

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ В РУДНОМ ШТАБЕЛЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.С. Курилко¹, В.И. Попов¹

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия,
e-mail: popov.gtf@mail.ru

Аннотация: Представлен вычислительный алгоритм, разработанный для моделирования процесса выщелачивания металла в поперечном сечении штабеля золотосодержащей руды. Модель позволяет прогнозировать процессы конвективного тепло- и массообмена в теле штабеля и включает уравнения конвективного теплопереноса с учетом возможных фазовых превращений выщелачивающего раствора и изменением его температуры при подаче, а также уравнений конвективной диффузии выщелачивающего раствора и растворенного металла. Отдельным этапом определяется приближенное решение процесса диффузии этих же компонентов в кусковом рудном материале. Суммарные вклады диффузионных потоков по всем рудным кускам, находящимся в реакционной зоне, используются как стоки и источники для соответствующих уравнений конвективной диффузии. Данные, используемые в модели, включают физико-химические, геометрические и эксплуатационные параметры, такие как: содержание выщелачиваемой руды, скорость подачи и концентрация цианида, распределение по размеру кускового материала руды, поперечные габариты штабеля. На основе представленной модели можно прогнозировать как извлечение металла, так и потребление реагентов, используя доступные исходные параметры. Моделирование обеспечит получение обоснованных данных как для предварительного технико-экономические обоснования, так и выбора оптимального режима эксплуатации.

Ключевые слова: тепломассоперенос при фазовых превращениях, диффузия, фильтрация, математическое моделирование, химические реагенты, кучное выщелачивание, рудный штабель, цианиды, замерзание и оттаивание.

Для цитирования: Курилко А. С., Попов В. И. Моделирование тепломассообменных процессов выщелачивания в рудном штабеле при низких температурах окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 1. – С. 111–119. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-111-119.

Modeling heat and mass exchange processes in ore pile in heap leaching under low ambient temperature

A.S. Kurilko¹, V.I. Popov¹

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: popov.gtf@mail.ru

Abstract: The article presents the computational algorithm developed for modeling metal leaching process in cross section of gold ore pile. The model allows predicting processes of heat and mass convection in the pile body and includes equations of convective heat transfer with regard to possible phase transitions of leaching solution and the solution temperature changes during feeding, as well as equations of convective diffusion of leaching solution and dissolved metal. A separate stage is an approximate solution for diffusion of the same components in lump ore. Overall contributions of diffusion flows from all lump ore in the reaction zone are used as sources and sinks in the related equations of convective diffusion. The model input data are physicochemical, geometrical and operational parameters such as: content of ore to be leached, cyanide concentration and feed rate, size distribution of lump ore and cross dimension of pile. The model enables prediction of both metal recovery and reagent consumption using available input parameters. Modeling can provide justified data for both pre-feasibility study and optimization of operation conditions.

Key words: head and mass transfer during phase transitions, diffusion, percolation, mathematical modeling, chemical reagents, heap leaching, ore pile, cyanides, freezing and thawing.

For citation: Kurilko A. S., Popov V. I. Modeling heat and mass exchange processes in ore pile in heap leaching under low ambient temperature. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(1):111-119. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-111-119.

Введение

Одним из эффективных способов разработки месторождений с низким содержанием полезных компонентов является технология выщелачивания, отличающаяся существенно меньшей трудоемкостью и себестоимостью добычи металла [1 – 5]. Математическое моделирование используется для описания различных процессов выщелачивания металла из бедных руд. Некоторые базовые модели процесса выщелачивания были представлены в течение последних лет и используются для его прогноза. При этом добыча благородных металлов привлекает наибольшее внимание из-за сравнительно высокой экономической эффективности.

Широко используется модель сжимающегося ядра, различные кинетические модели, в том числе использующие эмпирические данные о характерных химических реакциях процесса выщелачивания [3, 4, 6 – 10]. Модель сжимающегося ядра была полезна при описании кинетических характеристик гетерогенных систем жидкость — твердое

тело, но обозначила некоторые проблемы, связанные с учетом размера частиц рудного материала. Было показано, что модели выщелачивания, в которых не учитывается изменение размера частиц, могут привести к ошибочным выводам. Несмотря на многочисленные исследования, описывающие реакции выщелачивания с помощью моделей сжимающегося ядра, их адекватное применение оправдано лишь для концентрированных реагентов при условии сферической или квадратной формы ядра. Если эти условия не выполняются, возможны осложнения в определении скорости реакций [6 – 10].

Опыт работы предприятий, применяющих процесс кучного выщелачивания, показывает, что его использование в регионах с холодным климатом встречает ряд проблем, которые снижают его эффективность [3, 5, 7]. Это связано с тем, что технология кучного выщелачивания в зимних условиях в первую очередь определяется необходимостью создания и сохранения положительного температурного режима рудного шта-

беля, а также поддержания оптимального уровня химических параметров процесса цианирования [3, 4]. Поэтому работы, связанные с увеличением продолжительности и полноты извлечения металла в подобных условиях, вызывают обоснованный интерес.

Обобщение и систематизация этих решений по объектам, процессам, условиям применения и техническим приемам представляется актуальным для выбора эффективных, оптимальных и экологически безопасных в конкретных природно-климатических и горно-геологических условиях месторождений.

Определяющими параметрами в процессе цианирования являются: количество свободного цианида, соединения, которые вступают в реакцию с цианидом, размер частиц и температурные условия. Скорость извлечения золота повышается при увеличении концентрации свободного цианида, но его избыток вызывает образование комплексов с примесями в системе. Так, наличие сульфидных соединений в рудном штабеле приводит к значительному и нерациональному потреблению цианида.

Температура среды выщелачивания оказывает существенное влияние на растворение включений металлического золота в рудном материале. Обычно повышение температуры увеличивает растворимость металлов, это происходит в связи с ростом коэффициента диффузии реагента и изменением константы равновесия химической реакции. В тоже время концентрация и скорость растворения кислорода уменьшаются. Кроме того, повышение температуры раствора вызывает и более высокую растворимость примесей. Так как скорости этих процессов различны, то необходим поиск оптимальных температур процесса выщелачивания, в том числе обеспечивающих возможность его проведения при отрицательных температурах внешней среды [11].

Математическая модель

Проведенный анализ показывает, что построение минимальной модели тепловых и концентрационных преобразований в штабеле в рамках первичного приближения должно включать уравнения в частных производных:

- диффузионно-конвективного теплопереноса;
- диффузионно-конвективного переноса рабочего раствора;
- баланса концентрации активного цианида и продуктивного раствора.

Система уравнений замыкается кинетическими уравнениями, определяющими химическое взаимодействие и фазовое равновесие раствора. В предварительной версии рассматривается возможность поддержания положительного режима температуры штабеля в условиях отрицательных температур окружающей среды. При этом используются апробированные алгоритмы фильтрации и теплопереноса в промерзающих протаивающих породах [12].

Для упрощения вычислительный эксперимент проведен в предположении однородности горных пород, характеризующихся одной формой уравнения фазового равновесия поровой влаги.

С помощью введения параметра захвата — k_{3AX} предусмотрена возможность селекции растворенного компонента на внутренней границе лед-рассол.

- Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = -\nabla J_T + L\rho I_F \quad (1)$$

- Уравнение переноса влаги

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla J_W - I_F \quad (2)$$

- Уравнения переноса для концентраций растворенных реагентов

$$\frac{\partial(wC_1^f)}{\partial t} = -\nabla J_{C_1} - k_{3AH_1} C_1^f I_F + I_{R_1}$$

$$\frac{\partial(wC_2^f)}{\partial t} = -\nabla J_{C_2} - k_{3AH_2} C_2^f I_F + I_{R_2} \quad (3)$$

Здесь c — теплоемкость; ρ — плотность рудного материала в штабеле; L — теплота фазового превращения вода — лед; I_F — мощность источника фазового превращения; w — влагосодержание в долях единицы; C_1^f — концентрация выщелачивающего реагента в растворе; k_{3AX_1}, k_{3AX_2} — коэффициенты захвата реагентов льдом; I_{R_1} — расход выщелачивающего реагента; I_{R_2} — выход металла в раствор в соответствии с химической реакцией.

Индекс 1 относится к содержанию цианида в фильтрующемся растворе, а индекс 2 — к содержанию в нем выщелачиваемого металла.

Потоки J компонентов включают конвективный перенос. Система (1–3) замыкается уравнением состояния порового раствора $T_F = T_F(w, C)$, учитывающим специфические характеристики

среды — потенциал адсорбционного взаимодействия, величину удельной поверхности, концентрацию порового раствора [12].

Для величины гидравлической проводимости использовано следующее выражение [14].

$$K(w) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (4)$$

Здесь K_s — коэффициент фильтрации раствора для насыщенного порового пространства; S — степень насыщения порового пространства жидкой фазой; m — параметр, определяемый спецификой строения порового пространства материала рудного штабеля.

Наличие льда в поровом пространстве рудного материала штабеля приводит к существенному снижению его проницаемости, что учитывается вводом фактора фильтрационного сопротивления перемещению потока [13]

$$K(w)_{frozen} = 10^{-\frac{\Omega w_i}{w_t - w_r}} K(w) \quad (5)$$

Здесь w_i — содержание льда в поровом пространстве в долях единицы; w_t — суммарное содержание влаги и льда в долях единицы; w_r — величина влагосодержания, соответствующая максимальному влагонасыщению; Ω — числовой параметр.

Решение системы уравнений (1)–(3) осуществляется на основе конечно-разностных соотношений полученных с помощью интегро-интерполяционного метода с использованием процедуры расщепления по физическим процессам (фильтрация, диффузия, фазовый переход, химические преобразования исходного состава) [12].

Для рассматриваемой задачи геометрия области представлена на рис. 1.

На границах Γ_1 и Γ_4 заданы условия конвективного теплообмена с окружающей средой

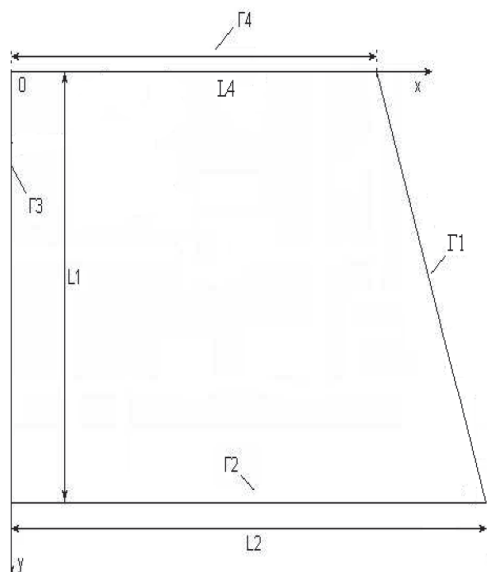


Рис. 1. Схема расчетной двумерной области ($L_1 = 5$ м; $L_2 = 12,5$ м; $L_4 = 8$ м)

Fig. 1. Scheme of the calculated two-dimensional region ($L_1 = 5$ m; $L_2 = 12.5$ m; $L_4 = 8$ m)

$$J_t = \alpha(T - T_{cp})$$

и условия инфильтрации выщелачивающего реагента

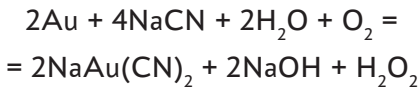
$$J_w = V_{con}^w,$$

здесь α — коэффициент конвективного теплообмена; T_{cp} — температура среды теплообмена; V_{con}^w — удельная скорость подачи выщелачивающего раствора.

Предусмотрена возможность независимо задавать температуру подаваемого на поверхность штабеля раствора. На границе Г3 выполняются условия симметрии для потоков тепломассопереноса — $J_t = 0$ и $J_w = 0$.

На границе Г2 задана постоянная температура и условие протекания раствора по массообмену.

Рассмотрим основную реакцию процесса выщелачивания



Предполагается, и это существенно упрощает рассмотрение, что химическая реакция происходит мгновенно, и основное время процесса тратится на диффузионную транспортировку реагентов в реакционную зону. При этом собственно процесс выщелачивания происходит в кусковом материале руды, который по предположению имеет шаровидную форму с радиусом 0,02 м. Реагент из фильтрационного потока диффундирует в кусковой рудный материал, а продукты реакции также диффузионным путем выходят в омывающий раствор. Эти процессы описываются системой двух уравнений ($i = 1, 2$).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_i r^2 \frac{\partial C_i}{\partial r} \right)$$

При граничных условиях вида:

$$C_1 = 0 \text{ при } t = t_{start}; C_1 = C_1^f \text{ при } r = a;$$

$$C_2 = C_2^{rock} \text{ при } t = t_{start};$$

$$C_2 = C_2^f \text{ при } r = a;$$

Здесь C_2^{rock} — начальное распределение содержания металла в выщелачиваемом материале (моль/куб · м); C_i — концентрация цианида ($i = 1$) и металла ($i = 2$) в диффундирующем растворе реагента (моль/куб · м); D_i — коэффициенты диффузии реагентов в кусковом материале, они приняты постоянными; t_{start} — индивидуальное время начала реакции в рудном материале штабеля, зависящее от его локализации (вертикальной координаты).

Решение этой задачи о диффузии реагента в рудном материале в предположении о шаровидной форме кусков принято в аналитической форме [15] и в дальнейшем используется как приближенное решение для определения соответствующих стоков и источников системы уравнений (1–3). Расход выщелачивающего реагента I_{R1} и переход металла в раствор в результате реакции выщелачивания I_{R2} определяется суммированием диффузионных потоков со всей поверхности реагирующего кускового рудного материала. Из условия подачи цианистого раствора 0,003 л/(м² · с) выводится для оценки скорости конвективного переноса фильтрационным потоком K_s величина порядка $3,0 \cdot 10^{-6}$ м/с для массива штабеля в талом состоянии. Концентрация поступающего в штабель раствора цианида составляет 4 моль/куб.м.

Результаты

На рис. 2–3 представлены результаты расчетов на основе разработанной математической модели процесса выщелачивания. На рис. 2 приведены профили концентрации растворенного металла на реакционном фронте выщелачивания в конкретные моменты времени. Ширина этих зон определяется интенсивностью миграционных процессов и распределением кускового рудного материала по размеру. Расчет приведен для размера куска — $r = 0,02$ м.

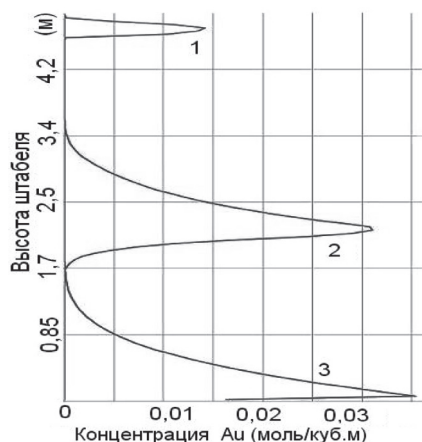


Рис. 2. Распределение концентрации $C2f$ выщелаченного металла в растворе по высоте штабеля для различных моментов времени (1–2 сут.; 2–16 сут.; 3–32 сут.)

Fig. 2. Distribution of the concentration $C2f$ of leached metal in solution in the volume of the stack for various time instants (1–2 days; 2–16 days; 3–32 days)

На (рис. 3) представлено расположение профилей концентрации выщелачивающего раствора цианида для таких же значений времени. Сравнение представленных результатов с полученными

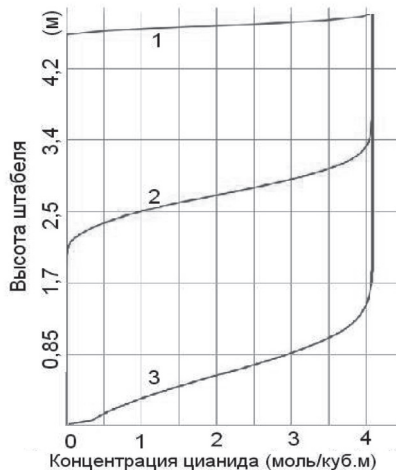


Рис. 3. Распределение выщелачивающего раствора цианида C_1^f по высоте штабеля для различных моментов времени (1–2 сут.; 2–16 сут.; 3–32 сут.)

Fig. 3. Distribution of leaching solution of cyanide C_1^f in the volume of the stack for various points in time (1–2 days; 2–16 days; 3–32 days)

в работах [7–9] позволяет говорить о качественно подобном механизме описания распределения концентраций рабочего раствора и металла в объеме штабеля с помощью предложенной модели процесса выщелачивания.

На (рис. 4) приведены результаты расчетов с параметрами математической модели, максимально приближенными к условиям эксперимента по выщелачиванию, опубликованным в работе [16]. Различие результатов расчета и экспериментальных данных [16] не превышает 10–15%.

Заключение

Данная расчетная модель позволяет оценить время на восстановление рабочей температуры штабеля при аварийном простое или необходимые параметры теплоизоляции при продлении работ в условиях влияния отрицательных температур среды [11]. Так как при этом допускается, что массив может иметь отрицательную температуру, то величины содержания воды, льда и концентрации

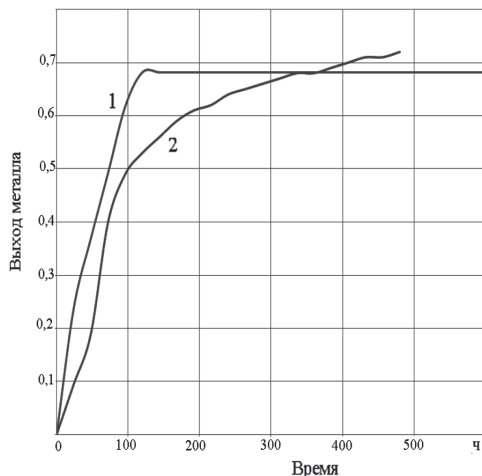


Рис. 4. Сравнение расчетных (1) и экспериментальных данных (2) по степени извлечения металла на лабораторной установке [16]

Fig. 4. Comparison of calculated – (1) and experimental data – (2) [16] on the degree of metal extraction in a laboratory setup

определяются на основе уравнения фазового равновесия по начальным значениям влагосодержания и концентраций, заданных для талого состояния. Изменение тепловых условий в теле штабеля может привести к искажению фильтрующихся потоков реагента, образованию мертвых зон. Представленная расчетная модель позволяет на основе данных регистрации температурного поля штабеля прогнозировать появление подобных ситуаций.

Любые изменения условий эксплуатации в экстремальных погодных условиях будут зависеть от строения и неоднородности рудного штабеля, а также

состава и качества рудного материала. Результаты наших исследований позволяют в значительной степени сохранять технологическую устойчивость процесса кучного выщелачивания металла, целенаправленно применяя управление температурным режимом штабеля: как организацией его теплозащиты, так и оптимальным регулированием температурой подаваемого раствора реагента.

Представленная модель допускает усложнение и детализацию химического взаимодействия в рассматриваемых системах, включая конкурентные механизмы расхода реагентов и учета тепловых эффектов при их взаимодействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Киселев В. В., Каймонов М. В., Попов В. И. Перспективные направления подземного выщелачивания золота в россыпных шахтах криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 177 — 184. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-177-184.

3. Воробьев А. Е., Погодин М. А., Чекушина Т. В. Классификация методов выщелачивания золота при отрицательных температурах окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1999. — № 2. — С. 76 — 80.

4. Алтушкин И. А., Левин В. В., Король Ю. А., Карев Б. В. Опыт подземного выщелачивания руд Гуменского медного месторождения // Цветные металлы. — 2019. — № 5. — С. 17 — 32. DOI: 10.17580/tsm.2019.05.03.

5. Аренс В. Ж., Фазлуллин М. И., Хрулев А. С., Хчяян Г. Х. Опыт отработки погребенных многолетнемерзлых россыпей золота методом скважинной гидродобычи // Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 41 — 46. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.09.

6. Smith K. E. Cold weather gold heap leaching operational methods // Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. 1997. Vol. 49. No 4. Pp. 20 — 23.

7. McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross M. Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures // Minerals Engineering. 2016. Vol. 90, Pp. 77 — 88.

8. McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross M. Heap leaching: Modelling and forecasting using SFD technology // Minerals. 2018. Vol. 8. No 1. Pp. 107 — 118.

9. McBride D. Preferential flow behavior in unsaturated packed beds and heaps: Incorporated into CFD model // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 171. Pp. 177 — 185.

10. Masloboev V., Seleznev S., Svetlov A., Makarov D. Hydrometallurgical processing of low — grade sulfide ore and mine waste in the arctic region: Perspectives and challenges // Minerals. 2018. Vol. 8. No 10. Pp. 436 — 442.

11. Попов В. И., Каймонов М. В. Определение оптимальных параметров процесса выщелачивания в рудном штабеле при отрицательных температурах окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № S24. — С. 292 — 298. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-292-298.

12. Попов В.И. Новый метод решения задач промерзания в спектре температур // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Труды международной научно-практической конференции (г. Якутск 14–17 июня 2005 г.). Т. 2. — Якутск: Изд-во института мерзлотоведения СО РАН, 2005. — С. 57–59.
13. Lundin L. Hydraulic properties in an operational model of frozen soil // *Hydrology*. 1990. Vol. 118. Pp. 289–310.
14. Hansson K., Simunek J., Mizoguchi M., Lundin L. C., van Genuchten M. Th. Water flow and heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications // *Vadose Zone Journal*. 2004. Vol. 3. Pp. 693–704.
15. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — С. 487.
16. Ковалев Н.В., Ковалев В.Н., Холоднов В.А. Модифицирование модели «сжимающееся ядро» для описания процесса выщелачивания золота из смеси фракций руды // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. — 2015. — № 31. — С. 99–104. **МИАБ**

REFERENCES

1. Kovlekov I. I., Sherstov V. A., Varlakov P. S., Dmitriev A. A. Experience of heap leaching of gold ore in Yakutia. *Nauka i obrazovanie*. 2005, no 1, pp. 21–24. [In Russ].
2. Киселев В. В., Каймонов М. В., Попов В. И. Promising trends in in-situ leaching in gold placer mines in permafrost region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 12, pp. 177–184. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-177-184.
3. Vorob'ev A. E., Pogodin M. A., Chekushina T. V. Classification of gold leaching methods under negative ambient temperatures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 1999, no 2, pp. 76–80. [In Russ].
4. Altushkin I. A., Levin V. V., Korol' Yu. A., Karev B. V. Experience of in-situ leaching in the Gumny copper deposit. *Tsvetnye metally*. 2019, no 5, pp. 17–32. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2019.05.03.
5. Arens V. Zh., Fazlullin M. I., Khrulev A. S., Khcheyan G. Kh. Experience of borehole hydraulic mining of buried permafrost gold placers. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no 1, pp. 41–46. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.09.
6. Smith K. E. Cold weather gold heap leaching operational methods. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 1997. Vol. 49. No 4. Pp. 20–23.
7. McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross, M. Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures. *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 90, Pp. 77–88.
8. McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross M. Heap leaching: Modelling and forecasting using SFD technology. *Minerals*. 2018. Vol. 8. No 1. Pp. 107–118.
9. McBride D. Preferential flow behavior in unsaturated packed beds and heaps: Incorporated into CFD model. *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 171. Pp. 177–185.
10. Masloboev V., Seleznev S., Svetlov A., Makarov D. Hydrometallurgical processing of low – grade sulfide ore and mine waste in the arctic region: Perspectives and challenges. *Minerals*. 2018. Vol. 8. No 10. Pp. 436–442.
11. Popov V. I., Kaymonov M. V. Determination of optimal heap leaching parameters under negative ambient temperatures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no S24, pp. 292–298. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-292-298.
12. Popov V. I. A new method of dealing with freezing in a temperature spectrum. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Yakutsk, 14–17 iyunya 2005 g.)* [International Conference and Workshop Proceedings on Problems and Prospects in Integrated Mineral Mining in Permafrost Zone (Yakutsk, June 14–17, 2005)], Vol. 2. Yakutsk, Izd-vo instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2005, pp. 57–59.
13. Lundin L. Hydraulic properties in an operational model of frozen soil. *Hydrology*. 1990. Vol. 118. Pp. 289–310.

14. Hansson K., Simunek J., Mizoguchi M., Lundin L. C., van Genuchten M. Nh. Water flow and heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications. *Vadose Zone Journal*. 2004. Vol. 3. Pp. 693 – 704.

15. Karslou G., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal conduction of solids], Moscow, Nauka, 1964, pp. 487.

16. Kovalev N. V., Kovalev V. N., Kholodnov V. A. Modification of a compressible fluid core model to describe gold leaching from a mixture of ore fractions. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2015, no 31, pp. 99–104. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курилко Александр Сардокович¹ – д-р техн. наук,
главный научный сотрудник,

Попов Владимир Иванович¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: popov.gtf@mail.ru,

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН,
e-mail: popov.gtf@mail.ru.

Для контактов: Попов В.И., e-mail: popov.gtf@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Kurilko¹, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher,
V.I. Popov¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: popov.gtf@mail.ru,

¹ Chersky Mining Institute of the North,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677000, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Corresponding author: V.I. Popov, e-mail: popov.gtf@mail.ru.

Получена редакцией 07.10.2019; получена после рецензии 01.06.2020; принята к печати 10.12.2020.

Received by the editors 07.10.2019; received after the review 01.06.2020; accepted for printing 10.12.2020.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Фатьянов А.В., Никитина Л.Г., Никитин С.В.

Обогащение полезных ископаемых в условиях нестационарного поля центробежных сил

Год: 2020

Страниц: 208

ISBN: 978-5-98672-512-3

Рассмотрены технологические особенности методов разделения мелких и тонких фракций минерального сырья. Рассмотрены новые направления разделения тонкодисперсных минеральных частиц в поле центробежных сил. Показаны теоретические возможности использования нестационарного центробежного поля для обогащения тонковкрапленных руд и техногенного минерального сырья. Описаны технологические параметры разделения минералов, обеспечивающих создание основы для конструирования обогатительных установок.