© Д.М. Шестернев, В.П. Мязин,
С.Б. Татауров, А.Н. Черепанов,
2006

УДК 622. 234.42

Д.М. Шестернев, В.П. Мязин, С.Б. Татауров,
А.Н. Черепанов

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИЛЬТРАЦИИ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ ОКОМКОВАНОЙ СУГЛИНИСТОЙ РУДЫ В ПЕРИОД СТРОИТЕЛЬСТВА И ВОДОНАСЫЩЕНИЯ ШТАБЕЛЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Семинар № 18

Общая характеристика проблемы

В настоящее время накоплен существенный опыт использования классической технологии кучного выщелачивания (КВ) в Сибири. Его анализ показывает, что существует много проблем, без решения которых не удается достичь высокой эффективности КВ.

В практике КВ часто применяются многоярусные штабели высотой до 10-20 и более метров. В существующей литературе сведений об изменении гранулометрического состава и коэффициентов фильтрации при их строительстве из окомкованой руды и после полного водонасыщения практически нет. В тоже время известно, что даже при незначительной бытовой нагрузке отдельные горизонты окомкованных руд разрушаются, что не может не сказаться на эффективности извлечения золота при КВ. В связи с этим, трудно согласится, что увеличение объемов куч однозначно способствует повышению эффективности КВ окомкованных глинизированных руд. Причем, это следует не только из теоретических предпосылок, но и из отрицательного опыта кучного выщелачивания золота из окомкованных руд в криолитозоне Сибири [1 - 4, 7 и др.].

Исходя из этого и в соответствии с программой фундаментальных исследований по изучению кинетики и механики криогенных процессов, в лаборатории общей криологии ИПРЭК СО РАН был проведен комплекс экспериментальных лабораторных и натурных исследований. Основными их задачами являлись: 1) изучение коэффициентов фильтрации руд прошедших стадию криогенеза и залегающих в естественных условиях (на примере месторождения «Погромное»); 2) выявление причин и установление закономерностей изменения коэффициентов фильтрации и гранулометрического состава окомкованной руды месторождения «Погромное».

Методика исследований

Экспериментальные исследования выполнены с использованием руд месторождения «Погромное» (Центральное Забайкалье). По вещественному составу, физико-механическим свойствам, крупности и фазовому составу золота

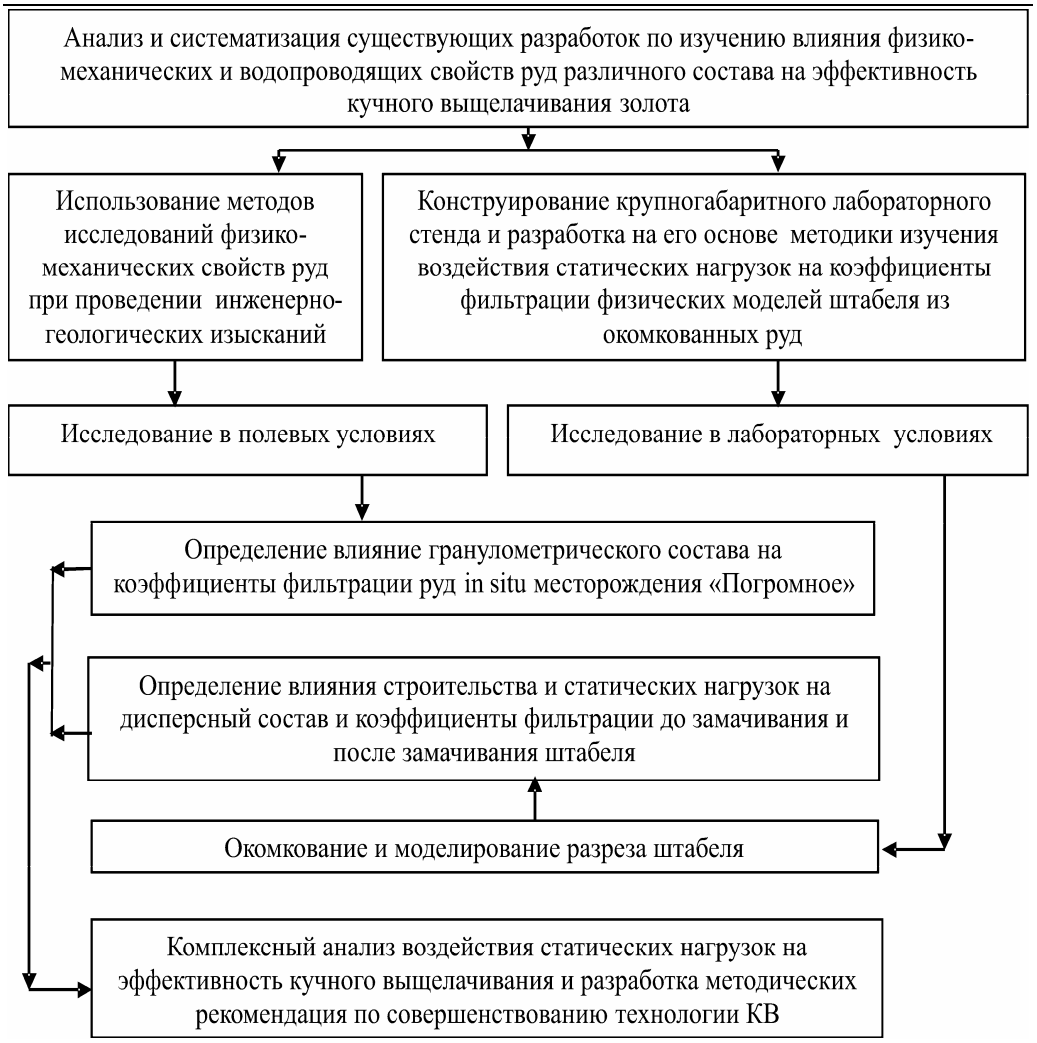

Рис. 1. Блок-схема исследований водопроводящих свойств и дисперсности руд и окатышей в натурных и лабораторных условиях

исследуемые окисленные золото-кварц-лимонитовые руды месторождения «Погромное» относятся к благоприятным для извлечения из них золота методом кучного выщелачивания.

Методика комплексных исследований гранулометрического состава и фильтрационных свойств окомкованной руды штабеля, изменяющихся в процессе строительства и в ходе КВ предусматривала поэтапное решение проблемы (рис. 1).

На первом этапе на основе критического анализа фондовых и опубликованных источников была сформулирована цель и основные задачи исследований по установлению причин снижения эффективности кучного выщелачивания штабелей из окомкованной руды.

На втором этапе были решены проблемы конструирования крупногабарит-

ного лабораторного стенда. На его основе разработана методика изучения коэффициентов фильтрации штабеля из окомкованных руд. Параллельно с этим применение методик, используемых при инженерно-геологических изысканиях, позволили установить физико-механические свойства руд. Кроме того, в полевых условиях были проведены исследований коэффициентов фильтрации руд различного гранулометрического состава, из которых были изготовлены модели штабелей.

На третьем этапе с учетом спектра изменений гранулометрического состава окомкованной руды, бытовой нагрузки в 10-ти метровом штабеле КВ было исследовано влияние состава, структуры и свойств окомкованных руд на величину коэффициента фильтрации штабеля в диапазоне изменений внешних нагрузок от 7500 до 15000 кгс/м^2 (73.5–47.1 кПа).

Для проведения окомкования использовали суглинистое минеральное сырье (руду) крупностью -20 мм. В качестве связующего вещества был выбран цемент марки ПЦ-400. Его концентрация принималась равной 4 кг на тонну руды. Концентрация воды составляла 20 л/т. Гранулометрический состав окомкованной суглинистой руды был следующим: -40+20 (22 %), -20+10 (35.6 %), -10+5 (17.9 %), -5+2 (15.2 %), -2+1 (5.1), -1+0.5 (1.7 %), -0.5+0.1 (0.7 %), -0.1 (0.5 %) мм. Влажность окомкованной руды на начало экспериментальных исследований колебалась от 0.11 до 0.17 д.ед, прочность 68.3 кПа (6965 кгс/м^2).

Прочность окатышей, изготовленных нами в лабораторных условиях, сравнима с прочностью окатышей, равной 69.5 кПа (7100 кгс/м^2), используемых при кучном выщелачивании на Куранахском месторождении [3].

Определение влияния статических нагрузок на фильтрационные свойства окомкованной руды по разрезу штабеля КВ проводили с использованием методических разработок С.Р. Месчяна [5]. Конструкция крупногабаритного стенда для производства исследований, разработанная в ЛОК ИПРЭК СО РАН показана на рис. 2.

В проектах разработки месторождений, как правило, предусматривается использование штабелей высотой 7.5–10 м и выше. Плотность окомкованной руды в штабеле в среднем составляет 1500 кг/м^3. Оценка бытового давления на различных глубинах штабеля, оценивалась по формуле $P_i = h_i \cdot \rho$ (здесь P – давление на подошве рассматриваемого слоя окомкованной руды, кгс/м^2, h – мощность слоя окомкованной руды штабеля, м, ρ - плотность окомкованной руды штабеля $\rho = const = 1500$, кг/м^3, i – глубина подошвы слоя окомкованной руды).

Для изучения влияния изменения бытовой нагрузки на гранулометрический состав окомкованной руды штабеля высотой десять метров при строительстве и водонасыщении была выполнена серия экспериментов. В первой серии, для каждого эксперимента формировали две аналогичные модели штабеля, на каждую из которых задавали равную нагрузку, равную бытовому давлению на заданной глубине. После завершения уплотнения, для одной из моделей проводился гранулометрический анализ. Это позволяло оценить изменения гранулометрического состава окомкованной руды при строительстве штабеля. Вторую модель использовали для определения коэффициента фильтрации.

Коэффициент фильтрации $K_ф$ руд, м/сут	Значение статистических параметров			
	A	*b*	*b1*	*R*
	$K_ф = a + be^{(C/b1)}$			
$K_{пес.}$	1.7	0.3	19.8	0.78
$K_{суп.}$	-0.008	0.014	18.9	0.63
$K_{суг.}$	0.005	$9.4 \cdot 10^{-4}$	8.7	0.57

Примечание: *R* – коэффициент корреляции, *a*, *b*, *b1* – коэффициенты аппроксимации уравнения, С – содержание крупнообломочных частиц в горной породе (аргумент уравнения)

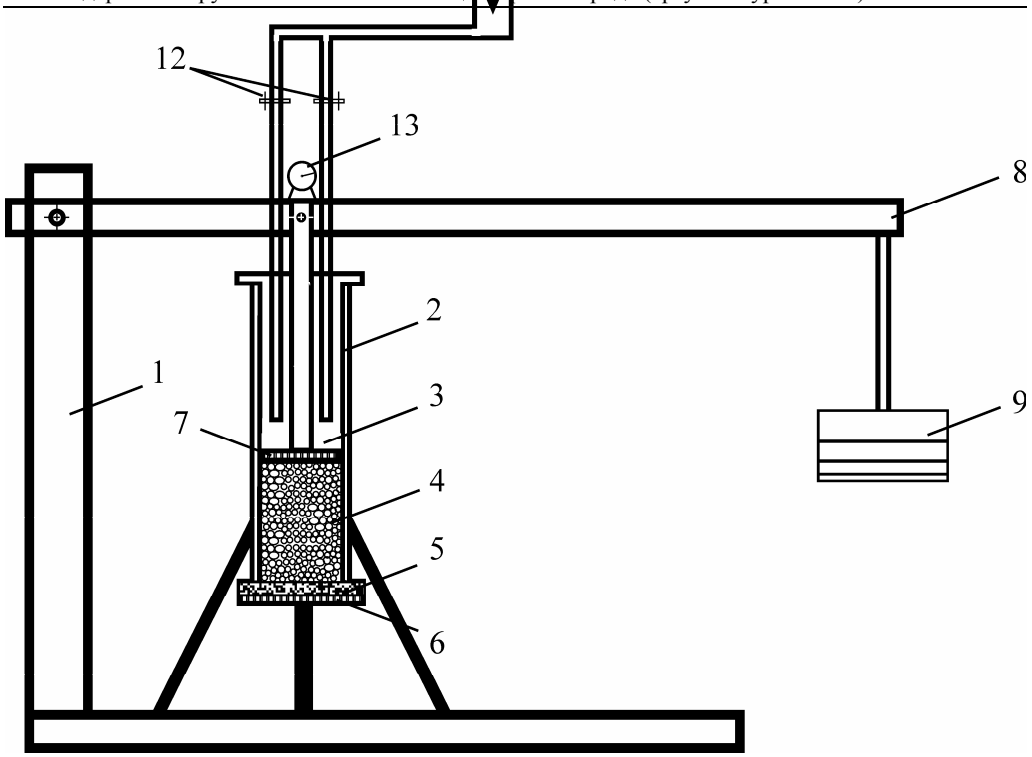

Рис. 2. Схема крупногабаритного лабораторного стенда для исследований воздействия статической нагрузки на изменение дисперсности руды штабеля и коэффициента фильтрации: *1* – станина; *2* – рабочая камера; *3* – полимерный материал для равномерного распределения жидкости; *4* – окомкованная руда; *5* – фильтрующий слой (галька); *6* – перфорированная нижняя крышка кассеты; *7* – поршень с перфорацией; *8* – рычаг; *9* – груз; *10* – емкость с жидкостью; *11* – патрубок для подачи жидкости; *12* – дозаторы; *13* – индикатор часового типа

Вторая серия экспериментов отличалась тем, что во время уплотнения аналогичных по составу двух моделей штабеля при тех же нагрузках, что и в первой серии, в рабочую камеру, подавались растворы. Расход раствора для орошения исследуемых моделей (площадь сечения 0.024 м^2) в крупногабаритной установке был постоянным в течение эксперимента. При достижении заданной нагрузки одну из моделей использовали для установления влияния водонасыщения на изменение гранулометрического состава окомкованной руды, во второй определяли значения коэффициента фильтрации.

На завершающей стадии исследований производился комплексный анализ воздействия статических нагрузок на гранулометрический состав окомкованной суглинистой руды, воздействия изменения гранулометрического состава на величину коэффициента фильтрации, и в целом на эффективность кучного выщелачивания. Это позволило высказать ряд предложений по совершенствованию технологии КВ золота в суровых климатических условиях Сибири.

Определения гранулометрического состава и физико-механических свойств окомкованной руды выполняли до и после проведения каждого в отдельности эксперимента, количество которых в сериях изменялось от 5 до 10.

Для оценки изменений гранулометрического состава и коэффициентов фильтрации в процессе строительства и замачивания штабеля КВ использовались иодидные растворы.

Результаты исследований

Изменение коэффициента фильтрации руд зоны криогенеза с песчаным $K_{пес}$, супесчаным $K_{суп.}$ и сугли-нистым $K_{суг.}$ мелкоземом в зависи-мости от содержания в них круп-нообломочных частиц C подчи-няется экспоненциальному закону (таблица). Значения коэффициентов корреляции максимальны для руд с песчаным мелкоземом, минимальны - для руд с суглинистым мелкоземом. По-видимому, это следствие большей неоднородности строения руд с суглинистым мелкоземом, обусловленной сложной дифференциацией крупнообломочных фракций по всему разрезу криогенной коры выветривания. Несомненно, это необходимо учитывать при использовании руд данного типа для окомкования, и последующего КВ.

Экспериментальные лабораторные исследования показали, что при достижении бытовой нагрузки штабеля более 7500 кгс/м^2 (73.5 кПа) в процессе строительства происходит увеличение дисперсности окомкованных руд штабеля без существенного образования пылевато-глинистой составляющей. Указанные выше статические нагрузки формируются в штабеле на глубине 5 м. Дальнейшее увеличение высоты штабеля ведет к разрушению окатышей, находящихся ниже этого слоя. На подошве штабеля высотой 10 м она достигает 147.1 кПа (15000 кгс/м^2). Моделирования условий строительства и водонасыщения штабеля высотой 10м позволило установить закономерность изменения коэффициента фильтрации по глубине штабеля из окомкованной суглинистой руды, при изменении ее дисперсности на глубинах от 5 до 10 м (рис. 3).

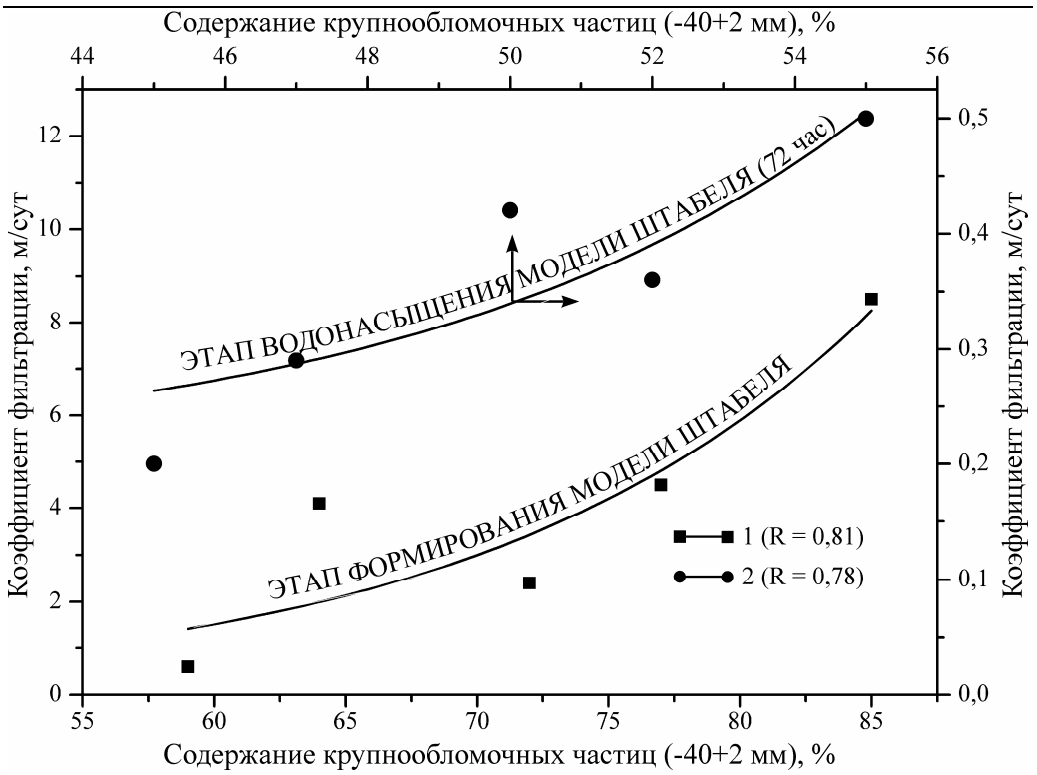

Рис. 3. Изменения коэффициента фильтрации окомкованной руды (окатыши 40+2 мм), изготовленной из руды слоя криогенеза месторождения «Погромное» в зависимости от содержания окатышей по глубине штабеля (Н, м): 1 – до водонасыщения; 2 – после водонасыщения

На этапе формирования штабеля содержание окатышей (-40+2 мм) с глубины 5 до 10 м уменьшилось от 85 до 57%. Содержание песчаных частиц руды увеличилось до 43%. В результате снижение $K_ф$ составило от 8.5 до 0.6 м/сут (рис. 3, кривая I).

После полного водонасыщения содержание крупнообломочных фракций (-40+2 мм) уменьшилось с 85 до 45%. В отличие от предыдущего этапа в составе руды, вновь появились суглинистый мелкозем, существовавший до окомкования. Его содержание достигло 55 %, что всего на 10-15% меньше содержания мелкозема в исходной руде. В результате коэффициент фильтрации по глубине штабеля снизился от 0.5 до 0.2 м/сут (рис. 3, кривая II). Темп снижения значений коэффициента фильтрации для окомкованной руды до водонасыщения при уменьшении содержания окатышей составил 0.28, после водонасыщения – 0.0075 м/сут.

Таким образом, зависимость изменения коэффициента фильтрации от содержания крупнообломочных фракций в руде in situ месторождения «Погромное» и окомкованной руды в штабеле имеет аналогичный характер. При этом темп снижения коэффициента фильтрации в них практически совпадает. Изменение дисперсности окомкованной руды в штабеле до водонасыщения не приводит к разрушению окатышей с образованием глинистого мелкозема. Это

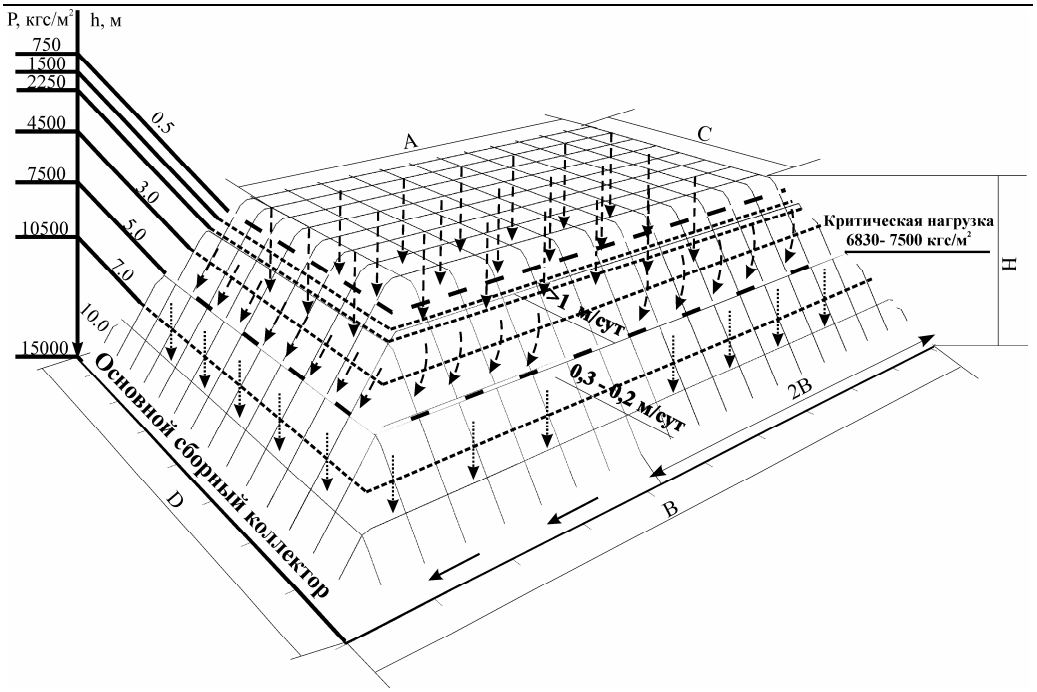

Рис. 4. Схема фильтрации растворов в период работы штабеля КВ (при Н=10 м)

происходит при водонасыщении штабеля, когда действуют физико-химические процессы (гидратация, растворение и т.д.), приводящие к разрушению структурных связей. Этим и объясняется то, что величина коэффициента фильтрации разрушенной окомкованной руды после водонасыщения близка к значению коэффициентов фильтрации руд в естественном залегании, но не достигает их. В то же время она находится за пределами допустимых значений коэффициентов фильтрации равных 0.5 м/сут, требуемых для эффективного применения технологии кучного выщелачивания [4].

Для экспериментальной проверки эффективности КВ в результате снижения коэффициентов фильтрации обусловленного разрушением окомкованной руды при предельных нагрузках от выше лежащей породы был создан трансформер (рис. 4).

Его технические характеристики позволили выполнять многофункциональные исследования физической модели штабеля в масштабе 1:100 [6, 8].

В результате установлено, что скорость движения потока на подошве верхнего слоя штабеля, эквивалентной мощности равной 5 м, на порядок выше скорости потока в слое штабеля КВ аналогичной эквивалентной мощности, следовательно эффективность извлечения золота в первом случае следует ожидать существенно больше, чем во втором.

Выводы

1. Разработана методика лабораторных исследований изучения изменения фильтрационных свойств окомкованной руды с использованием физических моделей штабеля КВ.

2. Натурными исследованиями доказано, что уменьшение количества крупнообломочных частиц в песчаных, супесчаных и суглинистых грунтах естественного залегания приводит к уменьшению скорости фильтрации по экспоненциальной кривой. Так уменьшение крупнообломочных частиц (-40+2 мм): а) в песчаных грунтах от 90 до 0 % приводит к уменьшению коэффициента фильтрации от 35 до 0.5 м/сут; б) в супесчанных грунтах соответственно от 50 до 0 % и от 0.15 до 0.005 м/сут; в) в суглинистых грунтах от 35 до 0 % и 0.04 до 0.0014 м/сут. При этом темп снижения значений коэффициента фильтрации для песчаных грунтов при уменьшении содержания крупнообломочных частиц на 1 % составил 0.38, в супесчаных грунтах – 0.003, в глинистых грунтах 0.001 м/сут.

3. Установлено, что изготовленные окатыши с использованием 4-5 кг/т разрушаются в сухом виде: при нагрузке более 68.3 кПа (6965 кгс/м^2) без образования пылевато-глинистой составляющей; после водонасыщения в течение 72 суток.

4. Выявлено, что нагрузки, разрушающие окатыши при насыпном весе окомкованной руды 1500 кг/м^3, формируются в штабеле высотой более 5 м.

5. Из полученных результатов следует, что для повышения эффективности кучного выщелачивания окомкованных суглинистых руд целесообразно отказаться от дальнейшего совершенствования экстенсивных технологий КВ (путем увеличения объема руд с увеличением высоты штабеля более 5 м и продления периода за счет создания теплоизоляционного покрова из крупнообломочного материала). Более эффективным на наш взгляд будет создание интенсивных технологий КВ, предусматривающих сокращение пе-риода кучного выщелачивания золота. Наиболее оптимальной она будет в том случае, если начало и завершение этого периода будет производиться в теплое время года. Это возможно в Сибири при использовании штабеля из окомкованной суглинистой руды высотой не более 5 м с объемом до 150 000 т.

Для доизвлечения золота в этом случае можно использовать предложенную нами энергосберегающую технологию [9]. Это позволит повысить эффективность извлечения до 90 - 92 %, и существенно снизит капитальные затраты на производство рекультивации. Кроме того, повышение экономической эффективности этой технологии будет обусловлено за счет использования естественных энергоисточников (циклического промерзания и оттаивания штабеля КВ) и солнечной радиации для дополнительной дезактивации высокотоксичных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аренс В.Ж.* Физико-химическая геотехнология: Учеб. пособие. –М.: Изд-во МГГУ. 2001. - 656 с.
2. *Грунтоведение. //под ред. В.Т. Трофимова.* -6-е изд., перераб. И доп. –М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
3. *Дружинина Г.Я., Строганов Г.А., Зырянов М.Н.* Кучное выщелачивание золота из предварительно окомкованных руд. //Цветные металлы. № 9. 1997. -стр. 17-19.
4. *Кучное* выщелачивание благородных металлов. /Под редакцией М.И. Фазлуллина. //М.: Издательство академии горных наук. 2001. 647 с.
5. *Месчян С.Р.* Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения (с учетом временных эффектов). М.: «Недра». 1974. -192 с.
6. *Решение на выдачу пат.* № Российская Федерация, МКИ Е21 В43/28. Устройство

для изучения технологических параметров кучного выщелачивания металлов из руд и геотехногенных отходов в холодный и теплый периоды года /соавт.: Д.М. Шестернев, С.Б. Татауров, А.Н. Черепанов - № 2004134760/03; заявл. 29.11.2004; приоритет 29.11.2004. -8 с.: ил.2.

7. *Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Емельяненко Е.А., Радченко Д.Н.* Влияние гранулометрического состава и реагентного режима на процесс кучного выщелачивания окисленных медных руд. //Горный журнал. №3. 2002. стр. 48-50.

8. *Шестернев Д.М., Мязин В.П., Татауров С.Б.* Перспективы использования физических и физико-химических методов интенсификации кучного выщелачивания золота в криолитозоне Забайкалья. // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 1.- М.: изд-во МГГУ, 2006. -стр. 271-275.

9. *Шестернев Д.М., Мязин В.П., Татауров С.Б.* Исследование криогенной дезинтеграции золотокварцевых руд для интенсификации процесса кучного выщелачивания золота. //Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. №1. 2006, стр. 108-116.

Коротко об авторах

Шестернев Дмитрий Михайлович – профессор, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе ИПРЭК СО РАН (ИПРЭК СО РАН), Институт природных ресурсов экологии и криологии СО РАН,

Мязин Виктор Петрович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой ОПИ и ВС ЧитГУ, Читинский государственный университет,

Татауров Сергей Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИПРЭК СО РАН, докторант, Институт природных ресурсов экологии и криологии СО РАН,

Черепанов Андрей Николаевич – аспирант, Институт природных ресурсов экологии и криологии СО РАН.

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ПОЛЯКОВ Алексей Вячеславович	Разработка метода расчета эффективности процесса резания горных пород струями воды сверхвысокого давления и обоснование параметров устройства для их получения применительно к проходческим комбайнам	05.05.06	к.т.н.