

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.064.4:628.316

DOI:10.7242/echo.2024.2.1

РАСЧЕТ ОБЪЕМА ИЗВЕСТНЯКА ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ СИСТЕМ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ИЗЛИВОВ КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Н.Ф. Фетисова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Известняк является наиболее широко применяемым материалом для пассивной очистки шахтных вод. Растворение кальцита кислыми водами приводит к повышению pH, нейтрализации кислотности и добавлению в воду гидрокарбонат-ионов. Однако при контакте с кислой высокожелезистой водой поверхность известняка быстро покрывается охристой пленкой, препятствующей его дальнейшему растворению. Одним из способов предотвращения данного негативного эффекта является изоляция шахтной воды от контакта с атмосферой путем создания фильтрующих дрен, заполненных щебнем известняка. Такие подземные водотоки получили название бескислородных известняковых дрен. Ввиду медленного протекания реакций в подобных системах очистки для них требуется значительное количество заполняющего материала. В настоящей работе, на примере ряда изливов Кизеловского угольного бассейна, выполнена оценка необходимого объема щебня известняка для их заполнения. В результате расчетов были определены: минимальный объем известняка, требуемый для удержания воды в системе в течение рекомендуемого времени; объем известняка «с запасом» на 15 лет работы дрены, определенный с учетом скорости его растворения; объем известняка, рассчитанный на основании показателя эффективности удаления кислотности одной тонной известняка в сутки.

Ключевые слова: шахтные воды, пассивная очистка, время удержания, кислотность, объем и масса известняка.

Введение

К пассивным технологиям геохимической очистки кислых шахтных вод относят такие системы, в которых в качестве фильтрующей среды применяются неорганические материалы, являющиеся источником поступления щелочных компонентов в воду. Наиболее широко применяемым материалом является известняк. Его преимущества заключаются в безопасности, относительно низкой стоимости и доступности. Другими материалами, применяемыми для обработки кислой воды в системах геохимической очистки, могут быть побочные продукты производств, такие как отходы с высоким содержанием карбоната кальция и стальной шлак. Поскольку процессы удаления загрязняющих веществ в системах пассивной очистки происходят гораздо медленнее, чем при традиционной химической обработке, то для достижения аналогичных результатов требуется более длительное время удержания воды и большие площади [1]. Следовательно, перед тем, как принимать решение о разработке пассивных систем очистки, необходимо представлять размеры будущих сооружений и оценить возможность их размещения на местности с учетом наличия свободных земель и их правовым статусом.

В настоящей работе рассмотрены способы определения необходимого объема щебня известняка для заполнения закрытых каналов или так называемых бескислородных известняковых дрен. Оценка выполнена на примере ряда изливов Кизеловского угольного бассейна, характеристики которых, согласно ранее выполненным исследованиям [2, 3], частично или полностью отвечают критериям применимости методов пассивной очистки, основанным на химическом составе и расходе потока.

Материалы и методы

Бескислородные известняковые дрены представляют собой котлованы или траншеи, глубиной от 1 до 3 м, заполненные крупным щебнем или смесью крупного щебня и камня известняка (с обломками от 5 до 20 см), засыпанные глинистым грунтом. Для предотвращения инфильтрации стоков в грунтовые воды, засорения и создания газового барьера фильтрующий слой дополнительно изолируется пленкой. Принцип действия бескислородной дрены заключается не в удалении из воды металлов, а в увеличении pH и щелочности воды за счет растворения известняка. Осаждение гидроксидов железа или алюминия в таких дренах минимизируется за счет отсутствия в герметичном пространстве кислорода. Таким образом, фильтрация воды в известняке в бескислородных условиях является этапом предварительной подготовки шахтной воды, которая затем отстаивается в прудах-осадителях и, при необходимости, доочищается на заболоченных участках.

Специалисты предъявляют определенные требования к качеству воды, несоответствие которым делает строительство бескислородных известняковых дрен заведомо нецелесообразным. Критериями применимости таких фильтрующих дрен в качестве системы пассивной очистки, согласно [4], являются следующие: содержание в шахтной воде растворенного O_2 не более 2-3 мг/л, Fe^{3+} не более 10% от железа общего и Al не более 25 мг/л. В одном из базовых исследований [5], где впервые описаны важнейшие принципы пассивной очистки шахтных вод, даны более консервативные критерии: поступающие в систему шахтные воды должны содержать менее 1 мг/л растворенного Fe^{+3} , Al и O_2 . Поскольку цель настоящего исследования заключается в оценке гипотетических размеров рассматриваемых систем пассивной очистки, было принято допущение о соответствии качества шахтных вод наименее строгим критериям.

В работе рассмотрено три варианта расчета объема щебня известняка для заполнения фильтрующих дрен. В первом случае расчет минимального объема был сделан на основании рекомендуемого времени удержания воды в дрене (14 часов), согласно формуле (1) [6]:

$$V = \frac{Q \cdot t_d}{n}, \quad (1)$$

где: V – объем известняка, m^3 ; Q – расход потока шахтной воды, $m^3/час$; t_d – минимальное время удержания воды, час; n – пустотность щебня (до 0,5).

Во втором случае требуемый объем известняка был рассчитан с учетом потери его массы из-за растворения. Формула для расчета массы известняка (2), в которой учитывается скорость растворения кальцита (снижающаяся экспоненциально с течением времени), предложена в работе [7]:

$$M = e^{k \cdot t} \cdot \frac{Q \cdot t_d \cdot \rho_s \cdot (1-n)}{n}, \quad (2)$$

где: M – масса известняка, кг; e – число Эйлера ($e \approx 2,718$); k – константа скорости растворения известняка, $год^{-1}$; t – срок службы известняковой дрены, час (обычно 14-15 лет в пересчете на часы); t_d – минимальное время удержания воды, час; ρ_s – плотность известняка (истинная), $кг/м^3$; n – пустотность.

Таким образом, масса известняка рассчитывается с таким «запасом», чтобы к окончанию проектного срока службы фильтрующей дрены вода по-прежнему удерживалась в ней необходимое время. В дальнейшем стоки продолжают фильтроваться, но время их пребывания в дрене будет меньше необходимого времени удержания.

Поскольку истинная плотность известняка (ρ_s) связана с насыпной плотностью известняка (ρ_b) выражением (3) [7]:

$$\rho_b = \rho_s \cdot (1 - n), \quad (3)$$

то для нахождения объема может быть использована формула (4):

$$V = e^{k \cdot t} \cdot \frac{Q \cdot t_d}{n}, \quad (4)$$

Третий вариант расчета учитывает кислотность шахтной воды (A (*acidity*), г $\text{CaCO}_3/\text{м}^3$). В качестве основы для проектирования системы очистки используется такой показатель, как эффективность удаления кислотности одной тонной известняка в сутки (Df (*design factor*), г/т·сут). В настоящей работе для определения требуемого объема щебня известняка была использована следующая формула (5):

$$V = \frac{Q \cdot A}{Df \cdot \rho_b}, \quad (5)$$

Показатель эффективности – величина эмпирическая. По данным наблюдений 36 бескислородных известняковых дрен, данный показатель достигал 675 грамм (удаления) кислотности одной тонной известняка в сутки [8]. В отсутствии исследований специалисты предлагают использовать достаточно консервативное значение: 50 г/т·сут [9].

Используемые для расчета усредненные данные по расходу потока шахтных вод и кислотности воды приведены в работе [2]. Время удержания воды зависит от скорости растворения кальцита (и увеличения гидрокарбонатной щелочности), которая является функцией химического состава воды и «чистоты» известняка. Оптимальное время нахождения воды в дрене в каждом конкретном случае следует обосновывать экспериментально. При отсутствии эмпирических данных рекомендуемое время удержания составляет 14 часов [6]. Пустотность щебня известняка была принята равной 0,49, насыпная плотность – 1,42 т/м³ (щебень фракции 40-80 мм, карьер Всеволово-Вильвенского месторождения в Пермском крае). Объем известняка по формуле (4) рассчитывался на 15 лет службы фильтрующей дрены.

Константа k (в выражениях (2) и (4)) определяется как средняя многолетняя скорость выноса ионов Ca (J_{Ca} , кг/год), «высвобожденных» за счет растворения кальцита в известняке, нормированная на исходную массу известняка (M , кг) и весовую долю CaCO_3 в нем (X_{CaCO_3}), согласно следующей формуле [7]:

$$k = \frac{J_{\text{Ca}}}{(M \cdot X_{\text{CaCO}_3})}. \quad (6)$$

Скорость выноса ионов Ca (J_{Ca} , г/час) может быть найдена по формуле (7):

$$J_{\text{Ca}} = Q \cdot \Delta C_{\text{Ca}}, \quad (7)$$

где Q – средний расход потока (м³/час), а ΔC_{Ca} – разность между концентрациями кальция в шахтных водах до и после их фильтрации в известняке (г/м³). Таким образом, точное значение константы скорости растворения k может быть получено после строи-

тельства пилотной системы очистки и наблюдения за ней в течение нескольких лет. В настоящей работе для расчета объема известняка по формуле (4) было использовано значение $k = 0,024 \text{ год}^{-1}$ ($2,7 \cdot 10^{-6} \text{ час}^{-1}$), приведенное в работе [7] как медианное, полученное по данным исследований 13 бескислородных известняковых дрен.

Результаты и обсуждение

Результаты расчета минимального объема (по формуле (1)) и объема известняка на 15 лет службы фильтрующей дрены (по формуле (4)) показаны в табл.1. В таблице также приведена соответствующая масса щебня, определенная с учетом насыпной плотности.

Согласно выполненным расчетам, для выполнения условия удержания воды в фильтрующей дрене в течение рекомендуемых 14 часов, на заполнение одной траншеи, в зависимости от расхода потока, потребуется от 0,15 до 4,8 тыс. м³ или от 0,22 до 6,9 тыс. тонн щебня известняка. Простые расчеты (без учета уклона и коэффициента фильтрации) показывают, что, при условной ширине траншей 2 м и высоте засыпки известняка 1,5 м, их длина будет изменяться от 50 м до 1620 м. Принимая во внимание растворение известняка, для удержания воды в дрене не менее рекомендуемого времени в течение 15 лет, количество известняка должно быть увеличено на 42,6%.

Таблица 1

Результаты определения объема и массы щебня известняка для заполнения дрены (время удержания $td = 14$ часов)

Излив	Q, м ³ /час	V, м ³	V _{(15 лет),} м ³	M, тонн	M _{(15 лет),} тонн
Родник 417а, ш. Нагорная	170,24	4864	6935	6907	9848
Штольня, ш. Усьва-3	105,67	3019	4305	4287	6113
Шурф № 63, ш. Белый Спой	51,00	1457	2078	2069	2950
Штольня, ш. им. 1 мая	44,00	1257	1793	1785	2545
Штольня, Клавдинская, ш. Усьва 3	22,03	629	897	894	1274
Штольня, ш. им. 40 лет Октября	21,33	610	869	866	1234
Штольня, ш. им. Володарского	20,67	591	842	839	1196
Шурфы 56-62, ш. им. 40 лет Октября	15,33	438	625	622	887
Штольня Каменка, ш. им. Чкалова	14,33	409	584	581	829
Скв.634, шахты Шумихинская	5,33	152	217	216	308

В табл. 2 представлен результат определения объема и массы щебня известняка, выполненного на основании показателя эффективности удаления кислотности тонной известняка в сутки. На графике (рис. 1) показан объем известняка, полученный по трем вариантам расчета.

Таблица 2

Результаты определения объема и массы щебня известняка для заполнения дрены, рассчитанные с учетом кислотности воды ($Df = 50$ г/т·сут)

Излив	Q ср, л/с	pH	Кислотность г CaCO ₃ /м ³	V, м ³	M, тонн
Родник 417а, ш. Нагорная	47,29	5,8	27,6	1588	2255
Штольня, ш. Усьва-3	29,35	2,9	234,3	8370	11885
Шурф № 63, ш. Белый Спой	14,17	3,4	451,4	7782	11050
Штольня, ш. им. 1 мая	12,22	2,6	428,4	6371	9047
Штольня Клавдинская, ш. Усьва 3	6,12	2,8	544,0	4051	5753
Штольня, ш. им. 40 лет Октября	5,93	3,1	213,7	1541	2188
Штольня, ш. им. Володарского	5,74	3,8	1142,1	7980	11332
Шурфы 56-62, ш. им. 40 лет Октября	4,26	3,5	425,3	2204	3130
Штольня Каменка, ш. им. Чкалова	3,98	2,8	498,7	2415	3430
Скв.634, ш. Шумихинская	1,48	4,6	1333,6	2403	3412

Согласно результатам вычислений, объем известняка, полученный на основании показателя эффективности 50 г/т·сут, в разы больше, чем объем, рассчитанный с учетом рекомендуемого времени удержания, для всех рассмотренных изливов, кроме наиболее крупного (с расходом 47,29 л/с). Для данного потока шахтных вод, обладающих наименьшей кислотностью, требуемый объем известняка значительно снизился. Соответственно, при таком объеме заполнителя время удержания составит 4,5 часа, а длина траншеи (2 м × 1,5 м) – около 500 м.

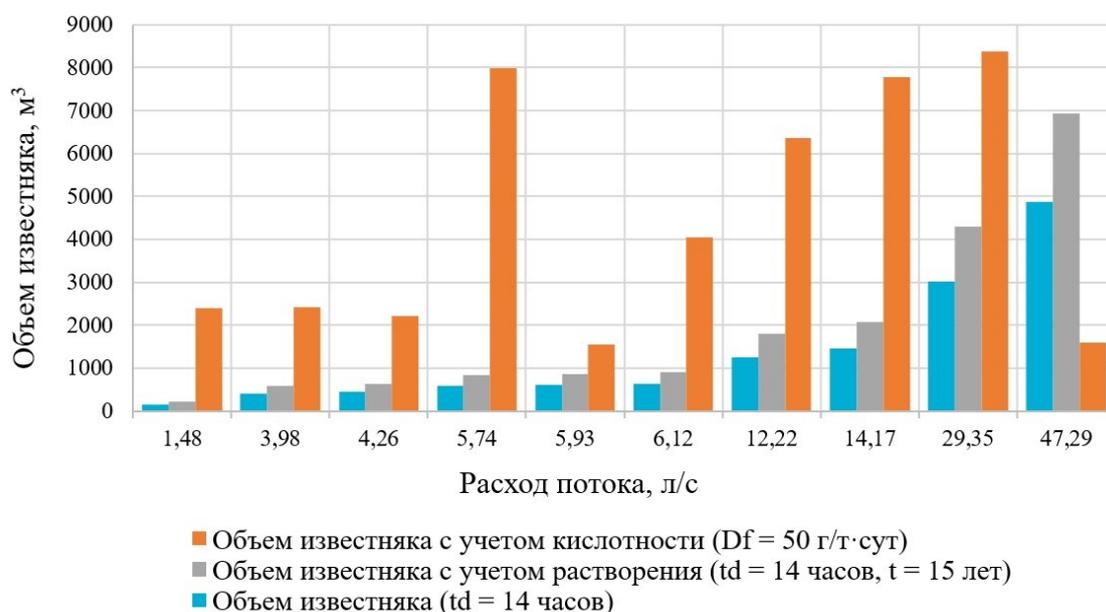


Рис. 1. Результаты расчета объема щебня известняка тремя способами

Выводы

Реализация систем пассивной геохимической очистки в виде бескислородных известняковых дрен, параметры которых рассчитаны на основании рекомендуемых значений времени удержания воды (14 часов) и показателя эффективности удаления кислотности (50 г / т сут), потребует значительных объемов известняка и площадей, отводимых для их размещения. Для крупных изливов и/или наиболее загрязненных металлами шахтных вод необходимая для эффективной очистки длина каналов может достигать нескольких километров.

Планирование систем очистки на основании только рекомендуемого времени удержания, без учета кислотности воды, может привести к недооценке или переоценке размеров фильтрующих дрен. Время удержания воды является критически важным параметром для эффективности систем очистки. Уменьшение времени удержания и, следовательно, размеров системы может быть обосновано путем проведения лабораторных экспериментов и реализации пилотных проектов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000402-4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kleinmann B., Skousen J., Wildeman T., Hedin B., Nairn B., Gusek J. The early development of passive treatment systems for mining-influenced water: a North American perspective // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – V. 40. – P. 818–830. – DOI: 10.1007/s10230-021-00817-8.
2. Фетисова Н.Ф. Оценка возможности применения пассивных методов для очистки шахтных вод с высоким содержанием металлов // *Гидрогеология и карстоведение: межвуз. сб. науч. тр.* – Пермь, 2023. – Вып. 21. – С. 52-59.
3. Фетисова Н.Ф., Фетисов В.В. Подходы к выбору систем очистки дренажных вод заброшенных горных выработок Кизеловского угольного бассейна // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2024. – № 1. – С. 109-124. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_109.
4. Wolkersdorfer C. Passive Treatment Methods for Mine Water // *Mine Water Treatment – Active and Passive Methods*. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2022. – P. 151-187. – DOI:10.1007/978-3-662-65770-6_4.
5. Hedin R.S., Nairn R.W., Kleinmann R.L.P. Passive treatment of coal mine drainage / US Bureau of Mines IC 9389, US Department of the Interior. – Washington, DC., 1994. – 44 p.
6. PIRAMID Consortium. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters: European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 «Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage» (PIRAMID) / University of Newcastle Upon Tyne. – Newcastle Upon Tyne UK, 2003. – 166 p.
7. Cravotta C.A. III, Watzlaf G.R. Design and performance of limestone drains to increase pH and remove metals from acidic mine drainage // *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers: applications to radionuclides, trace metals, and nutrients* / Eds.: Naftz D., Morrison S.J., Fuller CC., Davis J.A. – Amsterdam, 2003. – P. 19-66. – DOI: 10.1016/B978-012513563-4/50006-2.
8. Skousen J., Ziemkiewicz P.F. Performance of 116 passive treatment systems for acid mine drainage: Proceedings of 22nd National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation. – Lexington: ASMR, 2005. – P. 1100-1133.
9. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R., McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // *Mine Water and the Environment*. – 2017. – V. 36., № 1. – P. 133-153. – DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.