

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №5, Том 12 / 2020, No 5, Vol 12 <https://esj.today/issue-5-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/12NZVN520.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Тчаро Хоноре Моделирование проницаемости штабеля для стабилизации фильтрационных свойств выщелачивающих растворов // Вестник Евразийской науки, 2020 №5, <https://esj.today/PDF/12NZVN520.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Tcharo Honore (2020). Permeability modeling of ore stockpile for the stabilization of leaching solution filtration properties. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 5(12). Available at: <https://esj.today/PDF/12NZVN520.pdf> (in Russian)

УДК 553.3/.9

Тчаро Хоноре

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия
Аспирант

E-mail: honoretcharo@yahoo.com

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=989497

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Honore_Tcharo

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57211300325>

Моделирование проницаемости штабеля для стабилизации фильтрационных свойств выщелачивающих растворов

Аннотация. При кучном выщелачивании нередко наблюдается постепенное снижение значений показателей фильтрации выщелачивающих растворов из-за образования внутри штабеля малопроницаемых слоев или зон.

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

Обеспечение непрерывного движения технологических растворов в штабеле является довольно сложной геомеханической задачей, решение которой требует применения средств математического моделирования. Настоящая работа направлена на изучение и изменение физико-механического состояния грунта для улучшения его гидродинамических свойств. Раскрыт механизм осаждения крупных частиц (пыльники, глина, илы, шлам) в штабеле с учетом их размеров. Установлено, что процесс закупоривания порового пространства штабелей происходит в трех стадиях.

Был проведен расчет гидравлических характеристик растворов, в зависимости от различных факторов, что позволяет увеличить степень просачиваемости их и уровень смачиваемости кусков руды. В частности, рассматривается влияние естественных или искусственных каналов на характеристики грунта.

Установлена зависимость проницаемости от объема исследуемого слоя, объема пор в него, числа, диаметра, высоты и угла наклона каналов, начальной пористости слоя.

Ключевые слова: математическое моделирование; штабель; малофильтрационные слои; канал; проницаемость; пористость; пыльники; фильтрационные свойства

Введение

Технология кучного выщелачивания (КВ) драгоценных металлов применяется для извлечения полезных компонентов из бедных руд. Протяженность объектов кучного выщелачивания часто составляют от десятки до сотни гектаров руды. В настоящее время высота штабеля КВ достигает 40–150 м. При обработке таких объектов кучного выщелачивания обеспечение равномерного движения технологических растворов во всех областях штабеля является важным аспектом, обуславливающим поддержания необходимого значения выхода продуктивных растворов [1].

В мероприятиях по извлечению полезных ископаемых кучным выщелачиванием инженеры сталкиваются со следующим геомеханическими трудностями:

- уплотнением рудного (особенно в нижней) массива при формировании штабеля бульдозерами или по другим горно-технологическим факторам;
- образованием внутри штабеля малопроницаемых слоев или малопроницаемых зон;
- снижением порового пространства за счет набухания глинистого материала;
- снижением значений показателей фильтрации выщелачивающих растворов с течением времени;
- уменьшением степени извлечения полезного компонента (металла), заключенного в малопроницаемых слоях.

Данные проблемы более выражены при сооружении штабелей КВ большой высоты. Ряд работы направлены на повышение эффективности технологии кучного выщелачивания руд [2; 3] на основе решения проблемы снижения просачиваемости с помощью энергии взрыва [4] и других методов. Однако, существующие методы не обеспечивает полноценное увеличение фильтрации растворов через штабель.

Изучение процесса просачивания позволит предлагать подходы к решению перечисленные сложности КВ.

В процессе просачивания технологические растворы, подвергаясь воздействию сил тяжести и капиллярных сил, избирательно извлекают полезные компоненты, а затем транспортируют их вместе с мелкими частицами через поровое пространство. Продуктивные растворы выходят из кучи штабеля только при условии, что все поры штабеля заполнены растворами т. е. при полной насыщенности обрабатываемой зоны.

Условия разрыва, транспортировки и окончательного осаждения мелких частиц в порах зависят от скорости потока растворов, размера частиц и размера пор [5–8]. Из-за различия характеристик штабелей, для каждого из них существуют определенные критическая скорость просачивания и предельная скорость, ниже которой частицы осаждаются в порах, вследствие чего возникают трудности к просачиванию. В практике кучного выщелачивания на первоначальном этапе транспортировка частиц размером 63–250 мкм осуществляется быстрее [9; 10].

Практический опыт показывает, что при изучении керна, извлеченной из штабеля наблюдается 3 основных малофильтрационных слоя, которые образуются по определенной закономерности (рис. 1).

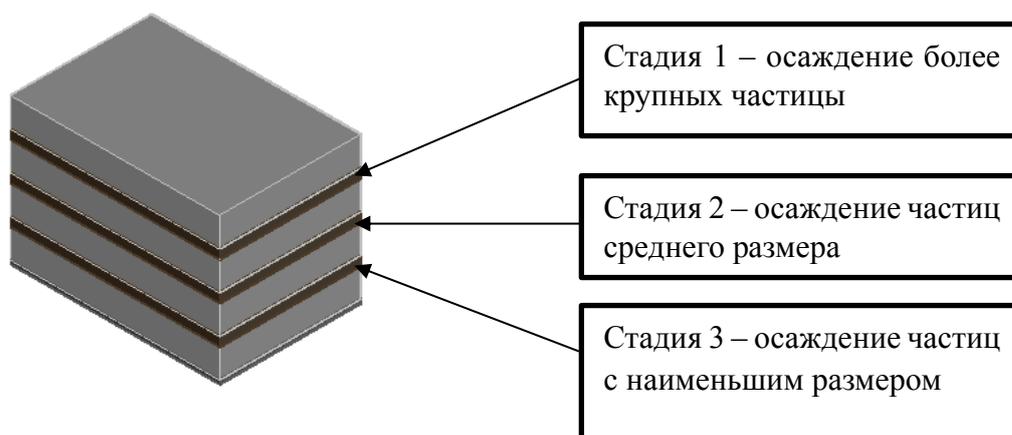


Рисунок 1. Модель массива с 3-мя малофильтрационными слоями (составлено/разработано автором)

Крупные частицы (пыльники, глина, илы, шлам), как правило, осаждаются ближе к поверхности штабеля – это первая стадия снижения фильтрационной способности, а частицы среднего размера будут оседать ближе к центральной области штабеля – вторая стадия снижения гидравлической проводимости. Частицы с наименьшим размером постепенно осаждаются ближе к нижней части штабеля кучного выщелачивания – это третья стадия снижения фильтрационных свойств штабеля.

Удельная поверхность мелких частиц может достигать от нескольких квадратных метров до десятков, даже сотен квадратных метров. Осаждение таких частиц в порах способствуют снижению фильтрационных свойств штабеля или даже к полному закупориванию порового и пустотного пространства массива руд [11–13].

Таким образом, малопроницаемые слои в штабеле КВ образуются в результате протекания процессов самопроизвольной суффозии (переноса) тонкодисперсных частиц из верхней его части вниз по разрезу.

В частности, наблюдается увеличение упругого состояния массива руд за счет заполнения имеющегося пустотного, образуемого между кусками руды, пространства пылью. До настоящего времени наиболее способы стабилизации фильтрационных характеристик штабеля при кучном выщелачивании обеспечивают лишь частичного уровня просачивания растворов или краткосрочного восстановления фильтрационных характеристик штабеля.

Кроме того, фильтрация выщелачивающих растворов происходит по постоянным путям, что приводит к наличию значительных блоков необработанной рудной массы и, соответственно к недоизвлечению полезного компонента.

В связи с этим, существует определенная необходимость в исследовании параметров штабеля КВ, изменение которых способствуют разрушению малопроницаемых слоев внутри штабеля КВ путем создания поровых каналов. Успешная реализация данного мероприятия обеспечить воздействие на слаботронутые области штабеля при проникновении технологических растворов, что позволит восстановить оптимальную фильтрационную способность массива выщелачиваемых руд и освобождения для растворов золота, заключенного в рудах зоны кольматации.

Моделирование процесса образования малофильтрационных слоев является комплексной задачей, для решения которой нужно учитывать следующие параметры штабеля кучного выщелачивания: размер (диаметр) пыли; количество (масса) пыли; скорость движения растворов; площадь всех каналов для миграции растворов, неоднородность (шершавость) поверхности кусков руды; свойства поверхности кусков руды (гидрофильность, гидрофобность

или смачиваемость); мощность малофильтрационных слоев, их поперечное сечение, время их формирования, диапазон изменения температур, наличие примесей, изменение давления и т. д. Одним из важнейших параметров поровых каналов учтенным в данном исследовании является их извилистость, которую нужно учитывать для реальные условий грунтов.

Методы исследования

Для упрощения задачи разработана математическая модель поведения потока технологических растворов в пористой среде, способствующая увеличению пропускной способности штабеля, для достижения более равномерного их просачивания через него. Для этого предусматривается создание малоразмерных каналов в малопроницаемых слоях, образованных в штабеле в процессе кучного выщелачивания, с последующим расчетом значения фильтрации.

Основные данные для решения поставленной задачи приведены в таблице 1.

Таблица 1

Описание параметров математической модели

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

Составлено/разработано автором

Результаты

Метод расчета конечной гидравлической проницаемости при создании вертикальных каналов

Геометрическая модель малопроницаемого слоя с вертикальными каналами представлено на рис. 2.

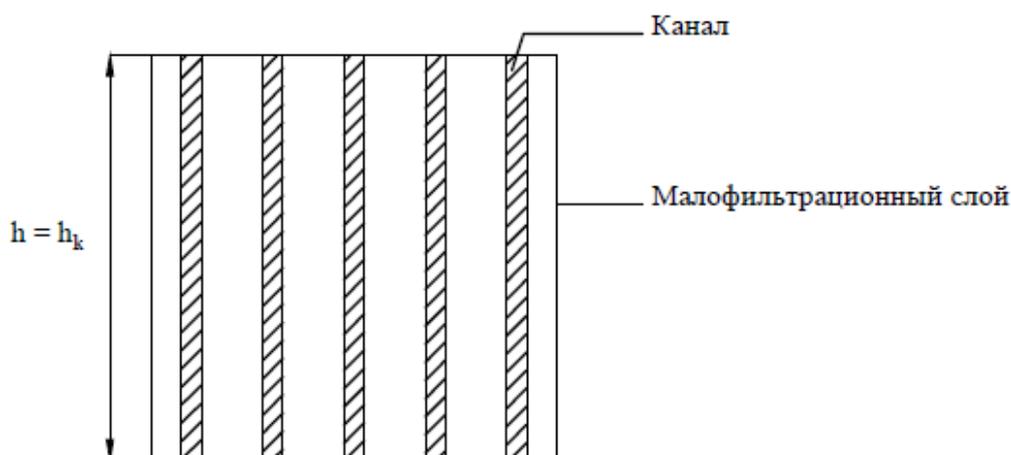


Рисунок 2. Общий вид малопроницаемого слоя с вертикальными каналами (составлено/разработано автором)

Объем малофильтрационного слоя:

$$V = a \cdot b \cdot h \quad (1)$$

Объем пор до образования каналов:

$$V_1 = m_1 \cdot V \quad (2)$$

$$m_1 = \frac{V_1}{V} \quad (3)$$

Объем занимаемый N поровыми каналами вычисляется по формуле:

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

где $h_k = h$.

При создании N каналов сокращается объем существующих до образования каналов пор в области их образования. Для определения объема сокращенных пор используется следующая формула:

$$V_c(N) = m_1 \cdot V_k(N) \quad (5)$$

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

$$V_2(N) = V_1 + V_k(N) - V_c(N) \quad (6)$$

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

$$V_2(N) = V_1 + N(1 - m_1) \frac{\pi h_k d_k^2}{4} \quad (7)$$

Пористость после образования каналов вычисляется по формуле:

$$m_2 = \frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_k d_k^2}{4V} \quad (8)$$

Для штабелей КВ проницаемость массы руды зависит от пористости. Зависимость проницаемости от размеров пор для фильтрации растворов через поры идеальной пористой среды оценивается с учетом уравнения Пуазейля и Дарси.

Формула Пуазейля выражается следующим образом:

$$Q = \frac{n\pi r^4 F \Delta P}{8\mu L} \quad (9)$$

где:

n – число пор, приходящихся на единицу площади фильтрации;

r – радиус порового канала;

F – площадь фильтрации;

ΔP – перепад давлений;

L – длина порового канала.

Коэффициент пористости среды, через которую проходит фильтрация:

$$m = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{образца}}} = \frac{nF\pi R^2 L}{FL} = n\pi R^2 \quad (10)$$

Следовательно, уравнение (9) можно переписать следующим образом:

$$Q = \frac{mr^2 F \Delta P}{8\mu L} \quad (11)$$

Из уравнения Дарси следует, что:

$$Q = \frac{FK_{\text{пр}} \Delta P}{\mu L} \quad (12)$$

Приравняв правые части уравнений (11) и (12) получим для размера созданных каналов взаимосвязь пористости и проницаемости:

$$K_{\text{пр}} = m_2 \frac{r_k^2}{8} \quad (13)$$

Проницаемость малофильтрационного слоя после образования N вертикальных каналов диаметром d_k определяется по формуле:

$$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_k d_k^2}{4V} \right) \frac{d_k^2}{32} \quad (14)$$

Для реальных условий штабеля КВ радиус порового канала рассчитывается с учетом структурных особенностей пород, с использованием эмпирического уравнения Ф.И. Котлякова:

$$r = \frac{2}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{K_{\text{пр}} \cdot \varphi}{m}} \quad (15)$$

где: φ – структурный коэффициент, учитывающий извилистость.

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

$$\varphi = \frac{0,5035}{m^{1,1}} \quad (16)$$

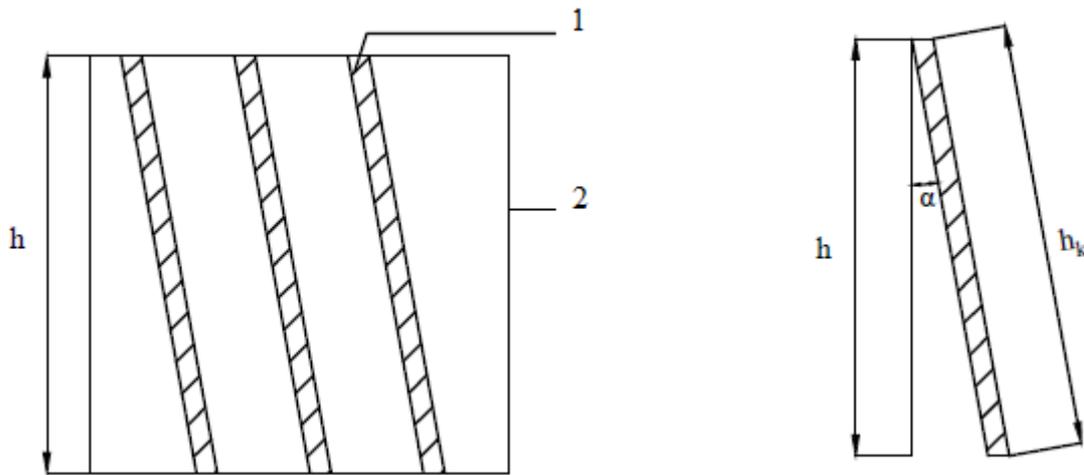
После преобразования получаем следующую формулу проницаемости, учитывающую извилистость каналов:

$$K_{\text{пр}} = \left(\frac{4V_1 + N(1 - m_1)\pi h_k d_k^2}{4V} \right)^{2,1} \frac{(d_k \cdot 7 \cdot 10^5)^2}{8,056} \quad (17)$$

Метод расчета конечной гидравлической проницаемости при создании наклонных каналов

Геометрическая модель малопроницаемого слоя с наклонно-направленными каналами представлена на рис. 2.

Каналы располагаются под углом α к вертикальной оси.



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

Рисунок 3. Геометрический вид (составлено/разработано автором)

Объем занимаемый N наклонно-направленными поровыми каналами вычисляется по формуле:

$$V_k(N) = \pi N \frac{d_k^2}{4} h_k \quad (18)$$

где $h_k = \frac{h}{\cos \alpha}$.

Проводя подобный расчет как с вертикальными каналами, получаем следующее значение проницаемости при создании N наклонных каналов:

$$K_{пр} = \left(\frac{4V_1 \cos \alpha + N(1 - m_1) \pi h d_k^2}{4V \cos \alpha} \right) \frac{d_k^2}{32} \quad (19)$$

Проницаемость с учетом извилистости каналов рассчитывается по формуле:

$$K_{пр} = \left(\frac{4V_1 \cos \alpha + N(1 - m_1) \pi h d_k^2}{4V \cos \alpha} \right)^{2,1} \frac{(d_k \cdot 7 \cdot 10^5)^2}{8,056} \quad (17)$$

Обсуждение

Математическое моделирование проницаемости осуществлено с учетом образованных в малопроницаемых слоях вертикальных и наклонных каналов. Была получена зависимость проницаемости от объема исследуемого слоя, объема пор в них, числа, диаметра, высоты и угла наклона каналов, начальной пористости слоя (табл. 2).

Таблица 2

Формулы для расчета проницаемости

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

Составлено/разработано автором

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

При этом, во избежание чрезмерно высокой фильтрации растворов, диаметр каналов не должен превышать 2–10 мм. Все же размеры создаваемых каналов и направления их в штабеле КВ необходимо установить в зависимости от горно-технологических условий решаемой инженерной задачи. Предложенные вертикальные и наклонные направления формирующихся каналов в малопроницаемых слоях будут также зависеть от содержания металлов в них. Например, наклонные каналы обеспечат наибольший контакт растворов с кусками руды по сравнению с вертикальными каналами. Необходимо обратить внимание на возможность создания горизонтальных, криволинейных или сочетания перечисленных направлений каналов.

Каналы должны находиться в пределах малофильтрационной области. В результате увеличатся эффективные объемы выщелачиваемых руд, а также решатся проблемы каналирования в штабелях. Их численное количество будет определяться на основе характеристик (в зависимости от мощности, протяженности малопроницаемого слоя и его сложившейся проницаемости) штабеля КВ и достигаемого результата.

Важным аспектом является определение областей с осложненным просачиванием технологических растворов. Для нахождения выделения таких областей необходимо использовать любые существующие, менее затратные и отвечающие высокому качеству методы. В настоящее время существуют различные современные электроразведочные методы оценки равномерности смачивания кусков руды, локализации поровых каналов для фильтрации растворов в объеме штабеля КВ, выделения непроработанных участков штабеля для дальнейшего повторной обработки. Электроразведочные технологии необходимо подбирать в зависимости от высоты штабеля с точки зрения экономической целесообразности. Стоит проводить сбор и анализ данных при снижении качества и фильтрационных свойств продуктивных растворов ниже установленного технологического предела.

Заключение

Полученные математические модели взаимосвязи проницаемости от объема малофильтрационного слоя, объема пор в него, числа, диаметра, высоты и угла наклона каналов, начальной пористости и извилистости слоя служат преимущественно для увеличения проходимости рабочих растворов в штабеле КВ.

Будущие исследования будут направлены на выявление способов создания таких каналов, расчет необходимого числа их в зависимости от диаметра для изменения проницаемости штабеля с 0,01 мкм² до 1 мкм² и более, а также увеличения пористости с 0,15 до 0,3–0,35. Кроме того, для более четкого обоснования полученных зависимостей, а также их дополнения требуется проведения лабораторных и/или опытно-промышленных исследований с учетом влияния других факторов, таких как температура, химические реакции и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tcharo H., Koulibaly M., Tchibozo F.K.N. Development of Methods for Anti-filtration Formations Destruction Inside a Heap Leach Pile // In S. Glagolev (Ed.): ICAM 2019, SPEES, 2019. – pp. 143–145.
2. Яшкин И.А., Овешников Ю.М., Авдеев П.Б. Повышение эффективности технологии кучного выщелачивания золотосодержащих руд // ГИАБ. 2014. № 4. С. 162–169.
3. Абен Е.Х., Рустемов С.Т., Бахмагамбетова Г.Б., Ахметханов Д. Повышение извлечения металла на основе активации выщелачивающего раствора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 12. – С. 169–179. DOI: 10.25018/0236-14932019-12-0-169-179.
4. Тюпин В.Н. Интенсификация кучного выщелачивания руд с использованием энергии взрыва // Горный Журнал, 2019, № 8, стр. 61–64.
5. Amr F. Elhakim. Estimation of soil permeability // Alexandria Engineering Journal 2016, Vol. 55(3), pp. 2631–2638.
6. Alim K., Parsa S., Weitz D.A., Brenner M.P. Local Pore Size Correlations Determine Flow Distributions in Porous Media // Phys Rev Lett. 2017, 119(14). pp. 144501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.144501.
7. Vafai K. Handbook of Porous Media // CRC Press, Boca Raton, FL, 2015, pp. 959.
8. Qian Zhai, Harianto Rahardjo. Estimation of permeability function from the soil–water characteristic curve // Engineering Geology, 2015, Vol. 199, pp. 148–156.
9. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Основные факторы, определяющие эффективность орошения штабеля КВ // Вестник Евразийской науки, 2019 №1, <https://esj.today/PDF/51NZVN119.pdf>.
10. Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Каки Кристоф, Тчаро Х., Воробьев К.А. Интенсификация кучного выщелачивания золота из тонкодисперсных руд с использованием нанотехнологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1. – С. 160–174. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-160-174.
11. Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Горлова О.Е., Колодежная Е.В. Развитие технологических инноваций глубокой и комплексной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Журнал Известия тульского государственного университета. науки о земле. – 2020. – № 1. – С. 159–171.
12. Ковалев Н.В. Ковалев В.Н., Холоднов В.А. Модифицированная математическая модель «сжимающееся ядро» процесса выщелачивания золота // XXIX Международная научная конференция ММТТ-29 «Математические методы в технике и технологиях»: сб. науч. тр. / СГТУ. – Саратов, 2016. – Т. 10. – С. 12–24.
13. Назарова Л.А., Назаров Л.А. Геомеханические и гидродинамические поля в продуктивном пласте в окрестности скважины с учетом зависимости фильтрационных свойств пород от эффективных напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2018, № 4, стр. 11–20.

Tcharo Honore

Peoples' friendship university of Russia, Moscow, Russia

E-mail: honoretcharo@yahoo.com

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=989497

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Honore_Tcharo

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57211300325>

Permeability modeling of ore stockpile for the stabilization of leaching solution filtration properties

Abstract. A gradual decrease in the values of filtration indicators of leaching solutions due to the formation of low-permeability layers or zones inside the stockpile is often observed during heap leaching.

Traditional methods of heap leaching have the disadvantage consisting in a decrease in the degree of recovery of useful component (metal) due to a decrease in the values of filtration indicators of leaching solutions over time, due to the compaction of the ore mass during the formation of a stockpile by bulldozers or other mining and technological factors. That leads to the formation of low-permeability layers or low-permeability zones inside the stockpile.

Ensuring the continuous flow of technological solutions in a heap leach stockpile is a rather difficult geomechanical task that to be solved may require the use of mathematical simulation methods. This work is aimed at studying and changing the physical and mechanical state of the soil to improve its hydrodynamic properties. The mechanism of settling of large particles (anthers, clay, silt, sludge) in a stockpile, considering their size, has been revealed. It has been established that the process of clogging the stockpile pore space occurs in three stages.

We have calculated the hydraulic characteristics of the solutions, depending on various factors, which allows us to increase their seepage rate and the level of wettability of the pieces of ore. In particular, the influence of natural or artificial channels on soil characteristics is considered.

We have established the dependence between permeability and the investigated layer volume, the volume of pores in it, the number, diameter, height and angle of inclination of the channels, and the initial porosity of the layer.

Keywords: mathematical modeling; stockpile; low-filtration layers; channel; permeability; porosity; anthers; filtration properties