

Министерство образования и науки

Донецкой Народной Республики

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи

Сергей Гулько
20.03.2020г.

Гулько Сергей Евгеньевич

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ШАХТНЫХ ВОД**

05.23.19 - Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Работа выполнена в Государственном учреждении «Донгипрошахт» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики г. Донецк.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Высоцкий Сергей Павлович
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»
заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»

Официальные оппоненты: **Дрибан Виктор Александрович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель директора по научной работе
Республиканского академического
научно-исследовательского и
проектно-конструкторского института горной геологии,
геомеханики, и маркшейдерского дела

Дрозд Геннадий Яковлевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Промышленное, гражданское
строительство и архитектура» Института строительства,
архитектуры и ЖКХ ГОУ ВПО «Луганский
национальный университет имени Владимира Даля»

Копылов Андрей Борисович
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Городского строительства,
архитектуры и дизайна» Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Тульский государственный университет»

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Донецкий национальный университет»

Защита состоится 25 июня 2020 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.023.03 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2. Зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(0623)22-77-19, e-mail: d01.023.03@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://@donnasa.ru>).

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 01.023.03

Башева Татьяна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эксплуатируемые и закрытые шахты создают общегосударственную проблему загрязнения окружающей среды. В Донецкой Народной Республике из 79 шахт только 17 находятся в эксплуатации. Из 62 шахт производится откачка шахтной воды, количество которой составляет до 59,5 млн. м³ в год.

Откачиваемые шахтные воды обладают повышенной минерализацией и многие из них содержат токсичные соединения тяжелых металлов. При поступлении шахтных вод в поверхностные водоемы происходит интенсивное загрязнение последних, что исключает возможность использования поверхностных вод в промышленных и коммунальных целях. В мировой практике качество воды влияет на состояние здоровья населения, водные организмы, функционирование технологических систем и качество выпускаемой продукции. Сложность проблемы состоит в том, что токсическое действие загрязняющих веществ во многих случаях проявляются не сразу, а в отдаленной перспективе. Практически все поверхностные водные источники республики загрязнены сбросами шахтных вод. Вместе с тем промышленная и коммунальная сферы используют значительные объемы пресной воды, поступающей из канала Северский Донец-Донбасс. Существует тенденция постоянного увеличения стоимости этой воды.

При больших объемах поступления шахтных вод в поверхностные водоемы и дефицита пресной воды возникает необходимость решения проблемы ресурсосбережения и замены пресной воды шахтной водой в некоторых производственных процессах, а также для коммунальных потребителей воды.

Сохранение полезных свойств воды – её высокой теплоёмкости и большой растворяющей способности обеспечивается только при очистке, кондиционированием шахтной воды от некоторых примесей. Однако при традиционных технологиях очистки происходит вторичное загрязнение окружающей среды. Поэтому проблема научного обоснования экологической безопасности выбора технологий очистки шахтных вод и основных параметров технического процесса: необходимых объемов и степени очистки, типов используемых реагентов с учетом их экологических свойств, является важной с точки зрения экологической безопасности и обеспечения устойчивости окружающей среды.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Основные исследования теоретического и прикладного характера выполнены в соответствии с:

– НИОКТР № 01170000277. «Снижение рисков возникновения опасных ситуаций на промышленных объектах» п. 3 «Разработать перспективные направления очистки сточных вод с использованием факторов, работа которых приближена к режимам идеального вытеснения и идеального смешения с учетом реализации процессов в промышленных условиях»;

– поручением Департамента анализа и стратегического развития Донецкой Народной Республики «Разработка технического задания на использование шахтных вод промышленными предприятиями как альтернативного источника водоснабжения»;

– заданием Правительства Донецкой Народной Республики «Выполнить технико-экономическое обоснование использования шахтных вод закрытых угледобывающих предприятий для дополнительного водоснабжения г. Снежное».

Степень разработанности экологической безопасности темы. Теоретической основой выполнения исследований в области использования вод повышенной минерализации, в частности шахтных вод, для промышленных и коммунальных

потребителей являются работы Апельцина И.Э., Брика М.Т., Высоцкого С.П., Голубцова В.А., Горновского И.Т., Громогласова А.А., Дрозда Г.Я., Душкина С.С., Запольского А.К., Карелина Ф.Н., Клячко В.А., Когановского А.М., Кострикина Ю.И., Куликова Н.И., Кульского Л.А., Мартыновой О.И., Найманова А.Я., Нечаева А.П., Николадзе Г.И., Нывлта Я., Стермана М.А., Шевченко М.А., Шкроба М.С., Яковлева С.В., Jinshuai Guo, Robert Kleinmann, Langelier W.F., Connor Newman, Kristian Wolkendortger и др.

Несмотря на большой объем исследований в данной области следует отметить, что недостаточно полно сформулированы теоретические положения влияния основных факторов, обеспечивающих экологическую безопасность использования шахтных вод в качестве подпиточной воды и теплоносителя в системах теплоснабжения, в качестве охлаждающей воды в оборотных циклах тепловых электростанций. При очистке шахтных вод от соединений жесткости и тяжелых металлов отсутствуют приоритеты технологических решений в выборе предпочтительных реагентов, обеспечивающих уменьшение загрязнения окружающей среды. При традиционном умягчении воды в натрий-катионитных фильтрах в поверхностные водные источники сбрасывается более 2,5 г·экв солей на каждый г·экв удаленной жесткости, что увеличивает поступление вредных примесей в окружающую среду. Кроме того, при использовании традиционных сильнокислотных катионитов для умягчения вод повышенной минерализации значительно снижается емкость поглощения вследствие притивоионного эффекта, что также приводит к увеличению сброса засоленных стоков. При использовании мембранных технологий для обессоливания шахтных вод нерешенной является проблема сбросов ретентата (концентрата), загрязнения мембраны и переработки ретентата путем его испарением или вымораживанием.

Целью исследования является теоретическое и экспериментальное обоснование способов повышения экологической безопасности технологических процессов использования шахтных вод в системах теплоснабжения и водоснабжения, в промышленности и коммунальной сфере.

Объект исследования – шахтные воды Донбасса и их влияние на экологическую обстановку в Донецкой Народной Республике.

Предмет исследования – процессы и явления, определяющие закономерности экологической безопасности за счет применения в народном хозяйстве шахтных вод после реализации разработанных технологий их обработки.

Задачи исследования:

– обосновать использование шахтных вод как ресурса, позволяющего заменить пресные воды или сократить их использование;

– определить влияние компонентов шахтных вод, ограничивающих возможность их использования в качестве теплоносителя в тепловых сетях и оборотных системах водоснабжения;

– обосновать экологически безопасные способы очистки шахтных вод, позволяющих снизить отрицательное воздействие на окружающую среду, как в процессе очистки, так и при сбросе воды в поверхностные водные источники;

– описать аналитическими зависимостями влияние составляющих компонентов шахтной воды и её температуры, а также показателя *pH* на растворимость карбоната кальция, гипса и соединений тяжелых металлов, позволяющих выбрать экологически безопасный режим обработки, обеспечивающий снижение сбросов загрязнений в поверхностные водные источники;

– обосновать использование мембранных методов поперечной фильтрации для обессоливания шахтных вод, определение методов повышения производительности мембранных установок, увеличения эффективности их эксплуатации и сокращения сбросов засоленных стоков путем использования установок с фазовым переходом;

– обосновать влияние индукционного периода кристаллизации изоморфных соединений карбоната кальция и гипса на процессы использования и очистки шахтной воды.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

– обосновано использование шахтных вод, как недооценённого ресурса, позволяющего решить проблему дефицита пресной воды и обеспечить экологическую безопасность аридных регионов;

– для повышения экологической безопасности систем теплоснабжения разработаны теоретические положения использования шахтных вод для подпитки тепловых сетей с закрытым водоразбором, заключающиеся в определении: величины снижения карбонатного индекса с применением карбоксильных катионитов; растворимости полиморфных соединений карбоната кальция; а также индукционного периода кристаллизации гипса, что обеспечивает безопасные условия регенерации фильтров;

– впервые установлены граничные значения карбонатного индекса и получены аналитические зависимости индукционного периода кристаллизации карбоната кальция, что обеспечивает условие надежной работы оборотных систем водопользования при использовании шахтной воды в качестве теплоносителя;

– обоснованы экологически безопасные инновационные технологии противонакипной отработки воды в оборотных системах через снижение карбонатной жесткости известью, а также определены приоритетные реагенты с учетом оценки эффективности очистки от накипеобразователей;

– впервые установлены условия кристаллизации карбоната кальция на различных материалах, используемых в качестве оросителей градирен, заключающиеся в получении аналитической зависимости интенсивности осаждения от угла смачивания поверхности;

– впервые установлена критериальная зависимость переноса пермиата через обратноосмотическую мембрану в зависимости от скорости потока ретентата, концентрации солей, коэффициентов диффузий соли и вязкости потока, длины хода потока и расстояния между мембранами, что позволяет количественно установить влияние отдельных факторов и выбрать оптимальные условия эксплуатации установок поперечной фильтрации;

– установлено влияние различных рабочих схем подключения обратноосмотических модулей на степень обессоливания исходной воды и производительность обратноосмотической установки по пермиату;

– впервые обосновано использование режима близкого к идеальному вытеснению при термической переработке ретентата за счет использования секционированного потока выпариваемой жидкости;

– впервые разработаны теоретические положения выбора экологически безопасной технологии вымораживания ретентата и обоснованы причины относительно низкой степени обессоливания – перехода солей в лед за счет дискретной молекулярной структуры воды;

– установлены аналитические зависимости остаточного содержания тяжелых металлов в шахтной воде в зависимости от уровня pH и обоснована необходимость

ступенчатого осаждения соединений тяжелых металлов, что обусловлено их амфотерными свойствами.

Практическое значение полученных результатов:

– с целью повышения экологической безопасности разработаны положения по выбору технологических параметров применения шахтных вод в качестве теплоносителя в циркуляционных системах и тепловых сетях, установлены индукционный период кристаллизации, тип фильтров и объем их загрузки для обработки шахтной воды, выбор типа реагентов, определены оптимальные условия обратноосмотического обессоливания;

– разработаны руководящие указания по экологически безопасному использованию шахтных вод в оборотных циклах промышленных предприятий, для подпитки тепловых сетей в коммунальных системах водопользования и при подготовке питьевой воды;

– разработаны новые экологически безопасные технологии очистки шахтных вод, позволяющие получить альтернативный источник водоснабжения, что особенно важно для условий Донбасса;

– результаты исследований внедрены на промышленных предприятиях Донбасса.

Методология и методы исследования. Анализ процессов загрязнения шахтных вод и их влияния на состояние состава шахтных и поверхностных вод Донецкой Народной Республики. Влияние состава шахтных и поверхностных вод на выбор оптимальных технологических схем, а также принципиальных параметров технологического процесса. При выборе технологии очистки шахтных вод исследованы методы осаждения с использованием различных реагентов, ионообменные технологии с использованием различных ионообменных смол, мембранные технологии, в частности, обратный осмос с различными схемами включения обратноосмотических модулей и методы с использованием фазового перехода: испарительные и вымораживанием. Обоснование экологических и экономических характеристик технологий очистки шахтных вод от примесей различной степени дисперсности с использованием аналитических и расчетных методов. Сопоставление данных по составу шахтных вод различных шахт с учетом прогнозируемых показателей их изменения. Выбор приоритетных потребителей очищенной шахтной воды.

При проведении исследований были использованы потенциометрический, гравиметрический и химический методы анализа, обработаны результаты исследований американской компании “Film Tec” – одного из основных производителей мембранных элементов и фирмы NALCO – основного мирового производителя химических реагентов для борьбы с накипеобразованием в оборотных системах. Для оценки экспериментальных результатов были использованы математические методы обработки полученных экспериментальных данных. При выводе критериальных уравнений подбора использованы методы анализа размерностей с учетом дополнения Хантли.

Положения, выносимые на защиту:

– методологические принципы разработки экологически безопасных технологий, теоретически обоснованных технологий очистки шахтных вод от соединений жесткости и тяжелых металлов, позволяющие уменьшить загрязнение поверхностных водных источников;

– ресурсосбережение в регионах с дефицитом пресной воды в результате исключения или вытеснения её использованием шахтной воды для подпитки тепловых сетей с закрытым водоразбором и оборотных систем водоснабжения;

– энерго- и ресурсосберегающие, и экологически безопасные технологии очистки шахтных вод на карбоксильных катионитах с теоретическим обоснованием карбонатного индекса и определением необходимой загрузки фильтров по снижению щелочности и эквивалентной величины жесткости обрабатываемой воды;

– теоретическое и экспериментальное обоснование технологий и реагентов для очистки минерализованных вод в оборотных циклах водоснабжения энергетических, химических и металлургических предприятий с использованием известкования подпиточной воды;

– теоретическое и экспериментальное обоснование использования экологически безопасной технологии обратного осмоса с разработкой критериального уравнения описания процесса с применением принципа Хантли;

– теоретическое и экспериментальное обоснование многоступенчатой технологии и реагентов для очистки шахтных вод от тяжелых металлов, позволяющие снизить загрязнение поверхностных водных источников тяжелыми металлами;

– использование разработанных экологически безопасных технологий концентрирования ретентата обратноосмотических технологий с применением секционированного упаривания и вымораживания. Теоретическое обоснование необходимости секционирования ретентата с учетом структуры потоков при упаривании и дискретных свойств водных растворов;

– республиканский и отраслевой документ: «Руководящие указания по использованию и совершенствованию процессов очистки шахтных вод на предприятиях народного хозяйства».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: сходимостью экспериментальных данных с достоверной вероятностью $\Phi(D) = 0,95$, полученных на современных приборах: электрофотокolorиметре ФЭК-М, фотометре Photolab Spectral, WTW (Германия), анализаторе ионов AI-123 (*pH*), Konduktometer LF-318 с ячейками TetraCon 325, микроскопе МБС-10, вискозиметре ПВР-2, *pH*-метре И-101М; адекватностью статистических математических модулей описания процессов с использованием аналогий и принципа Хантли.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы доложены автором на: I-м международном научно-практическом форуме «Технологии и процессы в горном деле и строительстве» (Донецк, 2013 г.); первом международном форуме «Зеленый город: взгляд в будущее» (Горловка, 2013 г.); II Международной научно-практической конференции «Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территории Донбасса: традиции и инновации» (Луганск, 2017 г.); XII международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 2017 г.); Международном совещании «Развитие строительства и жилищно-коммунального хозяйства в ДНР» (Макеевка, 2018 г.); 14-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (Тула, 2018 г.); международной научно-практической конференции «22 марта – всемирный день водных ресурсов» (Луганск, 2019 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 23 научных изданиях, общим объемом 44,66 п. л., лично автором – 22,74 п. л., в том числе шесть работ в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины, четыре работы в специализированных научных

изданиях, рекомендованных МОН РФ, четыре работы в специализированных научных изданиях, рекомендованных ВАК МОН ДНР, четыре публикации по материалам научных конференций, пять публикаций в других изданиях, в т. ч. в монографии «Очистка, кондиционирование и использование вод повышенной минерализации», а также «Руководящие указания по использованию и совершенствованию процессов очистки шахтных вод на предприятиях народного хозяйства», утвержденные Председателем Государственного комитета по науке и технологиям Донецкой Народной Республики Аноприенко А.Я.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов, списка использованных источников и шести приложений. Материалы диссертации изложены на 328 страницах, в том числе на 219 страницах основного текста, 76 полных страницах с рисунками и таблицами, 21 странице списка источников, 12 страницах приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформированы цель и задачи диссертационного исследования, показана связь работы с научными программами, темами, заданиями руководства Донецкой Народной Республики. Приведены: научная новизна и практическое значение полученных результатов; положения, выносимые на защиту; обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций; апробация результатов диссертации; количество публикаций; структура и объем диссертации.

В первом разделе обосновано негативное влияние шахтных вод на экологические системы. Уничтожение и деградация естественных экосистем на суше и в водной среде привели к быстрому сокращению биоразнообразия и тотальному загрязнению среды обитания, атмосферы и водных ресурсов. При загрязнении поверхностных и подземных вод не просто исключается возможность их использования для питьевых целей и хозяйственной деятельности, а нарушаются законы биосферы и появляется негативный результат, если не сразу, то не в столь отдаленном будущем.

В энергетике, металлургической и химической промышленности огромные объемы пресных вод используются в качестве теплоносителя – для отвода тепла в установках, применяемых в технологических процессах. Шахтные воды могут вытеснить широко используемые пресные воды, что позволит существенно снизить их дефицит. Например, на шахтах г. Донецка откачивается на поверхность около 60 млн. м³ воды в год.

Шахтные воды загрязнены взвешенными дисперсными частицами угля и породы. Учитывая то, что уголь менее твердый по сравнению с пустой породой, то в откачиваемой шахтной воде доля частиц угля больше, чем частиц породы. Происходит своеобразная первая ступень обогащения угля. Возникает необходимость удалить эти частицы угля из шахтной воды. При этом сконцентрированные на очистных сооружениях взвешенные частицы являются качественным топливом, которое может быть использовано на промышленных установках и в бытовых твердотопливных котлах.

Шахтные воды являются одной из наиболее распространенных в Донбассе разновидностью сточных вод. Химический состав шахтных вод приведен в таблице 1.

Очистка сточных вод от взвешенных частиц постепенно совершенствуется. В промышленных установках в отечественной практике и за рубежом широко применяются отстойники. Для очистки промышленных стоков также применяются биопруды. Для интенсификации процессов очистки стоков, загрязненных бытовыми отходами,

Куликовым Н.И. в горизонтальных отстойниках начали использовать биохимическую очистку с ершами для ускорения процесса за счет развития контакта поверхности между активным илом и обрабатываемой водой.

Таблица 1 – Химический состав шахтных вод

Наименование предприятия (шахты)	Содержание в сточных водах ионов металлов, мг/дм ³							Жесткость, мг-экв/дм ³	Щелочность, мг-экв/дм ³
	Калий	Натрий	Кальций	Магний	Хлориды	Сульфаты	Сухой остаток		
СП «Шахта «Ольховатская»	0,2	175	116	92	74	753	1480	13,4	3,8
ЛШ «Миусская»	2,8	364	92	78	74	641	1575	10,7	10,7
ОП «Шахта им. XVII партсъезда»	1,8	360	146	74	141	792	1608	13,3	7,9
ЛШ «Шахта «Лесная»	2,2	523	42	86	264	660	1750	9,1	9,9
ЛШ «Шахта «Зуевская»	2,7	484	93	61	142	887	1864	9,6	7,4
ОП «Шахта «Чайкино»	0,1	55	78	10	14	373	2000	6,7	13,1
ОП «Ясиновская-Глубокая»	2,0	736	41	39	265	543	2060	5,3	14,6
ОП «Шахта «Северная»	23	168	78	55	101	269	2065	8,2	5,6
Шахта «Комсомолец Донбасса»	2,2	841	14,3	4,3	486	148	2092	1,1	19,0
ОП «Шахта «Шахтерская Глубокая»	8,0	1200	85	77	1100	960	2100	10,6	10,2
ОП «Шахта Прогресс»	2,2	760	16	22	194	709	2212	2,6	18,0
ОП «Шахта «Калиновская-Восточная»	4,0	724	52	31	280	588	2220	5,2	8,2
ОП «Холодная Балка»	2,8	672	132	75	240	1190	2535	12,7	10,6
ЛШ им. М. Горького	4,2	620	146	121	345	1033	2938	27,1	13,2
ЛШ «Шахта «Лидиевка»	8,7	548	184	141	311	1400	3027	20,8	6,9
ЛШ «Шахта «Куйбышевская»	9,7	394	212	167	303	1278	3090	24,3	11,8

В 60-х годах прошлого века такие ученые как Кургаев Е.Ф. и Квятковский В.М. предложили применение осветлителей-аппаратов с поперечным отводом шлама. Это позволило существенно повысить производительность оборудования в результате увеличения подъемных скоростей очищаемой воды в аппаратах.

Однако технология очистки шахтных вод от гомогенных примесей – растворимых солей, оставалась практически нерешенной. В 70-х годах прошлого века такие ученые, как Гнусин Н.И., Гребенюк В.Д., Высоцкий С.П. начали работы по применению электролиза для очистки вод повышенной минерализации. Использование традиционного ионного обмена оказалось невозможным из-за высокого противоионного эффекта.

Под руководством академика Пилипенко А.Т. на шахте «Петровская» в Донбассе была сооружена опытная установка по очистке шахтных вод, основным звеном которой являлись электролизные модули. Под руководством Высоцкого С.П. на Зуевской экспериментальной ТЭЦ ВТИ, а затем на Новочеркасской ТЭС и Уфимской ТЭЦ-3 определены оптимальные режимы работы промышленных электролизных установок. Изучены и установлены относительно высокие расходы воды на собственные нужды и степень обессоливания до 50%. Работы по концентрированию стоков и обессоливанию

минерализованных вод методом упаривания выполнялись в прошлом веке профессором Стерманом Л.С. (МЭИ). В Донбассе профессором Насонкиной Н.Г. выполнен комплекс работ по применению обратного осмоса в системах водоснабжения. Работы по применению мембранных технологий для очистки вод повышенной минерализации показали необходимость тонкой очистки воды от поливалентных металлов и коррекции ионного состава во избежание быстрого загрязнения мембран и потери ими эксплуатационных характеристик.

Вначале XXI века, по инициативе д.т.н. Янковского Н.А., при консультации Высоцкого С.П., сооружена промышленная обратноосмотическая установка производительностью 1500 т/ч, которая обеспечивает обессоливание шахтной воды для концерна «Стирол». Это позволило исключить для этих целей использование пресной воды из канала Северский Донец-Донбасс.

С точки зрения экологической безопасности защиты среды от загрязнения наиболее благоприятным вариантом обработки шахтных вод является выделение из них компонентов в твердом виде способом осаждения. При этом необходимо обеспечить кристаллизацию удаляемых примесей в виде трудно растворимых соединений, этим занимались ученые: Мартынова О.И., Кострикин Ю.М., Шкроб М.С., Нывлт Я., Robert Kleinmann, Kristian Wolkendorter, Connor P. Newman, Will Wftgon, Wiederman H.G., Mark Weselak и др. Однако кристаллизация не обеспечивает удаление растворимых солей: хлоридов и сульфатов натрия, хлоридов кальция. К тому же эти соединения находятся в растворах в диссоциированном состоянии, что также усложняет выбор технологий их удаления.

Основными проблемами при этом являются процессы переработки и сбросов ретентата, а также обеспечение стабильной работы модулей. Учитывая высокую стоимость оборудования и реагентов, необходимость сокращения или исключения сброса сточных вод, нерешенными являются проблемы выбора технологий и реагента при подготовке воды для крупнотоннажных потребителей. При любых технологиях большинство ученых полагают – требуется надежная предочистка. Анализ работы отстойников различных конструкций показал, что для очистки шахтных вод от взвешенных частиц целесообразно использование тонкослойных отстойников малочувствительных к колебаниям нагрузки и температуры обрабатываемой воды.

Во втором разделе рассмотрено использование вод повышенной минерализации для подпитки тепловых сетей. Отложение накипи на теплообменных поверхностях является одной из главных проблем теплоэнергетики на протяжении всей истории ее развития. Допустимая величина интенсивности накипеобразования для теплофикационных систем составляет 0,11 г/(м²·ч). Образование на внутренней поверхности котла слоя накипи толщиной всего 1 мм вызывает перерасход топлива на 5÷8 %. При отводе тепла от теплообменников очень важно, чтобы коэффициент загрязнения находился на наиболее низком уровне. По выполненным исследованиям в работе приведены данные, которые показывают значительное влияние толщины отложений такого основного для большинства оборотных систем отложения, как карбонат кальция, на коэффициент теплопередачи (K) и соответствующее увеличение энергозатрат (ΔZ). При этом (1):

$$K = 471/\delta^{1,15}, \text{ Вт/м}^2; \quad \Delta Z = 34 \cdot \delta^{0,97}, \%, \quad (1)$$

где ΔZ – процент превышения затрат по сравнению с работой оборудования без отложений; δ – толщина накипи, мм.

Кристаллизация характеризуется определенным индукционным периодом пересыщения. Индукционный период связан с периодом задержки τ_3 – временем до начала образования слоя отложений. При кристаллизации τ_3 имеет тенденцию к уменьшению при повышении температуры раствора при неизменной степени пресыщения.

При использовании шахтных вод в качестве теплоносителя для закрытых тепловых сетей следует учитывать два ограничения: минерализацию воды и карбонатный индекс. Следует учитывать также, что с одной стороны температура сетевой воды существенно больше, что интенсифицирует коррозионные процессы, а с другой стороны подпиточная вода проходит стадию деаэрации, что снижает интенсивность кислородной коррозии. Основной составляющей накипи является карбонат кальция, интенсивность кристаллизации которого зависит от карбонатного индекса – произведения концентрации ионов кальция и гидрокарбонатов.

Для определения влияния концентрации основных составляющих процесса кристаллизации карбоната кальция на интенсивность образования отложений исследованы изменения концентрации щелочности, кальция и углекислого газа. Зависимость количества отложений на поверхности нагрева от концентрации угольной кислоты и от показателя ($pH - pPK$) приведены на рисунках 1 и 2.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить зависимость (2) количества отложений от карбонатного индекса:

$$G = 0,3(CaЩ)/CO_2)^{0,45}, \quad (2)$$

где G – количество отложений, моль/ч; C_{CO_2} – концентрация CO_2 в водном растворе, мг/дм³; $CaЩ$ – карбонатный индекс, (мг·экв/дм³)².

Влияние карбонатного индекса на интенсивность процесса кристаллизации карбоната кальция показано на рисунке 3.

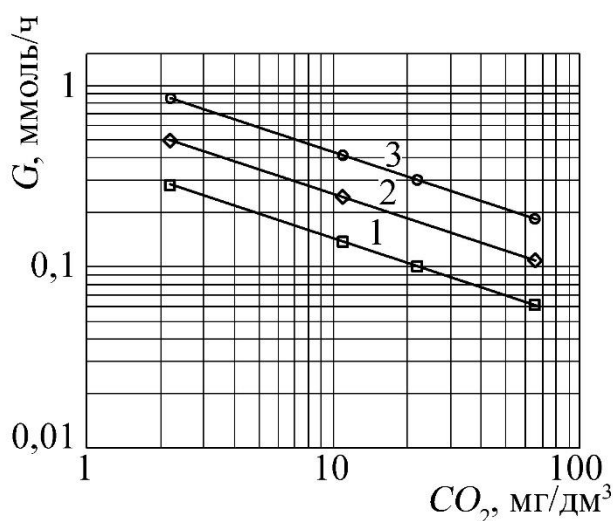


Рис. 1. Зависимость количества отложений (G) на поверхности нагрева от концентрации угольной кислоты (CO_2):
 1 – Ж = 0,7 мг·экв/дм³; Щ = 3 мг·экв/дм³;
 2 – Ж = 7 мг·экв/дм³; Щ = 1 мг·экв/дм³;
 3 – Ж = 7 мг·экв/дм³; Щ = 3 мг·экв/дм³.

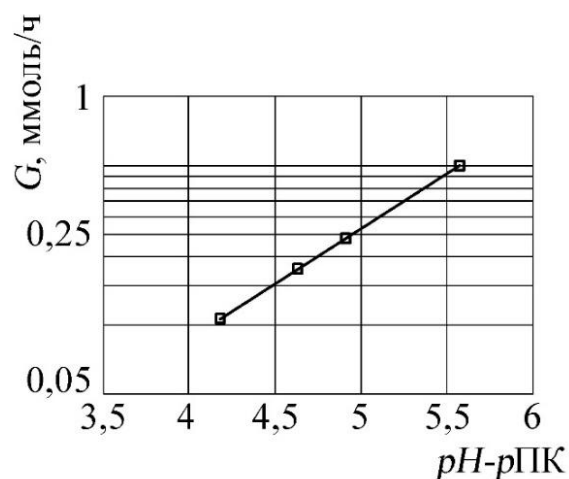


Рис.2. Зависимость количества отложений (G) на поверхности нагрева от показателя ($pH - pPK$).

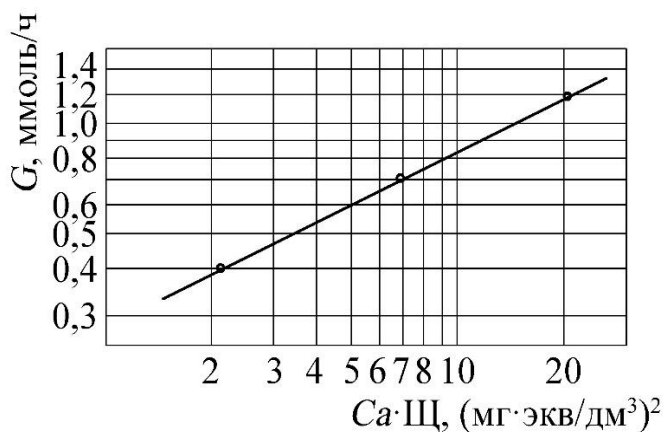


Рис. 3. Зависимость количества отложений (G) от карбонатного индекса (Ca·Щ).

использования вод не только в системах питьевого водоснабжения, но и в технологических процессах. Даже при уменьшении в разы объемов потребления поваренной соли актуально решение проблемы поиска альтернативных технологий очистки воды для подпитки тепловых сетей. Одной из таких технологий является умягчение воды на карбоксильных (слабокислотных) катионитах.

При подготовке воды для подпитки тепловых сетей необходимый уровень очистки воды устанавливается из следующих соображений. Производство остаточной концентрации ионов кальция и щелочности не должно превышать карбонатный индекс. При этом (3):

$$(Ca - \Delta Щ) \cdot (Щ - \Delta Щ) \leq I_k, \quad (3)$$

где Ca, Щ – соответственно, концентрация катионов кальция и анионов щелочности в очищенной воде, мг·эquiv/дм³; ΔЩ – степень снижения щелочности и жесткости, мг·эquiv/дм³; I_к – карбонатный индекс, (мг·эquiv/дм³)².

Получено квадратное уравнение (4):

$$\Delta Щ^2 - \Delta Щ(Ca + Щ) - I_k + Ca \cdot Щ = 0. \quad (4)$$

После решения относительно ΔЩ получаем, что для исходной воды с жесткостью 8 мг·эquiv/дм³ и щелочностью 4 мг·эquiv/дм³ и с карбонатным индексом 3 (мг·эquiv/дм³)² необходимый уровень снижения кальциевой карбонатной жесткости составит 3,36 мг·эquiv/дм³. Используя данные стоимости слабокислотной ионообменной смолы фирмы «Пьюролайт» Ц_и = 130 руб./дм³, коэффициент амортизации α = 0,12 и стоимость товарной серной кислоты Ц_р = 5000 руб./т, определена оптимальная длительность фильтроцикла τ_р = 10 ч.

Следующим важным условием обеспечения надежной эксплуатации фильтров, загруженных карбоксильным катионитом, является предотвращение гипсования катионита при его регенерации. Указанный катионит имеет очень высокую обменную емкость. При регенерации катионита раствором серной кислоты в слое ионообменной смолы образуется высокая концентрация сульфата кальция. Последний отличается низкой растворимостью и способен к кристаллизации в виде CaSO₄·2H₂O.

На большинстве установок подготовки воды для подпитки тепловых сетей осуществляется технология подготовки воды ее умягчением в натрий-катионитных фильтрах. Использование умягчения воды в натрий-катионитных фильтрах имеет также отрицательную экологическую составляющую процесса. Натрий-катионитные фильтры регенерируются с удельным расходом поваренной соли в 2,5÷3 раза больше стехиометрических значений.

Регенерационные стоки сбрасываются в поверхностные водоемы, что исключает возможность

Для предотвращения гипсования слоя ионита необходимо, чтобы длительность пребывания регенеранта в слое ионита была меньше по сравнению со скрытым (латентным) периодом кристаллизации. Длительность пребывания регенерационного раствора в слое ионита определяется из полученного в работе следующего уравнения (5):

$$\tau_{\text{пр}} \leq (H - h)\varepsilon^{0,65} \cdot 60/W, \text{ мин}, \quad (5)$$

где H – высота загрузки слоя ионита в фильтре, м; h – высота «работающего» слоя ионита, ($\sim 0,17$ м); ε – доля свободного объема в слое ионита ($\sim 0,4$); W – скорость пропуска регенеранта через слой ионита, м/ч.

Если принять высоту загрузки ионита в фильтре 1,0 м, скорость пропуска регенеранта 10 м/ч, то максимальная (предельная) длительность индукционного периода кристаллизации должна превышать (6):

$$\tau_{\text{пр}} \leq (1,0 - 0,17)0,4^{0,65} \cdot 60/10 \leq 2,7 \text{ мин}. \quad (6)$$

Индукционный период кристаллизации гипса зависит от температуры и произведения концентраций ионов кальция и сульфатов.

Выполнены исследования при различном произведении концентрации: 0,00625, 0,0025, 0,05 и 0,1 (моль/дм³)² в диапазоне температур от 20 до 80°C. Приведенные на рисунке 4 данные показывают, что индукционный период кристаллизации сульфата кальция описывается экспоненциальной функцией обратной величины абсолютной температуры.

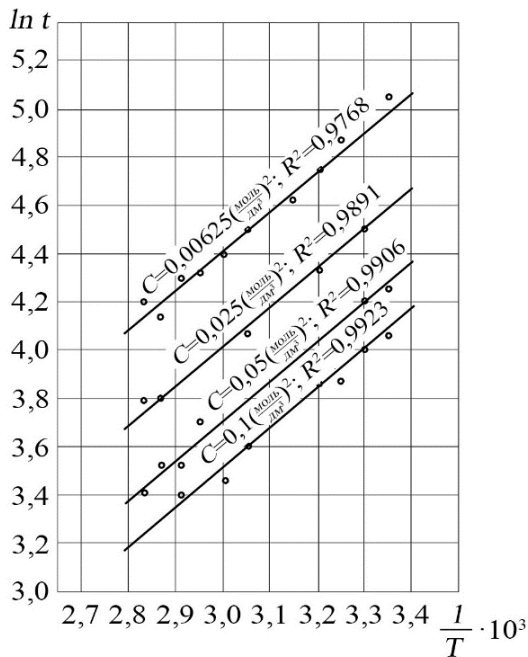


Рис. 4. Зависимость продолжительности индукционного периода (t) сульфата (Ca) от температуры (T)

Общая зависимость индукционного периода для исследованного диапазона параметров температуры и произведения концентраций кальция и сульфат-ионов описывается уравнением (7) с коэффициентом корреляции не менее 0,98.

$$\tau_{\text{ind}} = 0,124(\text{ПК})^{-0,305} \exp(1647/T), \quad (7)$$

где ПК – произведение концентраций ионов кальция и сульфатов, (моль/дм³)².

Зависимость (7) позволяет определить предельное значение (ПК) с учетом допустимой величины τ_{ind} из уравнения (6). При температуре регенерационного раствора 25°C (298K) предельное значение (ПК) с точки зрения предупреждения гипсования фильтрующего слоя составляет $4,5 \cdot 10^3$ (моль/дм³)². Это указывает на то, что для высокоёмких карбоксильных катионитов целесообразно осуществлять ступенчатую регенерацию.

В третьем разделе рассмотрено использование шахтных вод в оборотных циклах промышленных предприятий. Образование в растворе определенной формы кристаллов влияет на условия накипеобразования. Мелкие кристаллы отталкиваются от теплопередающей поверхности за счет сил термофореза, а крупные кристаллы отлагаются на поверхностях теплопереноса за счет адгезии. Характерный вид кристаллов приведен на рисунке 5.

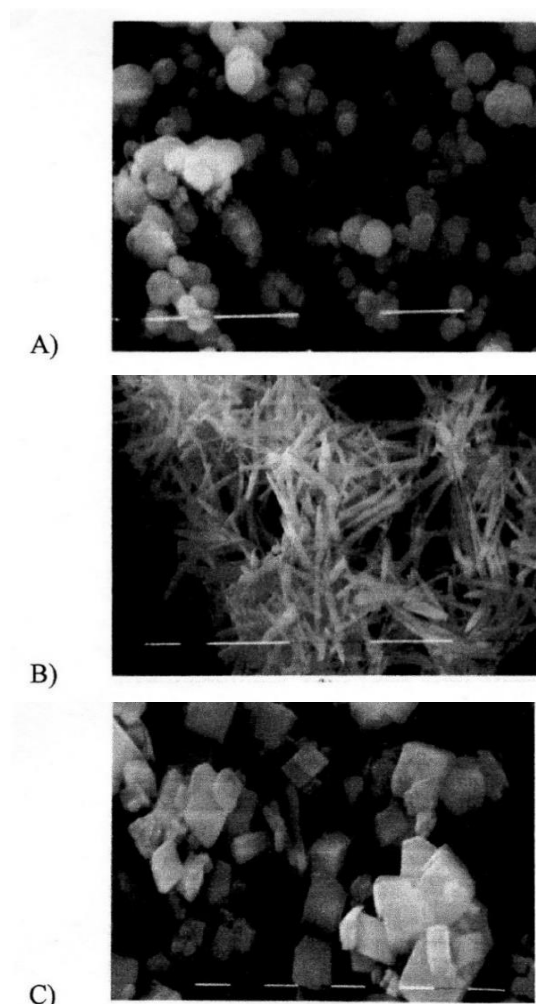


Рис. 5. Характерный вид кристаллов ватерита (А), арагонита (В) и кальцита (С) (масштаб – 10 мкм).

Как видно из представленных данных при образовании накипи наименее предпочтительными являются кристаллы арагонита, которые имеют объемную, игольчатую разветвленную структуру, обладающую соответственно наибольшим термическим сопротивлением.

Интенсивность образования отложений зависит от произведения растворимости (ПР) для отдельных форм накипи. Полученные значения (ПР) для различных модификаций накипи следующие (8-10):

$$\text{для ватерита } \text{ПР}_в = \exp\left(\frac{500}{T-523}\right); \quad (8)$$

$$\text{для арагонита } \text{ПР}_а = \exp\left(\frac{769}{T-577}\right); \quad (9)$$

$$\text{для кальцита } \text{ПР}_к = \exp\left(\frac{909}{T-611}\right). \quad (10)$$

На размер образующихся кристаллов влияет гидрокарбонатная щелочность воды. Критической величиной щелочности является величина 7 мг·экв/дм³, при которой образующиеся кристаллы имеют максимальный размер.

На рисунке 6 показано влияние щелочности воды на соотношение размеров кристаллов. Аналитическое выражение зависимости имеет вид (11):

$$\frac{\delta}{\delta_{max}} = \frac{1}{1 + \varepsilon^{-2,13(\text{Щ}-5,47)}}, \quad (11)$$

где δ , δ_{max} – соответственно, текущий и максимальный размер кристаллов, мм.

Условия накипеобразования зависят также от индукционного (латентного) периода кристаллизации отдельных кристаллов. При индукционном периоде кристаллизации, превышающем время нахождения раствора в теплообменном аппарате, накипеобразование не происходит. С этой точки зрения предпочтительным является использование теплообменников с ограниченным временем нагрева жидкости.

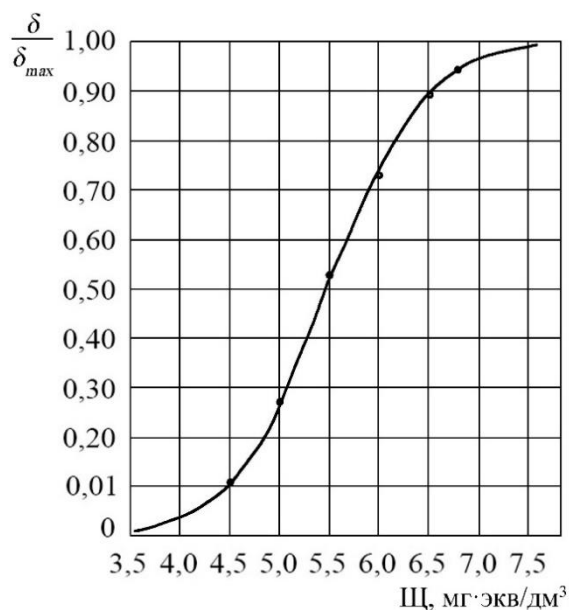


Рис.6. Зависимость соотношения размеров (δ/δ_{max}) кристаллов от гидрокарбонатной щелочности воды (Щ).

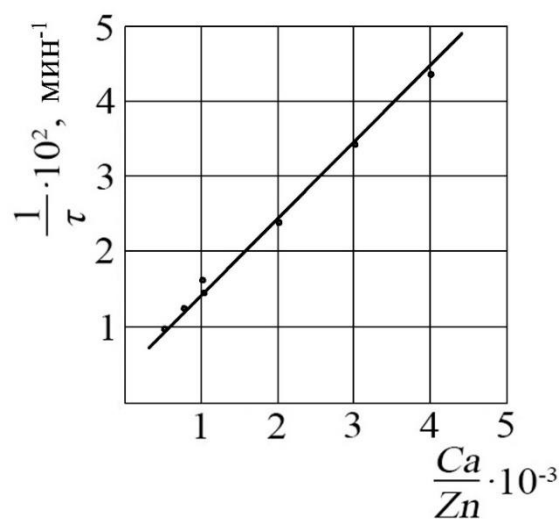


Рис.7. Влияние соотношения (Ca/Zn) на индукционный период кристаллизации карбоната кальция (τ).

Индукционный период зависит даже от микроколичеств некоторых элементов. На рисунке 7 показано влияние соотношения концентраций кальция и цинка на индукционный период.

Как видно из представленных данных, увеличение концентрации цинка в 4 раза повышает индукционный период кристаллизации в 3 раза.

Оборотные системы водопользования широко применяются в различных отраслях промышленности. Надежность и экономичность работы оборотных систем водоснабжения определяется, в основном, качеством воды, циркулирующей в этих системах. Так, например, на ТЭС, работающих с подпиткой в оборотные системы воды с повышенной жесткостью, возникают проблемы агрессивного воздействия минерализованной воды на строительные сооружения и металлические конструкционные материалы, а также накипеобразование в конденсаторах турбин и на оросителях градирен.

Многообразие химических процессов, происходящих в циркуляционной системе, затрудняет оценку кинетических характеристик, определяющих скорость выпадения карбоната кальция. Образование зародышей кристаллов зависит от типа поверхности, на которой происходит кристаллизация. Согласно М. Фольмеру, процесс образования твердой фазы в основном зависит от типа стенки или физического состояния поверхности раздела. При этом энергия образования зародыша кристалла определяется соотношением (12):

$$A = 1/3 \pi r^2 \sigma [2(1 - \cos \theta) - \sin^2 \theta \cdot \cos \theta], \quad (12)$$

где A – энергия образования зародыша кристалла на стенке, Н·м; r – размер частиц кристаллов, м; σ – поверхностная энергия грани кристалла, Н/м; θ – краевой угол смачивания, град.

Из этого выражения следует, что соотношение энергии изотермического образования твердой фазы из пересыщенного раствора на твердой стенке и свободной поверхностной энергии кристаллизации в объеме раствора зависит от краевого угла смачивания поверхности. Зависимость продолжительности образования зародышей кристаллов τ_3 от степени перенасыщения α и типа поверхности показана на рисунке 8.

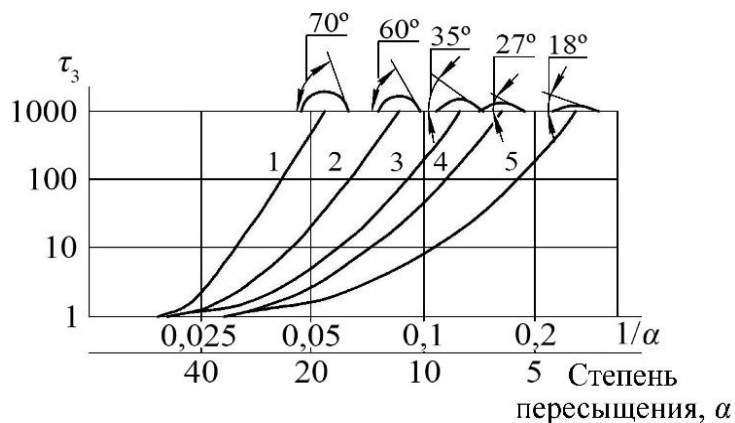


Рис. 8. Зависимость продолжительности образования зародышей кристаллов (τ_3) от степени перенасыщения (α) и типа поверхности:

- 1 – поливинилхлорид, 2 – плексиглас,
3 – стекло, 4 – замороженный плексиглас,
5 – полированная нержавеющая сталь.

При изучении условий кристаллизации карбоната кальция на различных поверхностях получена зависимость скорости образования отложений от типа поверхности (таблица 2).

Интенсивность накипеобразования на разных поверхностях зависит от затрат энергии для преодоления порога «неустойчивости». Чем выше это значение энергии, тем меньше

интенсивность кристаллизации частиц на поверхности нагрева.

На рисунке 9 показано влияние расчетного значения энергии образования зародышей на поверхности материала на интенсивность кристаллизации карбоната кальция.

Таблица 2 – Исследование материалов теплопередающих поверхностей

Материал	Угол смачивания θ , град	Интенсивность отложений V , г/(м ² ·ч)
Полиэтилен	87	0,0088
Стеклопластик	71	0,0194
Стеклоткань	57	0,032
Асбоцемент	24	1,74

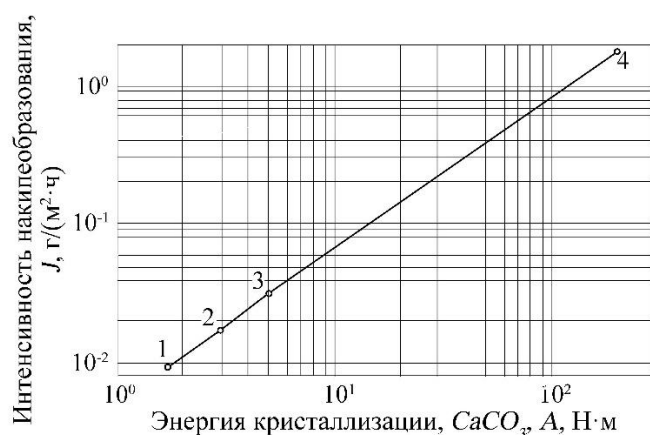


Рис. 9. Зависимость скорости кристаллизации (J) от типа материала, на котором кристаллизуется карбонат кальция, от энергии образования зародышей (A):
1 – полиэтилен; 2 – стеклопластик;
3 – стеклоткань; 4 – асбоцемент.

Анализируя эти результаты, необходимо учесть, что величина порога «неустойчивости» зависит от физического состояния поверхности. Если поверхность пористая, имеет узкие трещины (как, например, в асбоцементных пластинах),

инкрустация кальция может происходить даже в ненасыщенном растворе.

Основными факторами, определяющими смещение равновесия в системах, представленных реакциями (13-15):



являются температура воды, pH раствора и концентрация ионов кальция, а также парциальное давление CO_2 .

Зависимость произведения растворимости от температуры, полученная по экспериментальным данным, показана на рисунке 10.

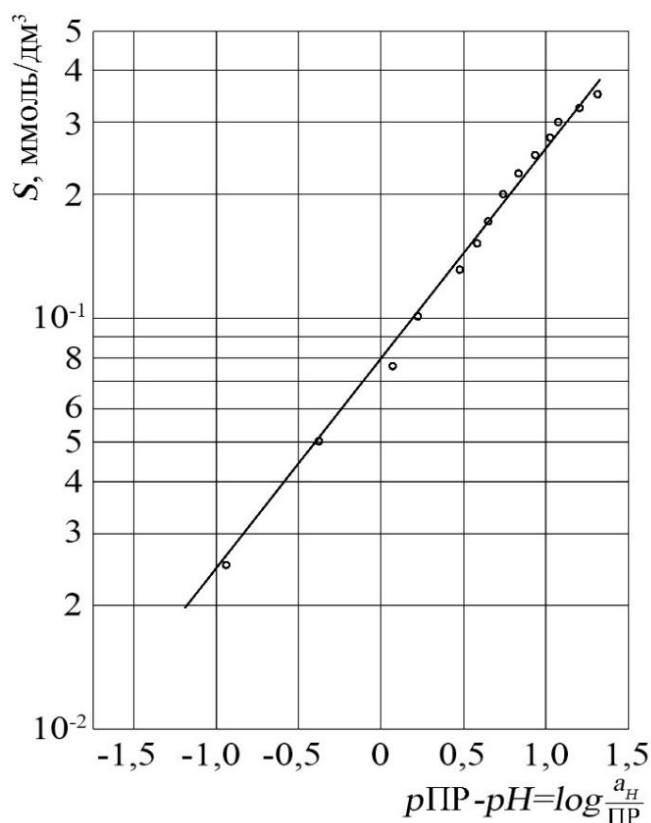


Рис. 10. Зависимость растворимости (S) карбоната кальция от разницы ($pPP - pH$).

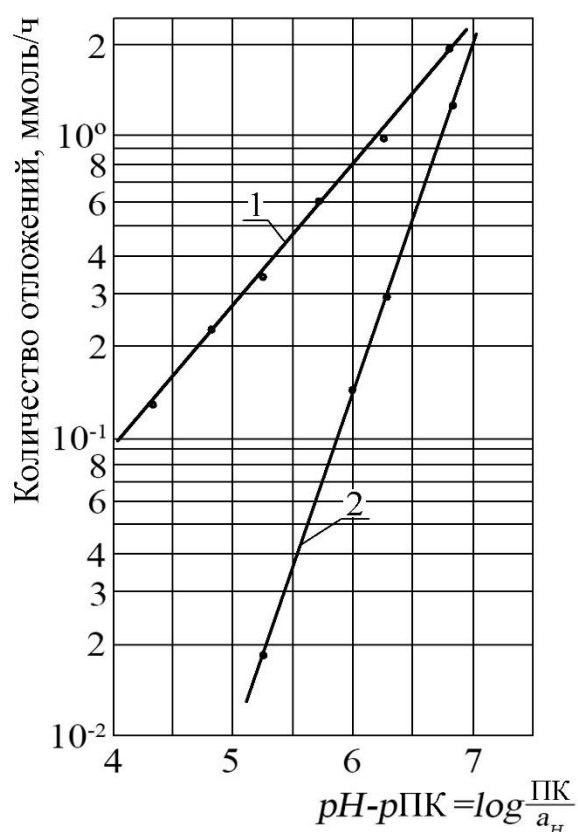


Рис. 11. Зависимость количества отложений на поверхности нагрева от показателя ($pH - pPK$):
1 – количество отложений при нагреве без стабилизаторов накипи (антискалантов);
2 – количество отложений при дозировке 1,7 мг/кг полифосфата $Na_9P_7O_{22}$.

Зависимость количества отложений на поверхности нагрева при дозировке 1,7 мг/кг полифосфата $Na_9P_7O_{22}$ выражается полученной в работе зависимостью (16):

$$G = 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot \exp 2,72(pH - pPK) = 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{a_{Ca} \cdot a_{CO_2}}{a_H} \right)^{1,18}, \text{ ммоль/ч.} \quad (16)$$

Аналитическое выражение указанной зависимости количества растворенного карбоната кальция от параметра $(pH - pPK)$ имеет вид (17):

$$S = 7,97 \cdot 10^{-2} \cdot \exp 1,18(pPP - pH) = 7,97 \cdot 10^{-2} \exp \left[\left(\log \frac{a_H}{PP} \right)^{1,18} \right], \text{ ммоль/м}^3. \quad (17)$$

После несложных преобразований указанной зависимости получим (18):

$$S = 7,97 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{a_H}{PP} \right)^{0,51}, \text{ ммоль/ м}^3. \quad (18)$$

В лабораторных условиях выполнены эксперименты по определению интенсивности накипеобразования при различном произведении концентраций и pH раствора. Температура раствора поддерживалась в пределах $93 \pm 2^\circ C$.

Из приведенных на рисунке 11 данных следует, что интенсивность накипеобразования хорошо описывается экспоненциальной зависимостью от параметра $(pH - pPK)$.

Без стабилизирующей обработки вода, имеющая значение $(pH - pPK) > 4$ или индекс стабильности по Ризнеру менее 6,0, склонна к формированию отложений. При значении $(pH - pPK) < 4$ или индексе более 7,0 (по Ризнеру) она не обеспечивает формирование защитного покрытия в виде карбоната кальция. Коррозия будет становиться все более серьезной проблемой при значении $(pH - pPK) > 4$ или повышении индекса стабильности по Ризнеру до $7,5 \div 8,0$.

При применении полифосфатов вода со значением $(pH - pPK) < 6$ или индексом стабильности по Ризнеру более 4,0 может быть использована при температуре до $93^\circ C$ с незначительным количеством отложений. Зависимость количества отложений на поверхности нагрева без стабилизаторов выражается формулой (19):

$$G = 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot \exp 1,1(pH - pPK) = 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{a_{Ca} \cdot a_{CO_2}}{a_H} \right)^{0,45}, \text{ ммоль/ч.} \quad (19)$$

Таким образом, при одинаковом значении показателя $(pH - pPK) = 6$ введение антинакипной присадки обеспечивает снижение образования накипи примерно в 5,5 раза. Наряду с этим увеличение pH и, соответственно, разности $(pH - pPK)$ до 6,5 приводит к снижению эффективности применения антинакипной присадки. Снижение интенсивности накипеобразования в этих условиях происходит в 2,4 раза.

По результатам изучения процесса накипеобразования в оборотных системах получены зависимости индукционного периода кристаллизации карбоната кальция при различных температурах (рисунок 12).

Обобщенная зависимость τ_{ind} от температуры и степени пересыщения описывается формулой (20):

$$\tau_{ind} = 2,93 \exp \left(\frac{2,422 \cdot 10^3}{T} \right) \left(\frac{PK}{PP} \right)^{0,71}. \quad (20)$$

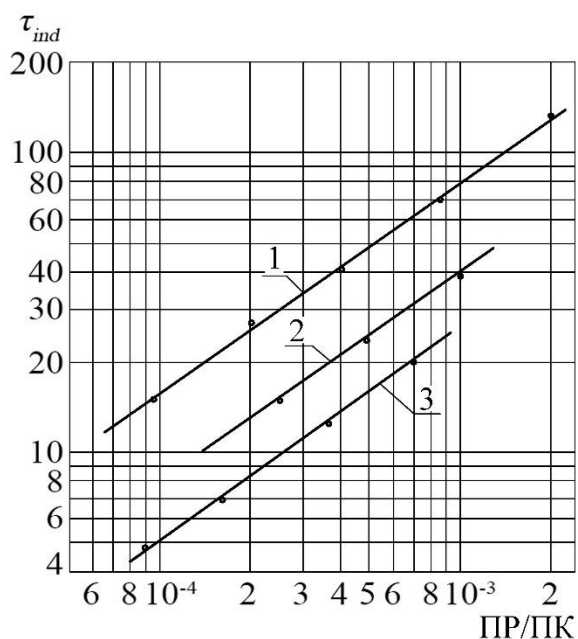


Рис. 12. Зависимость индукционного периода кристаллизации карбоната кальция (τ_{ind}) от соотношения произведения растворимости к произведению концентраций заданного вещества (ПР/ПК).

Например, алюминий, несмотря на то, что он расположен в крайнем безопасном положении, представляет опасность из-за риска развития болезни Альцгеймера и деменции при относительно низких концентрациях в воде любых форм этого металла.

Степень загрязнения шахтных вод тяжелыми металлами зависит от концентрации указанных металлов в каменных углях шахт Донбасса. Содержание токсичных компонентов в углях девяти шахт (Октябрьская, им. Горького, им. Челюскинцев, Ганзовка, Лидиевка, им. Орджоникидзе, им. Батова, им. Бажанова и Иловайская) существенно превышает кларки токсичных компонентов. Самые высокие концентрации в углях имеют место для элементов 1 класса опасности: ртути – 5÷62,5; мышьяка – 15÷106; бериллия – 10; свинца – 15; цинка – 2÷2,5. Попадая в поверхностные водоемы, большая часть указанных элементов образует донные осадки.

Учитывая сложную ситуацию в регионе с обеспечением населения питьевой водой и относительно малое содержание тяжелых металлов в шахтных водах, может быть реализована отдельная система водоснабжения с подачей обработанной шахтной воды для санитарно-гигиенических целей и обессоленной воды для питьевых целей.

Степень мобильности тяжелых металлов в воде зависит от следующих параметров: pH воды; содержания в воде карбонатов и фосфатов; содержания и типа органических веществ; наличия сульфид-ионов и пирита. Однако, основным фактором воздействия среды на поведение тяжелых металлов является значение pH .

Несмотря на наличие большого количества химических и биологических технологий для обработки шахтных сточных вод, известкование является основным и наиболее распространенным методом. Это обусловлено высокой эффективностью удаления тяжелых металлов. Этому способствует также относительно низкая стоимость

В четвертом разделе рассмотрены разработанные способы очистки шахтных вод от тяжелых металлов. Объем сброса шахтных вод зависит от коэффициента водообильности. На величину последнего влияют: гидрогеологические условия угольных месторождений, степень осушения шахтных полей, принятые системы разработки и добычи угля, способы управления кровлей и др.

Основными загрязнителями шахтных вод являются взвешенные вещества, минеральные соли и соединения тяжелых металлов. Последние представляют наибольшую опасность для биоты. Самую высокую биохимическую активность представляют лабильные формы соединений тяжелых металлов. По чувствительности животных и человека к металлам их можно расположить в ряд: $Hg > Cu > Zn > Ni > Pb > Cd > Cr > Sn > Fe > Mn > Al$.

Следует отметить, что расположение металла в приведенном ряду может изменяться в зависимости от ионного и молекулярного состава воды и, соответственно, показателя pH , концентрации металла и его валентности.

известии в пересчете на эквивалент действующего вещества, учитывая малую эквивалентную массу известии – 28.

Обработка шахтных вод, содержащих повышенные концентрации кальциевой карбонатной жесткости, позволяет также существенно снизить минерализацию указанных вод и обеспечить возможность их использования в оборотных системах охлаждения конденсаторов турбин и прочего промышленного оборудования. Для более полного осаждения некоторых металлов требуется предварительное окисление (продувкой воздуха, введением хлорной известии или озонированием) – например, для соединений двухвалентного железа, или восстановление – для соединений шестивалентного хрома.

Гидроксиды тяжелых металлов осаждаются в виде коллоидных заряженных частиц, поэтому возникает необходимость добавки коагулянтов, которые нейтрализуют заряд частиц и обеспечивают увеличение их агрегатов. Для интенсификации процесса осаждения за счет дальнейшего агрегирования осаждаемых частиц в обрабатываемую воду добавляют флокулянты. Учитывая многокомпонентное содержание тяжелых металлов в шахтной воде стадия осаждения может быть реализована в несколько ступеней.

Большинство тяжелых металлов обладают амфотерными свойствами. При превышении значения pH больше оптимального значения равновесной концентрации металла значительно возрастают. На рисунке 13 показано изменение концентрации тяжелых металлов и алюминия в зависимости от уровня pH .

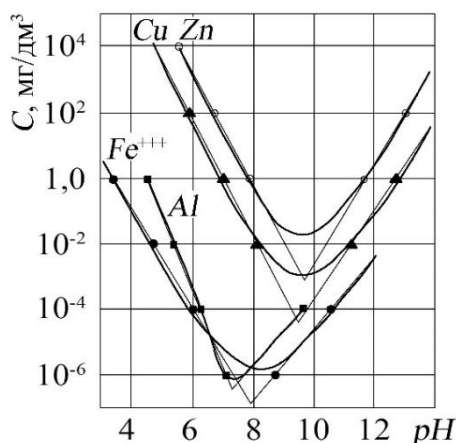


Рис. 13. Зависимость концентрации (C) тяжелых металлов и алюминия в зависимости от уровня (pH).

На кривых рисунка 13 точками показаны расчетные значения. Данные показывают хорошую воспроизводимость результатов.

После обработки опытных данных получены аналитические уравнения зависимости концентрации отдельных элементов от значения pH и, соответственно, активности водородных ионов. Уравнения имеют вид (21-24):

$$\text{для } Fe^{3+} = \frac{10^{22,248} + 10^{2,957pH}}{10^{2pH} \cdot 10^{14,248}} = 10^{8,0} \cdot a_H^{2,0} + \frac{1}{10^{14,248} \cdot a_H^{0,957}}, \quad (21)$$

$$\text{для } Cu^{2+} = \frac{10^{38,122} + 10^{3,989pH}}{10^{1,87pH} \cdot 10^{24,926}} = 10^{13,196} \cdot a_H^{1,87} + \frac{1}{10^{24,926} \cdot a_H^{2,028}}, \quad (22)$$

$$\text{для } Zn^{2+} = \frac{10^{31,808} + 10^{3,291pH}}{10^{1,817pH} \cdot 10^{17,36}} = 10^{14,448} \cdot a_H^{1,817} + \frac{1}{10^{17,36} \cdot a_H^{1,474}}, \quad (23)$$

$$\text{для } Al^{3+} = \frac{10^{25,487} + 10^{3,463pH}}{10^{14,315} \cdot 10^{2,396pH}} = 10^{11,172} \cdot a_H^{2,396} + \frac{1}{10^{14,315} \cdot a_H^{1,067}}. \quad (24)$$

В пятом разделе рассмотрено применение обратноосмотического обессоливания шахтных вод. Увеличение минерализации исходной воды приводит к неконкурентоспособности существующих в промышленности ионообменных технологий приготовления подпиточной воды.

Значительное увеличение стоимости реагентов и ужесточение требований к сбросу засоленных стоков вызывает необходимость замены существующих ионообменных технологий на мембранные. Последние обладают рядом достоинств: практически полное исключение потребления реагентов на процесс обессоливания воды, высокая степень обессоливания за один цикл и снижение сброса солей до уровня, эквивалентного содержанию солей в исходной воде.

Использование обратноосмотического оборудования, несмотря на некоторую простоту схемы соединения аппаратов и обслуживания требует знания распределения нагрузки между корпусами и мембранами. В противном случае наблюдаются потери эксплуатационных свойств технологического процесса: повышение расхода электроэнергии, снижение степени обессоливания и выхода чистой воды – пермеата или увеличения капитальных затрат на установки.

Мембранные элементы в обратноосмотической установке могут быть собраны по разным схемам, конфигурациям. Например, при обессоливании солоноватых вод с солесодержанием до 2 г/дм³ мембраны могут быть соединены в несколько корпусов, соединенных параллельно (для увеличения производительности оборудования) и последовательно (для увеличения выхода обессоленной воды – пермеата). На рисунках 14 и 15 показаны разные схемы подключения мембранных аппаратов и возможность быстрого перехода к другой конфигурации.

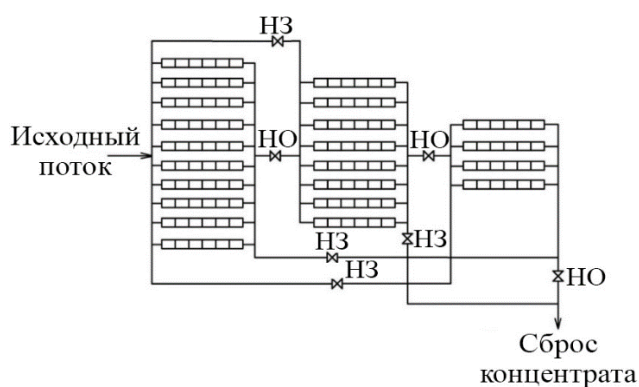


Рис. 14. Переход от трехступенчатой схемы включения к двухступенчатой: НЗ, НО – соответственно нормально закрытые и открытые клапаны.

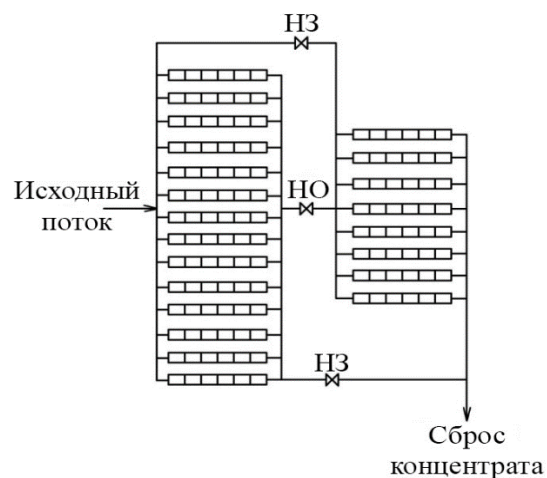


Рис. 15. Изменение подключения корпусов для двухступенчатой установки с последовательной (по концентрату) на параллельную.

Очевидно, что в случае обессоливания высокоминерализованных вод последовательное соединение обратноосмотических элементов по концентрату вызовет как ухудшение качества пермеата, так и опасность загрязнения последних по ходу концентрата мембранных элементов и потерю технических характеристик мембран.

Расчеты технологических параметров работы обратноосмотических установок показали, что при одинаковом давлении поступающей воды и одинаковом количестве корпусов изменение конфигурации подключения позволяет в значительной мере увеличить расход обессоленной воды – пермеата

При неизменном расходе поступающей воды и выходе пермеата переход с трехступенчатой схемы подключения корпусов на одноступенчатую позволяет уменьшить давление поступающей воды приблизительно с 13 до 10 бар и затраты электроэнергии с 0,55 до 0,43 кВт ч/м³.

Изменение конфигурации подключения корпусов обратноосмотических аппаратов позволяет гибко регулировать производительность оборудования за счет изменения выхода пермеата. При этом при одинаковой производительности можно достичь значительной экономии электрической энергии. Изменение конфигурации подключения корпусов дает также возможность регулировать качество пермеата. Наиболее целесообразно использовать двухступенчатую схему включения мембранных аппаратов, при которой достигаются наилучшие показатели пермеата по сравнению с другими схемами. При современных ценах на электроэнергию и на мембранные аппараты оптимальное давление поступающей воды составляет приблизительно 14 бар.

При обратноосмотическом обессоливании, где движущей силой переноса воды является давление, прирост переноса при росте превышения давления над осмотическим пропорционально квадрату разности максимального и фактического удельного переноса пермеата через поверхность мембраны (25):

$$\frac{dq}{dp} = k(Q_{max} - q)^2, \quad (25)$$

где Q_{max} , q – соответственно, максимальный и фактический удельный поток обессоленной воды (пермеата) через мембрану для данного аппарата при соответствующем качестве воды, которая поступает на очистку, дм³/ч·м².

$$k = 1/C \cdot Q_{max}. \quad (26)$$

К режимным факторам, которые характеризуют процесс обратноосмотического обессоливания относятся: солесодержание и ионный состав исходной воды, солесодержание концентрата, температура раствора, скорость раствора и рабочее давление. К основным конструктивным особенностям установок можно отнести: длину хода потока воды, которая обессоливается, расстояние между мембранами, типы мембран и турбулизаторов (спейсеров) потока между мембранами.

Для оценки влияния отдельных параметров на процесс обратноосмотического разделения водных растворов целесообразно представление зависимостей комплекса безразмерных величин. Это позволяет сопоставить (сравнить) и обобщить результаты работы разнообразных конструкций обратноосмотических аппаратов и режимов их работы. Использование зависимостей безразмерных комплексов также позволяет рассматривать процесс, который описывается разнообразными уравнениями в целом и осуществлять прогноз параметров процесса в неисследованной области (таблица 3).

Таблица 3 – Матрица решения задачи массопереноса в обратноосмотическом элементе

	Единица измерения	L_x	L_y	L_z	G	P	τ	n	Взаимная связь показателей степени
q	кг/м ² ·с	-2/3	-2/3	-2/3	1	-	-1		$-a - b - c + f - \frac{2}{3}k + l = -\frac{2}{3}$
Q	кг/м ² ·с	-1	-1	-	1	-	-1	a	
C_0	кг/м ³	-1	-1	-1	1	-	-	b	
C	кг/м ³	-1	-1	-1	1	-	-	c	$-a - b - c + f - \frac{2}{3}k + l = -\frac{2}{3}$
V	м/с	1/2	-	1/2	-	-	-1	d	
ν	м ² /с	-	-	2	-	-	-1	b	$b - c + \frac{1}{2}d + 2c + m - \frac{2}{3}k = -\frac{2}{3}$
D	м ² /с	1	1	-	-	-	-1	f	
t	м	-	-	1	-	-	-	n	
L	м	1	-	-	-	-	-	n	$a + b + c + k = 1$ $a + d + l + f = 1$
P	кг/м ²	-2/3	-2/3	-2/3	1	-	-	k	
F	м ²	1	1	-	-	-	-	l	

где C_0 , C – соответственно, солесодержание исходной и обессоленной воды, кг/м³; F – площадь поверхности мембран, м²; Da – критерий Дамкелера, характеризующий соотношение потоков обессоленной воды (пермеата) и исходной воды (характеризующий выход пермеата); P – давление воды в ячейках ретентата, г/м²; t – расстояние между мембранами в ячейках ретентата, мм; D – коэффициент диффузии солей в ячейках ретентата, м²/с; ν – кинематическая вязкость раствора, м²/с; L – протяженность потока в ячейках ретентата, м; V – скорость потока раствора, м/с.

При описании процесса следует учитывать разницу между размерностями длины, которая измеряется в направлениях: расстояние между мембранами, длину хода потока воды, которая обессоливается, и ширину потока.

Для нахождения значений необходимых показателей степени была проанализирована работа мембранного элемента и получены аналитические зависимости:

- расхода воды через мембрану от давления воды, которая поступает на очистку;
- расхода воды через мембрану от вязкости раствора, который поступает на очистку при разных температурах;
- удельного выхода пермеата – расхода через мембрану от давления воды, которая поступает на очистку.

Исходя из вышеприведенных зависимостей получено следующее (27):

$$Da = \frac{q}{Q} \cdot \left(\frac{P}{C_0 t}\right)^{2,23} \cdot \left(\frac{D \cdot L}{V \cdot F}\right)^{1,88} \left(\frac{D \cdot t^2}{\nu \cdot F}\right)^{1,58} \cdot \left(\frac{D \cdot t}{V \cdot F}\right)^1 \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{t^2}{F}\right)^{0,74} \quad (27)$$

В шестом разделе рассмотрено применение процессов с фазовым переходом для переработки концентрата (ретентата). В мировой практике широко применяются технологии обессоливания, обратного осмоса, ионного обмена. При этом в качестве отходов технологических процессов получается значительные объемы сточных вод. Сброс последних в окружающие поверхностные водоемы приводит к их засолению и

исключает возможность использования воды из поверхностных водных источников для потребителей. Кроме сточных вод после установок обессоливания в различных отраслях промышленности в поверхностные водоемы сбрасывается значительное количество шахтных вод, имеющих высокую минерализацию.

Удовлетворение природоохранных требований может быть реализовано упариванием или вымораживанием стоков. При упаривании реагента изучены процессы с использованием энергии солнца. Показано, что применение секционирования емкости для упаривания для создания потока обрабатываемой воды близкого к идеальному вытеснению обеспечивает существенное уменьшение выхода рассола и увеличение производительности оборудования. Определена степень в зависимости от толщины слоя упариваемой воды.

Использование вымораживания является более экономически выгодным процессом, т.к. теплота плавления льда $6,01$ кДж/моль существенно меньше теплоты упаривания воды – $40,65$ кДж/моль. Однако процесс вымораживания является выгодным, если распределение солей между маточным раствором и льдом будет соответствовать такому состоянию, когда основная масса солей останется в растворе.

Исследования по вымораживанию выполнялись в лабораторных условиях с растворами солей: хлористого натрия (поваренной соли), хлористого калия и хлористого кальция с концентрацией $5, 10, 15, 20$ и 25 г/дм³. Для уменьшения или сокращения величин ошибок при определении концентрации растворов в опытах применялись растворы моносолей, а не их смеси. Это позволило использовать для определения кондуктометрический метод анализа.

Для оценки распределения концентраций солей между рассолом и талой водой целесообразно представить схему отдельных потоков (рисунок 16).

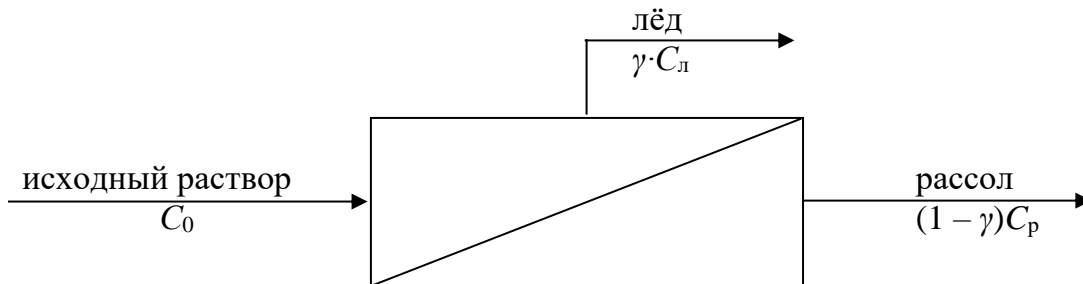


Рис. 16. Принципиальная схема распределения концентраций потоков соли между льдом и рассолом:

C_0 – солесодержание исходного раствора, г/дм³; $C_л$ – солесодержание талой воды, г/дм³;
 C_p – солесодержание рассола, г/дм³; γ – массовая доля льда.

Общий баланс солей можно представить уравнением: $C_0 = \gamma \cdot C_л + (1 - \gamma) \cdot C_p$. Степень обессоливания исходного раствора равна: $\alpha = (C_0 - C_л)/C_0$. Степень концентрирования равна: $\beta = C_p/C_0$. Подставив значения (α) и (β) в первоначальное уравнение, получим (28):

$$\alpha = (1 - \gamma)(\beta - 1)/\gamma. \quad (28)$$

Уравнение (28) позволяет оценить вклад доли образовавшейся твердой фазы – льда и степени концентрирования (β) на степень обессоливания.

Для повышения достоверности полученных результатов выполнены исследования

определения концентрации растворов поваренной соли, хлористого калия и кальция по содержанию ионов хлора, а также хлористого кальция по содержанию ионов жесткости (кальция). Анализ полученных результатов показал, что для всех концентраций исходных растворов доля образовавшегося льда располагается в ряд для растворов $NaCl > KCl > CaCl_2$. Степень обессоливания при меньшей длительности вымораживания раствора больше. Самая высокая степень обессоливания, соответственно, наименьшая степень перехода солей в лёд имеет место для растворов поваренной соли. Увеличение концентрации растворов существенно не влияет на изменение степени перехода солей в лёд, что свидетельствует о рыхлой структуре льда и «встраивании» раствора в промежутки между кристаллами льда. Один цикл процесса вымораживания соленых вод не обеспечивает получение пресной воды солесодержанием до 1 г/дм^3 .

Учитывая целесообразность многоступенчатого вымораживания при обессоливании воды повышенной минерализации для обеспечения получения качества воды, соответствующей нормам на пресную воду питьевого класса, авторами разработана и внедрена схема опреснения методом вымораживания шахтной воды, приведенная на рисунке 17.

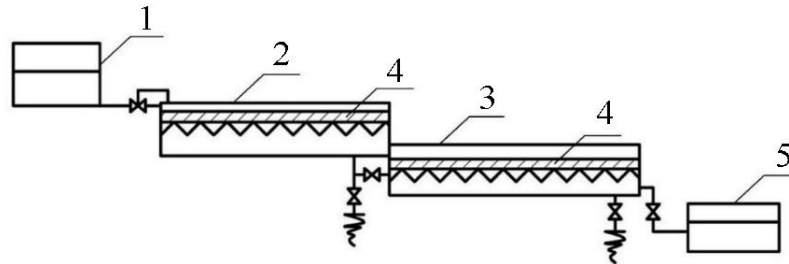


Рис. 17. Схема опреснения методом вымораживания шахтной воды:
1 – бак исходной воды; 2, 3 – бассейны вымораживания;
4 – слой льда; 5 – бак опресненной воды.

Бассейны в которых происходит вымораживание, оборудованы волнистыми (гофрированными) полимерными поддерживающими слой льда пластинами. В нижней части гофрированных поверхностей расположены отверстия. После вымораживания и дренирования рассола слой льда тает и раствор талой воды сбрасывается во второй бассейн. Талая вода после второго бассейна направляется в бак опресненной воды.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны и реализованы новые научно-обоснованные технологические решения получения экологически безопасных альтернативных источников водоснабжения в результате инновационной комплексной подготовки шахтных вод через снижение их минерализации и обеспечения нормативных требований для использования в коммунальных и промышленных системах, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие Донецкой Народной Республики.

2. Высокая теплоемкость воды обеспечивает приоритетное использование шахтных вод в качестве теплоносителя для отвода тепла в оборотных системах водопользования и для подвода тепла в тепловых сетях. Установлено, что основным ограничивающим фактором при использовании шахтных вод для указанных

потребителей, является высокий карбонатный индекс, производство кальциевой жесткости на щелочность воды, повышенная минерализация шахтных вод, а также низкие значения произведений растворимостей карбоната кальция и гипса.

3. Получены аналитические зависимости произведений растворимостей карбоната кальция и гипса от температуры подогрева водных растворов соответствующих солей. При использовании шахтных вод в оборотных циклах в качестве теплоносителя критическим фактором является выбор технологии очистки воды (циркуляционной или подпиточной), выбор оборудования и типа реагентов. Установлено, что обработка подпиточной воды раствором известкового молока обеспечивает повышение КПД очистки более чем в 2 раза. Для очистки от взвешенных веществ в подпиточной воде обосновано применение технологий осаждения с присадкой высокодисперсного песка. Исходя из экологических характеристик реагентов и их стоимости обосновано применение только извести вместо извести и кальцинированной соды. Инновационным является подготовка шахтных вод с помощью карбоксильных катионитов для снижения карбонатного индекса воды. Экспериментально и теоретически обосновано снижение щелочности воды, которое эквивалентно снижению жесткости, что позволяет определить необходимый объем загрузки ионнообменной смолы для реализации процесса очистки воды.

4. Получены аналитические зависимости индукционных периодов кристаллизации карбоната кальция и гипса, что позволяет определить критическое время нахождения воды, содержащей потенциальные накипеобразователи, в зоне нагрева и необходимое время нахождения в реакторе-осадителе. Обосновано влияние концентрации ионов железа на степень снижения карбонат кальциявого накипеобразования.

5. Для повышения экологической безопасности поверхностных водных источников, представленных шахтными водами загрязненными соединениями тяжелых металлов, разработана технология очистки сбрасываемых в поверхностные водоемы вод от тяжелых металлов. Выполнен анализ оптимальных значений pH для осаждения тяжелых металлов. С учетом амфотерности свойств тяжелых металлов и существенного отличия стоимости реагентов-осадителей (извести и сульфата натрия), доказано преимущество применения ступенчатого осаждения, кроме увеличения степени очистки воды это обеспечивает возможность реализации соединений металлов в осадках.

6. Анализ технологий обессоливания шахтных вод показывает безальтернативность применения мембранных технологий обработки вод повышенной минерализации. Исследование эффективности применения обратноосмотических аппаратов для обессоливания вод повышенной минерализации позволило получить критериальное уравнение, характеризующее влияние основных режимов: расхода, скорости потока обессоливания воды, солесодержания воды, длины хода потока, расстояния между мембранами и давления исходной воды на степень обессоливания в обратноосмотических установках. Установлено, что оптимальное давление исходной воды для солесодержания исходной воды $\sim 2\text{ г/дм}^3$ изменяется в пределах $10\div 14$ бар в зависимости от стоимости электроэнергии.

7. Для экологической безопасности применения обратноосмотических технологий обессоливания шахтной воды обоснована целесообразность использования испарения и вымораживания для обработки ретентата. Доказано, что применение вымораживания обеспечивают ряд экологических преимуществ, обусловленных значительно меньшими затратами энергоресурсов. Характерно, что дискретные характеристики структур воды вызывают необходимость отмывки твердой фазы или применения ступенчатого

вымораживания.

8. В соответствии с решением правительства Донецкой Народной Республики при использовании теоретических и практических разработок автора разработаны и утверждены в МОН рекомендации по использованию шахтных вод в промышленных целях. Материалы по исследованию вод повышенной минерализации применяются в учебном процессе при подготовке магистров в ДонНАСА по направлению 20.04.01 «Инженерная защита окружающей среды» по дисциплине «Технология очистки сточных вод». Результаты исследований используются при разработке проекта обеспечения питьевой водой г. Снежное. Ожидаемый экономический эффект от внедрения научно-технических разработок по использованию шахтных вод составляет 10,65 млн. руб. в год.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. **Гулько, С.Е.** Опыт и перспективы использования шахтной воды [Текст] / С.Е. Гулько, И.И. Гомаль // Уголь Украины. – 2013. – №6, – С. 30-34. *(Сделан детальный обзор опыта применения и выдвинуты предложения по более широкому использованию шахтной воды в промышленности).*

2. **Гулько, С.Е.** Анализ состава и состояния гидротехнических сооружений угольных шахт [Текст] / С.Е. Гулько, И.И. Гомаль // Вісті Донецького гірничого інституту. Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. – 2013. – №1 (32), – С. 78-84. *(Выполнен анализ состояния гидротехнических сооружений угольных шахт и сделаны выводы о необходимости их модернизации).*

3. **Высоцкий, С.П.** Использование шахтных вод для питьевого водоснабжения и в производственных циклах промышленных предприятий [Текст] / С.П. Высоцкий, **С.Е. Гулько** // Вісті Донецького гірничого інституту. Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. – 2013. – Ч.1. – №2 (33), – С. 200-208. *(Обоснована возможность использования шахтных вод для получения пресной воды и в оборотных циклах промышленных предприятий).*

4. **Vysotsky, S.P.** Economic and ecological features of water cleaning on weak acidic cation exchange resin for district heating systems [Text] / **Vysotsky S.P, Gulko S.E.** // Проблеми екології. Загальнодержавний науковий журнал. – 2014. – № 1 (33). – С. 3-9. *(Определены экологические преимущества применения карбоксильных катионитов при умягчении вод повышенной минерализации. Приведена методика расчета необходимой загрузки фильтров).*

5. **Высоцкий, С.П.** Использование шахтных вод в качестве резервного источника водоснабжения [Текст] / С.П. Высоцкий, **С.Е. Гулько** // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка-МакНИИ. – 2014. – №1 (33). – С. 82-98. *(Обоснованы принципы определения какие соединения необходимо удалять из шахтной воды и в каком количестве в зависимости от потребителей).*

6. **Высоцкий, С.П.** Риски затопления шахт и использование шахтных вод [Текст] / С.П. Высоцкий, В.В. Лихачева, **С.Е. Гулько** // Вестник Автомобильно-дорожного института ДонНТУ. – 2016. – № 1 (18) – С. 88-95. *(Обоснованы уровни рисков при*

затоплении шахт и приведены рекомендации по использованию откачиваемых шахтных вод).

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН РФ:

1. Высоцкий, С.П. Кристаллизация карбоната кальция в оборотных системах водопользования [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Вода: химия и экология. – М.: – 2016. – №1. – С. 69-75. *(Обосновано влияние накипеобразователей на экологические характеристики использования вод повышенной минерализации в местах теплоснабжения и оборотных циклах промышленных предприятий. Определено влияние рПК, рПР и рН на растворимость и индукционный период кристаллизации карбоната кальция).*

2. Высоцкий, С.П. Выбор альтернативных решений для подготовки воды для подпитки тепловых сетей [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Энергосбережение и водоподготовка. – М.: – 2016. – № 4 (102). – С. 3-8. *(Выполнен анализ технологий обработки воды для подпитки тепловых сетей с точки зрения снижения загрязнения поверхностных вод и уменьшения затрат на природоохранные мероприятия).*

3. Высоцкий, С.П. Совершенствование технологий обессоливания воды в обратноосмотических установках [Текст] / С.П. Высоцкий, М.В Коновальчик., С.Е. Гулько // Теплоэнергетика. – М.: – 2017. – № 7. – С. 91-98. *(Выполнен анализ работы обратноосмотических технологий обессоливания вод повышенной минерализации. Разработано критериальное уравнение процесса переноса пермиата. Разработаны принципы регулирования производительности установки и степени обессоливания путем изменения схем подключения модулей).*

4. Vysotsky, S.P. Improvement of water desalination Technologies in Reverse Osmosis Plants [Electronic resource] / S.P. Vysotsky, M.V. Konovalchik, S.E. Gulko // Thermal engineering. Pleiadesing, Inc. – 2017. – Vol. 64 – № 7. – P. 542-548. – Access mode : <https://doi.org/10.1134/S0040601517070114>. *(Обосновано использование карбоксильных катионитов для снижения карбонатного индекса. Приведены теоретические зависимости определения снижения щелочности для выбора загрузок фильтров).*

– публикации в рецензируемых научных изданиях, утвержденных перечнем ВАК МОН Донецкой Народной Республики:

1. Высоцкий, С.П. Экологические риски при эксплуатации и закрытии угольных [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. 2017. Вып. 2017-5 (127). – С. 18-25. *(Обоснованы уровни рисков при затоплении шахт и приведены рекомендации по использованию откачиваемых шахтных вод).*

2. Высоцкий, С.П. Экологические риски и особенности использования шахтных вод для подпитки тепловых сетей [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Вестник Академии гражданской защиты: научный журнал. – Донецк: ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2018. – Вып. 2 (14). – С. 20-26. *(Приведены особенности применения шахтных вод в системах теплоснабжения с закрытым водоразбором и обоснована технология их обработки по снижению карбонатного индекса).*

3. Высоцкий, С.П. Особенности процессов вымораживания водных растворов [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современное промышленное и гражданское строительство. 2018. Вып. 2018 – Т. 14. – №2. – С. 109-116. *(Обоснованы преимущества очистки вымораживанием вод повышенной минерализации перед упариванием воды).*

Приведены теоретическое обоснование причины низкой степени деминерализации и метод решения этой проблемы).

4. **Гулько, С.Е.** Особенности использования шахтных вод в промышленных целях [Текст] / С.Е. Гулько, С.П. Высоцкий // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. 2018. Вып. 2018-5 (133). – С. 109-116. *(Приведено обоснование технологии очистки вод шахт повышенной минерализации от накипеобразователей с оценкой КПД очистки в зависимости от типа реагента и выбора технологии очистки подпиточной оборотной воды).*

– публикации по материалам конференций:

1. **Гулько, С.Е.** Использование шахтных вод в системах питьевого и технического водоснабжения [Текст] / С.Е. Гулько // Сборник материалов первого международного форума: «Зеленый город: взгляд в будущее» (Горловка, 31 мая – 1 июня 2013 г.). – 2013. – С. 147-151.

2. **Гулько, С.Е.** Технологические риски при эксплуатации и закрытии угольных шахт [Электронный ресурс] / С.Е. Гулько // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс] / Под ред.: С.Г. Костюк. – Кемерово: КузГТУ. – 2017. – С. 111-1 – 111-11. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/BGD/2017/bgd2017/pages/Articles/111.pdf>.

3. **Гулько, С.Е.** Техносферная безопасность при ликвидации шахт в Донецке [Текст] / С.Е. Гулько, И.И. Гомаль // 14-я Международная Конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» 30-31 октября 2018 г. В 2 т. Т. 1: материалы конференции. Тула: Изд-во ТулГУ. – 2018. – С. 371-379. *(Определено количество, производительность и схема расположения водоотливов, необходимых для обеспечения техногенной безопасности действующих шахт и объектов поверхности при ликвидации шахт в г. Донецке).*

4. **Гулько, С.Е.** Уменьшение вредного влияния шахтных вод на окружающую среду [Текст] / С.Е. Гулько, С.П. Высоцкий // IV Международная научно-практическая конференция. Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. «Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации». – 2019. – №10 (28). – С. 82-89. *(Проанализированы пути снижения вредного влияния сбросов шахт).*

– публикации в других изданиях:

1. Высоцкий, С.П. Очистка, кондиционирование и использование вод повышенной минерализации [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько – Донецк: «Каштан», 2014. – 324 с. *(Выполнен анализ применения вод повышенной минерализации в различных отраслях промышленности в частности в тепловой энергетике, металлургии и в коммунальных котельных).*

2. Высоцкий, С.П. Совершенствование технологии очистки шахтных вод от взвешенных частиц [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2016. – № 3 (53). – С. 70-78. *(Обоснованы преимущества очистки шахтных вод от взвешенных частиц в тонкослойных аппаратах с дозировкой высокодисперсного песка для инициирования и ускорения процесса регуляции).*

3. Высоцкий, С.П. Снижение вредного воздействия горных предприятий на окружающую среду [Текст] / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Научный вестник НИИГД

«Респиратор». – 2017 – № 1 (54), – С. 65-74. (*Обоснованы методы снижения вредного действия горных предприятий на окружающую среду за счет очистки шахтных вод от взвешенных частиц*)

4. **Гулько, С.Е.** Особенности использования шахтных вод в оборотных циклах промышленных предприятий / С.Е. Гулько // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации. – 2017. – ч. 2. – №3 (5). – С. 177-179.

5. **Высоцкий, С.П.** Менеджмент использования шахтных вод [Текст] / С.П. Высоцкий, **С.Е. Гулько** // Научно-практический журнал «Строитель Донбасса». – 2018. – №4 (5). – С. 28-31. (*Обоснованы показатели, определяющие условия применения шахтных вод в оборотных системах охлаждения, для подпитки тепловых сетей и для охлаждения кристаллизаторов в установках непрерывной разливки стали*).

АННОТАЦИЯ

Гулько Сергей Евгеньевич. Научные основы экологически безопасных технологий при использовании шахтных вод. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства. – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка – 2020.

В диссертационной работе усовершенствованы экологически безопасные технологии обработки шахтных вод, которые обеспечивают рациональное использование природных ресурсов и соответствие нормативам вредного воздействия на окружающую среду. Для подпитки тепловых сетей обосновано применение умягчения на карбоксильных катионитах. Решены проблемы выбора загрузок ионитов с учетом карбонатного индекса и предельных значений индекса в зависимости от температуры подогрева воды. Экспериментально определены значения индукционного периода кристаллизации гипса, позволяющих обоснованно выбирать концентрацию регенерационных растворов.

Важнейшей экологической и технологической проблемой явилось определение условий экономичного и надежного использования воды с предотвращением загрязнения конденсаторов турбин, оросителей градирен и теплообменников. Решены задачи определения интенсивности накипеобразования в зависимости от концентрации ионов кальция, щелочности воды и *pH*. Определены значения индукционного периода при кристаллизации карбоната кальция. Показано, что при разных температурах теплоносителя критическая щелочность воды, влияющая на размер кристаллов равна $7 \text{ мг} \cdot \text{экв} / \text{дм}^3$. Учитывая высокое содержание в шахтных водах соединений тяжелых металлов, обоснована технология их удаления методом осаждения. Показано, что амфотерность многих гидратных соединений тяжелых металлов обуславливает необходимость их ступенчатого осаждения.

Теоретически решены вопросы очистки шахтных вод с использованием обратного осмоса. Выведено критериальное уравнение и определено влияние длины хода потока обрабатываемой воды, концентрации солей, коэффициентов диффузии и вязкости на параметры процесса обессоливания воды. Обоснована схема регулирования потоков

пермиата и ретентата позволяющая гибко регулировать производительность установки и степень обессоливания воды.

Ключевые слова: технологии обработки шахтных вод, подпитка тепловых сетей, интенсивность накипеобразования, индукционный период, концентрация регенерационных растворов, обратный осмос, удаление тяжелых металлов.

ANNOTATION

Gulko Sergey Evgenievich. **The scientific basis of environmentally friendly technologies when using mine water.** – On the rights of the manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.23.19 – Environmental safety of construction and urban economy. - State educational institution of higher professional education "Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture". – Makeevka – 2020.

In the dissertation, environmentally friendly technologies for the treatment of mine water are improved, which ensure the rational use of natural resources and compliance with the standards of harmful effects on the environment. The use of softening on carboxylic cation exchangers is justified for feeding heating networks. The problems of choosing ionite loadings taking into account the carbonate index and the limiting index values depending on the temperature of water heating, were solved. The values of the induction period of gypsum crystallization are experimentally determined, which make it possible to reasonably choose the concentration of regeneration solutions.

The most important environmental and technological problem was the determination of the conditions for the economical and reliable use of water with the prevention of pollution of turbine condensers, cooling tower sprinklers and heat exchangers. The problems of determining the scale formation intensity are solved depending on the concentration of calcium ions, alkalinity of water and *pH*. The values of the induction period during crystallization of calcium carbonate are determined. It was shown that at different temperatures of the coolant, the critical alkalinity of water, affecting the size of the crystals, is $7 \text{ mg}\cdot\text{eqv}/\text{dm}^3$. Considering the high content of heavy metal compounds in mine waters, the technology of their removal by the precipitation method is justified. It has been shown that the amphoteric nature of many hydrated compounds of heavy metals necessitates their stepwise deposition.

Theoretically resolved issues of mine water treatment using reverse osmosis. The criterion equation is derived and the influence of the path length of the treated water stream, salt concentration, diffusion coefficient and viscosity on the parameters of the process of water desalination is determined. The flow control scheme for permeate and retentate flows is justified, it allows flexible control of the plant performance and the degree of water desalination.

Keywords: mine water treatment technologies, make up district heating system, scale formation intensity, induction period, concentration of regeneration solutions, reverse osmosis, heavy metal removal.