рис. 1.11. Распределение территории континентов мира по выпадающим атмосферным осадкам

Прибавление атмосферной воды в системе установки КВ может привести к ее накоплению в различных водоемах, и в конечном итоге, к необходимости удаления излишней воды, что из-за очень дорогостоящих расходов на водоочистные сооружения, а также роста эксплуатационных расходов, крайне нежелательно.

Существует ряд объектов кучного и дамбового выщелачивания золота из руд [60, 76, 88, 93], где в штабелях КВ накапливаются дождевая вода и технологические растворы, что часто создает значительные гидравлические напоры над экраном (в отдельных случаях до 40 м высоты).

Наиболее известными из них являются золотой рудник Пьерина в Перу, золотой рудник Веладеро в Аргентине и золотой рудник Крипл-Крик в штате Колорадо (США), которые используют системы с двойными экранами ниже

максимального уровня воды.

В условиях сезонного чрезмерного выпадения осадков (например, в Западной Африке и Центральной Америке, где количество осадков нередко достигает 2500 мм/год) требуются довольно большие водохранилища: например, в Сансу (Ашанти, Гана) для кучного выщелачивания 3000 т/сут общий объем пруда-накопителя составляет 60000 км³. Кроме того, сильные дожди влияют на производительность штабеля КВ (рис. 1.12), способствуя добавлению в систему выщелачивания более 5 т воды на 1 т руды, и разрушению цельности штабелей.



Рис. 1.12. Сброс атмосферных осадков со штабелей КВ в тропических местностях

Поскольку значительное количество установок кучного выщелачивания находятся в пустынных районах Африки, с незначительными осадками, а также в других экологически чувствительных районах, сброс воды в которых неприемлем, то необходимо соблюдать оптимальный баланс между сбором воды и испарением.

Для оптимального решения проблемы управления растворами, многие предприятия в Чили, Аргентине и особенно в Перу и России начали активно развивать различные покрытия. Изоляция внешних поверхностей штабеля КВ в условиях стран Африки, Южно-Восточной Азии и Латинской Америки

предназначена для предотвращения испарения или разбавления из-за дождей технологических (выщелачивающих и металлосодержащих) растворов. Изоляция штабеля КВ осуществляется созданием малопроницаемых слоев либо из породы, либо из глинистых или полимерных покрытий, геомембранных пленок (тканепленочных материалов).

Созданные на начальных этапах кучного выщелачивания низкопроницаемые барьеры (экраны), служили в основном предметом сооружения площадок кучного и дамбового выщелачивания или прудков-испарителей [11, 14, 41, 84].

Применялись различные полиэтиленовые покрытия (ПВХ полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) линейные полиэтилены низкой плотности (ЛПЭНП) Аргентины в Колорадо (США, 1984 г.) Экраны на основе ПЭНД и ЛПЭНП (толщиной 1,5-2,0 мм) и покрытия на основе ПВХ (толщиной 0,75-1,0 мм) являются наиболее распространенными типами экранов, используемых в настоящее время в горнодобывающей промышленности. Применяются двухслойные покрытия из сочетания ПЭВП или ЛПЭНП со слоем гравии мощностью 1-2 м над ними (в медном объекте Серро-Колорадо, Чили, 1991 г.) и двухслойные выщелачивающие экраны, наиболее крупные из них (к 1995 г.): объект Эль-Гуанако (проект Аmax Gold), штабели Хекла Ла Чолла (Мексика) и Пьемонта (Невада, США).

Временные покрытия, называемые «дождевыми плащами», с 1988 г. использовались первоначально на площадках КВ Филиппин, Центральной Америки и Перу, когда многочисленные дожди разбавляют операционные технологические растворы, а накопление избыточной воды приводит к значительным затратам на очистку воды. Сегодня в большинстве проектов кучного выщелачивания стран с теплым климатом (Центральной и Южной Америки, Африки и Юго-Восточной Азии) используют дождевые плащи для покрытия руды и отделения дождевой воды от штабеля КВ.

Если системы штабеля КВ и пруда-накопителя спроектированы

правильно, то активная площадь выщелачивания может составлять до 40 % от общей площади сбора осадков. Для минимизации потерь при значительных осадках и низкой скорости испарения (например, в Янакоча, Перу, высота 3500 м) боковые откосы покрывают пластиком.

На других объектах (Mallon Minerals Corp – Рио Чикито, Коста-Рика) во время сезона дождей покрывают весь массив, при этом способ оказался не эффективным из-за механических трудностей перемещения данного покрытия. Для предотвращения чрезмерного накопления воды (в результате выпадения осадков, свойственного тропикам) на участках КВ, может потребоваться использование покрытий (временных и постоянных).

В настоящее время композитные защитные экраны при кучном выщелачивании активно используются на предприятиях Newmont Yanacocha (Северо-центральный регион Перу) и двойные геомембранные экраны применяют в технологиях КВ в штате Невада (США).

Современные геомембраны – искусственные непроницаемые мембранные тонкие слои или барьеры (геосинтетические глинистые экраны), специально образованные на поверхности штабеля КВ, используются для управления миграцией флюидов и их характеристиками. Типичный срок службы таких наружных покрытий составляет 30 и более лет, в течение которых практически сохраняются их первоначальные физические свойства [85]. Здесь процесс эксплуатации связан с наличием утечек за счет: диффузии, различных дефектов (производственный брак, дефекты сварочных швов, случайные проколы и др.) и появления трещин, после усадки панелей [104]. Установка геомембран требует привлечения большого числа рабочей силы, помимо этого стоимость данного покрытия высока, что является основным недостатком технологии их применения.

На основе анализа мировой практики кучного выщелачивания были выделены основные методы экранирования штабелей КВ и их элементов (табл. 1.2).

Используемые поверхностные покрытия штабеля КВ [21]

Назначение и вид поверхностных покрытий	Фото применения
Страна Изоляция поверхности штабеля слоем горнорудной массы Чили, Аргентина	
Изоляция штабелей от обильных дождей Перу	
Создание естественного / искусственного теплоизолирующего слоя у верхнего основания рудного штабеля Россия	
Сооружение на поверхностях штабелей теплозащитных материалов и устройств с последующим укрытием применяемой системы орошения Россия	
Теплозащита слоем минеральной ваты Перу	
Укрытие штабеля полимерной пленкой с подачей воздуха под установленным покрытием Перу, Россия	

Несмотря на улучшенные характеристик геосинтетического глинистого экрана по сравнению с закрепленным глинистом грунтом и другими геомембранами она низкоэффективная, особенно в дождливом сезоне года.

Особо важным при герметизации штабеля КВ является обеспечение его оптимальных фильтрационных характеристик путем применения методов предотвращения образования зон с низким значением фильтрации.

1.4. Факторы, определяющие образование малопроницаемых слоев в штабеле КВ

Причинами снижения коэффициента фильтрации может служить не только низкое качество выщелачивающих растворов, но и присутствие мелких частиц, способных закупорить поровое пространство или же повышенное уплотнение поверхности массива штабеля КВ, т.е. появление естественного малопроницаемого слоя, что является причиной возникновения со временем некоторой неравномерности в обработке выщелачивающими растворами массива штабеля КВ.

Этот эффект был выявлен при изучении объектов кучного выщелачивания месторождения Эссакане, где выявлены изменения концентрации золота в выходящих продуктивных растворах. Определено, что примерно через 20 дней качественные показатели по выщелачиванию золота в продуктивные растворы значительно ухудшились, скорость фильтрации выщелачивающих растворов уменьшалась (рис. 1.13).

Традиционные способы кучного выщелачивания имеют недостаток, заключающийся в уменьшении степени извлечения полезного компонента (металла) [27, 28] из-за снижения значений показателей фильтрации выщелачивающих растворов с течением времени, за счет уплотнения рудного массива при формировании штабеля бульдозерами или по другим горно-технологическим факторам, из-за образования внутри штабеля малопроницаемых слоев или малопроницаемых зон.

Малопроницаемые слои в штабеле КВ образуются в результате протекания процессов самопроизвольной суффозии (переноса) тонкодисперсных частиц (шлама, пыли и глины) из верхней его части вниз по разрезу. Кроме того, наблюдается увеличение упругого состояния массива руд за счет заполнения имеющегося пустотного, образуемого между кусками руды, пространства пылью [33, 140].

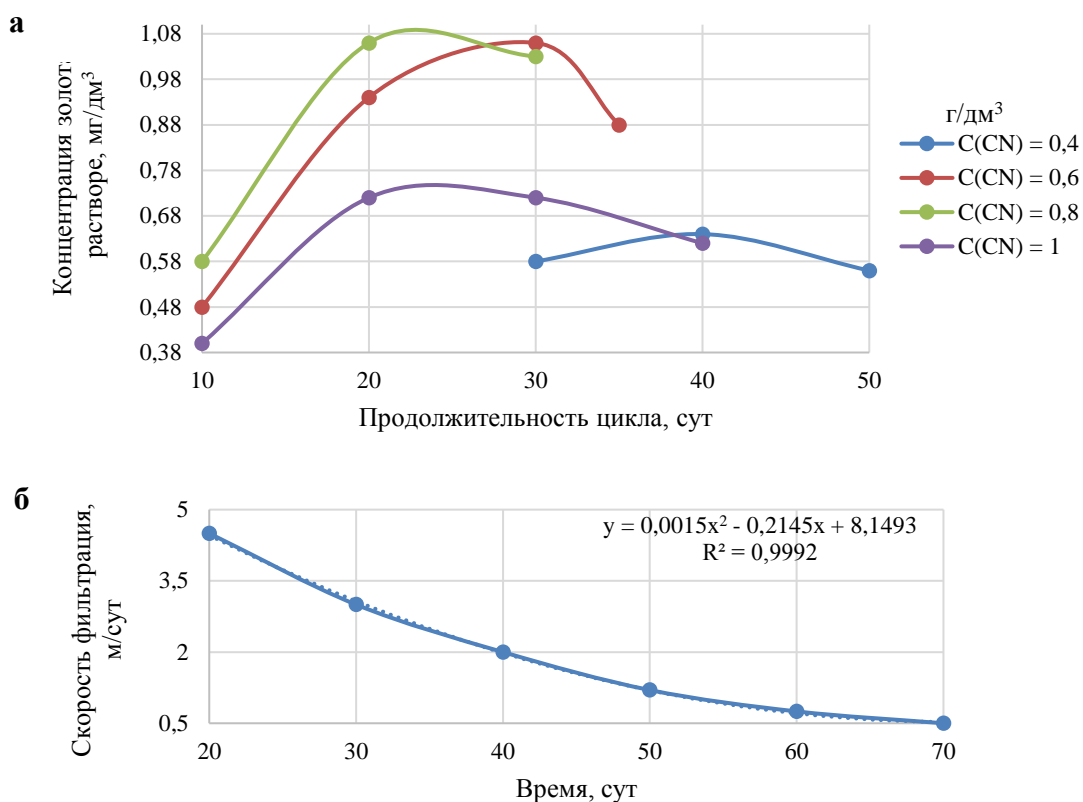


Рис. 1.13. Изменение параметров кучного выщелачивания: а – изменение концентрации золота в продуктивных растворах, б – изменение скорости фильтрации

До настоящего времени наиболее эффективные способы интенсификации процесса извлечения металлов при кучном выщелачивании в данных условиях обеспечивают лишь 0,05% дополнительного увеличения объемов руды штабеля, вводимых в выщелачивание.

Таким образом, равномерное распределение растворов внутри штабеля осложняется образованием малопроницаемых слоев за счет уплотнения кусков руды в процессе эксплуатации и другими факторами. Кольматация порового пространства штабеля снижает эффективность выщелачивания золота и способствует удерживанию частиц золота, в том числе нанозолота в зонах неохваченных воздействием технологических растворов.

Необходимо подчеркнуть, что даже при разрушении малопроницаемых слоев извлечение нанозолота из технологических растворов все еще остается недорешенной задачей.

1.5. Факторы, определяющие потери нанозолота при выщелачивании золотосодержащих руд

Золото, находящееся в минеральной матрице (решетке минералов-носителей), может иметь не только наноразмерный, но и кластерный уровень рассеяния [50].

В последнее время широко развивается исследование процессов, связанных с наночастицами. Существуют данные, свидетельствующие о достаточно широком распространении в природных объектах наночастиц золота [13, 15, 23, 26, 35].

Доказано широкое распространение наночастиц и природных кластеров золота не только в сульфидной минеральной матрице, но и в углеродистом веществе (например, в рудах месторождений орогенного и карлинского типа [48]).

Золото связано с сульфидными минералами в 3-х разных формах [111]: наночастицы микрочастиц металлического золота, а также мелкодисперсное золото в гетерогенных зонах кристаллов пирита; микровключения золотоносного арсенопирита, расположенного в основном вдоль трещин и внутри зон, обогащенных мышьяком; и химическое сочетание золота с кристаллической структурой пирита.

Баккенон и др., с помощью просвечивающей электронной микроскопии, было выявлено наличие субмикроскопических частиц металлического золота (диаметром около 200 Å) в пиритных зернах неокисленной руды типа «Карлин», а электронные микронзондовые анализы богатых мышьяком золотых зон показали, что расширение корреляционной линии As-Au хорошо совпадает с расширением золотоносности золотосодержащих арсенопиритов.

Спектры, полученные с помощью мессбауэровской спектроскопии золота, продемонстрировали природу «невидимого» золота в пирите, отличном от металлического золота или золота «невидимого» в арсенопирите.

«Невидимое» золото представлено главным образом металлическими наночастицами, захваченными в качестве механической примеси [3].

Золото находится в сульфидах в атомно-молекулярном рассеянии, изоморфно замещая железо, медь, мышьяк, цинк и свинец в структурах минералов.

Поверхностные дефекты золотосодержащих минералов приводят к значительному искажению их идеальной кристаллической решетки. При этом в области дефектов межатомные расстояния кристаллической решетки минеральной матрицы чаще всего увеличены, что облегчает диффузионный сток атомов золота в эти области как элемента, обладающего большим размерным фактором [20].

Анализы существующих исследований позволяют сделать заключение, что дефектная подсистема наноповерхности минеральной матрицы сульфидов является местом адсорбции золота в различных формах, часть из которых может находиться для существующих технологий, используемых в КВ, в трудноизвлекаемой форме.

Анализ диагенетического пирита из районов Сухого Лога (РФ), а также северной Карлины Тренд и Бендиго (США) с минерализованным золотом с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой лазерной абляции (LA-ICPMS) показывает диапазон нанозолота от 0,001 до 152 ppm (при среднем значении равном 1,4 ppm Au) [127]. Мелкозернистые черные аргиллиты из известных месторождений золота в Карлин Тренде (США), включают в себя органическое вещество с содержанием Au до 4,5 ppm, 75 000 ppm As, 1800 ppm V, 780 ppm Sb, 690 ppm Mo, 425 ppm U и 380 ppm Ni.

При исследовании кластерного золота [50] поверхность золотин различных месторождений была исследована методом АСМ-микроскопии. В частности, в Бирмингемском университете был разработан принципиально новый метод лучевого сканирования, с помощью которого стало возможным визуализировать строение золота и других материалов уже на атомарном

уровне [89]. На основе этой технологии впервые были получены довольно четкие снимки (рис. 1.14) пирамидальных кластеров, состоящих из 20-ти связанных между собой атомов золота.

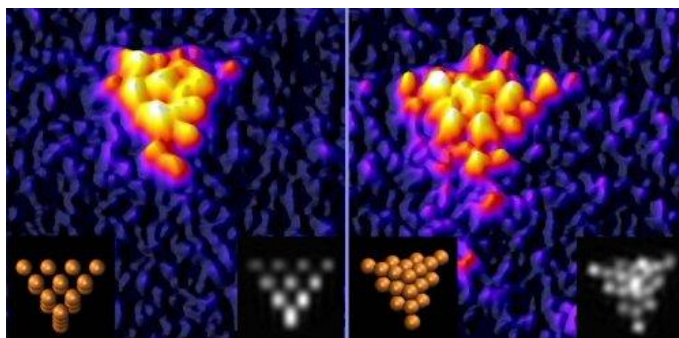


Рис. 1.14. Пирамидальные кластеры золота [89]

Кроме того, в литосфере зачастую встречается золото, связанное с органическим углеродистым и графитовым материалом. При этом углеродистые золотые руды зачастую содержат аморфный углерод, графит или органические вещества с высоким содержанием углеводородов [107].

Наноразмерные включения золота в сульфидных фазах и «видимое» золото в виде самородков, образующих основной наполнитель, присутствуют в углеродистых породах, а также в дискретных минерализованных кварц-карбонат-сульфидных жилах [124, 128]. Сульфидные фазы, содержащие видимые формы золота и нанозолото, обычно взаимосвязаны с углеродистыми формами.

Из-за естественной адсорбции этих углеродистых компонентов на золото, извлечение золота из углеродистых золотых руд цианированием сильно ингибируется, особенно для тех, у которых величина органических углеродных компонентов более 0,2-0,3 %.

Золото в углеродистой руде существует в виде самородных форм с 83,03 % зерен золота в диапазоне 0,005–0,01 мм и 16,97 % зерен золота в диапазоне -0,005 мм. Содержание углерода в такой золотосодержащей руде относительно высокое: 1,33 % графита и 1,50 % органического углерода [107].

Изучению строения поверхности нанозолотин, описанию деталей

микро- и нанорельефа их поверхности (например, нанобугорчатости, нанотрещиноватости, нанопористости, присутствию на ней нанопленок, наноборозд, нановключений и т.д.) было уделено значительно меньшее внимание в исследованиях [38, 136].

Известно, что наночастицы золота, покрытые нанопленками углерода, были выявлены в технологических растворах, а морфология полученных образцов была охарактеризована с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). На рис. 1.15, а показана структура сердцевинно-оболочки гибрида подобной наночастиц Au/C. Каждая такая наночастица, как правило, покрыта однородной углеродной оболочкой, толщина углеродных оболочек, которых является одинаковой.

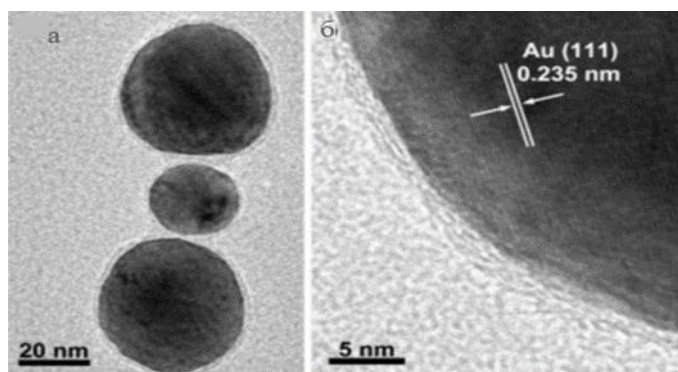


Рис. 1.15. Изображения наночастиц Au / C [119]: просвечивающим электронным микроскопом (а) и просвечивающим электронным микроскопом высокого разрешения (б)

Известны и другие механизмы образования таких нанопленок (например, при добавлении этанола или метанола в межфазную область, точной инъекции коллоидных растворов наночастиц золота, приготовленных в метаноле на границах раздела «вода - органический растворитель», использовании некоторых солей, испарении растворителя, ковалентном связывании, самосборке, обеспечиваемой электростатическими взаимодействиями и т.д.).

В области ядра отдельной наночастицы Au/C (рис. 1.15 б) четко видны решетчатые полосы с расстояниями 0,235 нм, соответствующие плоскости Au (111). Кроме того, наблюдается тонкий углеродный слой, окружающий

сердцевину Au, толщиной около 2 нм.

Марк де Луна и соавторы показали, что дисперсные наночастицы образуются на жидкостях с низким поверхностным натяжением и низкой вязкостью. Они также показали, что наночастицы образуются в основном на поверхности жидкости (особенно для жидкостей с высоким поверхностным натяжением). С увеличением размеров наночастиц золота отмечено увеличение компактности поверхностных нанопленок [97].

Величины поверхностного натяжения тонких нанопленок, отличающееся от величины поверхностного натяжения верхнего слоя водного раствора [22, 92, 104, 115, 123, 135], имеет важное значение для определения их поведения (рис. 1.16). При этом давление разрыва подобной пленки было проанализировано при альтернативной интерпретации разности поверхностного натяжения водных растворов с толщиной «островка» золота.

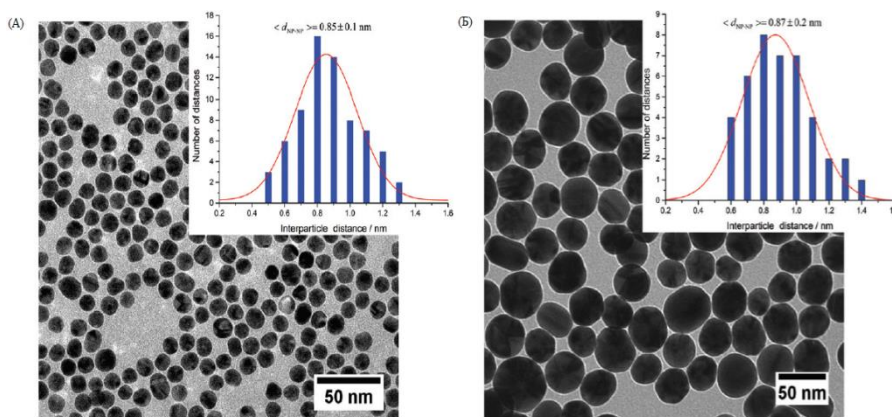


Рис. 1.16. Изображения межфазных нанопленок золота после переноса в сетку ПЭМ получены просвечивающей электронной микроскопией высокого разрешения [96]:

поверхностные нанопленки были сформированы с (А) 12 и (Б) 38 нм наночастиц золота на границе раздела «вода – воздух»

Ранее экспериментально было установлено и теоретически объяснено, что поверхностное натяжение более толстой нанопленки очень близко или почти равно толщине объемной жидкости (с бесконечной толщиной) [132].

При этом наблюдалось, что поверхностное натяжение изменялось с толщиной пленки и возникало давление разрыва. Когда нанопленка очень

тонкая (с размерами 4×4 нм), то при размерах менее 1,0 нм, она (после определенного времени существования) при температуре 300°К будет подвергаться разрыву. Более высокая температура ускорит процесс такого разрыва, а увеличенный размер нанопленки также ускорит ее разрыв.

Янг и др. [119] предложили, что относительно толстые нанопленки, превышающие определенную толщину, более устойчивы и долговечны.

На стадии 1 для критической толщины (1-1,15 нм) нанопленки золота время разрыва составляет примерно 20-100 нс [132]. Причем разрыв такой пленки будет значительным, а поверхностное натяжение при этом существенно снизится. На стадии 2 поверхностное натяжение изменяется с толщиной пленки. Эти изменения зависят от свойств такой нанопленки, значения концентрации и величины температуры.

На 2 стадии (для диапазона толщины 1,15-1,24 нм) было замечено, что нанопленки достаточно стабильны, даже после продолжительного времени существования ($< \infty$) – рис. 1.17. Для этого случая толщина нанопленок должна превысить $\sim 1,24$ нм. Выше значения $\sim 1,24$ нм нанопленка практически вообще не разрывается, т.к. критическое время разрыва бесконечное.

В результате проведенных исследований было предложено, что стабильность нанопленок можно разделить по 2-м факторам (многодиапазонной их толщины) в соответствии с критическим временем их разрыва [97, 110]. Как показано, для случая неустойчивой стадии I, когда толщина нанопленки составляет 1 нм, критическое время ее разрыва (также известное как долговечность пленки) определяется толщиной $\sim 0,5$ нм, и такая нанопленка разрывается почти сразу же после ее формирования и в этом случае невозможно измерить значения поверхностного натяжения.

Небольшая разница между результатами УФ / видимого цвета и СЭМ может быть объяснена потерей наночастиц или разрушением структуры ее пленки во время ее подготовки к визуализации СЭМ.

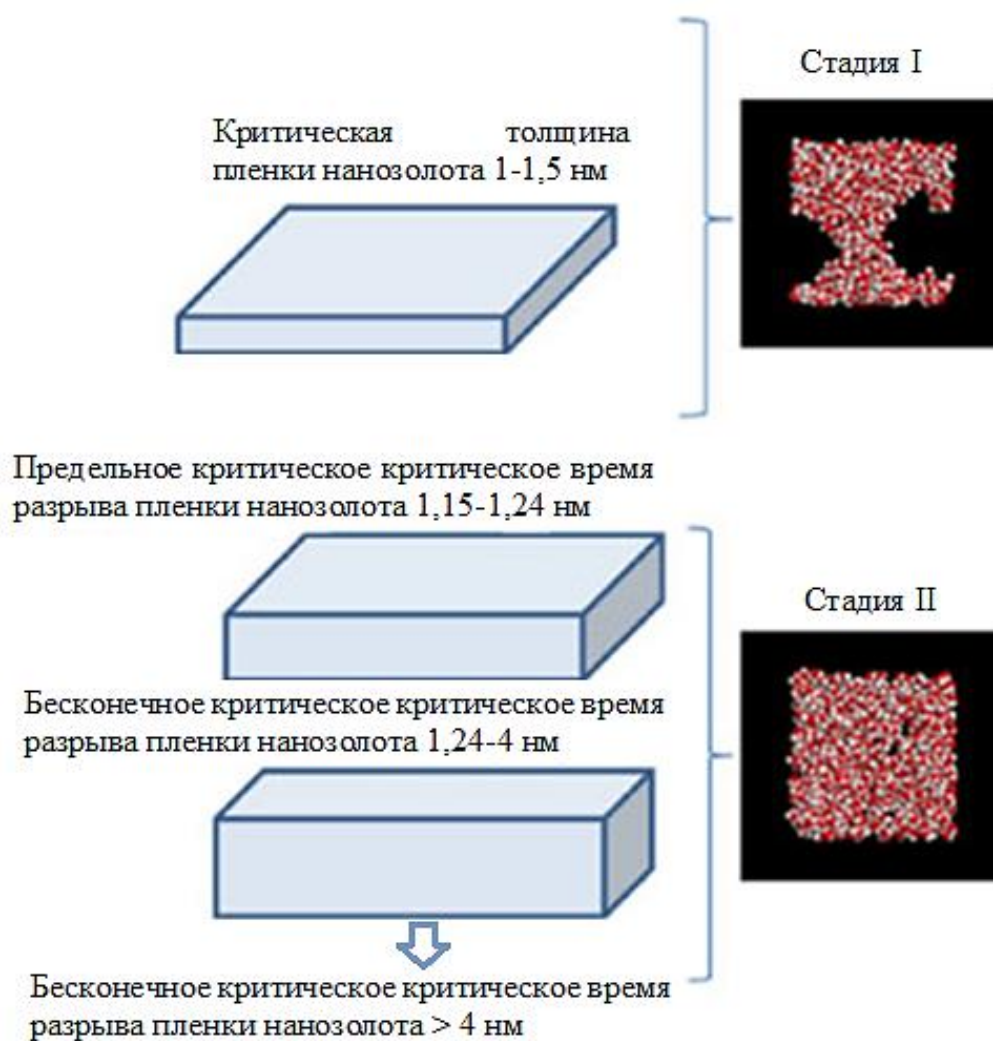


Рис. 1.17. Двухступенчатый механизм интерпретации стабильности пленки, при изменении поверхностного натяжения в зависимости от толщины при 300 К [132]

Если на поверхности раздела фаз большее количество наночастиц, то формируются более толстые пленки из наночастиц за счет коалесценции. Например, при введении 600 мкл раствора наночастиц на поверхность раздела, образуется однородная многослойная пленка, что согласно спектрам поглощения УФ (или видимого света) соответствует 1,6 монослоям. По имеющимся оценкам, пленка наночастиц на границе раздела будет более однородной, поскольку предотвращаются возможные нарушения, возникающие во время сушки и экстракции пленки из наночастиц.

В последнее время многие работы направлены на выявление существования не растворяющегося нанозолота в цианистых растворах.

Существуют исследования по выявлению поведения отдельных частиц нанозолота и определению условий образования агрегированных наночастиц золота в водных растворах.

Для изучения поведения наночастиц золота в растворах используют методы и приборы различного назначения.

Прибор Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical Ltd, Малверн, Великобритания) с длиной волны излучения 633 нм (гелий-неоновый лазер) применяется для исследования стабильности коллоидных золотых наночастиц, в воде и цианистых растворах.

УФ-видимая спектроскопия Shimadzu UV-1800 с 20 мл кварцевыми ячейками высокой точности (Hellma Analytics, Германия) используется для измерения уровня стабильности наночастицы золота при различных концентрациях соляной кислотой (HCl) или цианистого калия (KCN) в растворах. В частности, ученые из Оксфордского университета Алекс Л. и соавторы с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) смогли обнаружить и определить размерность частиц нанозолота, присущих в цианистых растворах (рис. 1.18 а). Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) они визуально обнаружили отдельные наночастицы золота и их агрегации (рис. 1.18 б).

Кроме того, динамическое рассеяние света (DLS) позволяет установить уровень диффузии дисперсных наночастиц золота в цианистых растворах, а прослеживание их броуновского движения осуществляется путем визуализации местоположения наночастиц золота в растворах с помощью анализа траекторий наночастиц (Nanoparticle Tracking Analysis – NTA).

Важным составляющим в исследовании наночастиц золота является определение дзета-потенциала – это двойной электрический потенциал, возникающий на границе раздела нанозолото-дисперсионная среда за счет адсорбции ионов цианистым раствором или диссоциации поверхностных соединений.

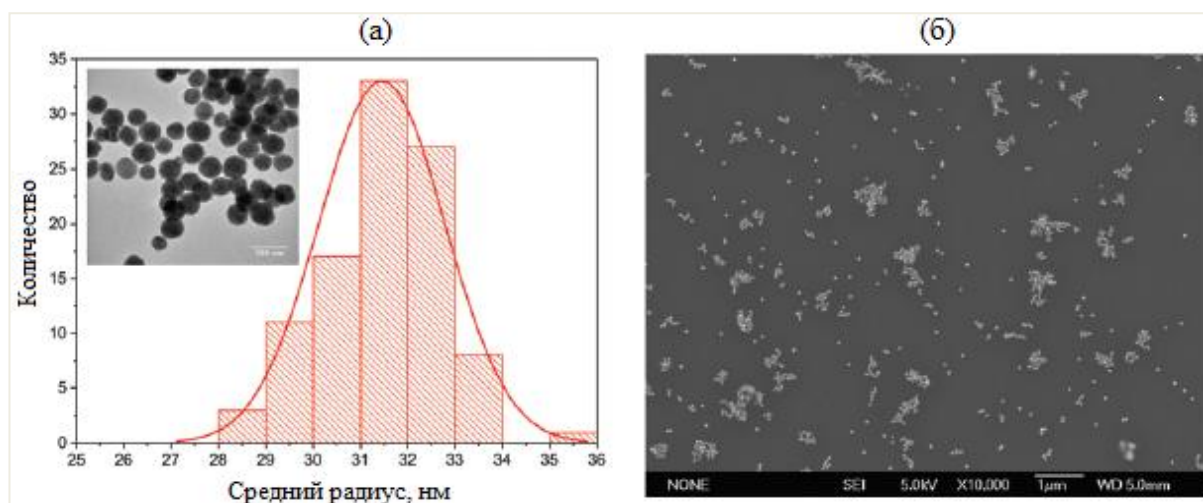


Рис. 1.18. ПЭМ- микрофотография распределения нанозолота по размеру (а) и СЭМ-микрофотография нанозолота (б), показывающая состояние агломерации частиц в цианосодержащем растворе

Значение дзета-потенциала (± 30 мВ) коллоидной системы является характерным значением для условного разделения низко-заряженных поверхностей ($\leq \pm 30$ мВ – плохая устойчивость) и высоко-заряженных поверхностей ($\geq \pm 30$ мВ – хорошая устойчивость).

Степень поглощения света, измеряемая УФ-видимой спектроскопией, является также показателем существования нанозолота в водных растворах. Например, при наложении тлеющего разряда переменного тока к раствору HAuCl_4 в присутствии NaOH было выявлено (после 10 мин воздействия) существование отдельных сферических наночастиц золота размером 5,7 нм и коралловидных кластеров (при $\text{pH} \leq 8$), сферических наночастиц размером 120 нм и кластеров коралловидной формы размером до 100 нм (при $\text{pH} 9$) и умеренно сферических наночастиц золота с уменьшением размера от 100 нм до 30,6 нм (при увеличении pH с 10 до 13). Ван и др. также показали, что при увеличении значения pH водного раствора HAuCl_4 снижается его восстановительный потенциал, что приводит к образованию наночастиц более значительного размера.

С помощью УФ-видимой спектроскопии с длиной волн в диапазоне 520–535 нм исследователи Оксфордского университета смогли получить

информацию о стабильности наночастиц золота, т.е. их устойчивости к скоплению и агломерации в цианосодержащем растворе [5]. Было установлено, что с увеличением концентрации цианида в растворе (> 50 ммоль/л) устойчивость к скоплению и агломерации частиц нанозолота снижается. В результате основная масса наночастиц приходится на отдельные наночастицы, которые трудно улавливать.

Практический опыт выщелачивания золота, особенно при кучном выщелачивании показывает, что ряд факторов таких, как наличие примесей других химических элементов и соединений (т.е. присутствия в растворе других ионов, кроме CN^-), снижение концентрации цианида, нехватка или избыток кислорода, изменение pH и температуры реакционной среды, а также приобретение гидрофобных свойств у частиц оказывают отрицательное влияние на протекание окислительного процесса растворения (эффективность растворения) золота [66, 130]. Нередко при кучном выщелачивании требуется осуществление мероприятий по доизвлечению золота из маточных растворов.

В работах [81, 121] были обнаружены кластеры коралловидной формы, собранные из этих мелких частиц с размером до 100 нм. В случае раствора с pH = 9 синтезированные частицы были обнаружены в виде коралловидных кластеров размером до 100 нм и сферических – размером примерно 120 нм. Наночастицы золота в растворах при высоком pH ($\sim 10-13$) имели отчетливую форму. Большая часть этого золота существует в виде наночастиц размером 5-120 нм. При его промышленном выщелачивании содержание золота в маточных растворах составляет от 50 до 150 мг/дм³.

Форма наночастиц золота в растворах была в основном сферической. Также были обнаружены наночастицы других форм таких как треугольник, шестиугольник и стержень.

В работе [1] установлено, что рудное золото зачастую имеет типично кластерное строение. При этом кластеры золота представлены весьма разными по размеру сферическими и эллипсоидальными образованиями. Так, размеры

кластеров в основном колеблются от 50 до 152 нм (составляя в среднем 91,8 нм). При получении ПЭМ изображения было заметно, что мелкие наночастицы объединяются в большой кластер. Агрегация наночастиц золота в растворе $\text{pH} = 12$ может быть вызвана H_2O_2 . При высоком pH , низком восстановительном потенциале, зародышеобразование становится медленнее. Кроме того, при высоком pH достаточное покрытие OH^- вокруг наночастиц золота создает энергетический барьер, противодействуя силе Ван-дер-Ваальса между частицами, чтобы предотвратить агрегацию до еще большего размера.

Агрегация наночастиц в более крупные объемы может быть осуществлена разными микроорганизмами. Были получены многочисленные анизотропные золотые наночастицы неправильной формы, а также некоторые сферические частицы. Более низкое значение pH реакционной смеси дает более крупные наночастицы, вероятно, из-за ограниченной доступности укупорочного средства (OH -функциональные группы). Более высокое значение pH реакционной смеси (например, $\text{pH} > 10$) образует квазисферические наночастицы Au меньших размеров.

Кроме того, было установлено, что относительная концентрация ПАВ значительно влияет на скорость роста наночастиц. Когда концентрация ПАВ увеличивается, скорость роста наночастиц также увеличивается. В случае образования наночастиц золота, ПАВ играет двойную роль [95]: как стабилизирующий и восстанавливающий агент, приводящий к образованию наночастиц в зависимости от концентрации.

Введение комплекса в ПАВ приводит к быстрому образованию и росту наночастиц с агрегацией. Агрегация возникает в результате неспособности ПАВ адекватно стабилизировать наночастицы, превышающие предел критического размера 15 нм, независимо от относительных концентраций агентов, однако скорость роста наночастиц сильно зависит от концентрации ПАВ.

В исследовании [139] авторы показали, что неионные поверхностно-

активные вещества Твин (Твин 20, Твин 40, Твин 60 и Твин 80) поглощают наночастицы золота (рис. 1.19). Например, применение различных концентраций неионогенного поверхностно-активного вещества Tween 80 в реакционной смеси привело к значительным изменениям в распределении по размерам образующихся дисперсий наночастиц золота [120, 125]. Согласно измерениям с помощью динамического рассеяния света, увеличение концентрации Tween 80 в реакционной смеси в диапазоне от 0,1 до 10 ммоль/л приводит к образованию наночастиц Au с уменьшением среднего диаметра от около 80 нм до 10 нм.

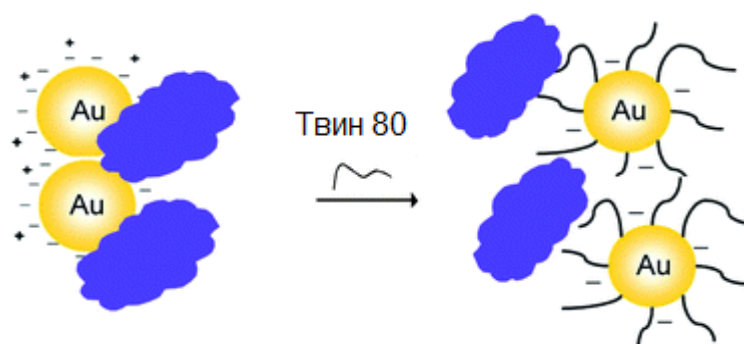


Рис. 1.19. Схема поглощения наночастиц золота ПАВ Твин 80 [139]

Таким образом, факт наличия нанозолота породах и возможность их существования в цианистых растворах в виде отдельных наночастиц и их агломерации требует выявления механизма их потери при реализации технологии кучного выщелачивания, а также разработка способа их извлечения.

1.6. Выводы

1. Основными факторами, влияющими на эффективность выщелачивания золота из руд (помимо значения активности и концентрации реагента), являются испарение и разбавление технологических растворов (75 %), качество антифильтрационных наружных покрытий (8 %), значение

потерь ультрадисперсных золотин в штабеле и с растворами (5 %) и снижение фильтрационных характеристик штабеля КВ (12 %).

Природные факторы (температура и усиленные ветродуи, а также выпадающие атмосферные осадки) отрицательно влияют на эффективность обработки кусков руды, т.к. они осложняют поддержанию необходимого постоянного значения требуемой концентрации реагентов (0,6-0,8 г/дм³), рН = 9-11 и Eh = -610 мВ в технологических растворах штабеля КВ.

2. Потери технологических растворов от испарения с учетом применяемой системы орошения составляют 2-30%, при наличии/отсутствии изоляции поверхности штабеля КВ – 0-35%, при воздействии ветровых потоков - 5-25%, от совместного воздействия солнечной радиации и ветра – до 40 % и более.

3. На африканском континенте большинство установок КВ обычно расположено на открытых площадках и часто подвергаются негативному воздействию выпадающих атмосферных осадков, что существенно осложняет управление технологическими растворами и водными ресурсами, нарушая технологические процессы. Выпадение атмосферных осадков в Африке (обильных дождей – ливней и в редких случаях - снега) могут привести к:

- разбавлению технологических растворов при орошении штабеля КВ;
- стоку токсичных технологических растворов за пределы штабеля КВ;
- разрушению цельности штабелей КВ из-за образования в их массиве трещин, способствующих обрыву боковых поверхностей установки;
- увеличению уровня продуктивных и маточных растворов в бассейнах с последующим их переливом;
- замерзанию (редко) штабелей в течение холодных ночей технологических растворов и использованного в процессе КВ оборудования (шланги, трубы и пр.).

4. Для управления растворами в практике кучного выщелачивания используются наружные покрытия: грунтовые экраны, полимерные,

геомембранные пленки различного назначения.

5. При кучном выщелачивании через примерно 20 дней после запуска процесса выщелачивания качество выщелачивающих растворов и скорость их фильтрации значительно ухудшается.

Со временем образуются в штабеле КВ малопроницаемые слои, в результате протекания процессов самопроизвольной суффозии (переноса) тонкодисперсных частиц (шлама, пыли и глины) из верхней его части вниз по разрезу, а также увеличения упругого состояния массива руд за счет заполнения имеющегося пустотного, образуемого между кусками руды, пространства пылью.

6. Установлено, что основные потери нанозолота приходятся на наноразмерные включения золота в сульфидных фазах, в углеродистых породах, а также в дискретных минерализованных кварц-карбонат-сульфидных жилах.

7. Золото в углеродистой руде существует в виде самородных форм (с 83,03 % зерен золота в диапазоне 0,005–0,01 мм и 16,97 % зерен золота в диапазоне $-0,005$ мм). Содержание углерода в такой золотосодержащей руде относительно высокое: 1,33 % графита и 1,5 % органического углерода.

Наночастицы золота, покрытые нанопленками других химических элементов были выявлены в технологических растворах. Наличие примесей других химических элементов и соединений, снижение концентрации цианида, нехватка или избыток кислорода, изменение рН и температуры реакционной среды, приобретение гидрофобных свойств у частиц оказывает отрицательное влияние на протекание окислительного процесса растворения нанозолота, основная часть которого имеет размер 5-120 нм.

2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

2.1. Объект и предмет исследования

Объектами исследования являются установки кучного выщелачивания золотосодержащих руд, действующих на месторождении Эссакане, расположенного в регионе Сахеля (Буркина Фасо) с суровыми климатическими условиями (формирующих засушливые пустыни). Здесь температура достигает 50°C в жарком сезоне, с годовой скоростью испарения 3000 мм/год. Средняя годовая температура составляет 29,1°C, а среднее годовое количество осадков, как правило, не превышает 368 мм. Однако, в дождевом сезоне часто бывают резкие и обильные ливни.

Основными золотосодержащими минералами месторождения Эссакане являются сапролиты (верхние), переходные породы или сапрок (нижние сапролиты) и коренные породы. Коренная порода (аренит) обычно состоит из серицита – скопления карбонатного кремнезема ± альбита ± арсенопирита ± пирита.

Содержание золота в рудах штабелей КВ составляет от 0,2 г/т до 2 г/т. При этом среднее содержание золота в сапролите составляет 0,33 г/т, в переходной руде – 0,43 г/т, и в коренной руде – 0,3 г/т.

Штабель КВ представляет собой насыпной массив руды высотой 40 м для сапролитов и переходных пород и более 60 м для коренных, с одноразовой площадкой с несколькими этажами.

В технологии осуществляется трехступенчатая система рудоподготовки: в первой стадии руда измельчается до 314 мм (100 % прохождение), во второй – 80 % при прохождении 38 мм (100 % прохождение кусков размером 50 мм), а в третьей 100 % измельченного продукта проходит через грохот 19 мм (из них 80 % составляют куски размером 8 мм).

Годовой объем загрузки штабелей составляет 10 млн т, при суточном объеме 2739 т. Номинальная скорость орошения выщелачивающими растворами составляет 10 л/ч/м², при этом извлечение золота составляет 55 %.

Общий объем пруда-накопителя для сбора продуктивных растворов составляет 500000 м³.

Предметом данного исследования являются золотосодержащие руды, массивы штабеля КВ и технологические растворы.

2.2. Методы исследования предотвращения испарения с применением кремнийорганических соединений

2.2.1. Экспериментальные исследования эффективности кремнийорганических соединений

Экспериментальные исследования были проведены на базе лаборатории органической химии Российского университета дружбы народов.

Описание экспериментальной установки.

Были подготовлены 3 культуральные и 3 цилиндрические пробирки объемом 5 мл (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Образцы для исследования

Оборудование: термометр, пробирки, пипетка, весы.

Материалы: вода, силиконовая жидкость.

Ход выполнения экспериментов

1. Первоначально на электронных весах было осуществлено взвешивание пустых пробирок с записью полученных значений их массы (при этом емкости не должны содержать воду или иных капель жидкости).

2. Затем пипеткой наполняли:

- 3 культуральные пробирки равной массой: воды; смеси воды и силиконовой жидкости; чистой силиконовой жидкостью;
- 3 цилиндрические пробирки (5 мл) равным количеством: воды; смеси воды и силиконовой жидкости; чистой силиконовой жидкостью.

3. Ежедневно осуществляли проверку температуры (при которой проводятся измерения) и замер количества оставшейся жидкости.

4. Измерения производились каждые 24 ч, при постоянной температуре в пределах 25-26 °С.

Во второй части опыта были подготовлены 3 цилиндрические пробирки по 5 мл. В начале опыта было произведено измерение их массы.

В пробирке I массой 29,59 г наполненной 4 мл воды массой 3,97 г, в пробирке II массой 27,77 г наполненной смесью 3 мл воды и 1 мл силиконовой жидкости общей массой 3,80 г и в пробирке III массой 29,46 г наполненной только силиконовой жидкостью объемом 4 мл и массой 3,41 г.

Другой эксперимент предназначен для определения необходимого количества силиконовой жидкости для покрытия 1 м² площади воды (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Фото чашек Петри с жидкостью

Оборудование: чашки Петри, весы, термометр, пипетка.

Материал: вода и силиконовая жидкость

Методика проведения экспериментов

1. Произведены измерения 5 пустых чашек Петри: их диаметр и вес.
2. Каждая чашка была заполнена одинаковым количеством теплой воды (32°C), равном 15 мл.
3. В чашки от I до V помещали 15 мл воды с добавкой 0,1 мл, 0,3 мл, 0,5 мл, 0,7 мл и 0,9 мл силиконовой жидкости соответственно, после чего проводилось измерение их массы.
4. Эксперимент был проведен при постоянной температуре 30-32°C, измерения производились каждые 30 мин.
5. Дальнейшие замеры проводили каждые 60 мин при $t_{\text{const}}=30-32^\circ\text{C}$ только в чашках с низким уровнем испарения – III, IV и V.

2.2.2. Компьютерное моделирование движения кислорода в штабеле кучного выщелачивания

Для определения оптимального давления снабжения кислородом штабеля КВ используются компьютерные модели.

Построенная 2D модель движения кислорода в программе SVAirFlow представляет собой часть штабеля КВ размером 5·5 м, с постоянной проводимостью воздуха $2,18 \cdot 10^{-5}$ см³/с, и имеющей один идеальный малопроницаемый слой по всей длине штабеля (рис. 2.3.).

Воздуховод установлен вблизи однородного малопроницаемого слоя с проводимостью воздуха $2,18 \cdot 10^{-7}$ см³/с, образованного в штабеле. Диаметр трубы преувеличен в целях обеспечения простоты эксперимента и более четкой визуализации.

Пологая, что нижняя и боковые стороны герметичны к утечке воздуха (например, путем экранирования поверхностей с применением силиконовых пленок), было осуществлено с помощью программного обеспечения SVAirFlow моделирование движения потока воздуха/кислорода через

однородный противофильтрационный слой. При этом температура внутри массы принималась постоянной и была равна 20°C.

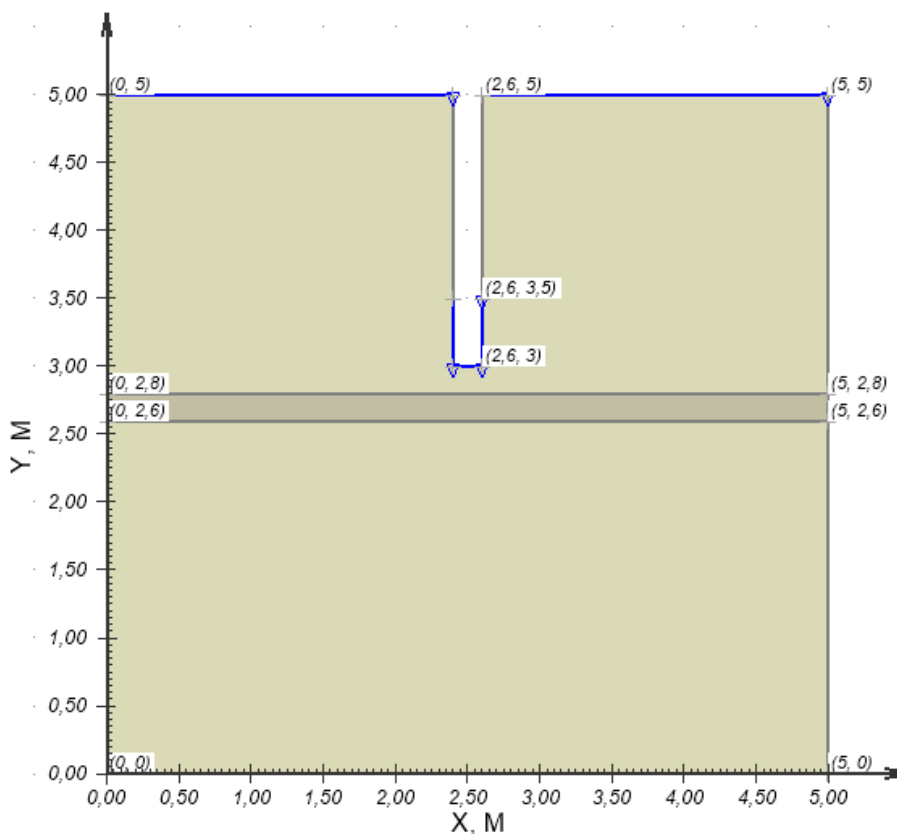


Рис. 2.3. Геометрическое описание модели

Давление подачи воздуха через трубопровод составляло 121 кПа, атмосферное давление на верхнюю часть штабеля КВ составляло 101 кПа.

2.3. Методы математического расчета фильтрации технологических растворов в штабеле КВ

Цель математического исследования - разработка методики расчета значений фильтрации растворов через штабель КВ.

Задачи математического исследования:

- 1) провести анализ математических расчетов и выбор формулы расчета проницаемости в зависимости от пористости и размера пористых каналов;
- 2) представить реальный штабель КВ с низкой проницаемостью в виде

соответствующей физической модели (в виде идеальной пористой среды для упрощения взаимодействий между технологическими растворами и кусками руды штабеля КВ);

3) задать параметры низкопроницаемого штабеля КВ (первоначальная пористость, размеры) и создать графическое представление образующихся каналов с заданными параметрами в модели массива штабеля КВ;

4) установить взаимосвязь между конечной проницаемостью (после создания каналов) и первоначальным ее значением (до создания каналов) и использовать полученную формулу в общей формуле расчета проницаемости;

5) создать новую методику расчета проницаемости в зависимости от радиуса образуемых каналов, их числа, объема штабеля, его конечной пористости для идеальной системы, с учетом реальных условий через коэффициент извилистости каналов;

6) провести расчет для диаметров каналов от 5 до 10 мм и построить графики зависимости проницаемости штабеля КВ от диаметра каналов при различной первоначальной пористости среды;

7) интерпретировать полученные результаты и осуществить соответствующие выводы.

Таблица 2.1

Описание параметров математической модели

Канал	Малопроницаемый слой
d_k – диаметр канала;	a – длина;
h_k – высота канала;	b – ширина;
V_k – объем канала;	h – высота;
N – общее число каналов;	m_1 – пористость до образования каналов;
α – угол наклона каналов	m_2 – пористость после образования каналов
	V – объем малопроницаемого слоя;
	V_1 – объем пор до образования каналов;
	V_2 – объем пор после образования каналов;
	V_c – объем сокращенных пор.

Основные данные, необходимые для решения поставленной задачи, приведены в таблице 2.1.

2.3.1. Метод расчета гидравлической проницаемости при создании вертикальных каналов

Геометрическая модель малопроницаемого слоя с вертикальными каналами представлена на рис. 2.4.

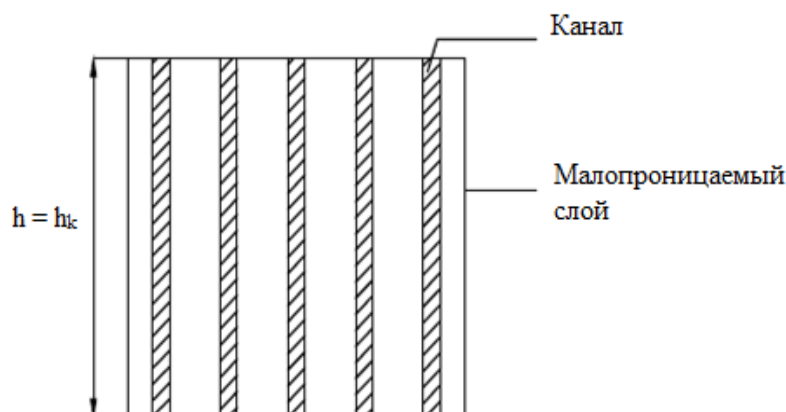


Рис. 2.4. Схема малопроницаемого слоя с вертикальными каналами

Объем малофильтрационного слоя выражается следующей формулой:

$$V = a \cdot b \cdot h \quad (3)$$

Объем пор до образования каналов определяем по формуле:

$$V_1 = m_1 \cdot V \quad (4)$$

$$m_1 = \frac{V_1}{V} \quad (5)$$

Объем, занимаемый N пористыми каналами, вычисляется по формуле:

$$V_k(N) = \pi N \frac{d_k^2}{4} h_k, \quad (6)$$

где $h_k = h$.

При создании N каналов происходит сокращение существовавших пор. Для определения объема сокращенных пор используется следующая формула:

$$V_c(N) = m_1 \cdot V_k(N) \quad (7)$$

Таким образом, общий объем пор в малопроницаемых слоях с учетом каналов определяется по формуле:

$$V_2(N) = V_1 + V_k(N) - V_c(N) \quad (8)$$

Подставляя значения V_k и V_c в уравнения (6), получаем объем пор после образования каналов:

$$V_2(N) = V_1 + N(1 - m_1) \frac{\pi h_k d_k^2}{4} \quad (9)$$

Пористость после образования каналов вычисляется по формуле:

$$m_2 = \frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_k d_k^2}{4V} \quad (10)$$

Зависимость проницаемости от размеров пор для фильтрации растворов через поры идеальной пористой среды оценивается с учетом уравнения Пуазейля и Дарси:

$$Q = \frac{n\pi r^4 F \Delta P}{8\mu L} \quad (11)$$

где: n – число пор, приходящихся на единицу площади фильтрации;

r – радиус порового канала; F – площадь фильтрации;

ΔP – перепад давлений; L – длина порового канала.

Коэффициент пористости среды, через которую проходит фильтрация:

$$m = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{образца}}} = \frac{nF\pi R^2 L}{FL} = n\pi R^2 \quad (12)$$

Следовательно, уравнение (11) можно переписать следующим образом:

$$Q = \frac{mr^2 F \Delta P}{8\mu L} \quad (13)$$

Из уравнения Дарси следует, что:

$$Q = \frac{FK_{\text{пр}} \Delta P}{\mu L} \quad (14)$$

Приравняв правые части уравнений (13) и (14), получим для размера созданных каналов взаимосвязь пористости и проницаемости:

$$K_{\text{пр}} = m_2 \frac{r_{\text{к}}^2}{8} \quad (15)$$

Коэффициент проницаемости малопроницаемого слоя после образования N вертикальных каналов диаметром $d_{\text{к}}$ определяется по формуле:

$$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_{\text{к}} d_{\text{к}}^2}{4V} \right) \frac{d_{\text{к}}^2}{32} \quad (16)$$

Для реальных условий штабеля КВ радиус порового канала (рис. 2.5) рассчитывается с учетом структурных особенностей пород, с использованием эмпирического уравнения Ф.И. Котьякова:

$$r = \frac{2}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{K_{\text{пр}} \cdot \varphi}{m}} \quad (17)$$

где: φ – структурный коэффициент, учитывающий извилистость.

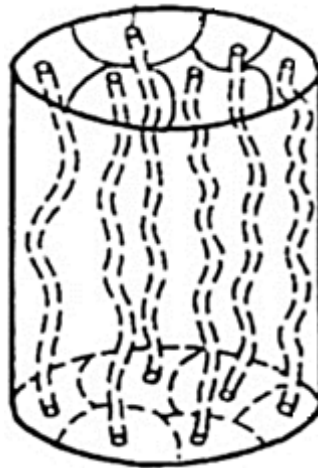


Рис. 2.5. Схема непроницаемого слоя с извилистыми каналами

Структурный коэффициент для зернистых пород штабеля КВ можно приблизительно определить по эмпирической формуле:

$$\varphi = \frac{0,5035}{m^{1,1}} \quad (18)$$

После преобразования получаем следующую формулу проницаемости, учитывающую извилистость каналов:

$$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_{\text{к}} d_{\text{к}}^2}{4V} \right)^{2,1} \frac{(d_{\text{к}} \cdot 7 \cdot 10^5)^2}{8,056} \quad (19)$$

2.3.2. Метод расчета гидравлической проницаемости при создании наклонных каналов

Геометрическая модель малопроницаемого слоя с наклонно-направленными каналами представлена на рис. 2.6.

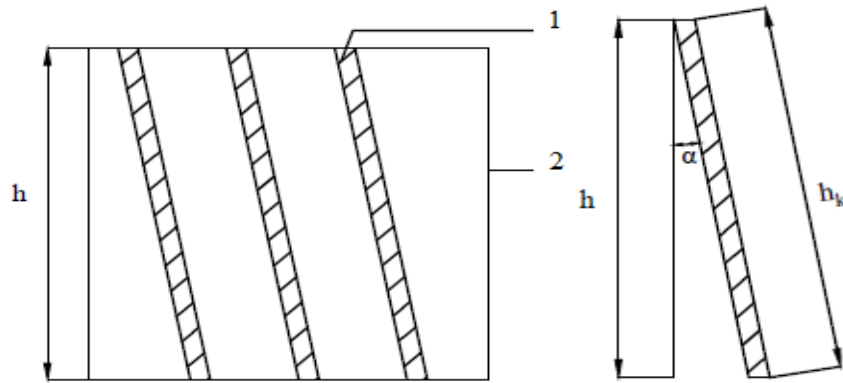


Рис. 2.6. Геометрический вид:

1 – пористый канал; 2 – малопроницаемый слой; h_k – высота канала; h – высота малопроницаемого слоя; α – угол наклона канала

Каналы располагаются под углом α к вертикальной оси.

Объем, занимаемый N наклонно-направленными пористыми каналами, вычисляется по формуле:

$$V_k(N) = \pi N \frac{d_k^2}{4} h_k, \quad (20)$$

где $h_k = h / \cos \alpha$; Проводя подобный расчет как с вертикальными каналами, получаем следующее значение проницаемости при создании N наклонных каналов:

$$K_{пр} = \left(\frac{4V_1 \cos \alpha + N(1 - m_1) \pi h d_k^2}{4V \cos \alpha} \right) \frac{d_k^2}{32} \quad (21)$$

Проницаемость с учетом извилистости каналов рассчитывается по формуле:

$$K_{пр} = \left(\frac{4V_1 \cos \alpha + N(1 - m_1) \pi h d_k^2}{4V \cos \alpha} \right)^{2,1} \frac{(d_k \cdot 7 \cdot 10^5)^2}{8,056} \quad (22)$$

Математическое моделирование проницаемости осуществлено с учетом

образованных в малопроницаемых слоях вертикальных и наклонных каналов. Была получена зависимость проницаемости от объема исследуемого слоя, объема пор в них, числа, диаметра, высоты и угла наклона каналов, начальной пористости слоя (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Формулы для расчета проницаемости

Без учета извилистости каналов	
При создании N вертикальных каналов	$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_{\text{к}} d_{\text{к}}^2}{4V} \right) \frac{d_{\text{к}}^2}{32}$
При создании N наклонных каналов	$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 \cos\alpha + N(1 - m_1)\pi h d_{\text{к}}^2}{4V \cos\alpha} \right) \frac{d_{\text{к}}^2}{32}$
С учетом извилистости каналов	
При создании N вертикальных каналов	$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_{\text{к}} d_{\text{к}}^2}{4V} \right)^{2,1} \frac{(d_{\text{к}} \cdot 7 \cdot 10^5)^2}{8,056}$
При создании N наклонных каналов	$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 \cos\alpha + N(1 - m_1)\pi h d_{\text{к}}^2}{4V \cos\alpha} \right)^{2,1} \frac{(d_{\text{к}} \cdot 7 \cdot 10^5)^2}{8,056}$

На основе полученной математической модели, можно установить уровень изменения гидравлической проводимости среды за счет создания каналов, которые позволяют увеличить проницаемость малопроницаемых слоев, и всего штабеля КВ [61, 62].

Для проведения численного расчета проницаемости были выбраны следующие параметры малопроницаемого слоя: длина – 1 м, ширина – 1 м и мощность – 1 м.

По задаче исследования диаметр каналов составляет 5-10 мм.

Для практической реализации данных каналов предусматривается разработка устройства робота, имеющего соответствующий диаметр 5-10 мм, предназначенного для разрушения малопроницаемых слоев.

2.4. Компьютерное моделирование для изучения процессов фильтрации

Целью компьютерного моделирования является исследование процесса фильтрации технологических растворов через массив штабеля КВ.

Задачи компьютерного исследования:

1) разработка физической модели штабеля КВ с тремя малопроницаемыми слоями, низкой пористостью и проницаемостью;

2) составление компьютерной симуляции движения технологических растворов в малопроницаемых слоях, образованных в процессе отработки штабеля КВ, путем введение всех параметров и граничных условий;

2) составление компьютерной симуляции движения технологических растворов после разрушения малопроницаемых слоев путем изменения предыдущих данных (пористости, проницаемости и т.д.);

3) проведение сравнительного анализа для определения степени изменения фильтрационных свойств массива штабеля КВ;

4) обобщение результатов математической и компьютерной моделей;

Компьютерная симуляция движения технологических растворов в штабелях КВ была осуществлена в программном обеспечении SVoffice в двух этапах: моделирование при наличии малопроницаемых слоев и после их разрушения.

Программное обеспечение SVoffice 2009, созданное компанией SoilVision Systems Ltd включает в себя разные направления исследования CHEMFLUX, SVAIRFLOW, SVFLUX, SVHEAT, SVSLOPE, SVSOLID. Программное обеспечение аккредитовано и зарегистрировано в Лос-Аламосской национальной лаборатории (Los Alamos National Laboratory), которая является одной из ведущих национальных лабораторий Министерства энергетики США, и рекомендуется при моделировании процессов движения различных флюидов.

Программное обеспечение позволяет реализовать модель путем:

1. Создания модели введением геометрических параметров исследуемого массива (рис. 2.7).

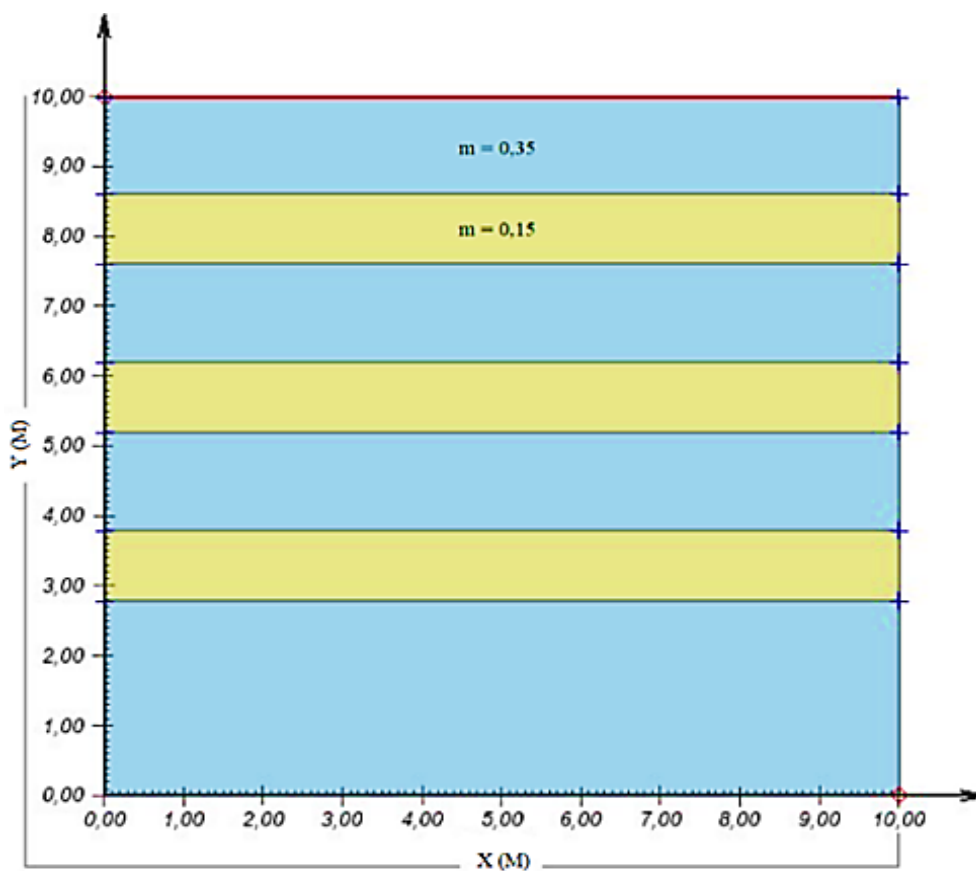


Рис. 2.7. Компьютерная модель: 2D геометрия образца

2. Определения граничных условий:

- скорость орошения массива постоянная и равна $2,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$;
- отсутствуют потери растворов с боков;
- плотность выхода технологических растворов равна $0,01 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$.

Модель состоит из 7-ми слоев: К1, К3, К5 и К7 – проницаемые участки, а К2, К4, К6 – малопроницаемые слои (табл. 2.3).

3. Определения свойств материала.

Области с малопроницаемыми слоями имеют пористость 0,15 и гидравлическую проводимость $1,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$, а в проницаемые участки – пористость равную 0,35 и гидравлическую проводимость – $2,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$.

Геометрические координаты областей массива

K1		K2		K3		K4		K5		K6		K7	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	10	0	8,6	0	7,6	0	7,6	0	6,2	0	5,2	0	2,8
10	10	10	8,6	10	7,6	10	7,6	10	6,2	10	5,2	10	2,8
10	8,6	10	7,6	10	6,2	10	6,2	10	5,2	10	3,8	10	0
0	8,6	0	7,6	0	6,2	0	6,2	0	5,2	0	3,8	0	0

Эти малопроницаемые слои представлены участками слежавшейся руды, пористостью 15% и проницаемостью 0,01 мкм². Проницаемые участки штабеля КВ имеют пористость равную 35% и проницаемость 2,3 мкм².

Во второй части моделирования движения растворов, принято, что малопроницаемые слои были разрушены и области, где они находились обладают теперь одинаковой пористостью равной 0,35 и гидравлической проводимостью – $2,64 \cdot 10^{-4}$ м³/с/м².

Для подтверждения результатов математического и компьютерного моделирования было осуществлено лабораторное исследование проницаемости и фильтрации массива пород.

2.5. Методы лабораторного исследования фильтрационных характеристик штабеля КВ

Лабораторное исследование проницаемости штабеля КВ было реализовано в лаборатории департамента недропользования и нефтегазового дела Российского университета дружбы народов.

Лабораторный прибор (рис. 2.8) для данного исследования представляет собой фильтрационную трубу с пористым дном, в который помещается сначала дренажный слой и далее испытываемый образец.

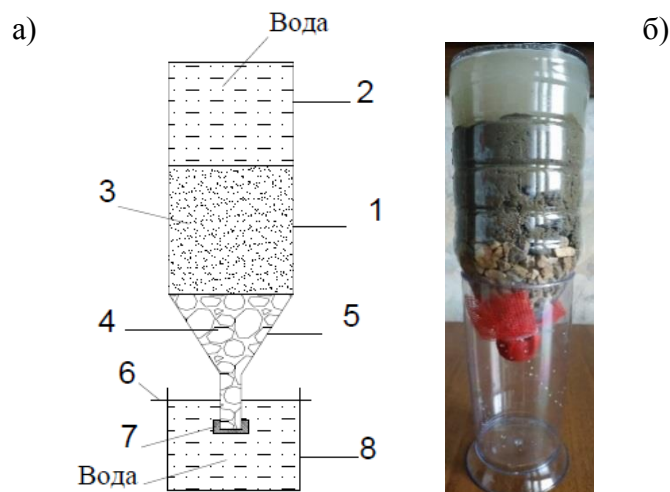


Рис. 2.8. Схема лабораторной фильтрационной установки:

1 - цилиндрическая часть фильтрационной трубы; 2 - область наполнения воды; 3 - цементно-песчаная смесь; 4 - гравий; 5 – воронка; 6 - держатель; 7- сетка; 8 - сборочная емкость

В составе оборудования для испытания на проницаемость входят следующие элементы: фильтрационная установка; секундомер; термометр; весы; линейка; спицы для создания каналов; шпатель; строительный нож; емкость для изготовления образца для испытания; сборочная емкость.

Планирование эксперимента.

Подготовку модельного образца штабеля КВ следует осуществлять в следующем порядке:

- песок, цемент и воду, необходимые для исследования коэффициента фильтрации, выдерживают в помещении для выравнивания их температуры с температурой окружающего воздуха;

- создается цементно-песчаная смесь с водой;

- вставляют сетку (7) на конце воронки (5) фильтрационной трубы, которую фиксируют держателем (6). После укладки сетки, предназначенной для удержания частиц породы в пределах трубы (1), засыпают дренажный слой из гравия (4) в пределах воронки (5), над которой засыпают слой испытываемого низкопористого образца (3) длиной L . Далее наливают определенное количество несжимаемой жидкости.

Данный процесс повторяют для 6 однотипных образцов для исследования фильтрации при вертикальных и наклонных каналах. Каналы создают с помощью спиц разного диаметра (от 5, 6, 7, 8, 9 и 10 мм, соответственно).

В качестве образца в этом опыте используется непроницаемая смесь песка и цемента с водой, которая выдерживают от 30 мин до 4 ч. При этом необходимо принимать во внимание, что для 1 кг смеси требуется примерно 0,13-0,14 л воды.

Первые измерения осуществляются для контрольного образца содержащем 70 % песка и 30 % цемента. После чего над смесью заливают воду (2) и измеряют значение ее расхода при различных интервалах времени.

После 30 минут наблюдения фильтрация через образец практически отсутствует. Это подтверждает, что цементно-песчаная смесь является не водопроницаемой.

Для увеличения фильтрации в непроницаемом образце создают 1 канал с помощью спицы диаметром 5 мм, в области центральной части образца (1) на всю его длину. После этого заметно быстрое заполнение стакана (8) водой, что свидетельствует о том, что жидкость течет по пути наименьшего сопротивления (через открытый поровый канал). Затем поровое пространство образца полностью заполняется жидкостью и в момент начала сбора ее в емкости под установкой, включается секундомер для фиксации времени фильтрации.

Создают 6 образцов с вертикальными каналами и 6 – с наклонными. Записывают данные фильтрации для возможного количества каналов, которые можно создать в зависимости от площади образца. Повторяют этот же процесс с созданием каналов диаметрами 6, 7, 8, 9 и 10 мм, соответственно.

Для каждого опыта измерения были проведены 3 раза с дальнейшим усреднением полученных данных.

Расчет фильтрации определяют следующим образом. Движение

несжимаемой воды в штабелях является ламинарным и осуществляется согласно закону Дарси. Тогда расчет коэффициента фильтрации (k) осуществляется согласно формуле:

$$K_{\text{пр}} = \frac{qL}{Sh} = \frac{QL}{Sht} \quad (24)$$

где: q – расход; Q – общий объем жидкости; t – период времени; h – напор, вызывающий поток; L – высота образца; S – площадь поперечного сечения.

2.6. Математическое моделирование взаимодействия между наночастицами золота

Для изучения условия взаимодействия между наночастицами и образования островков нанозолота в настоящее время применяется математическое моделирование поведения нанопленок золота на атомистическом уровне, с учетом проявления силовых полей его отдельных атомов. При этом разработанная модель должна отражать характерные особенности поведения нанозолота на мезоскопическом уровне.

Необходимо отметить, что на масштабах порядка нескольких Ангстрем детализация химических связей имеет большое значение.

Взаимодействие 2-х частиц золота, каждая из которых покрыта слоем жидкости толщиной 1,1 нм с идентичным радиусом ядра 1,1 нм может привести к отталкиванию твердого ядра в диапазоне 2,2 нм. Потенциал взаимодействия жидкости с наночастицами можно смоделировать короткодействующим отталкивающим потенциалом, предложенным Де Женном [94]:

$$U(d) = -2\pi \frac{k_B T}{S^3} \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \left[-\frac{16}{5} \frac{(2L)^{2,25}}{(d-R_1-R_2)^{0,25}} + \frac{16}{77} \frac{(d-R_1-R_2)^{2,75}}{(2L)^{0,75}} - \frac{48}{25} (2L(d-R_1-R_2)) + \frac{16}{5} (2L)^2 \right] \quad (25)$$

где: R_1 и R_2 – радиусы двух сфер, d – расстояние от между центров сфер,

L - толщина слоя жидкости, s – среднее расстояние между точками присоединения двух ПАВ, k_B – постоянная Больцмана, T – температура.

В моделях $L = 1,1$ нм и $s = 0,41$ нм, которое является средним расчетным расстоянием, исходя из предположения, что 116 молекул жидкости прикреплены к одной наночастице, $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К.

Условия существования формулы $d > R_1 + R_2$ и $L > 0$, (a) – положительное значение между двумя наночастицами.

Тогда $D = d + a = R_1 + R_2 + a$, и можно преобразовать формулу Де Женна следующим образом:

$$U(a) = -2\pi \frac{k_B T}{S^3} \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \left[-\frac{16 (2L)^{2,25}}{5 (a)^{0,25}} + \frac{16 (a)^{2,75}}{77 (2L)^{0,75}} - \frac{48}{25} (2La) + \frac{16}{5} (2L)^2 \right] \quad (26)$$

При изучении наночастицы золота в присутствии ПАВ, было замечено, что агрегация и стабилизация их поверхности происходят преимущественно при достижении их размера 15 нм.

Таким образом, для расчета потенциала взаимодействия между частицами нанозолота, можно использовать две одинаковые сферические наночастицы с диаметром 7,5 нм.

2.7. Выводы

1. Для определения эффективности кремнийорганических соединений были проведены эксперименты на предотвращение испарения и разбавление технологических растворов в специальных пробирках, а также в чашках Петри. Измерения были осуществлены путем наблюдений изменений данных по испарению при нормальных условиях температуры и давления.

2. С помощью математического моделирования была разработана новая методика расчета значений фильтрации растворов через штабель КВ. По

данной методике была установлена зависимости проницаемости слоя от радиуса образуемых каналов, их числа, объема штабеля, его конечной пористости для идеальной системы и с учетом реальных условий через коэффициент извилистости каналов. При этом здесь рассматривается образование каналов в малопроницаемых слоях.

3. В программном обеспечении SVoffice разработана компьютерная симуляция движения технологических растворов в штабелях КВ при наличии малопроницаемых слоев и после их разрушения.

Модель движения технологических растворов в малопроницаемых слоях, образованных в процессе отработки штабеля КВ, позволяет оценить гидравлические свойства штабеля КВ. Симуляция движения технологических растворов после разрушения малопроницаемых слоев позволяет оценить уровень восстановления фильтрационных характеристик штабеля КВ путем сравнения с первоначальным состоянием.

Лабораторные исследования проницаемости штабеля КВ были осуществлены с помощью лабораторного прибора, представляющего собой фильтрационную трубу с пористым дном, с латунной сеткой, вставленной на конце воронки фильтрационной трубы. Установка позволяет за счет создания каналов в малопроницаемой горной массе, находящейся в трубе с помощью спиц разного диаметра от 5 до 10 мм, определить изменения его значения фильтрации и проницаемости

4. Разработана математическая модель взаимодействия между наночастицами золота для определения условий агрегации этих наночастиц.

3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

3.1. Исследование эффективности применения кремнийорганических соединений на объектах кучного выщелачивания

3.1.1. Результаты экспериментальных исследований предотвращения испарения с применением кремнийорганических соединений

В начале опыта с 3 культуральными пробирками, было произведено измерение их массы, прежде чем добавить разные жидкости. Пробирка I массой 6,38 г наполненная водой массой 4,02 г, пробирка II массой 6,51 г наполненная смесью воды (70 %) и силиконовой жидкости (30 %) общей массой 4,00 г и пробирка III массой 6,47 г наполненная силиконовой жидкостью массой 4,01 г.

Замеры скорости испарения воды по массе осуществляется каждые 24. На основе полученных результатов (табл. 3.1) были построены графики испарения (рис. 3.1-3.4).

Таблица 3.1

Результаты измерения скорости испарения жидкостей

День	Пробирка I	Пробирка II	Пробирка III
	Остаток воды, г	Остаток смеси воды и силиконовой жидкости, г	Остаток чистой силиконовой жидкости, г
1	4,02	4,00	4,01
2	3,87	3,36	2,95
3	3,71	3,26	2,37
4	3,56	3,25	1,9
5	3,42	3,25	1,59
10	2,88	3,21	1,12
12	2,62	3,19	1,07
16	2,11	3,14	1,05
20	1,73	2,96	1,04

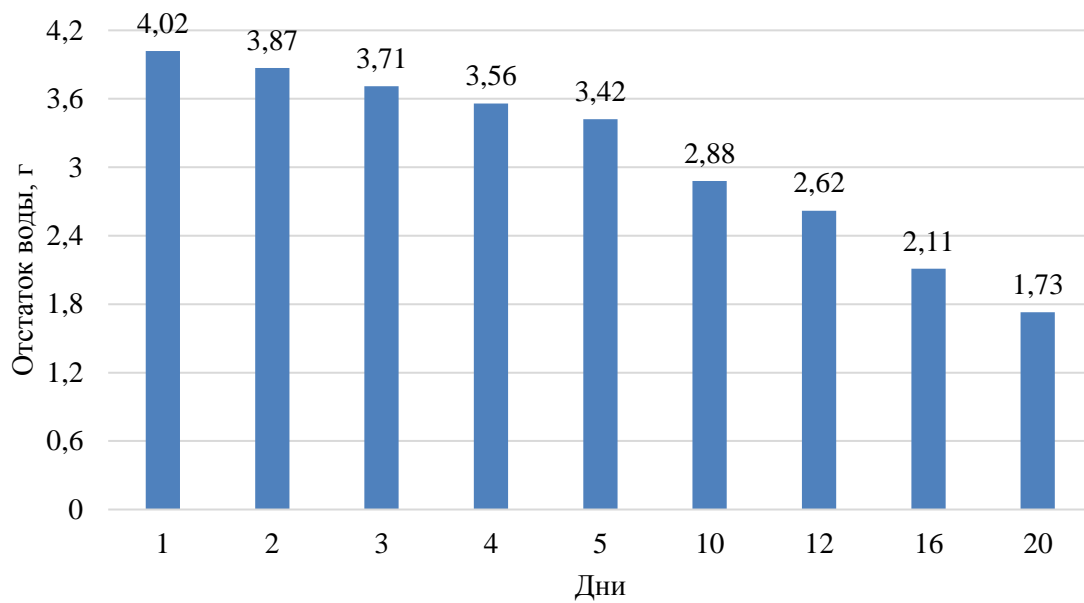


Рис. 3.1. График испарения воды

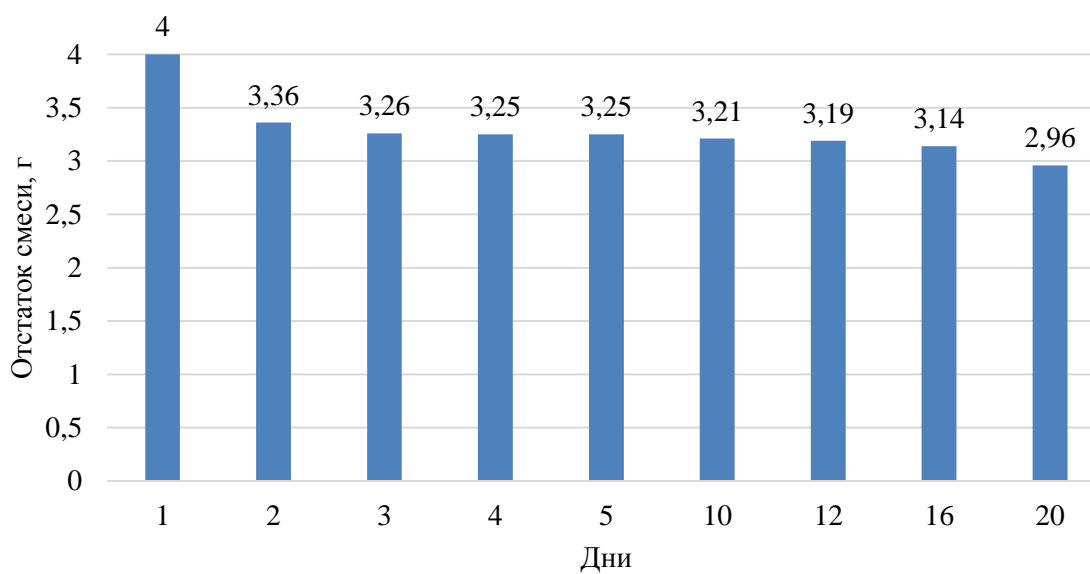


Рис. 3.2. Испарение смеси воды и силиконовой жидкости

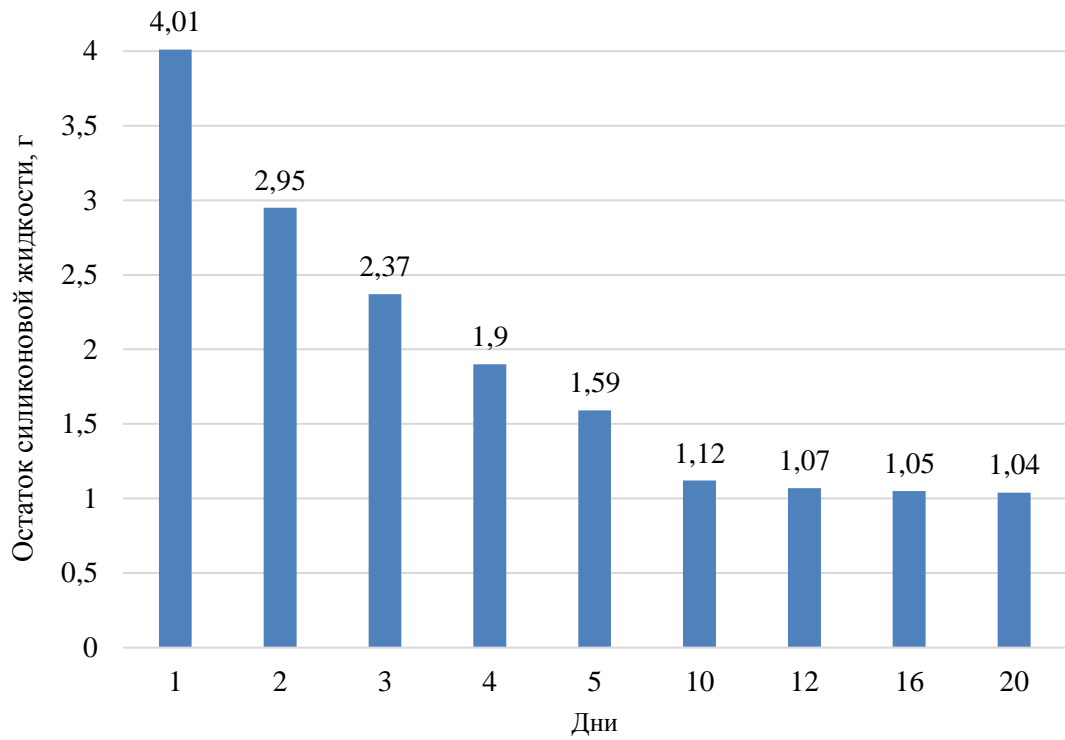


Рис. 3.3. Испарение силиконовой жидкости

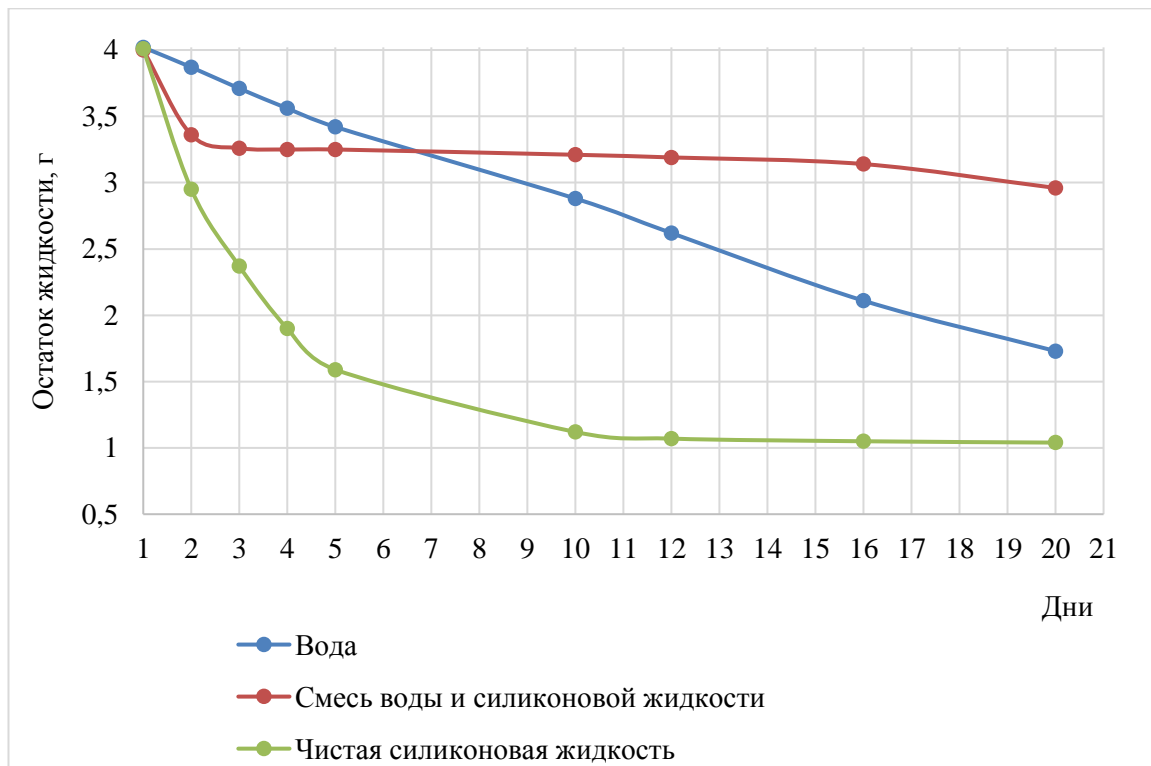


Рис. 3.4. Сравнение уровня испарения различных жидкостей

После 20 дней наблюдается испарение половины воды, 3/4 частей силиконовой жидкости, при этом испарение смеси воды и силиконовой жидкости составило только 1/3. Кроме того, смесь практически не испаряется с 4-го по 20-тый день.

Для исследования скорости испарения жидкостей по объему измерения производятся каждые 24 ч. Результаты замеров занесены в табл. 3.2, и, по ним были построены графики улетучившейся жидкости (рис. 3.5-3.8).

Анализ результатов в обоих случаях показывает, что с 4-го дня смесь практически не испаряется.

Таблица 3.2

Результаты измерения скорости испарения жидкости

День	Пробирка I	Пробирка II	Пробирка III
	Остаток воды, $\frac{\text{мл}}{\text{г}}$	Остаток смеси воды и силиконовой жидкости, $\frac{\text{мл}}{\text{г}}$	Остаток силиконовой жидкости, $\frac{\text{мл}}{\text{г}}$
1	4,00	4,00	4,00
	3,97	3,80	3,41
2	3,95	3,58	3,30
	3,92	3,49	2,96
3	3,90	3,39	3,00
	3,86	3,30	2,96
4	3,86	3,30	2,70
	3,80	3,22	2,50
5	3,79	3,30	2,50
	3,75	3,20	2,33
10	3,58	3,29	1,8
	3,53	3,18	1,76
12	3,48	3,29	1,57
	3,43	3,18	1,56
16	3,28	3,29	1,26
	3,22	3,18	1,26
20	3,1	3,29	1,15
	3,22	3,17	1,14

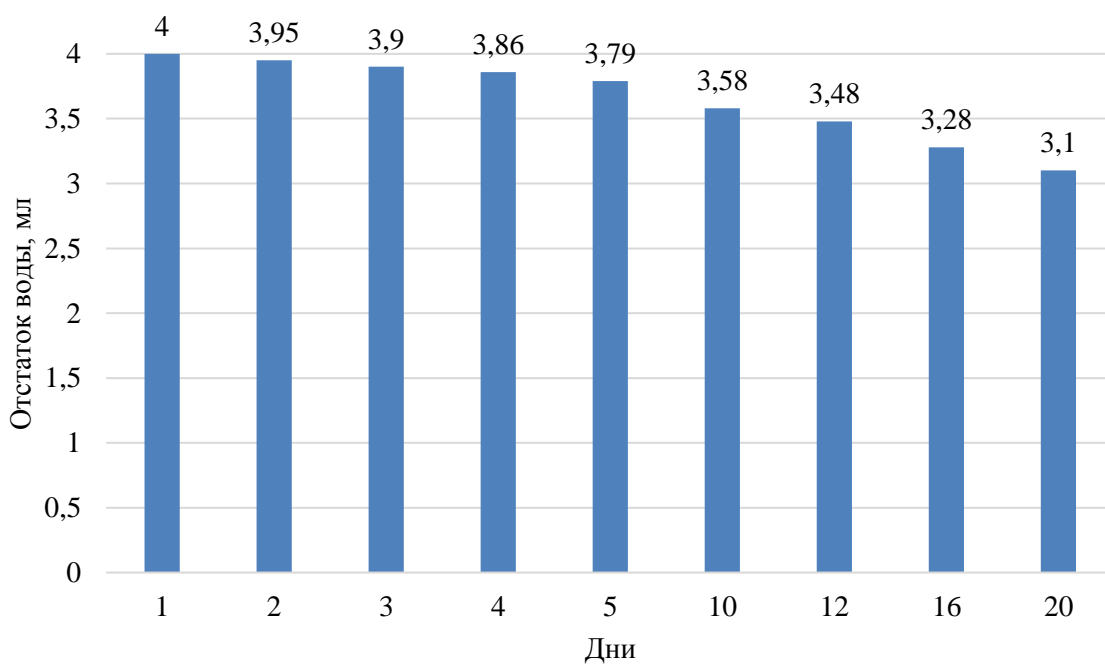


Рис. 3.5. График испарения воды

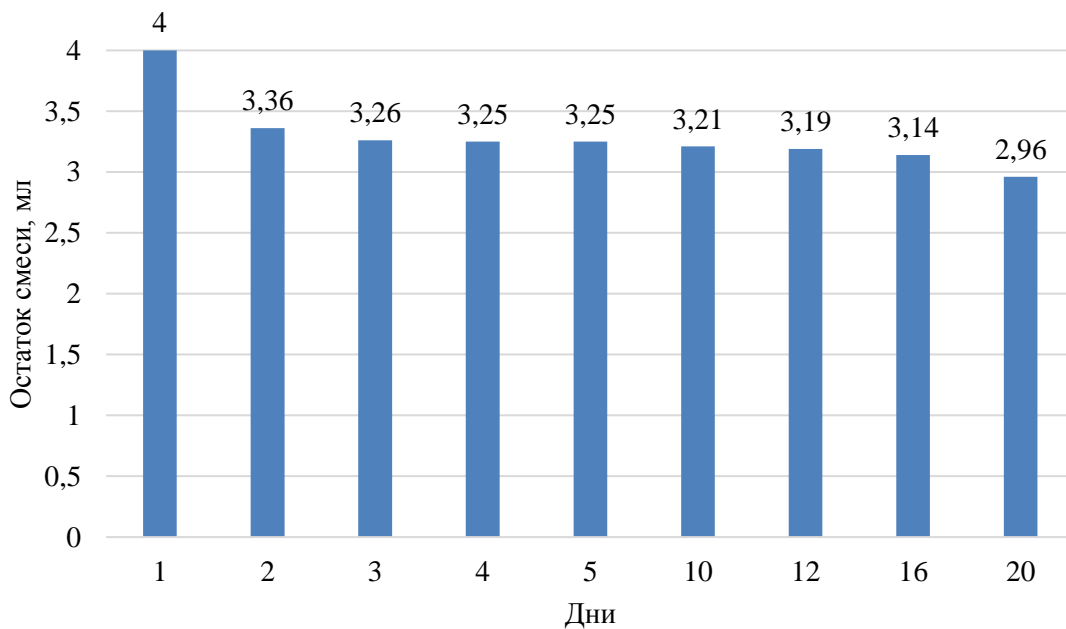


Рис. 3.6. Испарение смеси воды и силиконовой жидкости

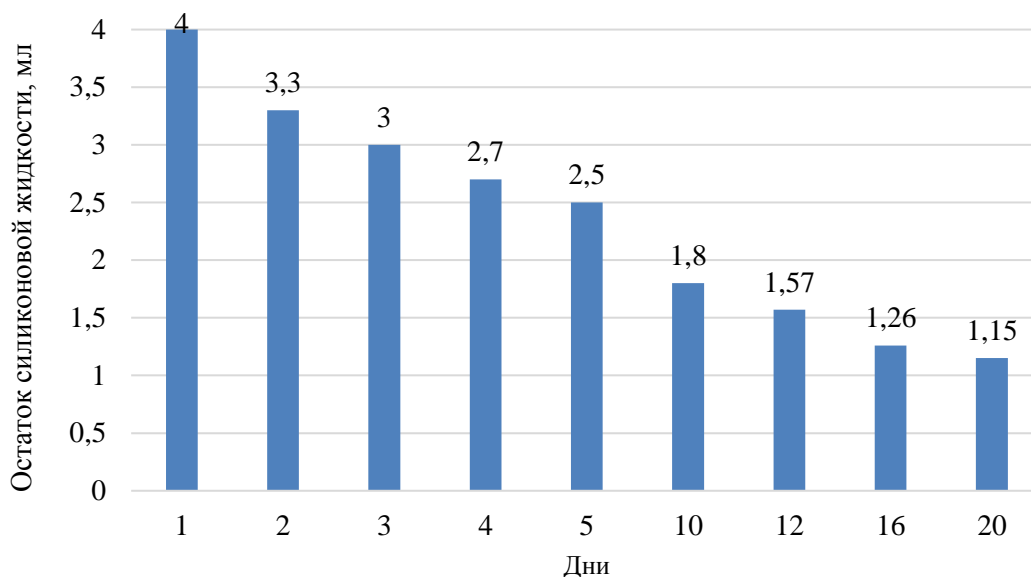


Рис. 3.7. Испарение силиконовой жидкости

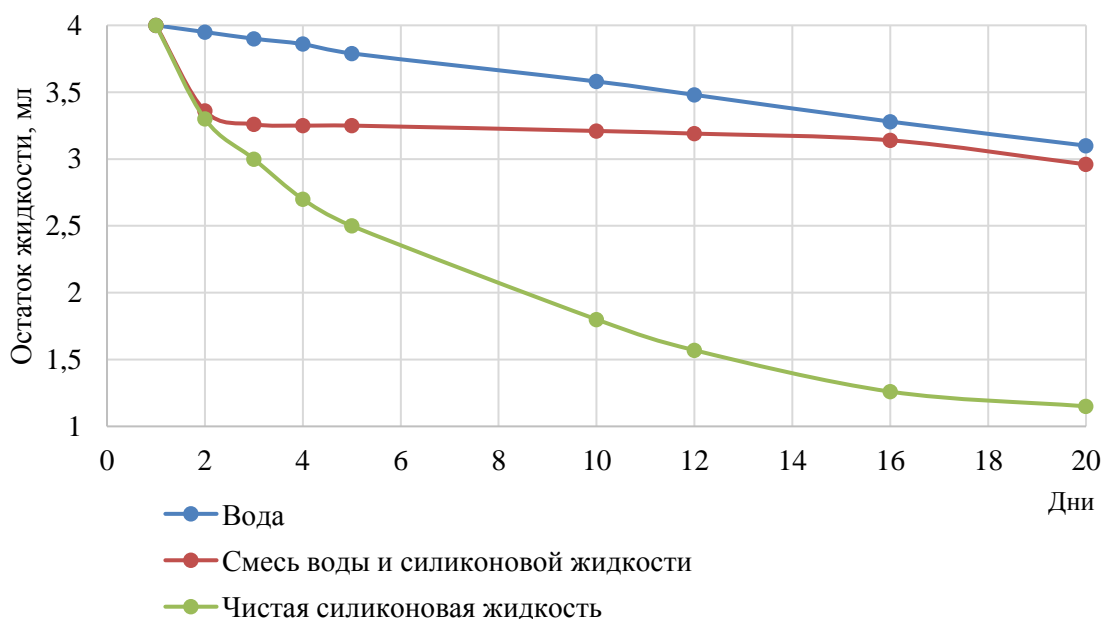


Рис. 3.8. Сравнение уровня испарения различных жидкостей

Наблюдается наличие 2-х отдельных слоев на поверхности смеси. Это явление объясняется тем, что с течением времени поверхностные слои воды и жидкости образуют между собой стабильную тонкую пленку, предотвращающую испарение смеси. После 20 дней количество испаряющейся воды составляет всего лишь $1/3$, испаряющейся силиконовой

жидкости - 3/4, смесь воды и силиконовой жидкости испарялась до 1/3.

Силы притяжения между молекулами воды, смеси воды и силиконовой жидкости, а также чистой силиконовой жидкости различаются. Молекулы чистой силиконовой жидкости образуют между собой более слабую цепь, чем молекулы смеси воды и силиконовой жидкости и чистой воды. Притяжение молекул данной смеси стабилизируется с 4-го дня, когда вода постепенно будет продолжать испаряться.

Таким образом, при распылении силиконовой жидкости на поверхности воды, в течение времени наблюдается образование тонкой малопроницаемой пленки на ее поверхности, которая предотвращает испарение воды, что подтверждается эффективность геомембран на основе силикона.

Для исследования скорости испарения жидкостей с единицы площади использовались чашки Петри.

На основе полученных данных (табл. 3.3, 3.4, 3.5, 3.6) были построены графики улечувившейся жидкости (рис. 3.9, 3.10).

Таблица 3.3

Сокращение количества жидкости за счет испарения

Образец	Замеры массы чашки со смесями					
	Диаметр, см	0 мин	30 мин	60 мин	90 мин	120 мин
I	9,4	116,37	115,64	114,45	113,36	
II	9,4	108,58	107,27	106,02	104,92	
III	9,4	118,49	117,35	116,31	115,34	114,25
IV	9,4	111,90	110,93	110,27	109,69	109,07
V	9,5	126,75	125,62	124,85	124,18	123,5
Образец	Диаметр, см	150 мин	180 мин	210 мин	240 мин	270 мин
I	9,4					
II	9,4					
III	9,4	113,17	111,96	111,03	109,95	108,88
IV	9,4	108,45	107,75	107,75	106,62	106,02
V	9,5	122,83	122,07	121,47	120,81	120,19

Количество испарившегося жидкости

Образец	Масса испарившегося вещества					
	Диаметр, см	0 мин	30 мин	60 мин	90 мин	120 мин
I	9,4	-	1,23	1,19	1,03	-
II	9,4	-	1,31	1,25	1,1	-
III	9,4	-	1,14	1,04	0,97	1,09
IV	9,4	-	0,97	0,66	0,58	0,62
V	9,4	-	1,3	0,77	0,67	0,68

Образец	Диаметр, см	Масса испарившегося вещества				
		150 мин	180 мин	210 мин	240 мин	270 мин
I	9,4	-	-	-	-	-
II	9,4	-	-	-	-	-
III	9,4	1,08	1,21	0,93	1,08	1,07
IV	9,4	0,62	0,7	0,54	0,59	0,6
V	9,4	0,67	0,76	0,6	0,66	0,62

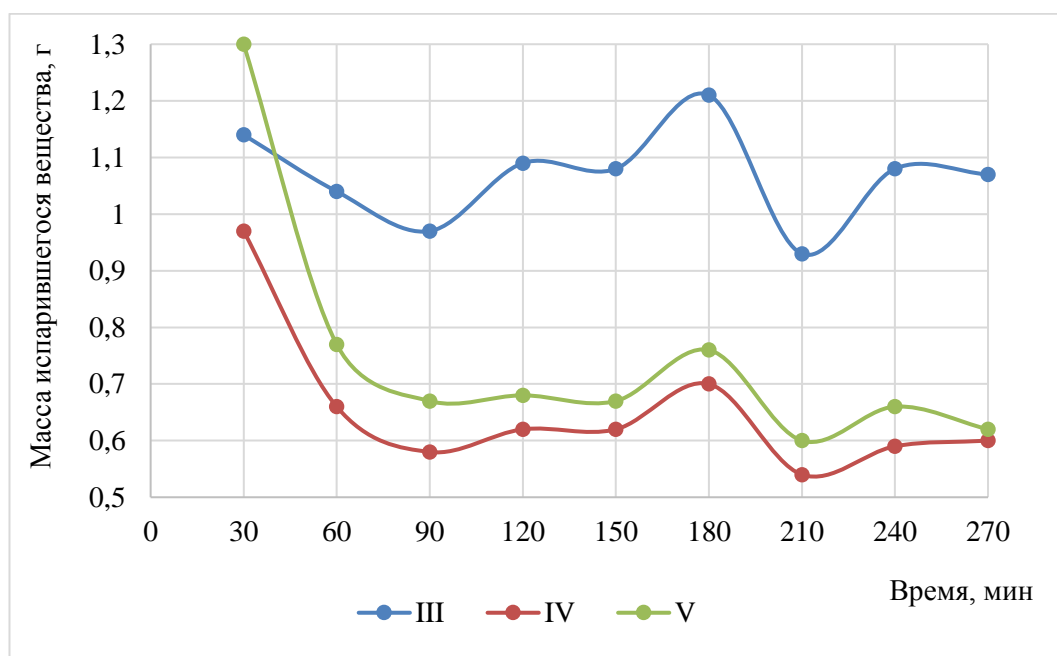


Рис. 3.9. График испарения смеси с течением времени

Таблица 3.5

Сокращение количества жидкости за счет испарения

Образец	Замеры массы чашки со смесями			
	Диаметр, см	60 мин	60 мин	60 мин
I	9,4			
II	9,4			
III	9,4	106,75	104,67	103,18
IV	9,4	104,81	103,58	102,43
V	9,4	118,90	117,61	116,43

Таблица 3.6

Масса испарившегося вещества

Образец	Масса			
	Диаметр, см	60 мин	120 мин	180 мин
I	9,4			
II	9,4			
III	9,4	2,13	2,08	1,49
IV	9,4	1,21	1,23	1,15
V	9,4	1,29	1,29	1,18

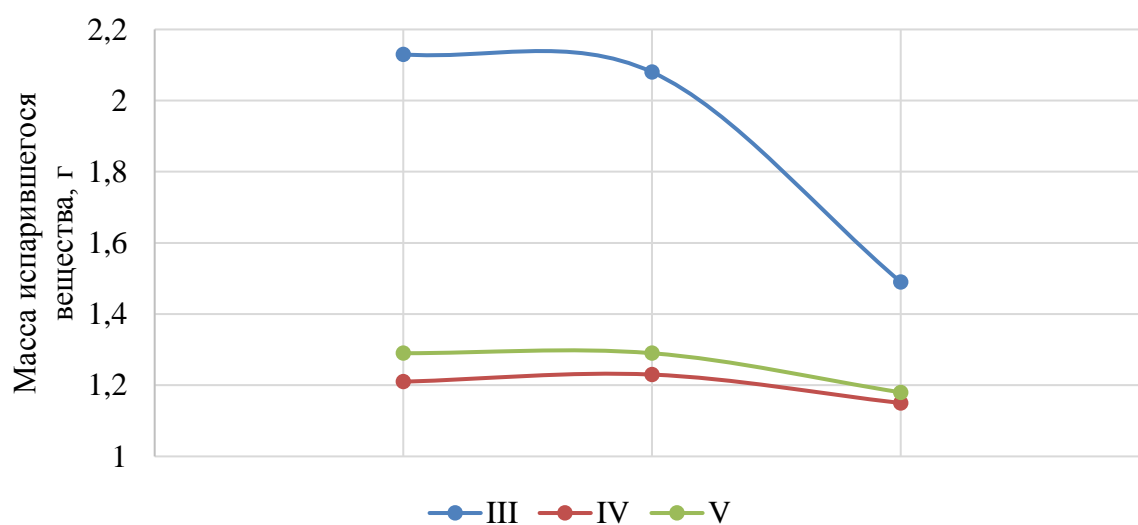


Рис. 3.10. График испарения смеси с течением времени

Анализ результатов позволяет определить, что количество испарившейся жидкости и скорость ее испарения на 1 м^2 меньше в IV и V-ой чашки, в которых вводили 0,7 и 0,9 мл силиконовой жидкости, соответственно.

3.1.2. Технология предотвращения испарения технологических растворов при кучном выщелачивании металлов на основе применения нанопленочного материала

Использование наружных покрытий при кучном выщелачивании связано с самыми значительными трудностями. Поэтому все еще предпринимают различные методы решения проблем испарения технологических растворов при КВ, что предполагает разработку принципиально новых видов покрытия штабеля КВ [55].

В настоящее время появилась необходимость в использовании экранирующей пленки с более высокой химической устойчивостью, которая способствовала бы исключению испарения растворов и реагентов, снижению отрицательного воздействия атмосферных явлений (радиации, осадков и т.д.), уменьшению затрат на реагенты, и тем самым обеспечению оптимальных характеристик технологических растворов и имела низкую стоимость.

Такая пленка может быть разработана на основе силикона.

Одни из более эффективных гидрофобизаторов готовят на основе кремнийорганических соединений (полиорганосилоксанов), основная цепь $[\text{R}_2\text{SiO}]_n$ которых состоит из атомов кремния и кислорода, а остальные валентности кремния замещаются либо арильными, либо алкильными радикалами, где: R – алкильные или арильные заместители.

Покрытия на основе силикона все еще не нашли широкого применения в предприятиях кучного выщелачивания. Однако, судя по их физико-химической характеристике силиконовые жидкости обладают хорошими гидрофобными свойствами.

Практический опыт показывает, что полярные связи полиорганосилоксановых смол направлены к защищаемой поверхности, а водоотталкивающие углеводородные радикалы – к окружающей среде. Поэтому, наблюдаются высокие значения контактного угла смачивания, равной 90-180°, между водой и поверхностями (в том числе, массивом штабеля руды), обработанными кремнийорганическими соединениями, что характерно для гидрофобных поверхностей.

Существуют различные виды силиконовых полимеров. Плотность модифицированного силикона (1,05–1,10 г/мл) при комнатной температуре несколько больше плотности воды, а вязкость его $0,65-25 \cdot 10^5$ мм²/с в зависимости от уровня полимеризации. На открытом атмосферном воздухе модифицированные силиконы с вязкостью >50 мм²/с практически не подвергаются испарению.

Конкретный тип силиконового полимера описан в патенте США № 6294159, где его структура (MQ) представляет собой жидкий триметилсилоксисиликатный полимер, с соотношением M : Q, равным 1 (например, полимер, полученный от General Electric Company, Waterford, New York под названием SR 399). Символ M означает монофункциональное звено $(\text{CH}_3)_3\text{SiO}_{0,5}$; D означает бифункциональное звено $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$; T означает трифункциональное звено $(\text{CH}_3) \text{SiO}_{1,5}$; и Q означает четырех- или тетрафункциональное звено SiO_2 .

Для практического использования наиболее предпочтительные силиконовые полимеры представляют собой MQ, MT, MTQ, MQ и MDTP полимеры. Особенно предпочтительны MQ полимеры, в которых соотношение M : Q составляет от 0,5 : 1,0 до 1,5 : 1,0, а средняя молекулярная масса полимера составляет от 1000 до 100000.

Штрихи у символов звеньев D', T' и Q' означают заместители, отличающиеся от метила, и должны быть конкретно определены для каждого отдельного случая. Обычные альтернативные заместители включают такие

группы, как винил, фенилы, амины, гидроксилы и т.д.

Примеры конкретных нерастворимых в воде модифицированных силиконов (табл. 3.7) включают в себя диметикон, циклометикон, триметилсилилаодиметикон, фенилтриметикон, триметилсилоксисиликат, полиорганосилоксан, полиалкилсилоксан, полиарилсилоксан, полиалкиларилсилоксан и полиэфирсилоксановые сополимеры.

Модифицированный силикон «МС-1» — это нерастворимая в воде вязкая жидкость серо-белого цвета.

Таблица 3.7

Виды модифицированных силиконов «МС-1» [47]

Время выхода, мин	Название / элементная формула	М	Относительное содержание, %
1,58	Тетраэтоксилан $C_8H_{20}O_4Si$	208	37,1
4,08	Триметилтриэтоксидциклотрисилоксан $C_9H_{24}O_6Si_3$	312	28,26
7,28	Триметилпентаэтоксидциклотетрасилоксан $C_{13}H_{34}O_9Si_4$	446	16,82
10,08	Метилэтилгептаэтоксидгидридциклотетрасилоксан $C_{17}H_{44}O_{12}Si_5$	580	4,43
2,42	Диметилтетраэтоксиддисилоксан $C_{10}H_{26}O_5Si_2$	282	2,4
1,01	Этанол C_2H_6O	46	2,25
12,49	Декаэтоксидциклопента-силоксан $C_{20}H_{50}O_9Si_5$	654	2,05
5,49	Гексаэтоксидциклотрисилоксан $C_{12}H_{30}O_{14}Si_3$	402	1,52
9,89	Гептаэтоксидпропаксидгидридциклопентасилоксан $C_{17}H_{44}O_{12}Si_5$	580	1,06

Силиконовые жидкости могут содержать ароматические вещества, алифатические углеводороды, углеводородный пропелент и др.

Для исследования технической эффективности применения покрытий на

основе силикона, были проведены эксперименты, направленные на изучение изменения скорости испарения различных жидкостей.

Таким образом, главным преимуществом применения силиконовых гидрофобизаторов при кучном выщелачивании является комплексность их действия наряду с достижением следующих целей:

- защиты штабеля КВ от проникновения внутри него влаги, радиации, осадков и т.д.;
- обеспечения теплоизоляции штабеля КВ;
- обеспечения эффективности и экономичности (снижение расходов на реагенты) процесса КВ за счет уменьшения уровня испарения растворов;
- увеличения срока продуктивного выщелачивания руды до круглогодичного.

Запатентованная автором технология кучного выщелачивания с изоляцией поверхностей штабеля КВ силиконовой пленкой имеет следующие этапы:

- а) подготовку площадку, предназначенную для отсыпки штабеля кучного выщелачивания;
- б) формирование нижнего основания штабеля КВ;
- в) формирование слоя, в котором укладываются перфорированные растворозаборные трубопроводы совместно со системой воздухопроводов;
- г) отсыпку штабеля КВ;
- д) создание распределяющего слоя;
- е) установку оросительных трубопроводов;
- з) покрытие поверхности штабеля КВ тонким слоем силикона;
- ж) подачу выщелачивающего раствора через орошающих трубопроводов;
- к) выщелачивание металлов и отбор продуктивных растворов в емкостях.

На рис. 3.11 представлена схема способа предотвращения испарения

технологических растворов при кучном выщелачивании металлов из руд.

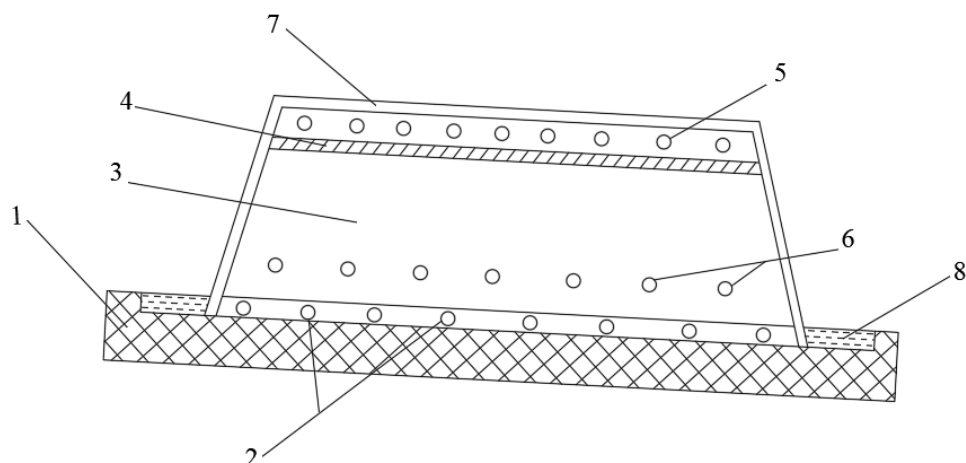


Рис. 3.11. Схема технологии кучного выщелачивания на основе экранирования поверхности штабеля [55]:

1 - антифильтрационный слой, 2 - перфорированный трубопровод для сбора продуктивных растворов, 3 - массив штабеля выщелачиваемой руды, 4 - распределяющий слой, 5 - орошающий трубопровод, 6 – воздухопроводы, 7 – силиконовое покрытие (пленка), 8 – закрытый от атмосферных осадков зумпф, предназначенный для сбора продуктивных (металлоносных) растворов

Технологию осуществляют следующим образом. Сначала дробят добытую золотосодержащую руду (со средней концентрацией Au 1,0-1,2 г/т) на дробильно-сортировочной установке (ДСУ).

Эффективное дробление руды при рудоподготовке для последующего извлечения [18, 19, 58], например, золота кучным выщелачиванием составляет 10–25 мм, но часто рудные куски могут иметь размеры до 100 мм и более (в зависимости от характеристики минерализации руд, пористости и т.д.).

После чего осуществляют подготовку участка кучного выщелачивания, предназначенного для отсыпки штабеля, ее планировкой (посредством срезания лишнего грунта ножом бульдозера).

Затем формируют основание штабеля кучного выщелачивания из малопроницаемого слоя (например, глина) (1) таким образом, чтобы его наклон составил 2–4% в сторону зумпфа (8). После чего формируют дренажную систему, которая реализуется преимущественно с помощью

перфорированных трубопроводов (2).

Эта система перфорированных труб служит для возврата технологических растворов с целью дальнейшего орошения штабеля кучного выщелачивания, т.е. они соединены с системой трубопроводов (5). При этом перенос технологических растворов обеспечивается электронасосами (на рис. 3.11 не показаны). Трубы соединяются с общим коллектором (на рис. 3.11 не показаны), который предназначен для вывода продуктивных (металлоносных) растворов в зумпф (8).

Далее процесс идет по традиционной технологической схеме [16]. После чего производится отсыпка массива штабеля кучного выщелачивания (3) с созданием распределяющего слоя из крупнодроблёных пород (4) и закладкой орошающего трубопровода (5) и воздухопроводов (6).

Данная технология может осуществляться при применении эмиттерного орошения с одновременной подачей кислорода в штабель КВ компрессором или укладкой перфорированных пустых труб между слоями кучи для проникновения кислорода. Полученные результаты компьютерной модели представлены на рис. 3.12.

Было выявлено, что давление воздуха во всем низкопроницаемом слое колеблется между 109 и 120 кПа, что способствует расширению пор [131].

По результатам исследования можно прийти к выводу, о том, что подача воздуха под давлением намного выше атмосферного в местах образования малопроницаемых слоев наряду с передвижением разбрызгивателей позволит решить проблемы снижения просачивания, созданные ими.

При полном насыщении массива руды растворами доступ к кислороду снижается или даже отсутствует [75], что способствует неблагоприятному протеканию необходимой химической и биологической реакций извлечения ценных металлов.

Выбранное рабочее давление должно обеспечить интенсивность орошения равную $\sim 5 \text{ дм}^3/\text{ч}/\text{м}^2$ при выщелачивании меди, урана и 10-11

дм³/час/м² при извлечении золота.

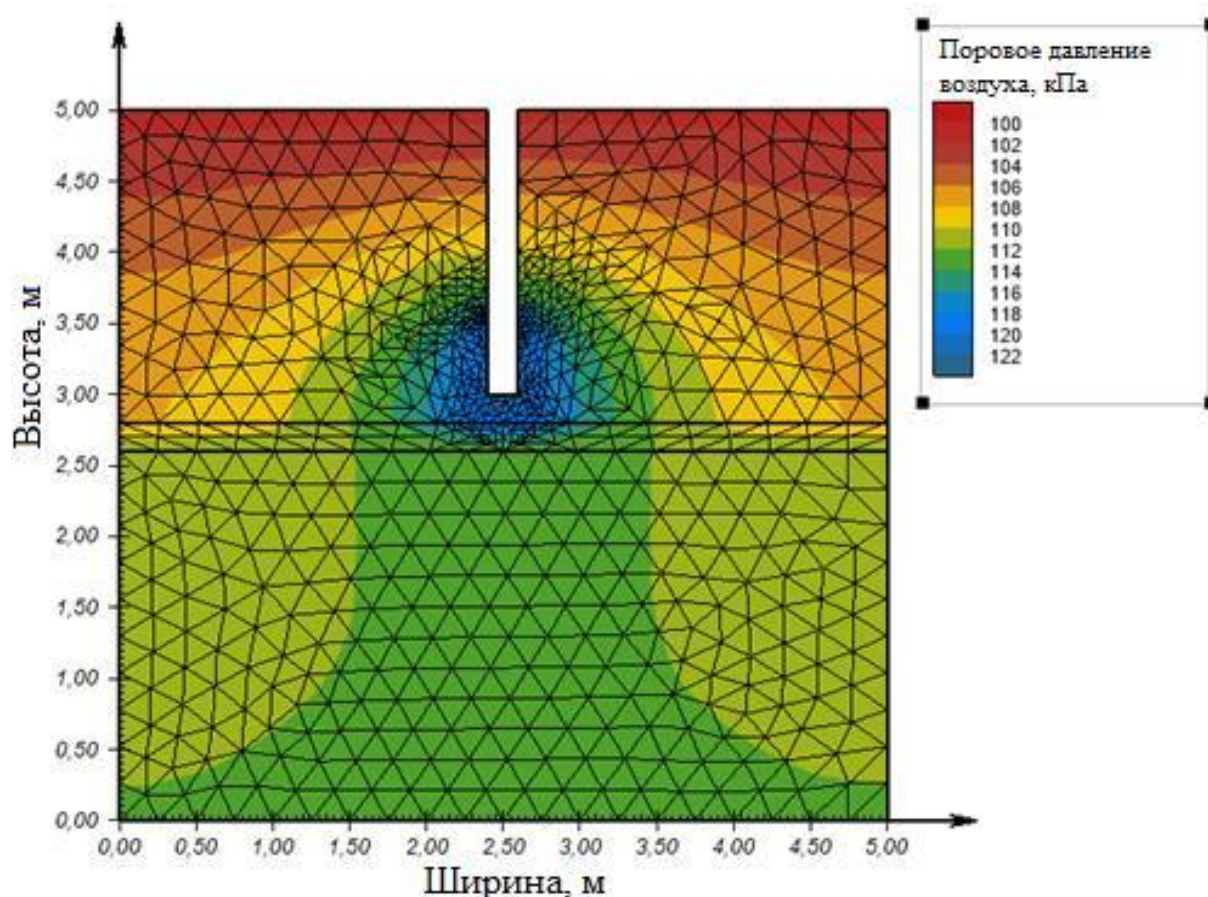


Рис. 3.12. Модель распространения подаваемого воздуха/кислорода в штабель КВ (разработка автора)

Для обеспечения эффективного выщелачивания необходимо подавать через системы воздухопроводов кислородосодержащий газ с содержанием кислорода намного больше, чем в атмосферном воздухе. Удельный расход кислорода составляет 0,012-0,020 м³ на 1 т руды, а расход цианида составляет 0,8-1,8 кг на 1 т руды.

Затем обработку поверхности и боковых откосов штабеля кучного выщелачивания производят силиконовым соединением, с созданием малопроницаемого слоя (7). Эта обработка может быть осуществлена, как посредством нанесения жидкого силикона, так и его мелкодисперсным распылением.

Формирование нанопленок силикона на поверхности штабеля КВ

осуществляется с помощью различных распылителей путем нанесения в виде растворов, распыления или капельно-воздушного напыления на поверхности массива штабелей КВ.

Щелевые распылители являются наиболее подходящими видами распылителей жидкостей в силу того, что они образуют более крупные по размеру капли (100-500 мкм), которые менее подвержены сносу ветром.

Существуют два варианта щелевого распылителя (рис. 3.13): стандартный щелевой и щелевой распылитель с эжекцией.

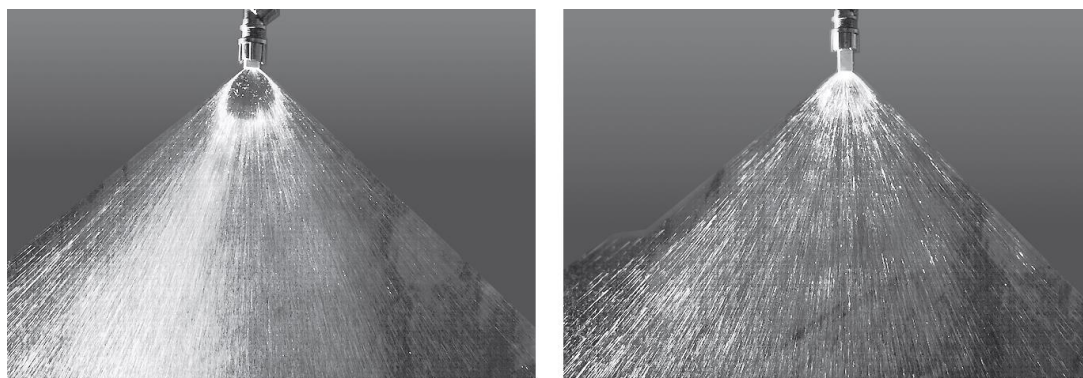


Рис. 3.13. Факелы распыла стандартного щелевого распылителя (слева) и щелевого распылителя с эжекцией воздуха (справа) [25]

Капли факела распыла распылителей с эжекцией воздуха более крупные по сравнению со стандартным щелевым.

В табл. 3.8 представлены результаты измерений времени существования капель.

Таблица 3.8

Время испарения капель в зависимости от температуры, влажности воздуха и диаметры капель [25]

Тест	Исходные условия			Время жизни капель (мин)				
	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Ветровой коэффициент	Размер капель, мкм				
				25	50	100	200	500
1	5	90	1	3,9	15,7	62,6	251	1570
2	15	50	2	0,37	1,47	5,2	23,7	147
3	25	30	3	0,14	0,15	2,2	8,7	55

При выборе типа распылителя для формирования силиконовой пленки нужно руководствоваться достижением оптимального размера капли (который лежит в диапазоне 150-250 мкм в лабораторных условиях), позволяющего обеспечить более равномерное распыление и покрытия руд на поверхности штабеля КВ.

Например, можно применять распылитель LU 120-04, который позволяет достичь медианно массового размера капель 240 мкм и IDK 120-025 – 282 мкм распылителя [72].

Таким образом, необходимо избегать применение первой группы и второй группы ультразвуковых распылителей, обеспечивающей формирование аэрозолей со средним диаметром формируемых капель распыляемой силиконовой жидкости в пределах от 80 до 30 мкм и 15 до 5 мкм соответственно.

Кроме того, нецелесообразно использовать электрораспыление, которое представляет собой технологию получения тонкого аэрозоля из потока жидкости (обычно 1-10 мкл/мин) с помощью сильного электрического тока [80, 117]. Полученные капельки наноразмерные и, соответственно, испаряются намного быстрее, а с другой стороны, использование сильного электрического тока экономически невыгодное.

В реальных условиях при учете значительного воздействия внешних факторов (ветродуя, температуры среды, т.д.) на капли факела распыла, можно отметить необходимость создания условий для выхода более крупных по размеру капель (> 250 мкм), позволяющих получить силиконовую пленку с минимальными потерями жидкости. Они менее подвержены сносу ветром, не успевают испариться до их осаждения на объекте обработки по сравнению с более мелкими каплями. Такой факел более устойчив к воздействию неблагоприятных внешних факторов. При этом важным значением для обеспечения равномерного распыления имеет угол распылителя (рис. 3.14).

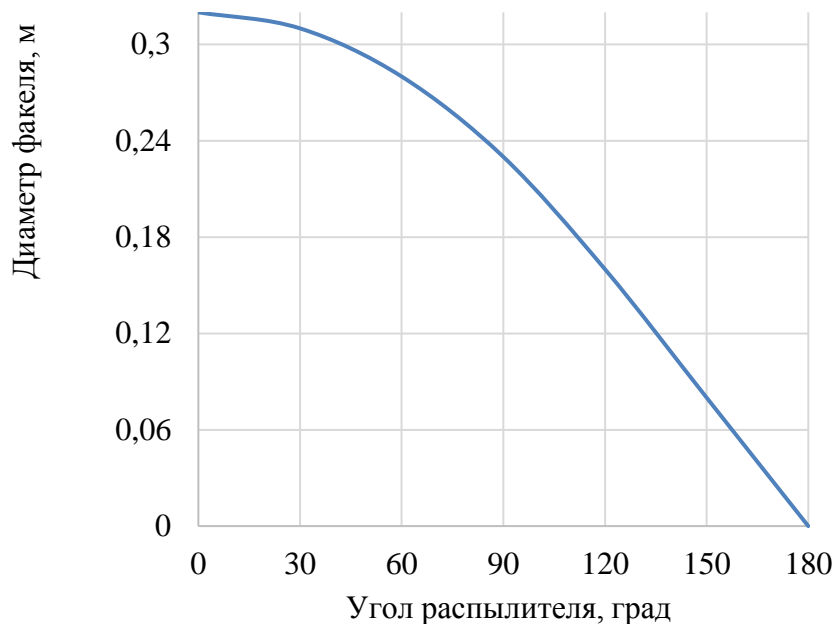


Рис. 3.14. Зависимость диаметра факела распыления от угла распылителя [72]

Анализ рис. 3.14 позволяет прийти к выводу, что для успешной реализации мероприятий по созданию силиконовой пленки, предпочтительнее держать распылители под крутым к обрабатываемой поверхности углом, что соответствует охват участка поверхности штабеля диаметром от 12 см.

Таким образом, силикон после его нанесения на поверхность штабеля кучного выщелачивания проникает в мелкодисперсный материал руд на небольшую (на 0,5-0,8 мм) глубину или обволакивает геоматериал толщиной 3-5 мм и затвердевает в течение 10-45 с, образуя прочную термозащитную полимерную пленку или покрытие (долговечность 14-16 месяцев) с полным связыванием поверхностных слоев штабеля (в том числе и пылевидных частиц в поверхностном слое). Весь такого покрытие составляет 50-1000 г/м².

Силиконовая плёнка состоит из нескольких слоёв:

- поверхностного слоя, который состоит из жиров, необходимых для предотвращения испарения жидкости.
- нелетучей жидкости, в которой сравнительно большое количество жидкости должно находиться на носителе в виде как можно более

тонкой и равномерно распределённой плёнки.

Предложенная нами технология кучного выщелачивания позволяет покрыть поверхности массива штабеля КВ тонким слоем силикона.

Использование на поверхности массива штабеля кучного выщелачивания слоя силикона – это наиболее эффективный и экономичный вариант урегулирования испарения. Следует отметить, что силикон не подвергается негативным воздействиям высоких температур, влажности, ветра, дождя и т.д.

Было установлено, что долговечность образованной прочной термозащитной полимерной пленки / покрытия составляет от 14-16 месяцев. Вес такого покрытие составляет 50-1000 г/м² в зависимости от его назначения и достигаемых целей. Последующее орошение штабеля кучного выщелачивания производится уже под силиконовым покрытием.

Создание пленочного покрытия обеспечивает эффективный процесс кучного выщелачивание со значительным снижением испарения с поверхности штабеля КВ по сравнению с другими технологическими решениями (рис. 3.15).

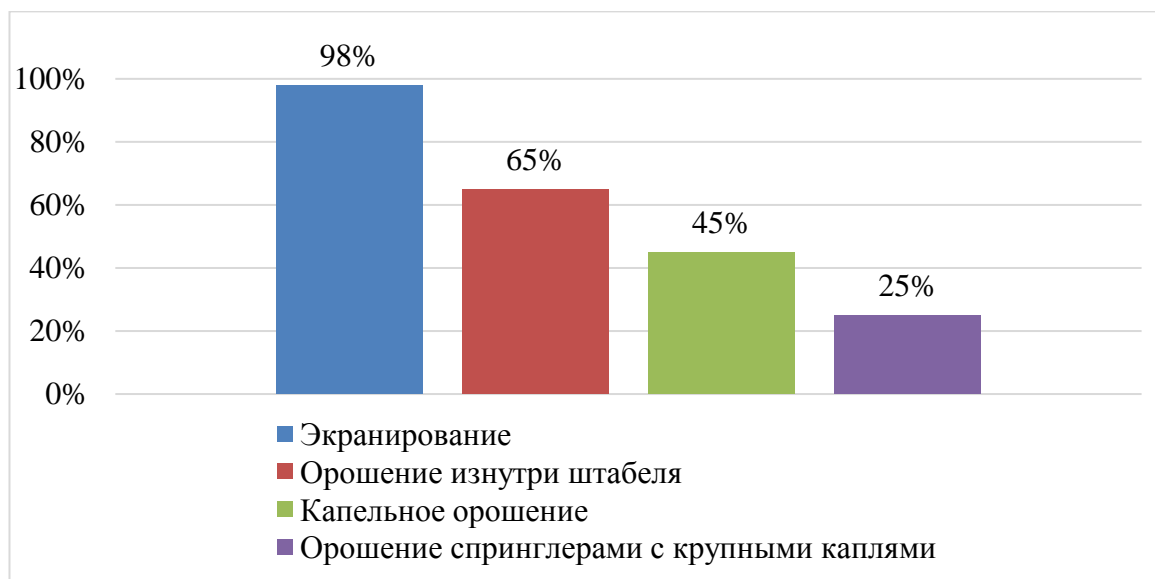


Рис. 3.15. Оценка эффективности различных способов предотвращения потери технологических растворов при КВ

Аэрация под давлением обеспечивает достаточную подачу кислорода и оптимальное поддержание температуры внутри штабеля КВ [126]. В итоге это позволяет обеспечить бесперебойную работу установок КВ (независимо от климатических условий). При этом необходимо выделить простоту установки силиконовой пленки по сравнению с другими покрытиями, меньше потребности в человеческих усилиях и незначительные затраты на создание пленки. Получаемая пленка имеет отличную термическую стабильность и не подвергается негативным воздействиям высоких температур, влажности, ветра, дождя и т.д.

Таким образом, особенностью новой технологии является то, что не нужно предпринимать специальных мер по предотвращению формирования и выделения свободного цианида, а также уменьшению потерь технологического раствора (цианида) и снижение затрат на цианид. Его применение позволит снизить расход цианистого калия в среднем в 10-15 раз.

3.2. Интенсификация кучного выщелачивания золотосодержащих руд на основе регулирования фильтрационных характеристик штабеля КВ

3.2.1. Разработка специализированного робота, предназначенного для работы в несвязанной среде

Учеными из Института Макса Планка из фотоактивного материала был создан наноробот, способный под воздействием световых излучений имитировать движение живых червячков [34].

При этом такой наноробот выполнен в виде нескольких типов: цилиндров длиной в 1 мм и 200-300 мкм в диаметре (рис. 3.16), а также дисков толщиной в 50 мкм и 200-400 мкм в диаметре.

В качестве материала для создания такого наноробота был использован фотоактивный жидкокристаллический эластомер — материал, который

сочетает в себе свойства упругих каучуков и жидких кристаллов. При этом он способен под воздействием тепла или света быстро и полностью обратимо менять свою первоначальную форму.

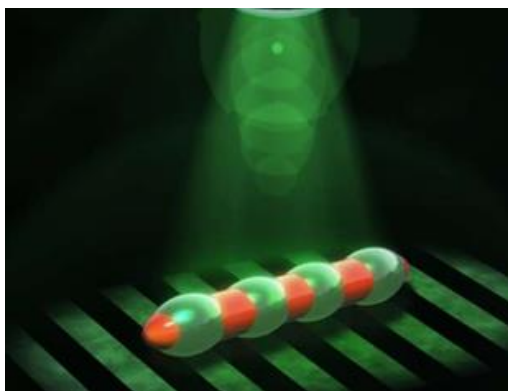


Рис. 3.16. Цилиндрический наноробот

При поглощении монохроматического света, например, зеленого лазерного пучка с длиной волны 532 нм, структурные единицы жидкого кристалла — мезогены — нагреваются и выстраиваются таким образом, что происходит расширение тела такого наноробота в радиальном направлении.

В результате тело такого наноробота способно расширяться и сужаться при поперечном попадании на него освещения, образующего световые волны вдоль его тела и, таким образом, проталкивая его вперед. Такие движения называются перистальтическими, и они характерны для движения живых дождевых червей.

Для создания световых полей с чередующимися светлыми и темными полосами используют оптическую систему с цифровыми микрзеркальными устройствами. В этой технологии пучок света проходит через объектив микроскопа и освещает тело наноробота. При этом на тело наноробота проецируется ряд световых полос различной длины, что вызывает деформацию освещаемых участков его тела.

Таким образом, с помощью оптической системы осуществляют регулировку скорости и направления перемещения полос по телу наноробота, а, следовательно, его передвижения.

Результаты проведенных экспериментов показали, что такой наноробот, плавающий в водном растворе глицерина, двигается в направлении, обратном направлению перемещения световых полос. При этом длина каждой световой полосы составляла 387 нанометров, а частота перемещения – 2 Гц. В результате тело наноробота смогло передвинуться на 110 мкм со скоростью 2,1 мкм в секунду.

На втором этапе экспериментов были изучены особенности движения наноробота, выполненного в виде дисков. В его теле структуры жидкого кристалла были ориентированы таким образом, что при освещении диски увеличивались в диаметре и одновременно уменьшали свою толщину. Такие диски погружались в емкость, наполненную силиконовым маслом, а световые узоры в виде полосы или в форме «вентилятора» ориентировались прямо на их теле. Также, как и для цилиндрического наноробота, перемещение полос приводило к движению наноробота-диска в противоположную сторону. В случае вращения узора в форме «вентилятора» происходило вращение нанодиска в обратную сторону (со скоростью в $0,5^\circ$ в 1 секунду).

Недостатком таких устройств является необходимость обеспечения постоянного контакта их тела со световыми лучами, от воздействия которых они передвигаются. Кроме того, они не предназначены для работы в массиве грунта.

Существует также устройство робота-гусеницы, разработанный Ваном и другими исследователями из Сеульского национального университета (Корея). Такой робот-гусеница имеет 2-е или 3-и пары ножек на передней части и 2-е или 3-и пары ножек на задней части своего тела.

Для подражания телу живой гусеницы был использован материал полидиметилсилоксан (ПДМС), кремнийорганический полимер. Форма для отливки была изготовлена на 3D-принтере, в которую затем и отлили тело будущего робота-гусеницы, а затем ему приделали ножки из плёнки полиимида. Роль мускульных волокон выполняли 8 нитей, обладающие

продольным эффектом памяти, проходящие через всё тело робота-гусеницы.

Такой робот-гусеница приводит себя в движение следующим образом: он сначала цепляется задними ножками, а затем двигает передние, распрямляя своё тело. Цепко держась передними и отпустив задние, он вновь сгибает своё тело для следующего шага.

Таким образом робот-гусеница передвигается за один шагок, протяженностью 54 мм, что составляет одну треть от длины его тела. Скорость робота-гусеницы составляет 3,6 мм/с. При этом он способен поворачиваться на $4,3^\circ$ за шаг.

Недостатком этого робота-гусеницы является проблема обеспечения его работы в подземных (почвенных) условиях, когда помехой передвижения будет являться необходимость выгибания его средней части, а также в агрессивных условиях (особенно в химически неблагоприятных средах и при существующем в грунте давлении).

Существует робот-червяк, который передвигается, изменяя свою перистальтику (сокращая и вытягивая тело). В этом устройстве использовали непрерывную сетку спирально обернутых трубок, скрепленных в местах пересечения (рис. 3.17).



Рис. 3.17. Робот, созданный по принципу перистальтического движения с постоянно деформируемой внешней поверхностью [82]

Сфера и принцип работы данного типа роботов, их внешняя оболочка, конфигурация и используемые материалы для их создания принципиально

отличаются от устройства, предназначенного для работы в штабелях КВ.

В связи с отсутствием идеального варианта робота, предназначенного для работы в несвязанной среде, нами было разработано устройство мобильного малогабаритного робота, созданного подобно роющим живым организмам (дождевым червям) и состоящего из нескольких сегментов, гибко сочлененных друг с другом (подвижных суставов), с утолщением к его середине, предназначенного для формирования малоразмерных каналов в массиве несвязанного грунта. При этом обеспечивается возможность работы робота в химически агрессивных условиях массива грунта.

Данный мобильный малогабаритный (миниатюрный) робот, оснащен устойчивым к воздействию химических реагентов, коррозии, истиранию и давлению налегающих кусков почвы корпусом (состоящим из гибко сочлененных друг с другом отдельных сегментов, которые могут быть выполнены в разных сечениях: круглым, плоским, треугольным, овальным, трапециевидным или сочетанием таких сечений по его длине) со средним диаметром 5-10 мм, с утолщением к его середине, и средней длиной 10 см и более, с блоком управления (служащего для обеспечения целенаправленного самостоятельного перемещения устройства или управления им с диспетчерской), передатчиком/приемником (для передачи данных о движении и мониторинга местонахождения робота, а также информации об окружающей среде, а кроме этого – для приема управляющих сигналов с диспетчерской), движителями (подобным щетинкам, размещенным по окружности на каждом сегменте его тела), аккумулятором электрической энергии (для обеспечения непрерывной работы устройства) и датчиками (для получения информации о давлении, температуре, физико-механических свойств почв и массивов грунтов).

Классификация роботов производится на основе особенностей их морфологии: длины тела (от несколько см до 3 м или более), а также формы. Срок службы таких роботов составляет от 3 лет.

Для правильного выбора материала корпусов роботов рекомендуется руководствоваться общедоступными справочниками о химической стойкости различных материалов, а также условия применимости основных материалов общепромышленного и промышленного назначения в различных средах. Например, при кучном выщелачивании серной кислотой, при выборе работающих в интервале температур 20-95°С и устойчивых к серной кислоте концентрацией 5-90 % и более материалов корпуса, можно руководствоваться табл. 3.9.

Таблица 3.9

Материалы устойчивые к агрессивным кислым средам [31]

Состояние агрессивной среды	Температурный режим агрессивной среды, °С	Материалы, устойчивые к агрессивным средам
Серная кислота концентрацией 5 %	20-45	Стали XI7H13M2T, 06XH28MD, титан и его сплавы, ферросилид, свинец, каменное и шлаковое литье, полимербетон, винипласт, полипропилен, углеграфитовые материалы, стеклопластики, эпоксидные, органосиликатные покрытия, гуммировочные резинки
Серная кислота концентрацией 5-20 %	20-50	Сталь 06XH28MD, свинец, ферросилид, титан и его сплавы, каменное литье, полимербетон, винипласт, полипропилен, стеклопластики, органосиликатные покрытия, гуммировочные резинки
Серная кислота концентрацией 70-90 %	40	Стали XI6H10T, XI7H13M2T, 06XH28MD, ферросилид, каменное литье, полипропилен, гуммировочные резинки
Серная кислота концентрацией более 90 %	80-95	Стали XI6H10T, XI7H13M2T, 06XH28MD, ферросилид, каменное литье, полипропилен, гуммировочные резинки, стеклопластики

Созданный таким образом химически и механически устойчивый мобильный малогабаритный робот выглядит следующим образом (рис. 3.18).

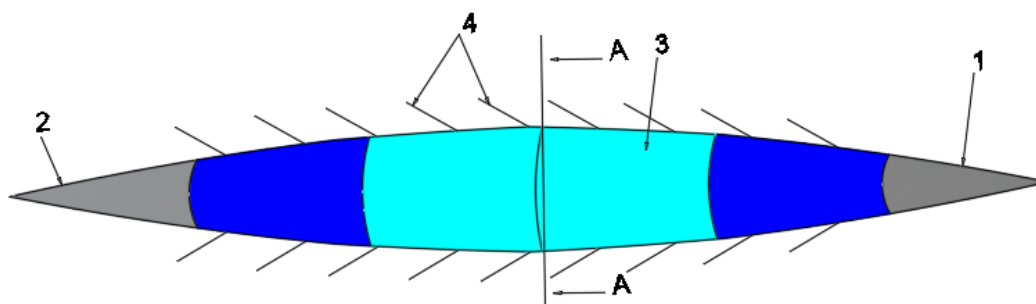


Рис. 3.18. Схема мобильного малогабаритного робота [69]:
1 – головной сегмент, 2 – задний сегмент, 3 – сегменты, 4 – движители

Робот имеет идентичные заостренные начальный («головной») 1 и задний сегмент 2, которыми он перемещает породы грунтов с образованием каналов за счет раздвижения мелких частиц. Головной и задний сегменты совершают раздвижение пород за счет проникновения их острого завершения.

Головной сегмент 1 и движители (щетинки, размещенные по окружности на каждом сегменте его тела, кроме головного и заднего сегментов) 4 способствуют движению робота вперед по методу смещения пород грунтов (почв). Робот перемещается со средней скоростью 1-2 см/мин. При этом возможно движение робота как вперед, так и назад.

Непосредственное движение робота осуществляется с помощью движителей-щетинки (размещенных по окружности на каждом его сегменте тела, кроме головного и заднего).

Для этого щетинки выполнены из материала, обладающего свойством памяти. При подаче на них в задней части робота электрического сигнала происходит их распрямление и упор в стенки канала, позволяющим оставаться робота на месте. При этом происходит вытягивание первой половины тела вперед, фиксация нового положения щетинками в первой половине тела, складывание щетинки задней части и ее подтягивание. Далее цикл повторяется.

Работа этих движителей (особенно передних) позволяет осуществлять проникновение заостренного переднего или заднего сегментов в массив окружающих частиц грунта и дальнейшего передвижения робота в него. Робот

способен к сложным передвижениям, поскольку он маневрирует по сложно построенной траектории, образуя наклонные и вертикальные каналы и идеально подходит для работы в насыпных грунтах, мягких глинах и илах.

Остальные сегменты робота, гибко сочлененных друг с другом, могут иметь разные виды сечения: круглое, плоское, треугольное, овальное, трапециевидное или сочетание таких сечений по длине его тела. Однако, предпочтительнее круглое сечение. Другие элементы, такие как блок управления, передатчик/приемник, аккумулятор электрической энергии на фигуре 1 не показаны.

Одновременное наличие в грунте давления и деформации требует объединения различных слоев электрической схемы робота в один датчик. Например, трехслойный датчик, был разработан для определения деформации в двух ортогональных направлениях, а также давления. Интегрированные датчики давления и деформации могут быть изготовлены в виде растяжимых микроканалов (рис. 3.19), заполненных проводящими жидкометаллическими эвтектическими сплавами (например, EGaIn_1 и Galinstan_2) [129].

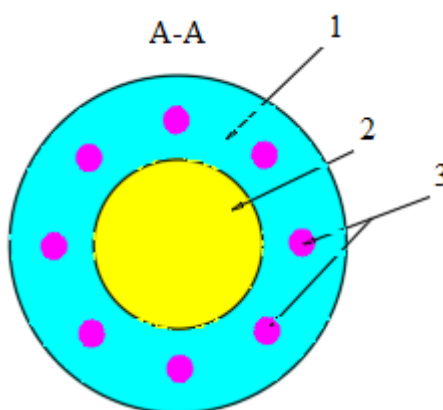


Рис. 3.19. Сечение тела робота с каналами-датчиками [69]:

1 – сечение тела робота; 2 – микроканал заполненный проводящими сплавами;
3 – датчики

Движители могут быть выполнены в виде проводов из титана или никеля, на которые подается электрический ток, вызывающий их обратимое сокращения и растяжение [17].

Элементы управления, получения и передачи данных направляют сигналы на пульт управления диспетчерской (на рис. 3.18 не показано) и позволяют оператору «рулить», отправляя робота в нужное место. Таким образом, в устройстве робота имеются интегрированные технологии геолокации, позволяющие диспетчеру получать всю необходимую информацию о его передвижениях и его работоспособности в массиве грунта.

Таким образом, роботизированная система управления роботами способствует:

- созданию внутри массивов прямых и сложных изогнутых каналов малых диаметров;
- обеспечению автономной локализации, картографии и навигации перемещения в почвах во время движения робота;
- анализу качества работы робота;
- обеспечению повышенной маневренности робота.

3.2.2. Технология повышения фильтрации технологических растворов в штабелях кучного выщелачивания с помощью роботов

В настоящее время существует определенная необходимость в разработке технологии, способствующей повышению эффективности выщелачивания за счет предотвращения образования или разрушения малопроницаемых слоёв внутри штабеля КВ, а также обеспечению воздействия на нетронутые области штабеля при проникновении технологических растворов, в целях восстановления или обеспечения оптимальной фильтрационной способности массива выщелачиваемых руд и освобождения для растворов золота, заключенного в рудах зоны кольматации.

Для этого проводят рудоподготовку, формируют массив штабеля КВ из дробленной руды, осуществляют выщелачивание металлов технологическими растворами, а также разрушают малопроницаемые слои путем введения в них

специальных устройств, преимущественно в виде роботов-червяков (так называемых «электронных червей, электрических червей, умных червей или цифровых червей») или иных видов миниатюрных (отвечающих требованиям) устройств, предназначенных для передвижения в штабеле КВ, преимущественно в местах образования малопроницаемых слоев, с образованием каналов до восстановления их оптимальной проницаемости. В итоге роботы обеспечивают эффективную проницаемость массива штабеля КВ, обуславливающую орошение всего объема заскладированных в штабеле руд [52, 56, 57] технологическими растворами и извлечение из них полезных компонентов.

Определить области с осложненным просачиванием технологических растворов можно любым существующим, менее затратным и отвечающим высокому качеству методом. К примеру, выделение таких областей можно осуществлять с помощью анализа сейсмических данных еще в самом начале процесса выщелачивания (при оптимальном уровне выхода продуктивных растворов) и повторным их подбором (при снижении качества продуктивных растворов ниже установленного технологического предела).

Роботы способны постоянно перемещаться в малопроницаемых слоях штабелей КВ. Так, с целью увеличения проходимости рабочих растворов рекомендуется осуществлять вертикальное, горизонтальное, либо наклонное передвижение роботов или сочетание данных направлений движения. При этом направление формирующихся каналов в малопроницаемом слое зависит от содержания металлов, в материале этого слоя, и колеблется от вертикального – 90° (при отсутствии металлов), наклонного – 45° (при среднем содержании металлов) и горизонтального направления (при максимальном содержании металлов).

С диспетчерского пункта можно ограничить передвижение роботов в определенных интервалах (например, только в выделенных областях с малопроницаемыми слоями).

Специфика их передвижения и разнообразие форм роботов делают их основными элементами в поддержании необходимых физико-химических и механических свойств (проницаемости, пористости и т.д.) массивов штабелей КВ (в течение всего цикла выщелачивания) [30], в том числе - их способности создать и/или расширить имеющиеся каналы, через которые будет обеспечиваться распределение потока технологических растворов внутри массива штабеля КВ.

Они создают протяженные гидродинамические каналы в штабеле КВ, диаметром не более 2-10 мм, по которым будут в дальнейшем течь и распределяться по прилегающим рудам технологические растворы. Эти каналы образуются при постепенном прохождении роботов в штабеле под давлением выше давления налегающих малопроницаемых образований, за счет расталкивающего воздействия тела робота на мелкие частицы в окружающее свободное пространство.

Каналы роботов увеличивают макропористость штабеля КВ и, следовательно, способствуют эффективной инфильтрации технологических растворов и аэрации. К тому же, при формировании каналов наблюдается смешивание пород различных горизонтов массива штабеля КВ. Кроме того, роботы способствуют рассеиванию бактерий и других микроорганизмов внутри штабеля КВ.

Размеры (малые, средние, большие) используемого робота и направление его движения в штабеле КВ устанавливаются в зависимости от горно-технологических условий решаемой инженерной задачи. При этом направление формирующихся каналов в малопроницаемом слое зависит от содержания металлов, в материале этого слоя, и колеблется от вертикального до горизонтального. Их численное количество определяется на основе характеристик (в зависимости от мощности малопроницаемого слоя и его сложившейся проницаемости) штабеля КВ и достигаемого результата.

Непосредственно конструкция различных видов роботов, а также их

движителей является отдельной инженерной задачей.

Выбор автопилотных роботов должен быть осуществлен с учетом следующих функциональных факторов:

- герметичности, износостойкости и крепости их корпуса в агрессивных средах;
- устойчивости к воздействию на них различных факторов (в первую очередь – выщелачивающих растворов);
- максимальной простоты (легкости) передвижения в штабеле КВ;
- условий для возможного расталкивания мелких частиц в свободное окружающее пространство;
- эффективной работоспособности и исправности интегрированных в устройстве блока управления, передатчика, аккумулятора электроэнергии и датчиков (для получения устройством необходимой информации);
- достаточного сигнала для поддержания связи с диспетчерским пунктом;
- наличия возможности повторного и долгосрочного их использования;
- перемещения их со средней скоростью 1-2 см/мин как автономно, так и с помощью управления диспетчером;
- экономической эффективности.

Дистанционное отслеживание местоположения роботов осуществляется на основе существующих интегрированных технологий геолокации, позволяющих диспетчеру получать всю необходимую информацию о передвижениях роботов и их работоспособности в массиве штабеля КВ.

Технология, осуществляемая согласно рис. 3.20, описывается следующим образом [53].

В начале проводится рудоподготовка, формируется антифльтрационное основание 1, на котором отсыпают массив штабеля кучного выщелачивания 2. После этого монтируют любую целесообразную систему оросительных трубопроводов, к примеру, на поверхности штабеля 3,

а на его основании 1 формируют систему (преимущественно канавки), предназначенную для сбора выходящих металлосодержащих растворов 5. Далее формируют зумпф 6, куда поступают просачиваемые растворы. Выщелачивающие растворы изливаются из системы орошения 4 и просачиваются через штабель. В этот период возможно неконтролируемое образование одного или нескольких малопроницаемых слоев 8.

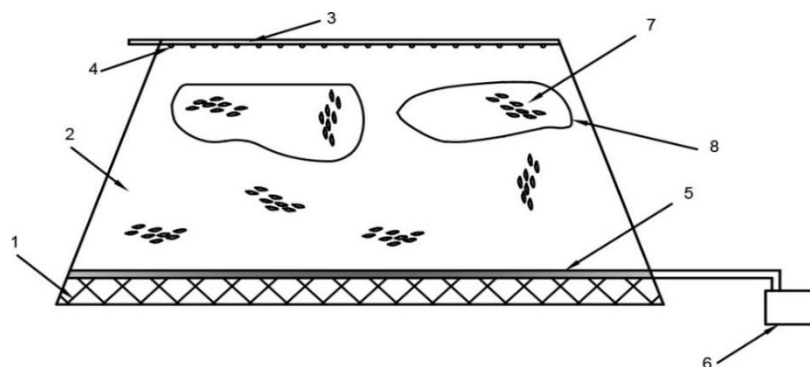


Рис. 3.20. Схема штабеля КВ (цифры см. в тексте)

Затем вводят группу роботов 7 (количество которых определяется в зависимости от мощности малопроницаемого слоя 8) с поверхностями штабеля (в том числе и боковых) в самом начале обработки заскладированной руды или при возникновении проблем с просачиваемостью растворов, непосредственно в направлении заранее выделенных областей кольтматации (малопроницаемых слоев 8), так, чтобы охватить всю площадь и мощность малопроницаемых образований (слоев).

Эти роботы имеют заостренный начальный («головной») сегмент, которым они раздвигают мелкие частицы при перемещении.

Традиционное оборудование, используемое при кучном выщелачивании металлов из руд, на рис. 3.20 не показано. Также не показаны традиционная схема извлечения металлов из продуктивных растворов.

На рис. 3.21 представлены возможные направления каналов: от вертикального – 90° (при отсутствии металлов), наклонного – 45° (при среднем содержании металлов) и горизонтального направления (при максимальном

содержании металлов).

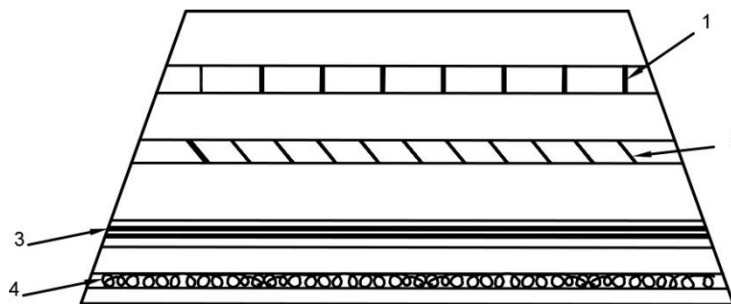


Рис. 3.21. Схема направления формирующихся каналов:

1 – вертикальный канал, 2 – наклонный канал, 3 – горизонтальный канал; 4 – криволинейный канал

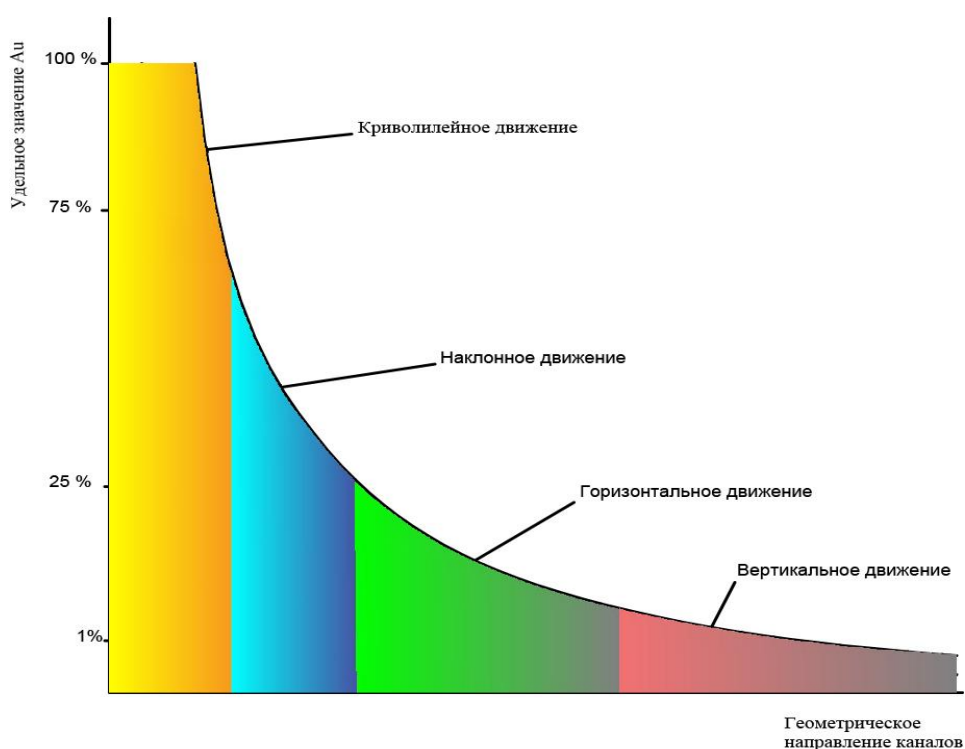


Рис. 3.22. Выбор геометрического направления каналов в зависимости от удельного значения золота в малопроницаемых слоях

Выбор направления движения роботов в малопроницаемых слоях осуществляется на основе оценки удельного содержания золота в малопроницаемом слое, где перемещаются роботы (рис. 3.22).

Данное мероприятие должно способствовать созданию и/или расширению уже имеющихся каналов, ускорению высвобождения металла из минеральной матрицы. И оно реализуется так, чтобы соответствовать

эффективному значению коэффициента фильтрации, обеспечивающего оптимальное (равномерное) просачивание технологических растворов внутри штабеля КВ и выщелачивания металла.

В результате образуется система разветвленных каналов, способствующих эффективному и глубокому проникновению технологических растворов в проблемные области.

3.2.3. Результаты математического моделирования фильтрации

На основе математической модели был проведен расчет изменения гидравлической проводимости (проницаемости) малопроницаемых слоев в зависимости от числа и размера каналов без учета извилистости (табл. 3.10) и с учетом извилистости (табл. 3.11) на примере вертикальных каналов.

Таблица 3.10

Зависимость проницаемости от диаметра и числа поровых каналов без учета извилистости

Диаметр каналов, см	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Количество каналов	100	100	100	100	100	100
Проницаемость при пористости 0,15, $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1171875	0,1687502	0,2296880	0,3000012	0,3796900	0,4687546
Проницаемость при пористости 0,2, $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1562500	0,2250002	0,3062505	0,4000011	0,5062523	0,6250043
Проницаемость при пористости 0,25, $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1953125	0,2812501	0,3828129	0,5000011	0,6328147	0,7812540
Проницаемость при пористости 0,30, $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,2343750	0,3375001	0,4593754	0,6000010	0,7593770	0,9375038
Проницаемость при пористости 0,35, $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,2734375	0,3937501	0,5359379	0,7000009	0,8859394	1,0937535

Таблица 3.11

**Зависимость проницаемости от диаметра и числа поровых каналов
с учетом извилистости**

Диаметр каналов, см	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Количество каналов	100	100	100	100	100	100
Проницаемость при пористости 0,15; $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1171875	0,1687502	0,2296880	0,3000012	0,3796900	0,4687546
Проницаемость при пористости 0,2; $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1562500	0,2250002	0,3062505	0,4000011	0,5062523	0,6250043
Проницаемость при пористости 0,25; $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1953125	0,2812501	0,3828129	0,5000011	0,6328147	0,7812540
Проницаемость при пористости 0,30; $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,2343750	0,3375001	0,4593754	0,6000010	0,7593770	0,9375038
Проницаемость при пористости 0,35; $\times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,2734375	0,3937501	0,5359379	0,7000009	0,8859394	1,0937535

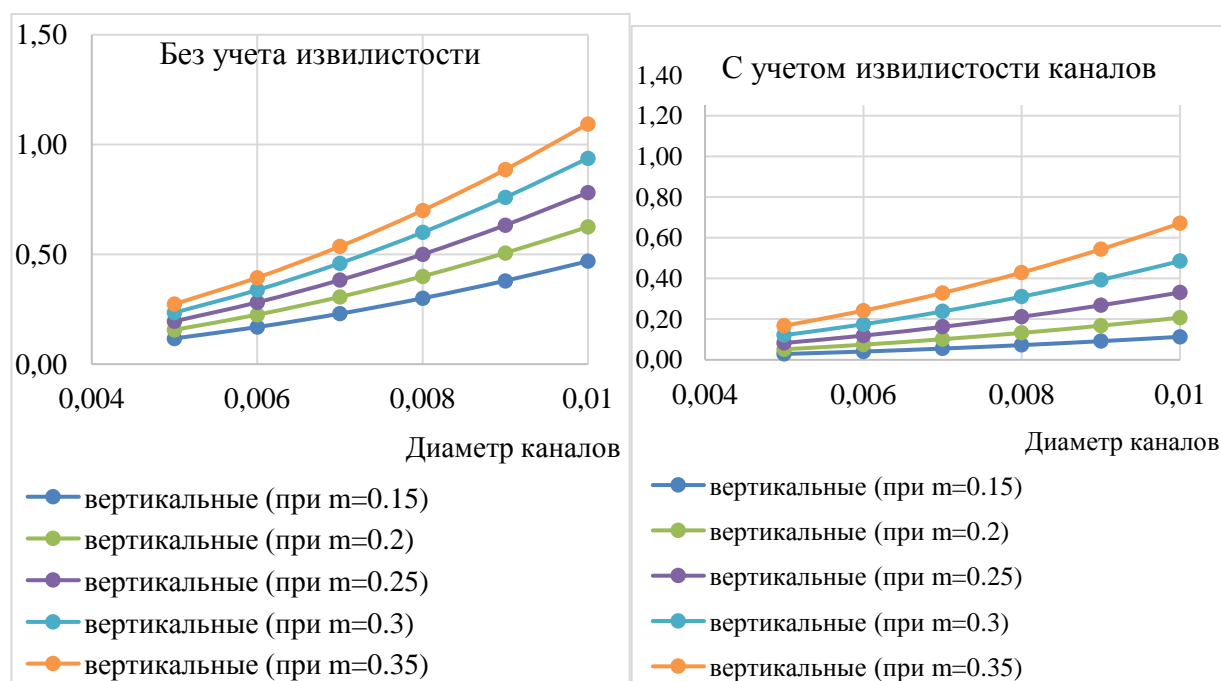


Рис. 3.23. Зависимость значения проницаемости ($\times 10^{-6} \text{ м}^2$) от диаметра и числа поровых каналов

При скорости прохождения 1-2 см/мин, время на создание необходимого одного канала длиной 1 м, и соответственно время, необходимое для разрушения малопроницаемого слоя, составит от 50 до 100 мин.

Обоснование математического моделирования.

Малопроницаемый слой имеет длину 1 м, ширину 1 м и мощностью 1 м и пористость $m = 15\%$ и 10 каналов диаметром 5-10 мм.

Для обоснования математического моделирования необходимо провести сравнение между полученными результатами с экспериментально доказанной формулой и с новой преобразованной формулой вычисления проницаемости (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Сравнительный анализ расчетов значений проницаемости
(вертикальные каналы)

Эмпирическая формула	$K_{\text{пр1}} = m \frac{r_k^2}{8} = y$					
Диаметр каналов, см	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
y	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
Проницаемость при пористости $0,15, \times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1172201	0,1690202	0,2301881	0,3008541	0,3810556	0,4708352
Преобразованная формула	$K_{\text{пр2}} = \left(\frac{4V_1 + N(1-m)\pi h_k d_k^2}{4V} \right) \frac{d_k^2}{32} = x$					
Диаметр каналов, см	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
x	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Проницаемость при пористости $0,15, \times 10^{-6} \text{ м}^2$	0,1173178	0,1688176	0,2298127	0,3002135	0,3800295	0,4692713
Коэффициент корреляции	0,999999741					

Расчет коэффициента корреляции между полученными значениями проницаемости осуществляется по формуле:

$$r_{K_{\text{пр1}}K_{\text{пр2}}} = \frac{\sum(x_i - x_{\text{cp}})(y_i - y_{\text{cp}})}{\sqrt{\sum(x_i - x_{\text{cp}})^2 \cdot \sum(y_i - y_{\text{cp}})^2}} \quad (23)$$

После проведения численного расчета значение коэффициента корреляции составляет 0,999999741, что свидетельствует о том, что имеется сильная позитивная связь между проницаемостью, полученной по экспериментально доказанной и преобразованной формулам.

Таким образом, полученная математическая модель может быть использована для проведения расчетов с многокомпонентными переменными.

3.2.4. Результаты компьютерного моделирования исследований до и после восстановления проницаемости штабеля КВ

Наличие малопроницаемых слоев отрицательно влияет на значения проницаемости штабелей КВ. Характер и направление движения растворов представлен на рис. 3.24.

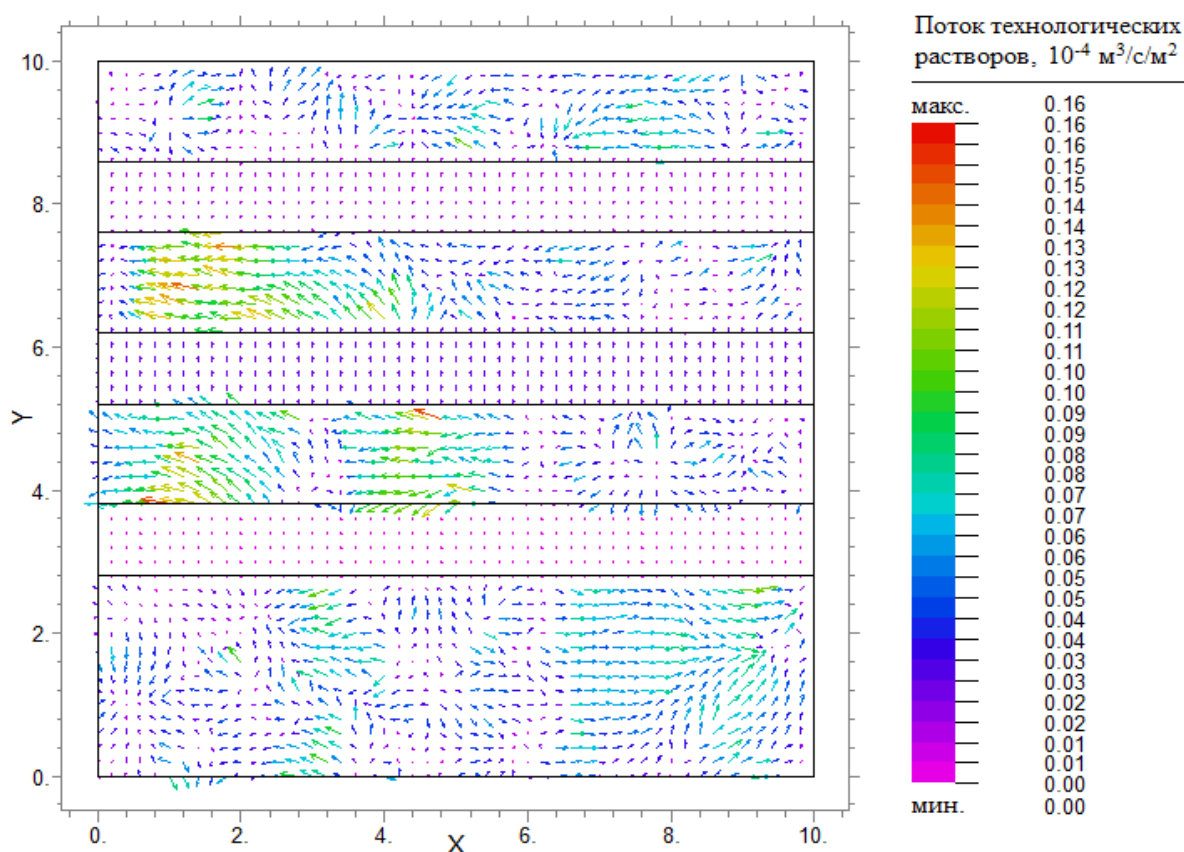


Рис. 3.24. Модель движения технологических растворов в малопроницаемых слоях

В результате исследований при заданных в разделе 2.4 условиях было определено довольно низкое значение гидравлической проводимости растворов ($2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$) в малопроницаемых слоях. Видно, что большими значениями потоков технологических растворов обладает зоны с высокой гидравлической проницаемостью.

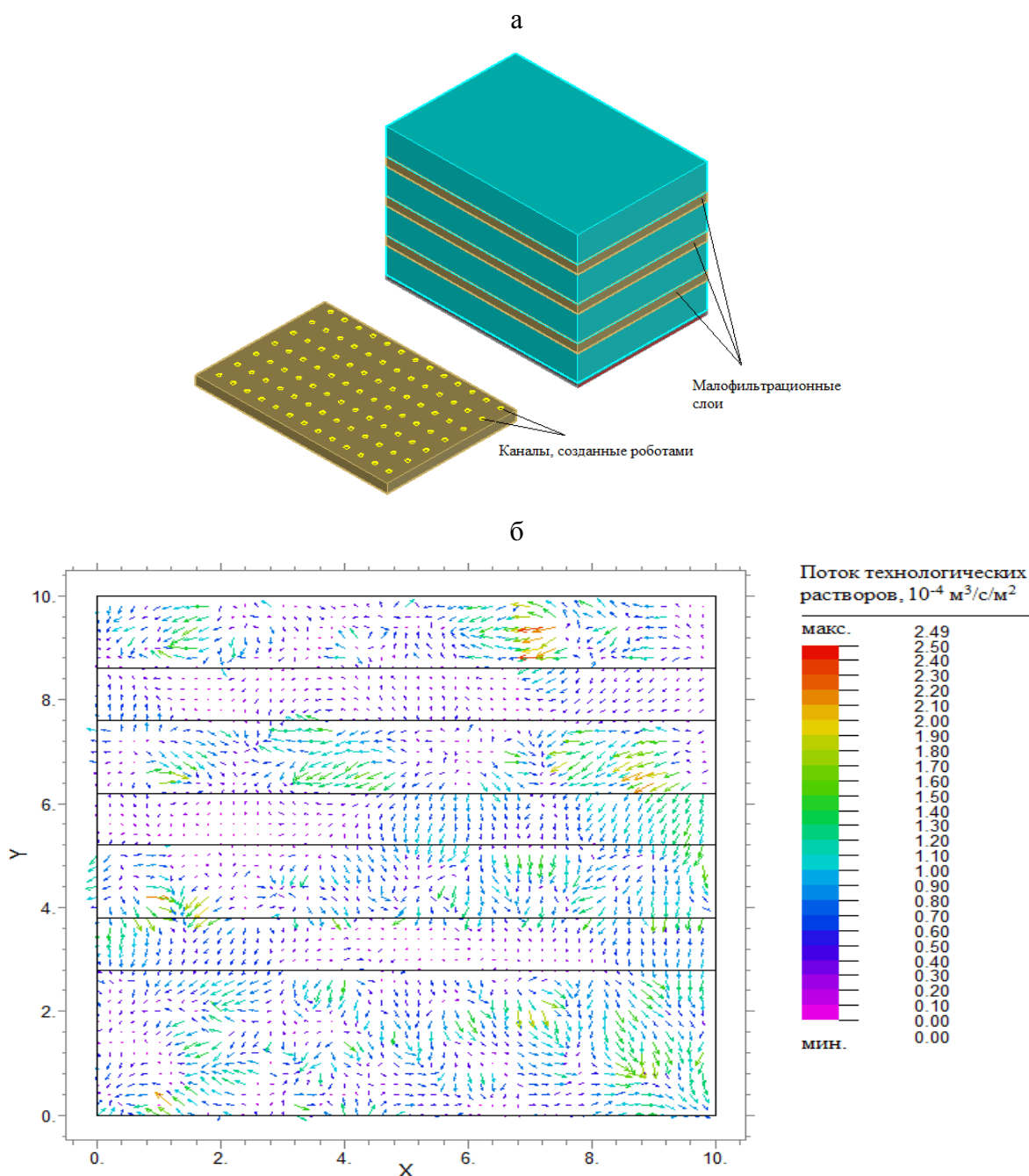


Рис. 3.25. Увеличение проницаемости малопроницаемых слоев:
 а – вертикальные каналы, созданные роботами; б – модель движения технологических растворов после прохождения роботов

Разработанная в системе SVoffice компьютерная модель показала, что при обеспечении улучшения проницаемости малопроницаемых слоев до уровня 1 мкм^2 , за счет использования разработанных малогабаритных роботов, одновременно восстанавливается должное значение гидравлической проводимости технологических растворов.

Таким образом, в малопроницаемых слоях гидравлическая проводимость технологических растворов повышается до $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$, а во всем штабеле до $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$ по сравнению с их первоначальными значениями (рис. 3.25).

3.2.5. Результаты экспериментального исследования процессов фильтрации растворов

Полученные экспериментальные измерения записаны в табл. 3.13 для вертикальных каналов и табл. 3.14 для наклонных каналов. Значение коэффициента фильтрации при создании пористых каналов диаметром 5 мм составляет около $0,131 \text{ см}/\text{с}$ и для вертикальных и $0,109 \text{ см}/\text{с}$ наклонных каналов, и увеличивается по мере увеличения их диаметров (рис. 3.26).

Таблица 3.13

Результаты исследований для образцов с вертикальными каналами

Диаметр канала d , см	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Количество профильтрованной жидкости Q , см^3	360	360	360	360	360	360
Диаметр цилиндрической части, см	9	9	9	9	9	9
Высота, см	7	7	7	7	7	7
Площадь поперечного сечения S , см^2	63	63	63	63	63	63
Время фильтрации t , с	48,32	45,1	42,25	37,25	33,80	30,45
Скорость фильтрации жидкости, $\text{см}/\text{с}$	0,118	0,127	0,135	0,153	0,169	0,188
Напор жидкости h , см	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Коэффициент фильтрации K_f , $\text{см}/\text{с}$	0,131	0,141	0,150	0,170	0,188	0,209

Результаты исследований для образцов с наклонными каналами

Диаметр канала d, см	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Количество профильтрованной жидкости Q, см ³	360	360	360	360	360	360
Диаметр цилиндрической части, см	9	9	9	9	9	9
Высота, см	7	7	7	7	7	7
Площадь поперечного сечения S, см ²	63	63	63	63	63	63
Время фильтрации t, с	58,02	54,94	48,02	44,64	38,41	36,27
Скорость фильтрации жидкости, см/с	0,098	0,104	0,119	0,128	0,149	0,158
Напор жидкости h, см	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Коэффициент фильтрации K _ф , см/с	0,109	0,116	0,132	0,142	0,165	0,175

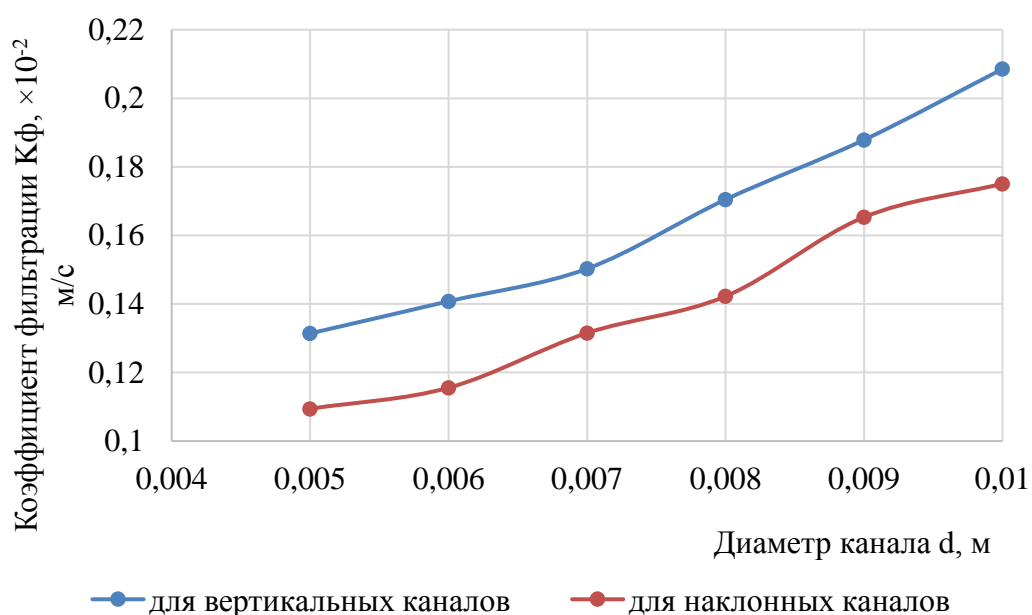


Рис. 3.26. Зависимость значений проницаемости от величины диаметра поровых каналов

Полученные данные согласуются с общепринятыми значениями фильтрации для водопроницаемых массивов (табл. 3.15).

При анализе полученных результатов можно прийти к выводу, что для перехода слоя из разновидности водонепроницаемого ($<0,005$ м/сут) в водопроницаемый достаточно создать 1 канал в фильтрационной трубе

диаметром 9,1 см. Исходя из чего, проницаемость штабеля КВ при наличии каналов, образованных роботами, увеличивается более чем в 100 раз.

Таблица 3.15

Классификация массивов по степени водопроницаемости

Разновидность массивов	ГОСТ 25100	Разновидность массивов	По Теодоровичу Г.И.
	Коэффициент фильтрации Кф, м/сут		Коэффициент проницаемости, мкм ²
Не водопроницаемые	<0,005	Плохо проницаемые	<0,001
Слабоводопроницаемые	0,005...0,30	Слабопроницаемые	0,001 – 0,01
Водопроницаемые	0,30...3	Средне проницаемые	0,01 – 0,1
Сильно водопроницаемые	3...30	Хорошо проницаемые	0,1 – 1
Очень сильно водопроницаемые	>30	Очень хорошо проницаемые	>1

Эти результаты показывают, что создание каналов увеличивает лишь водопроницаемость массива, но не имеет существенное влияние на его пористость.

Для повышения пористости массива требуется полное освобождение ранее перекрытых фильтрационных путей путем обработки малопроницаемых слоев большим числом роботов.

Экспериментальные данные подтверждают полученные результаты в компьютерной и математической моделях.

Таким образом, при оптимальных условиях использования роботов в натуральных исследованиях зона смачивания увеличится на 12% и более, а эффективность фильтрации в них увеличивается на 15% и более (от начальных значений этих параметров).

Применение роботов позволит, за счет увеличения объема вовлекаемых в выщелачивание руд, путем освобождения для выщелачивающих растворов золота, в том числе и нанозолота заключенных в рудах зоны кольматации, что

существенно увеличить извлечение металла, и сократить общий цикл выщелачивания штабелей КВ. Для более полного извлечения золота необходимо также управлять свойствами технологических растворов, от которых зависит его выщелачивание.

Однако, при улучшении фильтрационных свойств массива руд необходимо избегать формирования зон различной проницаемости (гидравлическая проводимость должен находиться в пределах допустимого значения для эффективного выщелачивания руды).

3.3. Исследование извлечения нанозолота в процессе кучного выщелачивания

3.3.1. Изучение механизма образования и потерь «островков» и пленок плавучего золота

В некоторых золоторудных месторождениях мира присутствует наноминеральный тип золота, который распространен в пирит-арсенопиритовой вкрапленной минерализации (например, в золоторудном месторождении Эссакане (Буркина Фасо) и др.). Более широко на таких объектах распространено ультрадисперсное золото. Причём большая часть этого золота присутствует как "невидимое" или нанозолото (частицы которого менее 0,1 мкм).

Кроме обычного, крупного, в рудах зачастую содержится ультрадисперсное золото фактически, «невидимое» золото предпочтительно концентрируется в арсенопирите [74], чаще всего в виде кластерного золота, химически объединенного в кристаллической решетке сульфида и в небольшой пропорции в виде микрокристаллических частиц металлического золота, включенных в сульфидные кристаллы [138].

Нижняя граница класса (0,6 нм) нанозолота характеризуется состоянием, когда все атомы уже являются поверхностными. С ростом

размеров наночастиц их доля последовательно увеличивается, при 10 нм «объемные» атомы составляют, как правило, около от 50% их общего количества.

Анализ работ (см. раздел 1.5), рассматривающих наличие нанозолота в кристаллических минеральных решетках и формы существования нанозолота, позволил составить классификацию, приведенную в табл. 3.16.

Необходимо отметить, что форма структуры нанозолота играет важную роль при разработке методов извлечения нанозолота. Выщелачивание золота осуществляется быстрее для нанозолота с простой структурой, чем для нанозолота со сложной и комплексной структурой. Наличие нанозолота в кристаллической решетке минералов показывает возможность его выщелачивания. Неравномерность процесса выщелачивания из-за неэффективного способа орошения штабеля КВ и формирование малопроницаемых слоев приводят к потерям нанозолота ещё в самом начале процесса его извлечения в массиве штабеля КВ.

Качество технологических растворов также оказывает влияние на формирование потерь наночастиц золота. Ведь несоответствие требуемым значениям параметра рН среды раствора приведет к снижению способности растворения золота в объеме раствора и тем самым к увеличению числа «плавающих» наночастиц золота на поверхности технологических растворов.

Из-за своей пластичности частицы золота со временем под воздействием внешних факторов могут преобразовываться в различные мельчайшие пластинки и чешуйки.

Максимальные размеры плоских частиц золота достигают 0,1 мм, а минимальные приближаются к коллоидным, т.е. они относятся к нано формам золота, или же нано дисперсные формы золота в рудах сформировались при образовании ряда месторождений. При этом даже первостепенное золото коренного месторождения может иметь до 70% золотин, размер которых не превышает 0,1 мм.

Разнообразие наноструктур золота, влияющие на эффективность
выщелачивания

Структура нанозолота	Изображение	Структура нанозолота	Изображение
Фуллерены		Нанопроволоки	
Нанопластинки		Нанотрубки	
Нанобипирамиды		Наноспираль	
Наностержени		Нанокольца	
Нанорис		Нанозвезды	
Сферические наночастицы		Наночаши	
Наноразветвления		Наноструктуры с покрытием в виде оболочки другого вещества	
Наногексаподы		Треугольники	
Шестиугольники		Десятигранники	

Несмотря на высокую плотность золота [60], его чешуйки и нанопленки даже при размере более 1 мм, довольно хорошо плавают по поверхности воды или технологических растворов (рис. 3.27).

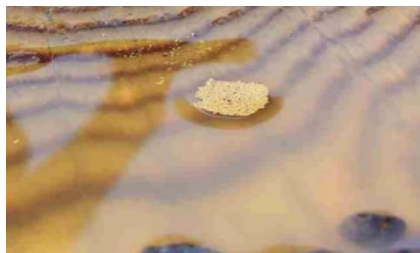


Рис. 3.27. Фото «островок» плавучего золота (Кавчик Р.Б., 2015)

Особенностью плавучего золота является не только его чешуйчатая форма, а также значительная пористость и гидрофобные свойства поверхности, которые и определяют его плавучесть. Плавучее золото может удерживаться на поверхности воды или технологических растворов (при снижении качества растворов) силой поверхностного натяжения, в результате чего значительная часть золота таких классов теряется при использовании современных технологий с применением технологических растворов. Поэтому важно настроить взаимодействие нанозолота и технологических растворов для уменьшения производственных потерь металла.

Часто перенос плавучих мелких частиц золота не предусмотрен технологией КВ. В связи с чем мелкие чешуйки плавучего золота переносятся вместе с растворами кучного выщелачивания и уходят в «хвосты» переработки, а именно, задерживаются в водотоках, находящихся внутри штабеля КВ, преимущественно, в глинистом веществе (илисто-глинистой фракции) или безвозвратно теряются в сборочных бассейнах. Основная масса потерь такого золота составляет до 55 %.

В связи с этим, выявление механизма образования плавучих «островков» и пленок из наночастиц золота является весьма важной задачей для выбора параметров технологии кучного выщелачивания и оценки величины потерь золота на различных ее стадиях.

Для выявления механизма образования, твердожидкую среду штабелей КВ целесообразно рассматривать, как некоторую поверхность раздела “жидкость – наночастицы”, представляющий собой оптимальную систему для самосборки объектов, начиная от молекул и наночастиц до плавучих нанопленок и «островков». Причем, плавучие «островки» и нанопленки золота на границах раздела фаз «воздух – жидкость», в тонком поверхностном слое технологических растворов, могут оставаться стабильными в течение различных периодов времени: от 1 дня до нескольких дней (в зависимости от условий окружающей среды и в первую очередь – от величины поверхностного натяжения жидкости).

При формировании на поверхности воды или технологических растворов различных монослойных нанопленок и наночастиц золота их морфология остается практически (около 60 %) одинаковой (рис. 3.28). При этом пленки золота, формируемые при более высоком (> 15 мН/м²) значении поверхностного натяжения, как правило, демонстрируют образование в них второго верхнего слоя - «островков», покрытых гидрофильной оболочкой.

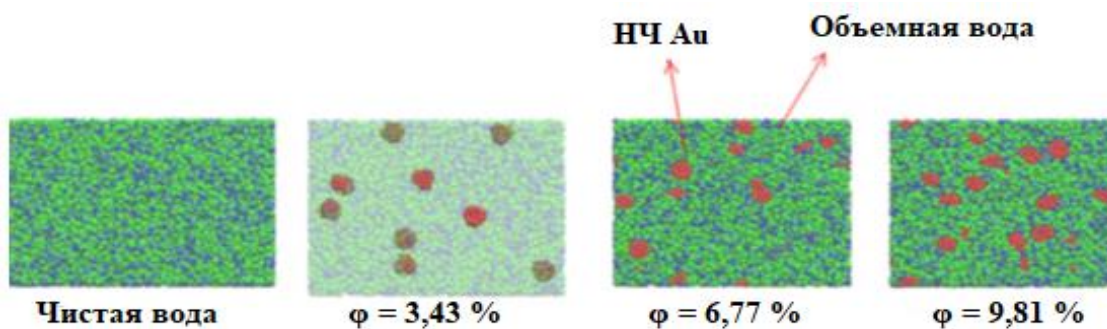


Рис. 3.28. Иллюстрации молекулярных структур воды и 3-х фракций загрузки наночастиц золота (молекулы воды прозрачны, чтобы проиллюстрировать положения наночастиц $\phi = 3,43$ %) [100]

В ходе проведенных исследований было установлено, что когда энергия взаимодействия наночастицы золота с водой равна $\epsilon = 0,05427$ эВ, то такие наночастицы показывают явно выраженные гидрофильные свойства.

Смачиваемость наночастиц золота зависит от изменения параметра

взаимодействия «золото – вода или технологические растворы ϵ » (рис. 3.29).

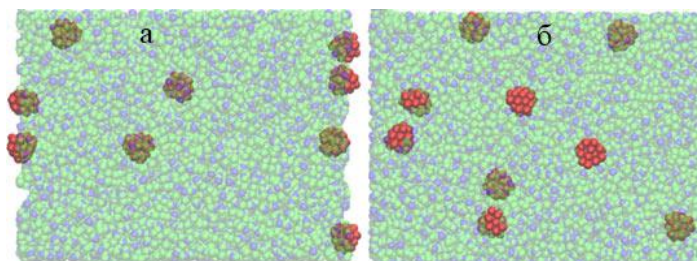


Рис. 3.29. Снимки [100]:

а - с гидрофобными наночастицами золота ($\epsilon = 0,007$ эВ); б - гидрофильные наночастицы золота ($\epsilon = 0,05427$ эВ)

Данное явление может быть объяснено воздействием сил поверхностного натяжения воды, механизмы работы которого определяются Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием (см. рис. 3.30). Силы Ван-дер-Ваальса обусловлены индуцированными электрическими взаимодействиями между 2-мя или более атомами или молекулами, которые очень близки друг к другу.

Знание особенностей и условий возникновения и проявления плавучих островков золота позволяет разработать совершенно новую технологию извлечения их при кучном выщелачивании [49].

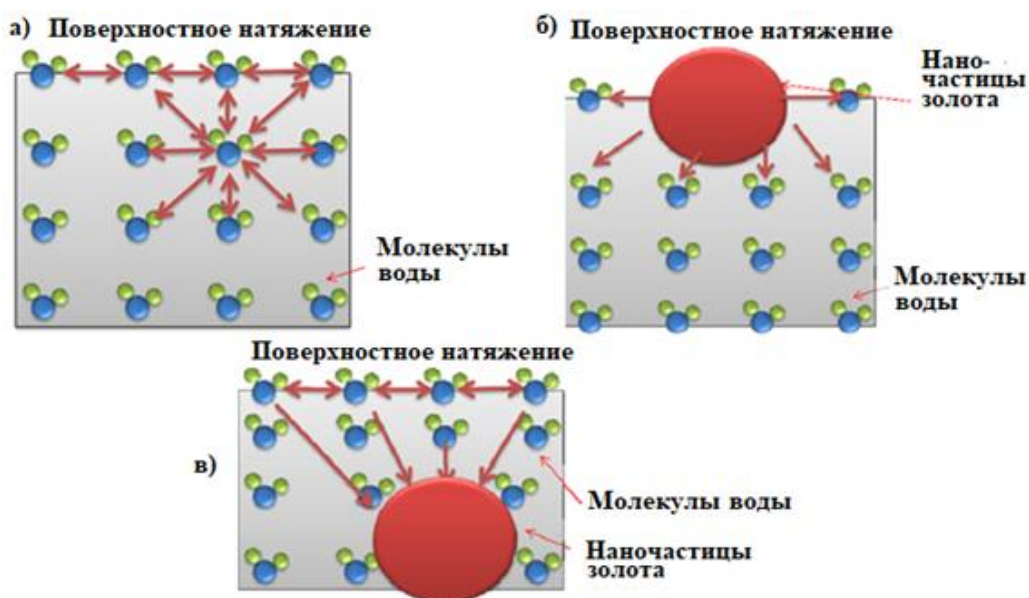


Рис. 3.30. Схема Ван-дер-Ваальсовой силы между молекулами воды и молекулами наночастиц золота [100]:

а) взаимодействие между молекулами воды; б) взаимодействия наночастиц золота с молекулами воды ($\epsilon_{\text{вода-золото}} < \epsilon_{\text{вода-вода}}$); в) взаимодействие наночастиц золота с молекулами ($\epsilon_{\text{вода-золото}} > \epsilon_{\text{вода-вода}}$)

Это особо важно в настоящее время, в связи с тем, что по оценкам экспертов доля руд, содержащих мелкое золото, составляет более 40 % мировых запасов золотосодержащих руд. И при их вовлечении в переработку традиционными технологиями будут возникать существенные потери за счет миграции плавучих нанозолотин, т.к. основная масса золота фракций порядка нанометра теряется в сборочных бассейнах при миграции.

Общие потери тонкого плавучего золота с растворами при кучном выщелачивании приходится на нанозолото размером от 5 до 120 нм.

С помощью математического моделирования можно объяснить условия образования островков и пленок нанозолота.

3.3.2. Результаты математического моделирования потенциала взаимодействия между наночастицами

На основе математической модели был проведен расчет взаимодействия между двумя частицами золота размером 15 нм в технологических растворах (табл. 3.17) в присутствия неионогенного ПАВ (например, Твин 80, который имеет способность поглощать наночастицы золота).

Таблица 3.17

Расчет потенциала взаимодействия между двумя наночастицами золота

	Значение								
a, нм	0,035	0,05	0,1	0,5	1	2	3	5	7,2369
d, нм	15,035	15,05	15,1	15,5	16	17	18	20	22,237
U, кВТ	9659,6	8410,0	6313,5	3088,3	2557,0	2749,8	3128,7	2949	-0,197

По полученным результатам построен график, показывающий потенциал взаимодействия между наночастицами при изменяющемся расстоянии между ними (рис. 3.31).

Результаты моделирования схоже на те, полученные при расчете потенциала с использованием симуляции Монте Карло (рис. 3.32).

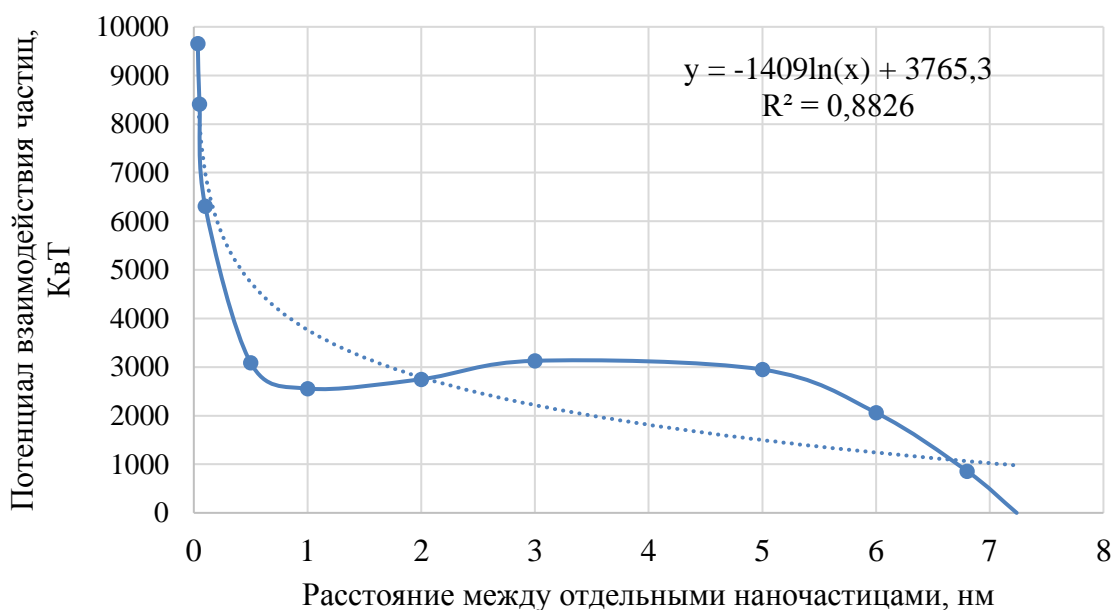


Рис. 3.31. Потенциал взаимодействия между наночастицами

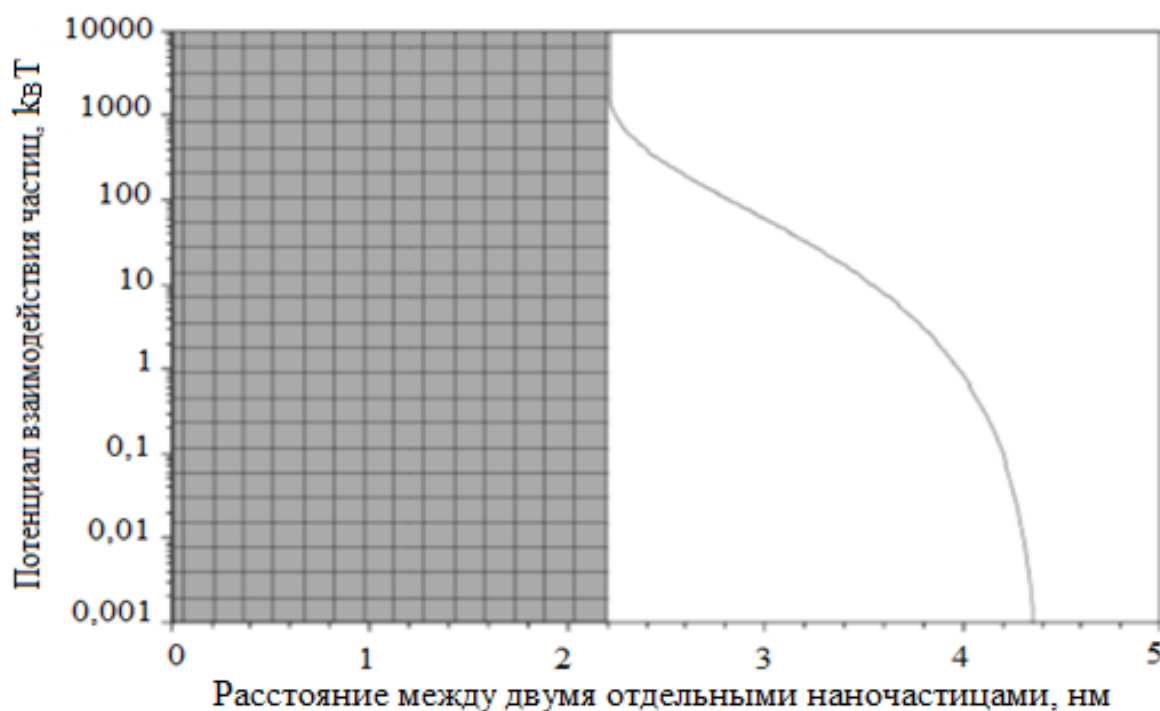


Рис. 3.32. Потенциал взаимодействия, используемый для моделирования Монте Карло

По полученным результатам можно прийти к выводу, что агрегация наночастиц золота эффективнее при расстоянии между ними менее 7 нм. Выше данного расстояние нет взаимодействия между частицами, что объясняет присутствие отдельных наночастиц в жидкой фазе.

3.3.3. Технология выщелачивания «плавучих» нанозолотин из технологических растворов

В связи с исследованиями возможности извлечения плавучего нанозолота нами была предложена более эффективная технология (рис. 3.33) снижения потерь золота с плавучими золотинами при переработке золотосодержащих руд технологиями кучного выщелачивания (КВ), которая осуществляется путем формирования непроницаемого основания, отсыпания на нем рудного штабеля из бедных руд с мелким золотом и монтажа системы подачи выщелачивающих и системы сбора продуктивных растворов с дальнейшим цианированием золотосодержащей руды.

При этом для снижения потерь золота [137] с плавучими нанозолотинами растворы цианидов, в наиболее эффективном месте, обрабатывают веществами, понижающими величину их поверхностного натяжения.

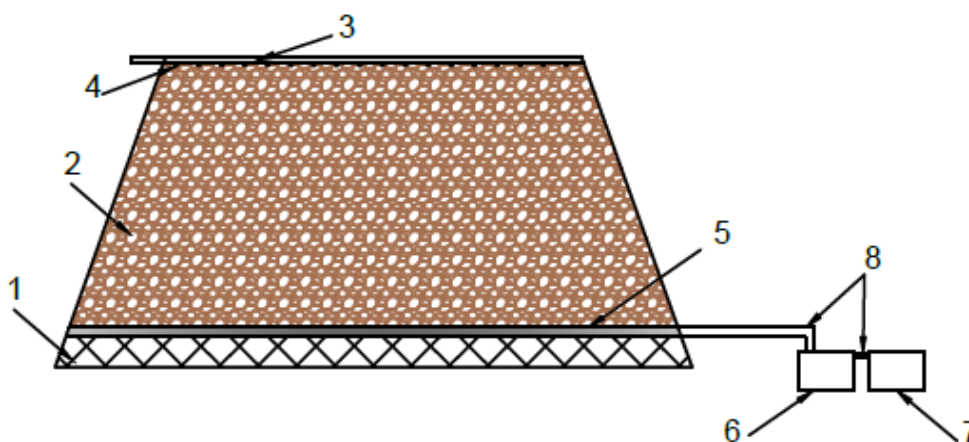


Рис. 3.33. Схема кучного выщелачивания руд с мелким золотом [54]:
1 – антифильтрационное основание; 2 – штабель КВ из руд с мелким золотом; 3 – система перфорированных трубопроводов, для подачи выщелачивающих растворов; 4 – отверстия в трубопроводе для нагнетания выщелачивающих растворов в массив штабеля КВ; 5 – канавки; 6 – зумпф; 7 – короб; 8 – соединительные трубопроводы

Веществами, уменьшающими поверхностное натяжение технологических растворов, являются различные ПАВ: жирные кислоты,

детергенты, фосфолипиды, амфифильные вещества и др., т.е. обладающие как гидрофильными, так и гидрофобными свойствами преимущественно гексадеканол или цетиловый спирт $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_2\text{OH}$ и октадеканол или стеариловый спирт $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_2\text{OH}$.

Также используются неионогенные поверхностно-активные вещества серии полисорбатов Tween 20, Tween 40, Tween 60 и Tween 80, со значением абсорбции нанозолота при 600 нм равным 0,75, 0,5, 0,4, 0,3, соответственно. Это указывает на то, что Tween 80 увеличивает стабильность наночастиц золота в водных растворах.

Их применение позволяет снизить поверхностное натяжение с 0,05 до 0,040 Н/м и менее (рис. 3.34).

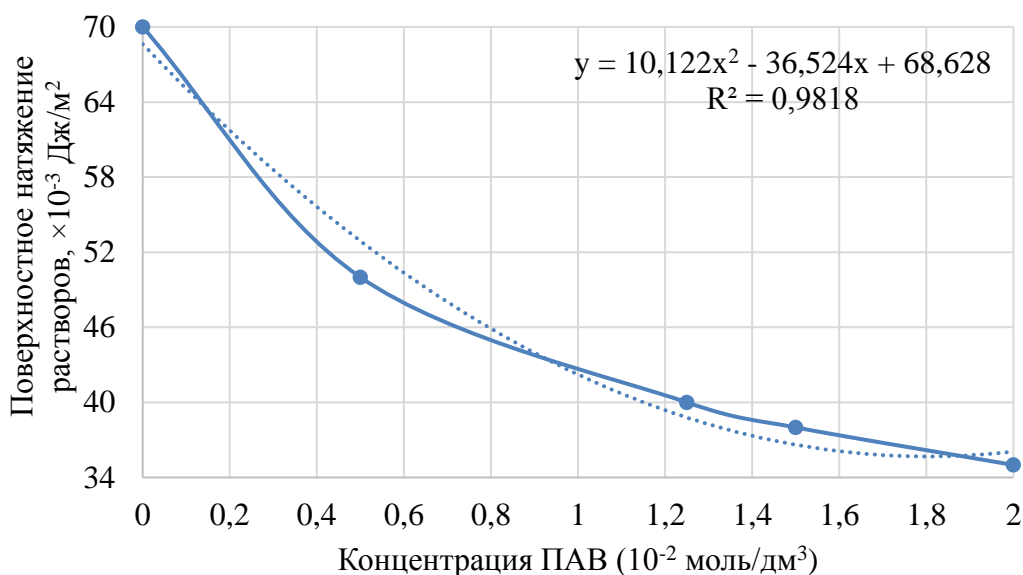


Рис. 3.34. Влияние концентрации ПАВ на поверхностное натяжение растворов

При этом для снижения возможных потерь золота с плавучими нанозолотинами в растворы цианидов, в специально созданном коробе 7. Дно и внутренние стенки короба покрыты рифленным пластиком. Он расположен после зумпфа 6 и предназначен для сбора растворов и высадки шламов. В него вводят атмосферный воздух, в виде нанопузырьков (устройство на рис. 3.33 не показано, например, это может быть с помощью «Генератор нанопузырьков,

способ получения жидких растворов, содержащих нанопузырьки, и их применение», Патент RU 2693136), с расходом менее 0,5 м³/ч, до понижения величины их поверхностного натяжения (примерно на 15 %). В результате этого нанозолотины потеряют свою плавучесть и из технологических растворов опустятся на поверхность короба 7, где в дальнейшем будут подвергнуты процессам сбора и высадки.

Протяженность зумпфа 6 делают такой, чтобы плавучие частицы нанозолота (нанозолотины) не успели осесть со шламом, а его приповерхностный слой (0,5-5 см), содержащий плавучее золото, направляют в короб 7. В короб 7, в приповерхностном объеме 7-12 сантиметров распыляют атмосферный воздух (устройство на рис. 3.33 не показано).

Техническая эффективность данной технологии кучного выщелачивания состоит в том, что она позволяет увеличить извлечение золота (в том числе и мелкого) размером 5-120 нм.

3.4. Выводы

1. В связи с низкой устойчивостью ранее применяемых пленок, появилась необходимость в разработке новой пленки с более высокой химической устойчивостью, которая способствовала бы исключению испарения растворов и реагентов, а также снижению отрицательного воздействия атмосферных явлений (радиации, осадков и т.д.), уменьшению затрат на реагенты. Такая пленка была разработана на основе силикона.

Силикон после его нанесения на поверхность штабеля кучного выщелачивания проникает в мелкодисперсный материал руд на небольшую (на 0,5-0,8 мм) глубину или обволакивает геоматериал толщиной 3-5 мм и затвердевает в течение 10-45 с, образуя прочную термозащитную полимерную пленку или покрытие (долговечность 14-16 месяцев) с полным связыванием поверхностных слоев штабеля (в том числе и пылевидных частиц в

поверхностном слое). Весь такого покрытие составляет 50-1000 г/м².

Силиконовая плёнка состоит из нескольких слоёв:

- поверхностного слоя, который состоит из жиров, необходимых для предотвращения испарения жидкости.
- нелетучей жидкости, в которой сравнительно большое количество жидкости должно находиться на носителе в виде как можно более тонкой и равномерно распределённой плёнки.

Формирование нанопленок силикона на поверхность штабеля КВ осуществляется с помощью различных распылителей путем нанесения в виде растворов, распыления или капельно-воздушного напыления на поверхности массива штабелей КВ.

2. При кучном выщелачивании (уже через примерно 20 дней) происходит снижение концентрации золота в выходящих продуктивных растворах, а также скорость фильтрации растворов за счет возникновения со временем некоторой неравномерности обработки массива штабеля выщелачивающими растворами, обусловленной появлением малопроницаемых слоев.

3. В связи с этим было разработано устройство робота и технология с его использованием, предназначенные для создания проницаемости в малопроницаемом слое массива штабеля КВ, формирующегося с течением времени и препятствующего, как правило, равномерному распределению технологических растворов.

Скорость прохождения робота в штабеле составляет 1-2 см/мин, время на создание необходимого одного канала длиной 1 м, и соответственно время, необходимое для разрушения малопроницаемого слоя объемом 1 м³, составит от 50 до 100 мин.

4. Была разработана математическая модель, позволяющая увеличить проницаемость малопроницаемых слоев и штабеля КВ, в целом. Было определено, что разработанная модель поведения потока технологических

растворов в пористой среде, способствует увеличению только пропускной способности штабеля, для достижения более равномерного их просачивания в него.

5. Разработана компьютерная модель, представляющая состояние штабеля КВ после улучшения проницаемости малопроницаемых слоев до уровня 1 мкм^2 , за счет использования разработанных малогабаритных роботов, что позволило одновременно восстановить должное значение гидравлической проводимости технологических растворов.

Компьютерная симуляция движения технологических растворов в штабелях КВ в малопроницаемых слоях показала довольно низкое значение гидравлической проводимости растворов ($2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$) в малопроницаемых слоях.

Таким образом, в малопроницаемых слоях гидравлическая проводимость технологических растворов повышается до $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$, а во всем штабеле до $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$ (т.е. увеличение в 100 раз) по сравнению с их первоначальными значениями.

6. В результате проведенных лабораторных исследований было показано, что для перехода слоя из разновидности водонепроницаемого ($<0,005 \text{ м}/\text{сут}$) в водопроницаемый достаточно создать 1 канал в фильтрационной трубе площадью $260,2 \text{ см}^2$. Проницаемость штабеля КВ при наличии каналов, образованных роботами, увеличивается более чем в 100 раз.

7. Результаты утверждают полученные результаты в компьютерной и математической моделях, согласно которым создание однотипных непересекающихся каналов существенно увеличивает лишь водопроницаемость массива, но не имеет значительное влияние на его пористость.

В результате достигается увеличение зоны смачивания на 12 % и более, а эффективности фильтрации – на 15 % и более (от начальных значений этих параметров).

8. В современных условиях от геотехнологии требуется довольно эффективное использование перерабатываемого минерального сырья на основе не только глубокого понимания его физико-химических свойств, но и умения целенаправленно (уже на наноуровне) изменять эти свойства, что, несомненно, предаст определенный импульс к разработке принципиально новых методов переработки минерального сырья (в том числе – с привлечением его нетрадиционных видов, например, минерального сырья с наноразмерными параметрами).

Наноразмерные геотехнологии должны базироваться на изучении и внедрении механизмов извлечения ценных компонентов на молекулярном, атомарном и электронном уровнях, когда появляется возможность управления процессами переработки минерального сырья уже на стадии формирования полезного компонента.

9. В ходе исследований было установлено, что часть нанозолота переходит в чешуйчатую форму и становится плавучим, т.к. вследствие приобретенной тонкочешуйчатой формы может удерживаться на поверхности воды или технологических растворов, силой поверхностного натяжения, в результате чего значительная часть золота таких классов теряется современными технологиями.

При этом некоторое количество плавучего золота размером 5-120 нм задерживается в водотоках, находящихся внутри штабеля КВ, преимущественно, в глинистом веществе (илисто-глинистой фракции) или безвозвратно теряется в сборочных бассейнах.

10. Разработана эффективная технология кучного выщелачивания «плавучих» нанозолотин, в которой обработку растворов осуществляют в наиболее эффективном месте, веществами, понижающими величину их поверхностного натяжения (0,040 Н/м и менее). В результате этого нанозолотины потеряют свою плавучесть и опустятся из растворов, где будут подвергнуты процессам их высадки (сбора и извлечения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложены технико-технологические решения по интенсификации технологии КВ за счет покрытия поверхности штабеля силиконовой нанопленкой, введения в промышленный оборот плавучих частиц нанозолота и нанопленок, а также обеспечения равномерной проницаемости штабеля КВ. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют делать следующие выводы:

1. В ходе исследований была установлена корреляция между значениями потерь от испарения в зависимости от гранулометрического состава выщелачиваемых руд или скорости выпуска растворов (равное 0,3-10 % от исходных растворов).

Выявлена корреляция между значениями потерь технологических растворов от испарения с учетом применяемой системы орошения (2-30 %), наличия/отсутствия изоляции поверхности штабеля КВ (0-35 %). Также определены корреляции испарения с относительной влажностью атмосферы (до 10 %) и скоростью ветра КВ (5-25%).

2. В связи с низкой физико-химической устойчивостью ранее применяемых экранирующих пленок, появилась необходимость в разработке принципиально новой пленки, с более высокой химической устойчивостью, которая способствовала бы исключению испарения растворов и реагентов, а также снижению отрицательного воздействия атмосферных явлений (радиации, осадков и т.д.), уменьшению затрат на реагенты и потерь плавучего золота.

Такая пленка была разработана на основе силикона, который после его нанесения на поверхность штабеля кучного выщелачивания проникает в ультрадисперсные золотосодержащие руды на небольшую (на 0,5-0,8 мм) глубину или обволакивает геоматериал (приповерхностные куски руды) толщиной 3-5 мм и затвердевает в течение 10-45 сек., образуя прочную

термозащитную полимерную пленку или покрытие (с долговечностью 14-16 месяцев) с полным связыванием поверхностных слоев штабеля (в том числе и пылевидных частиц в поверхностном слое). Вес такого покрытие составляет 50-1000 г/м².

3. Разработано устройство мобильного малогабаритного робота, предназначенного для работы в несвязанной среде, оснащённое устойчивым к воздействию химических реагентов, коррозии, истиранию и давлению налегающих кусков почвы корпусом со средним диаметром 5-10 мм, с утолщением к его середине, и средней длиной 10 см и более, с блоком управления (служащего для обеспечения целенаправленного самостоятельного перемещения устройства или управления им из диспетчерской), передатчиком/приемником (для передачи данных о движении и мониторинга местонахождения робота, а также информации об окружающей среде, а кроме этого – для приема управляющих сигналов с диспетчерского пункта), движителями (подобным щетинкам, размещенным по окружности на каждом сегменте его тела), аккумулятором электрической энергии (для обеспечения непрерывной работы устройства) и датчиками (для получения информации о давлении, температуре, физико-механических свойств почв и массивов грунтов).

4. Разработана технология интенсификации кучного выщелачивания золота из ультрадисперсных руд с помощью роботов, способствующая повышению эффективности выщелачивания за счет предотвращения образования или разрушения малопроницаемых слоев внутри штабеля КВ, а также обеспечению воздействия на незатронутые области штабеля при проникновении технологических растворов, в целях восстановления или обеспечения оптимальной фильтрационной способности массива выщелачиваемых руд и освобождения золота, заключенного в рудах зоны кольматации.

В результате достигается увеличение зоны смачивания на 12 % и более,

а эффективности фильтрации – на 15 % и более (от начальных значений этих параметров).

5. Для обеспечения интенсификации КВ золота весьма важное значение имеет крупность его золотин. Так, в ходе исследований было установлено, что рудное золото зачастую имеет выраженное нано- и даже кластерное строение. При этом кластеры золота представлены весьма разными по размеру сферическими и эллипсоидальными образованиями.

В процессе экскавации, транспортировки, складирования и выщелачивания часть крупного золота и нанозолота переходит в чешуйчатую форму и становится плавучим, т.к. вследствие приобретенной тонкочешуйчатой формы оно может удерживаться на поверхности воды или технологических растворов, силой поверхностного натяжения, в результате чего значительная часть золота таких классов теряется (в среднем до 55 % при использовании современных технологий).

При этом некоторое количество плавучего золота размером 5-120 нм задерживается в водотоках, находящихся внутри штабеля КВ, преимущественно, в глинистом веществе (илисто-глинистой фракции) или безвозвратно теряется в сборочных бассейнах.

6. Разработана эффективная технология кучного выщелачивания «плавучих» нанозолотин, в которой обработку растворов осуществляют в наиболее эффективном месте, веществами, понижающими величину их поверхностного натяжения (с 0,05 до 0,04 Н/м и менее). В результате этого нанозолотины потеряют свою плавучесть и опустятся из растворов, где будут подвергнуты процессам их высадки (сбора и извлечения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асхабов А.М. Кватаронная концепция: основные идеи и некоторые приложения // Известия Коми научного центра УрО РАН. Сыктывкар. – 2011. – Выпуск 3(7). – С. 70-77.
2. Баранников А.Г., Осовецкий Б.М. Морфологические разновидности и нанорельеф поверхности самородного золота разновозрастных россыпей Урала // Литосфера. –2013. – № 3. – С. 89–105.
3. Бугаева Н.Г. Тонкодисперсное ("невидимое") золото в сульфидах: экспериментальное исследование механизмов формирования: автореф. дис. на соиск. степ. канд. геол.-минер. наук: 25.00.09 / Ин-т геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. - Иркутск, 2006. - 22 с.
4. Вклад горной отрасли в социально экономическом развитии Буркина-Фасо /Воробьев А.Е., Тчаро Х., Чибозо Ф.К.Н. // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т.8. №3. 9 с. URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/116TVN316.pdf>.
5. Воробьев А.Е. Чекушина Т.В., Тчаро Х. Базовая типизация факторов, влияющих на эффективность орошения штабеля кучного выщелачивания // Вестник Атырауского института нефти и газа. – 2018. – С. 134-143.
6. Воробьев А.Е., Верчеба А.А., Трабелсси С. Основные наноформы золота месторождений и техногенного минерального сырья // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 4. – С. 21–25.
7. Воробьев А.Е., Трабелсси С. Виды наноформ золота в геогенном и техногенном минеральном сырье // Горный журнал Казахстана. – 2015. – №2. – С. 18–21.
8. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Минералогический состав золотых руд месторождения Эссакане // Материалы XV Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» в рамках симпозиума «Восстановление национальной экономики Сирии», 2016. С. 160.

9. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Основные факторы, определяющие эффективность орошения штабеля КВ // Вестник Евразийской науки. – 2019. – №1. URL: <https://esj.today/PDF/51NZVN119.pdf>.
10. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Проблема разбавления технологических растворов // В сб.: «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (материалы XXIV Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVII Уральской горнопромышленной декады). Екатеринбург, 2019. С. 177-179.
11. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Развитие применяемых при кучном выщелачивании покрытий и экранов // Вестник Евразийской науки. 2019. – URL: <https://esj.today/PDF/97NZVN618.pdf>.
12. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Снижение потерь от спринклеров при кучном выщелачивании металлов // В сб.: Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья материалы XXIV Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVII Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2019. С. 170-177.
13. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Сравнительный анализ свойств нанорельефа различных золотосодержащих сульфидов // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. –2016. – № 1. – С. 78-84.
14. Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Тчаро Х. Покрытия и экраны для кучного выщелачивания // Горный вестник Узбекистана. – 2019. № 3(78). – С. 4-6.
15. Гавриленко О.Д. Дефектная структура природного минерала арсенопирита / Гавриленко О.Д., Мисевра С.Я., Зимановская Н.А. и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – № 4. – С. 517–522.
16. Геохимия золота. Ресурсы и технологии России: Справочное издание. / А.Е. Воробьев, А.Д. Гладуш. – М.: Изд-во РУДН, 2000. – 432 с.
17. Гибкий робот-червь сможет втиснуться в любое пространство

<https://www.infoniac.ru/news/Gibkii-robot-cher-v-smozhet-vtisnut-sya-v-lyuboe-prostranstvo.html>.

18. Дементьев В.Е. Опыт Иргиредмета в области разработки, проектирования и внедрения технологии кучного выщелачивания на предприятиях России / В.Е. Дементьев, А.П. Татаринев, С.С. Гудков, Ю.Е. Емельянов, В.Н. Евдокимов, С.Г. Григорьев, Е.В. Галюков // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: В 2 т. 2: Золото / Под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Изд. «Руда и металлы», 2005. С. 32-39.
19. Дементьев В.Е., Дружина Г.Я., Минеев Г.Г. Кучное выщелачивание золотосодержащего сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2000. № 2. С. 74–78.
20. Зимановская Н.А. Нанозолото в углеродисто-золотосульфидных рудах месторождения Бакырчик // Вестник ВКГТУ. – 2014. – № 1. – С. 3-7.
21. Интенсификация кучного выщелачивания золота из тонкодисперсных руд с использованием нанотехнологий / Воробьев А. Е., Чекушина Т. В., Каки К., Тчаро Х., Воробьев К.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1. – С. 160–174. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-160-174.
22. Исследование влияния поверхностного натяжения технологических растворов на миграцию плавучего золота / Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Тчаро Х., Воробьев К.А., Курсина М.М. // Вестник АУНГ (Казахстан). – 2019. – № 4(52). – С. 136-144.
23. Исследование реакционной способности поверхности пирита и арсенопирита. – URL: <http://www.nnin.org/sites/default/files/files/NNINreu06Breitbach.pdf>.
24. Классификация штабелей кучного выщелачивания металлов / Воробьев А.Е., Чекушина Т.В. // Горный журнал. – 1997. – № 3. – С. 36-42.
25. Корнилов Т.В. Сравнительные характеристики стандартного щелевого распылителя и щелевого распылителя с эжекцией воздуха //

- Механизация. – 2010. – № 2. – С. 46-48.
26. Котова О.Б., Вайон И., Понарядов А.В. Наноструктурная минеральная поверхность: сорбционные свойства // Вестник Института геологии Коми Научного центра Уральского отделения РАН. – 2007. – № 10(154). – С. 8-10.
 27. Крылова Г.С., Седельникова Г.В., Елисеев В.Н. Особенности технологических схем кучного выщелачивания золота // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: В 2 т. 2: Золото / Под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Изд. «Руда и металлы», 2005. С. 88-91.
 28. Крылова Г.С., Седельникова Г.В., Королев Н.И. Перспективы кучного выщелачивания золота из техногенного сырья // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: В 2 т. 2: Золото / Под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Изд. «Руда и металлы», 2005. С. 84-88.
 29. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд в условиях Севера / Ковлеков И.И., Шерстов В.А., Князев Л. Н., Варлаков П.С., Дмитриев А.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. № 12. – С. 279-281.
 30. Кучное выщелачивание металлов / Воробьев А.Е., Чекушина Т.В. / В кн.: Физико-химическая геотехнология – М.: МГГУ, 2001. – С. 541-558.
 31. Лащинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Справочник: Монография. – М.: Издательство «Альян (Москва)», 2008. 752 с.
 32. Лузин Б.С. Экономические проблемы золотодобывающей промышленности. – М: Ассоциация горной книги, 2002. – 113 с.
 33. Морозов Ю.П., Пермикина Н.В. Исследование гидрометаллургической переработки пылей медеплавильного производства / В сб. IV Конгресс обогатителей стран СНГ: Материалы Конгресса. - Т.1. М.: Альтекс, 2003. — С. 5-7.
 34. Нанороботы воспроизвели движение дождевого червя //

<https://nplus1.ru/news/2016/02/26/swimmingmicrorobot>.

35. Онуфриенок В.В. Арсенопирит золотосодержащих руд: состав, позиции примесных атомов, распределение золота // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 3. – С. 43-48.
36. Орынгожин Е.С., Метакса Г.П., Алишева Ж.Н. и др. Разработка способа интенсификации процесса выщелачивания в массиве гидрогенных урановых месторождений // Вестник казахстанской национальной академии естественных наук, 2018. – № 2. – С. 74-76.
37. Особенности современной наноминералогии / Воробьев А.Е., Ибрагимов Р., Трабелсси С. // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы IV Международной науч.-практ. конф. (Междуреченск, 8–10 апреля 2015 г.) – Кемерово, 2015. – С. 26–27.
38. Осовецкий Б.М. Наноскульптура поверхности золота. Пермь: Пермский госуниверситет, 2012. – 232 с.
39. Петров В.Ф. Оценка экологических нагрузок при эксплуатации установок кучного выщелачивания золота //в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: В 2 т. 2: Золото / Под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Изд. «Руда и металлы», 2005. С. 96-103.
40. Порцевский А.К., Катков Г.А. Геотехнология (физико-химическая). Зарегистрировано в Федеральном агентстве по образованию (№ 5370 от 16.11.2005.). М.: МГОУ, 2004. – 66 с.
41. Практика применения геосинтетических глинистых экранов на площадках кучного выщелачивания в Перу / Воробьев А.Е., Тчаро Х., Чекушина Т.В. // Проблемы недропользования. Сетевое периодическое научное издание ФГБУН «Институт горного дела Уральского отделения РАН». – Екатеринбург, 2017. – Вып. 2. – С. 62-72.
42. Проблема испарения технологических растворов в установках КВ / Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Тчаро Х., Воробьев К.А. // В сб.: Материалы VIII международной научно-практической конференции:

- Современные тенденции и инновации в науке и производстве (Междуреченск, 03-04 апреля 2019 г.) / отв. ред. Т.Н. Гвоздкова. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им.Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2019. – 2019. – С. 109.1-109.5.
43. Проблема КВ, связанная с действием ветра / Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Тчаро Х., Воробьев К.А. //В сб.: Материалы VIII международной научно-практической конференции: Современные тенденции и инновации в науке и производстве (Междуреченск, 03-04 апреля 2019 г.), отв. ред. Т.Н. Гвоздкова. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2019. – С. 110.1-110.3.
44. Проблема разбавления технологических растворов / Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Тчаро Х. и др. // В сборнике материалов VIII международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». 2019. С. 111.1-111.5.
45. Рассчитана электронная структура стабильных золотых нанокластеров. – URL: http://nanojournal.ru/events.aspx?cat_id=224&d_no=889.
46. Сазонов А.М., Звягина Е.А., Леонтьев С.И. и др. Ассоциации микро- и наноразмерных обособлений благороднометалльного комплекса в рудах //Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2008. – Т. 1. – № 1. – С. 17-32.
47. Саутина Н.В., Ефремов Е.А., Каримова Д.Р. и др. Состав и свойства эмульсии модифицированного силикона в воде //Вестник Казанского технологического университета. Т. 15. №1. 2012. С. 68-73.
48. Связь нанорельефа пирита и арсенопирита с величиной адсорбции золота / Воробьев А.Е., Козырев Е.Н., Тчаро Х. // Наука, образование, культура и информационно-просветительская деятельность - основы устойчивого развития горных территорий: материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. – Владикавказ: Изд-во Северокавказский горно-металлургический

институт, 2015. – С. 264-272.

49. Седельникова Г.В. Новые достижения в области биотехнологии переработки минерального сырья // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения 2016): мат. междунар. конф., Санкт-Петербург, 26 - 30 сентября 2016 г. - М.: Руда и металлы, 2016. - С. 215 - 218.
50. Секисов А.Г., Манзырев Д.В. Минералого-геохимические и наноструктурные особенности золотосодержащих руд месторождений Забайкальского Края // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2009. – № 2. – С. 51-55.
51. Сиссе В., Тчаро Х. Активность модифицированных оксидов титана (Cu/TiO_2 , AU/TiO_2) при фотодеградациии 4-нитрофенола // Журнал "Вода: химия и экология", № 1-2 январь-февраль 2019. С. 168–174.
52. Способ выщелачивания отвалов: А.с. 1548416 СССР / Секисов А.Г., Хакулов В.А., Бударрагин А.Ю., Воробьев А.Е., Томских А.А. - МПК5 E21 В 43/28, БИ № 9, 1990. С.
53. Способ интенсификации кучного выщелачивания металла металлов из руд: Положительное решение по заявке о выдаче евразийского патента на изобретение № 201900567. заявл. 2019 / Тчаро Х., Воробьев А.Е. Чекушина Т.В.– 4 с.
54. Способ кучного выщелачивания руд с мелким золотом: Положительное решение о выдаче евразийского патента на изобретение № 201900514. заявл. 15.10.2019 / Воробьев А.Е., Тчаро Х., Чекушина Т.В., Каки К., Воробьев К.А. – 4 с.
55. Способ предотвращения испарения технологических растворов при кучном выщелачивании металлов из руд: Евразийский патент № 032669, заявка 201700386: заявл. 31.08.2017: опубл. 28.02.2019 / А.Е. Воробьев, Х. Тчаро. – 4 с.
56. Способ складирования горных пород: А.с. 1724875 СССР / Таскаев А.А.,

- Воробьев А.Е., Секисов А.Г., Минаков В.В., Воробьев С.Е. - МПК5 E21 C41/26, БИ №13, 1992.
57. Способ складирования и подготовки руд к переработке: Патент 2026972 РФ / Таскаев А.А., Воробьев А.Е., Секисов А.Г. - МПК6 E21 C 41/26, БИ №2, 1995.
58. Ступин В.И., Фазлуллин М.И. Опыт проектирования предприятий кучного выщелачивания благородных металлов // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: В 2 т. 2: Золото / Под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Изд. «Руда и металлы», 2005. - 328 с., С. 39-60.
59. Типизация систем орошения выщелачиваемой руды и сбора продуктивных растворов / Воробьев А.Е., Каргинов К.Г., Одинцова Е.С., Чекушина Т.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень-2002. – №9. – С. 54-60.
60. Тчаро Х. Изучение процесса извлечения золота и серебра при цианировании //Материалы XV Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» в рамках симпозиума "Восстановление национальной экономики Сирии". М.: Изд- во РУДН. 2016. С. 182-183.
61. Тчаро Х. Моделирование гидродинамических параметров штабеля при кучном выщелачивании // Международное совещание «Плаксинские чтения–2020» «Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья». – 2020. – С. 233-235.
62. Тчаро Х. Моделирование проницаемости штабеля для стабилизации фильтрационных свойств выщелачивающих растворов // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 5. – С. 1-10.
63. Тчаро Х. Нанопленки // В кн.: Воробьев А.Е., Воробьев К.А. Наноматериалы и нанотехнологии: Особенности протекания физико-химических процессов в наносистемах: Монография. – М.: Изд-во

- «Palmarium Academic Publishing (Saarbrücken)», 2018. – 15 с.
64. Тчаро Х. Обеспечение безопасности использования горных машин и оборудований // Сборник тезисов докладов IV международной научно-практической конференции Рязань. – 2015. – С. 65-68.
 65. Тчаро Х. Обоснование месторождений пригодных для кучного выщелачивания //Материалы XV Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» в рамках симпозиума "Восстановление национальной экономики Сирии". М.: Изд- во РУДН. 2016. С. 52-54.
 66. Тчаро Х. Перспективы извлечения наночастиц золота из цианистых растворов // Материалы V Всероссийской конференция «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». – 2020. – С. 58.1-58.10.
 67. Тчаро Х. Решение проблемы потери теплоты внутри штабеля кучного выщелачивания // Сборник тезисов X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу». Магнитогорск. 2019. С. 162-164.
 68. Тчаро Х. Состояние мирового производства золота // //Материалы XV Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» в рамках симпозиума "Восстановление национальной экономики Сирии". М.: Изд-во РУДН. 2016. С. 155-156.
 69. Устройство мобильного малогабаритного робота-червяка: Положительное решение о выдаче евразийского патента на изобретение № 201900568. заявл. 2019 / Воробьев А.Е., Тчаро Х. – 7 с.
 70. Фазлуллин М.И. Кучное выщелачивание благородных металлов. – М.: Издательство Академии горных наук, 2001. – 647 с.
 71. Физико-химическая геотехнология золота / Воробьев А.Е., Каргинов К.Г., Козырев Е.Н., Ашихмин А.А. - Владикавказ: Ремарко, 2001. - 343 с.

72. Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Хмелев М.В., Шалунова А.В., Генне Д.В. Ультразвуковые распылители наноматериалов // Южно-сибирский научный вестник. – 2012. – № 1 (1). – С. 193-197.
73. Чантурия В.А. Влияние гранулометрического состава и реагентного режима на процесс кучного выщелачивания окисленных медных руд /Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Емельяненко Е.А., Радченко Д.Н. //Горный журнал. 2002. № 3. С. 48.
74. Чантурия В.А. Нетрадиционные методы вскрытия упорных золотосодержащих руд и продуктов обогащения / Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д., Седельникова Г.В., Крылова Г.С. // В кн.: Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: В 2 т. 2: Золото / Под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Изд. «Руда и металлы», 2005. - 328 с., С. 111-122.
75. Чантурия В.А. Обоснование эффективности использования электрохимической технологии водоподготовки в процессах кучного выщелачивания руд /Чантурия В.А., Самусев А.Л., Миненко В.Г., Копорулина Е.В., Чантурия Е.Л. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. № 5. 2011. С. 114-123.
76. Чекушина Т.В. Повышение эффективности кучного выщелачивания металлов из рудного сырья подверженного влиянию климатических факторов /Чекушина Т.В., Воробьев А.Е., Ляшенко В.И., Тчаро Х. //Обогащение руд. – 2019. – №5. – С. 9-12. DOI: 10.17580/or.2019.05.02.
77. Шадрунова И.В., Радченко Д.Н. Обоснование параметров технологии кучного выщелачивания техногенного тонкодисперсного медьсодержащего сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2005. № 3. С. 276-280.
78. Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод. Ч. 1. Основы механики жидкости и газа. — М.: МГИУ, 2003. — 192 с.
79. Asger W. Исследование масс-спектрометрического нановолокна: химия,

- воздействие и влияние на здоровье // диссертация на соискания, 2010.
80. Bavi A., Kashkuli H.A., Boroomand S., Naseri A., Albaji M. Evaporation Losses from Sprinkler Irrigation Systems under Various Operating Conditions // Journal of applied sciences. – 2009. –vol. 9(3). – P. 597-600.
 81. Bogireddy N.K.R., Pal U., Martinez Gomez L., Agarwal V. Size controlled green synthesis of gold nanoparticles using Coffea arabica seed extract and their catalytic performance in 4-nitrophenol reduction // RSC Adv. – 2018. – vol. 8. – P. 24819-24826. DOI: 10.1039/c8ra04332a.
 82. Boxerbaum A.S., Horchler A.D., Shaw K.M., Chiel H.J., Quinn R.D. Worms, waves and robots // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, MN. – 2012. – pp. 3537-3538. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224805.
 83. Breitenbach A.J., Dolezal A.L. Impact of shallow and deep injection well leach solutions with respect to ore heap slope stability // Heap leach solutions. September 14-16, 2015, Reno, Nevada, USA – 2015. – pp. 16. <https://www.ausenco.com/download/620>.
 84. Breitenbach A.J., Smith M. E. Overview of geomembrane history in the mining industry // Published in the proceedings of the Eight International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japan, 18-22 Sept. 2006. pp. 4. <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/06/Leach-Pad-geomembrane.pdf>.
 85. Bureau of reclamation technical service center. Embankment Dams. – URL: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finals-pdfs/DS13-20.pdf>, 2014.
 86. Carolina Liljenström, David Lazarevic and Göran Finnveden. Silicon-based nanomaterials in a life-cycle perspective, including a case study on self-cleaning coatings // Environmental Strategies Research, 2013.
 87. Cor Jacobs, Jan Elbers, Reinder Brolsma, Oscar Hartogensis, Eddy Moors, María Teres, Rodríguez-Carretero Márquez, Bertvan Hove. Assessment of

- evaporative water loss from Dutch cities // *Building and Environment*. – 2015. – Vol. 83. – pp. 27-38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.005>.
88. Craig I., Mossad R., Hancock N. ‘Development of a CFD based dam evaporation model’, *International Symposium on Environmental Health, Climate Change and Sustainability*, QUT Brisbane, 20-22 November 2006.
89. DailyTechInfo.org: сайт / Впервые в истории сделан снимок кластера, состоящего из двадцати атомов золота. – URL: <http://www.dailytechinfo.org/np/3874-vpervye-v-istorii-sdelan-snimok-klastera-sostoyaschego-iz-dvadcati-atomov-zolota.html> (дата обращения: 25.02.2017).– Текст: электронный.
90. Daniel W. Kappes. *Precious Metal Heap Leach Design and Practice*. – URL: http://oremax.com/pdfs/resources/precious_metal_heap_leach_design_and_practice.pdf.
91. Daniels R.H., Dikler S., Stacey E.Li.C. Break Free of the Matrix: Sensitive and Rapid Analysis of Small Molecules Using Nanostructured Surfaces and LDI-TOF Mass Spectrometry. *Journal of the Association for Laboratory Automation*. – 2008. – vol. 13. – pp. 314-321.
92. David A. Fleming, Mary Elizabeth Williams. Size-Controlled Synthesis of Gold Nanoparticles via High-Temperature Reduction // *Langmuir*. – 2004. – vol. 20. – pp. 3021-3023.
93. David A. Milligan, Omar A. Muhtadi. *Chemical Solution Control*. – URL: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Milligan1988.pdf>.
94. De Gennes, P. G. *AdV. Colloid Interface Sci.* 1987, 27, pp. 189–209.
95. Derjaguin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. *Surfaces Forces*. – New York: Plenum Press, 1987. – 400 pp.
96. Diane McBride, James Gebhardt, Nick Croft, Mark Cross. *Heap Leaching: Modelling and Forecasting Using CFD Technology // Minerals*. – 2018. – vol. 8(9). – pp. 1-20.
97. Evgeny Smirnova, Pekka Peljoa, Micheál D. Scanlona, Hubert H. Giraulta.

- Gold Nanofilm Redox Catalysis for Oxygen Reduction at Soft Interfaces // Elsevier, *Electrochimica Acta*. – 2016. – vol. 197. – pp. 362-373.
98. Fedro S. Zazueta. Evaporation Loss During Sprinkler Irrigation. URL: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/ae/AE04800.pdf>.
99. Gang Zhao, Huilin Gao. Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – vol. 226 (1). pp. 109-124.
100. Gui Lu, Xiao-Dong Wang, Yuan-Yuan Duan. Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/273459029>.
101. Haghghi E., Madani K., and Hoekstra A.Y. The water footprint of water conservation using shade balls in California, *Nat. Sustain*, 2018, vol.1, 358–360, <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0092>.
102. Harris D.C., *Quantitative chemical analysis*, 7th Edition. Freeman, 2007.
103. Henri Gouin, Sergey Gavriluk. Dynamics of liquid nanofilms. *International Journal of Engineering Science*, Elsevier, 2008, 46, pp.1195-1202.
104. Hilda Garay, Javier Mendoza, Peru Carlos César, Peru Ernesto Najjar. Evaluation and quality control of geosynthetic clay liners in heap leach pads // *Proceedings of Heap Leach Solutions*, 2014. – URL: https://anddes.com/wp-content/uploads/2018/03/evaluation_and_qc_of_gcl_in_hlp.pdf.
105. Hubert H. Girault. Self-healing gold mirrors and filters at liquid–liquid interfaces // *Royal Society of Chemistry*, 2016.
106. Ian Philip Craig, Craig Peter Baillie, Vasantha Aravinthan, Paul A. Coop. Evaporation, seepage and water quality management in storage dams: A review of research methods // *Environmental Health*. – 2007. – vol. 7(3). – pp. 84-97.
107. Jianping Jin, Yuexin Han, Hui Li, Yangyang Huai, Yongjun Peng, Xiaotian Gu, Wei Yang. Mineral phase and structure changes during roasting of fine-grained carbonaceous gold ores and their effects on gold leaching efficiency // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – vol. 27(5). pp. 1184-1190.

108. Julian H.F., Smart E. Cyaniding gold and silver ores: Griffen. – URL: <https://doi.org/10.1038/071292a0>.
109. Kebarle P., Tang L. From ions in solution to ions in the gas phase - the mechanism of electrospray mass spectrometry. *Analytical Chemistry* 1993, 65, 972A-986A.
110. Maddox L. Metal. Invisible gold: Comparison of Au deposition on pyrite and arsenopyrite. *American Mineralogist*. – 1998. – vol. 83. pp. 1240–1245.
111. Marcos Gustavo Monroy Fernandez. Biolixiviation- cyanuration de minerais sulfurés aurifères réfractaires en dispositifs de percolation: Comportement des populations de *Thiobacillus ferrooxidans* et influence de la minéralogie et des conditions opératoires: These: Marcos Gustavo Monroy Fernandez. – 1993. – 252 c.
112. Mark J. Logsdon, MSc Karen Hagelstein, CIH Terry I. Mudder, The management of cyanide in gold extraction // International Council on Metals and the Environment, 1999. 39 pp.
113. Milad Aminzadeh, Peter Lehmann, and Dani Or. Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2018. – vol. 22. – pp. 4015–4032.
114. Nanda K.K., Maisels A., Kruis F. E. Surface Tension and Sintering of Free Gold Nanoparticles // *J. Phys. Chem.* – 2008. – vol. 112. pp. 13488–13491.
115. Nayar K.G., Panchanathan D., McKinley G.H., Lienhard V J.H. Surface Tension of Seawater // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. – 2014. – vol. 43. – No. 4. – pp. 1-10.
116. New Innovations in Drip Irrigation for Heap Leaching. URL: <https://drts.com/new-innovations-in-drip-irrigation-for-heap-leaching/#>, 2017.
117. Panjabi K., Rudra R., Goel P. Evaporation Retardation by Monomolecular Layers: An Experimental Study at the Aji Reservoir (India) // *Open Journal of Civil Engineering*. – 2016. – vol. 6. – pp. 346-357.

118. Panjabi K., Rudra R., Goel P. Evaporation Retardation by Monomolecular Layers: An Experimental Study at the Aji Reservoir (India) // Open Journal of Civil Engineering. – 2016. – vol. 6. – pp. 346-357.
119. Peng Yang, Guizhen Wang, Zhe Gao, He Chen, Yong Wang and Yong Qin. Uniform and Conformal Carbon Nanofilms Produced Based on Molecular Layer Deposition // Materials. – 2013. – pp. 5002-5012.
120. Petr Suchomel, Libor Kvitek, Robert Prucek, Ales Panacek, Avik Halder, Stefan Vajda, Radek Zboril. Simple size-controlled synthesis of Au nanoparticles and their size-dependent catalytic activity // Scientific Reports, 2018. – URL: <https://doi:10.1038/s41598-018-22976-5>.
121. Phuoc Van Thai, Shinnosuke Abe, Kenichiro Kosugi, Nobuo Saito, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi. Size/shape control of gold nanoparticles synthesized by alternating current glow discharge over liquid: the role of pH // Mater. Res. Express. – 2019. – vol. 6. – pp. 1-20.
122. Ponmudi. R., Ramesh. P., Vijay. S. Control the Evaporation of Water in Lakes and Ponds // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2018. – vol. 6. – pp. 1-6.
123. Potter G.M. "Some Developments in Gold and Silver Metallurgy", Extraction Metallurgy, Institution of Mining and Metallurgy, London. 1981. pp 128-136.
124. Qingyang Lin, Kate J Dobson, Peter D. Lee. Modelling particle scale leach kinetics based on X-ray computed micro-tomography images // Hydrometallurgy, 2016. <https://www.researchgate.net/publication/294579201>.
125. Ren Xiu-Ping, Zhou Bo, Li Lan-Ting, and Wang Chun-Lei. Structure and dynamics of ordered water in a thick nanofilm on ionic surfaces Chin. Phys. B Vol. 22, No. 1 (2013).
126. Robertson S.W., van Staden P.J., Seyedbagheri A. Advances in high-temperature heap leaching of refractory copper sulphide ores // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2012. – vol.112. – pp. 1045-1050.

127. Ross R. Large, Stuart W. Bull, Valeriy V. Maslennikov. A Carbonaceous Sedimentary Source-Rock Model for Carlin-Type and Orogenic Gold Deposits // Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology. – 2011. – vol. 106. – pp. 331–358.
128. Sahoo P.R., Venkatesh A.S. ‘Indicator’ carbonaceous phyllite/graphitic schist in the Archean Kundarkocha gold deposit, Singhbhum orogenic belt, eastern India: Implications for gold mineralization vis-a-vis organic matter // J. Earth Syst. Sci. – 2014. – Vol. 123. – No. 7. – pp. 1693–1703.
129. Sangbae Kim, Cecilia Laschi, Barry Trimmer. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics // Review vol 31, issue 5, pp. 287-294, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>.
130. Sankar K. Sivaraman, Sanjeev Kumar and Venugopal Santhanam. Room-temperature synthesis of gold nanoparticles – Size-control by slow addition // Gold Bulletin. – 2010. – vol. 43. – pp. 275-286.
131. Tcharo H., Koulibaly M., Tchibozo F.K.N. Development of Methods for Anti-filtration Formations Destruction Inside a Heap Leach Pile // In S. Glagolev (Ed.): ICAM 2019, SPEES, 2019. – pp. 143–145.
132. Tiefeng Penga, Qibin Li a, Jie Chena, Xuechao Gaoc, Quantitative analysis of surface tension of liquid nano-film with thickness: Two stage stability mechanism, molecular dynamics and thermodynamics approach // Журнал Elsevier, Physica A. – 2016. vol. 462. – pp. 1018-1028.
133. Timothy D. Stark. Geomembrane liners and covers. URL: <https://csengineermag.com/article/geomembrane-liners-and-covers/>.
134. Umesh J. Kahalekar, Hastimal S. Kumawat. Evaporation suppression from water surfaces using chemical films // International journal of civil engineering and technology (IJCIET). – 2013. – vol. 4(3). – pp. 185-196.
135. Vollath D., Fischer F.D. Estimation of Thermodynamic Data of Metallic Nanoparticles Based on Bulk Values. Metal Nanopowders // Wiley-VCH Verlag GmbH: Weinheim. - 2014. pp 1–24. -

URL: <https://doi.org/10.1002/9783527680696.ch1>.

136. Vollath D., Fischer F.D., Holec D. Surface energy of nanoparticles – influence of particle size and structure // Beilstein J. Nanotechnol. – 2018. – vol. 9. – pp. 2265–2276.
137. Vorobyev A.E., Chekushina T.V., Vorobyev K.A., Gomes A.Sh.S., Tcharo H. Geotechnologies of heap leaching the gold from rock dumps // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2019. – T. 19. – № 1.3. – pp. 841–848.
138. Vorobyov A.E., Lyashenko V.I., Tcharo H., Vorobyev K.A. Efficiency increase for gold-bearing ore deposits with respect to the influence of sulfide surface nanobarrier on metal adsorption // Scientific and technical journal “Metallurgical and Mining Industry”. – 2017. – № 7. – pp. 28-36.
139. Yuyun Zhao, Zhuo Wang, Wei Zhanga, Xingyu Jiang. Adsorbed Tween 80 is unique in its ability to improve the stability of gold nanoparticles in solutions of biomolecules // The Royal Society of Chemistry, 2010. DOI: 10.1039/c0nr00309c.
140. Zhengwen Zeng, Reid Grigg. A Criterion for Non-Darcy Flow in PorousMedia. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11242-005-2720-3.pdf>.