

ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНОЙ

Ковров А.С., Куликова Д.В., Кравченко Н.Д.

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

пр. Д. Яворницкого, 19, 49005, г. Днепр

kovralex1@gmail.com, kulikova.d.v@nmu.one, kiit15.kravchenko@gmail.com

В основу статьи положены материалы экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных условиях в ГП «УкрНИПИИ протехнологии», и результаты промышленных испытаний установки кондиционирования шахтных вод. В результате выполненных расчетов рекомендована технологическая схема очистки шахтных вод ОП «Шахта «Украина» ГП «Селидовуголь», заключающаяся в фильтрации исходной воды, содержащей хлорид- и сульфат-ионы через слой высокоосновного анионита марки АМ в HCO_3^- -форме, обработке фильтрата раствором NaOH, фильтрации полученной суспензии и подкисления фильтрата газовой смесью от котельной, содержащей 3–8% CO_2 . Регенерация насыщенного анионита осуществляется раствором Na_2CO_3 , полученным при поглощении CO_2 раствором NaOH. Согласно выполненным расчетам в результате последовательных операций очистки вода содержит не более 2–5 мг/л ионов кальция и магния и не более 50 мг/л хлорид- и сульфат-ионов, что позволяет использовать очищенную воду для хозяйственных и технологических нужд предприятия. При проектировании промышленной очистки шахтных вод производительностью 350 м³/час рекомендуется установка трех блоков водоочистки с производительностью каждого блока 120 м³/час. В зависимости от способа утилизации образующихся солевых отходов предлагаются два варианта утилизации регенерата сточных вод: выпаривание солей с захоронением сухих солей или альтернативное хранение жидкого регенерата в пруду-испарителе. Внедрение технологической схемы очистки на шахте позволит: значительно снизить сброс недостаточно очищенных шахтных вод в гидрографическую сеть с максимальным извлечением солевых компонентов; осуществлять попутную очистку дымовых газов шахтной котельной от твердых и газообразных компонентов; использовать очищенную воду на технологические нужды предприятия. *Ключевые слова:* очистка шахтных вод, ионный обмен, седиментация, фильтрование, отстойники, дымовые газы котельной.

Обґрунтування комплексної технології очистки шахтних вод і димових газів котельні. Ковров О.С., Кулікова Д.В., Кравченко М.Д.

В основу статті покладено матеріали експериментальних досліджень, проведених у лабораторних умовах в ДП «УкрНДПІ протехнології», і результати промислових випробувань установки кондиціонування шахтних вод. В результаті виконаних розрахунків рекомендовано технологічну схему очищення шахтних вод ВП «Шахта «Україна» ДП «Селідіввугілля», яка полягає у фільтрації вихідної води, що містить хлорид- і сульфат-іони через шар високолузжого аніоніту марки АМ в HCO_3^- формі, обробці фільтрату розчином їдкого натру NaOH, фільтрації отриманої суспензії і підкисленні фільтрату газовою сумішшю від котельні, що містить 3–8% CO_2 . Регенерація насиченого аніоніту здійснюється розчином Na_2CO_3 , утвореним під час поглинання CO_2 розчином NaOH. Згідно з виконаними розрахунками в результаті послідовних операцій очищення вода містить не більше 2–5 мг/л іонів кальцію і магнію та не більше 50 мг/л хлорид- і сульфат-іонів, що дає змогу використовувати очищену воду для господарських і технологічних потреб шахти. Під час проектування схеми промислового очищення шахтних вод потужністю 350 м³/год рекомендовано установку з трьох блоків водоочистки, кожний із середньою продуктивністю 120 м³/год. Залежно від способу утилізації солевих відходів, що утворюються внаслідок очистки, пропонуються два варіанти утилізації регенерату стічних вод: випарювання солевідходів із похованням сухого залишку солей або зберігання рідкого регенерату в ставку-випарнику. Впровадження технологічної схеми очищення на шахті дасть змогу: значно знизити скидання не досить очищених шахтних вод у гідрографічну мережу з максимальним вилученням солевих компонентів; здійснювати попутне очищення димових газів шахтної котельні від твердих і газоподібних речовин; використовувати очищену воду на технологічні потреби підприємства. *Ключові слова:* очистка шахтних вод, іонний обмін, седиментація, фільтрування, відстійники, димові газы котельні.

Justification of the integrated technology for treatment of mining waters and boiler-room emissions. Kovrov O., Kulikova D., Kravchenko M.

The paper is based on the materials of experimental studies conducted in laboratory conditions at the State Enterprise “Ukr R&D Institute for industrial technologies” and the results of industrial installation tests for mine water conditioning. As a result of the calculations, the technological scheme for the treatment of mine water at the coal mine “Ukraine” of the State Enterprise “Selidovugol” is recommended, which consists in filtering the discharged water that contains chloride and sulfate ions through a layer of highly alkaline HCO_3^- -anionite, treating the filtrate with sodium hydroxide solution (NaOH), filtering of obtained suspension and acidifying the filtrate with gas mixture from the boiler-room that contains 3–8% CO_2 . The regeneration of saturated anionite is carried out with a solution of sodium bicarbonate Na_2CO_3 obtained through absorption of CO_2 by solution of NaOH. According to the calculations, as a result of successive cleaning operations, the calcium and magnesium ions in the water do not exceed 2–5 mg/l, chloride and sulfate ions – 50 mg/l respectively, which allows use of purified water for household and technological needs of the enterprise. When designing industrial treatment of mine water with a capacity of 350 m³/h, it is recommended to install three water purification units with a capacity of 120 m³/h for each block. Depending on the method of disposal of the generated salt wastes, two options are proposed for the disposal of wastewater regenerate: evaporation of salt wastes with further disposal of dry salts or

alternative storage of liquid regenerate in an evaporation pond. Implementation of the proposed mine treatment flow chart will allow: significantly reduce the discharge of insufficiently treated mine water into a hydrographic network with maximum extraction of salt components; carry out associated purification of gas and dust emissions from the mine boiler-room from solid and gaseous components; use purified water for technological needs of the enterprise. *Key words:* mine water treatment, ion exchange, sedimentation, filtration, settling tank, boiler-room emissions.

Постановка проблемы. Одной из серьезных проблем горнопромышленного комплекса являются образование и сброс шахтных вод, загрязненных различными веществами минерального и органического происхождения. Шахтные воды Донецкого бассейна характеризуются высокими уровнями минерализации и жесткости, что не зависит от технологии извлечения и переработки горной массы. Сброс таких производственных сточных вод оказывает негативное влияние на поверхностные водные объекты, в результате чего повышается их общая минерализация и изменяется физико-химический состав. Таким образом, возникает необходимость в корректировке минерального состава сбрасываемых шахтных вод для соблюдения требований предельно-допустимого сброса и с целью их вторичного использования.

Актуальность исследования. Учитывая, что высокая минерализация шахтных вод является одной из самых острых экологических проблем горнодобывающей отрасли, ведется научно-экспериментальный поиск эффективных систем очистки шахтных вод. Одними из перспективных способов очистки сточных вод предприятий угольной промышленности являются деминерализация, обессоливание, ультрафильтрация, обратный осмос и другие. Комплексное применение перечисленных технологий позволяет снизить содержание минеральных и солевых компонентов не только до требований сброса в поверхностные водные объекты, но также использовать на технические и хозяйственно-бытовые нужды.

Связь авторских предложений с важными научными и практическими задачами. Проблема снижения техногенного прессинга на гидросферу имеет особую важность в горной промышленности, так как высокоминерализованные воды горных предприятий существенно нарушают устойчивость водных экосистем. Предлагаемая схема очистки шахтных высокоминерализованных вод методами ионного обмена и седиментации позволит максимально извлекать солевые компоненты из шахтных вод, а также очищать дымовые газы промышленной котельной. Внедрение схемы очистки шахтных вод на горном предприятии позволит максимально устранить сверхнормативные сбросы сульфатов, хлоридов и других загрязняющих веществ, а очищенную воду использовать в технологических процессах или передавать вторичным водопользователям на технические нужды.

Анализ последних исследований и публикаций. Влиянию высокоминерализованных шахтных вод на поверхностные водоемы посвящено множество работ. Шахтные воды оказывают существен-

ное влияние на состояние поверхностных водоемов и подземных вод как локально, так и в масштабах регионов, что отражается в разнообразных оценках экологических рисков [1], хотя методология таких подходов не всегда понятна.

В работе [2] проанализированы удельные показатели, характеризующие ассимиляционную емкость водных ресурсов Днепропетровской области. Установлено, что в бассейнах р. Самары и р. Волчьей этот показатель характеризуется как «высокий», что свидетельствует о существенном загрязнении поверхностных водоемов шахтными водами. Из статьи непонятно, как влияет на рассчитанные показатели минеральное или органическое загрязнение рек.

Шахтные воды могут оказывать негативное влияние даже после прекращения горных работ. Так, после закрытия шахты, уровень грунтовых вод поднимается, вызывая загрязнение почвы тяжелыми металлами и минеральными веществами [3].

Особое внимание заслуживает известное явление шахтного кислотного дренажа, связанного с окислением FeS_2 в шахтных водах и отходах, высвобождению Fe^{2+} и H^+ . Химические реакции способствуют снижению pH и выщелачиванию тяжелых металлов с последующим загрязнением поверхностных водоемов [4].

Аналогичные изменения экологического состояния окружающей среды наблюдаются в районах расположения прудов-накопителей шахтных вод, минерализация в которых достигает 15,3 г/л [5].

В связи с актуальностью проблемы шахтных вод предлагаются различные усовершенствованные сооружения очистки, прежде всего механической [6], эффективность которой достигает 96–98%.

Широко применяются вакуумные мембранные технологии с дистилляцией, направленные на удаление частиц и растворенных примесей методом испарения и конденсации, что имитирует природные процессы [7].

Классическими методами обработки высокоминерализованных шахтных вод стали комбинированные процессы прямого и обратного осмоса, эффективность которых зависит от эффективной конфигурации оборудования, химического состава и структуры мембран [8].

В исследовании [9] изучалось отделение урана от других анионов, присутствующих в кислотной шахтной воде, с использованием метода ионного обмена в периодическом и колонном режиме.

Выполненный анализ последних исследований и публикаций свидетельствует о том, что проблема высокоминерализованных шахтных вод является одной из ключевых в спектре природоохранной деятельности горных предприятий.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья. На практике применение вышеупомянутых методов по снижению минерализации шахтных вод является весьма проблематичным по двум причинам. Во-первых, значительные капитальные и эксплуатационные затраты на основные технологические процессы водоочистки и высокая стоимость реагентов. Во-вторых, утилизация солевых продуктов водоочистки является практически неразрешимой проблемой по причине отсутствия специализированных полигонов захоронения минеральных компонентов шахтных вод.

Цель исследования. Учитывая приведенный анализ современных исследований возникает необходимость поиска альтернативных, уникальных и экономически целесообразных инженерных решений в области очистки высокоминерализованных шахтных вод и утилизации солевых осадков.

Цель исследования заключается в обосновании комплексной технологии очистки шахтных вод и дымовых газов котельной методом с использованием метода ионнообменной сорбции.

Новизна исследования заключается в том, что применение технологии комплексной химводоочистки позволит одновременно снизить выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от промышленной котельной, а также содержание сульфатов и хлоридов в очищаемой шахтной воде на 98–99%.

Методологическое значение. Предложенный вариант очистки шахтных вод значительно расширяет границы традиционного использования метода ионного обмена. В ближайшей перспективе применение ионоселективных сорбентов позволит не только очищать сточные воды, но и избирательно извлекать из них ценные компоненты, что даст развитие новым экономически целесообразным технологиям водоочистки.

Изложение основного материала. *Общие сведения о предприятии и объектах планирования.* Отдельное подразделение «Шахта «Украина» ГП «Селидовуголь» (г. Украинск Донецкой области) введено в эксплуатацию в 1963 году с мощностью 1200 тыс. тонн угля в год. Наиболее существенным источником загрязнения атмосферы на шахте является промышленная котельная производительностью 16 Гкал/ч тепла в виде пара с давлением 0,3–0,5 МПа. В котельной установлено 4 котла типа ДКВР-6,5/13. Максимальные расходы угля составляют 8674 кг/ч, 15,6 тыс. т/год. Для очистки отработанных дымовых газов используются батарейные циклоны типа БЦ с эффективностью 80–86% для снижения выбросов твердых частиц пыли. После частичной очистки дымовых газов выбрасываются в атмосферу через кирпичную дымовую трубу высотой 45 м и диаметром устья 1500 мм. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от промышленной котельной шахты «Украина» приведены в табл. 1.

Таблица 1

Валовые выбросы от шахтной котельной

Наименование загрязняющих веществ	Предельно допустимый выброс		Фактические выбросы загрязняющих веществ	
	г/с	т/год	г/с	т/год
Пыль с SiO ₂ (20-70%)	19,6	56,89	9,4	31,878
Сернистый ангидрид	11,9	356,1	9,7	243
Оксид углерода	11,54	34,25	41,4	49,66
Оксиды азота	5,43	18,11	8,5	23,355

Таблица 2

Качественный состав шахтных вод

Наименование загрязняющих веществ	Концентрация, мг/л			Сброс загрязняющих веществ, т/год	
	ПДК	Фактическая	Проект. показат.	Существ. положение	Проект. показат.
Азот аммонийный	0,5	1,1	0,5	2,560	1,164
БПК _{полн.}	3,0	3,6	3,0	8,377	6,981
Взвешенные вещества	20,0	20,0	10	46,540	23,27
Железо	0,005	0,23	0,005	0,535	0,012
Нефтепродукты	0,05	0,64	0,05	1,489	0,116
Нитраты	40,0	5,6	5,0	13,031	11,635
Нитриты	0,08	0,1	0,01	0,233	0,023
Сульфаты	100	1560	25	1490,0	58,175
Фенолы	0,001	0,001	0,0001	0,002	0,000233
Хлориды	300	465	25	465,0	58,175
ИТОГО:				2027,767	159,551

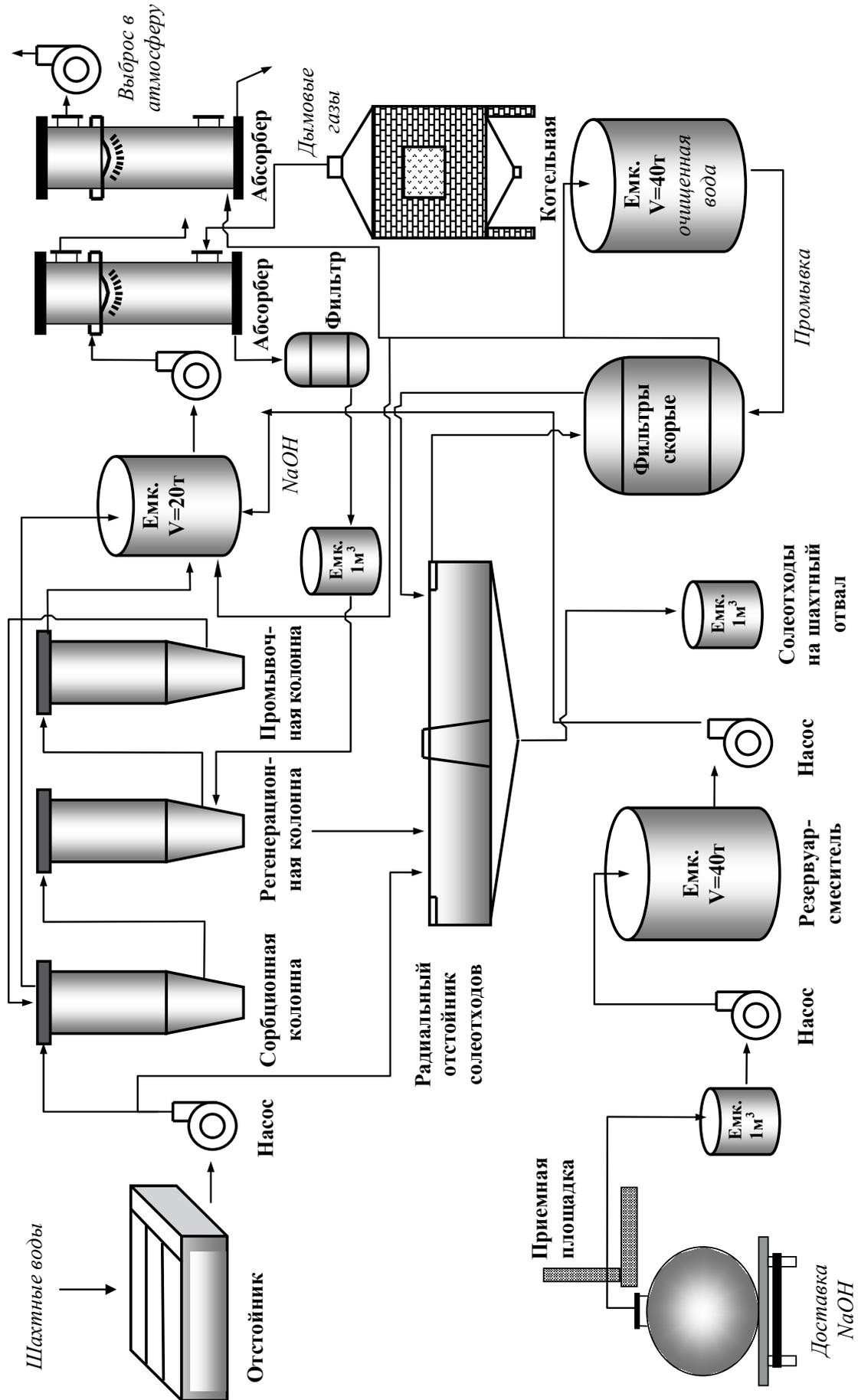


Рис. 1. Технологическая схема очистки шахтных вод и дымовых газов котельной

Анализируя табл. 1, можно отметить, что наиболее существенными факторами негативного влияния на состояние атмосферы являются выбросы твердых веществ пыли и сернистого ангидрида, что обусловлено высокой сернистостью угля. При этом газообразные вещества не улавливаются.

Усредненный объем шахтных вод составляет 3066 тыс. м³/год. С учетом использования шахтной воды на производственные нужды шахты сброс в р. Волчья (бассейн р. Днепр) составляет 2327 тыс. м³/год. В табл. 2 приводится качественный состав шахтных вод ОП «Шахта «Украина» ГП «Селидовуголь».

Качественный состав шахтных вод свидетельствует о сверхнормативных содержаниях хлоридов и сульфатов, высокие концентрации которых обусловлены природным составом подземных вод.

В рамках статьи предлагается комплексное решение экологических проблем шахты посредством внедрения технологии химводоочистки (далее – ХВО) котельной шахты.

Технические решения по очистке газов и шахтных вод. Технологические сооружения ХВО предназначены для очистки шахтных вод до качества, позволяющего использовать очищенную воду для подпитки паровых котлов и бытовых нужд шахты и г. Украинска, полива сельхозугодий и сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения с попутной очисткой дымовых газов от пыли, сернистого ангидрида SO_2 , окислов азота NO_x и диоксида углерода CO_2 .

Технология ХВО шахтной котельной включает следующие здания и сооружения (рис. 1): одноэтажное здание очистки габаритными размерами 42x18 м² с выпарной установкой, лабораторией и вспомогательными помещениями; радиальный отстойник-сгуститель диаметром 25 м; две емкости объемом 40 м³ каждая для приема и хранения 42%-ного раствора едкого натрия; емкость для промывной воды объемом 200 м³; ионообменные и промывные колонны; тарельчатые абсорберы для корректировки *pH* очищаемой воды, а также для приготовления регенерирующего раствора (8%-ного бикарбоната натрия NaH_2CO_3) посредством поглощения углекислого газа CO_2 раствором $NaOH$; насосное оборудование; эстакада трубопроводов от здания очистки к котельной и радиальному сгустителю.

Рассмотрено два варианта утилизации жидких отходов, образующихся в результате очистки методом ионного обмена. Для переработки жидких солевых отходов по первому варианту предусматривается выпарная установка и полигон для захоронения сухих солей. По второму варианту для хранения жидких отходов предусматривается пруд-испаритель емкостью 2500 м³ с периодом эксплуатации 10 лет [10].

Технологическая схема очистки шахтной воды методом ионного обмена.

Шахтная вода из существующего горизонтального трехсекционного отстойника ($V = 700 \text{ м}^3$)

в количестве 120 м³/ч подается насосами на установку ХВО котельной. Технология очистки шахтных вод включает следующие технологические операции.

1. *Сорбция анионов (Cl^- и SO_4^{2-}) в сорбционной напорной колонне (СНК) на анионите марки АМ.* Операция анионообменного извлечения хлорид- и сульфат-ионов осуществляется в квази-непрерывном цикле (с движением порций анионита через зоны регенерации и отмывки в рабочую зону) в аппаратах с восходящим потоком вод и растворов. Основные характеристики ионообменного процесса: емкость анионита – 700 мг-экв/л; скорость фильтрации – 20 м/час; высота слоя – 6 м. Вода из колонны поступает на осаждение катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , а насыщенный анионит – на регенерацию.

2. *Регенерация анионита 8%-ным раствором бикарбоната натрия Na_2CO_3 в противоточной ионообменной колонне (ПИК).* Основные характеристики ионообменного процесса: отношение анионит/раствор = 1:1,5; скорость фильтрации – 2 м/час; высота слоя – 6 м. Регенерат из колонны поступает на выпарную установку (1 вариант) или в пруд-испаритель (2 вариант), а анионит – на отмывку.

3. *Отмывка анионита очищенной водой в колонне ПИК.* Основные характеристики процесса: скорость фильтрации – 10–15 м/час; время отмывки – 20–30 мин. Отмытый анионит возвращается на сорбцию в ионообменную колонну, а промывная вода используется для приготовления регенерирующего раствора бикарбоната натрия NaH_2CO_3 .

4. *Осаждение из воды катионов жесткости Ca^{2+} и Mg^{2+} 42%-ным раствором $NaOH$ в сгустителе с периферическим приводом П-25 с последующим отстаиванием воды.* Прошедшая рабочую зону ионообменной установки вода поступает на операцию подщелачивания до значений *pH* 11,5–11,7, обеспечивающую эффективное образование осадков гидроокиси магния $Mg(OH)_2$ и карбоната кальция $CaCO_3$. Основные характеристики процесса: *pH* процесса – 11,5–11,7; скорость выпадения взвесей – 0,5 мм/с. Твердая фаза после отстаивания суспензии может сбрасываться (7,5 м³/час) либо подвергаться смешению с отработанным регенератом узла сорбции (для повышения значения *pH* образующейся суспензии и, соответственно, фильтрации, подвергающегося операции упаривания). Подщелачивание осуществляется в баке-смесителе, из которого суспензия направляется на операцию отстаивания, а затем и фильтрации. Последние две операции осуществляются, соответственно, в радиальном отстойнике и осветлительном фильтре с кварцевым песком или керамзитом.

5. *Контрольная фильтрация взвесей в скорых фильтрах загруженных керамзитом или антрацитом.* Скорость фильтрации – 10 м/ч. Шлам из сгустителя периодически насосом откачивается на шахтный отвал.

Результаты расчета аппаратов ионного обмена для ХВО котельной

№ п/п	Наименование показателей	Единица измерения	Значения показателей
1.	<i>Для сорбции анионов:</i>		
	– производительность по очищаемой воде, Q	м ³ /ч	120
	– суммарное содержание ионов Cl^- , SO_4^{2-} , $\sum C_{ан}$	г/м ³	2060
	– рабочая обменная емкость анионита, $a_{раб}$	г-экв/м ³	700
	– скорость фильтрации исходной воды, $W_{ф}$	м/ч	25
2.	<i>Для десорбции анионов:</i>		
	– производительность по регенерирующему раствору, $Q_{рег}$	м ³ /ч	10
	– концентрация регенерирующего р-ра NaH_2CO_3 , C	%	8
	– скорость фильтрации раствора NaH_2CO_3 , W_p	м/ч	3
	– время пребывания анионита в регенерационной колонне, t_p	ч	4
3.	<i>Для отмывки анионита:</i>		
	– производительность по отмывочной воде, $Q_{от}$	м ³ /ч	15-20
	– скорость фильтрации отмывочной воды (при времени подачи в колонну, обеспечивающем объемный расход отмывочной воды), $W_{от}$	м/ч	10-15
	– отношение высоты слоя анионита к диаметру колонны, B	б/р	3,75
	– время пребывания анионита в колонне, $t_{от}$	ч	4

6. *Корректировка pH очищенной воды дымовыми газами котельной в тарельчатом абсорбере.* Отфильтрованная от взвешенных частиц (не более 1–5 мг/л) вода с pH 11,5–11,7 поступает на стадию нейтрализации ее углекислым газом, содержащимся в дымовых газах котельной. Операция осуществляется в распыливающем абсорбере, оборудованном провальными тарелками дырчатого или трубчатого типа. Для предварительной очистки дымовых газов котельной от окислов серы и азота предусматривается размещение абсорбера аналогичного типа и конструкции, где в качестве поглотительной жидкости используется 5–10%-ный раствор $NaOH$. Газовая смесь, выходящая из данного абсорбера, поступает на вход второго абсорбера. В результате реакции CO_2 и $NaOH$ образуется 5–10%-ный раствор NaH_2CO_3 , который поступает в бак для хранения регенерирующего раствора

и применяется для десорбции хлорид- и сульфат-ионов в операции ионообменного извлечения анионов шахтной воды.

Регенерат каждого блока очистной установки в количестве 10 м³/ч подвергается концентрированию на выпарной трехкорпусной установке.

Вода, имеющая pH 7,5–8,0 на выходе из абсорбера, направляется потребителю для подпитки паровых котлов ДКВР 6,5/13 или после смешения с исходной шахтной водой поступает на орошение сельхозугодий.

7. *Обеззараживание воды осуществляется активным хлором.*

Результаты расчета технологии ХВО методом ионного обмена, выполненные согласно действующим нормативам проектирования сооружений очистки производственных сточных вод [11; 12], представлены в табл. 3.

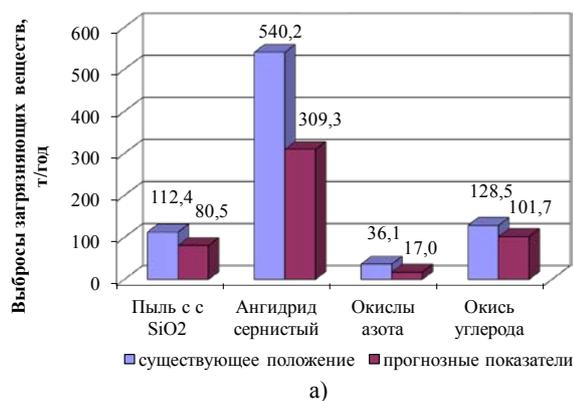


Рис. 2. Прогнозные показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (а) и сбросов шахтных вод (б) в гидрографическую сеть

Учитывая, что на котельной предусматривается мокрая очистка двумя абсорберами с эффективностью очистки 99%, твердая пыль в количестве 56,89 т/год будет улавливаться и вывозиться на породный отвал в виде шлама.

Применение анионообменной установки позволит снизить содержание сульфатов и хлоридов в очищаемой шахтной воде на 98–99% (по проектным показателям суммарное содержание этих ионов не превысит 50 мг/л). Учитывая эффективность ионообменной установки с высокоосновным анионитом марки АМ, сброс сульфатов уменьшится на 1460,2 т/год, хлоридов – на 455,7 т/год.

Прогнозные результаты эффективности применения технологии ХВО для котельной шахты и очистки шахтных вод представлены на рис. 2.

Главные выводы. Осуществление проекта химводоочистки котельной шахты на практике может иметь следующие преимущества:

существенное снижение сброса недостаточно очищенных сточных вод в гидрографическую сеть

с максимально возможным извлечением минеральных компонентов;

возможность использования очищенной воды на технологические нужды предприятия и подпитки паровых котлов городских котельных;

уменьшение использования воды питьевого качества в технологических процессах;

попутная очистка дымовых газов шахтной котельной от газообразных компонентов;

существенное снижение платы за загрязнение окружающей среды.

Перспективы использования результатов исследования. Представленные результаты исследования являются базисом для принятия инженерных решений в области снижения сброса и очистки высокоминерализованных шахтных вод. Внедрение подобных технологий с эффективной утилизацией солевых осадков позволит сократить уровень загрязнения поверхностных водоемов минеральными веществами и повысить экологическую эффективность технологий горного производства.

Литература

1. Gorova A., Pavlychenko A., Borysovs'ka O., Krups'ka L. (2013). The development of methodology for assessment of environmental risk degree in mining regions. *Mining of Mineral Deposits*, CRC Press Taylor & Francis Group. P. 207–209.
2. Kulikova, D., Kovrov, O., Buchavy, Y., Fedotov, V. (2018). GIS-based Assessment of the Assimilative Capacity of Rivers in Dnipropetrovsk Region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. No. 27 (2). P. 274–285. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/111851>.
3. Arefieva O., Nazarkina A., Gruschakova N., Skurikhina J., Kolycheva V. (2019). Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia. *International Soil and Water Conservation Research*. Vol. 7. Issue 1. P. 57–63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.001>.
4. Jönsson J., Jönsson J., Lövgren L. (2006) Precipitation of secondary Fe(III) minerals from acid mine drainage. *Applied Geochemistry*. Vol. 21. Issue 3. P. 437–445. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.12.008>.
5. Lavryk M.O., Pavlychenko A.V., Tripachova K.V. (2015). Study of character and degree of impact of mine drainage ponds on the environment. *Mining of mineral deposits*. No. 9(4). P. 477–483. URL: <https://doi.org/10.15407/mining09.04.477>.
6. Kolesnyk V., Kulikova D., Kovrov S. (2013). In-stream settling tank for effective mine water clarification, In: *Annual Scientific-Technical Collection "Mining of Mineral Deposits"*. CRC Press / Balkema, Netherlands; Taylor & Francis Group, London, UK. P. 285–289.
7. Sivakumar M., Ramezani-pour M., O'Halloran G. (2013). Mine Water Treatment Using a Vacuum Membrane Distillation System. *APCBEE Procedia*. Vol. 5. P. 157–162. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.028>.
8. Thiruvengkatachari R., Su S., Cunnington M. (2020). 14-FO-RO for mining wastewater treatment. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes Reverse and Forward Osmosis: Principles, Applications, Advances*. P. 325–336. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816777-9.00014-9>.
9. Queiroz Ladeira, A.C., Gonçalves, C.R. (2007). Influence of anionic species on uranium separation from acid mine water using strong base resins. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 148. Issue 3. P. 499–504. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.003>.
10. Основные технические решения по строительству опытно-промышленной установки химводоочистки дамбовых вод Восточного ГОКа: Проект. Арх. № 14183. Желтые Воды: Украинский научно-исследовательский проектный институт протехнологии, 2002.
11. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування: Видання офіційне. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 96 с.
12. Яковлев С.В. Очистка производственных сточных вод. Москва : Стройиздат, 1985, 335 с.