

УДК 544.435.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ И ПОДОТВАЛЬНЫХ ВОД ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

© 2016 г. Н.М. Шарапов¹, А.А. Паныч², А.В. Соколов¹

¹ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Восточный филиал, г. Чита, Россия

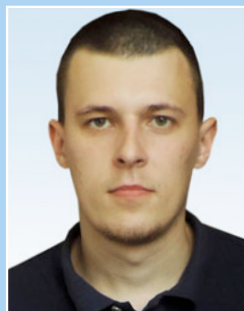
² ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», г. Чита, Россия

Ключевые слова: водные объекты, негативное воздействие на водные объекты, очистка шахтных вод, очистка подотвальных вод, уравнение Дарси, коэффициент фильтрации, коэффициент формы частиц грунта, коэффициент разноразмерности грунта, градиент напора, тяжелые металлы, геохимические барьеры.

На основании имеющихся литературных источников проведен критический анализ существующих способов очистки шахтных и подотвальных вод от тяжелых металлов, концентрации



Н.М. Шарапов



А.А. Паныч



А.В. Соколов

которых значительно превышают предельно допустимые, а также фильтрационных свойств загрузок геохимических барьеров. Выбран наиболее эффективный метод очистки. В результате лабораторных исследований предложена модифицированная зависимость для расчета коэффициента фильтрации для загрузки геохимического барьера. Установлено, что наиболее перспективными являются созданные по специальным технологиям искусственные геохимические барьеры, включающие в качестве основного элемента фильтрующую загрузку из природных материалов. При добыче и переработке они могут разделяться на фракции различных размеров, что значительно влияет на фильтрационные свойства загрузки, которая определяется величиной коэффициента фильтрации. По результатам лабораторных исследований предложена модифицированная зависимость по расчету коэффициента фильтрации для загрузки геохимических барьеров.

Существенной специфической особенностью технологического процесса добычи полезных ископаемых является образование на всех этапах производства жидких отходов – кислых загрязненных сточных вод (шахтных и подотвальных), представляющих наибольшую опасность для поверхностных и подземных вод и являющихся основными источниками поступления тяжелых металлов, многократно превышающих предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}). При переработке горных пород их значительные объемы накапливаются в виде отходов и поступают в отвалы пустой породы, загрязняющие окружающую среду (наибольшие потери наблюдаются при первичной переработке многокомпонентных руд). Общие потери полезных ископаемых достигают в процессе добычи 10–30, первичной переработки (обогащения) до 20–40, химико-металлургической переработки 10–15 % [1].

Забайкальский край – важнейший минерально-сырьевой горнопромышленный регион Российской Федерации, обладающий огромным потенциалом, здесь, как и во многих других регионах страны, отработка месторождений полезных ископаемых (угля, руд и золота) в большинстве случаев производится открытым способом [1–3].

Значительное количество загрязняющих веществ поступает и после консервации горных предприятий. Например, после окончания отработки Джидинского месторождения (Республика Бурятия) и закрытия производства в 1997 г. источниками загрязнения водных объектов остаются отходы обогащения руд, отвалы горных пород, дренажные рудничные воды [2]. Воды р. Модонкуль (правого притока р. Джиды), являющейся приемником шахтных и рудничных вод, содержат в опасных концентрациях алюминий (до 17 ПДК), кадмий (170 ПДК), марганец (40 ПДК) и ряд других металлов. Концентрация сульфатов превышает 700 мг/дм³, фтора – 6 мг/дм³, нефтепродуктов – 2 мг/дм³. Основным источником поступления загрязняющих веществ в р. Модонкуль является руч. Инкур (правый приток р. Модонкуль), воды которого содержат кобальт, медь, свинец на уровне ПДК, кадмий и хром до 3–5 ПДК и характеризуются как кислые (рН = 5,4) [2]. Кроме того, значительное количество токсичных элементов поступает в р. Модонкуль с рудничными водами штольни «Западная», дренирующей месторождение Холтосон. Содержание в рудничных водах меди, цинка и других тяжелых металлов многократно превышает значения ПДК (табл. 1). По данным Госсанэпиднадзора Бурятии в Закаменском районе самые высокие по республике показатели выхода на инвалидность (216,7 на 1000 обратившихся), а также женских и онкологических заболеваний.

Цель работы – проведение анализа существующих способов очистки шахтных и подотвальных вод от тяжелых металлов, выбор наиболее эффективного метода очистки, изучение теоретических вопросов, связанных с эффективностью очистки сточных вод.

Таблица 1. Состав шахтных вод, формирующихся в штольне «Западная» [2] (источник загрязнения р. Модонкуль)

Ингредиенты	Значения показателей по годам, мг/дм ³						
	1996	1998	1998	1999	2001	2005	2008
pH	6,2	1,7	3,95	6,3	3,08	4,47	3,56
Взвешенные вещества	262,4	257,3	177	118	–	–	–
Сухой остаток	–	–	–	–	3693,49	–	2488,04
Cl	4,21	4,13	4,47	2,4	< 0,2	16,05	5,67
SO ₄	518,2	210,2	–	656,0	2458,2	1564	1773,61
Ca	–	–	–	261	415,94	112	399,80
Mg	–	–	–	207	86,83	5	182,90
Fe _{общ}	7,7	4,76	н/о	0,5	17,67	0,41	36,6
Cd	0,49	0,96	2,36	–	1,391	0,042	–
Cu	4,27	19,84	0,505	1,7	34,88	0,811	–
As	–	–	н/о	–	< 0,01	–	–
Ni	0,31	0,51	0,56	–	0,617	0,021	–
Cr	0,71	0,45	0,525	–	0,0135	0,0007	–
Zn	6,17	2,01	1,05	2,7	64,43	1,927	–
NH ₄	–	–	2,34	н/о	–	–	0,43
NO ₃	–	–	0,096	0,22	–	3,9	26,67
NO ₂	–	–	0,003	0,008	–	–	–
БПК ₅	–	–	–	5,05	–	–	–
F	–	–	–	–	17,74	1,43	0,74

Примечание: «–» – по приведенному веществу исследования не проводились.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методы очистки сточных вод делятся на механические, химические, физико-химические и биологические. Применение того или иного метода в каждом конкретном случае определяется видом загрязняющего вещества и классом его опасности. В настоящее время известны следующие способы очистки шахтных (штольневых) и подотвальных вод горнорудных предприятий, содержащих свободную кислоту и соли тяжелых металлов [4]:

1) Гальванокоагуляционный способ очистки сточных вод с использованием гальванопары «железо-углерод», позволяющий селективно извлекать ценные компоненты на стадии предочистки сточных вод с получением обогащенного извлекаемым металлом продукта. Результатом очистки является получение чистой воды и безопасных шламов. Недостаток этого

способа – значительные материальные и энергетические затраты, к тому же, он применим только в период работы предприятия.

2) Очистка сточных вод известковым молоком с последующим осветлением в прудах-шламонакопителях. Существенным недостатком данного способа является невозможность обеспечить снижение концентрации тяжелых металлов до ПДК_{рх}. Кроме того, пруды-шламонакопители в период весеннего половодья или летнего паводка становятся потенциально опасными и могут стать причиной техногенной катастрофы, т. к. в них накапливаются миллионы кубометров шлама и воды с высоким содержанием токсичных ингредиентов.

3) Очистка сточных вод с помощью сильных окислителей широко используется для выделения железа и марганца, ионы которых в высшей степени окисления легко гидролизуются с образованием нерастворимых осадков. Самый эффективный реагент для этих целей – озон. Широкое распространение методов озонирования сдерживается высокой стоимостью оборудования и большими эксплуатационными затратами.

4) Перспективным способом очистки сточных вод, на наш взгляд, является технологическая схема, основанная на использовании нейтрализационно-сорбционного геохимического барьера.

Проведенный в рамках исследования анализ научных работ [1, 3–7], посвященных способам очистки сточных вод горных предприятий, показал, что геохимические барьеры наиболее эффективны для очистки шахтных и подотвальных вод, т. к. они позволяют практически по всем тяжелым металлам снижать концентрацию на 90 и более процентов, т. е. до уровня ПДК_{рх}. Кроме того, эти сооружения не требуют дополнительных источников энергии, значительных материальных затрат и могут работать за счет гидравлической энергии потока. Следовательно, могут использоваться на прекративших отработку полезных ископаемых предприятиях, где отсутствуют источники энергоснабжения. Геохимические барьеры позволяют значительно снизить антропогенное воздействие на водные объекты предприятий горнорудной промышленности.

Для снижения концентрации загрязняющих веществ в сточных водах горных предприятий в качестве сорбентов предлагается использовать как синтетические сорбенты, так и природные минералы [5]. Экономически выгодно в сравнении с синтетическими сорбентами применять природные минералы горных пород – природные цеолиты, бентонитовые и палыгорскитовые глины, диатомиты, опоки и ряд других горных пород и минералов. Применение геохимических барьеров на горнодобывающих объектах (существующих и прекративших свою деятельность) для очистки сточных вод с использованием местных природных сорбентов представляет большой интерес.

Степень извлечения химических элементов (I , %) из шахтных и подтовальных вод оценивается по формуле [6]:

$$I = \frac{100 \cdot (C_o - C_p)}{C_o}, \quad (1)$$

где C_o – начальная концентрации элемента в растворе;

C_p – конечная концентрации элемента в растворе.

Например, в ходе лабораторного эксперимента, проведенного в работе [2] установлено, что известняк и хурай-цакирский туф показали высокую степень извлечения свинца 90,65 и 88,41 % соответственно; меди – 49 и 26,33 %; кобальта – 35,18 и 11,68 %; никеля – 34,01 и 11,3 % (табл. 2).

Таблица 2. Извлечение химических элементов из рудничных вод штольни «Западная» (лабораторный эксперимент) [2]

Природный сорбент	Степень очистки рудничных вод от токсичных элементов, %								
	Cu	Zn	Pb	Cd	Fe	Ni	Co	W	Ba
Цеолитовый туф Холинского месторождения	75,4	59,6	91,0	4,4	3,8	0,4	0	6,8	10,0
Цеолитовый туф месторождения Мухор-Тала	13,2	9,7	54,2	4,7	1,4	5,2	5,6	6,34	1,4
Туф вулкана Хурай-Цакир	26,3	15,5	88,4	6,7	6,0	1,3	1,7	9,5	–
Известняк месторождения Зун-Нарын	49,0	36,1	90,7	3,8	2,7	4,0	35,2	4,7	8,9
Кальцит месторождения Зун-Нарын	13,5	3,4	45,9	2,0	1,5	2,6	2,1	1,2	5,0

Анализ представленных в табл. 2 данных показывает, что наиболее эффективным природным сорбентом является цеолитовый туф Холинского месторождения (Республика Бурятия). Так, степень извлечения этим сорбентом свинца достигает 91 %, меди – 75 %, цинка, кадмия и вольфрама – выше 50 %, других химических элементов – до 10 %. Кроме того, известняки и хурай-цакирские туфы можно добывать на местном уровне, что экономически целесообразно [8].

Согласно оценкам карбонатного сырья (известняков) на территории Забайкальского края, Восточно-Забайкальская карбонатная провинция является одной из богатейших в России, разведанные запасы доломитов составляют миллиарды тонн, магнезитов и цементных известняков – сотни миллионов тонн, мраморов, офиокальцитов – сотни тысяч кубометров [9]. В связи с этим возрастает целесообразность применения геохимических барьеров с загрузкой из местных природных материалов.

Среди всего разнообразия геохимических барьеров, используемых для очистки сточных вод, можно выделить:

- конструкции, целенаправленно использующие естественные барьерные свойства природной среды;
- искусственные барьеры, созданные по специальным технологиям.

Как было отмечено выше, наиболее эффективным способом очистки от соединений тяжелых металлов являются искусственные геохимические барьеры. В качестве материалов для загрузки геохимических барьеров в зависимости от состава загрязняющих веществ могут применяться природные материалы или иные вещества, например, производственные отходы.

В работе [4] предложена модель геохимического барьера, представляющая собой горизонтальный лоток из окрашенного нержавеющей металла полукруглой формы (длина 400, ширина 20, глубина 15 см), установленный на доске (длина 420, ширина 20, высота 5 см) под углом 1° к горизонтальной поверхности для создания уклона водного потока. Фильтрующий материал – зернистая загрузка из силицированного кальцита с размерами зерен 2–15 мм. Методика проведения экспериментов заключалась в фильтровании через зернистую загрузку обычной водопроводной воды, загрязненной высокими концентрациями хлоридов, сульфатов, железа, марганца, меди, нефтепродуктов, сульфидов, йода со скоростью 1 м/ч, которая выбрана как средняя и наиболее оптимальная с позиции степени очистки и производительности модели геохимического барьера (табл. 3).

Таблица 3. Снижение концентрации загрязняющих веществ в геохимическом барьере в зависимости от его длины [4]

Длина лотка на участке отбора пробы, см	Концентрация (мг/л) при скорости фильтрования 1 м/ч							
	Хлориды	Сульфаты	Нефте-продукты	Железо	Марганец	Медь	Сульфиды	Йод
0	7295,00	2045,00	1,02	36,70	11,40	998,00	48,50	36,55
400	2753,00	800,00	0,44	0,13	0,44	103,00	0,12	0,67
800	1143,00	524,00	0,25	0,09	0,28	52,86	0,04	0,20
1200	466,00	350,00	0,12	0,06	0,16	5,40	0,01	0,12
1600	274,00	215,00	0,05	0,04	0,08	0,45	0,005	0,07

Анализ приведенных данных показал, что комплексная очистка характеризуется следующей степенью извлечения химических элементов (I , %):

- по хлоридам: до уровня как $ПДК_{хп}$, так и $ПДК_{рх}$ на четвертой стадии очистки, в итоге $0,91 ПДК_{рх}$ (снижение исходной концентрации в 26,6 раз);

- по сульфатам: до уровня ПДК_{хп} в начале третьей стадии, в итоге 2,15 ПДК_{рх} (снижение исходной концентрации в 9,5 раз);
- по нефтепродуктам: до уровня ПДК_{хп} и ПДК_{рх} на четвертой стадии очистки, в итоге 1,00 ПДК_{рх} (снижение исходной концентрации в 20,4 раз);
- по железу: до уровня ПДК_{хп} в конце первой стадии, ПДК_{рх} на второй стадии, в итоге 0,40 ПДК_{рх} (снижение исходной концентрации в 917,5 раз);
- по марганцу: до уровня ПДК_{хп} на четвертой стадии, в итоге 8,0 ПДК_{рх} (снижение исходной концентрации в 142,5 раза);
- по меди: до уровня ПДК_{хп} на четвертой стадии, в итоге 450,0 ПДК_{рх} (снижение исходной концентрации в 2217,8 раз);
- по сульфидам: до уровня ПДК_{хп} на рубеже второй и третьей стадий, до уровня ПДК_{рх} на четвертой стадии, в итоге 1,00 ПДК_{рх} (снижение исходной концентрации в 9700 раз);
- по йоду: до уровня ПДК_{рх} на второй стадии, до уровня ПДК_{хп} на рубеже третьей и четвертой стадий; в итоге 0,56 ПДК_{хп} (снижение исходной концентрации в 522,1 раза).

Кроме того, отмечена высокая экономическая эффективность использования модели геохимического барьера с зернистой загрузкой из силицированного кальцита как способа очистки загрязненных вод. Показано, что увеличение степени очистки прямо пропорционально снижению скорости фильтрования. В целом эффективность комплексной очистки (при скорости 1 м/ч): для сульфатов – 89,5; нефтепродуктов – 95,1; хлоридов – 96,2; для железа, марганца, меди, сульфидов и йода – почти 100 % (табл. 4).

Высокая эффективность комплексной очистки по результатам исследований [4] указывает на то, что даже одновременное смешивание экстремальных значений всех загрязняющих веществ и образование цельного по концентрации состава водного раствора не будут влиять на степень очищения от каждого из веществ. Это обуславливается как высокой степенью очистки фильтрующего материала, так и удачной конструкцией модели геохимического барьера, а именно – времени контакта сточной воды с загрузкой геохимических барьеров.

Очистка шахтных и подтовальных вод при помощи геохимических барьеров может быть универсальным методом и для действующих предприятий, и для законсервированных объектов. Этот факт предопределяет актуальность дальнейшего изучения, развития и совершенствования данного метода. В частности, исследования должны идти по следующим основным направлениям:

- изучение фильтрационных свойств материалов загрузок с целью подбора оптимальных параметров геохимических барьеров в зависимости от гидравлических нагрузок;

Таблица 4. Степень очистки воды в геохимическом барьере от комплекса загрязняющих веществ в зависимости от его длины [4]

Длина лотка на участке отбора пробы, см	Степень очистки (%) при скорости фильтрования 1 м/ч							
	Хлориды	Сульфаты	Нефте-продукты	Железо	Марганец	Медь	Сульфиды	Йод
100	15,57	15,22	14,22	24,90	24,04	22,42	24,93	24,54
200	31,13	30,44	28,43	49,81	48,07	44,84	49,88	49,08
300	46,70	45,66	42,65	74,74	72,11	67,26	74,80	73,63
400	62,26	60,88	56,86	99,65	96,14	89,68	99,75	98,17
500	67,78	64,25	61,76	99,67	96,49	90,93	99,79	98,50
600	73,30	67,63	65,69	99,70	96,84	92,19	99,84	98,80
700	78,81	71,00	70,59	99,73	97,19	93,45	99,88	99,12
800	84,33	74,38	75,49	99,75	97,54	94,70	99,92	99,45
900	86,65	76,50	78,43	99,78	97,81	95,89	99,94	99,51
1000	88,97	78,63	81,37	99,81	98,07	97,08	99,96	99,56
1100	91,29	80,76	85,29	99,81	98,33	98,27	99,98	99,62
1200	93,61	82,89	88,24	99,84	98,60	99,46	99,98	99,67
1300	94,27	84,54	90,20	99,84	98,77	99,58	99,98	99,73
1400	94,93	86,19	92,16	99,86	98,95	99,71	99,99	99,75
1500	95,59	87,84	94,12	99,89	99,12	99,83	99,99	99,78
1600	96,24	89,49	95,10	99,89	99,30	99,95	99,99	99,81

– исследование физико-химических свойств загрузок для использования материалов с более высокими показателями очистки;

– совершенствование и разработка новых конструкций геохимических барьеров для очистки подотвальных, шахтных вод и вод из штолен;

– изучение применения местных природных материалов в качестве загрузки в геохимических барьерах для очистки загрязненных тяжелыми металлами сточных вод на горнопромышленных предприятиях и в других отраслях, где могут образовываться аналогичные воды.

Таким образом, требуется дополнительная проработка ряда вопросов, связанных с загрузкой и конструктивными особенностями искусственных геохимических барьеров.

Как отмечено выше, для горнорудных предприятий искусственный геохимический барьер представляет емкость, заполненную той или иной за-

грузкой, предназначенной для очистки шахтных и/или подотвальных вод. Основное его назначение – уменьшение содержания тяжелых металлов и, как следствие, снижение негативного влияния этих предприятий на окружающую среду и водные объекты.

Для примера рассмотрим геохимический барьер в виде трубопровода, диаметр которого обозначим через $d_{\text{мп}}$, а диаметр загрузки соответственно через $d_{\text{зг}}$.

В общем виде скорость фильтрации (v) шахтных и/или подотвальных вод через гидрохимический барьер может быть рассчитана по формуле [10]:

$$v = \frac{Q}{\omega_{\text{геом}}} = \frac{Q}{\omega_{\text{пор}} + \omega_{\text{зг}}}, \quad (2)$$

где Q – фильтрационный расход;

$\omega_{\text{геом}}$ – площадь сечения трубопровода,

$\omega_{\text{геом}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{мп}}^2}{4} = \omega_{\text{пор}} + \omega_{\text{зг}}$, $\omega_{\text{пор}}$ – площадь сечения пор загрузки (площадь действительного «живого сечения» потока),

$\omega_{\text{зг}}$ – площадь сечения частиц загрузки (через эту площадь вода не проходит).

Известно, что скорость фильтрации (v) в случае установившегося движения может быть представлена формулой Дарси, выражающей основной закон ламинарной фильтрации [7, 10, 11]:

$$v = k \cdot J, \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом фильтрации;

J – пьезометрический уклон или градиент.

Формула (3), относящаяся к ламинарной фильтрации, имеет следующие границы применимости [10]:

$$v \cdot d < 0,01 \div 0,07, \quad (4)$$

где скорость фильтрации v , см/с;

d – средний диаметр частиц грунта, см.

Что касается коэффициента фильтрации, его численные значения существенно изменяются. В табл. 5 приведены округленные значения k (порядок численных значений) для разных грунтов, величина коэффициента фильтрации прямо пропорциональна диаметру фракций. Кроме того, с увеличением разнородности грунта (для нашего случая загрузки) его численное значение также снижается, что объясняется уменьшением коэффициента объемной пористости грунта.

Таблица 5. Округленные значения k для разных грунтов [10]

Тип грунта	k , см/с
Галька, гравий	0,1–10
Песок крупнозернистый	0,1–0,01
Песок среднезернистый	0,01–0,001
Песок мелкозернистый	0,001–0,0001

Для определения коэффициента фильтрации используются лабораторный, расчетный или полевой методы. Рассмотрим более подробно расчетный метод, базирующийся на эмпирических зависимостях. В литературе представлено значительное количество формул, предложенных разными авторами для определения коэффициента фильтрации, в которых используются различные параметры, устанавливаемые по кривой гранулометрического состава. По этой кривой определяются характерные диаметры фракций, например, d_{10} , d_{60} и т. д. – диаметры частиц, вес которых вместе с весом более мелких частиц составляет соответственно 10, 60 и так далее процентов от веса грунта.

В работах [12, 13] отмечено, что при фильтрации в крупнопористых средах зависимость (2) нарушается и принимает вид:

$$v = k \cdot J^{1/p}. \quad (5)$$

Коэффициент фильтрации в этом случае авторы [13] рекомендуют определять по следующим зависимостям:

– для округлых частиц:

$$k = p \cdot \left(20 - \frac{14}{d}\right) \sqrt{d_{gr}}. \quad (6)$$

– для остроугольных частиц:

$$k = 18 \cdot p \cdot \sqrt{d_{gr}}. \quad (7)$$

где p – порозность (пористость) материала (доли единицы).

Для вычисления коэффициента фильтрации расчетным путем наиболее часто используются формулы Хазена, Слихтера, Казагранде, Заурбрея, Крюгера и др., основанные на характеристиках гранулометрического состава грунтов. Значения коэффициента фильтрации, рассчитанные по формулам указанных выше авторов, могут различаться в 1,5–2,0 и более раз [14]. Приведем наиболее распространенные формулы, преобразованные для воды.

Формула Хазена (в другой менее распространенной транскрипции – Газена) применима для грунтов с эффективным диаметром от 0,1 до 3,0 мм:

$$k = 0,75 \cdot c \cdot d_3^2 \cdot (0,75 + 0,03t), \quad (8)$$

где d_3 – эффективный диаметр, см;

c – некоторый коэффициент, учитывающий пористость грунта и имеющий следующие значения: для очень плотных песков $c = 0,8$, для песков средней пористости $c = 1,55$;

t – температура воды, °С.

Формула Сликтера:

$$k = 10,22 d_3^2 / (\mu \cdot \sigma). \quad (9)$$

В формуле (9) под эффективным диаметром d_3 понимается средний весовой диаметр частиц, определенный по кривой гранулометрического состава исследуемого образца, т. е. такой диаметр, для которого весовые количества частиц мельче и крупнее его равны; s – коэффициент, зависящий от пористости P фиктивного грунта; m – вязкость воды при температуре испытаний (при $t = 10$ °С, $m = 0,01333$ пуаз, формула Сликтера принимает вид: $k = 766 d_3^2 / \sigma$).

Вышеназванные формулы обычно используются в определенных пределах, т. к. базируются на допущениях применительно к образцам с различной крупностью зерен и степенью их однородности. Также необходимо отметить, что данные зависимости установлены для конкретных условий или сооружений с учетом действующих режимов движения воды. В случае разработки геохимических барьеров для очистки сточных вод горных предприятий от растворенных солей тяжелых металлов с использованием загрузки необходимо провести уточнение входящих в приведенные зависимости параметров и вид самих зависимостей. Кроме того, приведенные выше формулы не в полной мере учитывают свойства сточных вод, не удовлетворяют теории размерности и т. д.

Рассмотрим эмпирическую формулу для расчета коэффициента фильтрации (k , см/с) М.П. Павчича [10]:

$$k = 4 \frac{\Phi}{v} \cdot \sqrt[3]{\eta} \cdot \frac{n^2}{(1-n)^2} \cdot d_{17}^2, \quad (10)$$

где v – кинематический коэффициент вязкости воды, см²/с;

Φ – коэффициент, учитывающий форму частиц грунта, принимаемый для песчано-гравелистогалечных грунтов равным 1,0; для щебенистых грунтов 0,35–0,40;

η – коэффициент разнозернистости грунта (по Р.Р. Чугаеву его численное значение представляет отношение характерных диаметров фракций соответствующих 60 и 10 %: $\eta = d_{60}/d_{10}$);

d_{17} – диаметр фракции, соответствующей 17 % содержания ее по весу;

n – коэффициент объемной пористости грунта (в механике грунтов – это пористость (порозность) грунта), численное значение которой рассчитывается по формуле, которая также приведена в работе [10]:

$$n = \frac{\text{Объем пор грунта}}{\text{Объем пор грунта} + \text{Объем частиц грунта}} \quad (11)$$

Следует отметить, что для геохимических барьеров предложенная М.П. Паввичем формула (11) не используется из-за невозможности определения коэффициента разнородности грунта (η) и диаметра фракции (d_{17}), т. к. загрузка геохимических барьеров, как правило, имеет однородный диаметр фракций (d_{gr}).

Предлагаем следующий подход. Из теории движения наносов известна зависимость, позволяющая разделить донные и взвешенные наносы по величине безразмерного условного диаметра наносов [15]:

$$D_{gr} = D_m \left(g \left(\frac{\rho_s}{\rho_0} - 1 \right) / v^2 \right)^{1/3}, \quad (12)$$

где v – кинематическая вязкость воды;

g – ускорение силы тяжести;

ρ_s – плотность материала наносов;

ρ_0 – плотность воды;

D_m – средняя крупность наносов.

На наш взгляд, при расчете загрузки геохимических барьеров, в формуле (10) целесообразно коэффициент разнородности грунта (η) заменить на безразмерный диаметр, а плотность грунта – на плотность укладки загрузки: $\rho_s = \rho_{gr}$. Таким образом, зависимость для крупности загрузки геохимических барьеров может быть записана в виде:

$$D_{gr} = d_{gr} \left(g \left(\frac{\rho_{gr}}{\rho_0} - 1 \right) / v^2 \right)^{1/3}. \quad (13)$$

Тогда преобразованная зависимость для расчета коэффициента фильтрации М.П. Паввича примет вид:

$$k = 4 \frac{\Phi}{v} \cdot \sqrt[3]{\frac{D_{gr}}{d_{gr}}} \cdot \frac{n^2}{(1-n)^2} \cdot d_{gr}^2 \quad (14)$$

Предварительная оценка предложенного подхода в лабораторных условиях, проведенная авторами в работе [11], показала его правомерность.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ существующих способов очистки шахтных и подотвальных вод от тяжелых металлов. Установлено, что одним из наиболее эффективных способов очистки шахтных и подотвальных вод являются искусственные геохимические барьеры с загрузками из природных материалов, в частности – карбонатного сырья (известняков). В Забайкалье разведаны значительные запасы этого сырья, которые способны обеспечить применение указанных барьеров необходимыми материалами, что будет экономически выгодно.

При этом коэффициент фильтрации выступает величиной, определяющей производительность геохимического барьера, время контакта загрузки с загрязненными шахтными и подотвальными водами и, как следствие, эффективность их очистки. Исследованы предложенные разными авторами формулы для вычисления коэффициента фильтрации. Сделан вывод о том, что для геохимических барьеров данные зависимости не могут быть использованы, т. к. они определены для конкретных условий или сооружений с учетом действующих в них режимов движения воды и не учитывают форму частиц загрузки, в то время как загрузка геохимических барьеров, как правило, имеет однородный диаметр фракций.

Предложено при расчете коэффициента фильтрации вместо коэффициента разнородности грунта использовать безразмерный диаметр, а вместо плотности грунта – плотность укладки загрузки. Данный подход опробован в лабораторных условиях и показал хорошие результаты.

Определены задачи дальнейших исследований – уточнение предложенной зависимости для расчета коэффициента фильтрации в натуральных экспериментах, сравнение расчетных значений коэффициента фильтрации с его действительными значениями, расчет эффективности очистки шахтных и подотвальных вод на геохимических барьерах с использованием карбонатного сырья (известняков) для условий Забайкальского края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликова М.А. Оценка и снижение негативного воздействия сульфидных отходов при освоении месторождения Озерное: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб. 2010. 22 с.
2. Бардамова И.В., Смирнова О.К. Использование природных сорбентов для очистки рудничных вод Джидинского месторождения // Мат-лы III Всерос. симп. «Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий». Чита. 2010. С. 136–139.
3. Поляков О.А. Золотодобывающая промышленность Забайкальского края // Информ.-аналит. альманах «Россия. Власть, экономика, общество. Имена и судьбы». М.: Регион-пресс. Книга, 2009. С. 76–77.

4. Ахметов Т.О., Назаров В.Д., Горячев В.С. Применение геохимических барьеров для очистки природных вод // Водное хозяйство России. 2015. № 1. С. 76–85.
5. Климов Е.С., Бузаева М.В. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод. Ульяновск: УЛГТУ, 2011. 201 с.
6. Исаева О.Ю. Исследование перспективных методов очистки сточных вод от тяжелых металлов с целью создания эколого-геохимических барьерных зон: автореф. дисс. ...канд. техн. наук. Уфа. 2006. 24 с.
7. Паныч А.А., Шарапов Н.М., Соколов А.В. Применение геохимических барьеров для очистки подотвальных вод. Водные ресурсы и водопользование: сб. трудов / под ред. В.Н. Заслоновского, Л.Н. Зима. Чита: ЗабГУ, 2015. С. 66–86.
8. Крайнов С.Р., Швец В.М. Гидрохимия: учеб. пособие. М.: Недра, 1992. 463 с.
9. Гудзь М.М., Трубочев А.И. Основные закономерности размещения месторождений и проявлений карбонатного сырья Забайкалья // Горный информ.-аналит. бюл. Отд. вып.: Забайкалье. М. 2007. Т. 1. С. 214–222.
10. Чугаев Р.Р. Гидравлика: учеб. для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.
11. Паныч А.А., Шарапов Н.М., Соколов А.В. Экспериментальная установка для исследования свойств загрузки для фильтров очистки загрязненных вод. Кулагинские чтения: Техника и технологии производственных процессов. XV Междунар. науч.-практ. конф. Чита: ЗабГУ, 2015. С. 332–335.
12. Гидротехнические сооружения / под общ. ред. В.П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.
13. Журба М.Г., Вдовин Ю.И. Водозаборно-очистные сооружения и устройства: учеб. пособие для студентов вузов / под ред. М.Г. Журбы. М.: АСТ, 2003. 569 с.
14. Бутиц Ш.Ф., Самарина Ш.Ф. Пособие к практическим занятиям по гидрогеологии. Л.: ЛГУ, 1956. 172 с.
15. Бондарева Е.В., Кантаржи И.Г. Взаимодействие вдольберегового потока с морскими гидротехническими сооружениями // Гидротехн. строительство. 2009. № 12. С. 33–40.

Сведения об авторах:

Шарапов Николай Михайлович, д-р техн. наук, профессор, руководитель направления, Восточный филиал, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30; e-mail: nmshrapov@mail.ru

Паныч Анатолий Андреевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», Россия, 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, e-mail: pan66-6@mail.ru

Соколов Анатолий Васильевич, канд. техн. наук, доцент, главный инженер проектов, Восточный филиал, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, e-mail: vostokniivh@mail.ru