ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Очистка кислотных шахтных сточных вод нейтрализацией с использованием адсорбента

П.Эспиноза Тумиалан[1], Н.Тантавилка Мартинес[2], К.Баррето Хиностроза[2], Д.П.Р.Арана Руэдас[2]✉
[1] *Административный центр Серро – С.А.К – Волкан, Лима, Перу*
[2] *Университет Континенталь, Уанкайо, Перу*

Как цитировать эту статью: Эспиноза Тумиалан П., Тантавилка Мартинес Н., Баррето Хиностроза К., Арана Руэдас Д.П.Р. Очистка кислотных шахтных сточных вод нейтрализацией с использованием адсорбента // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 381-387. EDN HWRBRB

Аннотация. Одной из существенных проблем в горно-добывающем секторе является кислотный дренаж шахт, особенно на заброшенных и действующих шахтах, где должным образом не контролируется качество сброса воды. Степень удаления растворенных металлов меди, железа, свинца и цинка в дренаже кислых шахт была исследована путем применения различных пропорций смесей на основе нейтрализующего реагента гашеной извести с содержанием 67 % оксида кальция (CaO) с адсорбирующим материалом – природным бентонитом натрия по сравнению с применением нейтрализующего реагента без смешивания, обычно используемого при нейтрализации кислых горных стоков. Полученные результаты показывают, что степень удаления растворенных металлов из дренажа кислых шахт при обработке смесью нейтрализующего реагента и адсорбирующего материала в определенной пропорции достигает качества сброса, соответствующего экологическому стандарту (предельно допустимый уровень) при более низком pH, чем при нанесении нейтрализующего материала без смешивания, что свидетельствует о чистом снижении нейтрализующего агента на 1 кг/м^3 кислотного шахтного дренажа. Кроме того, осадок, образующийся при обработке смесью нейтрализующего реагента с адсорбирующим материалом, обладает лучшими характеристиками, чем обычный осадок без бентонита, поскольку он больше подходит для использования в качестве укрывного материала, снижая степень поверхностной инфильтрации воды в нанесенный осадок.

Ключевые слова: бентонит; кислотный шахтный дренаж; адсорбция металлов; водоочистка; укрывной материал

Поступила: 11.04.2023 ***Принята: 25.10.2023*** ***Онлайн: 15.12.2023*** ***Опубликована: 04.07.2024***

Введение. Наиболее вредными для окружающей среды являются сточные воды, образующиеся в результате шахтных сбросов с низким pH и повышенными концентрациями металлов [1-3]. Эти условия приводят к деградации почв и модификации гидрологической системы [4, 5], которая играет главную роль в развитии жизни там, где ее нехватка сильно влияет на экосистемы и людей [6, 7].

Горно-добывающие компании сталкиваются с актуальной проблемой управления и увеличения производства металла или энергии в рамках устойчивого подхода, охватывающего экономическую, социальную и экологическую сферы [8, 9]. В этом случае используется шахтный дренаж, который в основном делится на три типа: основной, нейтральный и кислотный. Главная проблема связана с кислотными стоками, называемыми кислотным шахтным дренажом (КШД) из-за его характеристики pH < 3 и высокой концентрации тяжелых металлов [10, 11]. Кроме того, как указано в источниках [12, 13], воздействия КШД можно разделить на четыре группы: экологические, биологические, физические и химические.

Обработка КШД делится на пассивные или активные технологии [14], активные обычно применяются для эффективного и быстрого удаления токсичных материалов, снижающих воздействие на окружающую среду в соответствии с требованиями законодательства [15] и где в условиях круговой экономики наблюдается тенденция к повышению стоимости материалов [16, 17].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© П.Эспиноза Тумиалан, Н.Тантавилка Мартинес, К.Баррето Хиностроза, Д.П.Р.Арана Руэдас, 2024

Тем не менее, образование огромного количества шлама неизбежно, и управление им может стать препятствием в процессе активного применения [18].

Стратегия обработки КШД должна основываться на скорости потока, химическом составе, логистических возможностях и экономических источниках, а также на юридических требованиях к выбросу и характеристиках принимающего органа [19, 20]. Следовательно, нейтрализация КШД и иммобилизация элементов имеют весьма важное значение [21].

Существуют данные о том, что компании использовали известь или неактивированный аттапульгит для нейтрализации КШД, удаления тяжелых металлов [22, 23] и образования вторичных минералов на землях, пострадавших от КШД [24].

Кроме того, в работах [25, 26] написано, что в настоящее время также важно стимулировать методы производства для снижения образования КШД у источника и прогнозировать вред окружающей среде в рамках превентивного подхода, поскольку образование КШД может пассивно продолжаться в течение многих лет [27, 28], и горно-добывающие компании не должны полагаться на отдельные технологии для достижения экологических стандартов [29].

Целью данного исследования, несмотря на достижение удовлетворительных результатов по нейтрализации и удалению металлов в дренаже кислых шахт, которые измеряются качеством образующихся сточных вод, является адаптация качества твердого побочного продукта, известного как осадок нейтрализации и улучшение его эксплуатационных свойств в качестве укрывного материала для хвостохранилищ и отвалов отходов, снижение затрат на закрытие шахт и ответственность за нанесение экологического ущерба.

При обработке КШД очень часто используется процесс нейтрализации – щелочное осаждение с последующим окислением и отделением осадка от сточных вод, в результате чего очищенная вода достигает экологического стандарта. Прогресс и оптимизация процесса основаны на рециркуляции осадка, которая позволяет использовать преимущества его остаточной щелочности и увеличить скорость осаждения осадка, получаемого с помощью технологии «осадок высокой плотности», а также на улучшении качества нейтрализации потока, которое зависит от условий гидратации извести (при которых освобождается максимальная доля гидроксильных ионов). Кроме того, оборудование лучше справляется с гомогенизацией потоков, сводя к минимуму «мертвые зоны» и короткие замыкания потока в реакторе.

Применяемая в исследовании концепция обеспечивает процессу нейтрализации и щелочному осаждению дополнительный эффект адсорбции растворенных металлов с использованием адсорбирующего материала, который не мешает основному процессу. Он также способствует удалению растворенных металлов, фиксируя их на своей поверхности, так что стехиометрически потребность в гидроксильных ионах снижается, другими словами, расход извести должен быть ниже.

Бентонит – это горная порода, состоящая из кристаллических глинистых минералов, образующихся в результате девитрификации. Химические изменения, сопровождающие его стекловидный магматический материал, обычно туф или вулканический пепел, часто содержат различные пропорции вспомогательных стеклянных гранул, которые первоначально были вкраплениями вулканического стекла. Тем не менее, коммерчески бентониты определяются исключительно на минералогической основе и обычно классифицируются в соответствии с их катионными прослойками и способностью к набуханию в воде как натриевые, кальциевые или калиевые. В исследовании применялся натриевый бентонит.

Во многих исследованиях по простой адсорбции ионов в бентоните [30] изучалась способность активированного бентонита в качестве адсорбента удалять компоненты в экспериментальных условиях. В работе [31] оценивается соотношение адсорбции норфлоксацина (НОР) и меди Cu^{2+} на элементах бентонитового соединения. Бинарная адсорбция Cd(II) – Ni(II) на бентоните показала, что оба металла проявляют очень сильное противодействие, аналогичное адсорбции другого металла [32]. С другой стороны, информация об одновременной адсорбции на многокомпонентных системах из бентонита или другой минеральной глины встречается очень редко.

Согласно источнику [33], с использованием природного бентонита ионы Cd(II), Cu(II), Ni(II) и Pb(II) удалялись в системах из одного и нескольких компонентов при различных условиях с максимальной адсорбцией через 20 мин. Повышение pH способствовало удалению ионов металлов. Адсорбция тяжелых металлов происходила по изотерме Ленгмюра как в системах из одного, так

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и из нескольких компонентов, что указывает на то, что механизмы сорбции не изменяются при определенных условиях. Из-за сильного противодействия между катионами сосуществование катионов в растворе снижает адсорбционную способность по сравнению с индивидуально полученными системами с одним металлом. Селективность по порядку адсорбции была следующей: Cu > Ni > Pb > Cd.

Кроме того, в работе [34] исследовалась адсорбция Fe(II) кислотного стока из заброшенной угольной шахты в Энуго Окпара, Нигерия, при помощи глины из бентонита. Исследование было основано на начальной концентрации 1308, 62, 49 и 24 мг/л Fe(II), Cu(II), Zn и Pb(II) соответственно во флаконе объемом 100 мл. Кроме того, одну за другой добавляли увеличенные дозы бентонита от 0 до 7 г, стабилизируя растворы при постоянном pH 2,7. Было обнаружено, что наибольшая адсорбция происходит при 4 г бентонита в 100 мл. Концентрация металла в конце процесса при орбитальном перемешивании при 200 об/мин в течение 4 ч составляла 78,50, 0,075 и 0,053 мг/л Fe(II), Cu(II) и Zn(II) соответственно.

Для сравнения, в статье [35] говорится о различных способах активации природного бентонита, включая кислотную активацию, показывающую, что соединения бентонита обладают высоким потенциалом для удаления загрязняющих веществ из шахтных сточных вод. В связи с активацией кислотой, когда концентрация кислоты превышает 30 %, удельная площадь поверхности бентонита существенно не увеличивается, а для подкисления бентонита натрием требуется меньшая концентрация, чем для бентонита кальцием. Как видно, существуют научные доказательства того, что бентонит натрия является распространенным и относительно дешевым материалом, который может быть использован при обработке КШД.

Основной целью данного исследования является снижение расхода нейтрализующих реагентов и улучшение качества образующегося шлама путем нейтрализации, что делает его более пригодным для последующего использования в качестве укрывного материала для хвостохранилищ, расчистки или ликвидации последствий при добыче полезных ископаемых.

Для определения наиболее эффективного, как с точки зрения удаления металла, так и качества осадка, были применены различные соотношения смешивания нейтрализующего реагента с адсорбирующим материалом. Исследование дополняется испытанием гидроизоляции от ила в качестве укрывного материала на открытой поверхности материала.

Кроме того, исследование проводится в Серро-де-Паско, штат Паско, Перу, на высоте 4300 м над уровнем моря в отвалах шахты с накопленным пиритом, принадлежащим закрытому руднику после его эксплуатации открытым способом.

Методы. *Гашеная известь и натриевый бентонит*. В качестве нейтрализующего реагента (НР) использовалась гашеная известь, взятая на промышленном предприятии по нейтрализации кислотных шахтных дренажей, результаты лабораторного анализа которой показали содержание 66,73 % оксида кальция (CaO), влажность 1,8 % и гранулометрию 96 % – 200 меш.

В качестве адсорбирующего материала использовался бентонит (BE), природный натрий, химическое название – силикат гидратированного алюминия – порошок бело-кремового цвета с высоким содержанием монтмориллонита, в мешках по 25 кг; 94-98 % бентонита и 2-6 % кварца или оксида кремния с удельным весом 2,52 и 881 кг/м^3 при относительной плотности 20 °C.

Адсорбционная способность растворимых металлов, гидроизоляция и герметизация являются наиболее важными свойствами бентонита для данного исследования.

Кислотный дренаж шахт. Проба, собранная из кислотного дренажа шахты объемом 25 ± 0,25 л, была взята в соответствии с процедурой отбора проб на очистных сооружениях кислотной дренажной системы, откуда были взяты образцы для экспериментальных испытаний: pH («на месте») 1,91-1,96; Cu 14,94 мг/л; Fe 836,75 мг/л; Pb 0,32 мг/л; Zn 60,72 мг/л.

Приготовление реагента. В качестве твердого реагента для испытаний на нейтрализацию и осаждение металлов были приготовлены три порошкообразные смеси гашеной извести с бентонитом в различных пропорциях, как показано в табл.1.

Далее 150 г реагента смешивали с одним литром дистиллированной воды для каждого случая. Кроме того, гашеную известь приготовили, смешав ее в количестве 150 г с 1 л дистиллированной воды.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© П.Эспиноза Тумиалан, Н.Тантавилка Мартинес, К.Баррето Хиностроза, Д.П.Р.Арана Руэдас, 2024

Таблица 1

Характеристики смесей, %

Смесь	Гашеная известь (HP)	Бентонит (BE)
C1	95	5
C2	90	10
C3	80	20

Таблица 2

Расход реагентов при проведении теста на нейтрализацию и осаждение, г/л

Реагент	Смесь	HP	BE
HP 100 %	6,45	6,45	0,00
HP 95 % – BE 5 %	6,35	6,03	0,32
HP 90 % – BE 10 %	6,04	5,44	0,60
HP 80 % – BE 20 %	7,12	5,70	1,42

Экспериментальные испытания нейтрализации и осаждения. Экспериментальные испытания проводились на оборудовании для испытания, состоящем из шести банок емкостью по 2 л каждая, с регулируемой скоростью вращения мешалок и контролем времени. Из-за санитарных ограничений тесты проводились в изолированной среде в лаборатории, расположенной в отделе экологических работ университета Континенталь, Уанкайо.

Используемым стандартом для испытаний был 1 л кислотного дренажа, перемешивание при 300 об/мин, время реакции 20 мин и добавление реагента градуированным миллилитровым шприцем. Во время теста реагент содержался в мензурке с магнитной мешалкой для поддержания однородности смеси.

В табл.2 приведены дозы реагентов, использованные в четырех испытаниях на нейтрализацию и осаждение. Реагенты подавались в виде твердожидкой смеси.

Кроме того, полученный осадок в тестах на нейтрализацию для каждой дозы с пятью повторениями собирали и хранили в четырех контейнерах отдельно, по одному для каждой дозы.

Аналитические методы. Металлы в жидких растворах анализировали следующими методами: медь (Cu) – SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Часть 3500-Cu B, 23 – издание 2017 г.; цинк (Zn) – SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Часть 3500-Zn B, 23 – издание 2017 г.; железо (Fe) – SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Часть3500-Fe B, 23 – издание 2017 г.; свинец (Pb) – SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Часть 5210-Pb B, 23 – издание 2017 г.

Экспериментальные тесты покрытия. Четыре фильтрационных столбца были изготовлены с использованием труб из ПВХ внутреннего диаметра четыре дюйма (10,16 см), высота прокладки 50 см ± 0,5 см. На дно была помещена 4-дюймовая крышка из ПВХ с отверстиями диаметром 1/8 дюйма, просверленными изнутри наружу, для сбора просачивающейся жидкости самостоятельно. В нижней части каждого столбца были установлены прозрачные контейнеры для сбора просачиваемой жидкости. Кроме того, боковые части были покрыты прозрачным полиэтиленом, чтобы свести к минимуму потери при испарении.

Осадок из каждой из четырех испытуемых групп объединяли из-за сходства его происхождения, добавляли высокомолекулярный растворимый полимерный флокулянт и встряхивали в течение 10 мин при 60 об/мин, затем путем отделения надосадочной жидкости получают стабильный загущенный осадок, содержание твердых веществ в котором подробно указано в табл.3.

Таблица 3

Характеристики тестируемой группы

Тестируемая группа	Объем осадка, мл	Содержание твердых частиц, %	Номер столбца
HP 100 %	280	32	1
HP 95 % – BE 5 %	275	28	2
HP 90 % – BE 10 %	270	29	3
HP 80 % – BE 20 %	271	27	4

На первой стадии покрытия фильтрующих столбцов через 45 мин ни в одном из столбцов не наблюдалось утечки жидкости снизу. Было замечено, что на поверхностях окраска становилась красноватой и над ней не было жидкости, как показано в табл.4.

Экспериментальные испытания на фильтрацию. После 18 ч фильтрации столбцы покрывали соответствующим осадком, и на поверхность столбца постепенно добавляли прохладную воду: 200 мл через 0 мин, 150 мл через 10 мин и 100 мл через 20 мин.

Объемы надосадочной и фильтрованной жидкостей через 25 мин после последнего добавления холодной воды представлены в табл.5.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 4

Данные о покрытии фильтрующих столбцов загущенным осадком

Характеристики покрытия	Столбцы, см			
	1	2	3	4
Высота заполнения	50	50	50	50
Высота осадка	3,4	3,5	3,6	3,6
Начальная высота	53,4	53,5	53,6	53,6
Уменьшение на 10 мин	2,8	2,6	2	1,8
Высота через 10 мин	50,6	50,9	51,6	51,8

Таблица 5

Объемы жидкостей после добавления воды

Номер столбца	Высота, см	Объем жидкости, мл	
		Надосадочная	Фильтрованная
1	0,3	24	145
2	1,2	94	142
3	1,6	126	105
4	2,2	177	65

Результат и обсуждение. *Нейтрализация и удаление металлов*. Нейтрализация несмешанной гашеной известью находится в пределах нормы расхода (6,45 г/л), которая применяется в промышленности для кислой воды с pH от 1,91 до 1,96, а также с учетом содержания анализируемых растворенных металлов.

В тестах со смесью гашеной извести и бентонита pH снижается с увеличением доли бентонита – также незначительно увеличивается концентрация растворенных металлов в обработанной воде. Тем не менее, при более низком значении pH происходит выведение растворенных металлов в соответствии с экологическим стандартом предельно допустимого уровня (ПДУ).

Следует отметить, что для достижения диапазона pH от 7,6 до 8 при использовании в качестве реагента только гашеной извести, несмотря на низкий расход, концентрация растворенных металлов превышает стандарт ПДУ (pH от 6 до 9, Pb 0,16 мг/л; Zn 1,20 мг/л; Cu 0,40 мг/л и Fe 1,6 мг/л): pH 7,8; Pb 0,18 мг/л; Zn 5,18 мг/л; Cu 1,23 мг/л; Fe 177,78 мг/л.

Кроме того, бентонит обладает эффектом адсорбции растворенных металлов, снижая их концентрацию в жидкости, особенно железа, с которым он обладал бы эффектом довольно качественной адсорбции (табл.6) [34].

Таблица 6

Характеристики жидкости, полученные при кислотной дренажной обработке при различных соотношениях нейтрализатора и адсорбента, мг/л

Реагент	pH	Pb	Zn	Cu	Fe
HP 100 %	8,93-9,27	0,03	0,16	0,05	1,21
HP 95 % – BE 5 %	8,72-8,89	0,03	0,28	0,09	1,54
HP 90 % – BE 10 %	7,89-8,15	0,09	0,75	0,25	1,55
HP 80 % – BE 20 %	7,61-8,0	0,11	0,97	0,32	1,58

Тесты на покрытие и фильтрацию. Из результатов нанесения загущенного шлама видно, что при более высокой доле бентонита в смеси толщина образовавшегося слоя на поверхности больше через 10 мин после его нанесения. Кроме того, в течение 45 мин не было никаких признаков просачивания в нижней части столбца.

При добавлении пресной воды к верхней поверхности столбцов наблюдается следующее: при покрытии осадком от обработки гашеной известью (столбец 1) высота надосадочной жидкости ниже, а объем фильтрованной жидкости выше. С увеличением доли бентонита скорость фильтрации и объем фильтруемого материала уменьшаются, что свидетельствует о том, что вода задерживается в столбце.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© П.Эспиноза Тумиалан, Н.Тантавилка Мартинес, К.Баррето Хиностроза, Д.П.Р.Арана Руэдас, 2024

Для применения смесей шлама с содержанием бентонита остается изучить последовательность его применения на месторождениях полезных ископаемых, хвостохранилищах или демонтажных работах, в зависимости от характеристик, которые в конечном итоге должны привести к обнажению незащищенного слоя.

Заключение. Кислотная обработка воды гашеной известью, смешанной с бентонитом, удаляет растворенные металлы при более низком pH, чем при использовании только гашеной извести. Осадок от кислотной обработки воды гашеной известью, смешанной с бентонитом, приобретает дополнительные свойства снижения скорости фильтрации прямо пропорционально содержанию бентонита. Использование осадка для нейтрализации гашеной извести, смешанного с бентонитом, должно быть адаптировано к типу покрытия, которое требуется для ликвидации хвостохранилищ, очистных сооружений или в целом открытых месторождений.

Ожидается, что это приведет к сокращению выбросов КШД в источнике, что снизит затраты на очистку, ущерб окружающей среде и трудоемкое управление шламом в рамках превентивного подхода.

Осадок от нейтрализации кислой воды, который в настоящее время считается отходом, не имеющим коммерческой ценности, но, напротив, сопряженным с затратами на обработку и утилизацию, может быть использован в качестве укрывного материала.

Использование укрывного материала на основе нейтрализационного шлама и бентонита на отвалах кислотообразующего материала постепенно снизит потенциал образования кислоты в отвале за счет уменьшения аэрации и проникновения воды, которые являются важными факторами окисления сульфидов и образования кислот и растворенных металлов.

Покрытие смесью бентонитового нейтрализующего шлама, в отличие от геосинтетического покрытия, имеет преимущество – лучше вписывается в ландшафтную среду после закрытия месторождений, образующихся в результате добычи полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gandy C.J., Gray N.D., Mejeha O.K. et al.* Use of propionic acid additions to enhance zinc removal from mine drainage in short residence time, flow-through sulfate-reducing bioreactors // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 327. № 116862. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116862

2. *Consani S., Carbone C., Dinelli E. et al.* Metal transport and remobilisation in a basin affected by acid mine drainage: the role of ochreous amorphous precipitates // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24. Iss. 18. P. 15735-15747. DOI: 10.1007/s11356-017-9209-9

3. *Pérez-López R., Millán-Becerro R., Basallote M.D. et al.* Effects of estuarine water mixing on the mobility of trace elements in acid mine drainage leachates // Marine Pollution Bulletin. 2023. Vol. 187. № 114491. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114491

4. *Fonseka C., Ryu S., Naidu G. et al.* Recovery of water and valuable metals using low pressure nanofiltration and sequential adsorption from acid mine drainage // Environmental Technology and Innovation. 2022. Vol. 28. № 102753. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102753

5. *León-Venegas E., Vilches-Arenas L.F., Fernández-Baco C. et al.* Potential for water and metal recovery from acid mine drainage by combining hybrid membrane processes with selective metal precipitation // Resources, Conservation and Recycling. 2023. Vol. 188. № 106629. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106629

6. *Etale A., Nhlane D., Richards H.* Graphene oxide nanosheets for treatment of mine-drainage contaminated water: The effect of phosphate functionalisation on U(VI) removal // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 38. Part 2. P. 647-651. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.549

7. *Mzinyane N.N.* Adsorption of heavy metals from acid mine drainage using poly (hydroxamic acid) ligand // South African Journal of Chemical Engineering. 2022. Vol. 42. P. 318-336. DOI: 10.1016/j.sajce.2022.09.007

8. *Yanan Jiao, Chunhui Zhang, Peidong Su et al.* A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 170. P. 1240-1260. DOI: 10.1016/j.psep.2022.12.083

9. *Levett A., Gagen E.J., Levett I., Erskine P.D.* Integrating microalgae production into mine closure plans // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 337. № 117736. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117736

10. *Guan Chen, Yicheng Ye, Nan Yao et al.* A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 329. № 129666. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129666

11. *Ji M., Li B., Majdi A. et al.* Application of nano remediation of mine polluted in acid mine drainage water using machine learning model // Chemosphere. 2023. Vol. 311. Part 2. № 136926. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136926

12. *Pereira T.C.B., dos Santos K.B., Lautert-Dutra W. et al.* Acid mine drainage (AMD) treatment by neutralization: Evaluation of physical-chemical performance and ecotoxicological effects on zebrafish (*Danio rerio*) development // Chemosphere. 2020. Vol. 253. № 126665. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126665

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. *Ighalo J.O., Kurniawan S.B., Iwuozor K.O. et al.* A review of treatment technologies for the mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD) // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 157. P. 37-58. DOI: 10.1016/J.PSEP.2021.11.008

14. *Roulia M., Alexopoulos D., Itskos G. et al.* Lignite fly ash utilization for acid mine drainage neutralization and clean-up // Cleaner Materials. 2022. Vol. 6. № 100142. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100142

15. *Junhao Qin, Xiaoying Cui, Hua Yan et al.* Active treatment of acidic mine water to minimize environmental impacts in a densely populated downstream area // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 210. P. 309-316. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.029

16. *Masindi V., Foteinis S., Renforth P. et al.* Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review // Ecological Engineering. 2022. Vol. 183. № 106740. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106740

17. *Qingsheng Xu, Cheng Yang, Jin Wang et al.* Evolution of mineral phase in the chemical neutralization process of Mn dominated acid mine drainage under different aeration conditions // Journal of Hazardous Materials Advances. 2022. Vol. 7. № 100090. DOI: 10.1016/j.hazadv.2022.100090

18. *Moreno-González R., Macías F., Meyer A. et al.* Life cycle assessment of management/valorisation practices for metal-sludge from treatment of acid mine drainage // Environmental Impact Assessment Review. 2023. Vol. 99. № 107038. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107038

19. *Cravotta III C.A.* Interactive PHREEQ-N-AMDTreat water-quality modeling tools to evaluate performance and design of treatment systems for acid mine drainage // Applied Geochemistry. 2021. Vol. 126. № 104845. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104845

20. *Masindi V., Madzivire G., Tekere M.* Reclamation of water and the synthesis of gypsum and limestone from acid mine drainage treatment process using a combination of pre-treated magnesite nanosheets, lime, and CO_2 bubbling // Water Resources and Industry. 2018. Vol. 20. P. 1-14. DOI: 10.1016/j.wri.2018.07.001

21. *Ho H.-J., Iizuka A., Vadapalli V.R.K. et al.* Potential investigation of concrete fines as an alternative material: A novel neutralizer for acid mine drainage treatment // Environmental Technology and Innovation. 2023. Vol. 29. № 102985. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102985

22. *Falayi T., Ntuli F.* Removal of heavy metals and neutralisation of acid mine drainage with un-activated attapulgite // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. Vol. 20. Iss. 4. P. 1285-1292. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.07.007

23. *Igarashi T., Herrera P.S., Uchiyama H. et al.* The two-step neutralization ferrite-formation process for sustainable acid mine drainage treatment: Removal of copper, zinc and arsenic, and the influence of coexisting ions on ferritization // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 715. № 136877. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136877

24. *Zhihang Ye, Jianwei Zhou, Peng Liao et al.* Metal (Fe, Cu, and As) transformation and association within secondary minerals in neutralized acid mine drainage characterized using X-ray absorption spectroscopy // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 139. № 105242. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105242

25. *Moodley I., Sheridan C.M., Kappelmeyer U., Akcil A.* Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Research developments with a focus on waste/by-products // Minerals Engineering. 2018. Vol. 126. P. 207-220. DOI: 10.1016/J.MINENG.2017.08.008

26. *Naidu G., Ryu S., Thiruvenkatachari R. et al.* A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage // Environmental Pollution. 2019. Vol. 247. P. 1110-1124. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.01.085

27. *Iizuka A., Ho H.-J., Sasaki T. et al.* Comparative study of acid mine drainage neutralization by calcium hydroxide and concrete sludge–derived material // Minerals Engineering. 2022. Vol. 188. № 107819. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107819

28. *Moo Joon Shim, Byoung Young Choi, Giehyeon Lee et al.* Water quality changes in acid mine drainage streams in Gangneung, Korea, 10 years after treatment with limestone // Journal of Geochemical Exploration. 2015. Vol. 159. P. 234-242. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.09.015

29. *Shiyang Xia, Ziling Song, Xiaoliang Zhao, Jiyang Li.* Review of the recent advances in the prevention, treatment, and resource recovery of acid mine wastewater discharged in coal mines // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 52. № 103555. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103555

30. *Maataoui El Y., M'rabet El M., Maaroufi A., Dahchour A.* Spiramycin adsorption behavior on activated bentonite, activated carbon and natural phosphate in aqueous solution // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. Iss. 16. P. 15953-15972. DOI: 10.1007/s11356-019-05021-4

31. *Xuewen Cao, Zhaofu Meng, En Song et al.* Co-adsorption capabilities and mechanisms of bentonite enhanced sludge biochar for de-risking norfloxacin and Cu^{2+} contaminated water // Chemosphere. 2022. Vol. 299. № 134414. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134414

32. *Padilla-Ortega E., Leyva-Ramos R., Flores-Cano J.V.* Binary adsorption of heavy metals from aqueous solution onto natural clays // Chemical Engineering Journal. 2013. Vol. 225. P. 535-546. DOI: 10.1016/j.cej.2013.04.011

33. *Bourliva A., Michailidis K., Sikalidis C. et al.* Adsorption of Cd(II), Cu(II), Ni(II) and Pb(II) onto natural bentonite: study in mono- and multi-metal systems // Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 73. Iss. 9. P. 5435-5444. DOI: 10.1007/S12665-014-3798-0

34. *Orakwue E.O., Asokbunyarat V., Rene E.R. et al.* Adsorption of Iron(II) from Acid Mine Drainage Contaminated Groundwater Using Coal Fly Ash, Coal Bottom Ash, and Bentonite Clay // Water, Air, and Soil Pollution. 2016. Vol. 227. Iss. 3. № 74. DOI: 10.1007/s11270-016-2772-8

35. *Manjot Toor, Bo Jin, Sheng Dai, Vimonses V.* Activating natural bentonite as a cost-effective adsorbent for removal of Congo-red in wastewater // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015. Vol. 21. P. 653-661. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.03.033

***Авторы*: П.Эспиноза Тумиалан,** *д-р наук, https://orcid.org/0000-0002-5031-0993* (*Административный центр Серро – С.А.К – Волкан, Лима, Перу*), **Н.Тантавилка Мартинес,** *магистр, профессор, https://orcid.org/0000-0002-9988-2941* (*Университет Континенталь, Уанкайо, Перу*), **К.Баррето Хиностроза,** *магистр, профессор, https://orcid.org/0009-0006-9987-7823* (*Университет Континенталь, Уанкайо, Перу*), **Д.П.Р.Арана Руэдас,** *магистр, научный сотрудник, darana@continental.edu.pe, https://orcid.org/0000-0002-3682-5405* (*Университет Континенталь, Уанкайо, Перу*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0