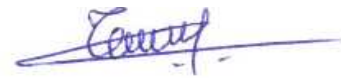


*На правах рукописи*



**Тчаро Хоноре**

**РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ  
КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА**

**Специальность**

25.00.13. Обогащение полезных ископаемых

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва  
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов» (ФГАОУ ВО РУДН)

Научный руководитель: **Чекушина Татьяна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук», доцент департамента Недропользования и нефтегазового дела ФГАОУ ВО РУДН

Официальные оппоненты: **Морозов Юрий Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**Юшина Татьяна Ивановна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обогащение и переработка полезных ископаемых и техногенного сырья» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ИРНИТУ)

Защита состоится «22» июня 2021 г. в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН: <http://ипконран.рф>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук

Матвеева Т.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** 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.

Научные исследования по совершенствованию технологии КВ ведутся 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. Karpes и др.

Одной из важнейших задач оптимизации процесса кучного выщелачивания является повышение эффективности режимов обработки штабеля технологическими растворами, т.к. существенным недостатком является их испарение из массива штабеля КВ или же наоборот – их разбавление атмосферными осадками. Решением этой проблемы является применение различных видов пленочных покрытий поверхности штабеля КВ.

Целенаправленное управление вышеуказанными аспектами позволяет обеспечить необходимое качество технологических растворов – оптимальных значений их концентрации (0,6-0,8 г/дм<sup>3</sup>), pH (9-11), Eh (в пределах - 610 мВ) и поверхностного натяжения (< 0,04 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 на большинстве золотосодержащих (рудных и россыпных, геогенных и техногенных) месторождений позволяет расширить существующую минерально-сырьевую базу этого металла и обеспечить разработку весьма эффективных технологий его извлечения (выщелачивания).

Еще одно мероприятие, способствующее интенсификации технологии КВ золота, заключается в обеспечении необходимого уровня равномерной проницаемости массива штабелей, за счет разрушения малопроницаемых слоев, образующихся из-за закупоривания их порового пространства тонкодисперсными частицами (шламом, пылью и глинистыми частицами), а также в освобождении для выщелачивающих растворов частиц золота, заключенного в рудах зоны подобной коагуляции.

**Цель исследования** – разработка способов интенсификации 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**

Эксперименты проводились на специально созданной лабораторной установке. Использовались следующие методы и методики: 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/дм<sup>3</sup>, рН – 9-11 и Ен 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 нанопокрyтия на основе кремнийорганических соединений.

2. 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 «плавающего 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.); X Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (Филиал КузГТУ, г. Междуреченске, 2021).

**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 закольматированных слоев внутри штабеля КВ; адаптации среды SVOffice для выполнения поставленных задач и создании 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель и задача исследований, аргументирована научная новизна,

достоверность и практическая значимость работы, сформированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены основные факторы, определяющие эффективность кучного выщелачивания золотосодержащих руд, связанные с испарением и разбавлением технологических раствором, со снижением фильтрации последних из-за образования противofильтрационных слоев (кольматация) в штабеле КВ и, следовательно, приводящие к потерям нанозолота. Обсуждаются существующие решения данной проблемы в мировой практике.

Во **второй главе** представлена методика проведения экспериментов по предотвращению испарения и разбавления технологических растворов, математического расчета значений фильтрации растворов через штабель КВ и компьютерной симуляции движения технологических растворов в штабелях КВ. Описаны лабораторные исследования проницаемости штабеля КВ, осуществленные с помощью лабораторного прибора, представляющего собой фильтрационную трубу с пористым дном, с латунной сеткой, вставленной на конце воронки фильтрационной трубы, а также математическое моделирование взаимодействия между наночастицами в жидкой среде.

В **третьей главе** описаны результаты лабораторных исследований по применению силиконовых покрытий для изоляции штабеля КВ, математических и компьютерных исследований применения малогабаритного мобильного устройства для разрушения противofильтрационных слоев в штабеле, а также извлечения нанозолота из технологических растворов.

#### 1. Исследование основных факторов, влияющих на эффективность кучного выщелачивания

На эффективность переработки золотосодержащих руд в штабелях кучного выщелачивания влияют различные факторы (рис. 1): такие, как испарение и разбавление технологических растворов (75 %), качество антифильтрационных наружных покрытий (8 %), снижение значений фильтрационной способности штабеля (12 %), и значение потерь нанозолотин в штабеле и с растворами (5 %).



Рис. 1. Анализ факторов, влияющих на эффективность выщелачивания золотосодержащих руд

Анализ указанных факторов позволит решить основные проблемы КВ золота из руд, и тем самым увеличить эффективность работы установок КВ.

На показатели извлечения золота из бедных руд определяющее влияние имеет равномерное распределение выщелачивающих растворов внутри штабеля КВ, необходимое для обеспечения

полной и эффективной насыщенности обрабатываемых руд. Для обеспечения эффективного выщелачивания руд необходимо осуществлять правильный выбор применяемого способа и вида обработки массива штабеля КВ, с учетом особенностей объектов КВ, но данное мероприятие не позволяет полностью решить проблему испарения, разбавления и т.д.

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

Таблица 1

Типизация факторов, влияющих на испарение выщелачивающих растворов при КВ

Фактор	Эффективность фактора	Фактор	Эффективность фактора
Гранулометрический состав руды	<p>Испарение (%)</p> <p>Размер кусков руды, см</p>	Применяемый способ орошения	<p>Испарение</p> <p>2% 4% 15% 30%</p> <p>Внутри штабельное орошение Капельное орошение Орошение спринглерами с крупными каплями Прудковое орошение</p>
Ветровое усилие	<p>Испарение (%)</p> <p>Скорость ветра, м/с</p>	Скорость выпуска растворов	<p>Испарение (%)</p> <p>Скорость фильтрации, см/с</p>
Климатические условия Африки	<p>Испарение, %</p> <p>Тепло Жарко Сухо</p> <p>Умеренная скорость ветра (0-6 м/с) Скорость ветра (6 -20 м/с) Спринклерное орошение</p>	Экранирование штабеля КВ	<p>Испарение, %</p> <p>Только основание штабеля Основание и боковые откосы штабеля Основание, откосы и поверхности штабеля</p>

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.

При орошении изнутри массива КВ значения испарения составляет 2 %, при капельном орошении – 4 %, при орошении спринклерами с крупными каплями – 15 % и при прудковом орошении – 30 %. Вместе с тем было выявлено, что испарение практически отсутствует при экранировании всей поверхности штабеля КВ.

Было установлено, что на величину испарения технологических растворов из штабелей КВ значительно влияют существующие атмосферные условия – нагрев, влажность атмосферы

и ветровые потоки (рис. 2), тепловые и гидравлические свойства выщелачиваемой руды (теплопроводность и гидравлическая проводимость, пористость и др.), которые довольно сложно оценить количественно.

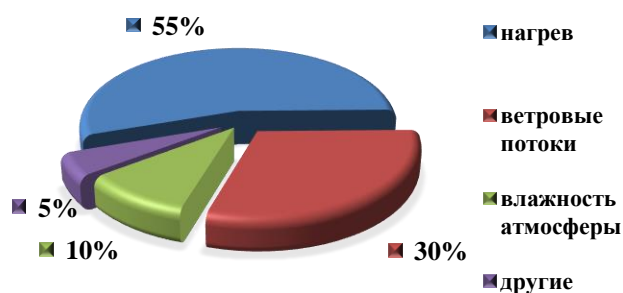


Рис. 2. Процентное соотношение природных факторов, определяющих испарение технологических растворов

Противоположно испарению, сезонное выпадение атмосферных осадков может привести к значительному разбавлению технологических растворов при орошении штабеля КВ, неконтролируемому стоку токсичных технологических растворов за пределы штабеля КВ, а также разрушению целостности штабелей КВ и др.

В условиях сезонного чрезмерного выпадения дождевых осадков (например, в Западной Африке и Центральной Америке, где их количество нередко достигает 2000-2500 мм/год) требуется довольно большие объемы прудов-растворохранилищ: в частности, в Сансу (Ашанти, Гана) для кучного выщелачивания 3000 т/сут. общий объем пруда-накопителя составляет 60000 км<sup>3</sup>.

## 2. Исследование эффективности применения покрытия на основе силикона на объектах кучного выщелачивания

В практике КВ золотосодержащих руд для предотвращения испарения и утечек технологических растворов через боковые поверхности или основание штабеля, или же их разбавления атмосферными осадками, штабель КВ, как правило, изолируют с помощью слоев непроницаемых грунтов (суглинка, супесей или глин, толщиной равной, 15-30 см) или геомембранных пленок (тканепленочных материалов).

В настоящее время, в связи с весьма длительным периодом эксплуатации штабелей КВ, появилась необходимость в разработке и практическом применении более эффективной экранирующей пленки, с высокой химической устойчивостью, которая способствовала бы полному исключению испарения растворов и реагентов, а также снижению отрицательного воздействия атмосферных явлений (радиации, осадков и т.д.), уменьшению затрат на реагенты, способствуя тем самым сохранению необходимого технологического качества растворов выщелачивания, а имела низкую стоимость.

Таблица 2

Результаты измерения скорости испарения

Дни	Пробирка I	Пробирка II	Пробирка III
	Остаток воды, г	Остаток смеси воды и силиконовой жидкости, г	Остаток 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



Были проведены экспериментальные исследования по выявлению оптимальных параметров для использования в качестве экранирующей пленки силикона. В первом варианте наполняли 3 пробирки равной массой воды (пробирка I), смеси воды и силиконовой жидкости (пробирка II) и чистой силиконовой жидкости (пробирка III) и провели измерения испарения по массе (табл. 2). Во втором варианте, в чашках от I-V помещали 15 мл воды с добавкой 0,1, 0,3 мл, 0,5 мл, 0,7 и 0,9 мл силиконовой жидкости, соответственно. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Количество испарившейся жидкости (диаметр чашек = 9,4 см)

Образец Время	I	II	III	IV	V
	0 мин	-	-	-	-
30 мин	1,23	1,31	1,14	0,97	1,3
60 мин	1,19	1,25	1,04	0,66	0,77
90 мин	1,03	1,1	0,97	0,58	0,67
120 мин	н/д	н/д	1,09	0,62	0,68
150 мин	н/д	н/д	1,08	0,62	0,67
180 мин	н/д	н/д	1,21	0,7	0,76
210 мин	н/д	н/д	0,93	0,54	0,6
240 мин	н/д	н/д	1,08	0,59	0,66
270 мин	н/д	н/д	1,07	0,6	0,62

н/д - измерения не проводились ввиду интенсивного испарения

После 20 дней количество испарившейся воды составило всего до 1/2, силиконовой жидкости до 3/4, а всего лишь 1/3 смеси воды и силиконовой жидкости испарилась (рис. 3 а). Это объясняется тем, что молекулы чистой силиконовой жидкости образуют между собой более слабую цепь, чем молекулы воды и смеси воды и силиконовой жидкости.

Таким образом при распылении силиконовой жидкости на поверхности воды, в течение короткого времени наблюдается образование тонкой малофильтрационной поверхностной пленки, которая предотвращает испарение жидкости, что подтверждает высокую эффективность геомембран на основе силикона.

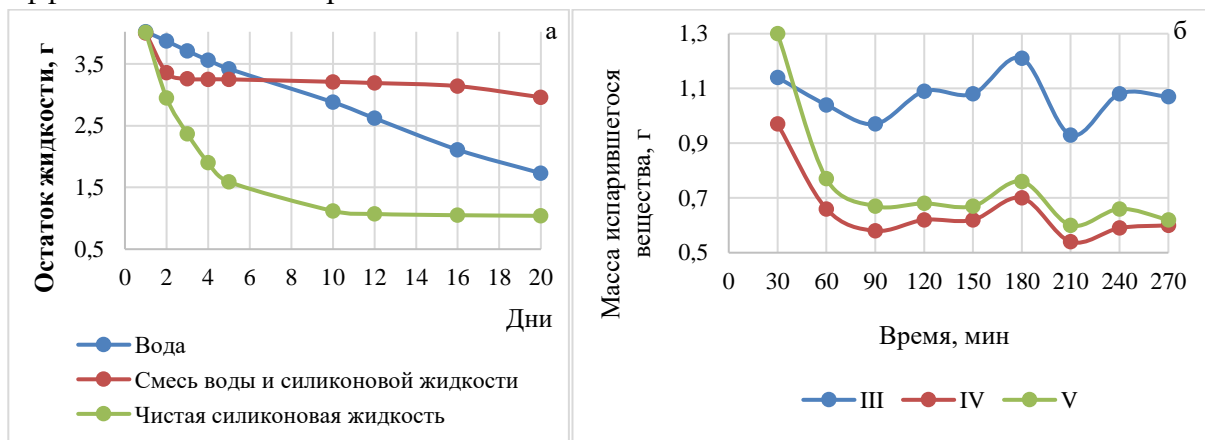


Рис. 3. Динамика испарения:

а – сравнение уровня испарения различных жидкостей; б – испарение вещества в зависимости от объема пленки силиконовой жидкости

Анализ результатов осуществленных экспериментов (рис. 3 б) позволяет определить, что количество испарившейся жидкости и скорость ее испарения на  $1 \text{ м}^2$  меньше в IV и V-ой чашки, в которые вводили 0,7 и 0,9 мл силиконовой жидкости, соответственно.

Силикон после его нанесения на поверхность штабеля КВ обволакивает мелкодисперсный золотосодержащий геоматериал (приповерхностные куски руды), пленкой толщиной 3-5 мм и затвердевает в течение 10-45 с (рис. 4), образуя прочную термозащитную полимерную пленку или покрытие (долговечностью 14-16 месяцев), с полным связыванием поверхностных слоев штабеля (в том числе и пылевидных частиц в поверхностном слое). Весь такого покрытия составляет  $50-1000 \text{ г/м}^2$ .

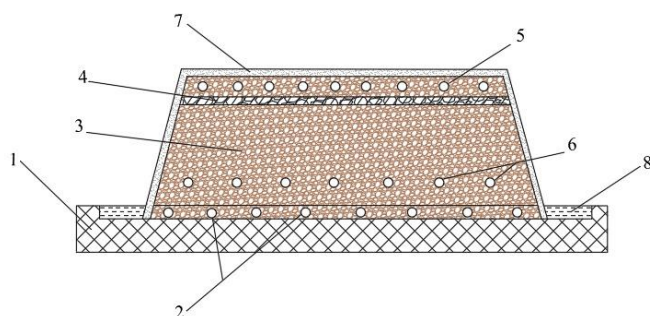


Рис. 4. Схема технологии кучного выщелачивания на основе экранирования поверхности штабеля:

1 - малопроницаемый 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

Формирование нанопленок силикона на поверхности штабеля КВ осуществляется путем нанесения в виде растворов, распыления или капельно-воздушного напыления.

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

Одной из основных проблем КВ является неравномерность обработки массива штабеля выщелачивающими растворами, обусловленная появлением малопроницаемых закольматированных слоев. Этот аспект был выявлен при проведении экспериментальных исследований изменения концентрации золота в выходящих продуктивных растворах, данные которых позволили сделать вывод, что после 20 дней обработки, их качество постепенно снизилось, а кроме того значение скорости их фильтрации также уменьшилась (рис. 5).

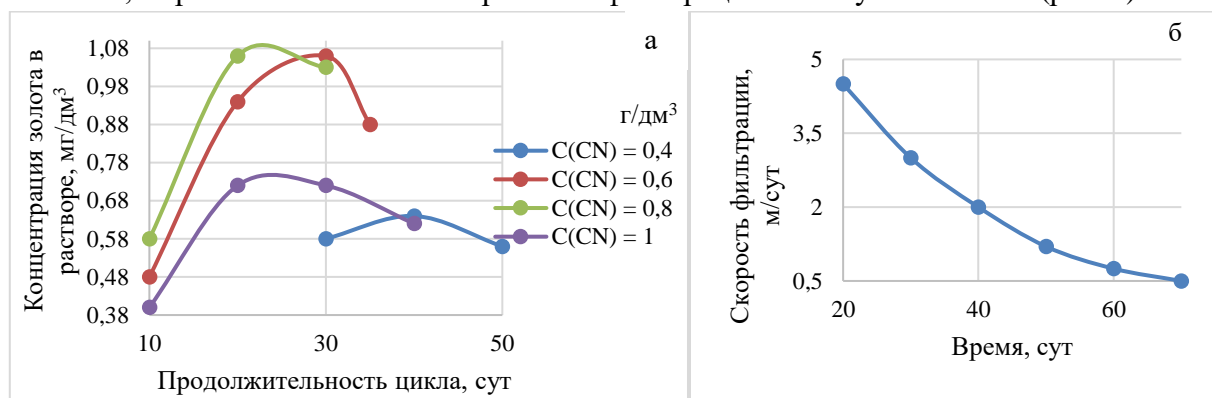


Рис. 5. Изменение параметров кучного выщелачивания:

а – изменение концентрации золота в продуктивных растворах; б – изменение скорости фильтрации

С помощью компьютерной модели, разработанной нами в системе SVOOffice, был осуществлен эксперимент по прогнозированию направления и скорости движения технологических растворов в штабелях КВ в малопроницаемых закольматированных слоях

(рис. 6). Эти малопроницаемые слои представлены участками слежавшейся руды, пористостью 15 % и со значением проницаемости  $0,01 \text{ мкм}^2$ . При этом проницаемые участки штабеля КВ имеют пористость равную 35 %, при проницаемости –  $2,3 \text{ мкм}^2$ .

В результате осуществления исследований было установлено довольно низкое значение ( $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$ ) гидравлической проводимости растворов, наблюдаемое в малопроницаемых закольматированных слоях.

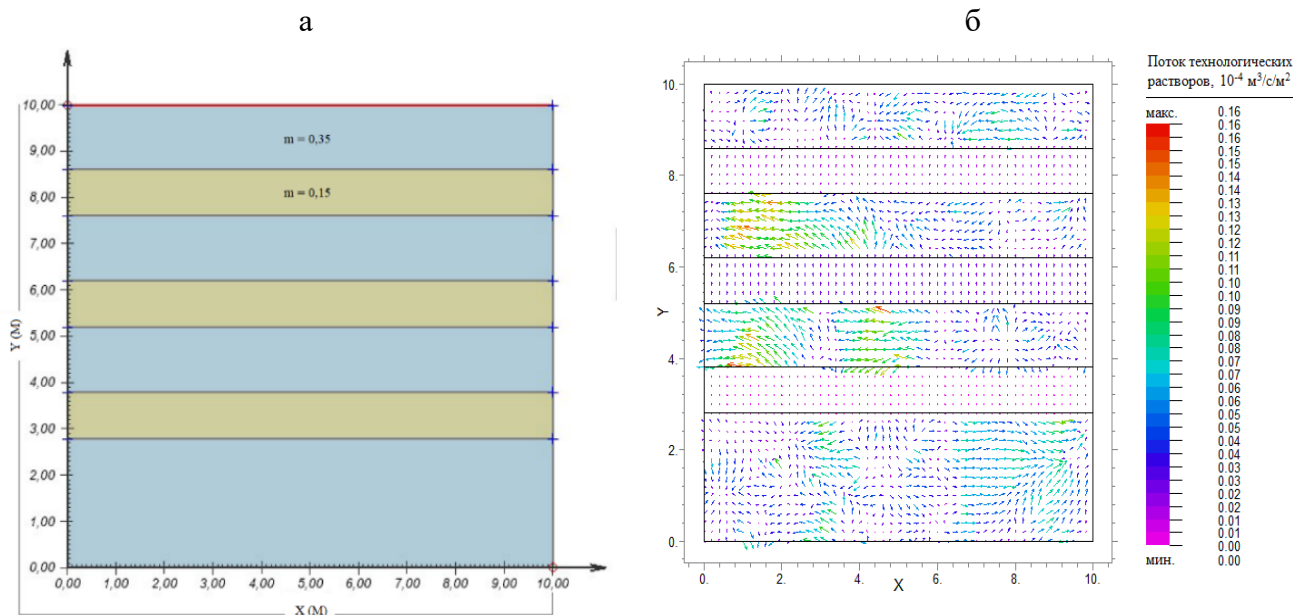


Рис. 6. Компьютерная модель:

а – 2D геометрия образца, б – модель направления движения технологических растворов в малопроницаемых слоях

Для более равномерной проработки всего массива штабеля КВ были разработаны устройство мобильных малогабаритных роботов (рис. 7), предназначенных для работы в несвязанной среде и соответствующая технология интенсификации кучного выщелачивания металлов из руд с их помощью.

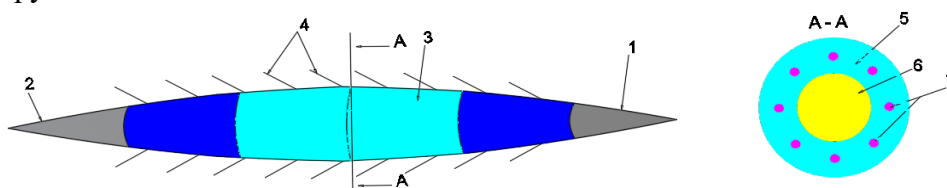


Рис. 7. Схема мобильного малогабаритного робота:

1 – головной сегмент, 2 – задний сегмент, 3 – сегменты, 4 – движители, 5 – сечение тела робота; 6 – микроканал заполненный проводящими сплавами; 7 – датчики

Головной сегмент и движители способствуют движению малогабаритного робота вперед по методу смещения разрушенных пород в различные стороны. Непосредственное перемещение такого робота осуществляется с помощью движителей-щетинки (размещенных по окружности на каждом его сегменте тела, кроме головного и заднего). Робот перемещается со средней скоростью 1-2 см/мин. При этом возможно движение малогабаритного робота как вперед, так и назад.

Для обеспечения перемещения малогабаритного робота используемые движители-щетинки выполнены из материала, обладающего свойством памяти. При подаче на них,

расположенных в задней части робота, электрического сигнала происходит их распрямление и упор в стенки канала, позволяющее осуществлять вытягивание первой половины тела вперед, с последующей фиксацией нового положения щетинками из первой половины тела, складывание щетинок задней части и ее подтягивание. Далее цикл повторяется.

В устройстве такого робота имеются интегрированные технологии геолокации, позволяющие диспетчеру получать всю необходимую информацию о его передвижениях и его работоспособности в массиве штабеля КВ.

Для повышения равномерности обработки золотосодержащих руд штабеля КВ в его массив (рис. 8), вводят группу роботов так, чтобы охватить всю площадь и мощность малопроницаемых закольматированных образований (слоев).

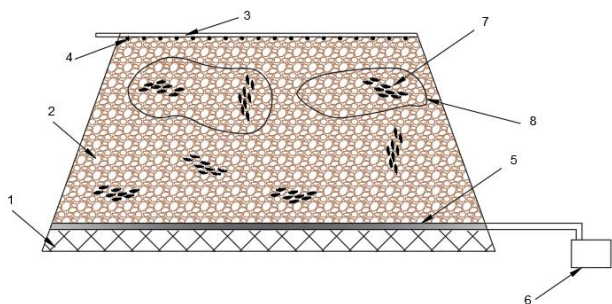


Рис. 8. Схема штабеля КВ:

- 1 – антифильтрационное основание;
- 2 – штабель КВ; 3 – система перфорированных трубопроводов, для подачи технологических растворов; 4 – отверстия в трубопроводе для нагнетания выщелачивающих растворов в массив штабеля КВ; 5 – канавки; 6 – зумпф; 7 – группа роботов; 8 – малопроницаемый слой

При этом направление формирующихся каналов в малопроницаемом слое зависит от содержания металлов, в геоматериале этого слоя, и колеблется от вертикального – 90° (при отсутствии металлов), наклонного – 45° (при среднем содержании металлов) и горизонтального направления (при максимальном содержании металлов) – (рис. 9).

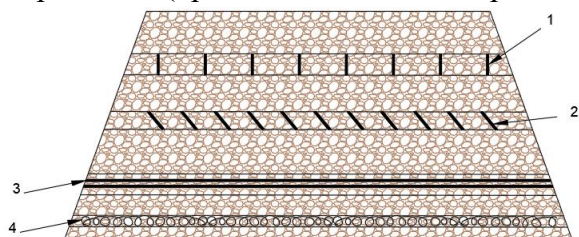


Рис. 9. Направление формирующихся каналов:

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

Выбор направления движения специальных малогабаритных роботов в малопроницаемых слоях, где перемещаются роботы, осуществляется на основе количественной оценки в них удельного содержания золота (рис. 10).

Таблица 4

Формулы для расчета проницаемости

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

В ходе исследований была разработана математическая модель, позволяющая установить зависимость проницаемости от объема исследуемого слоя, объема пор в выщелачиваемых рудах, числа, диаметра, высоты и угла наклона каналов, а также начальной пористости слоя (табл. 4).

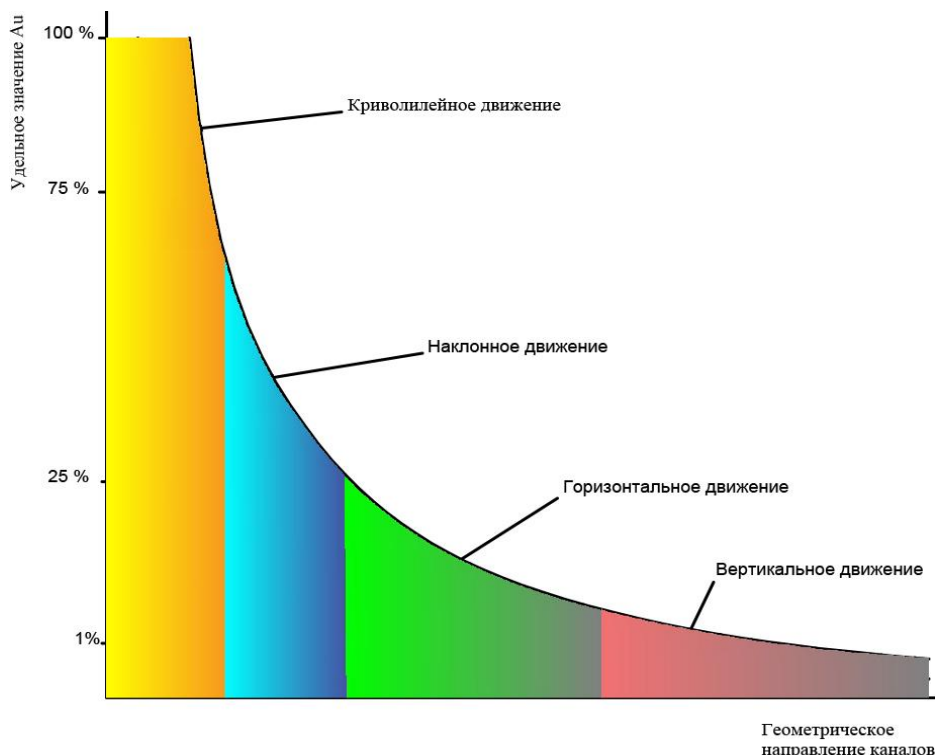


Рис. 10. Выбор геометрического направления каналов в зависимости от удельного значения золота в малопроницаемых слоях

Теоретические расчеты были осуществлены для малопроницаемого слоя длиной в 1 м, шириной 1 м и мощностью 1 м при числе каналов, равном 100 (рис. 11). Результаты расчета математической модели для наклонных каналов оказались довольно схожими с полученными данными для вертикальных, с незначительным отличием.

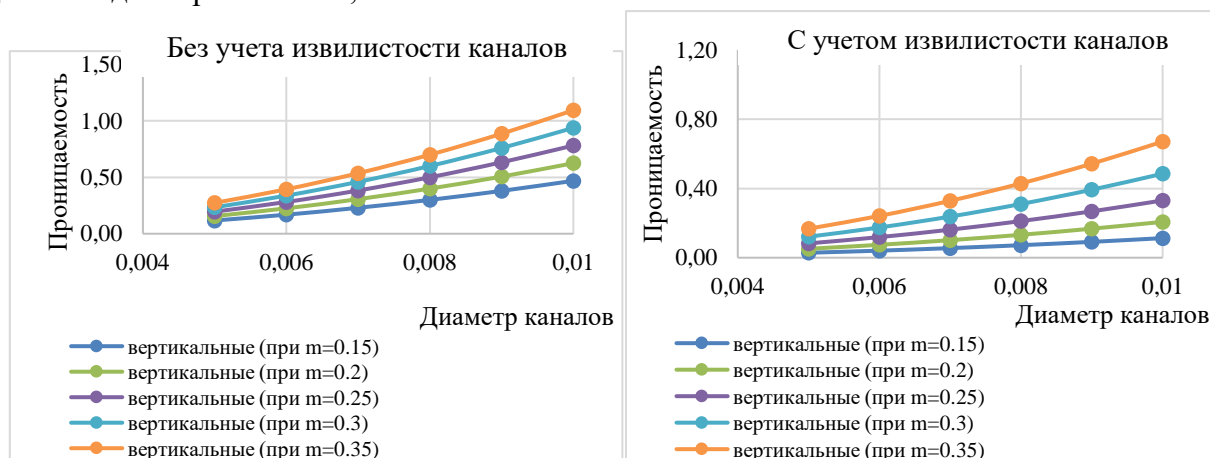


Рис. 11. Зависимость значений проницаемости ( $\times 10^6 \text{ м}^2$ ) от диаметра поровых каналов (м)

Разработанная в системе SVOffice компьютерная модель показала, что при обеспечении улучшения проницаемости малопроницаемых слоев до  $1 \text{ мкм}^2$ , за счет использования разработанных малогабаритных роботов, одновременно восстанавливается должное значение гидравлической проводимости технологических растворов (рис. 12).

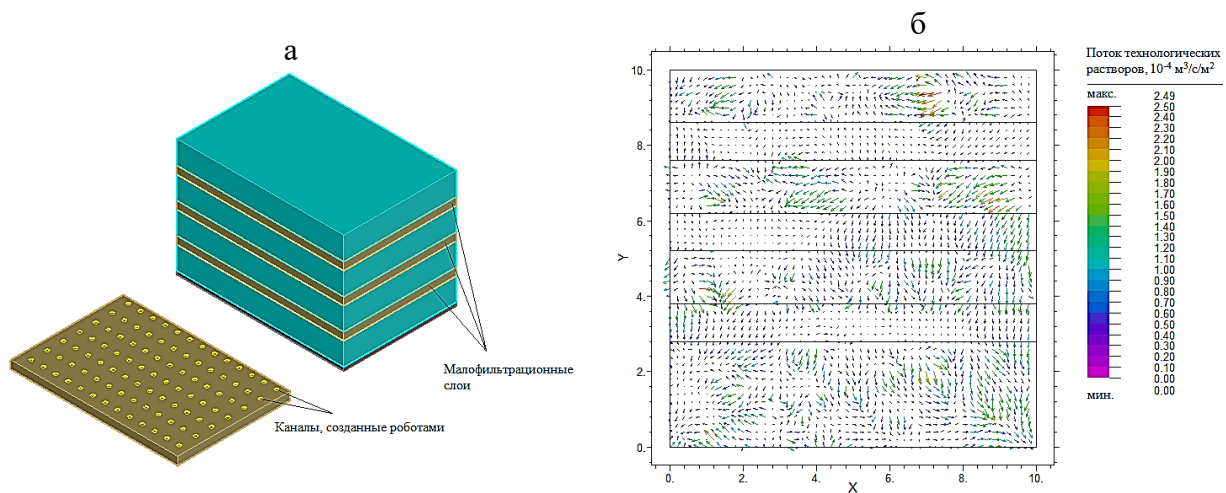


Рис. 12. Увеличение проницаемости малопроницаемых слоев:

а – вертикальные каналы, созданные роботами; б - модель движения технологических растворов после прохождения роботов

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  $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}^2$ .

Кроме компьютерного моделирования было осуществлено лабораторное исследование значений проницаемости выщелачиваемого массива (рис. 13).

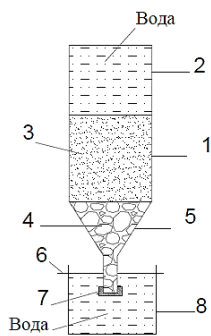


Рис. 13. Схема лабораторной фильтрационной установки:

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

Обработке подвергали 6 образцов непроницаемой цементно-песчаной смеси высотой 7 см, диаметром 9 см с вертикальными каналами и 6 образцов с наклонными каналами, в центральной части, которых создают единичные каналы диаметрами 5-10 мм. Все показатели измерений значений фильтрации были получены для участка площади  $127 \text{ см}^2$ , после заполнения фильтрационной трубы водой (табл. 5).

Таблица 5

Расчетные значения фильтрации

Диаметр канала d, см	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Коэффициент фильтрации $K_f$ для вертикальных каналов, см/с	0,131	0,141	0,150	0,170	0,188	0,209
Коэффициент фильтрации $K_f$ для наклонных каналов, см/с	0,109	0,116	0,132	0,142	0,165	0,175

Значение коэффициента фильтрации при создании пористых каналов диаметром 5 мм составляет около 0,131 см/с для вертикальных и 0,109 см/с для наклонных каналов, и оно увеличивается по мере увеличения их диаметров (рис. 14).

Экспериментальные данные подтверждают результаты, полученные в компьютерной и математической моделях.

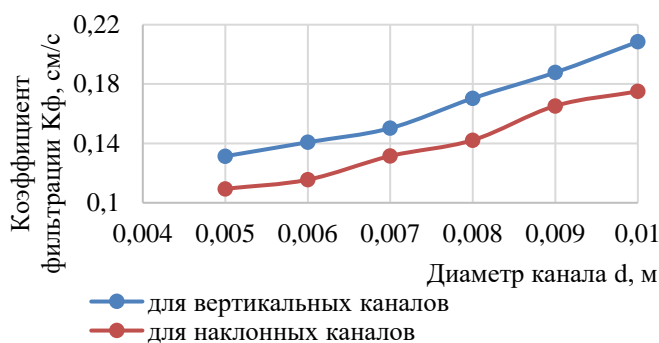


Рис. 14. Зависимость проницаемости от величины диаметра поровых каналов

Для повышения пористости массива требуется полное освобождение ранее перекрытых фильтрационных путей на основе обработки малофильтрационных закольматированных слоев большим количеством используемых роботов.

Таким образом, проницаемость штабеля КВ при наличии каналов, образованных роботами, увеличивается более чем в 100 раз.

Данное мероприятие способствует не только созданию и/или расширению уже имеющихся каналов в выщелачиваемых золотосодержащих рудах, но также ускорению вскрытия металла в минеральной матрице малопроницаемого закольматированного слоя. И оно реализуется так, чтобы соответствовать эффективному значению коэффициента фильтрации, обеспечивающему оптимальное (равномерное) просачивание технологических растворов внутри штабеля КВ и выщелачивания металла.

#### 4. Исследование возможности извлечения нанозолота в процессе кучного выщелачивания

Существенно влияющим на интенсификацию технологии КВ аспектом является крупность и форма нахождения золота в рудах. Золото, находящееся в минеральной матрице (кристаллической решетке минералов-носителей) таких руд обычно имеет наноразмерный и даже кластерный уровень рассеяния (рис. 15). Размеры кластеров нанозолота в основном колеблются от 50 до 152 нм (составляя в среднем 91,8 нм). При этом нанозолото представлено разными по размеру сферическими и эллипсоидальными нанообразованиями, приводящими к его технологическим потерям.



Рис. 15. Наночастицы золота в руде

Ученными и практиками в технологических растворах были выявлены наночастицы золота, которые покрыты нанопленками углерода и не осаждались смолами и активным углем, приводя к росту их потерь.

Известно, что золото представляет собой весьма пластичный металл, поэтому его частицы под действием внешних, прежде всего, механических факторов, со временем «уплощаются», т.е. преобразуются в различные мельчайшие пластинки и чешуйки. Максимальные размеры таких плоских частиц золота достигают 0,1 мм, а минимальные приближаются к коллоидным, т.е. они тоже относятся к наноформам.

Несмотря на относительно высокую плотность золота, его плоские чешуйки (даже при размере более 1 мм) и нанопленки довольно хорошо удерживаются на поверхности воды или технологических растворов, т.е. обладают определенной плавучестью. Данное явление может быть объяснено на основе проявления сил поверхностного натяжения воды, механизмы работы которого определяются ван-дер-ваальсовым взаимодействием.

При энергии взаимодействия наночастиц золота с молекулами воды ниже энергии взаимодействия между сами молекулами воды (при  $\epsilon_{\text{вода-золото}} < \epsilon_{\text{вода-вода}}$ ) наночастицы плавают, а в противоположном случае (при  $(\epsilon_{\text{вода-золото}} > \epsilon_{\text{вода-вода}})$ ) происходит их осаждения.

Было установлено, что в массиве штабеля КВ перенос взвешенных в технологических растворах наночастиц плавучего золота играет довольно значительную роль. Так, некоторое количество плавучего нанозолота задерживается в водотоках, находящихся внутри штабеля КВ, преимущественно, в глинистом веществе (илисто-глинистой фракции) или же теряется в сборочных бассейнах с илом. При этом общие потери плавучего нанозолота с растворами при кучном выщелачивании приходится на нанозолото размером от 5 до 120 нм.

Потери такого нанозолота связаны с комплексностью строения его наноструктуры и чем сложнее структура, тем труднее осуществляется его извлечения.

Для снижения потерь с плавучими нанозолотинами при переработке золотосодержащих руд технологиями кучного выщелачивания (КВ), была разработана более эффективная технология (рис. 16), в которой растворы цианидов, обрабатывают веществами, в наиболее эффективном месте, понижающими величину их поверхностного натяжения.

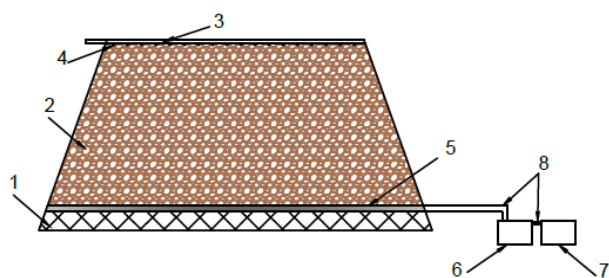


Рис. 16. Схема кучного выщелачивания золотосодержащих руд:

1 – антифильтрационное основание; 2 – 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

К веществам, уменьшающим поверхностное натяжение технологических растворов, относятся следующие ПАВ: жирные кислоты, детергенты, фосфолипиды, амфифильные вещества (т.е. обладающие как гидрофильными, так и гидрофобными свойствами), преимущественно гексадеканол или цетиловый спирт  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_2\text{OH}$ , а кроме этого – октадеканол или стеариловый спирт  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_2\text{OH}$ . Также используются неионогенные ПАВ (серии полисорбатов Tween 20, Tween 40, Tween 60 и Tween 80), которые позволяют существенно снизить значения поверхностного натяжения жидкостей (до 0,040 Н/м и менее) (рис. 17).



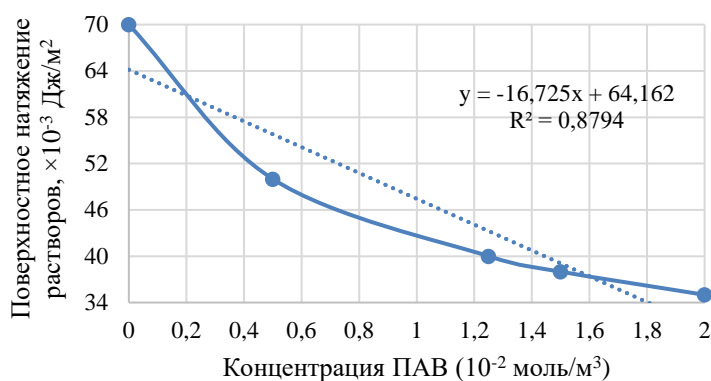


Рис. 17. Влияние концентрации ПАВ на поверхностное натяжение растворов

В результате уменьшения поверхностного натяжения выщелачивающих растворов нанозолотины теряют свою первоначальную плавучесть и опускаются из них на дно, где будут подвергнуты процессам их высадки (сбора и извлечения). При этом эффективная концентрация золота в продуктивных растворах находится в пределах от 0,4 г/дм<sup>3</sup> до 1 г/дм<sup>3</sup>.

### 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 мелкодисперсные 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/м<sup>2</sup>.

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 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 коагуляции.

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

5. Для обеспечения интенсификации КВ золота весьма важное значение имеет крупность его золотин. 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).

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

##### **Научные статьи в изданиях, опубликованных в изданиях базы Scopus и Web of Science:**

1. **Тчаро Х.** 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.

2. **Тчаро Х.** Интенсификация кучного выщелачивания золота из тонкодисперсных руд с использованием нанотехнологий / Воробьев А. Е., Чекушина Т. В., Каки К., Тчаро Х., и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 1. С. 160–174.

3. **Tcharo H.** Geotechnologies of heap leaching the gold from rock dumps / Vorobyev A.E., Chekushina T.V., Tcharo H. et al. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. T.19. №1.3. 2019. С. 841–848.

4. **Tcharo H.** Development of methods for anti-filtration formations destruction inside a heap leach pile / Tcharo H., Koulibaly M., Tchiboza F.K.N. / 14th International Congress for Applied Mineralogy. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. pp. 143–145.

#### **Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

5. **Тчаро Х.** Сравнительный анализ свойств нанорельефа различных золотосодержащих сульфидов / Воробьев А.Е., Тчаро Х. // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования издательство. № 1. 2016. С. 78–84.

6. **Тчаро Х.** Основные факторы, определяющие эффективность орошения штабеля КВ / Воробьев А.Е., Тчаро Х. // Вестник Евразийской науки. 2019. №1. <https://esj.today/PDF/51NZVN119.pdf>.

7. **Тчаро Х.** Развитие применяемых при кучном выщелачивании покрытий и экранов / Воробьев А.Е., Тчаро Х. // Вестник Евразийской науки. 2019. №6. <https://esj.today/PDF/97NZVN618.pdf>.

8. **Тчаро Х.** Моделирование проницаемости штабеля для стабилизации фильтрационных свойств выщелачивающих растворов // Вестник Евразийской науки. 2020. №5, <https://esj.today/PDF/12NZVN520.pdf>.

#### **Патенты на изобретение:**

9. 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.

10. 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. – 4 с.

11. Устройство мобильного малогабаритного робота-червяка: Положительное решение о выдаче евразийского патента на изобретение № 201900568. заявл. 2019 / Воробьев А.Е., **Тчаро Х.** – 7 с.

12. 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.

#### **Монографии и главы в монографии:**

13. Тчаро Х. «Нанопленки» // Глава в монографии Воробьев А.Е., Воробьев К.А. Наноматериалы и нанотехнологии: Особенности протекания физико-химических процессов в наносистемах: Монография. – М.: Издательство «Palmarium Academic Publishing (Saarbrücken)», 2018. – С. 152–180.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность своему 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 значимый методический вклад в работу над диссертацией. Отдельная благодарность профессору Каки К. (Университет Абомей-Калави, Республика Бенин) за постоянную заботу и помощь во время учебы в России.