

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОСОЧУВАННЯ РУДНОГО ШТАБЕЛЯ**О. П. Рижий, В. М. Глінчук, В. О. Козяр, Р. М. Ігнатюк, С. В. Морозюк**Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна. E-mail: Ignatyuk_r_m@ukr.net

Дослідження спрямовані на визначення раціональних параметрів процесу фільтрації базальтової породи в штабелі та в утвореному магазині виймальної камери. Проведений детальний аналіз вирішення даного питання провідними вітчизняними науковцями. Для повного вилучення корисного компонента з руди обгрунтований комбінований спосіб вилуговування міді, та наведені результати експериментальних досліджень проникності базальтової породи в процесі просочування робочим реагентом. Проведене математичне моделювання процесу просочування із застосуванням базових моделей пористого середовища. На основі виконаних експериментальних досліджень встановлені залежності швидкості просочування сформованого штабеля та утвореного магазину виймальної камери залежно від різного значення пористості та розмірів фракції руди.

Ключові слова: проникність моделі, просочування, модель Сліхтера, комбіноване вилуговування, базальтова порода, мідь.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОСАЧИВАНИЯ РУДНОГО ШТАБЕЛЯ**А. П. Рыжий, В. Н. Глинчук, В. А. Козяр, Р. М. Игнатюк, С. В. Морозюк**Национальный университет водного хозяйства и природопользования
ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33000, Украина. E-mail: Ignatyuk_r_m@ukr.net

Исследования направлены на определение рациональных параметров процесса фильтрации базальтовой породы в штабеле и в образованном магазине выемочной камеры. Проведен детальный анализ решения данного вопроса ведущими отечественными учеными. Для полного извлечения полезного компонента из руды обоснован комбинированный способ выщелачивания меди, и приведены результаты экспериментальных исследований проницаемости базальтовой породы в процессе пропитки рабочим реагентом. Проведено математическое моделирование процесса пропитки на основе базовых моделей пористой среды. Выполненные экспериментальные исследования позволили установить зависимости скорости просачивания сформированного штабеля и образованного магазина выемочной камеры в зависимости от разного значения пористости и размеров фракции руды.

Ключевые слова: проницаемость модели, пропитка, модель Слихтера, комбинированное выщелачивание, базальтовая порода, медь.

АКТУАЛЬНІСТЬ РАБОТИ. Розвиток індустрії вимагає постійного збільшення видобутку стратегічних видів сировини, до яких, в першу чергу, належить мідевмісна руда, тому виникає потреба введення в розробку бідних, глибокозалегаючих родовищ і хвостосховищ. Розвиток геотехнологічних способів із підземним вилуговуванням надзвичайно складний і негативно впливає на навколишнє середовище. Саме тому вилучення твердої фази металу з базальтової породи комбінованим способом вилуговування є найбільш доцільним, оскільки керовані параметри даного способу дозволяють мінімізувати вплив на геологічне середовище і поверхню [1].

Аналіз останніх досліджень показує, що є різні варіанти протікання процесу, однак жоден із них не дозволяє проводити вилучення міді та супутніх металів у максимальному об'ємі та зі значною економічною ефективністю. З аналізу робіт І.О. Садовенка, А.Д. Калька, Я.Б. Петрівського, М.Г. Лустюка, С.Р. Бобляха та інших, можна зробити висновок, що основні технологічні схеми, якими розробляють мідевмісні родовища сьогодні мають багато недоліків.

Все більшої гостроти набувають питання повноти використання ресурсів. Сьогодні тверді відходи складають 1,5 млрд т/рік, у відвалах їх нагромаджено більше 10 млрд т, а для їх складування зайнято більше 230 тис. га родючих сільськогосподарських земель. Крім того, у водні об'єкти щорічно скидається 20 млрд м³ стічних вод (у тому числі 3,2 млрд м³ забруднених) [1].

За сучасних умов розвитку і темпів зростання гірничої промисловості, недоліки в комплексному і більш повному використанні сировини стають неприпустимим марнотратством. Кожний відсоток втрат при досягнутих обсягах виробництва, веде до щорічної втрати сотень тисяч тон стратегічних видів сировини.

Тому використання альтернативного комбінованого підходу до видобутку міді, дозволить вести вилучення корисного компоненту більш повно та контролювати при цьому фактори, які призводять до забруднення навколишнього середовища [2].

Мета роботи – визначення раціональних параметрів процесу просочування базальтової породи в штабелі та в утвореному магазині виймальної камери.

МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. У сформованому штабелі, для вилуговування базальтової руди, проміжки між окремими частинками утворюють складну систему проточних каналів, що визначають швидкість просочування штабеля від верхньої до нижньої точки. Ефективність проходження процесу вилуговування буде залежати від швидкості просочування, а відповідно, і часу просочування штабеля.

Оцінку величин проведемо на основі аналізу процесу просочування в найпростіших гранулярних моделях пористого середовища, що в певному наближенні характеризують структуру штабеля руди. Найпростіша гранулярна модель незцементованої руди становить конгломерат різним чином упакованих сферичних частинок однакових розмірів. Оче-

видно, що всі властивості подібної моделі повинні визначатися властивостями частинок, способом їх упаковки, а також взаємодією рідини, що насичує модель, із частинками. Ці обставини дозволяють оцінити кількісний зв'язок між розрихленістю моделі, розмірами частинок і проникністю для рідини в процесі просочування.

Модель Сліхтера, що складається із геометрично правильно упакованих однакових сферичних частинок, передбачає форму елементарної комірки моделі у вигляді ромбоєдра, утвореного центрами восьми куль, що дотикаються між собою.

Геометрія моделі визначає, що об'єм твердої фази в кожній комірці буде дорівнювати об'єму сферичної частинки:

$$V_T = \frac{\pi d_c^3}{6}, \quad (1)$$

де d_c – діаметр сфери.

Таким чином розрихленість моделі p можна визначити наступним співвідношенням [3]:

$$p = 1 - \frac{\pi d^3}{V_p b}, \quad (2)$$

де V_p – об'єм ромбоєдра.

З урахуванням геометричних особливостей елементарної комірки величину p визначають наступним чином:

$$p = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \alpha)\sqrt{1 + 2\cos \alpha}}, \quad (3)$$

де α – кут нахилу твірної ромбоєдра до основи ($60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$).

Для аналізу руху рідини всередині комірки вводять величину просвітності n , яка визначається відношенням площі просвіту S між кулями в площині, що з'єднує їх центри, до площі основи ромбоєдра S_0 :

$$n = \frac{S}{S_0}. \quad (4)$$

Зв'язок між величиною n і геометричними параметрами моделі d, β в такому випадку визначається наступним чином:

$$n = \frac{d^2 \sin \beta - \frac{\pi d^2}{4}}{d^2 \sin \beta} = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \beta}. \quad (5)$$

Система рівнянь (3) – (5) є трансцендентною і для її розв'язку використовували чисельні методи.

Пористість в моделі Сліхтера залежно від кута нахилу α , лежить в межах від 0,26 до 0,476, при цьому залежність просвітленості від пористості представляється функціональною залежністю побудованою методом найменших квадратів і представленою на рис. 1.

$$n = 0,5645 \cdot p - 0,0544 = f(p), \quad (6)$$

з коефіцієнтом кореляції рівним 0,9998.

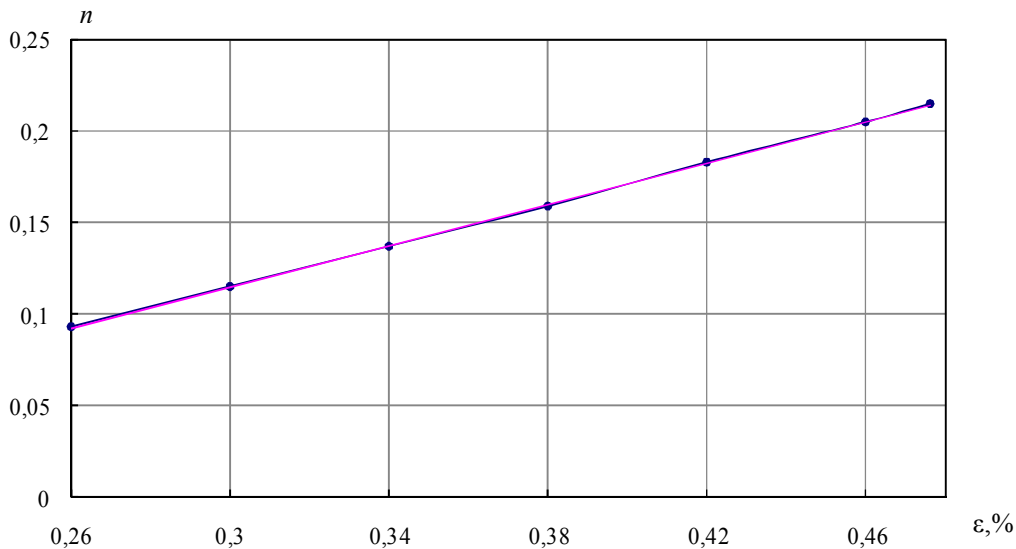


Рисунок 1 – Залежність між просвітністю і пористістю моделі Сліхтера

У кожній елементарній комірці моделі будуть існувати два фільтраційних канали, форма перерізу яких, є криволінійні трикутники із змінними по довжині розмірами комірок [5].

Визначимо середню швидкість течії рідини в таких каналах:

$$\bar{v} = \frac{\bar{S} \Delta p}{2\eta l}, \quad (7)$$

де l – довжина каналу; Δp – перепад тисків на кінцях каналу; \bar{S} – середня площа каналів.

Враховуючи співвідношення Дююї–Форхгеймера, швидкість фільтрації, визначимо наступним чином [6]:

$$v_\phi = p \bar{v}. \quad (8)$$

Величини l, \bar{S} в моделі визначимо наступним чином:

$$l = ad; \quad \bar{S} = bnS_0, \quad (9)$$

де a, b – коефіцієнти (за Сліхтером $a = 1,065$; $b = 1,436$).

З урахуванням співвідношень (6), (7), (9) швидкість фільтрації:

$$v_{\phi} = C \frac{pf(p)S_0 \Delta p}{2\eta d}, \quad (10)$$

де C – стала, що визначається геометричними параметрами моделі.

Розрахунки за співвідношенням (10) приведені на рис. 2.

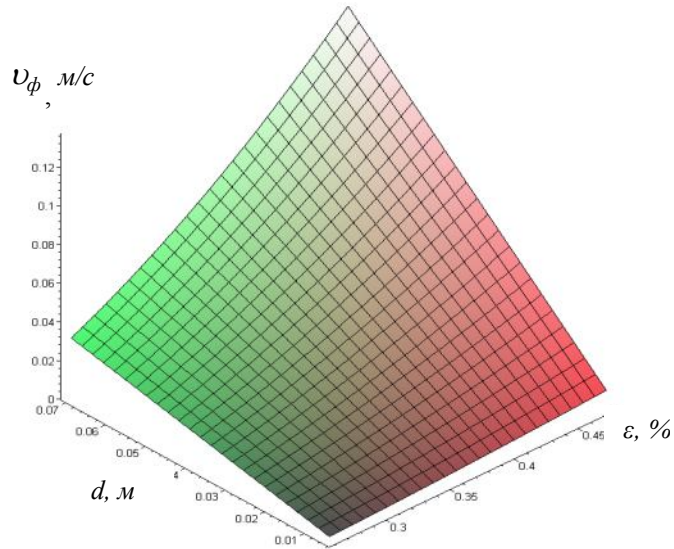


Рисунок 2 – Залежність швидкості фільтрації від пористості та розміру фракції руди

З урахуванням закону Дарсі проникність моделі визначається:

$$[K_{\text{Сліхтера}}] = C \frac{d^2 f(p)}{1-p}. \quad (11)$$

Теоретичні розрахунки за даним співвідношенням показані на рис. 3.

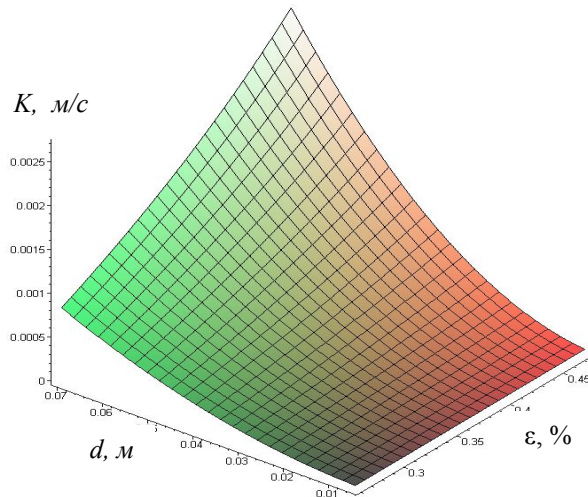


Рисунок 3 – Залежність проникності моделі Сліхтера від пористості та розміру фракції руди

Для ефективної оцінки процесу просочування сформованого штабеля та утвореного магазину, проведемо дослідження просочування на прикладі моделі Терцагі.

Дана модель є хаотичною упаковкою в першому наближенні сферичних частинок базальтової породи в купі, де відбувається процес вилуговування. В цьому випадку число частинок в одиниці об'єму моделі визначимо:

$$N = \frac{6(1-n)}{8\pi d^3}. \quad (12)$$

У такому випадку кількість частинок N_i на одиниці площі, що умовно пересікає модель, визначається за наступним співвідношенням:

$$N_i = \left(\frac{6(l-p)}{8\pi d^3} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (13)$$

Нехай число каналів трикутного перерізу і довжини l повинно співпадати із числом частинок на одиниці площі. Якщо вважати, що площа поперечного перерізу одиничного каналу рівна s_0 , тоді умовну пористість моделі упаковки визначимо наступним чином:

$$\varepsilon = \left(\frac{6(l-p)}{8\pi d^3} \right)^{\frac{2}{3}} s_0. \quad (14)$$

Чисельний розв'язок рівняння (13) дозволяє оцінити умовну пористість моделі купи в залежності від величини s_0 , причому мінімальне значення рівне $s_0 \cong \frac{\sqrt{3}}{4} d^2$, а величина p дорівнює 0,15 при мінімальній величині s_0 .

Максимальне значення умовної пористості моделі становить 0,57 при величині $s_0 \cong \frac{3\sqrt{3}}{2} d^2$, шестикутник із стороною a .

Для характеристики опору течії рідини в каналі моделі введемо величину гідравлічного радіуса r_0 , який рівний відношенню площі поперечного перерізу каналу до його периметру Π :

$$r_0 = \frac{s_0}{\Pi}. \quad (15)$$

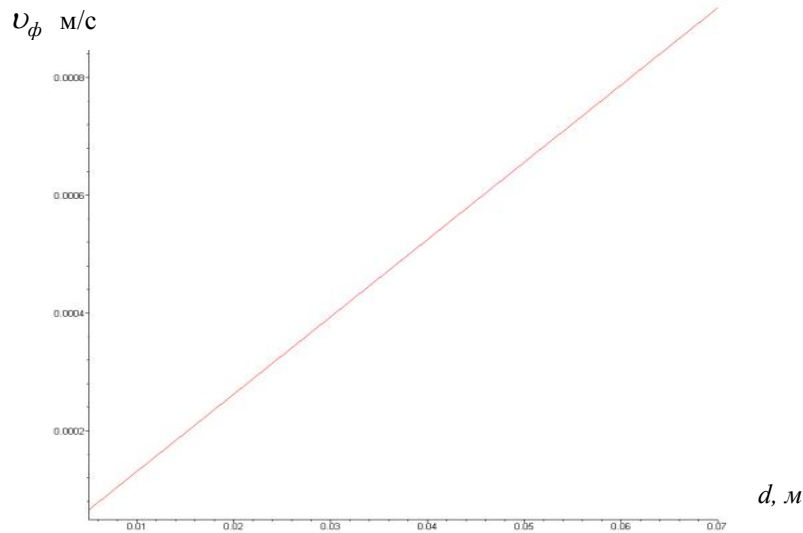


Рисунок 4 – Залежність швидкості фільтрації від фракції базальтової руди

А з урахуванням закону Дарсі отримаємо наступне співвідношення для проникності моделі Терцагі [5] (рис. 5):

$$[K_{\text{Терцагі}}] = \tilde{\varepsilon} \frac{p^2 d^2}{(l-p)^{\frac{2}{3}}}, \quad (20)$$

де $\tilde{\varepsilon}$ – постійна Терцагі ($\tilde{\varepsilon} = \frac{l}{53}$).

Кінетику процесу вилуговування розглянемо на основі моделі уніфікованих пор [7]. Дана модель

Оскільки периметр $\Pi = 3a$, то:

$$r_0 = \frac{s_0}{3a}. \quad (16)$$

З іншої сторони, наближена формула для середньої швидкості течії в'язкої рідини в каналі призматичного перерізу має наступний вигляд:

$$\bar{v} = \frac{r_0^2 \Delta p}{\gamma \eta l}, \quad (17)$$

де Δp – перепад тисків на кінцях каналу; γ – постійний коефіцієнт, що залежить від форми перерізу каналу (для рівностороннього трикутника $\gamma = \frac{5}{3}$).

Для мінімальної площі поперечного перерізу одиничного каналу середня швидкість течії в'язкої рідини за умови, що $l = a$, відповідно рівна:

$$\bar{v} = \frac{d \Delta p}{90 \eta}. \quad (18)$$

Враховуючи співвідношення Дюпюї–Форхгеймера, для швидкості фільтрації отримаємо:

$$v_\phi = \frac{pd \Delta p}{90 \eta}. \quad (19)$$

Теоретичний розрахунок за співвідношенням (19) залежно від розміру фракції частинок базальтової руди приведений на рис. 4 при $p = 0,15$.

передбачає, що тіло містить відкриту і повністю змочену систему циліндричних капілярів.

Реакція вилуговування в такому модельному пористому тілі відбувається одночасно, при цьому його геометричні розміри не змінюються, а вилучення твердої фази призводять до розширення пор і об'єднання їх в цілісні структури. Для уніфікованих пор рівняння моделі, що описує ступінь вилучення твердої фази (X) має наступний вигляд [8, 9]:

$$X = \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} \left[\left(1 + \frac{t}{\tau} \right)^2 \left(\frac{G - 1 - \frac{t}{\tau}}{G - 1} \right) - 1 \right], \quad (21)$$

де ε_0 – початкова пористість модельного твердого тіла; G – структурний параметр (більший від одиниці), який знаходиться із рівняння:

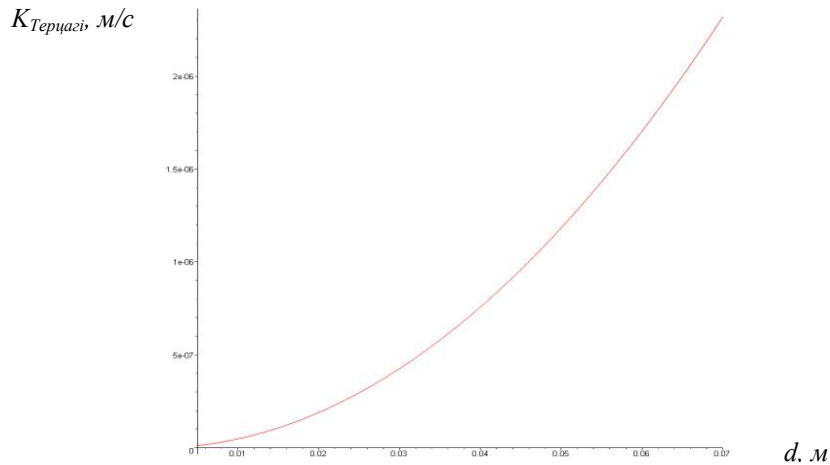


Рисунок 5 – Залежність проникності моделі Терцагі від різної фракції базальтової руди

$$\frac{4}{27} \varepsilon_0 G^3 - G + 1 = 0, \quad (22)$$

де τ – константа часу, час за який радіус пори збільшився в два рази:

$$\tau = \frac{r_{p0} \rho_M}{r}, \quad (23)$$

де r_{p0} – початковий радіус пори (м); ρ_M – молярна густина твердої фази (моль/м³); r – швидкість реакції моль/(м²·с).

$$\rho_M = \frac{\bar{\rho}}{\bar{M}} = \sum_i \frac{x_i \rho_i}{M_i}, \quad (25)$$

де $\bar{\rho}$ – середня густина твердої фази; \bar{M} – середня молярна маса базальтової породи; x_i – об’ємні долі компонентів; M_i – молярні маси компонентів; ρ_i – густина компонентів. Залежність зміни структурного параметру від пористості наведена на рис. 6.

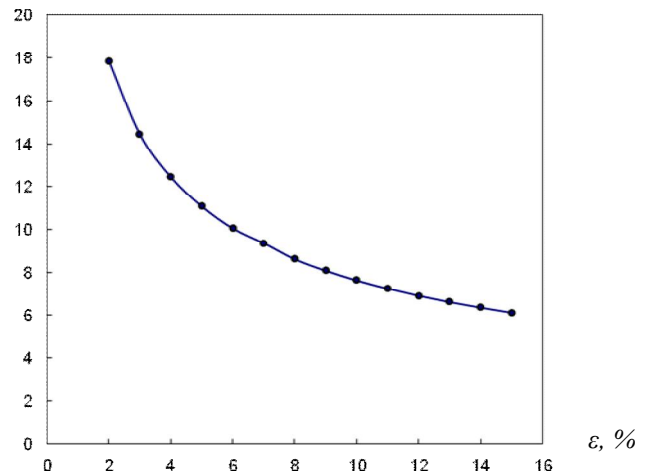


Рисунок 6 – Зміна структурного параметру G від пористості базальтів ε

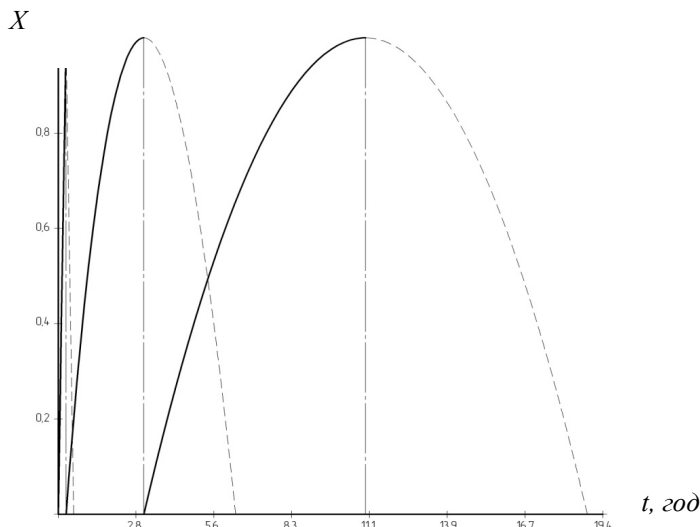
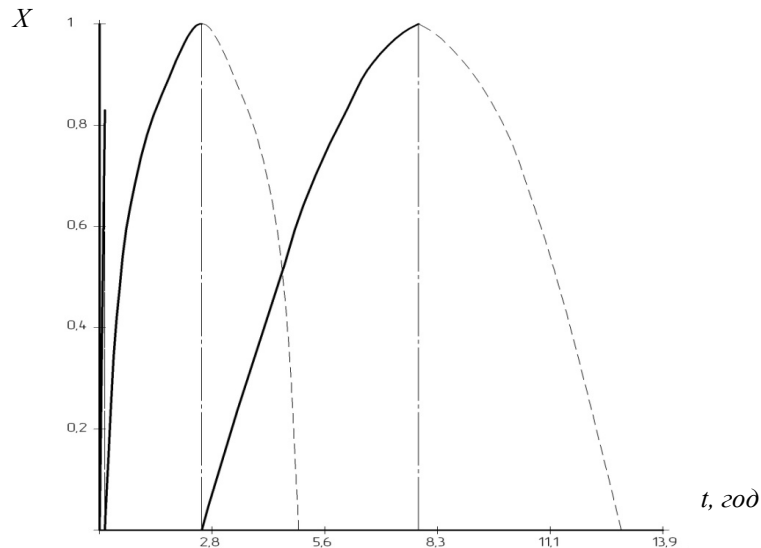


Рисунок 7 – Залежність ступеня вилучення від часу для $\varepsilon = 4\%$

Рисунок 8 – Залежність ступеня вилучення від часу для $\varepsilon = 8\%$

ВИСНОВКИ. Результати досліджень довели, що час просочування для фракції частинок радіуса $d = 30$ мм із питомою поверхнею $s \cong 105$ м²/кг, залежно від пористості ($\varepsilon = 4\text{--}8\%$) знаходиться в межах 2,5–5 год. Теоретично оцінений час процесу вилуговування, в залежності від пористості зразків базальтової руди, знаходиться в межах 12–19 год., що підтверджує ефективність його технологічної реалізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Параметри геотехнології для мідних трапових комплексів України. / А.Д. Калько, І.В. Романюк, Р.М. Ігнатюк // *Разработка рудных месторождений.* – Кривий Ріг, 2011. – Вып. 94. – С. 90–94.
2. Обґрунтування та вдосконалення основних технологічних параметрів розробки родовища мідне-вмісних базальтів комбінованою гірничою технологією / Черней Е.І., Калько А.Д., Ігнатюк Р.М., Пахаренко В.Л., Глінчук В.М. // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* – Кременчуг, 2014. – Вып. 2/2014 (85). – С. 119–125.
3. Многофазные процессы в пористых средах: научное пособие / Л.И. Хейвец, А.В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
4. Ігнатюк Р. М. Застосування схеми купного вилуговування для мідних трапових комплексів України // *Матеріали науково-технічної конференції «Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку 2011».* – Кривий Ріг: КТУ, 2011. – С. 13.
5. Исследование кинетики пропитки для оценки времени технологического процесса выщелачивания базальтовой руды // Калько А.Д., Ігнатюк Р.М., Машченко В.А. // *Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию с дня рождения заслуженного работника высшей школы Беларуси, д.т.н., профессора Кислова Н.В. «Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых».* – Минск: БНТУ, 2012. – С. 120–124.
6. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород: монография. – М.: Недра, 1985. – 240 с.
7. Движение жидкостей и газов в природных пластах: научное пособие / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. – М.: Недра, 1980. – 208 с.
8. Bobliakh S. R. Subsurface reactive transport processes modeling / S. R. Bobliakh, V. O. Kozyar, R. M. Ignatyuk // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* – Кременчуг, 2012. – Вып. 5/2012 (76). – С. 165–169
9. Mining Engineering Handbook. – Society for Mining Metallurgy & Exploration. – ISBN: 0873351770, ed: Hartman, Howard L. – 1998. – PP. 2049–2106.

MODELING OF SEEPAGE PROCESS OF ORE STACK

O. Rizhiy, V. Glinchuk, V. Kozyar, R. Ignatyuk, S. Morozyuk

National University of Water Management and Nature Resources Use
vul. Soborna, 11, Rivne, 33000, Ukraine. E-mail: Ignatyuk_r_m@ukr.net

Research in work is aimed on the rational parameters of the basalt rocks filtration in piles and in excavation chamber formed by the store. The detailed analysis of solving this issue by leading national scholars is carried out. For complete extraction of useful component of the ore the reasonable combined method of copper leaching is grounded, and the results of experimental studies of basalt rock permeability during impregnation of working reagent are presented. The mathematical modeling of the impregnation process, based on the basic models of the porous medium, is done. On the basis of the experimental studies the dependences of seepage speed of formed stacks and formatted excavation chamber store are determined, depending on the different values of porosity and ore fractions size.

Key words: model permeability, percolation, Slihter model, combined leaching, basaltic rock, copper.

REFERENCES

1. Ignatyuk, R.M., Cal'co, A.D., Romaniuk, I.V. (2011), "Parameters geotechnology for copper complexes of ladder of Ukraine", *Razrab. rudn. mestorozhd.*, iss. 94., pp. 90–94.
2. Cherney, E.I., Cal'ko, A.D., Ignatyuk, R.M., Paharenko, V.L., Glinchuk, V.M. (2014), "Justification and improvement of main technological parameters for mining of copper containing basalt by the combined technology", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. 2 (85), pp. 119–125.
3. Heifetz, L.E., Neimark, A.V. (1982), *Mnogofaznyie protsessyi v poristyyih sredah: nauch. posob.* [Multiphase processes in porous environments: tutorial], Chemistry, Moscow, USSR.
4. Ignatyuk, R.M. (2011), "Application circuits un- to leaching for copper complexes of Ukraine", *Materials of science conference "Mining and metallurgical complex: achievements, problems and prospects of 2011"*, p. 13.
5. Ignatyuk, R.M., Cal'co, A.D., Mashchenko, V.A. (2012), "Investigation of the kinetics of impregnation time to assess technological process basalt ore leach- ing", *Scientific collected works of conference dedicated to the 80th anniversary of the birth of Honored Worker of Higher School of Belarus, Professor N.V. Kislov "The processes and means of production and processing of minerals"*, Belarusian National Technical University, Minsk, pp. 120–124.
6. Romm, E.S. (1985), *Strukturnyie modeli porovogo prostranstva gornyyih porod: monografiya* [Structural models of the pore space of rocks: monograph], Nedra, Moscow, USSR.
7. Barenblatt, G.I. (1980), *Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnyih plastah: nauch posob* [The movement of liquids and gases in natural formations: a tutorial], Nedra, Moscow, USSR.
8. Bobliakh, S.R., Kozyar, V.O., Ignatiuk, R.M. (2012), "Subsurface reactive transport processes model- ing", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University* no. 5 (76), pp. 165–169.
9. Mining Engineering Handbook, (1998), *Society for Mining Metallurgy & Exploration*, pp. 2049–2106.

Стаття надійшла 09.02.2015.