

УДК 669.21/23;57.66; 622
DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-13-19

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ПРИ БЛОЧНОМ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

MODELING OF FILTRATION PROCESSES OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN BLOCK UNDERGROUND LEACHING

А. М. Зозуля,
Забайкальский
государственный
университет, г. Чита
mr.hunter.82@mail.ru

A. Zozulya,
Transbaikal State University,
Chita



В. А. Овсейчук,
Забайкальский
государственный
университет, г. Чита
Mks3115637@yandex.ru

V. Ovseychuk,
Transbaikal State University,
Chita



Приаргунское производственное горно-химическое объединение более 50 лет отрабатывает запасы урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. За этот период большая часть богатых руд была отработана традиционной горно-физической технологией. Доля бедных и рядовых руд остаётся всё ещё значительной, но традиционная технология не обеспечивает необходимый уровень рентабельности. Поэтому широкое внедрение физико-химической геотехнологии: блочное подземное выщелачивание (БПВ) и кучное выщелачивание (КВ) – может стать решающим моментом в продолжении эксплуатации этих месторождений.

Применяемая технология подземного блочного выщелачивания имеет один существенный недостаток – низкий показатель извлечения урана в продуктивный раствор, что значительно снижает эффективность применения данной технологии при разработке убогих урановых месторождений.

Для повышения выхода урана в продуктивный раствор необходимо проанализировать весь процесс подготовки и выщелачивания и установить основные причины низких показателей перевода урана в подвижное состояние. Для этих целей предлагается провести моделирование процесса подземного выщелачивания за счёт построения наглядных моделей ореолов растекания растворов по замагазинированной горнорудной массе, аккумулированной в подземной камере.

В процессе моделирования установлено, что распределение классов крупности кусков отбитой руды в камере возможно прогнозировать на стадии буровзрывных работ; при определении линии наименьшего сопротивления W и расстояния между концами скважин принять во внимание диаметр зоны регулируемого дробления R_p . При этом образуются три зоны гранулометрических составов: зона переизмельчения, зона оптимума и зона выхода негабарита. Растекание растворов по зонам будет различаться тем значительнее, чем выше высота камеры. В зоне с более крупным дроблением ожидается почти отвесное распределение фронта растекания растворов. Соответственно, чем мельче фракция, тем положе фронт к горизонтали.

Предлагаются мероприятия по моделированию процессов фильтрации, которые несут следующие функции:

– возможность регулирования расхода рабочих растворов на веер оросительных скважин для достижения оптимальных параметров выщелачивания, т. е. оперативного управления технологическим процессом;

– знание закона распространения факелов орошения даёт возможность выбора оптимальной сетки расположения одиночных оросителей

Ключевые слова: бедная урановая руда; замагазинированная горнорудная масса; блочное подземное выщелачивание (БПВ); оросительные скважины; факел орошения; коэффициент фильтрации; класс крупности; число Рейнольдса; буровзрывные работы; зона регулируемого дробления

РАО “Priargunsky Production Mining and Chemical Association” has been working on reserves of uranium deposits of the Streletsovsky ore field for more than 50 years. During this period, most of the rich ores have been worked out by traditional mining and physical technology. The share of poor and ordinary ores remains significant, but traditional technology does not provide the necessary level of profitability. Therefore, the widespread introduction of physicochemical technology: underground block (BPV) and heap leaching (KV) can be a decisive moment in the continuation of the operation of these deposits.

The applied technology of underground block leaching has one significant drawback – a low rate of uranium recovery into a productive solution, which significantly reduces the effectiveness of this technology in the development of poor uranium deposits.

To increase the yield of uranium into the productive solution, it is necessary to analyze the entire preparation and leaching process and establish the main reasons for the low rates of transition of uranium to a mobile state. For this purpose, it is proposed to simulate the underground leaching process by building visual models of halos spreading of solutions along shranked ore mining mass accumulated in an underground chamber.

During the simulation, it was found that the distribution of the size classes of the broken ore pieces in the chamber can be predicted at the stage of drilling and blasting operations, and when determining the line of least resistance W and the distance between the ends of the wells, take into account the diameter of the controlled crushing zone R_p . At the same time, 3 zones of granulometric compositions are formed: a re-grinding zone, an optimum zone and a non-carbarite exit zone. The flow of solutions through these zones will differ the more significantly, the higher the height of the chamber. In a zone with larger crushing, an almost steep distribution of the solution spreading front is expected. Accordingly, the smaller the fraction, the lower the front to the horizontal is.

The following functions are offered to simulate filtering processes:

- it is possible to control the flow of working solutions to the fan of irrigation wells in order to achieve optimal leaching parameters, i.e. to quickly control the process;
- knowledge of the law of distribution of irrigation flares makes it possible to select the optimal grid of location of single sprinklers

Key words: poor uranium ore; shranked ore mining mass; block underground leaching; irrigation wells; irrigation flare; filtration coefficient; size class; Reynolds number; drilling and blasting operations; controlled crushing zone

Актуальность. За почти 50-летний период отработки урановых месторождений Стрельцовского рудного поля запасы богатых руд практически исчерпаны. Добыча бедных и рядовых руд традиционными технологиями в современных условиях убыточна. Возможным решением возникшей проблемы может стать применение физико-химических геотехнологий, одной из которых является блочное подземное выщелачивание (БПВ) [6]. Широкому внедрению БПВ препятствует низкий коэффициент извлечения урана из убогих руд при выщелачивании. Для установления истинных причин низкой эффективности БПВ предлагается провести детальный анализ всего технологического процесса.

Объект исследования – эксплуатационный блок, отрабатываемый подземным блочным выщелачиванием.

Предмет исследования – технологические процессы при подготовке и выщелачивании минерального сырья.

Целью исследования является повышение эффективности выщелачивания полезного компонента.

Задача исследования – создание оросительной системы и режимов орошения замагазинированного рудного массива, позволяющих с высокой технологической эффективностью и оптимальными экономическими показателями проводить добычу урана геотехнологическими способами.

Технологическая эффективность заключается в минимизации потерь полезного компонента при выщелачивании, т. е. прогнозировании необходимых условий для наиболее полного извлечения полезного компонента из руды.

Методы исследования – графико-математическое моделирование процессов рудоподготовки и выщелачивания замагазинированной в камере руды.

Экономическая целесообразность определяется максимально возможной прибылью при получении готовой продукции.

Разработанность темы и результаты исследований. Достижение поставленных задач возможно за счёт построения наглядных моделей ореолов растекания растворов по замагазинированной горнорудной массе, ак-

кумулированной в подземной камере [1]. По трёхмерному построению факелов орошения производится расчёт зоны, подверженной выщелачиванию, который позволяет определять объём проработанной части рудной массы и величину потерь. С математической точки зрения (при идеальных условиях) факел орошения представляет собой коническую фигуру вращения, объём которой определяется по формуле

$$V_{\text{факела}} = \frac{1}{3} \pi 2 \phi dx , \quad (1)$$

где ϕdx – площадь замкнутой кривой растекания во фронтальной проекции выщелачиваемого массива.

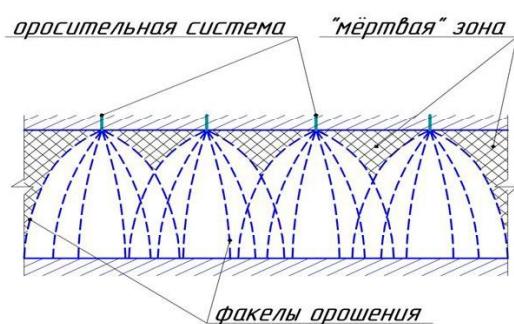


Рис. 1. Фронтальный разрез камеры-магазина в процессе фильтрации технологических растворов

Fig. 1. Front section of the chamber-shop in the process of filtration of technological solutions

Создавая модель распространения факелов орошения, определяют зоны, которые не подвергаются воздействию рабочих реагентов, т. н. «мёртвые зоны». На их долю приходится основной объём технологических потерь полезного компонента, который определяется из соотношения [2; 7]

$$Q_{\text{потерь}} = Q_{\text{блока}} - \frac{V_{\text{факела}} N_{\text{факелов}}}{k_{\text{разрыхл.}}} \gamma , \quad (2)$$

где $Q_{\text{блока}}$ – запасы блока по металлу, т; $N_{\text{факелов}}$ – число факелов орошения; $k_{\text{разрыхл.}}$ – коэффициент разрыхления горнорудной массы;

γ – содержание полезного компонента в руде, т/м³.

Зная зависимость скорости фильтрации от крупности рудного материала и оперируя законом Дарси, можно подобрать наиболее оптимальный режим подачи реагентов. Однако установлено, что фильтрация растворов

возможна при выполнении условий ламинарного протекания жидкости через фильтрующую среду, когда число Рейнольдса для определённого коэффициента фильтрации не должно превышать 6. Объясняется это тем, что при переходе потока из ламинарного режима возникают области вихревых циркуляций жидкости, которые вызывают сопротивление движению. При движении по разрыхлённой среде это может привести к её размыванию, созданию проточных каналов, которые нарушают равномерное распределение реагента по выщелачиваемому рудному материалу. Данный постулат сводится к системе условия, описываемого системой

$$\begin{cases} u = -k \frac{dh}{dl} \\ Re = \frac{ud_3}{\mu} < 6 , \end{cases} \quad (3)$$

где u – скорость фильтрации раствора;

k – коэффициент фильтрации;

$\frac{dh}{dl}$ – гидродинамический градиент;

Re – число Рейнольдса;

d_3 – оптимальный диаметр куска магазинированной горнорудной массы;

μ – коэффициент динамической вязкости жидкости.

В среде MathCAD [2; 3] проведено моделирование растекания растворов с использованием фактора случайного распределения кусков различной крупности равномерно по всему объёму камеры подземного выщелачивания. Удалось установить, что средняя величина угла растекания составляет 32,5°. На рис. 2 приведена кривая зависимости скорости фильтрации при инфильтрационном режиме выщелачивания от среднего размера куска рудного материала.

Недостатком такого подхода можно считать, что распределение различных классов крупности обусловлено параметрами ведения буровзрывных работ и поддаётся определенной систематизации [4].

Например, при веерной отбойке и магазинировании образуются три зоны гранулометрических составов: зона переизмельчения, зона оптимума и зона выхода негабарита.

Растекание растворов по этим зонам будет различаться тем значительнее, чем выше высота камеры. В зоне с более крупным дроблением ожидается почти отвесное распределение фронта растекания растворов. Соответственно, чем мельче фракция, тем положе фронт к горизонту [5; 8].

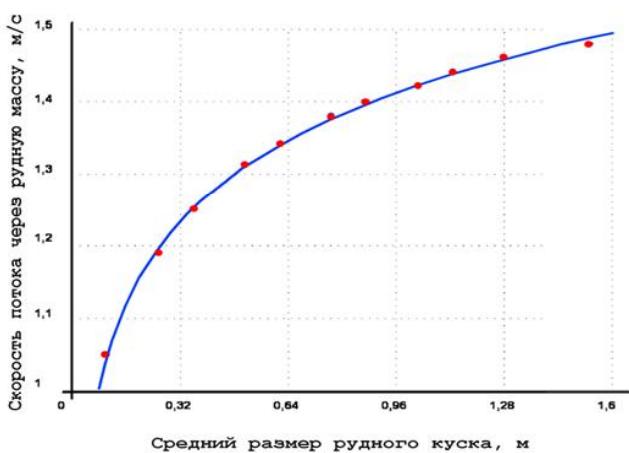


Рис. 2. Зависимость скорости фильтрации от среднего размера куска рудного материала /
Fig. 2. The dependence of the filtration rate on the average size of a piece of ore material

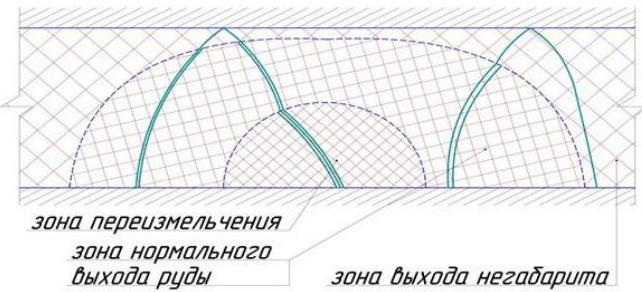


Рис. 3. Схема расположения веерных скважин при отбойке / Fig. 3. The layout of fan wells during drilling

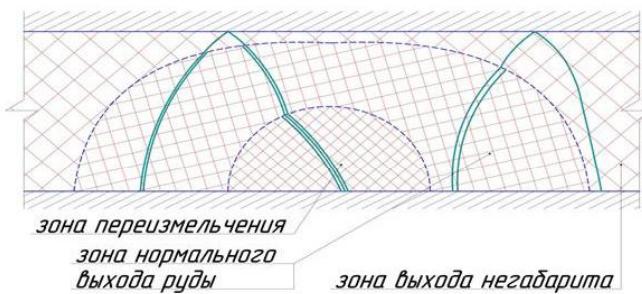


Рис. 4. Образование зон классов крупности при магазинировании / Fig. 4. The formation of zones of size classes during storage

Однако распределение классов крупности при выпуске рудной массы из камеры для создания компенсационного пространства нарушит существующую картину, поэтому вопрос требует отдельного изучения и зависит от схемы отгрузки.

Согласно закону Дарси, поток жидкости распределяется наиболее равномерно, когда число Рейнольдса для поровой среды меньше 6. Это условие зависит от величины эффективного диаметра заполнителя в фильтрационной среде, т. е. гранулометрического состава горнорудной массы

$$\left\{ \begin{array}{l} d_3 = \frac{\mu Re}{u}, \\ d_3 = \sqrt{\frac{\sum (P_i d_i)^2}{\sum P_i}} \end{array} \right. , \quad (4)$$

где P_i – доля класса крупности d_i в массиве рудного материала.

Распределение классов крупности возможно прогнозировать на стадии буровзрывных работ, если при определении линии наименьшего сопротивления W и расстояния между концами скважин а во внимание принять диаметр зоны регулируемого дробления R_p

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 2R_p \cdot K_{II} \\ W = R_p \sqrt[3]{2,5 K_{II}^2 n''} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где K_{II} – коэффициент, учитывающий взаимодействие зарядов по линии скважин;

n'' – предельное число зарядов, при котором наблюдается их взаимодействие и усиление действия взрыва;

K_{II}^2 – коэффициент усиления действия взрыва (за счёт взаимодействия зарядов в группе).

Кроме того, при миграции растворов вниз они растекаются по бокам и поглощаются горными породами. Это приводит к уменьшению удельного расхода растворов по высоте камеры (рис. 5).

Предлагаемые мероприятия по моделированию процессов фильтрации несут следующие функции:

- появляется возможность регулирования расхода рабочих рас-

тволов на веер оросительных скважин для достижения оптимальных параметров выщелачивания (рис. 6), т. е. оперативного управления технологическим процессом [9];

– знание закона распространения факелов орошения даёт возможность выбора оптимальной сетки расположения одиночных оросителей (рис. 7).

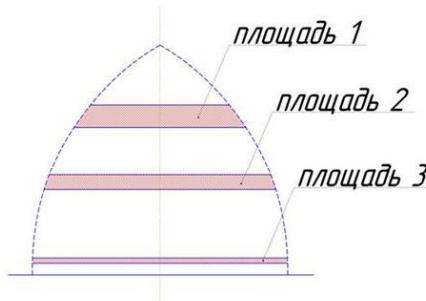


Рис. 5. Процесс растекания рабочих растворов / Fig. 5. The process of spreading of working solutions

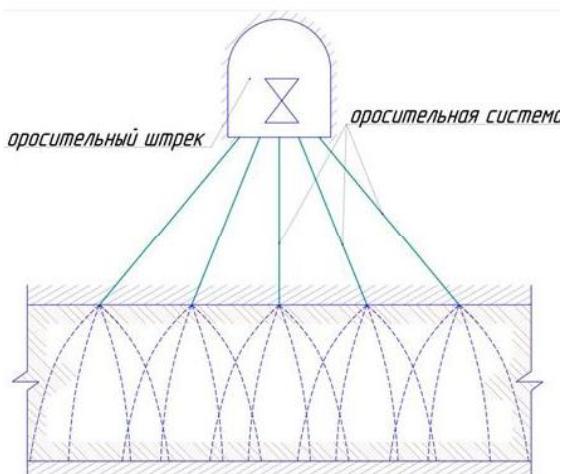


Рис. 6. Принцип функционирования оросительной системы / Fig. 6. The principle of functioning of the irrigation system



Рис. 7. Сетки расположения оросителей / Fig. 7. The grid arrangement of sprinklers

Таким образом, мероприятия по моделированию процессов растекания технологических растворов при блочном подземном выщелачивании заключаются в создании математической модели их растекания, рациональном выборе сетки оросительных скважин и оптимального режима орошения [10].

Заключение. Нахождение оптимальных условий извлечения полезного компонента в продуктивные растворы при подземном выщелачивании, т. е. – прогнозирование условий, при которых будет получен максимальный экономический эффект, является основной целью моделирования. Достижение этого возможно при определённом корректировании параметров буровзрывных работ для создания пористой среды с необходимой проницательной способностью, выборе сетки орошения скважин с минимизацией «мёртвых зон» в проработке растворами массива, выборе режима подачи раствора, обеспечивающего равномерное распределение его по факелу орошения.

Моделирование можно считать инструментом для повышения эффективности блочного подземного выщелачивания. Его реализация возможна при использовании программных средств Delphi, MathCAD, SketchUp, Java, Macromedia Flash.

Список литературы

1. Аликулов Ш. Ш. Математическое моделирование фильтрации растворов подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // Известия высших учебных заведений. Екатеринбург: УрГГУ, 2017. Вып. № 5. С. 95–101.
2. Аликулов Ш. Ш., Халимов И. У. Интенсификация параметров подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд на примере урановых месторождений Узбекистана // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 3. С. 37–48. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48.
3. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Ляшенко В. И. Особенности конструирования систем подземного выщелачивания металлов // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». 2018. Т. 19, № 1. С. 80–91.

4. Долгих П. Ф., Остроумова И.Д., Бубнов В. К. Математическое моделирование процесса выщелачивания полезных компонентов из кускового рудного материала // Комплексное использование минерального сырья. 1981. № 5. С. 36–38.
5. Маркелов С. В., Вильмис А. Л., Салахов И. Н. Локальное движение технологических растворов при насыщении рудных кусков в процессе выщелачивания // Новые идеи в науках о Земле: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф.: в 7 т. М.: МГРИ-РГГРУ Москва, 2019. С. 56–58.
6. Секисов А. Г., Лавров А. Ю. Перспективы использования шахтного выщелачивания при разработке золоторудных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 1. С. 114–121.
7. Alikulov S. S. The research of intensification of the technological processes of in situ leaching of uranium // European science review. 2018. No. 3.
8. Sharipov K. T., Sharafutdinov U. Z., Saparov A. B. Current state of the uranium extraction at the NMMC // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2016. No. 7–8.
9. Sadykov M. P. Development and evaluation of a mathematical model in an in-situ uranium leaching technique // Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy Volume 128, Issue 4, 2 October 2019. P. 158–166.
10. Wang P., Sun, Z., Hu Y., Cheng H. Eaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact // Science of the Total Environment Vol. 695, 2019. 10 December, № 133893.

References

1. Alikulov Sh. Sh. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy* (News of higher educational institutions). Yekaterinburg: USGU, 2017, no. 5, pp. 95–101.
2. Alikulov Sh. Sh., Khalimov I.U. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy* (Mining information-analytical bulletin), 2021, no. 3, pp. 37–48, DOI: 10.25018 / 0236-1493-2021-3-0-37-48.
3. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Lyashenko V. I. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya "Inzhenernye issledovaniya"* (Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Engineering Research Series), 2018, vol. 19, no. 1, pp. 80–91.
4. Dolgikh P.F., Ostroumova I.D., Bubnov V.K. *Kompleksnoe ispolzovanie mine-ral'nogo syr'ya* (Complex use of mineral raw materials), 1981, no. 5, pp. 36–38.
5. Markelov S. V., Vilimis A. L., Salakhov I. N. *Novye idei v naukah o Zemle: materialy XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 7 t.* (New Ideas in Earth Sciences: Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference: in 7 vol.), 2019, pp. 56–58.
6. Sekisov A. G., Lavrov A. Yu. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopаемых* (Physical and technical problems of mining), 2016, no. 1, pp. 114–121.
7. Sharipov K. T., Sharafutdinov U. Z., Saparov A. B. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2016. No. 7–8.
8. Alikulov S. S. *European science review* (European science review), 2018, no. 3.
9. Sadykov M. P. *Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy* (Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy), 2019, 2 October, vol. 128, Issue 4, pp. 158–166.
10. Wang P., Sun, Z., Hu Y., Cheng H. *Science of the Total Environment* (Science of the Total Environment), 2019, 10 December, vol. 695, no. 133893.

Информация об авторе

Зозуля Артем Михайлович, аспирант, кафедра подземной разработки месторождений полезных ископаемых, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: геотехнология подземных горных работ
mr.hunter.82@mail.ru

Овсейчук Василий Афанасьевич, д-р. техн. наук, профессор кафедры подземной разработки месторождений полезных ископаемых, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: повышение эффективности разработки скальных руд урановых месторождений, физико-техническая и физико-химическая геотехнология
mks3115637@yandex.ru

Information about the author

Artem Zozulia, postgraduate, Underground Mining department, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: geotechnology of underground mining operations

Vasyliy Ovseychuk, doctor of engineering sciences, professor, Underground Mining department, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: scientific substantiation and creation of new technologies of ore deposits mining

Для цитирования

Зозуля А. М., Овсейчук В. А. Моделирование процессов фильтрации технологических растворов при блочном подземном выщелачивании // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 4. С. 13–19. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-13-19.

Zozulia A., Ovseychuk V. Modeling of filtration processes of technological solutions in block underground leaching // Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 4, pp. 13–19. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-13-19.

Статья поступила в редакцию: 24.05.2021 г.

Статья принята к публикации: 28.05.2021 г.