ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов фильтрации в штабеле кучного выщелачивания

М.А.МАРИНИН, М.А.КАРАСЕВ, Г.Б.ПОСПЕХОВ, А.А.ПОМОРЦЕВА, В.Н.КОНДАКОВА, В.И.СУШКОВА✉
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Маринин М.А., Карасев М.А., Поспехов Г.Б., Поморцева А.А., Кондакова В.Н., Сушкова В.И. Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов фильтрации в штабеле кучного выщелачивания // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 30-40. DOI: 10.31897/PMI.2023.7

***Аннотация*.** Представлены результаты изучения факторов, определяющих формирование и изменение фильтрационных свойств штабеля кучного выщелачивания, сформированного из окомкованных бедных песчано-глинистых руд. Выполнен анализ методов исследования фильтрационных свойств рудного материала для разных этапов функционирования участков кучного выщелачивания. Опытно-фильтрационными работами установлено влияние процесса сегрегации при отсыпке штабеля на формирование зон с сильно отличающимися параметрами проницаемости руды. Показано построение и применение численной модели фильтрационных процессов в окомкованных рудах на основе лабораторных экспериментов. С помощью моделирования просачивания растворов при различной интенсивности орошения выполнены обоснования оптимальных параметров штабеля с точки зрения его геомеханической устойчивости и предупреждения подъема уровня растворов выше дренажного слоя.

***Ключевые слова*:** кучное выщелачивание; окомкованная руда; просачивание; фильтрация; коэффициент фильтрации; численное моделирование; модель

Благодарность. Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение Государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год № FSRW-2020-0014.

Поступила: 06.05.2022 ***Принята: 17.11.2022*** ***Онлайн: 27.02.2023*** ***Опубликована: 27.02.2023***

Введение. Концепция устойчивого развития горнорудных предприятий предполагает развитие технологий, направленных на малоотходную разработку месторождений твердых полезных ископаемых [1, 2] и максимальное извлечение металлов из бедных забалансовых руд [3-5] с учетом соблюдения требуемых экологических стандартов [6, 7]. В практике извлечения благородных металлов из руд апробированы различные технологии [8-10], в том числе кучное выщелачивание (КВ), которое является перспективной и относительно дешевой технологией вовлечения в переработку бедных и забалансовых руд, содержащих золото, серебро и другие полезные компоненты [11]. Эффективное извлечение полезных компонентов при этой технологии зависит от условий просачивания раствора через рудный штабель [12, 13]. Эти условия определяются гранулометрическим и вещественным составом материала в штабеле [14, 15]. При этом кучное выщелачивание не так сильно зависит от температуры, чем биовыщелачивание руд [16-18].

Исходный гранулометрический состав бедных песчано-глинистых руд делает процесс выщелачивания очень медленным и невыгодным [14]. Например, низкая скорость просачивания растворов не позволяет провести выщелачивание в период положительных температур в условиях Крайнего Севера, что требует продолжения работ при отрицательных температурах за счет дополнительных трат на подогрев растворов и утепление штабеля. В случае консервации рудного штабеля на зимний период необходимо учитывать влияние циклов промерзания и оттаивания материала на вещественный состав и геотехнологические свойства сырья [19].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для песчано-глинистых бедных руд с низким коэффициентом фильтрации производят их окомкование с помощью добавления цемента. В результате получают окатыши, которые должны обеспечивать необходимое просачивание растворов через штабель и выдерживать давление вышележащих масс руды. При этом на фильтрационные свойства массива кучного выщелачивания оказывает влияние множество факторов от этапа формирования штабеля до окончания его эксплуатации.

Фильтрационные процессы, помимо влияния на сам процесс выщелачивания, также определяют устойчивость кучи как откосного сооружения [20]. При орошении растворы по аналогии с водой в бортах карьеров или в отвалах отвечают за напряженное состояние, физико-химическое взаимодействие и характер развития деформаций во времени [21]. Поэтому понимание формирования фильтрационных свойств в штабеле кучного выщелачивания позволит не только обеспечить эффективное извлечение золота из окомкованных руд, но и определить оптимальные и безопасные параметры штабелей с точки зрения высоты яруса и их количества.

Вопросами применения расчетных методов и, в частности, методов численного моделирования для решения задач фильтрации при орошении окомкованной руды растворами занимались многие исследователи. В работах [22-24] представлена методика моделирования фильтрации через окомкованные руды на основании теории неполностью водонасыщенной среды. Отдельным задачам фильтрации при эксплуатации штабелей кучного выщелачивания посвящен ряд работ [25-27], в которых рассмотрены вопросы применения метода объемных элементов, устойчивости штабеля при его орошении, а также решения фильтрационных задач с учетом отрицательных температур окружающего воздуха. Однако, несмотря на хорошую теоретическую проработку рассматриваемого вопроса, в существующих исследованиях мало внимания уделяется вопросам апробации принятых фильтрационных моделей и их параметров по данным масштабных лабораторных или полевых исследований.

Цель исследования – характеристика и анализ факторов, определяющих формирование и изменение фильтрационных свойств в массиве окомкованных песчано-глинистых руд при кучном выщелачивании золота.

В качестве объекта для изучения фильтрационных свойств и режимов фильтрации в штабеле кучного выщелачивания приняты условия, характерные для Куранахского золоторудного узла на территории Якутии в России [28, 29]. Выбор объекта обусловлен интенсивным внедрением кучного выщелачивания на данной территории и большим потенциалом для применения этой технологии на многие годы вперед, что обусловлено несколькими факторами, среди которых основными являются:

• низкое содержание золота – 1,36 г/т, при больших подтвержденных запасах на территории – 530 т;

• большой объем отвалов и хвостов с низким содержанием золота, накопленных за более 55 лет разработки месторождений в регионе, которые потенциально могут рассматриваться как перспективное техногенное сырье;

• песчано-глинистый состав руд с включениями крупнообломочного материала, сформировавшийся в результате гипергенных процессов;

• возможность достижения большого объема извлечения золота (86,7-92,9 %) за счет прямого цианирования;

• короткий период в году с отсутствием отрицательных температур – менее 4,5 мес., как правило, только в летние месяцы из-за резко континентального климата.

Куранахский золоторудный геолого-промышленный тип оруденения сформировался в корах выветривания по первичным эпитермальным рудам золотосульфидно-карстового типа. Руды месторождений представляют собой песчано-глинистую массу кварц-лимонитгидрослюдисто-монтмориллонитового состава с включением крупнообломочного материала. Благодаря своему генезису на территории Куранахского узла в контурах рудоносных залежей золото распределено неравномерно, участки с высоким содержанием чередуются с убогими рудами [30, 31].

Опытные испытания процесса кучного выщелачивания золота из песчано-глинистых куранахских руд начаты в 1974-1975 гг. институтом «Иргиредмет». Было установлено, что эффективность процесса, помимо содержания золота, зависит от масштаба установки кучного выщелачивания,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 30-40 DOI: 10.31897/PMI.2023.7
© М.А.Маринин, М.А.Карасев, Г.Б.Поспехов, А.А.Поморцева, В.Н.Кондакова, В.И.Сушкова, 2023

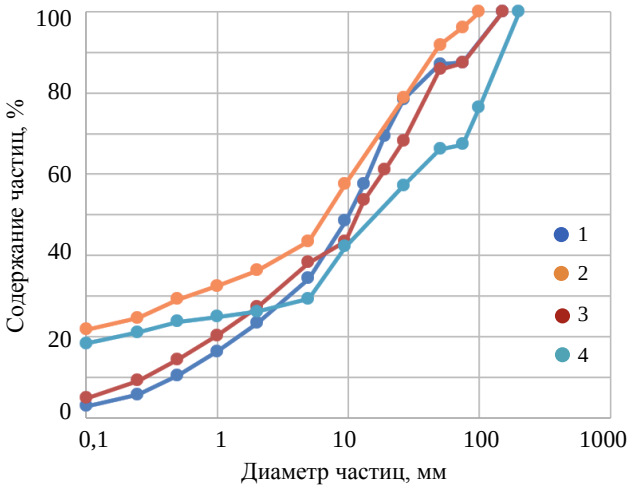


Рис.1. Гранулометрический состав окомкованных руд

1 и 2 – свежеокомкованная руда № 1 и № 2;
3 и 4 – выведенная из орошения руда № 3 и № 4

содержания глинистых минералов, высоты штабеля, способа укладки руды и ряда других факторов. При этом главную роль играет содержание глинистой фракции, которая препятствует фильтрации растворов, а также задерживает уже растворенное золото [32-34].

Впервые промышленное кучное выщелачивание окомкованных песчано-глинистых куранахских руд было реализовано АО «Алданзолото» в 1996 г. [25]. На предприятии руду, дробленную до класса –125 мм, окомковывали с добавками цемента и укладывали в штабели для капельного орошения. В настоящее время планируется интенсификация процесса внедрения технологии кучного выщелачивания на территории Куранахского золоторудного узла, что обуславливает актуальность обоснования оптимальных параметров кучного выщелачивания: высоту штабеля, количество ярусов, необходимость межъярусных дренажей и др.

В рамках исследований с опытного участка кучного выщелачивания были получены пробы свежих окомкованных руд до укладки в штабель, а также материалы с участков, уже выведенных из орошения. Орошение материала осуществлялось 30-50 дней. Результаты определения гранулометрического состава отобранных проб с помощью сухого рассева приведены в виде интегральных кривых (рис.1).

Имеющиеся отличия в гранулометрическом составе можно объяснить тем, что после укладки в штабель и орошения происходит разрушение части окатышей и измельчение обломков породы под действием растворов и механического давления вышележащих руд. Различие в гранулометрическом составе означает, что в процессе орошения происходит изменение фильтрационных свойств в массиве руд. При этом разрушение окатышей приводит к возвращению материала в состояние до окомкования, что также ухудшает фильтрационные параметры штабеля. Вместе с влиянием процесса сегрегации на состав при формировании штабеля это может приводить к формированию линз наподобие песчано-глинистых грунтов внутри штабеля, что будет снижать эффективность процесса извлечения золота. На рис.2 представлены доказательства неоднородности строения штабеля: изображения вскрытой откосной поверхности на опытном участке (рис.2, *а*), керн из скважины (рис.2, *б*), пробуренной через выведенный из-под орошения штабель, а также откос, сложенный практически полностью крупнообломочным материалом (рис.2, *в*).

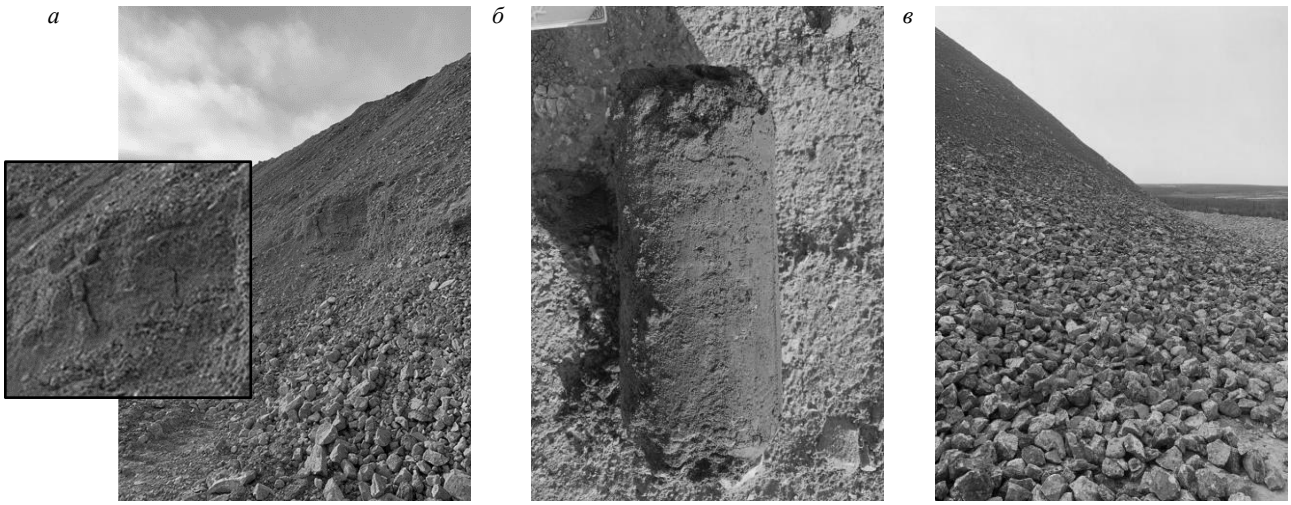


Рис.2. Сегрегация рудного материала в штабеле на опытном участке

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

По гранулометрическому составу в соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» представленные материалы по аналогии с природными грунтами могут быть отнесены: выведенный из орошения материал – к крупнообломочным щебенистым грунтам; свежая окомкованная руда – к крупнообломочным дресвяным грунтам. Для таких грунтов значение коэффициента фильтрации может изменяться в широких пределах. Например, в Справочном руководстве гидрогеолога под редакцией В.М.Максимова средние значения коэффициента фильтрации для проницаемых галечников и гравия с мелким песком и глиной приведены в диапазоне 1-10 м/сут. Ориентировочно коэффициент фильтрации подобных материалов также можно оценить по П 56-90/ВНИИГ «Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений» согласно графику экспериментальных значений коэффициентов фильтрации песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтов.

Если принять диаметр частиц, содержащихся в грунте 17 % по массе, равным 0,1 мм, то коэффициент фильтрации составит: при рыхлом сложении 0,003-0,02 см/с или 2,6-17,3 м/сут; при плотном сложении 0,0005-0,003 см/с или 0,4-2,6 м/сут.

Таким образом, по гранулометрическому составу представленные для изучения материалы можно охарактеризовать коэффициентом фильтрации в диапазоне от 0,4 до 17,3 м/сут, что требует дальнейшего уточнения лабораторными и полевыми исследованиями фильтрационных свойств окомкованной руды.

Методы. Исследование фильтрационных характеристик окомкованной руды выполнялось в лабораторных условиях на образцах, на стендовом оборудовании, моделирующем часть массива на участке кучного выщелачивания, а также в полевых условиях. Такой комплексный подход позволил установить корреляции между различными способами изучения фильтрационных характеристик руд.

На первом этапе исследования фильтрационные характеристики окомкованных руд определялись в лабораторных условиях. Руду предварительно уплотняли в компрессионных приборах до величин вертикальных напряжений, соответствующих весу вышележащей рудной массы. Испытание проводилось до нагрузок 0,6 МПа, соответствующих высоте штабеля 40 м. Были получены закономерности изменения фильтрационных характеристик окомкованной руды для двух типов гранулометрических составов в зависимости от высоты штабеля: первый тип окомкованной руды был представлен классом крупности до –20 мм, второй класс крупности до –125 мм.

На втором этапе исследования был выполнен отсев окомкованных руд с характерным для распределения в штабеле гранулометрическим составом. Отсев предварительно укладывали в подготовленный стенд с размерами 450×450×1000 мм высотой 1000 мм. В первом опыте насыщение окомкованной руды при естественной влажности проводилось раствором и изучался процесс ее насыщения, а во втором – процесс фильтрации через окомкованную руду в полностью водонасыщенном состоянии.

Течение жидкости через пористую среду различной степени водонасыщения обычно рассматривается через уравнения Ричарда. В общем виде уравнение может быть записано через две неизвестных переменных – степень водонасыщения (относительная влажность) S и напор h:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \nabla k(h) \nabla h + \frac{\partial k(h)}{\partial z},$$

где k – коэффициент фильтрации.

При выполнении фильтрационных расчетов принята получившая наибольшее распространение на практике модель Van Genuchten – Mualem, которая позволяет описать процесс фильтрации жидкости через пористые тела в полностью или неполностью водонасыщенном состоянии. Принятая модель позволяет учесть изменение фильтрационных характеристик пористой среды в зависимости от степени ее водонасыщения.

Фильтрационные характеристики пористой среды контролируются через характеристическую зависимость между степенью водонасыщения (влажностью) грунта и величиной отрицательного порового давления, которая характеризует способность грунта сохранять жидкость в пористом пространстве при различных значениях порового давления.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 30-40 DOI: 10.31897/PMI.2023.7
© М.А.Маринин, М.А.Карасев, Г.Б.Поспехов, А.А.Поморцева, В.Н.Кондакова, В.И.Сушкова, 2023

Фильтрационная модель Van Genuchten – Mualem [35, 36] связывает степень водонасыщения с напором:

$$S(\psi) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})\left[1 + \left(g_a|\psi|\right)^{g_n}\right]^{g_c};$$

$$\psi = -\frac{p_w}{\gamma_w};$$

$$g_c = \frac{1 - g_n}{g_n},$$

где p_w – отрицательное поровое давление; γ_w – удельный вес жидкости в пористом пространстве; S_{res} – остаточная величина степени водонасыщения раствором пористой среды; S_{sat} – значение полного водонасыщения пористого пространства раствором; g_a, g_n, g_c – параметры уравнения Van Genuchten – Mualem.

Относительный показатель коэффициента фильтрации определяется по формуле

$$k_{rel}(S) = \max\left[\left(S_{eff}\right)^{g_l}\left(1 - \left[1 - \left(S_{eff}\right)^{\frac{g_n}{g_n - 1}}\right]^{\frac{g_n - 1}{g_n}}\right)^2 \cdot 10^{-4}\right];$$

$$S_{eff} = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}},$$

где S_{eff} – эффективная степень водонасыщения пористой среды раствором.

Фактический коэффициент фильтрации определяется по формуле

$$k(S) = k_{sat}k_{rel}(S),$$

где k_{sat} – коэффициент фильтрации пористой среды в полностью насыщенном жидкостью состоянии.

Принятая модель позволяет учесть изменение коэффициента фильтрации окомкованной руды в зависимости от степени ее водонасыщения, что в значительной степени повысит достоверность прогноза развития фильтрационных процессов в зоне полного и неполного водонасыщения. При выполнении фильтрационных расчетов принято, что коэффициент фильтрации определяется гранулометрическим составом с учетом крупных включений. Показатели фильтрационной модели неполностью водонасыщенной среды определены для гранулометрического состава с размерами фракций от 0,002-0,25 м. Параметры фильтрационной модели сведены в таблицу, а для окомкованной руды представлены в виде закономерностей изменения отрицательного порового давления и коэффициента фильтрации от степени водонасыщения (рис.3).

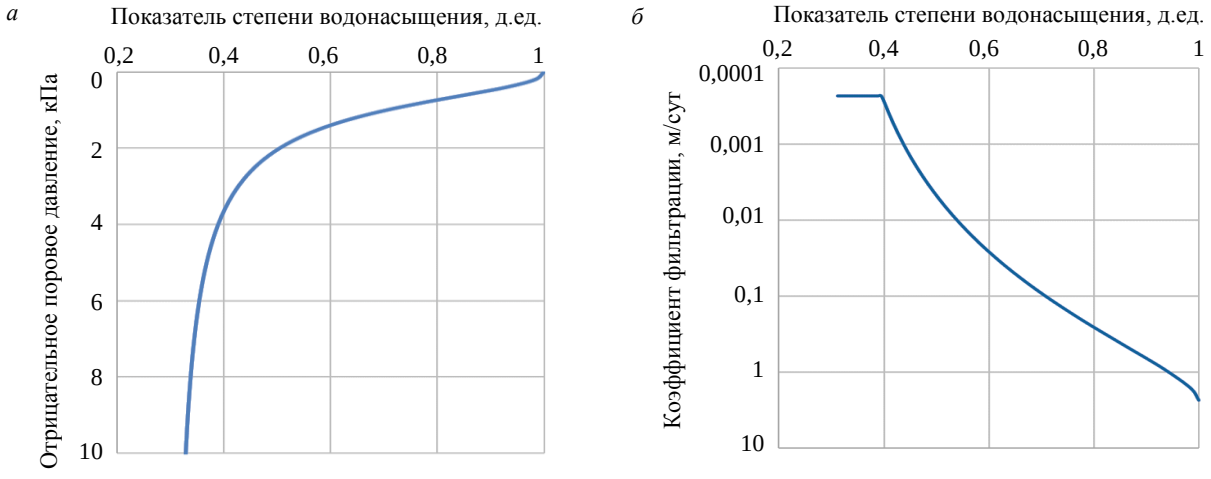


Рис.3. Зависимости изменения отрицательного порового давления (*а*) и коэффициента фильтрации (*б*) от показателя степени водонасыщения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.7

Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 30-40
© М.А.Маринин, М.А.Карасев, Г.Б.Поспехов, А.А.Поморцева, В.Н.Кондакова, В.И.Сушкова, 2023

Параметры фильтрационной модели Van Genuchten – Mualem

Материал	k_{sat}, м/сут	S_{res}	S_{sat}	g_a, 1/м	g_n	g_c	g_l
Окомкованная руда	2,35	0,139	1,0	12,4	2,28	–0,56	0,5
Гравийный слой	7,0	0,105	1,0	14,5	2,68	–0,62	0,5
Песчаный слой	3,5	0,105	1,0	14,5	2,68	–0,62	0,5

Калибровка численной модели выполнялась по результатам фильтрационных испытаний, полученных на стендовом оборудовании. При построении фильтрационной численной модели учтены основные этапы эксперимента, включающие первоначальное водонасыщение окомкованной руды, а также последующие стадии фильтрации жидкости через пористое пространство. Численная модель геометрически повторяла физическую модель: мощность слоя окомкованной руды 70 см; мощность дренажного слоя 30 см; размеры поперечного сечения 0,45×0,45. При выполнении калибровки модели принято, что интенсивность орошения составляет 300 л/(м^2·сут). Расчеты показали, что насыщение окомкованной руды происходит за 17 ч, что в целом соответствует данным, полученным в рамках физического моделирования. После полного водонасыщения скорость фильтрации жидкости через пористую среду составляет 20 мин, что было отмечено в эксперименте. Влажность окомкованной руды достигает 0,32, что соответствует показателю водонасыщения 76 %. На основании выполненных расчетов выполнена калибровка фильтрационных характеристик окомкованной руды.

Полученные параметры фильтрационной модели окомкованной руды приняты для проведения параметрических исследований насыщения раствором пористого пространства руды.

Обсуждение результатов. Лабораторные исследования по определению фильтрационных характеристик пород штабеля, полученные при различных классах крупности окомкованной руды, позволили получить закономерности изменения фильтрационных характеристик по глубине (рис.4, *а*). Зависимости для двух классов крупности руды имеют одинаковый характер. Как видно из представленных закономерностей, коэффициент фильтрации снижается по мере увеличения плотности руды и снижения ее пористости, что характерно для пористых сред. Необходимо отметить, что абсолютные значения коэффициента фильтрации в значительной степени отличаются. Начальное значение коэффициента фильтрации окомкованной руды при классе крупности –20 составляет 3,1 м/сут, при классе крупности 125 коэффициент фильтрации равен 50 м/сут, т.е. изучаемый класс крупности руды оказывает значительное влияние на значение коэффициента фильтрации и в меньшей степени влияет на характер его изменения под нагрузкой.

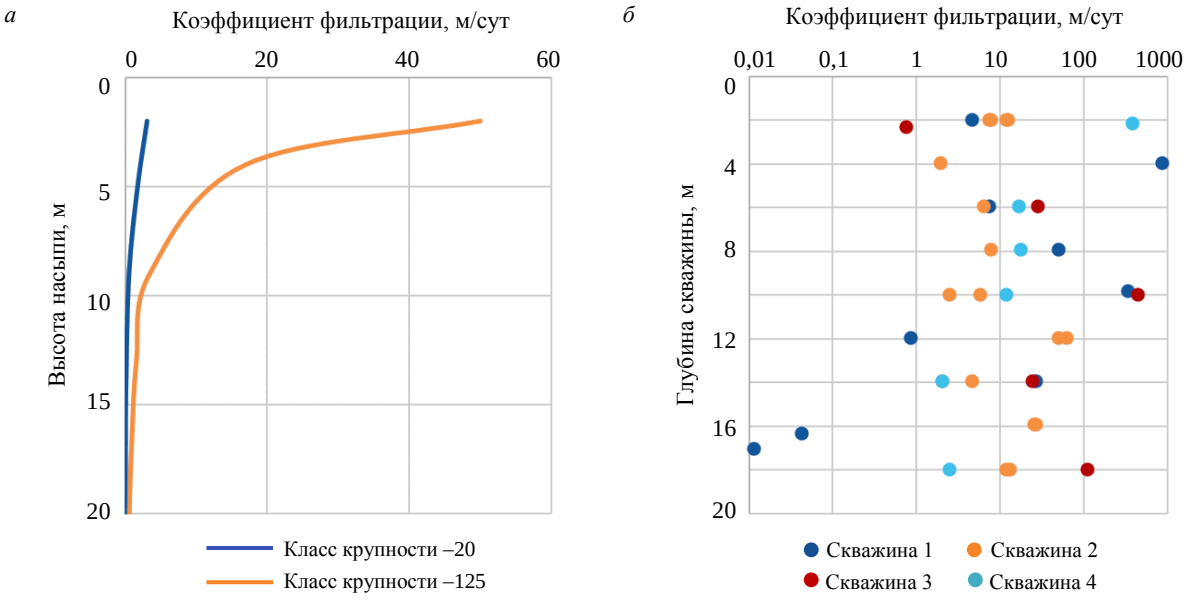


Рис.4. Закономерности изменения фильтрационных характеристик от степени уплотнения и выборки гранулометрического состава, полученные в лабораторных условиях (*а*), и результаты определения изменения коэффициентов фильтрации по глубине скважин по данным полевых испытаний (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 30-40 DOI: 10.31897/PMI.2023.7
© М.А.Маринин, М.А.Карасев, Г.Б.Поспехов, А.А.Поморцева, В.Н.Кондакова, В.И.Сушкова, 2023

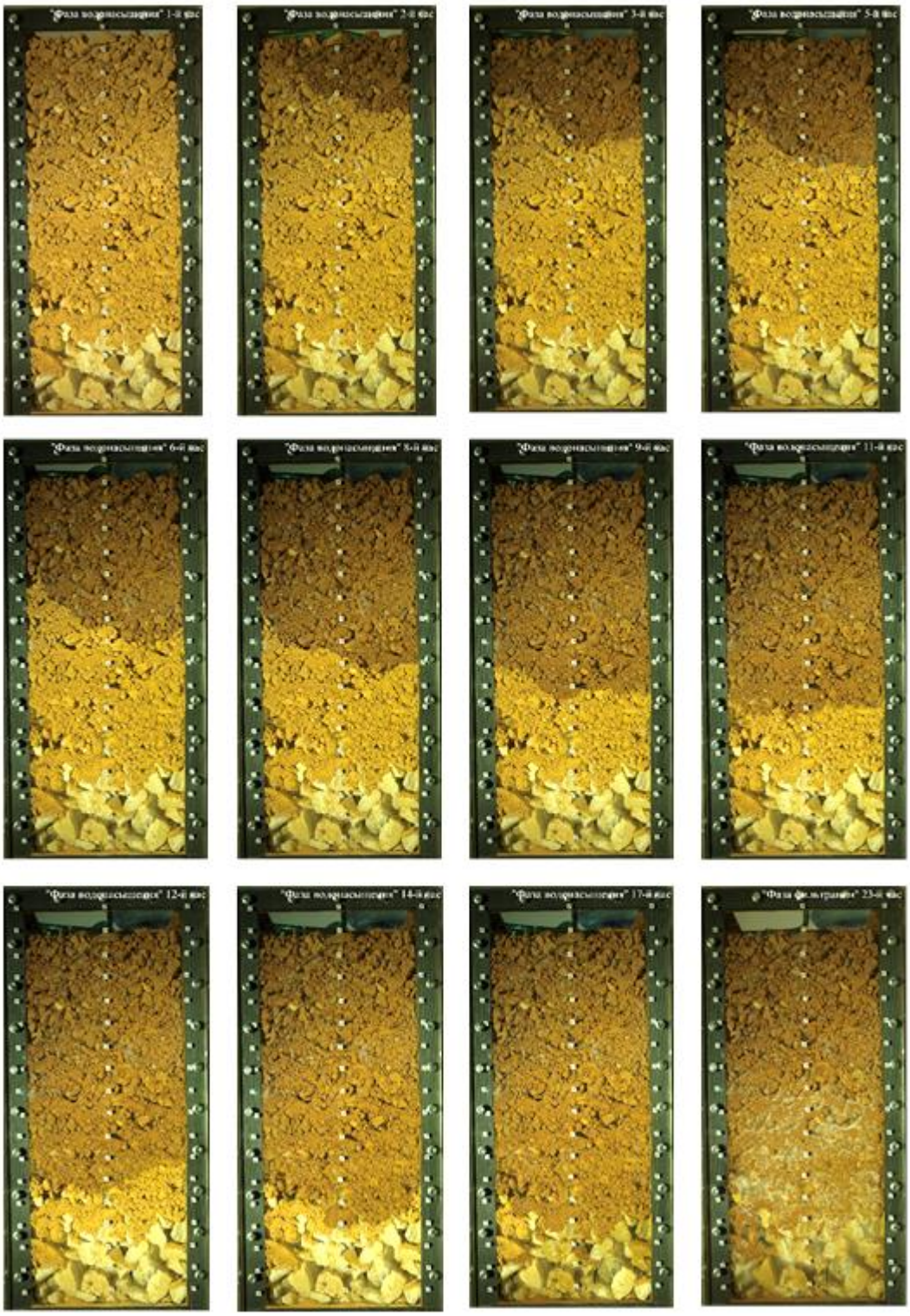


Рис.5. Самоуплотнение рудного материала при орошении

Исследование фильтрационных характеристик пород штабеля на стендовом оборудовании (рис.5) показало, что в рамках первой стадии лабораторного эксперимента моделировалась фаза водонасыщения рудного материала высотой 700 мм без уплотнения. Время частичного водонасыщения материала составило 18 ч при интенсивности орошения 2,5/3,5 л/ч, т.е. за данный период вода прошла до дренажного слоя. Далее рудный материал проливался с заданной интенсивностью для полного водонасыщения. В процессе водонасыщения рудный материал осел на 5 см, что

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.7

Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 30-40
© М.А.Маринин, М.А.Карасев, Г.Б.Поспехов, А.А.Поморцева, В.Н.Кондакова, В.И.Сушкова, 2023

составляет 7 %. На второй стадии эксперимента выполнялось дополнительное орошение руды, находящейся уже в полностью водонасыщенном состоянии (65 см). При подаче воды с интенсивностью 12 л/ч руда начала отдавать воду через 10 мин, а через 43 мин с начала орошения интенсивность отдачи составила 12 л/ч. Таким образом, коэффициент фильтрации материала составил 2 м/сут. Водные растворы промывают русла в теле рудного материала и вода уходит по вымоинам. Окатыш не выдерживает проточного обводнения и разрушается, поэтому русла в теле рудного материала слагаются из первичных пород. На третьей стадии эксперимента водонасыщенный рудный материал был полностью затоплен водой на 1 ч (при этом подано 66,5 л, а вышло 64 л). Данный опыт моделировал поднятие растворов выше дренажного слоя. В ходе опыта было отмечено значительное разрушение рудных окатышей при их затоплении.

Данные полевых испытаний (см. рис.4, *б*) показали, что величина коэффициента фильтрации изменяется в широком диапазоне (в зависимости от положения участка проведения испытания), однако значения коэффициента фильтрации редко опускаются ниже 2 м/сут. В основном величина коэффициента фильтрации варьирует в диапазоне от 2 до 10 м/сут. На отдельных локальных участках значение коэффициента фильтрации падает значительно ниже 2 м/сут, однако по полученным данным сложно связать такое падение фильтрационных характеристик с общим уплотнением пород штабеля, вероятно, оно связано с особенностью формирования штабеля кучного выщелачивания. Интересным представляется незначительное влияние глубины заложения окомкованных руд на среднее значение их фильтрационных характеристик.

Для оценки влияния фильтрационных характеристик среды на формирование зоны неполностью водонасыщенных пород выполнены расчеты, в которых значение коэффициента фильтрации изменялось от 2 до 20 м/сут. В расчетах принимались минимальные значения коэффициента фильтрации без учета его изменения в плане на каждом исследованном интервале глубин по результатам опытно-фильтрационных работ.

Характеристики модели неполностью водонасыщенной среды принимались по данным крупномасштабных лабораторных исследований. Для фактического гранулометрического состава окомкованной руды были получены закономерности изменения степени водонасыщения пород штабеля от интенсивности проливки раствора. За граничное значение степени водонасыщения принята величина, равная 0,8. При значениях выше 0,8, как показали результаты лабораторных исследований, механические характеристики пород за счет насыщения раствором резко начинают снижаться, такое водонасыщение руд принято предельным.

На основании выполненных расчетов для принятых фильтрационных параметров окомкованных руд получены закономерности изменения максимальной степени водонасыщения пород штабеля от коэффициента фильтрации (рис.6, *а*) и интенсивности орошения (рис.6, *б*). Результаты

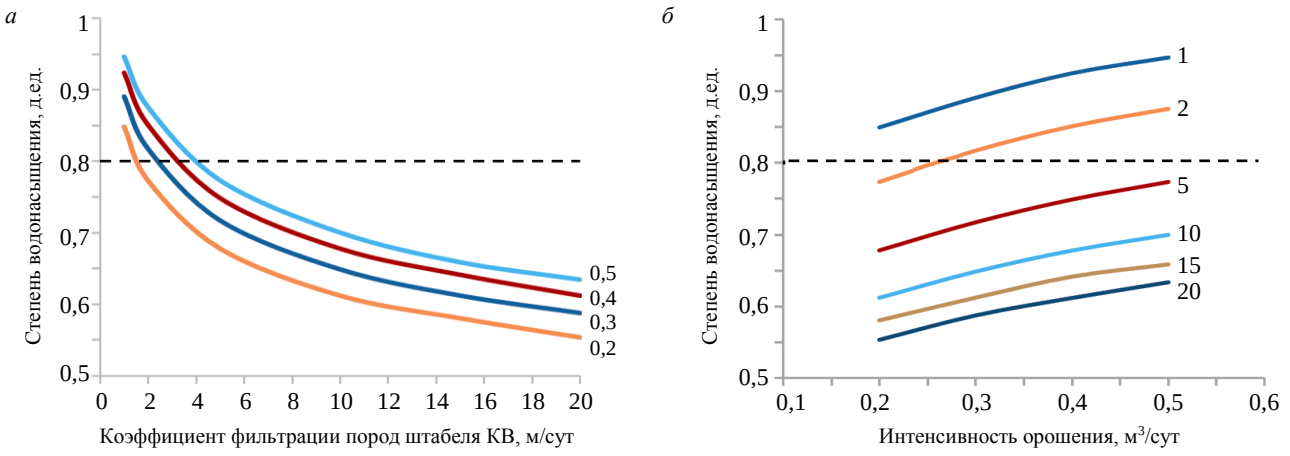


Рис.6. Закономерности изменения степени водонасыщения штабеля КВ в зависимости от коэффициента фильтрации (*а*) и интенсивности орошения (*б*) при заданной величине интенсивности орошения (0,2, 0,3, 0,4, 0,5 м^3/сут) и коэффициенте фильтрации пород (1, 2, 5, 10, 15, 20 м/сут);
пунктир – максимальное значение водонасыщения пород штабеля

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© М.А.Маринин, М.А.Карасев, Г.Б.Поспехов, А.А.Поморцева, В.Н.Кондакова, В.И.Сушкова, 2023

показывают, что по мере увеличения коэффициента фильтрации наблюдается снижение степени водонасыщения пород штабеля, что позволяет увеличивать интенсивность орошения поверхности штабеля растворами. При коэффициенте фильтрации 5 м/сут интенсивность орошения может быть увеличена до 0,5 $м^3$/сут (500 л раствора на 1 $м^2$), при 4 м/сут – до 0,4 $м^3$/сут, при 2 м/сут – не должна превышать 0,3 $м^3$/сут. По результатам расчетов получены граничные величины интенсивности орошения пород, при которых внутри штабеля не будет формироваться водоносный горизонт, а механические характеристики пород штабеля изменяются в допустимых пределах. Предельное значение водонасыщения пород штабеля может привести к резкому изменению его механических характеристик.

Учет возможной вариативности фильтрационных характеристик в зависимости от фактического гранулометрического состава окомкованной руды показал, что значение предельных величин интенсивности орошения изменяется в пределах 20 %. Можно отметить, что фактическая картина распределения фильтрационных характеристик пород штабеля КВ более благоприятная по отношению к данным, получаемым на основании лабораторных исследований, что позволяет потенциально повысить интенсивность орошения пород растворами.

Предложенный метод прогноза фильтрационных процессов в штабеле кучного выщелачивания, основанный на определении фильтрационных показателей среды по данным масштабных лабораторных исследований на стендовом оборудовании и их изменчивости по глубине штабеля на основании полевых испытаний, позволяет качественно повысить достоверность результатов расчетов скорости фильтрации, определения допустимой интенсивности орошения и возможности формирования водоносного горизонта внутри тела штабеля. Последующие исследования будут направлены на более детальное изучение вопросов сегрегации окомкованных руд в теле штабеля кучного выщелачивания и изучение влияния зафиксированных по данным полевых испытаний отклонений фильтрационных характеристик от среднего значения на исследуемые показатели.

Заключение. В работе приведены результаты лабораторных, полевых и косвенных (по гранулометрическому составу) методов определения фильтрационных характеристик руд. Выполнен анализ методов определения фильтрационных параметров окомкованных песчано-глинистых руд на опытном участке кучного выщелачивания на территории Куранахского золоторудного узла. Установлено, что при назначении проектных параметров, характеризующих фильтрационную способность рудного штабеля, можно ориентироваться на гранулометрический состав окомкованных руд.

Методики лабораторного определения коэффициента фильтрации предполагают состояние полного водонасыщения материала, чего не должно происходить в процессе эксплуатации на участках кучного выщелачивания. В связи с этим необходимо выполнять моделирование процесса орошения руды на стендах, что также позволит подобрать оптимальную интенсивность орошения.

Наиболее достоверную информацию о значении коэффициента фильтрации можно получить путем выполнения опытно-фильтрационных работ на участке опытной отсыпки штабеля. Различие в проектных и реальных значениях фильтрационных параметров объясняется сегрегацией состава в процессе формирования рудного штабеля.

Процесс сегрегации материала приводит к формированию неоднородного строения рудного штабеля с зонами, резко отличающимися по гранулометрическому составу, что непосредственно сказывается на анизотропии массива по коэффициенту фильтрации. В результате этого формируются участки, сложенные самыми мелкими фракциями, которые подвергаются размоканию растворами и формируют в процессе уплотнения зоны с коэффициентом фильтрации, характерным для глинистых грунтов. Такие слабопроницаемые участки влияют на движение растворов в штабеле и могут влиять на снижение процесса извлечения золота.

Численное моделирование фильтрационных процессов в рудном штабеле позволяет наиболее полно учесть фильтрационную неоднородность массива и определить наиболее эффективные параметры режимов эксплуатации участков кучного выщелачивания.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Argimbaev K.R., Ligotsky D.N., Mironova K.V., Loginov E.V.* Investigations on material composition of iron-containing tails of enrichment of combined mining and processing in kursk magnetic anomaly of Russia // International Journal of Engineering, Transactions. 2020. Vol. 33. Iss. 7. P. 1431-1439. DOI: 10.5829/IJE.2020.33.07A.31

2. *Marinina O.A., Kirsanova N.Y., Nevskaya M.A.* Circular economy models in industry developing a conceptual framework // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 24. P. 9376-9386. DOI: 10.3390/en15249376

3. *Бураков А.М., Касанов И.С.* Обоснование методики оценки прогнозных ресурсов техногенных россыпей Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 9. С. 168-183. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0- 168-183

4. *Брагин В.И., Харитонова М.Ю., Мацко Н.А.* Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 617-625. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1

5. *Fomin S.I., Ivanov V.V., Semenov A.S., Ovsyannikov M.P.* Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // Asian Research Publishing Network Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. № 11. P. 1306-1311.

6. *Argimbaev K.R., Yakubovskiy M.M., Ivanova M.A.* Design justification of drainage and antifilter facilities of the tailings at various methods of their constructions // International Journal of Ecology and Development. 2015. Vol. 30. № 2. P. 76-85.

7. *Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. et al.* Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 376. DOI: 10.3390/MIN12030376

8. *Шумилова Л.В., Хатькова А.Н., Черкасов В.Г.* Альтернативные варианты подготовки техногенных отходов к выщелачиванию металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 3-2. С. 173-181. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_173

9. *Иваник С.А., Илюхин Д.А.* Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 202-208. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202

10. *Александрова Т.Н., Николаева Н.В., Львов В.В., Ромашев А.О.* Повышение эффективности переработки руд благородных металлов на основе моделирования технологических процессов // Обогащение руд. 2019. № 2. С. 8-13. DOI: 10.17580/or.2019.02.02

11. *Thenepalli T., Chilakala R., Habte L. et al.* A Brief Note on the Heap Leaching Technologies for the Recovery of Valuable Metals // Sustainability. 2019. Vol. 11. Iss. 12. № 3347. DOI: 10.390/SU11123347

12. *McBride D., Croft T.N., Cross M. et al.* Optimization of a computational fluid dynamics model – Heap leach model and sensitivity analysis of process operation // Minerals Engineering. 2014. Vol. 63. P. 57-64. DOI: 10.1016/J.MINENG.2013.11.010

13. *Van Genuchten M.Th.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil science society of America journal. 1980. Vol. 44. Iss. 5. P. 892-898. DOI: 10.2136/SSSJ1980.03615995004400050002x

14. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Selective Disintegration Justification Based on the Mineralogical and Technological Features of the Polymetallic Ores // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. № 851. DOI: 10.3390/min11080851

15. *Татауров С.Б.* Обоснование геотехнологических процессов кучного выщелачивания золота с криогенными преобразованиями минерального сырья: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2011. 41 с.

16. *Попов В.И., Каймонов М.В.* Определение оптимальных параметров процесса выщелачивания в рудном штабеле при отрицательных температурах окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 24. С. 292-298. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-292-298

17. *Leahy M.J., Davidson M.R., Schwarz M.P.* A model for heap bioleaching of chalcocite with heat balance: Bacterial temperature dependence // Minerals. Engineering. 2005. Vol. 18. Iss. 1. P. 1239-1252. DOI: 10.1016/j.hydromet.2006.07.004

18. *Татауров С.Б.* Исследования изменчивости технологических свойств золотосодержащего сырья в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 45-50.

19. *Pacheco P.G.M., Purizaga M., Huertas J., Romanel C.* Flow analysis and dynamic slope stability in a copper ore heap leach // 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 64th Canadian Geotechnical Conference, 2-6 October, 2011, Toronto, Ontario, Canada. SIMSG, 2011. P. 1-7.

20. *Лушников Я.В., Багазеев В.К.* Определение физико-механических свойств окатышей при формировании штабеля кучного выщелачивания // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 8. С. 124-127.

21. *Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А.* Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно-нарушенных массивах при разработке МПИ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 8. С. 123-131.

22. *Xiuxiu Miao, Narsilio G.A., Aixiang Wu, Baohua Yang*. 3D dual pore-system leaching model. Part 1: Study on fluid flow // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 167. P. 173-182. DOI: 10.1016/J.HYDROMET.2016.11.015

23. *McBride D., Gebhardt J.E., Croft T.N., Cross M.* Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures // Minerals Engineering. 2016. Vol. 90. P. 77-88. DOI: 10.1016/J. MINENG.2015.11.005

24. *McBride D., Cross M., Gebhardt J.E.* Heap leach modeling employing CFD technology: A «process» heap model // Minerals Engineering. 2012. Vol. 33. P. 72-79. DOI: 10.1016/J. MINENG.2011.10.003

25. *Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н., Дорожкина Л.А.* Модель формирования комплексных золотоурановых месторождений Центрально-Алданского рудного района // Известия вузов. Геология и разведка. 2006. № 2. С. 23-31.

26. *Cariaga E., Concha F., Sepúlveda M.* Flow through porous media with applications to heap leaching of copper ores // Chemical Engineering Journal. 2005. Vol. 111. Iss. 2-3. P. 151-165. DOI: 10.1016/MIN.2005.02.019

27. *McBride D., Gebhardt J., Croft N., Cross M.* Heap Leaching: Modelling and Forecasting Using CFD Technology // Minerals. 2018. Vol. 8. Iss. 1. № 9. DOI: 10.3390/MIN8010009

28. *Ковлеков И.И., Шерстов В.А., Варлаков П.С., Дмитриев А.А.* Опыт кучного выщелачивания руд в Якутии // Наука и образование. 2005. № 1. С. 21-24.

29. *Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др.* Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции // Региональная геология и металлогения. 2017. № 17. С. 93-111.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

30. *Tatarinov A.P., Dementyev V.Y., Tsykunova G.V.* Development and introduction of heap leaching // 26th International Mineral Processing Congress: Innovative Processing for Sustainable Growth, 24-28 September 2012, New Delhi, India. IMPC, 2012. P. 5539-5542.

31. *Федотов П.К., Сенченко А.Е., Федотов К.В., Бурдонов А.Е.* Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 218-227. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218

32. *Дементьев В.Е., Татаринов А.П., Гудков С.С.* Основные аспекты технологии кучного выщелачивания золотосодержащего сырья // Горный журнал. 2001. № 5. С. 53-55.

33. *Дементьев В.Е., Дружина Г.Я., Минеев Г.Г.* Кучное выщелачивание золотосодержащего сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2000. № 2. С.74-78.

34. *Robertson S.W., Van Staden P.J., Cherkaev A., Petersen J.* Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 208. № 105811. DOI: 10.10165/J.HYDROMET.2021.105811

35. *Mostaghimi P., Tollit B.S., Neethling S.J. et al.* A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching // Journal of Engineering Mathematics. 2014. Vol. 87. P. 111-121. DOI: 10.1007/S10665-013-9672-3

36. *Татауров С.Б., Шестернев Д.М., Мязин В.П., Черепанов А.Н.* Изменение коэффициентов фильтрации и гранулометрического состава золотосодержащей окомкованной суглинистой руды в период строительства и водонасыщения штабеля кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 12. С. 286-294.

***Авторы*: М.А.Маринин,** *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0002-5575-9343* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **М.А.Карасев,** *д-р техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0001-8939-0807* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **Г.Б.Поспехов,** *канд. геол.-минерал. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0001-9090-5150* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **А.А.Поморцева,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0002-7911-7011* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **В.Н.Кондакова,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0002-4883-7972* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **В.И.Сушкова,** *лаборант-исследователь, s171560@stud.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0003-4247-6499* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0