На правах рукописи

Белова Лариса Владимировна

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОТЫ ИЗ ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ НА ПЕРЕГОРОДЧАТОМ ДЕГАЗАТОРЕ

Специальность 05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Пенза – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель: **Жулин Александр Гаврилович,**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Официальные оппоненты: **Дзюбо Владимир Васильевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Говоров Олег Борисович,
кандидат технических наук, руководитель Центра инноваций в области водоснабжения и водоотведения Акционерного общества «Институт МосводоканалНИИпроект» (АО «МосводоканалНИИпроект»)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС)

Защита состоится «17» февраля 2017 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.02 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» и на сайте http://dissovet.pguas.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета М.В. Бикунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Тюменском регионе для хозяйственно-питьевого водоснабжения широко используются подземные воды, на химический состав которых влияют болотная система Западной Сибири и, в ряде случаев, наличие нефтегазоносных горизонтов.

В подземной воде отмечается большое содержание растворенных органических примесей (перманганатная окисляемость 11,7–23,0 мг/дм^3), повышенные концентрации углекислого газа (20,0–200,0 мг/дм^3), сероводорода (0,20–1,95 мг/дм^3) и метана (5,3–60,0 мг/дм^3). Газовые составляющие создают восстановительную среду, которая обусловливает содержание в воде растворенных форм железа (1,14–14,00 мг/дм^3), марганца (0,02–3,80 мг/дм^3), их органокомплексов и негативно влияют на процессы очистки воды.

Большинство станций обезжелезивания работают в режиме упрощенной аэрации с фильтрованием подземной воды, при котором концентрация железа после водоочистки нередко превышает требования СанПиН 2.1.4.1074–01, что, в основном, связано с недостаточным насыщением воды кислородом и неполным удалением растворенной угольной кислоты.

Опыт внедрения усложненных технологий при реконструкции станций обезжелезивания показал, что даже при использовании реагентных методов улучшения качества воды, предварительная дегазация является необходимым звеном технологической цепи. В результате снижения высоких концентраций углекислого газа повышаются значения водородного показателя и эффективность последующей обработки воды, снижается ее коррозионная активность.

Глубокое удаление CO_2 из подземной воды интенсифицирует процесс обезжелезивания, тем самым улучшая барьерную функцию очистных сооружений по железу, в связи с этим разработка и внедрение в технологические схемы эффективных дегазаторов является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы дегазации воды в водоснабжении исследовали А.А. Кастальский, Л.П. Румянцева, В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова, Н.Д. Артеменок, Д.В. Глазков, Ю.Л. Сколубович, В.А. Сучков,

А.Г. Жулин, О.В. Болотова и др. Несмотря на высокую эффективность удаления газов на некоторых существующих моделях дегазаторов, авторами отмечается сложность их конструктивного исполнения, малая скорость движения обрабатываемой воды, высокие затраты электроэнергии. Актуальной остается задача разработки конструкции дегазатора, сочетающего высокую эффективность дегазации воды с повышением *КПД* использования воздуха, простотой эксплуатации и низкими экономическими затратами.

Цель диссертационной работы – научное обоснование, разработка и внедрение перегородчатого дегазатора барботажного типа для интенсификации десорбции углекислоты из подземных вод Тюменского региона.

Для реализации цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Анализ условий формирования и особенностей качественного состава подземных вод Тюменской области, существующих технологий их дегазации, изучение теоретического аспекта процесса десорбции углекислоты. Выбор направления исследования.

2. Обобщение практического опыта работы станций обезжелезивания региона и выявление наиболее эффективных методов дегазации воды.

3. Экспериментальные исследования и оценка влияния десорбции угольной кислоты на изменение качественного состава подземной воды.

4. Выявление закономерностей процесса удаления углекислоты при барботаже в свободном объеме и на перегородчатом дегазаторе при противотоке, получение обобщенных математических зависимостей по определению остаточного содержания углекислоты в воде после дегазации, разработка алгоритма расчета перегородчатого дегазатора.

5. Разработка технологии интенсификации процесса десорбции угольной кислоты из подземной воды, проведение ее технико-экономической оценки.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются подземные воды с повышенным содержанием углекислоты станций обезжелезивания Тюменского региона. Предмет исследования – процесс удаления углекислоты из подземной воды на дегазаторах барботажного типа.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются теоретические и эмпирические методы исследования – наблюдение, анализ, сравнение, обобщение, моделирование, эксперимент. Теоретической базой являются научные труды специалистов в области дегазации воды для нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения и других отраслей, научные закономерности процессов массообмена в двухфазных потоках. Эмпирическая база исследований включает эксперименты на полупроизводственной установке в производственных условиях на существующих станциях водоочистки, методы планирования эксперимента и статистического анализа для получения эмпирических зависимостей процесса десорбции углекислоты с применением программного пакета Microsoft Office «Excel», сравнение и анализ полученных результатов с целью обоснования эффективности предложенного сооружения.

Научная новизна диссертационного исследования.

1. Установлены закономерности процесса десорбции повышенных концентраций углекислоты из подземной воды в дегазаторах барботажного типа.

2. Разработана, испытана и апробирована новая конструкция дегазатора барботажного типа, обеспечивающая высокий эффект удаления углекислого газа из воды.

3. Получены математические модели для определения остаточного содержания растворенной углекислоты при барботаже в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха и для перегородчатого дегазатора барботажного типа с учетом влияющих факторов.

4. Создана методика расчета перегородчатого дегазатора. Построена расчетная номограмма для определения конечного содержания угольной кислоты на выходе из дегазатора, позволяющая выбрать оптимальные параметры дегазации при различных концентрациях углекислоты в подземной воде.

5. Определена степень влияния процесса десорбции углекислоты на изменение качественного состава подземных вод, приведена расчетная зависимость изменения величины водородного показателя воды при ее дегазации.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложена новая конструкция перегородчатого дегазатора барботажного типа, позволяющая интенсифицировать процесс десорбции углекислоты. Выявлены основные закономерности и оптимальные режимные параметры газоудаления в дегазаторе при барботаже в свободном объеме и с перегородками. Получены аналитические зависимости для определения остаточного содержания углекислоты, учитывающие влияние удельного расхода воздуха, скорости противотока воды, исходного содержания углекислого газа и конструктивных особенностей сооружения. Разработана методика расчета перегородчатого дегазатора.

Практическая значимость диссертационных исследований обусловлена возможностью использования полученных результатов при проектировании и эксплуатации перегородчатого дегазатора. Результаты испытаний и внедрения дегазатора в производство доказали его надежность в эксплуатации при низких капитальных и эксплуатационных затратах.

Личный вклад соискателя заключается в систематизации теоретических данных, постановке цели и задач диссертационной работы, проведении исследований в производственных условиях, анализе и математической обработке экспериментальных данных, обобщении результатов исследований, апробации и внедрении их в производство, публикации статей и выступлениях на конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование применения барботажного дегазатора для проведения исследований по интенсификации процесса десорбции углекислоты из подземной воды.

2. Исследование изменения физико-химических показателей качества воды в процессе дегазации.

3. Результаты исследований по удалению углекислоты из подземной воды при барботаже в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха.

4. Результаты исследований по интенсификации процесса десорбции углекислоты на перегородчатом дегазаторе.

5. Методика расчета перегородчатого дегазатора барботажного типа, расчетная номограмма по определению остаточного содержания углекислоты.

6. Рекомендации по применению перегородчатого дегазатора.

7. Опыт внедрения и оценка экономической эффективности перегородчатого дегазатора на примере станций обезжелезивания региона.

Степень достоверности полученных результатов исследования подтверждена применением метрологических поверенных средств измерений, использованием утвержденных методик определения углекислоты и щелочности, методов планирования эксперимента, определением адекватности математических моделей и воспроизводимости экспериментальных данных, высокой сходимостью экспериментальных данных с расчетными.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях ТюмГАСУ (Тюмень, 2004–2011 гг.); всероссийских НПК: «Водохозяйственный комплекс России: состояние, проблемы, перспективы» (Пенза, 2005 г.), «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири» (Тюмень, 2007–2010 гг.), «Вода: проблемы и решения» (Тюмень, 2007–2011 гг.); международных НПК: «Энергосберегающие технологии, методы повышения эффективности работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» (Иркутск, 2007 г.), «Стратегические проблемы освоения водных ресурсов Сибири и Арктики в XXI веке: концептуальное мышление и идентификация личности» (Тюмень, 2012 г.), «Наука и образование в XXI веке» (Тамбов, 2013 г.), «Земля, вода, климат Сибири и Арктики в XXI веке: проблемы и решения» (Тюмень, 2014 г.).

Реализация работы. Проведены опытно-промышленные испытания перегородчатого дегазатора на станциях обезжелезивания ФБУ Центра реабилитации «Тараскуль» и ОАО «Птицефабрика «Боровская» Тюменской области. Дегазатор испытан и внедрён в технологическую схему станции обезжелезивания по результатам НИР «Обследование, разработка проекта

модернизации и наладка станции обезжелезивания ВОС–8000 пгт. Пойковский» Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано основных 12 работ общим объемом 4,28 п.л. (лично автором – 2,59 п.л.), из них – пять публикаций в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, отчет о научно-исследовательской работе «Обследование, разработка проекта модернизации и наладка станции обезжелезивания ВОС–8000 пгт. Пойковский». Оформлена и зарегистрирована заявка (№ 2016104144 от 09.02.2016 г.) на патент на изобретение «Перегородчатый дегазатор воды для удаления углекислоты».

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 152 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 165 библиографических источников, 22 таблицы, 37 рисунков и 6 приложений А–Е.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи, научная новизна исследований, определена теоретическая и практическая значимость, представлены сведения об апробации и реализации работы.

В **первой главе** отмечены особенности водных ресурсов Тюменского региона, рассмотрены свойства диоксида углерода и его влияние на процессы водоочистки, выполнен анализ работы станций обезжелезивания, выявлены преимущества и недостатки существующих методов дегазации воды, конструктивные и технологические особенности дегазаторов.

Рассмотрены теоретические основы процесса десорбции газа из воды, механизм образования дисперсной фазы и условия формирования гидродинамической обстановки в массообменном аппарате.

Систематизированы, на основе анализа литературных источников, физические методы дегазации-аэрации воды, применяемые в хозяйственно-питьевом водоснабжении. Установлено, что при высоких исходных концентрациях растворенной углекислоты в подземной воде (от 50 мг/дм^3 до 200 мг/дм^3) применяются насадочные, барботажные и вихревые дегазаторы.

В условиях региона, при низких температурах исходной воды и, в зимний период года – воздуха, эффективность удаления углекислоты на градирнях составляет не более 20–30 %, их применение ограничивается исходным содержанием углекислоты в воде до 100 мг/дм^3 и необходимостью размещения в закрытых помещениях.

На станциях обезжелезивания Тюменской области используются барботажные дегазаторы в свободном объеме и с гравийной загрузкой, а также аэратор-дегазатор вихревого типа, предложенный В.В. Дзюбо. Конструктивная и эксплуатационная простота обычных барботажных дегазаторов обусловила их применение, несмотря на невысокий эффект удаления углекислоты и повышенные расходы электроэнергии. Дегазаторы гравийный и вихревого типа, имеющие высокий эффект удаления углекислоты, отличаются сложностью конструкции и значительными эксплуатационными затратами.

Анализ существующих сооружений по дегазации воды показал, что конструкция барботажного дегазатора позволяет взять ее за основу для проведения исследований по интенсификации десорбции углекислоты.

Во **второй главе** представлена методика экспериментальных исследований с указанием используемых приборов, оборудования, установок, определены погрешности измерений, обоснован выбор метода обработки данных.

Исследования проводились на экспериментальной установке (рисунок 1) в производственных условиях станций обезжелезивания региона на подземных водах с исходным содержанием диоксида углерода 30–200 мг/дм^3. Исходная вода из скважины подавалась в верхнюю часть барботера, состоящего из прозрачной пластмассовой колонны. Подача сжатого воздуха от компрессора осуществлялась в нижнюю часть установки (режим противотока) с диспергированием его через дырчатые распределители воздуха диаметрами $d_{отв}$ = 2–6 мм. Отвод обработанной воды предусмотрен в нижней части установки. Замер расхода воды, подаваемой на дегазацию, осуществлялся объемным методом, количество подаваемого воздуха регулировалось вентилем и определялось по показаниям ротаметра. На пути движения потоков воды и воздуха устанавливались поперечные

горизонтальные перегородки в виде сегмента круга с центральным углом 173°, расположенные в шахматном порядке по высоте колонны.

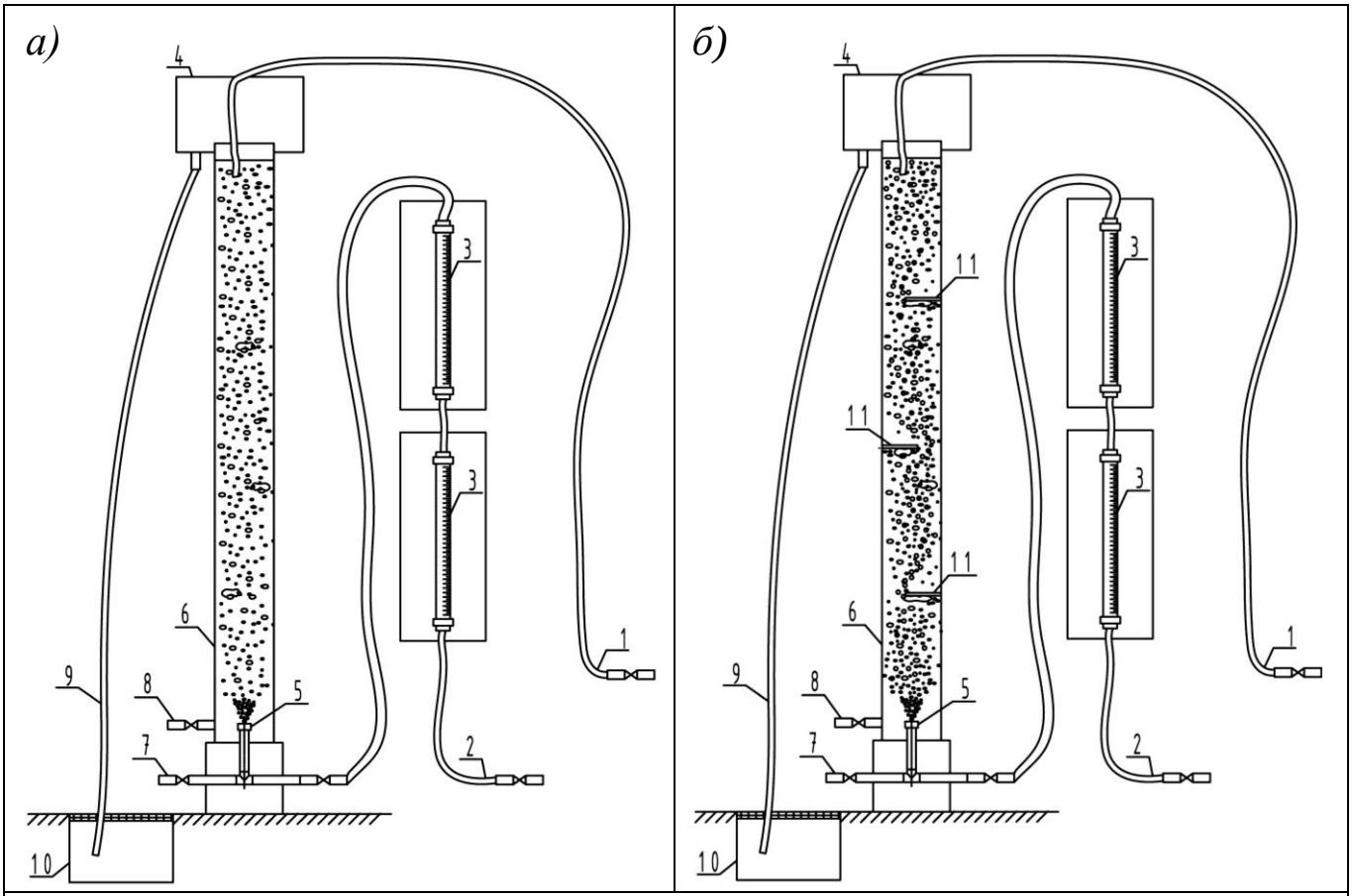

Рисунок 1 – **Схемы экспериментальных установок для удаления углекислоты при барботаже в свободном объеме (*а*), с поперечными горизонтальными направляющими (*б*):**
1 – подача исходной воды из скважины; 2 – подача воздуха; 3 – ротаметр; 4 – промежуточная емкость; 5 – распределитель воздуха; 6 – барботажная колонна высотой 3,0 м; 7 – опорожнение; 8 – отвод аэрированной воды; 9 – перелив; 10 – лоток сбросной канализации; 11 – горизонтальные поперечные направляющие

Концентрация углекислоты и значение общей щелочности определялись методом прямого титрования в соответствии с аттестованными методиками измерений, водородный показатель воды измерялся иономером И–120.

Недостаточная изученность физического процесса массообмена, сложность десорбции углекислоты в газожидкостных системах с деформируемой поверхностью раздела фаз, ее зависимость от значительного числа влияющих факторов обусловили использование методов планирования эксперимента. В исследованиях применялись методики активного многофакторного эксперимента – ортогональные и ротатабельные планы второго порядка.

Параметром оптимизации принята концентрация угольной кислоты на выходе из дегазатора $[CO_2]_{кон}$. Исходная функция отклика, связывающая параметр оптимизации с влияющими факторами, имела вид

$$[CO_2]_{кон} = f(t_{воды}, Щ, pH, t_{воздуха}, [CO_2]_{исх}, h_{воды}, q_{уд}, V_{воды}, d_{отв}), \quad (1)$$

где $t_{воды}$ – температура воды; $Щ$ – щелочность; pH – водородный показатель; $t_{воздуха}$ – температура воздуха; $[CO_2]_{исх}$ – исходное содержание углекислоты в подземной воде; $h_{воды}$ – высота слоя воды в дегазаторе; $q_{уд}$ – удельный расход воздуха; $V_{воды}$ – скорость движения воды при противотоке; $d_{отв}$ – диаметр отверстий дырчатого распределителя воздуха.

На основе проведенного анализа факторов, влияющих на процесс десорбции углекислоты, были составлены планы экспериментов для барботажа в свободном объеме и на перегородчатом дегазаторе.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния десорбции угольной кислоты на изменение качественного состава подземных вод при барботаже.

Сравнительный анализ изменения показателей качества воды до и после обезжелезивания показал, что снижение перманганатной окисляемости, аммония, железа, марганца происходит за счет окисления кислородом воздуха (таблица 1).

Таблица 1 – **Качественная характеристика поступающей и очищенной подземной воды станции обезжелезивания ФБУ Центра реабилитации «Тараскуль»**

Наименование показателей качества воды	Значение показателей качества воды	
	из скважины	после очистки
pH	6,64	6,94
Железо общее, мг/дм^3	12,00	0,31
Окисляемость перманганатная, мг/дм^3	17,2	5,2
Аммоний (по азоту), мг/дм^3	2,3	1,2
Нитраты, мг/дм^3	0,48	1,10
Общая жесткость, ^{o}Ж	2,8	2,8
Марганец, мг/дм^3	0,62	0,22
Кальций, мг/дм^3	32,1	34,0
Магний, мг/дм^3	14,6	13,3
Сухой остаток, мг/дм^3	219,2	224,4
Свободная углекислота, мг/дм^3	118,0	57,0

Общая жесткость и сухой остаток изменяются незначительно, так как концентрация свободного диоксида углерода в воде превышает равновесную его концентрацию, соответственно, катионы Ca^{2+}, Mg^{2+} остаются в равновесии с анионом HCO_3^-.

Изменение величины щелочности и *pH* дополнительно исследовалось в производственных условиях при барботаже объема природной воды продолжительностью ($t_{барботажа}$) 60 минут, с отбором проб через каждые 10 минут. Исходные значения углекислоты, щелочности и водородного показателя составили, соответственно, $[CO_2]_{исх}$ = 81,8 мг/дм^3, *Щ* = 1,88 ммоль/дм^3, *pH* = 7,02. Зависимость изменения щелочности воды от содержания угольной кислоты приведена на рисунке 2.

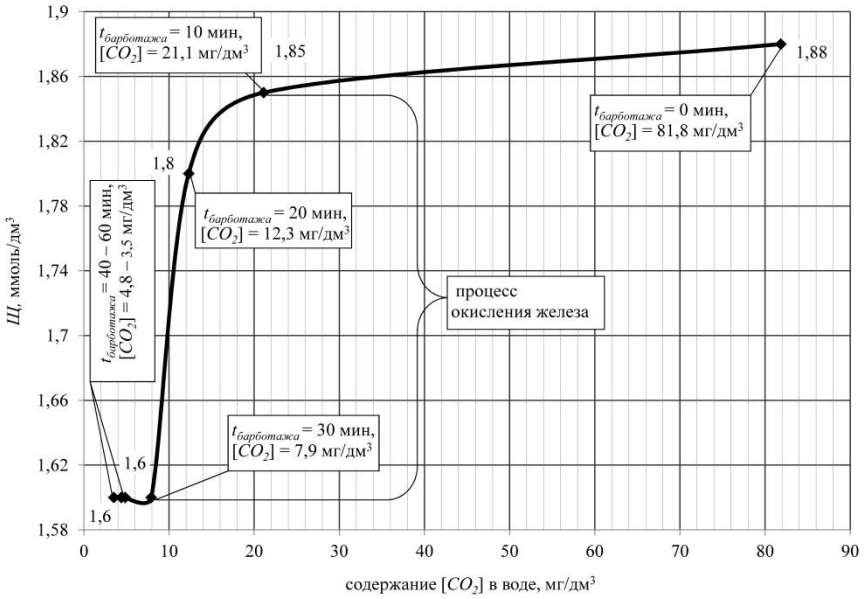

Рисунок 2 – **Зависимость изменения щелочности от содержания [CO_2] в воде**

Проведенные исследования показали, что концентрация ионов $\left[HCO_3^-\right]$ в процессе дегазации изменяется незначительно (0,28 ммоль/дм^3) в сравнении с изменением содержания [CO_2]. На основе полученных результатов предложено использовать уравнение Henderson – Hasselbalch для определения величины *pH* буферных растворов в упрощенном виде. Изменение водородного показателя $\Delta pH^{дегазации}$ определяется соотношением $\Delta pH^{дегазации} = \lg\frac{[CO_2]_{исх}}{[CO_2]_{кон}}$, значение *pH* на выходе из дегазатора определяется по формуле

$$pH_{кон}^{дегазация} = pH_{исх} + \lg\frac{[CO_2]_{исх}}{[CO_2]_{кон}}, \qquad (2)$$

где $pH_{исх}$ – значение pH исходной воды, $[CO_2]_{исх}$ и $[CO_2]_{кон}$ – концентрация углекислоты в воде до и после дегазации.

Известно, что барботажные дегазаторы характеризуются конструктивной и эксплуатационной простотой, но в тоже время отмечаются низкие значения *КПД* использования воздуха при относительно высоких энергозатратах. С целью интенсификации процесса десорбции углекислоты проведена модернизация конструкции барботажного дегазатора путем установки горизонтальных поперечных перегородок. В связи с недостаточностью сравнительных данных при барботаже в свободном объеме для идентичных исходных условий были проведены дополнительные исследования, позволившие сравнить эффективность предложенной конструкции перегородчатого дегазатора с барботажным.

В ходе исследования изучались режимы движения потоков вода-воздух и структура барботажного слоя, которая зависит от плотности фаз, высоты слоя воды, водовоздушного соотношения, скоростей противотока воды и воздуха.

Изучение закономерностей процесса десорбции углекислоты при барботаже в свободном объеме выявило области изменения параметров, входящих в план эксперимента. Исходное содержание углекислоты в подземной воде, характеризующее значение движущей силы десорбционного процесса, было принято приоритетным фактором, позволяющим применять полученную математическую зависимость для подземных вод с различными значениями исходных концентраций углекислоты.

Для получения уравнения регрессии, представляющего зависимость конечного содержания углекислоты в воде на выходе из барботажного дегазатора от принятых факторов, использовалось ортогональное центральное композиционное планирование эксперимента. Независимыми факторами, влияющими на процесс десорбции углекислоты из подземной воды, приняты: $[CO_2]_{исх}$ – исходное содержание углекислоты, мг/дм^3; $q_{уд}$ – удельный расход воздуха, м^3/м^3; $h_{воды}$ – высота слоя воды в барботере, м; $d_{отв}$ – диаметр отверстий истечения воздуха, м; $V_{воды}$ – скорость движения воды, м/ч. Основной уровень и

интервалы варьирования независимых факторов, их значения в звездных точках, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – **Основные уровни и интервалы варьирования факторов для барботажа в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха**

Наименование показателей	Значения показателей по факторам				
	X_1 $[CO_2]_{исх}$, мг/дм^3	X_2 $q_{уд}$, м^3/м^3	X_3 $h_{воды}$, м	X_4 $d_{отв}$, м	X_5 $V_{воды}$, м/ч
Основной уровень (0)	120	8,0	1,25	0,004	26,0
Верхний уровень (+)	160	11,0	1,75	0,005	40,0
Нижний уровень (-)	80	5,0	0,75	0,003	12,0
Интервал варьирования	40	3,0	0,50	0,001	14,0
Звездные точки (-α)	58	3,4	0,50	0,002	4,3
Звездные точки (+α)	182	12,6	2,00	0,006	47,7

В результате математической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимость $[CO_2]_{кон} = f([CO_2]_{исх}, h_{воды}, q_{уд}, V_{воды}, d_{отв})$:

– в безразмерном (кодированном) виде

$$Y = 63{,}50 + 19{,}13X_1 - 6{,}52X_2 - 6{,}57X_3 - 3{,}73X_5 - 2{,}73X_1X_2 + 2{,}50X_3^2, \quad (3)$$

– в натуральном масштабе

$$[CO_2]_{кон} = 40{,}64 + 0{,}67 \cdot [CO_2]_{исх} + 0{,}56 \cdot q_{уд} - 38{,}14 \cdot h_{воды} - 0{,}27 \cdot V_{воды} - 0{,}022 \cdot [CO_2]_{исх} \cdot q_{уд} + 10 \cdot h_{воды}^2 \quad (4)$$

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии осуществлялась с помощью критерия Фишера *F*. Зависимость рекомендуется для определения остаточного содержания углекислоты при барботаже в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха, отклонения расчетных и экспериментальных данных не более ± 10 %.

В **четвертой главе** приведены результаты исследований по интенсификации десорбции углекислоты на перегородчатом дегазаторе.

Молекулярная диффузия в условиях низких температур подземной воды снижена, поверхностное натяжение на границе раздела фаз для маленьких пузырьков воздуха максимально, вследствие чего десорбция углекислоты в обычных барботажных дегазаторах затруднена.

Для повышения эффективности использования воздуха была предложена конструкция барботажного дегазатора, оснащенного поперечными

направляющими – турбулизаторами воды, изменяющими структуру и траекторию движения встречных потоков вода-воздух. В данном сооружении периодически образуются крупные пузыри неправильной формы, сопротивление пограничного слоя которых значительно ниже, чем у маленьких пузырьков, что особенно важно для интенсификации процесса десорбции.

На начальном этапе десорбционного процесса движущей силой являются концентрационные градиенты, при уменьшении которых в перегородчатом дегазаторе создаются условия, способствующие преодолению силы поверхностного натяжения на границе раздела фаз. Диффузионный и конвективный массообмен активизируется в условиях гидродинамической неустойчивости межфазной поверхности. Площадь живого сечения в местах установки горизонтально расположенных перегородок уменьшается, происходит местное увеличение скоростей противотока воды и воздуха, создаются турбулентные пульсации влияющие на устойчивость поверхности контакта фаз, происходит интенсивное обновление и деформация ее границ, уменьшается толщина пограничного слоя, в момент разрыва пузыря диффузия молекул CO_2 из воды в воздух протекает активнее.

При исследовании процесса десорбции углекислоты на перегородчатом дегазаторе учитывалось влияние следующих факторов: диаметр отверстия дырчатого воздухораспределителя, исходное содержание углекислоты, водовоздушное соотношение, скорость противотока, высота слоя воды, количество перегородок и расстояние между ними.

Сравнение эффектов удаления углекислоты для обычного барботажного, гравийного и перегородчатого дегазаторов с использованием различных распределителей воздуха (отверстия, колпачки сетчатые и грибковые) показали, что применение грибковых колпачков ВОДГЕО, увеличивающих площадь контакта воды и воздуха за счет первоначального дробления воздушных пузырей, в перегородчатом дегазаторе нецелесообразно, так как конструктивные особенности дегазатора приводят к периодическому изменению формы и

дроблению пузырей. Наибольший эффект удаления углекислоты наблюдался при диаметрах отверстий распределителей воздуха 5, 6 мм.

Диапазон изменений удельного расхода воздуха для перегородчатого дегазатора установлен на основе экспериментальных данных от 4,0 до 14,0 $м^3/м^3$. В практике водоснабжения для барботажа в свободном объеме приняты скорости противотока до 20 м/ч, в ходе эксперимента для перегородчатого дегазатора – выше 20 м/ч. Согласно полученным сравнительным данным для трех типов дегазаторов при различных скоростях противотока воды (рисунок 3) эффективность удаления углекислоты в перегородчатом дегазаторе по сравнению с обычным барботажным увеличивается на 15–25 % и равна эффекту в дегазаторе с гравийной загрузкой, но высокие скорости движения воды в предложенной конструкции позволяют уменьшить ее размеры в плане.

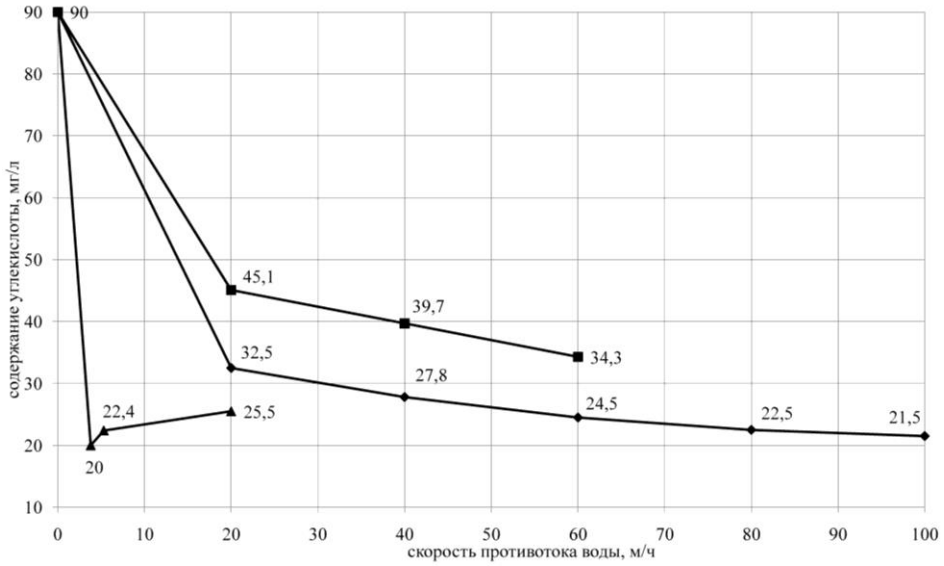

Рисунок 3 – **Изменение остаточного содержания углекислоты в воде в зависимости от скорости противотока для трех типов дегазаторов**: ■ – обычный барботажный, ▲ – с гравийной загрузкой, ♦ – перегородчатый

Высота перегородчатого дегазатора определяется количеством установленных в нем перегородок и расстоянием между ними. С возрастанием количества перегородок происходит увеличение эффективности удаления углекислоты (рисунок 4). При расстоянии между перегородками 0,4 м наблюдается стабильно высокий эффект, поэтому данный параметр принят величиной постоянной.

Исследование процесса десорбции углекислоты на перегородчатом дегазаторе проводилось в три этапа, в ходе которых определялось требуемое количество перегородок, остаточное содержание углекислоты при скорости

противотока воды 20 м/ч, изменение содержания углекислоты в воде при различных скоростях противотока.

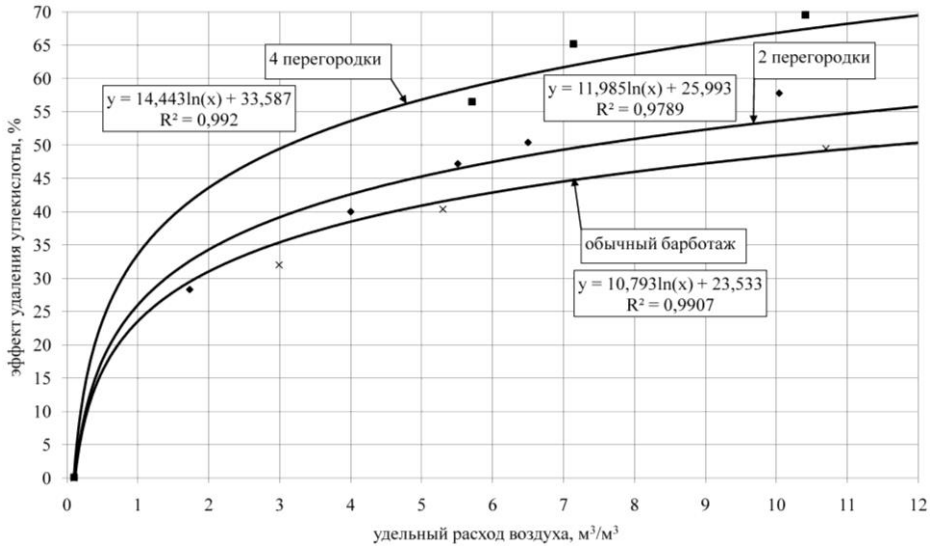

Рисунок 4 – **Сравнение эффектов удаления углекислоты при разном количестве перегородок по сравнению с обычным барботажом** при $[CO_2]_{исх}$ = 100 мг/дм^3, $V_{воды}$ = 24,0 м/ч, расстояние между перегородками 0,4 м

При планировании эксперимента использовался ротатабельный план второго порядка для определения зависимости требуемого количества перегородок $N_{треб}$ от влияющих факторов: $[CO_2]_{исх}$ – исходное содержание углекислоты в воде, мг/дм^3; $q_{уд}$ – удельный расход воздуха, м^3/м^3; $[CO_2]_{треб}$ – требуемое содержание углекислоты в воде после обработки, мг/дм^3. Основной уровень и интервалы варьирования независимых факторов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – **Основные уровни и интервалы варьирования факторов эксперимента для определения требуемого количества перегородок**

Наименование показателей	Значения показателей по факторам		
	X_1 $[CO_2]_{исх}$, мг/дм^3	X_2 $q_{уд}$, м^3/м^3	X_3 $[CO_2]_{треб}$, мг/дм^3
Основной уровень (0)	130	8,0	40,0
Верхний уровень (+)	170	12,0	50,0
Нижний уровень (-)	90	4,0	30,0
Интервал варьирования	40	4,0	10,0
Звездные точки (-α)	63	1,3	23,2
Звездные точки (+α)	197	14,7	56,8

В результате математической обработки данных получены уравнения:

– в безразмерном (кодированном) виде

$$Y = 4{,}17 + 1{,}15X_1 - 0{,}74X_2 - 1{,}15X_3 + 0{,}44X_2^2, \quad (5)$$

– в натуральном масштабе

$$N_{треб} = 8{,}12 + 0{,}03 \cdot [CO_2]_{исх} - 0{,}63 \cdot q_{уд} - 0{,}12 \cdot [CO_2]_{треб} + 0{,}03 \cdot q_{уд}^2. \quad (6)$$

Для получения зависимости конечного содержания углекислоты $[CO_2]_{кон}$ при постоянной скорости противотока $V_{воды}$ = 20 м/ч с учетом значимых факторов $[CO_2]_{исх}$, $q_{уд}$ и $N_{пер}$ (количество перегородок) использовался ротатабельный план второго порядка. Интервалы варьирования факторов эксперимента приведены в таблице 4.

Таблица 4 – **Основные уровни и интервалы варьирования факторов эксперимента для определения остаточного содержания углекислоты при скорости противотока 20 м/ч**

Наименование показателей	Значения показателей по факторам		
	X_1 $[CO_2]_{исх}$, мг/дм^3	X_2 $q_{уд}$, м^3/м^3	X_3 $N_{пер}$, шт
Основной уровень (0)	130	8,0	2
Верхний уровень (+)	170	12,0	3
Нижний уровень (-)	90	4,0	1
Интервал варьирования	40	4,0	1
Звездные точки (-α)	63	1,3	0
Звездные точки (+α)	197	14,7	4

В результате математической обработки данных получены уравнения:

– в безразмерном (кодированном) виде

$$Y = 65{,}591 + 21{,}282X_1 - 9{,}969X_2 - 7{,}813X_3 - 1{,}976X_1^2 + 4{,}390X_2^2 - 2{,}875X_1X_2, \quad (7)$$

– в натуральном масштабе

$$[CO_2]_{кон} = 9{,}9887 + 0{,}9969 \cdot [CO_2]_{исх} - 4{,}5460 \cdot q_{уд} - 7{,}8128 \cdot N_{пер} - \\ - 0{,}0012 \cdot [CO_2]_{исх}^2 + 0{,}2744 \cdot q_{уд}^2 - 0{,}0180 \cdot [CO_2]_{исх} \cdot q_{уд} \quad . \quad (8)$$

Скорость противотока воды, являясь важной составляющей интенсификации процесса десорбции углекислоты, взаимосвязана с такими факторами, как удельный расход воздуха и количество перегородок в дегазаторе. Для определения остаточного содержания углекислоты при различных скоростях противотока (более 20 м/ч) проводились дополнительные исследования, по данным которых построена расчетная номограмма (рисунок 5), позволяющая объединить несколько переменных $[CO_2]_{кон} = f([CO_2]_{исх}, q_{уд}, N_{пер}, V_{воды})$ при отсутствии функциональной зависимости между ними.

На основе проведенных исследований разработана методика расчета перегородчатого дегазатора.

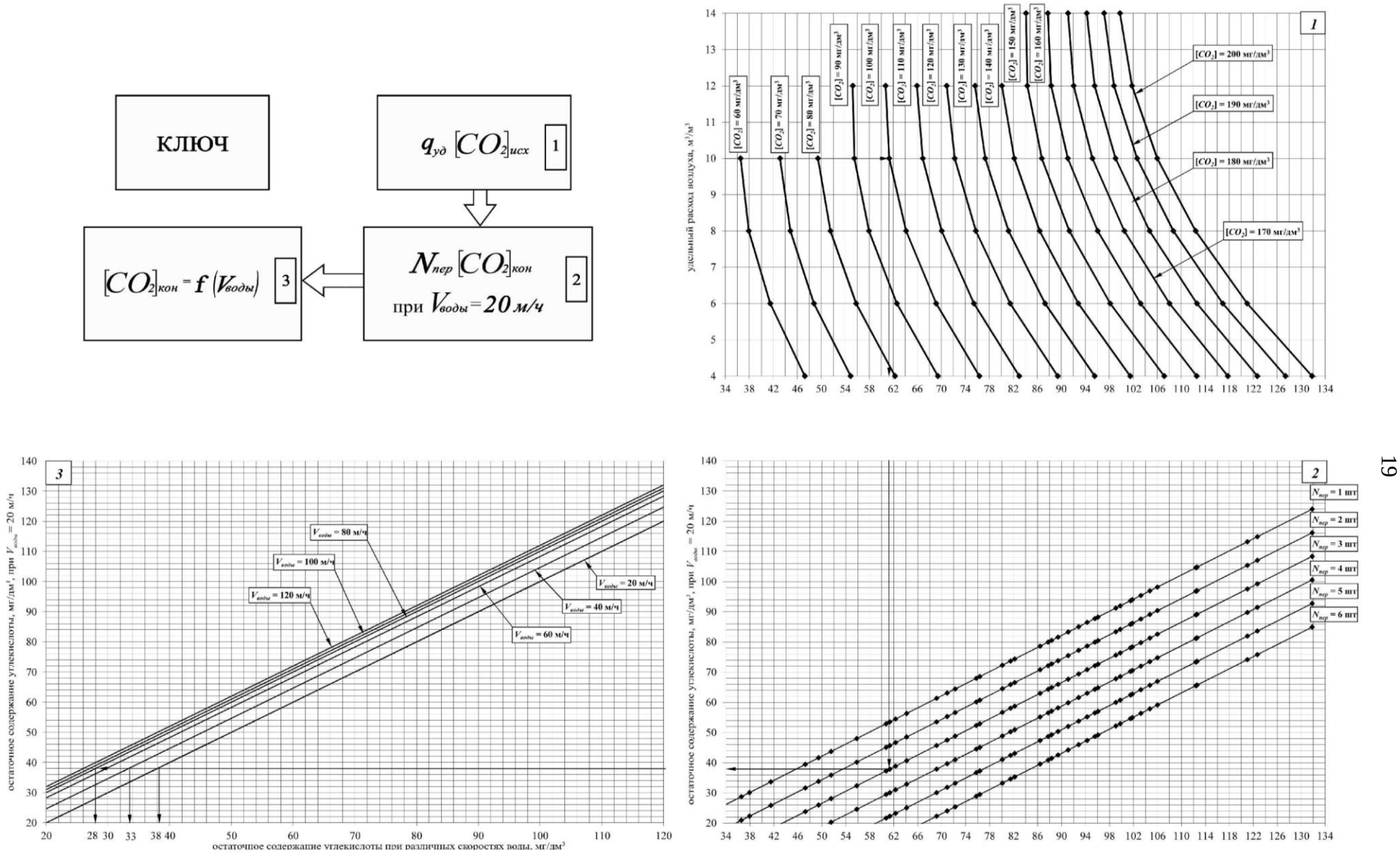

Рисунок 5 – **Номограмма для определения остаточного содержания углекислоты для перегородчатого дегазатора барботажного типа**

В **пятой главе** представлены практические результаты исследований, показан опыт внедрения в производство, доказана экономическая эффективность предложенной конструкции в сравнении с другими типами дегазаторов.

Сравнение вариантов проводилось для станции обезжелезивания ОАО «Птицефабрика «Боровская», расположенной в поселке Боровский Тюменской области с производительностью Q = 6790,0 м^3/сут = 282,9 м^3/ч и содержанием углекислоты в исходной воде $[CO_2]_{исх}$ = 110 мг/дм^3.

Проведено технико-экономическое сравнение четырех вариантов дегазационных устройств: пленочного дегазатора с кольцами Рашига и дегазаторов барботажного типа – в свободном объеме, гравийного и перегородчатого. Расчет параметров дегазации и размеров сооружений для барботажа в свободном объеме и перегородчатого дегазатора проводился по предложенной методике, параметры для пленочного и барботажного дегазатора с гравийной загрузкой приняты согласно опубликованным данным. Технико-экономическое сравнение проводилось по годовым приведенным затратам, результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – **Сравнительные показатели приведенных затрат для технологических схем с различными дегазаторами**

Тип дегазатора	Затраты на капитальное строительство, тыс. руб.	Годовые эксплуатационные затраты				Приведенные затраты, тыс. руб.
		Амортизационные отчисления, тыс. руб.	Годовые затраты на электроэнергию, тыс. руб.	Затраты на промывку фильтров обезжелезивания, тыс. руб.	Итого, тыс. руб.	
Перегородчатый	1195,862	119, 586	761,328	761,310	1642, 225	1785,728
Гравийный	2757,104	275, 710	1065,860	761,310	2102,880	2433,733
Пленочный	3527,091	352,709	346,058	761,310	1460,077	1883,328
Барботажный в свободном объеме	1324,776	132,478	761,328	1141,964	2035,770	2194,743

Сравнительная экономическая оценка эффективности показала, что перегородчатый дегазатор обеспечивает достаточно высокую эффективность удаления углекислоты и является экономически выгодным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа процесса дегазации подземных вод станций обезжелезивания установлено, что эффективность удаления углекислого газа может быть повышена в сооружениях с горизонтальными направляющими перегородками, работающих по принципу аэрации в свободном объеме с противоточным движением воды и воздуха, интенсифицирующих массообмен в системе «вода-воздух».

2. Исследования изменений качественного состава воды в процессе дегазации показали, что щелочность, солесодержание и карбонатная жесткость не изменяются при остаточной концентрации углекислоты в воде выше равновесной. Полученная в ходе эксперимента математическая зависимость позволяет определять значения водородного показателя, возрастающего при десорбции углекислоты.

3. Выявлены закономерности процесса удаления углекислоты при барботаже в свободном объеме, позволившие сравнить и оценить эффективность газоудаления на предлагаемой конструкции перегородчатого дегазатора барботажного типа.

4. Получена математическая зависимость определения остаточного содержания углекислоты от ее исходного содержания, водовоздушного соотношения, скорости движения и высоты слоя воды в барботере. Установлено, что барботаж в свободном объеме целесообразен для исходных концентраций углекислоты в воде до 100 мг/дм^3, при этом максимальный эффект удаления углекислоты не превышает 60 %.

5. Экспериментально доказано, что новая конструкция перегородчатого дегазатора позволяет повысить эффективность удаления углекислоты до 80 % за счет интенсификации конвективного массопереноса и рекомендуется к применению при исходных концентрациях углекислоты в воде до 200 мг/дм^3.

6. Разработан алгоритм расчета перегородчатого дегазатора на основе полученных математических зависимостей и экспериментальных данных для скоростей противотока воды от 20 до 120 м/ч.

7. Построена расчетная номограмма для определения остаточного содержания углекислоты, позволяющая в условиях производства регулировать параметры технологического процесса дегазации при изменении исходного содержания углекислоты в воде.

8. Проведены опытно-промышленные испытания перегородчатого дегазатора на станциях обезжелезивания ФБУ Центра реабилитации «Тараскуль» и ОАО «Птицефабрика «Боровская» Тюменского района Тюменской области. Дегазатор испытан и внедрён в технологическую схему станции обезжелезивания по результатам НИР «Обследование, разработка проекта модернизации и наладка станции обезжелезивания ВОС–8000 пгт. Пойковский» Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа.

9. Оценка технико-экономической эффективности показала, что затраты на капитальное строительство перегородчатого дегазатора составили 1195,862 тыс. руб., что в 2,95 раз меньше затрат на строительство пленочного дегазатора с загрузкой из колец Рашига. Приведенные затраты для перегородчатого дегазатора на 648 тыс. руб. меньше затрат для дегазатора с гравийной загрузкой и на 409 тыс. руб. меньше затрат для барботажного дегазатора в свободном объеме. Перегородчатый дегазатор при высокой эффективности удаления углекислоты имеет наименьшие экономические затраты в сравнении с градирнями и другими типами барботажных дегазаторов.

СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Белова, Л.В. Расчетное уравнение к определению остаточного содержания углекислоты при дегазации подземных вод в барботажных устройствах [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Изв. вузов. Строительство. – 2008. – № 10. – С. 69–74.

2. Белова, Л.В. К снижению содержания углекислоты из подземной воды на перегородчатом дегазаторе барботажного типа [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Изв. вузов. Строительство. – 2010. – № 2. – С. 45–52.

3. Белова, Л.В. Снижение концентрации углекислоты в подземных водах на перегородчатом дегазаторе [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 1. – С. 33–38.

4. Белова, Л.В. Барботажные дегазаторы станций обезжелезивания (общие рекомендации к применению и расчету) [Текст] / А.Г. Жулин, О.В. Сидоренко, Л.В. Белова // Изв. вузов. Строительство. – 2012. – № 3. – С. 39–48.

5. Белова, Л.В. Обоснование и результаты экспериментальных исследований процесса десорбции углекислоты из подземной воды на перегородчатом дегазаторе [Текст] / Л.В. Белова // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5. – С. 163–170.

Публикации в других научных изданиях

6. Белова, Л.В. Интенсификация удаления углекислоты из подземной воды [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник материалов III Всероссийской НПК «Водохозяйственный комплекс России: состояние, проблемы, перспективы» – Пенза, 2005. – С. 52–55.

7. Белова, Л.В. Влияние конструкции дегазатора на процессы десорбции [Текст] / Л.В. Белова // Сборник материалов VI научной конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ. – Тюмень: ООО «Сити-пресс», 2006. – С. 44–46.

8. Белова, Л.В. Сравнение эффекта дегазации двух типов барботеров [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник докладов II-й международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии, методы повышения эффективности работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения». – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – С. 23–25.

9. Белова, Л.В. Перегородчатый дегазатор барботажного типа [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Строительный вестник Тюменской области. – 2011. – № 2. – С. 72–74.

10. Белова, Л.В. Влияние десорбции углекислоты на изменение качественного состава подземных вод [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Стратегические проекты освоения водных ресурсов Сибири и Арктики в XXI веке: концептуальное мышление и идентификация личности». – Тюмень, 2012, том 1. – С. 61–67.

11. Белова, Л.В. Интенсификация процесса снижения содержания углекислоты из подземной воды при ее обезжелезивании [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке» 30 сентября 2013 г.: в 34 частях. Часть 21; Мин-во обр. и науки РФ. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 33–36.

12. Белова, Л.В. Сравнительная экономическая оценка эффективности работы перегородчатого дегазатора [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник докладов XVI Международной научно-практической конференции «Земля, вода, климат Сибири и Арктики в XXI веке: проблемы и решения». – Тюмень, 2014. – С. 90–100.