

На правах рукописи



КАРМАЛОВ Александр Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
ХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ
ПОЛИМЕРНЫХ ФИЛЬТРОВ**

Специальность 2.1.4. Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск - 2025

Работа выполнена на кафедре водоснабжения и водоотведения
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Научный руководитель: **Сколубович Юрий Леонидович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», ректор, член-корр. РААСН (г. Новосибирск)

Официальные оппоненты: **Матюшенко Анатолий Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой инженерных систем, зданий и сооружений (г. Красноярск)

Терехов Лев Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики (г. Санкт Петербург)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (г. Симферополь)

Защита состоится « 28 » февраля 2025 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета ИРНТУ.05.03 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу <http://www.istu.edu>.

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета ИРНТУ.05.03, Лавыгиной О.Л. e-mail: lavyginaol@ex.istu.edu; тел.89086628066

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



О.Л. Лавыгина

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Государственная программа «Чистая вода» предусматривает необходимость достижения высоких стандартов и требований, предъявляемых к качеству питьевой воды. Программа нацелена на решение сложных инженерно-технических задач, связанных с обеспечением и поддержанием микробиологических и химических показателей воды, защитой и сохранением водозаборного оборудования, внедрением новых и безопасных материалов и технологий. Следует отметить, что, начиная с 90-х годов прошлого столетия, в связи с затяжным характером изменения форм собственности, отсутствием своевременного технического обслуживания, ремонта и санации, увеличилась аварийность сетей и сооружений систем водоснабжения, сократился срок их службы, в том числе и водозаборных скважин, многие из которых в результате кольматации фильтров и прифильтровых зон потеряли производительность и вышли из строя. Возникла проблема организации эффективной эксплуатации и восстановления вышедших из строя водозаборных скважин. Как показал проведенный анализ, малозатратных и доступных технологий восстановления скважин на сегодняшний день нет, и поэтому проблема решается в основном путем строительства новых скважин, что не всегда является эффективным и экономически обоснованным решением этой проблемы.

Повышение эффективности использования и восстановления водозаборных скважин может быть достигнуто путем исследования процесса кольматации, количественного и качественного состава отложений, а также разработки на основе этих исследований регламента эксплуатации водозаборных скважин в сочетании с мероприятиями и средствами, предотвращающими эти негативные процессы. В конструкциях водозаборных скважин, в основном применяются стальные обсадные трубы и гидравлически несовершенные проволочные или сетчатые фильтры на трубчатых (стальных) каркасах с щелевыми или круглыми отверстиями, отличающиеся низкой эффективностью и качеством.

Большая часть водозаборных скважин для питьевого водоснабжения Сибирского региона пробурена в период 1970-1991 гг., из которых более половины в настоящее время снизили свою производительность или не работают. Для их восстановления требуется решение задач организационного, технического, экономического и правового характера в комплексной системе «водоисточник – водозабор – водоподготовка – подача и распределение воды».

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время проблема обеспечения работоспособности скважин решается путем их регенерации. Значительный вклад в это направление внесли такие известные ученые, как Ивашечкин В.В., Алексеев В.С., Кружилин Р.А., Акульшин А.А., Цымбалов А.А., Гребенников В.Т., Лобачёв П.В., Карелин В.Я., Минаев А.В., Турк В.И., Абрамов Н.Н., Лезнов Б.С., Авсюкевич А.П., Сомов М.А., Карамбиров С.Н., Штейнмиллер О.А., Фисенко В.Н., Щербаков В.И., Николенко И.В., Али М.С., а также зарубежные учёные: Гуринович А.Д., Thomas M., Tolvanen J., Anderson H., Sophocles S., Todini E., Rossman L и другие. Авторы

рассматривают кольматацию, как основную причину снижения производительности водозаборных скважин и предлагают различные способы решения данной проблемы, в основе которых лежат процессы регенерации скважин. Разработан и апробирован в производственных условиях ряд методов регенерации водозаборных скважин, позволяющих провести их восстановление. При этом рекомендуется применение как физических, так и химических методов декольматации. При выборе метода регенерации авторы руководствуются преимущественно физической природой кольматирующих отложений и экономическими затратами. Данный подход не всегда учитывает специфику условий и время эксплуатации водозаборных скважин, а также наличие антропогенной нагрузки на территории водозаборов. В частности, степень физического износа внутрискважинного оборудования может стать лимитирующим фактором для использования химической регенерации водозаборных скважин.

Таким образом, авторами рассматривается химическая регенерация чаще всего как изолированный процесс, без учета анализа природных и техногенных факторов.

Объектом исследования являются водозаборные скважины Сибирского региона.

Предметом исследования являются гидрохимические показатели воды, процессы кольматации и регенерации скважин как факторы, определяющие повышение эффективности эксплуатации подземных водозаборов.

Цель работы

Исследование и выявление причин снижения дебита скважин, факторов, влияющих на процесс их регенерации и разработка комплексного подхода к восстановлению водозаборных скважин для повышения эффективности эксплуатации и надежности подземных водозаборов.

Задачи работы:

- провести анализ причин снижения производительности водозаборных скважин на примере населенных пунктов Сибирского региона;
- изучить влияние природных и техногенных факторов на условия формирования, а также изменения количественного и качественного состава подземных вод;
- исследовать процессы кольматации и регенерации скважин, оценить эффективность диагностических работ и применения фильтров из композитных материалов;
- разработать комплексный подход к восстановлению водозаборных скважин, основанный на предварительном изучении природных и техногенных причин кольматации, обосновании технологических параметров регенерации и применения полимерных фильтров;
- доказать эффективность разработанного комплексного подхода к восстановлению производительности скважин на примере водозаборов Томской и Новосибирской областей, выполнить технико-экономическое обоснование предложенного комплексного подхода.

Методы исследования

Для обследования водозаборных скважин использовался метод телеметрии, относящийся к комплексу геофизических исследований. Для обследования скважин применялся мобильный видеокомплекс, оборудованный фронтальной и боковой видеокамерами «КП-512ВК». На водозаборах гг. Томска, Северска видеообследование скважин проводилось системой телеинспекции jProbe LONG с моторизованным барабаном (ООО «ДЖЕНЕРАЛ ОПТИКС»).

Для определения микробиологического исследования использовались микроскопический метод (бактериоскопический и вирусоскопический), и культивирование, и выделение чистых культур микроорганизмов. При количественной оценке роста в пробирках пользовались таблицами Мак-Креди. Гетеротрофы определялись на мясопептонном агаре, разведенном в 10 раз, культивировались при температуре $19\div 24^{\circ}\text{C}$ в течение 7 суток. Сапрофиты различных трофических уровней выявляли посевом аликвоты на мясопептонный агар различной концентрации. Мезофильные сапрофиты высевались на концентрированный неразведенный мясопептонный агар. Аммонифицирующие бактерии выявляли на среде РВ. Нефтеокисляющие бактерии выявляли на агаризованной среде Мюнца. Нитрифицирующие микроорганизмы выявлялись на среде Виноградского методом предельных разведений. Сульфатредуцирующие бактерии культивировались на средах Таусона, Штурма. Эксперименты по определению микробиологических показателей, а также химического состава отложений проводились в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии ФГАОУ ВО «Национальный институт Томский политехнический университет».

Для измерения плотности откачиваемой субстанции использовался поплавковый плотномер. Выявление закономерностей и прогнозирование интенсивности коррозионных процессов в скважинном оборудовании проведено с помощью методов статистического анализа. Математическая обработка данных лабораторных исследований осуществлялась с помощью пакетов прикладных программ Microsoft Excel. Аналитические исследования выполнялись в аккредитованных лабораториях АО «Северский водоканал» и ОАО «Томскгеомониторинг».

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Степень достоверности результатов исследования обусловлена их соответствием ранее полученным результатам и разработкам и многолетним наблюдением за изменениями естественной структуры фильтрационных потоков подземных вод. Исследования проводились в лабораториях, имеющих аккредитацию в соответствующей области. Используемые физико-химические и математические модели и методы согласуются с реальными процессами кольматации в трубном пространстве водозаборных скважин. Выводы достаточно хорошо коррелируются с результатами, полученными другими исследователями, и не противоречат физическим закономерностям в смежных областях знаний.

Научная новизна

1. Разработан комплексный подход к восстановлению закольматированных водозаборных скважин, основанный на предварительных гидрогеохимических исследованиях околотрубного пространства, применении методов химической регенерации и использовании новых конструкций полимерных фильтров.

2. Выявлены закономерности воздействия различных физиологических групп микроорганизмов на процессы кольматации скважин и образования отложений на трубопроводах и оборудовании.

3. На основании установленной специфики микрофлоры в воде околотрубного пространства получены зависимости интенсивности коррозионных процессов скважинного оборудования от времени эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Значение для теории образования отложений на поверхности скважин состоит в том, на процесс их формирования оказывают различные компоненты микрофлоры, находящиеся в воде и в околотрубном пространстве.

2. Предложена типовая схема, состоящая из четырех последовательных этапов процесса восстановления скважин, учитывающая не только качественный и количественный состав подземных вод, но и условия эксплуатации водозаборов.

3. Разработан технологический регламент эксплуатации подземных водозаборов, внедрение которого в производственных условиях позволит существенно продлить срок их службы и избежать строительство новых скважин.

4. Определены оптимальные параметры применения соляной кислоты (концентрация –12-15 мас. %, время выдержки в стволе скважины – 5-24 ч.) и бисульфата натрия (концентрация –10-12 мас. %, нагрев до 45÷50°С) для регенерации скважин с различной степенью кольматации.

5. Предложено для скважин с высоким риском кольматации и значительной коррозией применять фильтры из полимерных материалов, конструкции которых разработаны автором.

6. На примере водозаборных сооружений Томской, Новосибирской областей, показана эффективность разработанного комплексного подхода, позволившего снизить себестоимость работ по капитальному ремонту водозаборных скважин и обеспечить экономический эффект. В частности, на водозаборе г. Асино полученный экономический эффект составил более 4 млн. руб.; на территории площадки ООО «Томлесдрев» (г. Томск) полностью восстановлены 4 неработающие скважины путем химической регенерации, экономический эффект составил более 20 млн. руб. Имеются соответствующие акты о внедрении.

Положения, выносимые на защиту

1. Комплексный подход к эксплуатации и восстановлению работающих и закольматированных водозаборных скважин, включающий четыре этапа: оценку гидрогеохимических показателей воды и гидротехнических параметров скважины; диагностику и изучение содержания солей и веществ, образующих

состав кольматанта; химическую регенерацию скважины и оценку эффективности ее применения.

2. Закономерности, определяющие интенсивность коррозионных процессов в скважинном оборудовании в зависимости от уровня воздействия физиологических групп микроорганизмов подземных вод, которые позволяют оптимизировать условия химической регенерации водозаборных скважин.

3. Методика определения оптимальных параметров применения соляной кислоты для регенерации скважин с высокой степенью кольматации.

4. Результаты применения полимерного фильтра для водозаборных скважин, позволяющего обеспечить работоспособность внутрискважинного оборудования в агрессивных условиях водоносных горизонтов.

5. Результаты расчетов эффективности использования предлагаемого подхода к регенерации внутрискважинного оборудования на примере интенсификации работы водозаборных сооружений Томской, Новосибирской областей.

Личный вклад автора. Автор с 1985 по 2024 гг. принимал непосредственное участие в работах, связанных с регенерацией артезианских скважин Северского, Томского, Орловского месторождений подземных вод и одиночных скважин Сибирского региона. В соответствующие эксплуатационные организации автором внедрена методология комплексной регенерации водозаборных скважин совместно с установкой дополнительных фильтров из композитных материалов и использованием стеклопластиковых водоподъемных колонн.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены на конференциях различного уровня: научно-практическая конференция «Основные водохозяйственные проблемы и пути их решения» (г. Томск, Томскводоканал, 2005); научно-практическая конференция «Обеспечение безопасности питьевого водоснабжения и водоотведения» (г. Новосибирск, НГТУ, 2006 г.); научно-производственная конференция «Решение проблем экологической безопасности в водной отрасли» (г. Новосибирск, НГТУ, 2009 г.), VII Международная научно-производственная конференция «Надежность и экологическая безопасность работы систем водоснабжения и водоотведения», (г. Новосибирск, НГТУ, 2011 г.); V Международная специализированная выставка «Композит-Экспо» 2012 (г. Москва, МВЦ Крокус Экспо, 2012 г.); VII Международная научно-производственная конференция «Решение проблем экологической безопасности в водохозяйственной отрасли», (г. Новосибирск, НГТУ, 2012 г.); научно-практическая конференция, посвященной памяти академика РАЕН, профессора, д.т.н. А.Ф. Порядина «Экологическая безопасность водопользования» (г. Новосибирск, 2022 г.).

Область исследования

соответствует паспорту научной специальности 2.1.4. «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов», а именно п. 2 «Качество природных и сточных вод, методы определения отдельных

компонентов загрязнений, закономерности процессов их взаимодействия в водных объектах и в системах водного хозяйства, прогнозирование изменения качества воды в естественных и искусственных водных объектах», п. 17 «Предотвращение отложений, биологических обрастаний, коррозии трубопроводов, оборудования и сооружений в системах водного хозяйства».

Публикации

Автор имеет по теме диссертации 24 работы, в том числе одну монографию, одну статью в сборнике Scopus, 8 статей в журналах из перечня ВАК, одно авторское свидетельство.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 139 наименований. Работа изложена на 216 страницах машинописного текста, включая 23 таблиц и 107 рисунков; имеется 10 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность диссертационной работы, степень разработанности обозначенной проблемы, определены объект и предмет исследования, представлена формулировка научно-технической гипотезы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния подземных вод Сибирских регионов, который показал, что подземные воды имеют повышенное содержание железа и марганца, а также значительное количество органических примесей, которые в сочетании с жизнедеятельностью бактерий создают активную коррозионную среду.

В технических системах водоснабжения, как и в природных условиях, вода, содержащая растворенные компоненты, обладает способностью реагировать на изменение термодинамических условий (температура, давление, газовый режим) и, соответственно, изменять свой химический состав, вследствие чего из раствора выводится твердая минеральная фаза. В связи с этим при эксплуатации водозаборов из подземных источников неизбежно возникают проблемы, связанные с ухудшением фильтрационных свойств водовмещающих пород и уменьшением дебитов эксплуатационных скважин.

Выполнен анализ методов регенерации скважин. Показано, что известные методы регенерации скважин не позволяют эффективно их восстанавливать, вследствие наличия в них не только химических, но и биологических обрастаний.

Во второй главе приведены экспериментальные исследования, выполненные на водозаборных сооружениях г. Северска, г. Томска и г. Асино. Составлена карта фактического состояния эксплуатационных скважин и наблюдательной сети на территории влияния Томского и Северских водозаборов. По результатам многолетних режимных наблюдений за уровнями подземных вод и их качеством отмечено изменение естественной структуры

фильтрационных потоков подземных вод за счет формирования депрессионных поверхностей.

В период наиболее интенсивного техногенного загрязнения изучен микробиологический состав вод, количество бактерий, вызывающих коррозию водоподъемного оборудования, фильтров скважин, приборов. По количественному составу отдельных физиологических групп микроорганизмов воды скважин проведена экологическая оценка их состояния и подземного водоносного горизонта в целом. Отмечено, что 50% скважин водозабора характеризуется бактериальным загрязнением. Причем, большинство из них содержит разнообразные физиологические группы микроорганизмов, осуществляющих в аэробных и анаэробных условиях деструкцию минеральных и органических веществ и участвующих в биогеохимических циклах углерода, азота, серы (таблица 1).

Таблица 1 - Характер бактериального загрязнения подземных вод водозабора по данным микробиологического анализа

Физиологические группы микроорганизмов	№№ скважин с бактериальным загрязнением
Мезофильные сапрофиты	1, 11а, 14, 15
Уробактерии	1, 1а, 3, 4, 7, 9, 11а, 13, 15, 17а, 18, 19, 25а, 26
Гетеротрофы	3, 6, 15, 9, 11а, 13, 14, 25а
Нефтеокисляющие	13, 14, 17, 20, 24, 25, 26
Аммонифицирующие	1, 4, 6, 11а, 14, 16, 17, 18, 24
Денитрифицирующие	1, 3, 8, 11а, 13, 14, 15
Сульфатредуцирующие	1, 6а, 7, 8, 11а, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 26

Дана оценка влияния различных сельскохозяйственных и промышленных объектов на загрязнение подземных вод. Показано влияние каждого из бактериальных загрязнений на коррозионную активность воды в скважинах. Доказано, что коррозию в изученных скважинах могут вызывать как сульфатредуцирующие бактерии, так и денитрифицирующие микроорганизмы, с деятельностью которых связано наличие в некоторых скважинах повышенного количества аммиака.

Показано, что загрязнение мезофильными сапрофитами связано с проникновением в водоносный горизонт поверхностных стоков, загрязненных фекалиями. О том, что такая связь для подземных вод водозабора существует, свидетельствует наличие в воде скважин условно-патогенного микроорганизма *Proteus vulgaris*, типичным местообитанием которого обычно является почва, загрязненная органическими веществами животного происхождения.

Установлено, что микрофлора в подземной воде отрицательно воздействует на все элементы водозаборных сооружений, увеличивая степень коррозионной активности воды. Высокая коррозионная активность воды обусловлена комплексом микрофлоры, представленной гетеротрофными, аммонифицирующими, нитрифицирующими, денитрифицирующими и особенно сульфатредуцирующими бактериями. Доказано, что степень агрессивности воды (коррозионная активность) возрастает при наличии постоянного источника загрязнения, способствующего накоплению, например,

культур сульфатвосстанавливающих бактерий, вызывающих коррозию оборудования и трубопроводов. Высокая коррозионная активность воды обусловлена комплексом микрофлоры, представленной гетеротрофными, аммонифицирующими, нитрифицирующими, денитрифицирующими и особенно сульфатредуцирующими бактериями. По экспериментальным данным была установлена зависимость коррозионной активности микрофлоры от физиологических групп микроорганизмов (рисунок 1).

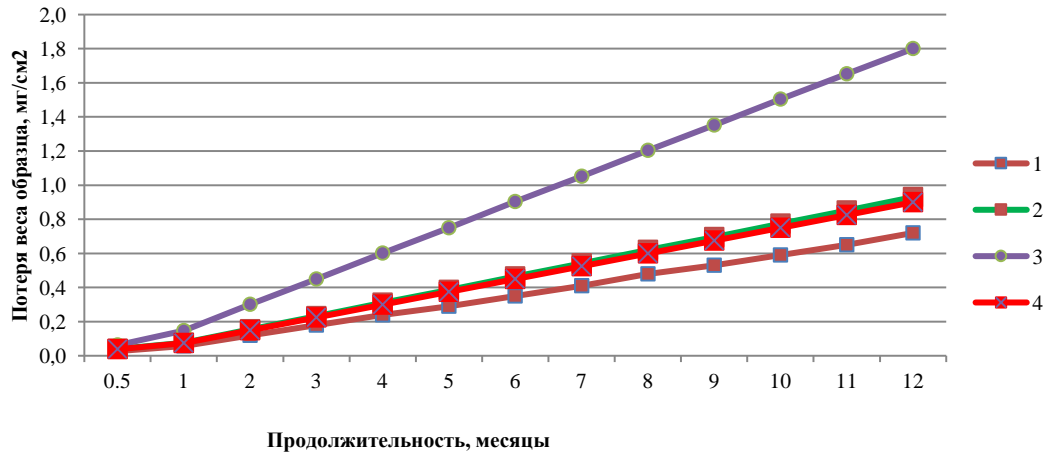


Рисунок 1 - Коррозионная активность микрофлоры
1 – воздействие воды; 2 – воздействие гетеротрофных бактерий; 3 – воздействие сульфатредуцирующих бактерий; 4 – воздействие нитрифицирующих бактерий

Зависимость коррозионной активности микрофлоры от времени представлена следующими уравнениями.

$$\text{Воздействие воды: } y = \begin{cases} \frac{2}{25}(2x-1), & x \in \left[\frac{1}{2}; 1\right], \\ \frac{2}{75}(2x+1), & x \geq 1. \end{cases}$$

$$\text{Воздействие гетеротрофных бактерий: } y = \begin{cases} \frac{1}{15}(2x-1), & x \in \left[\frac{1}{2}; 1\right], \\ \frac{1}{105}(8x-1), & x \geq 1. \end{cases}$$

Воздействие сульфатредуцирующих и нитрифицирующих бактерий:

$$y = \begin{cases} \frac{4}{25}(2x-1), & x \in \left[\frac{1}{2}; 1\right], \\ \frac{1}{75}(11x+1), & x \geq 1. \end{cases}$$

где x -время, мес., y - коррозионная активность, выраженная в потерях веса образца, мг/см².

Согласно проведенным исследованиям, микрофлора скважин водозабора представлена биоценозом органотрофных и автотрофных групп микроорганизмов, осуществляющих в аэробных и анаэробных условиях

разложение органических и минеральных веществ и участвующих в биогеохимических циклах углерода, азота, серы. В процессе добычи подземных вод формируются твердые минеральные образования в виде солей и отложение их в околоскважинном пространстве, прифилтровой зоне скважин и на их оборудовании (насосы, водомеры, трубы), фильтрах водозаборов и скважин.

Результаты лабораторного контроля показали на наличие техногенного загрязнения вод эксплуатируемого комплекса палеогеновых отложений, выраженное в повышении минерализации, концентрации хлоридов, сульфатов, аммония на отдельных участках территории водозаборов. При этом образуется пленка различной толщины, по мере увеличения которой под действием силы тяжести происходит ее отрыв и оседание в отстойнике или на забое. Коррозионные процессы приводят к образованию многочисленных питтингов и язв, водоподъемное оборудование теряет свою работоспособность.

Техногенное загрязнение хлоридами и сероводородными соединениями приводят к изменению геохимических особенностей воды в подземных горизонтах. Изменения геохимических условий вызывают усиление агрессивности среды к металлическим, железобетонным конструкциям инженерных сооружений водозабора. В связи с этим, на водозаборных скважинах довольно часто наблюдаются случаи коррозии водоподъемного оборудования и практически полного зарастания сечения труб и отверстий фильтров железистыми и минеральными отложениями (см. рисунки 2, 3, 4).



Рисунок 2-

Водоподъемные трубы
артезианской скважины



Рисунок 3-

Фильтр артезианской
скважины



Рисунок 4-

Отложения на фильтре
артезианской скважины

Исследования показали, что кольматирующие отложения водозаборов регионов Западной Сибири включают в себя соли кальция, магния, марганца (карбонаты), соединения железа в виде гидроксида, оксида, сульфида, фосфата (см. табл. 2). По данным анализа проб осадков, отобранных с электропогружных насосов, установлено присутствие гидроксида железа $Fe(OH)_3$.

Таблица 2 – Химический состав отложений водозаборов

Место отбора кольматанта	Содержание по весу, %											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ППП	FeO
Скв.ТВ	4,92	0,29	63,89	0,92	7,72	<0,2	0,03	0,15	7,63	0,24	14,71	0,36
Скв.СВ	4,55	0,31	70	5	3,47	<0,02	0,1	0,21	1,12	0,34	15,37	0,78
Скв.Ас	7,72	0,57	68,73	1,5	3,86	0,56	0,1	0,15	2,88	0,2	14,22	0,84

Скв.ТВ – скважины Томского водозабора, Скв.СВ – Северского водозабора, Скв.Ас – г. Асино; ППП – потери при прокаливании

На технологическом оборудовании водозаборов формируются бесструктурные охристые массы, которые образуются в условиях динамического водного потока на фильтрах и водоподъемных трубах эксплуатационных скважин, на погружных насосах и измерительной аппаратуре.

В третьей главе излагается комплексный метод, основанный на комплексной регенерации полностью вышедших из эксплуатации или работающих со сниженным от проектного дебитом водозаборных скважин.

В работе показано, что механическими и гидравлическими методами не достигается существенное повышение производительности скважин, т.к. не затрагивается прифильтровая зона, а также увеличивается риск нарушения целостности стальных конструкций длительно работающих скважин и непосредственно фильтра, где и возникает пескование.

В этом отношении эффективным является реагентный способ восстановления скважин. Как показали проведенные исследования, данный метод позволяет провести декольматацию не только фильтрующей поверхности ствола скважины, но и прифильтовой зоны артезианской скважины, что повышает эффект как по производительности скважины, так и по длительности сохранения повышенной водоотдачи водовмещающих пород.

Для химической реагентной обработки скважин могут быть использованы жидкие и порошкообразные реагенты кислотного действия. Автором проведены масштабные лабораторные и натурные исследования по подбору наиболее эффективного реагента для растворения кольматирующих отложений и определена его концентрация. Установлено, что наиболее эффективно растворение протекает при воздействии соляной кислоты и раствора бисульфата натрия (с его нагревом).

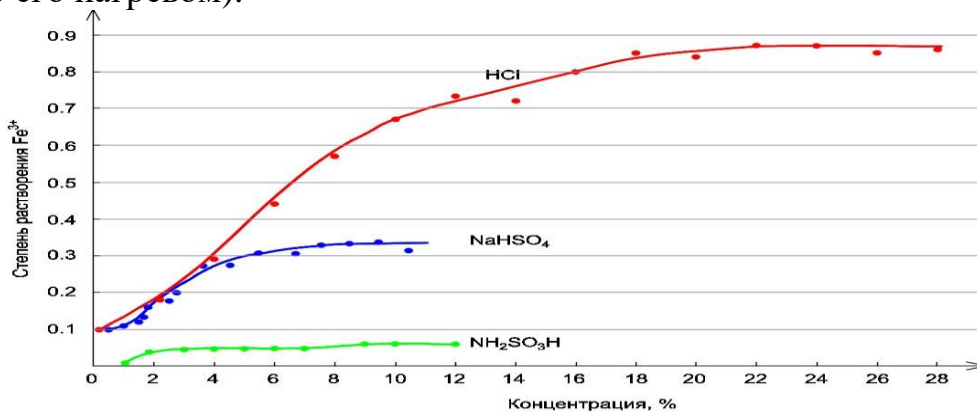


Рисунок 5 - Диаграмма растворимости железистых осадков в зависимости от концентрации различных реагентов

На основе экспериментальных данных установлена зависимость степени растворения железистых осадков от концентрации реагентов, которая имеет следующий вид:

$$\text{Для HCl: } y = \begin{cases} 0,0125x^2 + 0,1, & x \in [0; 4], \\ \frac{0,9x - 2,4}{x}, & x \geq 4. \end{cases}$$

$$\text{Для NaHSO}_4: y = \begin{cases} 0.015x^2 + 0.1, & x \in [0; 2], \\ \frac{0.377x - 0.489}{x - 0.345}, & x \geq 2. \end{cases}$$

$$\text{Для NaH}_2\text{SO}_3\text{H: } y = \begin{cases} 1.34\sqrt{x} - 1, & x \in [1; 2], \\ 0.55, & x \geq 2. \end{cases}$$

Однако, кислота или другие реагенты приводят к ускорению коррозионного процесса изношенных стенок фильтровых труб и сальниковой набивки, что не позволяет применять данный метод. В связи с этим, автор применил для регенерации ингибированную соляную кислоту с концентрацией в теле фильтра 12÷15%, с циклической подачей ее в прифильтровую зону и в прилегающий водоносный пласт. Оптимальное время контакта закольматированной скважины с кислотой составляет от 5 до 24 часов. Кроме соляной кислоты применялся порошкообразный бисульфат натрия, который не менее эффективен и в меньшей степени токсичен.

На рис. 6 приведены графики изменения удельного дебита скважин, подвергшихся химической обработке разными реагентами. При этом соляная кислота рекомендуется для обработки скважин с высокой степенью обрастания, когда структура кольматанта имеет прочно сцементированный характер. Во всех других случаях целесообразно применять бисульфат натрия.

Достаточный объем раствора для обработки скважины определяется по формуле:

$$V_p = V_\phi + V_{\text{пор}} + V_{\text{отс}} \quad (1)$$

где V_p – объем раствора, м³; V_ϕ – объем фильтра, м³; $V_{\text{пор}}$ – объем пор зоны кольматации, м³; $V_{\text{отс}}$ – объем отстойника, м³.

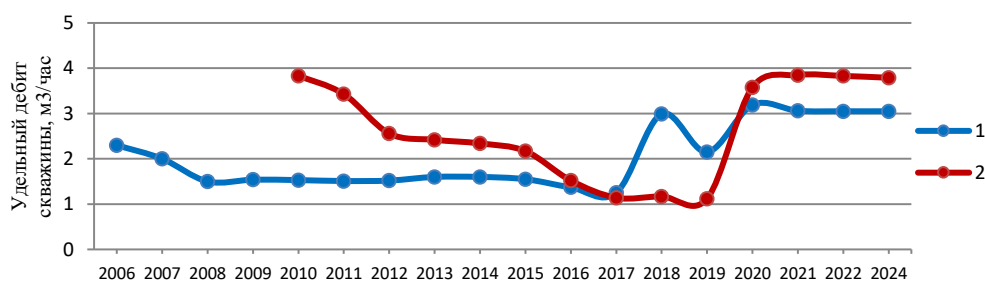


Рисунок 6 - Хронологический график наблюдения по скважинам № 33э (1) и № 27э (2) Томского водозабора подземных вод до и после проведения химической обработки бисульфатом натрия (1) и раствором соляной кислоты (2)

Выражая каждое слагаемое через геометрические размеры, объем раствора можно определить по формуле:

$$V_p = \frac{\pi d_{\text{фвн}}^2}{4} \cdot l_\phi + \frac{\pi D_k^2 - d_{\text{фн}}^2}{4} \cdot l_\phi \cdot n + \frac{\pi d_{\text{фвн}}^2}{4} \cdot l_{\text{отс}} \quad (2)$$

где $d_{\text{фвн}}$ – внутренний диаметр фильтра, м; $d_{\text{фн}}$ – наружный диаметр фильтра, м; $l_{\text{ф}}$ – длина фильтра, м; $D_{\text{к}}$ – диаметр зоны кольматации, как сумма наружного диаметра фильтра и двух размеров зоны кольматации, м; N – пористость породы ($n=0,08$); $l_{\text{отс}}$ – длина отстойника, м.

При приготовлении раствора необходимо также учитывать разбавление водой в фильтре скважины. При объеме жидкости в фильтре скважины, равном $V_{\text{ф}}$, объем жидкости в заливочной емкости составляет:

$$V_{\text{емк}} = V_{\text{р}} - V_{\text{ф}} \quad (3)$$

Объем воды $V_{\text{емк}}$ заливают в заливочную емкость и добавляют реагент, исчисляя его необходимую концентрацию в заливочной емкости из формулы:

$$C_{\text{емк}\%} = \frac{C_{\text{опт}\%} \cdot V_{\text{р}}}{V_{\text{емк}}}, \quad (4)$$

Где $C_{\text{опт}\%}$ – оптимальная концентрация реагента, %.

Как показали проведенные исследования, если скважина закольматирована и структура кольматанта имеет прочно сцементированный характер, целесообразно производить нагрев реагента в стволе фильтра с помощью скважинного нагревателя. Такой способ является терморегентным, он более трудоемок, но позволяет восстановить работоспособность скважин, выведенных из эксплуатации более 10-15 лет назад. Установлено, что процесс растворения наиболее интенсивен в диапазоне температур $45 \div 55^{\circ}\text{C}$.

В работе при регенерации скважин с кольматацией химического и бактериологического происхождения предложено применять фильтры из композитных материалов, и совместно с НПФ «Экотон» разработаны такие фильтры для водозаборных скважин, с повышенным коэффициентом фильтрации за счет увеличения перфорирования и степени напыления в зависимости от фракции водоносного песка. Впервые такой фильтр был установлен в скважине МП «Северский Водоканал». На рисунках 7 и 8 приведена расходограмма этой скважины. Начиная с октября 1995 года, скважина запесковала и была выведена из эксплуатации. После регенерации и установки дополнительного фильтра дебит скважины увеличился в 1,5 раза. На протяжении 5 лет артезианская скважина № 8 работала стабильно с дебитом $65 \div 80 \text{ м}^3/\text{час}$.

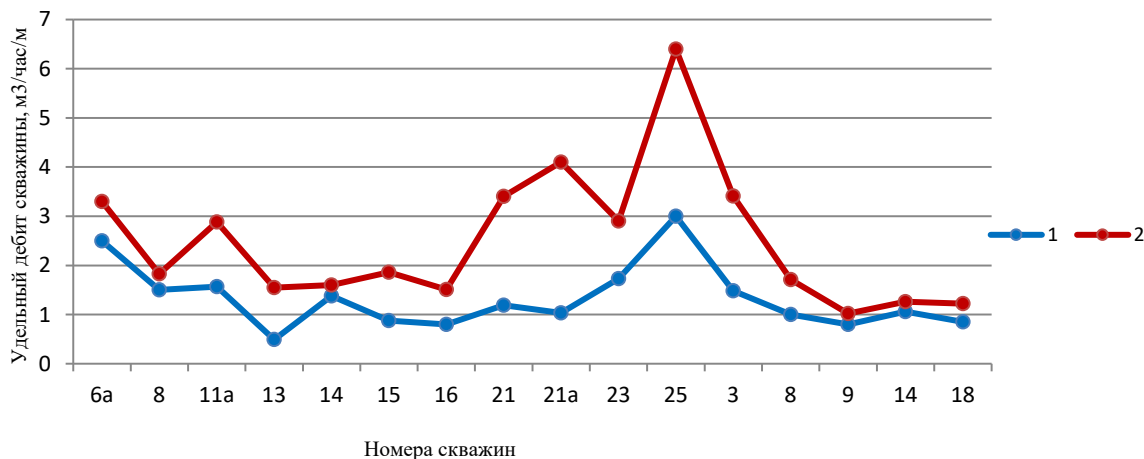


Рисунок 7 - Удельный дебит до (1) и после (2) установки полимерных фильтров



Рисунок 8 - Расходограмма по скважине № 8 водозабора № 2

На основе разработок автора были предложены фильтры из композитных материалов, которые оказались востребованы для практического использования при восстановлении водозаборных скважин как в Томской области, так и в центральной и южной части России. Благодаря постоянно проводимой работе по регенерации и использованию современных композитных материалов ОАО «Северский водоканал» и ООО «Томскводоканал» успешно эксплуатируют скважины возрастом до 50 лет без значительного уменьшения дебита по сравнению с первоначальным.

Комплексный подход к регенерации скважин представляет собой четыре этапа и приведен в виде блок-схем, представленных на рисунках 9-12.

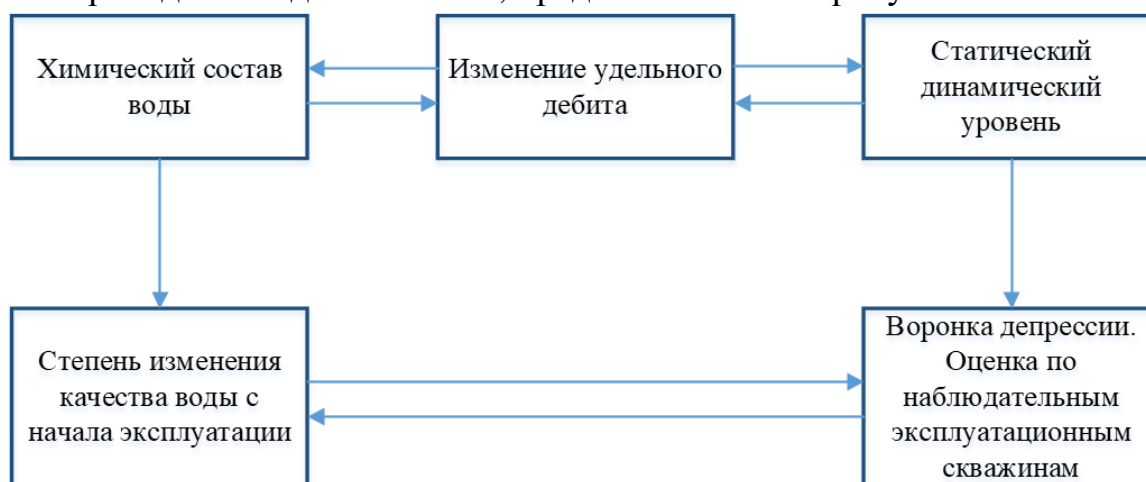


Рисунок 9 – I этап комплексного подхода к восстановлению скважин (оценка общих данных)

Первый этап включает в себя контроль изменения показателей химического состава и направлен изучение содержания солей жесткости, железа общего, марганца (солей и веществ, образующих состав кольматанта).



Рисунок 10 – Схема проведения диагностики (II этап комплексного подхода к восстановлению скважин)

Второй этап включает следующие виды работ:

1. Прокачка скважины эрлифтной установкой до забоя с целью удаления осевших взвешенных частиц и мелкодисперсных примесей.
2. Оценка откачиваемой субстанции по органолептическим показателям (запаху сероводородные, фенольные и др.), слизистым включениям и пескованию.
3. Добавление коагулянта с целью очистки ствола скважины и флокулянта (при необходимости) для образования осадения флокул с целью увеличения прозрачности в рабочей и фильтровой колоннах скважины с выдержкой 4÷5 суток до начала диагностики (в случае эксплуатируемых скважин).
4. При диагностике неэксплуатируемых скважин добавление коагулянта не рекомендуется. При этом необходимо визуализировать сложившееся состояние внутренней части скважины за время простоя и характер биологического обрастания и взвесей.
5. Монтаж видеокаротажного оборудования и дальнейшие операционные действия по оценке состояния рабочей колонны, сальниковых устройств, наличия кольматирующих отложений и дефектов в фильтровой колонне.
6. Визуальная оценка характера кольматирующих отложений на предмет биологического или химического происхождения, или их совокупности. Обнаружение и удаление посторонних предметов.



Рисунок 11 – Алгоритм принятия решений по химической регенерации (III этап комплексного подхода к восстановлению скважин)

На третьем этапе определяют вид и характер кальматирующих отложений. Рекомендовано до производства работ по регенерации скважин проводить обследование методом телеметрии.

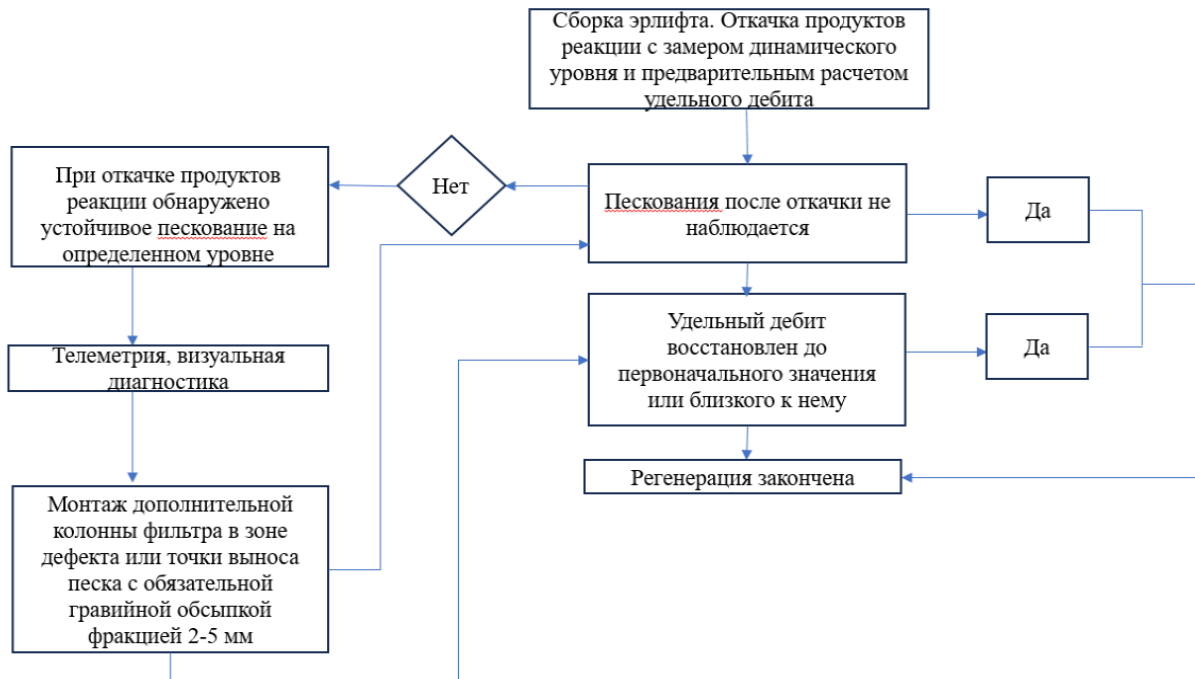


Рисунок 12 - Алгоритм оценки результатов регенерации (IV этап комплексного подхода к восстановлению скважин)

На четвертом этапе при откачке эрлифтом продуктов реакции с контролем плотности откачиваемой субстанции определяется удельный дебит и наличие пескования. При достижении удельного дебита от 60 до 100% от первоначального и отсутствия пескования регенерация считается оконченной. После этого монтируется водоподъемное оборудование, производятся химические анализы, осуществляется запуск скважины и ведется мониторинг согласно производственной программе.

При обработке скважин реагентами кислотного действия необходимо учитывать следующие особенности: образующиеся при реакции газы (CO_2 , H_2S , Cl_2) способны вызвать газлифтный подъем раствора по стволу скважины с выбросом на поверхность и опасную загазованность шахтных колодцев насосных станций, растворение неустойчивых конструктивных элементов скважин и др. Это предопределяет необходимость тщательной герметизации устья скважины при обработках, обязательную вентиляцию и продувку шахтных колодцев и насосных станций. После обработки скважину прокачивают от остаточного количества реагентов и продуктов реакции. Индикаторный контроль в полевых условиях возможен предложенным автором поплавковым плотномером, который позволяет исключить влияние натяжения жидкости для более точного измерения.

Если при откачке продуктов реакции обнаружено устойчивое пескование на определенном уровне, производится теледиагностика с обнаружением точки пескования.

Затем производится повторная эрлифтная откачка с параллельным монтажом фильтровой колонны из композитных материалов с отсыпкой межтрубного пространства просеянным гравием фракцией 2÷5 мм.

При повторном запуске скважины удельный дебит, достигнутый при регенерации, должен составлять не менее 60 % от начального. В этом случае восстановление скважины закончено. При наличии ускоренной коррозии стальных водоподъемных колонн с обрастанием железобактериями, колонна подлежит замене на стеклопластиковую.

В четвертой главе представлены результаты внедрения комплексного подхода к восстановлению водозаборных скважин, дебит которых значительно снижен относительно первоначального, либо закольматировавшихся полностью. Описан порядок выполнения работ и применяемое оборудование. Технология комплексной регенерации разработана автором, который впервые применил для инспекции и контроля процесса регенерации телеметрический метод, позволяющий оценить состояние скважины, эффективность применяемого для химической обработки реагента, рассчитать его количество.

В работе представлены результаты выполнения комплексной регенерации на примере трех скважин, расположенных в разных городах Томской области – Томск, Северск и Асино. До момента химической обработки скважины проработали от 26 до 54 лет. Такие скважины обычно выводят из эксплуатации. Однако после комплексной регенерации восстановлена их производительность на уровне от 60 до 100% от первоначального дебита (рисунки 13, 14).



Рисунок 13 -

Производительность скважин до (1) и после (2) проведения химреагентной обработки. Томское месторождение подземных вод



Рисунок 14 -

Производительность скважин до (1) и после (2) проведения химреагентной обработки. Северское месторождение подземных вод

Заключение содержит краткие результаты проведенных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы причины снижения производительности водозаборных скважин населенных пунктов Сибирского региона. На основании многолетних аналитических и экспериментальных исследований выявлено, что комплекс природных и антропогенных условий, в которых эксплуатируются водозаборные скважины Сибирского региона, существенно влияет на характер и процесс кольматации фильтров, прифильтровой зоны, околоскважинного пространства и гравийной обсыпки и, в конечном итоге, на производительность водозаборов.

2. Проведен анализ состояния подземных вод Сибирских регионов, который показал, что подземные воды имеют повышенное содержание железа и марганца, а также значительное количество органических примесей, которые в сочетании с жизнедеятельностью бактерий создают активную коррозионную среду.

3. На основе натурных исследований выявлены воздействия химических, биологических и других соединений на процессы кольматации скважин и образование отложений на трубопроводах и оборудовании. Установлено, что кольматирующие отложения водозаборов регионов Сибири включают в себя соли кальция, магния, марганца (карбонаты), соединения железа в виде гидроксида, оксида, сульфида, фосфата.

4. Разработан комплексный подход к восстановлению скважин, который основан на выявленных автором закономерностей кольматации скважин и новых технологий их восстановления. Комплексный подход включает: оценку общих данных; диагностику; принятие решений и оценку результатов. Для измерения плотности откачиваемого раствора рекомендован, разработанный автором прибор (плотномер), который обеспечивает высокую точность и оперативность исследования (а. с. № 1122920).

5. Разработан технологический регламент эксплуатации и регенерации подземных водозаборов, внедрение которого в производственных условиях позволит продлить срок их службы и избежать строительство новых скважин.

6. Предложен новый тип фильтра из полимерных материалов, позволяющий повысить производительность скважин на 50% и исключить коррозионное воздействие на конструкции скважин при ее химической регенерации.

7. На основе разработанной комплексной технологии восстановлено более 80 скважин в Томской и Новосибирской областях. Экономический эффект от внедрения предложенных организационных и технологических решений превысил 20 млн. руб. При этом значительно сократились затраты на ремонт и эксплуатацию скважин.

8. Практическая значимость диссертационных исследований подтверждена следующими актами о внедрении: МП Северский водоканал (г. Северск Томская обл.); МО «Неверский сельсовет» (Водозабор для хозяйственно-питьевых нужд с. Невер Амурская обл.); ООО «Томлесдрев» (г. Томск); МУП АГП «Асиновский водоканал», (г. Асино Томская обл.); ООО «ДМ – Сырный двор» (г. Северск Томская обл.).

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Развивать и внедрять в практику эксплуатации водопроводных скважин предложенный метод комплексного восстановления скважин с использованием реагентного метода и оборудования из композитных материалов.

2. Дополнить нормативную документацию в сфере хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов применением комплексного подхода в части эксплуатации подземных водозаборов.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. **Кармалов, А. И.** Применение полимерных фильтров "Экотон" при восстановлении и бурении скважин на воду / **А. И. Кармалов, С.В. Филимонова** // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 9. – С. 10-14.

2. **Кармалов, А. И.** Анализ причин кольматации и коррозии оборудования водозаборных скважин в условиях повышенной техногенной нагрузки / **А. И. Кармалов, С.В. Филимонова** // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 9-1. – С. 16-20.

3. **Кармалов, А. И.** Опыт эксплуатации и совершенствование системы обеззараживания воды с использованием гипохлорита натрия / Г. Е. Сиволов, **А. И. Кармалов, Г. Л. Медриш** [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 9-1. – С. 28-32.

4. **Кармалов, А. И.** Очистка и утилизация промывных вод скорых фильтров станций обезжелезивания / Ю. Л. Сколубович, **А. И. Кармалов, Е. Л. Войтов** // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 9-1. – С. 34-39.

5. Мартыненко, Г. Д. Реконструкция сооружений повторного использования промывной воды фильтров станции обезжелезивания / Г. Д. Мартыненко, А. Я. Найманов, А. А. Найманова, **А. И. Кармалов** // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 10. – С. 14-20.

6. Шелехов И. Ю. Мероприятия по увеличению степени надежности и эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения / И. Ю. Шелехов, О. Л. Лавыгина, А. И. Шелехова, **А. И. Кармалов**, В. Н. Кульков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2024. – Т. 14, № 3(50). – С. 608-616.

7. **Кармалов, А. И.** О техническом состоянии канализационного хозяйства крупного города / **А. И. Кармалов**, А. Ю. Сколубович // Известия вузов. Строительство. – 2024. – № 10. – С. 110-116.

8. **Кармалов А. И.** Исследование процессов вторичного минералообразования в водопроводных скважинах питьевого назначения / **А. И. Кармалов**, Ю. Л. Сколубович Ю. Л., В. Р. Чупин, И. Ю. Шелехов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2024. – Т. 14. № 4. (51) – С. 735-745

Публикация в издании, индексируемом в международной реферативной базе Scopus

9. **Karmalov, A.I.** Hydrogeochemical characteristics of water intakes from groundwater sources in Seversk / A. I. Karmalov, E. M. Dutova, I. V. Vologdina, D. S. Pokrovsky, V. D. Pokrovskiy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016. – Vol. 43. – p. 012032.

Статьи в других научных изданиях

10. **Кармалов, А. И.** Изучение состава водорастворенных газов в подземных водах водозабора на юге Томской области / Н. Г. Наливайко, **А. И. Кармалов** // Труды томских ученых по системам водоснабжения. – Томск, 2005. – С. 207–213.

11. **Кармалов, А. И.** Методы борьбы с пескопроявлением в артезианских скважинах / **А. И. Кармалов**, С. В. Филимонова // Основные водохозяйственные проблемы и пути их решения: материалы научно-практической конференции (Томск, 27-28 мая 2005 г.). – Томск, 2005. – С. 58–63.

12. **Кармалов, А. И.** Влияние техногенных нагрузок в зонах санитарной охраны на состояние водозаборных сооружений. / **А. И. Кармалов**, С. В. Филимонова // Обеспечение безопасности питьевого водоснабжения и водоотведения: сборник тезисов (г. Новосибирск, 17-18 мая 2006 г.). – Новосибирск: ООО РПК Основа, 2006. – С. 21–24.

13. **Кармалов, А. И.** Методы восстановления артезианских скважин. Решение проблем экологической безопасности в водной отрасли: тезисы / **А. И. Кармалов**, С. В. Филимонова. – Новосибирск: ООО РПК Основа, 2009. – С. 18–22.

14. **Кармалов, А. И.** Влияние техногенных нагрузок по площади водосбора на интенсивность коррозии и осадкообразование / **А. И. Кармалов**, С. В. Филимонова // Водные ресурсы и водопользование, 2012. – № 5. – С. 21–26.

15. Сиволов Г. Е. Оптимизация и энергоэффективность систем управления режимами водораспределения и водоотведения в ЗАТО Северск / Г. Е. Сиволов,

А. И. Кармалов, П. Б. Ивансон // материалы конференции (Москва: МВЦ «Крокус Экспо», 26-27 апреля 2012г.). – Москва, 2012. – С. 21–28.

16. **Кармалов, А. И.** Оптимизация режима работы скорых фильтров. Решение проблем экологической безопасности в водохозяйственной отрасли: сборник материалов / **А. И. Кармалов**. – Новосибирск: ООО «Основа-Мастер», 2012. – С. 13.

17. Бойко, В. П. Очерки истории водоснабжения и водоотведения / В. П. Бойко, Е. Ю. Осипова, **А. И. Кармалов** и др. – Томск: ТГАСУ, 2014. – 164 с.

18. **Кармалов, А. И.** Диагностическое обеспечение при регенерации водозаборных скважин / **А. И. Кармалов**, Н. А. Климова // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2017. – №7. – С. 38.

19. Гейль, А. В. Техничко-экономический эффект реконструкции скважин / А. В. Гейль, **А. И. Кармалов** // Материалы международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева, посвященной 10-летию института промышленных технологий и инжиниринга (Тюмень, 22–26 октября 2019 г.). – Тюмень: ТИУ, 2019. – С. 314–316.

20. **Кармалов А. И.** Долгосрочная эксплуатация артезианских скважин: проблемы и решения / **А. И. Кармалов**, Л. В. Герб, В. В. Товкач // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2023. – № 4. – С.8.

21. **Кармалов А. И.** Применение композитных материалов при эксплуатации артезианских скважин в условиях измененной гидрогеохимической среды : сборник научных трудов / Инженерно-экологические проблемы энергосбережения в строительстве и ЖКХ / **А. И. Кармалов**, С. В. Филимонова. - Томск : ТГАСУ, 2017. - №1 - с.12-14.

22. **Кармалов, А. И.** Восстановление работоспособности артезианских скважин : сборник научных трудов / Инженерно-экологические проблемы энергосбережения в строительстве и ЖКХ / **А. И. Кармалов**, Е. Ю. Курочкин. – Томск : ТГАСУ, 2017. - №1 - с.18-22

Монография:

23. **Кармалов, А. И.** Повышение эффективности сооружений водоснабжения: монография / А. И. Кармалов, Ю. Л. Сколубович. – Северск: Контекст, 2011. – 92 с.

Авторское свидетельство:

24. А. с. № 1122920 СССР, МПК G 01 N 9/18. Поплавковый плотномер: Г. Д. Слабожанин, А. И. Кармалов, Т. К. Мусаев; заявл. 04.05.1983; опубл. 08.07.1984, заявитель Томский инженерно-строительный институт.

Подписано в печать _____. Формат 60 х 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Зак. 162. Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83