

Перспективы экологизации горного производства для снижения вредных выбросов в атмосферу

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-29-32>

ДЖИОЕВА А.К.

Канд. техн. наук,
доцент кафедры «Горное дело»
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский
горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)»,
362021, г. Владикавказ, Россия,
e-mail: adadak@mail.ru

В исследовании приведено обоснование перспектив экологической модернизации горного производства при снижении вредных выбросов в атмосферу за счет обоснования параметров насыщенного раствора для подземного выщелачивания геоматериала. Он предотвращает образование вредных веществ на контакте с рудным телом и максимально секвестрирует CO_2 в рудовмещающий массив. Итогом работы является установление логарифмической зависимости растворимости CO_2 от физических параметров водного раствора, который предлагается нагнетать в рудовмещающий массив.

Ключевые слова: устойчивая добыча, рудоносный массив, выбросы в атмосферу, рудные месторождения, экологизация, подземное выщелачивание.

Для цитирования: Джиеова А.К. Перспективы экологизации горного производства для снижения вредных выбросов в атмосферу // Уголь. 2022. № 10. С. 29-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение устойчивой добычи при подземном способе разработки месторождений подразумевает снижение экстерналий от техногенной трансформации геосреды [1], внедрение нетрадиционных подходов к освоению техногенных отходов [2], использование преимуществ перехода к индустрии 4.0 (цифровизация горного произ-

водства) [3], а также развитие численных методов решения многомерных задач оптимизации процессов обогащения полиметаллического сырья [4]. Совершенствование подходов к обеспечению экологической модернизации добывающих отраслей промышленности смещается от концепции жизненного цикла «шахты/рудника» к циклу «конечного продукта» (угля/шахтного метана/никеля). В связи с этим необходимо повышение комплексной энергоэффективности всей цепочки от вскрытия запасов, проходческих/добычных работ и шахтного транспорта до обогащения сырья, рециклинга/утилизации и восстановления экосистемных услуг в рамках горных отводов шахт/рудников (за счет широкого внедрения закладки выработанного пространства) [5].

Интенсификация добычи полезных ископаемых оказывает существенное давление на изменение углеродного баланса в мировых масштабах. Современное состояние подземной дегазации углегазовых месторождений шахтного метана сопряжено с рядом вопросов, одним из которых является обеспечение надежности каптажа газа из скважин в результате их подработки лавой [6]. В связи с этим огромные масштабы подрабатываемого массива горных пород изменяют естественные аэрогазовые процессы в почвах («дыхание земли»), а также интенсифицируют эмиссию «медленного» метана, вклад которого не учитывается в глобальных моделях распределения метана в атмосфере. Наличие нелинейных проявлений в рассматриваемых процессах частично можно прогнозировать при использовании развивающихся методов геостатистики [7] или аналогично методикам пространственного анализа для открытого способа разработки месторождений (проведения геоэкологического мониторинга с использованием ДДЗ) [8].

Проблема улавливания CO_2 из атмосферы с последующим его долгосрочным хранением в глубоких горизонтах является особенно актуальной для нашей страны. Ее решение является ключевым аспектом для восстановления углеродного баланса в мировом масштабе, а также для снижения углеродного следа отечественного сырья. Кроме того, для условий подземного способа отработки

рудных месторождений совмещение захоронения диоксида углерода в глубоких горизонтах пород (при избыточной концентрации его в закачиваемом водном растворе) позволит вытеснить токсичные газы, которые образуются при контакте с закачиваемой в рудное тело водой. В связи с этим нахождение условного экстремума функции двух переменных (давления P , МПа и T , °С), отражающего максимально возможное значение растворимости CO_2 в растворе с водой, нагнетаемого в массив, изучено недостаточно полно.

Цель работы – обоснование перспектив экологизации горного производства для снижения вредных выбросов в атмосферу за счет предотвращения выбросов токсичных веществ и максимальной секвестрации CO_2 предельно насыщенным раствором для выщелачивания.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСТВОРА ДЛЯ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Базовая геотехнология подземного выщелачивания приведена на рис. 1.

Раствор для выщелачивания, который включает воду, смешанную с O_2 и CO_2 , нагнетают в массив горных пород, вмещающий рудное тело 4, через скважины 3. При отсутствии насыщенности раствора в воду поступают существенные объемы вредных веществ. Часть токсичного газа выносится в полость ствола добычной скважины 2, но большая часть аккумулируется под землей и может транспортироваться в водоносные горизонты. Исходящий поток с загрязненным раствором выкачивается на поверхность через 2 и подается на переработку 1.

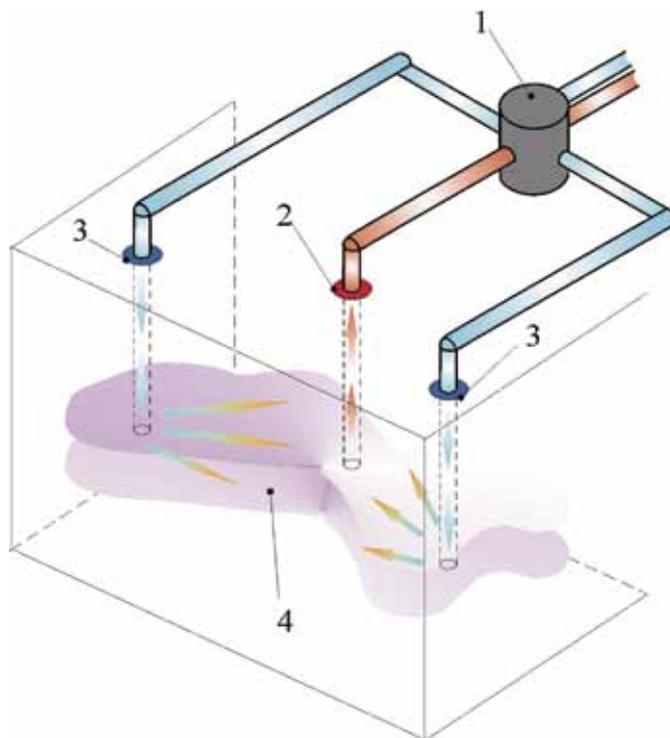


Рис. 1. Технология подземного выщелачивания:
1 – технологический узел, 2 – скважина по добыче,
3 – скважина для нагнетания раствора, 4 – рудное тело

Растворимость CO_2 в H_2O

P (МПа)	t (°C)						
	10,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00
0,1	0,0458	0,0330	0,0200	0,0124	0,0063	0,0000	0,0000
0,5	0,2228	0,1624	0,1030	0,0719	0,0532	0,0396	0,0268
1,0	0,4282	0,3136	0,2011	0,1429	0,1093	0,0873	0,0701
2,5	0,9478	0,7034	0,4610	0,3346	0,2632	0,2200	0,1914
5,0	1,4647	1,1607	0,7911	0,5914	0,4773	0,4098	0,3688
7,5	1,4983	1,2729	1,0078	0,7792	0,6448	0,5652	0,5190
10,0	1,5309	1,3063	1,0814	0,9074	0,7720	0,6909	0,6457
12,5	1,5622	1,3382	1,1140	0,9925	0,8644	0,7908	0,7517
15,0	1,5925	1,3688	1,1448	1,0249	0,9239	0,8686	0,8400
17,5	1,6218	1,3983	1,1741	1,0555	0,9768	0,9257	0,9131
20,0	–	1,4266	1,2020	1,0844	1,0201	0,9789	0,9709
22,5	–	1,4541	1,2286	1,1119	1,0566	1,0249	1,0260
25,0	–	1,4808	1,2542	1,1381	1,0881	1,0652	1,0751
27,5	–	1,5068	1,2788	1,1631	1,1159	1,1012	1,1192
30,0	–	1,5322	1,3025	1,1871	1,1410	1,1337	1,1593
32,5	–	1,5571	1,3255	1,2102	1,1644	1,1635	1,1960
35,0	–	1,5816	1,3478	1,2324	1,1864	1,1911	1,2299
37,5	–	1,6058	1,3695	1,2539	1,2076	1,2170	1,2614
40,0	–	1,6297	1,3908	1,2747	1,2282	1,2415	1,2910
42,5	–	1,6534	1,4117	1,2950	1,2484	1,2649	1,3190
45,0	–	1,6770	1,4321	1,3148	1,2684	1,2874	1,3456
47,5	–	1,7004	1,4523	1,3342	1,2883	1,3092	1,3711
50,0	–	1,7237	1,4723	1,3532	1,3081	1,3304	1,3955

Для оценки целесообразности применения раствора CO_2 с водой необходимо выявить его максимально возможную концентрацию при условии захоронения на существующих глубинах разработки угольных пластов. Принимаемый диапазон глубин 800-1200 м соответствует геостатическому давлению на модуль в размере 15-25 МПа. При учете широкого диапазона значений изотерм на данных глубинах можно принять температуру пород равной 30-55°C. Образование необходимого раствора для выщелачивания из нескольких компонентов является произвольным процессом. Его протекание в условиях, когда энергия Гиббса $\Delta G < 0$ (изобарно-изотермический потенциал – ИИП) напрямую зависит от энтальпийного и энтропийного вкладов [9]. В случае, если ИИП растворимого вещества в растворе для выщелачивания приходит к равновесию его химического потенциала в чистом виде, растворение прекращается ($\Delta G = 0$). При этом образуется насыщенный раствор. Отношение между составными частями многокомпонентных систем зачастую выражают через «концентрацию», при этом для двухкомпонентных растворов она может быть выражена через моляльность – число молей растворенного вещества в 1 кг растворителя (моль/кг). Данные моляльности CO_2 в воде для большинства условий представлены из работы Zhenhao Duan [10] и сведены в *таблице*.

Из исследования *таблицы* очевидно видно наличие недостаточного количества экспериментальных данных при определении моляльности в определенных выше условиях задачи. Для дополнения пробелов в данных применялись общие подходы для осуществления трехмерной интерполяции по методике, изложенной в работе [11]. Среди отечественных исследователей часто используют множество процедур интерполяции (Renka, Akima, Watson), при этом выбирают ту из них, проекция поверхности которой наиболее удовлетворительно отражает проекцию первичной поверхности (на основании R^2 – коэффициента детерминации). Из приведенных выше алгоритмов, в результате, более высокие параметры ко-

эффициента детерминации получил алгоритм «Watson». Результирующая поверхность исследуемой функции показана на *рис. 2*. Данный алгоритм отличается от «способа треугольников» тем, что определение соседних данных осуществляют только одним способом. Основной алгоритм CO_2 (когда естественные соседние точки формируют единственное расположение) более всего подобен обтягиванию ближайших экспериментальных точек «резиновым листом» [12].

В результате установлена зависимость растворимости CO_2 от физических параметров вмещающего массива горных пород, имеющая следующий вид ($R^2 = 0,98$):

$$m = \frac{0,4 - 0,005t + 0,00002t^2 - 0,0199 \ln P - 0,0138(\ln P)^2 + 0,0076(\ln P)^3}{1 - 0,001t - 0,765 \ln P + 0,2371(\ln P)^2 - 0,0222(\ln P)^3}, \quad (1)$$

где m – моляльность (моль/кг); t – температура (°C); P – горное давление (МПа).

Итоговая функция (1) решалась для вышеуказанных условий задачи ($t = 30-55$ °C, $P = 15-25$ МПа), максимальное значение растворимости при условиях ($t = 30$ °C, $P = 25$ МПа) составило 1,405 моль/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было выполнено оптимизационное моделирование путем расчета условного экстремума найденной зависимости растворимости CO_2 в воде от изменения термодинамических условий. Произведена оптимизация базовой поверхности исходных данных с использованием алгоритма Watson. В результате установлена зависимость растворимости CO_2 в растворе от внешнего давления и температуры горных пород, имеющая логарифмический вид. При вычислении условного экстремума локальной области оптимальной функции установлено значение моляльности, равное 1,405 моль/кг. Массовая доля CO_2 , растворенного в воде в условиях его захоронения в глубокозалегающем массиве, не превысит 61,82 г/л воды. В связи с этим в 1 м³ полезного объема можно вместить 61,82 кг CO_2 .

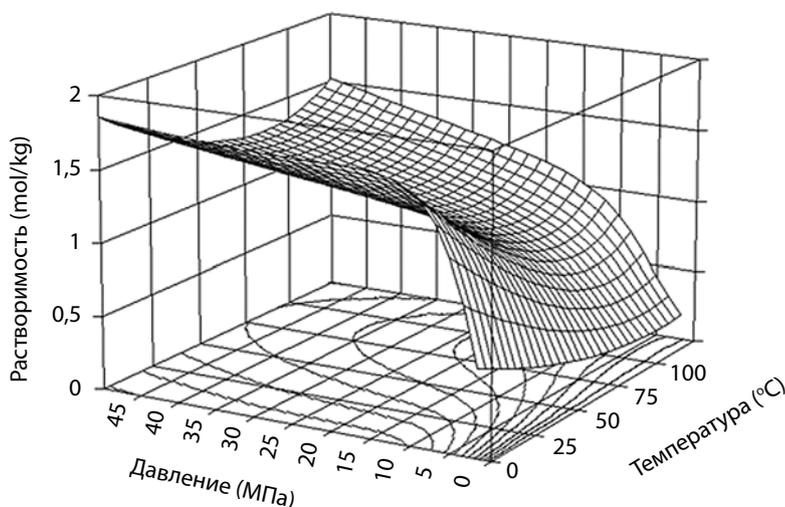


Рис. 2. Графическое представление интерполированной функции отклика

Список литературы

- Gorman M.R., Dzombak D.A. A review of sustainable mining and resource management // *Transitioning Resources, Conservation & Recycling*. 2018. Vol. 137. P. 281-291.
- Механохимическая технология добычи металлов из хвостов обогащения / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.С. Бригида и др. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. С. 175-183.
- Dzhioeva A.K., Tekhov A.V. Reduction of mine methane emissions for ensuring sustainable development of geotechnologies in the transition to Industry 3.0 / *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1064. Art No 012008.
- Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings // *Scientific Bulletin of the National Mining University*. 2020. Vol. 5. P. 47-54.

5. Полнота использования ресурсов недр и здоровье населения горнодобывающего региона / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.С. Вагин и др. // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 34-40.
6. Ensuring stability of undermining inclined drainage holes during intensive development of multiple gas-bearing coal layers / V.S. Brigida, V.I. Golik, Yu.V. Dmitrak et al. // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 239. P. 497-501.
7. Яйцкая Н.А., Бригида В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. С. 162-173.
8. Spatial data and technologies for geomonitring of land use under aspect of mineral resource sector development / N.J. Adero, C. Drebenstedt, E.N. Prokofeva, et al. // Eurasian Mining. 2020. Vol. 1. P. 69-74.
9. Зенин Г.С., Пенкина Н.В., Коган В.Е. Физическая химия: Ч. 3. Фазовые равновесия и учения о растворах. СПб.: СЗТУ, 2005. С. 119-120.
10. An improved model for the calculation of CO₂ solubility in aqueous solutions containing Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ and SO₄²⁻ / D. Zhenhao, S. Rui, Zh. Chen et al. // Marine Chemistry. 2006. Vol. 96. P. 131-139.
11. Джзиева А.К., Бригида В.С. Пространственная нелинейность динамики метановыделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 522-530.
12. Watson D. "Nngridr": An Implementation of Natural Neighbor Interpolation. Claremont, Australia, 1994. 170 p.

Original Paper

UDC 622.277 © A.K. Dzhioeva, 2022

ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 10, pp. 29-32

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-29-32>

Title

PROSPECTS FOR MINING ECOLOGIZATION TO REDUCE HARMFUL EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

Author

Dzhioeva A.K.¹

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

Authors Information

Dzhioeva A.K., PhD (Engineering), Associate Professor,

e-mail: adadak@mail.ru

Abstract

The study provides a substantiation of prospects of mining operations environmental modernization while reducing harmful emissions into the atmosphere by substantiating the parameters of a saturated solution for leaching geomaterial. It prevents the formation of harmful substances in contact with the ore body and sequesters CO₂ in the surrounding rock mass as much as possible. The work results in establishing a logarithmic dependence of the CO₂ solubility on the physical parameters of the solution, which is proposed to be discharged into an ore-hosting mass.

Keywords

Sustainable mining, Ore-hosting mass, Emissions into the atmosphere, Ore deposits, Environmentalization, Underground leaching.

References

1. Gorman M.R. & Dzombak D.A. A review of sustainable mining and resource management. *Transitioning Resources, Conservation & Recycling*, 2018, (137), pp. 281-291.
2. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Brigida V.S. & Burdzieva O.G. Mechanochemical technology of metal mining from enriching tails. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2020, (331(6)), pp. 175-183. (In Russ.).
3. Dzhioeva A.K. & Tekhov A.V. Reduction of mine methane emissions for ensuring sustainable development of geotechnologies in the transition to Industry 3.0. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, (1064), 012008.
4. Golik V.I., Dmitrak Yu.V. & Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, (5), pp. 47-54.

5. Golik V.I., Razorenov Y.I., Vagin V.S. & Puzin V.S. Completeness of use of the mineral resources, and the health of the population in the mining region. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 202, (6), pp. 34-40. (In Russ.).
6. Brigida V.S., Golik V.I., Dmitrak Yu.V. & Gabaraev O.Z. Ensuring stability of undermining inclined drainage holes during intensive development of multiple gas-bearing coal layers. *Journal of Mining Institute*, 2019, (239), pp. 497-501.
7. Yaitskaya N.A. & Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems. Spatial data interpolation. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2022, (12(1)), pp. 162-173. (In Russ.).
8. Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N. & Vostrikov A.V. Spatial data and technologies for geomonitring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*, 2020, (1), 69-74.
9. Zenin G.S., Penkina N.V. & Kogan V.E. Physical Chemistry: Part 3. Phase equilibria and the doctrine of solutions. SPb.: SZTU Publ., 2005, pp. 119-120. (In Russ.).
10. Zhenhao D., Rui S., Chen Zh. et al. An improved model for the calculation of CO₂ solubility in aqueous solutions containing Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ and SO₄²⁻. *Marine Chemistr*, 2006, (96), pp. 131-139.
11. Dzhioeva A.K. & Brigida V.S. Spatial non-linearity of methane release dynamics in underground boreholes for sustainable mining. *Journal of Mining Institute*, 2020, (245 (1)), pp. 522-530.
12. Watson D. "Nngridr": An Implementation of Natural Neighbor Interpolation, Claremont, Australia, 1994, 170 p.

For citation

Dzhioeva A.K. Prospects for mining ecologization to reduce harmful emissions into the atmosphere. *Ugol'*, 2022, (10), pp. 29-32. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-10-29-32](http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-29-32).

Paper info

Received June 20, 2022

Reviewed August 19, 2022

Accepted September 26, 2022

UNDERGROUND MINING