

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Жулин Александр Гаврилович

Тюмень – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ УДАЛЕНИЯ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ ИЗ ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ	10
1.1 Анализ работы станций обезжелезивания с учетом особенностей подземных вод Тюменского региона. Современные методы и технологии удаления растворенных газов при водоочистке	10
1.1.1 Особенности водных ресурсов Тюменского региона	10
1.1.2 Факторы, влияющие на наличие углекислоты в подземных водах	12
1.1.3 Свойства углекислого газа и его влияние на процессы водоочистки	13
1.1.4 Анализ работы станций обезжелезивания в Тюменском регионе	17
1.1.5 Методы дегазации воды	23
1.2 Теоретические аспекты процесса десорбции углекислоты	29
1.2.1 Массоперенос при десорбции	29
1.2.2 Механизмы образования дисперсной фазы и изменения пузырей в турбулентном потоке	32
1.2.3 Гидродинамическая обстановка в массообменном аппарате барботажного типа	36
Выводы	39
2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	41
2.1 Методики и приборы измерений	41
2.2 Методика исследования процесса десорбции углекислоты	45
2.3 Обоснование выбора метода обработки данных	48
2.4 Выбор влияющих факторов	51
Выводы	53
3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УДАЛЕНИЮ УГЛЕКИСЛОТЫ ПРИ БАРБОТАЖЕ В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ	54
3.1 Исследование влияния десорбции угольной кислоты на изменение качественного состава подземных вод	54

3.2 Закономерности процесса десорбции углекислоты при барботаже в свободном объеме при противотоке	60
3.3 Математическая обработка экспериментальных исследований по удалению углекислоты при барботаже в свободном объеме	67
Выводы	73
4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОТЫ НА ПЕРЕГОРОДЧАТОМ ДЕГАЗАТОРЕ	74
4.1 Закономерности процесса десорбции углекислоты в перегородчатом дегазаторе.....	74
4.2 Математическая обработка экспериментальных исследований по удалению углекислоты в перегородчатом дегазаторе	84
4.3 Алгоритм расчета перегородчатого дегазатора	92
Выводы	99
5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕГОРОДЧАТОГО ДЕГАЗАТОРА	101
5.1 Опыт внедрения перегородчатого дегазатора при реконструкции станции обезжелезивания ВОС-8000 пгт. Пойковский	101
5.2 Оценка экономической эффективности.....	103
Выводы	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ В	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	152

ВВЕДЕНИЕ

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

В подземной воде отмечается большое содержание растворенных органических примесей (перманганатная окисляемость в пределах 11,7–23,0 мг/дм³), повышенные концентрации углекислого газа (20,0–200,0 мг/дм³), сероводорода (0,20–1,95 мг/дм³) и метана (5,3–60,0 мг/дм³). Газовые составляющие создают восстановительную среду, которая обуславливает содержание в воде растворенных форм железа (1,14–14,00 мг/дм³), марганца (0,02–3,80 мг/дм³), 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 CO₂ 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, в 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 молодых ученых 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ УДАЛЕНИЯ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ ИЗ ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ

1.1 Анализ работы станций обезжелезивания с учетом особенностей подземных вод Тюменского региона. Современные методы и технологии удаления растворенных газов при водоочистке

1.1.1 Особенности водных ресурсов Тюменского региона

Тюменский регион располагает значительными водными ресурсами, состав и свойства которых определяются геологическими, географическими, гидрогеологическими условиями и степенью промышленного освоения районов.

Рассматриваемая территория расположена в южной части Западно-Сибирского сложного бассейна пластовых вод, выделяемого в границах Западно-Сибирской плиты, которая сформировалась в герцинский тектонический период. Рельеф представляет плоскозападинную, реже пологоволнистую равнину с абсолютными отметками 110–140 м [77]. Для северной части характерен ледниковый и водно-ледниковый рельеф с термокарстовыми котловинами, буграми пучения, пятнистыми и полигональными тундрами. В южных районах преобладают озерно-котловинные формы рельефа [144]. Географическое положение региона определило континентальный климат с суровой продолжительной зимой (32 недели в тундре, 21 – в лесостепи), коротким, холодным летом в северной части и теплым – в южной. Среднегодовая сумма осадков превышает среднегодовую испаряемость [144]. Климат формирует общий фон для процессов, влияющих на химический состав природных вод [17]. Равнинный характер местности способствует широкому распространению на территории области озер и болот [6, 7, 144], заболоченность в отдельных районах составляет 20–75 % площади [125].

Гидрогеологическая обстановка взаимосвязана с мощным и широко распространенным в регионе водоносным горизонтом отложений атлымской и новыми-

хайловской свит [97]. Верхний гидрогеологический этаж представлен тафрогенными образованиями триасового возраста (вулканогенно-осадочные и осадочные континентальные отложения). Зона свободного водообмена характеризуется наличием сложнопереслаивающейся песчано-глинистой толщей континентального олигоцена, неогена и других генетических типов четвертичных отложений [102, 103]. Согласно «Принципам гидрогеологической стратификации и районирования территории России» в составе верхнего гидрогеологического этажа зафиксированы два водоносных комплекса: четвертичный ($12Q$) и эоцен-неогеновый ($12P2-N$). Гидрогеологические параметры подземных вод определяются свободным водообменом, наличием пресных вод, изменяющих концентрацию от слабосоленых до сильносоленых. Водоносный четвертичный комплекс ($12Q$) распространен на территории повсеместно, залегает первым от поверхности, подстилается водоносным эоцен-неогеновым комплексом. Основная функция четвертичного комплекса – подпитывать нижележащий водоносный эоцен-неогеновый комплекс, разделенный на верхнюю – относительно водоупорную, среднюю – относительно водоносную и нижнюю – водоносную части. Основная роль верхней части разреза – защита нижележащих подземных вод от загрязнения [142].

По химическому составу подземные воды четвертичного и эоцен-неогенового водоносных комплексов характеризуются как гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, реже хлоридно- или сульфатно-гидрокарбонатные, магниевые-кальциевые или кальциевые-натриевые воды с минерализацией до $1,0 \text{ г/дм}^3$ (пресные) и солоноватые (от $1,0$ до 25 г/дм^3) [142].

Сочетание таких климатических и гидрогеологических факторов в регионе, как избыточная увлажненность, равнинность, заболоченность, слабая дренированность снижают окислительно-восстановительный потенциал подземных вод, уменьшают концентрацию кислорода, стимулируют окисление органических веществ в анаэробных условиях. Подземные воды неглубокого заложения имеют высокие показатели цветности, перманганатной окисляемости, содержания железа и марганца, превышающие нормативные значения [44, 47].

Образованию железосодержащих соединений в подземных водах способствует свободная углекислота, влияющая на растворение железосодержащих минералов: пирита, ильменита, гематита, сидерита и др. Количественные показатели железа, которое присутствует в воде в форме двух- и трехвалентных ионов, органических и неорганических коллоидных и комплексных соединений, значительно превышают показатели марганца. В незначительных количествах присутствуют в воде такие микрокомпоненты, как медь, цинк, алюминий, свинец, мышьяк, бром, фтор, а также фенолы, нефтепродукты и аммонийные соединения [142].

Качественный состав подземных вод зависит от области питания, инфильтрации атмосферных осадков, наличия снежного покрова, связи поверхностных и подземных вод, рельефа местности, способствующего или препятствующего вертикальной аэрации грунтов и подземных вод [154].

1.1.2 Факторы, влияющие на наличие углекислоты в подземных водах

Химический состав воды диктуется природными условиями, в которых осуществляется ее круговорот и определяется физико-географическими, геологическими, физико-химическими, биологическими и антропогенными факторами [4, 16, 83, 158]. Все природные воды содержат то или иное количество газов от нескольких мг/дм³ до $n \cdot 10^3$ мг/дм³ [109, 121].

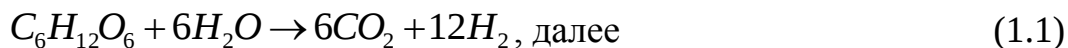
Углекислый газ, согласно классификации по генезису газов, может иметь атмосферное, биохимическое, химическое происхождение или являться газом дегазации мантии [12, 20, 24].

Газы земной коры в результате процессов диффузии и фильтрации способны мигрировать по трещинам и порам горных пород, поступать в водоносные горизонты, растворяясь в воде [12, 40, 51, 129].

По количественной распространенности в подземных водах газы представлены в следующем порядке: диоксид углерода CO_2 , сероводород H_2S , метан CH_4 , азот N_2 , возможны небольшие скопления тяжелых углеводородных газов, радона, аргона, гелия и водорода [88, 91, 139].

По растворимости в воде газы делятся на две группы: 1) газы с неполярными молекулами, которые плохо растворяются в воде – азот, кислород, аргон и др.; 2) газы с полярными молекулами, которые при взаимодействии с водой образуют химические соединения, способные к электролитической диссоциации – диоксид углерода и сероводород. Растворимость газов в воде зависит от природы самого газа, давления, температуры и минерализации воды. Парциальное давление углекислого газа в воздухе составляет 30–40 Па и, согласно закону Генри-Дальтона, его концентрация в воде может быть в пределах от 0,5 до 1,3 мг/дм³ [90, 109].

В закрытых гидрогеохимических системах насыщение воды углекислым газом осуществляется при инфильтрации через почвенный слой за счет протекания биохимических процессов [25, 51, 121]. Жизнедеятельность микроорганизмов ускоряет окислительно-восстановительные процессы, способствуя изменению валентности многих химических элементов, в результате чего происходит перевод твердых элементов в жидкую фазу, что увеличивает их миграционную способность [75, 89, 92]. Например, в анаэробных условиях при значительных концентрациях органических веществ в подземных водах происходит их окисление микроорганизмами с образованием углекислого газа и метана [12]



метан в связи с малой растворимостью слабо реагирует с водой.

Нефтегазовое происхождение диоксида углерода связывают с газовыми и нефтяными месторождениями, выделение растворенных газов происходит из нефти при снижении пластового давления. Рассеянные углеводородные газы в породах нефтегазовых площадей мигрируют и накапливаются в горизонтах затрудненного водообмена [12, 93, 129].

1.1.3 Свойства углекислого газа и его влияние на процессы водоочистки

Оксид углерода (IV) или углекислый газ CO_2 – бесцветное газообразное вещество, относительная молекулярная масса $M_r CO_2 = 44,04$, плотность

$\rho CO_2 = 1,977 \text{ г/дм}^3$ (н.у.), растворимость диоксида углерода невелика и составляет 1,7 объема на 1 объем воды при 0°C . Углекислый газ является кислотным оксидом, который реагирует с основными оксидами, щелочами и водой [32, 98, 151].

При взаимодействии CO_2 с водой образуется неустойчивая угольная кислота H_2CO_3 со структурной формулой молекулы $O = C \begin{smallmatrix} \text{OH} \\ \text{OH} \end{smallmatrix}$, которая относится к слабым электролитам и существует только в водном растворе, придавая ему кисловатый вкус. Из всего количества растворенного CO_2 только 0,3 % взаимодействует с водой до образования угольной кислоты, остальная часть находится в свободном состоянии [10, 147].

Реакция гидратации диоксида углерода происходит медленно в сравнении с диссоциацией угольной кислоты и зависит от pH раствора. Согласно графикам рисунка 1.1, при $pH = 4,3$ вся углекислота находится в виде свободного диоксида углерода CO_2 и ее гидратированной формы H_2CO_3 , при $pH = 8,35$ практически вся в форме ионов бикарбоната HCO_3^- , а при повышении pH до 12 представлена только карбонатными ионами CO_3^{2-} [22].

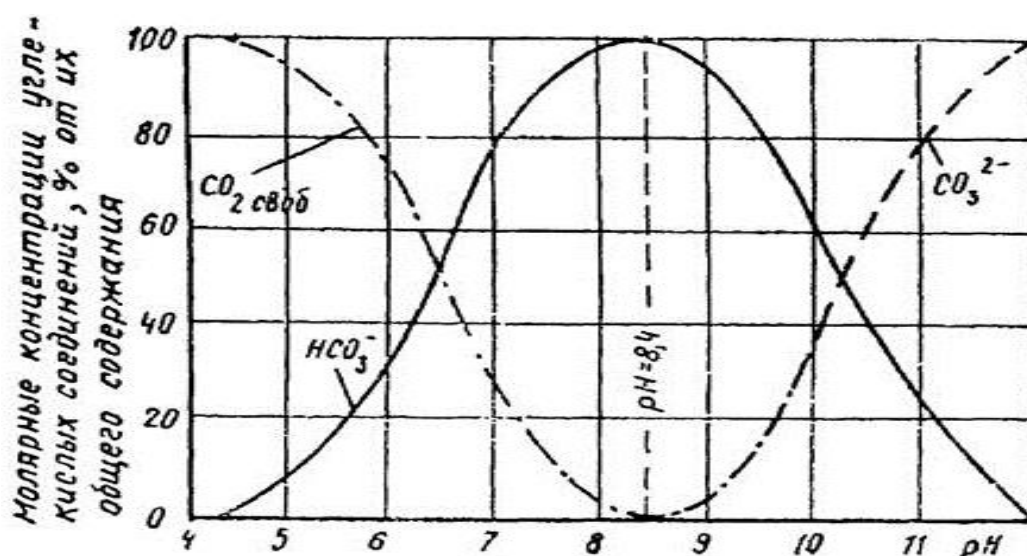
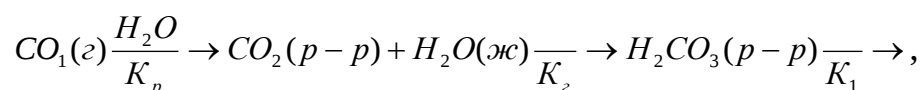
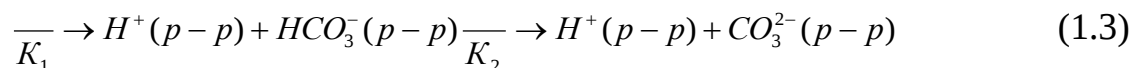


Рисунок 1.1 [22] – Зависимость отношения CO_2 , HCO_3^- и CO_3^{2-} от pH воды (при $t = 25^\circ \text{C}$)

Последовательность равновесий при взаимодействии в системе $CO_2 - H_2O$ представлена в виде [147]





константы равновесия на промежуточных этапах при 20 °С имеют значение

$$K_p = [CO_2] / P_{CO_2} = 3,6 \cdot 10^{-2}, \quad K_s = [H_2CO_3] / [CO_2] = 3 \cdot 10^{-3}, \quad (1.4)$$

$$K_1 = [H^+] \cdot [HCO_3^-] / [H_2CO_3] = 1,3 \cdot 10^{-4}, \quad K_2 = [H^+] \cdot [CO_3^{2-}] / [HCO_3^-] = 5 \cdot 10^{-11}. \quad (1.5)$$

Константы диссоциации угольной кислоты зависят от температуры воды, при этом константа скорости гидратации CO_2 снижается, а константы диссоциации первой и второй ступеней увеличиваются [157].

Содержащиеся в воде ионы бикарбоната HCO_3^- , карбоната CO_3^{2-} и двуокись углерода связаны между собой углекислотным равновесием

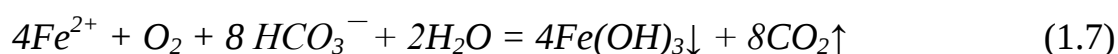


Согласно уравнению (1.6) для поддержания в растворе определенного количества бикарбонатных ионов $[HCO_3^-]$ необходимо наличие равновесной углекислоты. Если в воде $[CO_2] \gg [CO_2]_{равн}$, то ее избыток способен вызывать растворение карбоната кальция (агрессивная вода), если же $[CO_2] \ll [CO_2]_{равн}$, то будет происходить распад части бикарбонатных ионов с образованием CO_2 .

Различают химически несвязанную и химически связанную углекислоту, обозначая при химическом анализе общую (H_2CO_3, CO_2, HCO_3^- и CO_3^{2-}), свободную (равновесную + агрессивную = $H_2CO_3 + CO_2$), карбонатную (связанную в виде ионов CO_3^{2-}), гидрокарбонатную (полусвязанную в виде ионов HCO_3^-) [22, 23].

Содержание в воде угольной кислоты не регламентируется СанПиН 2.1.4.1074-01 [133], однако процессы обезжелезивания, коагуляции, умягчения, обессоливания ионообменными методами, обескремнивания солями алюминия, стабилизационной обработки и борьбы с коррозией, требуют постоянного контроля за ее концентрацией в воде с целью удаления или связывания [42, 84].

Растворенное железо в подземной воде региона присутствует, в основном, в виде $Fe(HCO_3)_2$, устойчивость соединения зависит от наличия углекислоты и кислорода. На окисление 1 мг железа (II) стехиометрически, согласно уравнению



расходуется 0,143 мг кислорода, при этом щелочность воды снижается на 0,036 ммоль/дм³ и выделяется 1,6 мг CO₂ [76, 110, 113, 157].

Выбор метода обезжелезивания зависит от концентрации и формы нахождения железа в воде (ионы двухвалентного железа, коллоидные органические и неорганические соединения, истинно-растворенные органические соединения двух- и трехвалентного железа) [110].

В регионе широко применяется метод упрощенной аэрации с фильтрованием. Обезжелезивание при упрощенной аэрации является гетерогенным автокаталитическим процессом, не требует окисления двухвалентного железа в трехвалентное до фильтрации, позволяет отказаться от специальных аэрационных устройств и контактных емкостей, снижает капитальные и эксплуатационные затраты. Насыщение воды кислородом с одновременным удалением свободной углекислоты происходит путем излива воды или подачи воздуха в обрабатываемую воду.

При недостаточном удалении свободной углекислоты, ее молекулы концентрируются на поверхности каталитической пленки загрузки фильтров обезжелезивания, нарушая процессы окисления железа из-за отсутствия контакта воды с пленкой (явление газовой кольматации) [110, 145]. Образующаяся в процессе обезжелезивания свободная углекислота приводит к местному снижению значения pH , замедлению процесса окисления и гидролиза, с возможным локальным растворением неустойчивых гидроокисей двух- и трехвалентного железа [9].

М.С. Шкроб отметил [159], что углекислота придает воде весьма малую кислотность, но действие угольной кислоты на сталь больше, чем сильной соляной кислоты из-за буферных свойств раствора CO₂. В малых концентрациях свободная углекислота оказывает косвенное влияние на коррозионный процесс, препятствуя осаждению карбонатного осадка, который может существенно затормозить коррозию. При высоком содержании свободной углекислоты и низких значениях pH воды ускоряется коррозионный процесс с кислородной и водородной деполяризацией [2, 34, 124, 157].

В результате коррозии трубопроводов содержание железа в воде возрастает при ее транспортировке, уменьшается пропускная способность трубопроводов,

увеличиваются расходы электроэнергии на создание необходимого давления в сети, могут появляться свищи и происходить утечка воды [111, 124].

Повышенные концентрации углекислоты приводят к уменьшению емкости высокоосновных анионитов по ионам кремниевой кислоты и требуют повышенного расхода едкого натрия при их регенерации [146, 159], обуславливают необходимость включения между ступенями ионнообменных фильтров декарбонизаторов воды для удаления CO_2 , увеличивая капитальные и эксплуатационные затраты [23, 122, 128].

В дальнейших исследованиях рассматривается удаление избыточной (агрессивной) свободной углекислоты.

1.1.4 Анализ работы станций обезжелезивания в Тюменском регионе

Подземные воды региона характеризуются повышенными концентрациями свободных газов (CO_2 , H_2S , CH_4), растворенного железа, марганца, кремния, аммонийных соединений и примесей органического происхождения, показатели качества воды ряда объектов приведены в таблице 1.1.

В Тюменской области внедрялись станции обезжелезивания, работающие по методу упрощенной аэрации с фильтрованием на напорных зернистых фильтрах, которые не всегда обеспечивали требуемую степень очистки воды [5, 15, 48, 49, 74, 136, 148], что послужило поводом для анализа действующих технологических схем очистки.

В результате исследований, проведенных НИИ КВОВ по улучшению очистки подземных вод для г. Нефтеюганска, была предложена комплексная технологическая схема очистки воды, включающая дегазацию, озонирование, коагуляцию, фильтрование на песчаных и угольных фильтрах, обеззараживание воды (рисунок 1.2). Авторы проекта реконструкции станции (ГУП «МосводоканалНИИпроект») установили, что наряду с применением реагентов предварительная аэрация воды на дегазаторах-аэраторах является необходимой ступенью водоочистки для удаления основной массы свободных

Таблица 1.1 – Показатели качества подземных вод на объектах Тюменского региона

Наименование показателей	Объекты					
	пгт. Пойковский [49]	г. Сургут [148]	г. Лангепас	г. Нефтеюганск	г. Мегион	г. Лянтор
Запах при 20°С, баллы	1	1	1	0	1	0
Привкус при 20°С, баллы	0	—	0	0	0	0
Цветность, град.	38–45	5,0–15,0	10–50	13,4–30,2	10–30	58–78
Мутность, мг/дм ³	0,7–0,9	0,2–0,4	1,1–2,5	0,02–1,50	0,5–1,2	0,18–0,80
<i>pH</i>	7,0–7,4	7,0–7,3	6,5–7,3	6,9–7,3	7,0–7,2	7,0–7,1
Железо общее, мг/дм ³	1,35–1,5	2,0–2,2	1,50–3,75	1,16–2,50	2,5–4,2	1,14–2,56
Марганец, мг/дм ³	—	0,05–0,06	0,07–0,27	0,02–0,09	0,05–0,36	0,016–0,050
Хлориды, мг/дм ³	—	—	4,2–50	6–53	3–45	64–128
Сульфаты, мг/дм ³	—	—	0,02–7,00	—	—	4,0–6,5
Сухой остаток, мг/дм ³	—	200–250	320–450	170–290	358–404	242–418
Жесткость общая, °Ж	—	1,0–1,2	2,5–5,9	0,64–1,22	1,5–2,5	0,5–0,7
Свободная углекислота, мг/дм ³	40–45	20–40	50–100	20–30	30–40	25–40
Метан, мг/дм ³	до 30	10–20	10–60	10–30	25–30	5,3–27,7
Щелочность, ммоль/дм ³	5,8–6,0	3,0–3,2	4,8–5,6	2,9–4,5	4,6–6,6	2,6–3,5
Температура, °С	1–3	1	3–8	4	8	6
Сероводород, мг/дм ³	< 0,5	0,5	1,74–1,95	0,2–0,5	0,05–0,20	0,90–1,14
Окисляемость перманганатная, мг О ₂ /дм ³	4–7	3,0–3,3	3,75–11,70	4,0–7,5	4,5–6,0	5,76–7,10
Нитриты, мг/дм ³	—	0,001–0,008	—	—	—	—
Нитраты, мг/дм ³	—	0,2–0,6	0,8–1,1	0,8–1,6	—	—
Нефтепродукты, мг/дм ³	—	до 0,1	0,15–0,73	0,08–0,10	0,04–0,13	0,10–0,26

Продолжение таблицы 1.1

Наименование показателей	Объекты					
	г. Ялуторовск	ФБУ ЦР «Тараскуль»	п. Онохино	г. Тюмень	г. Ишим	г. Нягань [74]
Запах при 20°С, баллы	1	1	2	2	1	3
Привкус при 20°С, баллы	2	1	2	2	2	—
Цветность, град.	20	5	10	10	20	25–40
Мутность, мг/дм ³	3,25	< 1	2,5	< 1	50,9	1,5–2,0
<i>pH</i>	6,8	6,5	6,6	6,8	6,85	6,2
Железо общее, мг/дм ³	3,18	14,0	4,8	5,3	9,38	1,2–4,1
Марганец, мг/дм ³	0,44	0,4	0,18	0,02	0,26	0,82
Хлориды, мг/дм ³	57,72	12,0	—	5,0	77,0	3,8
Сульфаты, мг/дм ³	9,43	8,2	—	4,5	49	8,0
Сухой остаток, мг/дм ³	597,5	490	320	350	600	30–70
Жесткость общая, °Ж	9,43	3,3	3,5	3,5	8,5	0,20–0,30
Свободная углекислота, мг/дм ³	65	60–200	80–100	80	60	60–120
Метан, мг/дм ³	—	—	—	—	—	0,2
Щелочность, ммоль/дм ³	9,7	4,6	4,6	4,8	4,2	0,5
Температура, °С	6	6	6	6	6	2–4
Сероводород, мг/дм ³	< 0,5	< 1,0	< 0,5	< 1,0	< 1,0	0,8
Окисляемость перманганатная, мг О ₂ /дм ³	4,24	10,5	5,3	4,5	9,6	3,0–3,5
Нитриты, мг/дм ³	—	0,19	—	0,001	0,2	—
Нитраты, мг/дм ³	—	0,05	—	0,15	36,0	40
Нефтепродукты, мг/дм ³	н/о	—	—	0,05	1,35	0,4

« — » — нет данных; « н/о » — не обнаружено

газов (CO_2 и CH_4), что позволяет достичь требуемых показателей содержания железа и повысить эффективность последующей реагентной обработки воды [5].

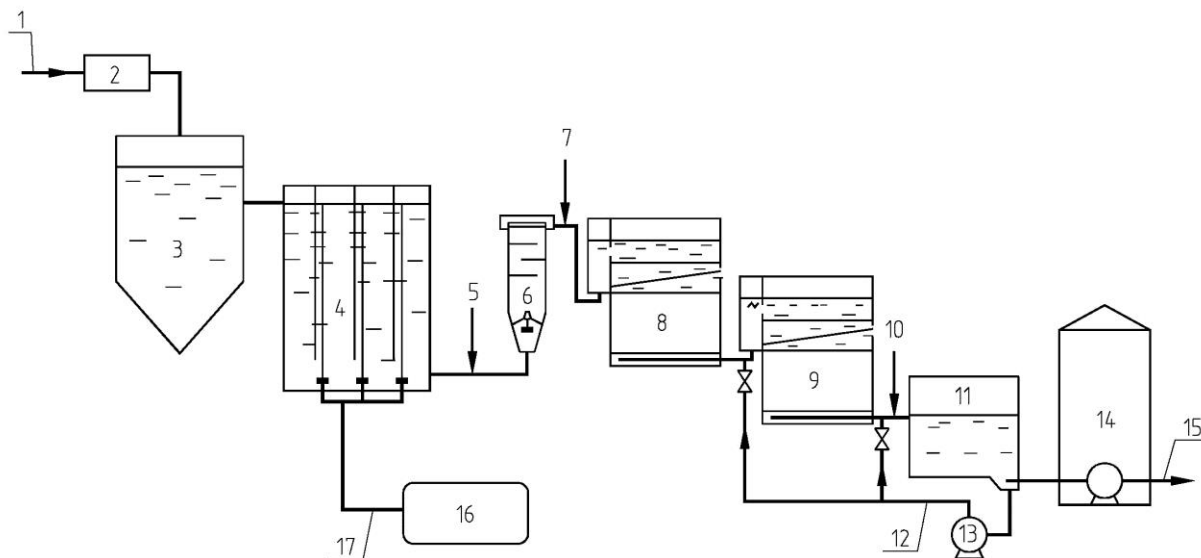


Рисунок 1.2 – **Принципиальная схема очистки подземных вод для г. Нефтеюганска [5]:**
 1 – подача исходной воды из скважины; 2 – высокоэффективный аэратор; 3 – дегазатор-аэратор;
 4 – контактная камера; 5 – подача коагулянта; 6 – смеситель; 7 – подача флокулянта;
 8 – скорый фильтр с двухслойной загрузкой; 9 – угольный фильтр; 10 – подача хлорреагента;
 11 – резервуар чистой воды; 12 – подача воды на промывку фильтров; 13 – промывной насос;
 14 – насосная станция II подъема; 15 – подача воды потребителю; 16 – озонаторный блок;
 17 – подача озono-воздушной смеси

В г. Когалыме для эффективного удаления железа была предложена безреагентная очистка по следующей схеме: подача исходной воды в аэрационно-дегазационную установку → фильтрование через гидроантрацит → доокисление кислородом в камере смешения → фильтрование через антрацит Еврезит → обеззараживание [15].

Подземные воды Хуготского водозабора г. Нягани с малым солесодержанием, высоким содержанием агрессивной уголекислоты, железа и марганца (таблица 1.1) предлагалось очищать по технологической схеме: стабилизация воды гидроксидом кальция → обезжелезивание и деманганация на двухступенчатых осветлительно-сорбционных фильтрах с плавающей и тяжелыми загрузками → обеззараживание гипохлоритом кальция или натрия → фторирование [74].

На водоочистной станции «Кедровый лог» г. Сургута аэрация воды осуществлялась по двум схемам. По первой схеме в качестве аэратора-дегазатора ис-

пользовалась вентиляторная градирня с последующим доокислением железа в промежуточном резервуаре в течение 30 минут, при этом нарушался режим образования в загрузке фильтров каталитической пленки, что снижало эффект обезжелезивания.

По второй схеме очистки для насыщения воды кислородом воздуха предусматривалась его подача через редукционный клапан перед смесителем, после чего вода подавалась на напорные фильтры. Отсутствие дегазатора в данной схеме приводило к загазованности загрузки фильтров и ухудшало процесс обезжелезивания. Для повышения эффективности работы была проведена реконструкция станций: по первой схеме – произведена замена деревянной хордовой насадки на насадку из пластмассовых блоков призм высотой 0,5 м (эффект дегазации повысился на 15 %); по второй схеме – введен в эксплуатацию барботажный аэратор-дегазатор (рисунок 1.3), что обеспечило устойчивый эффект по удалению метана и железа [148].

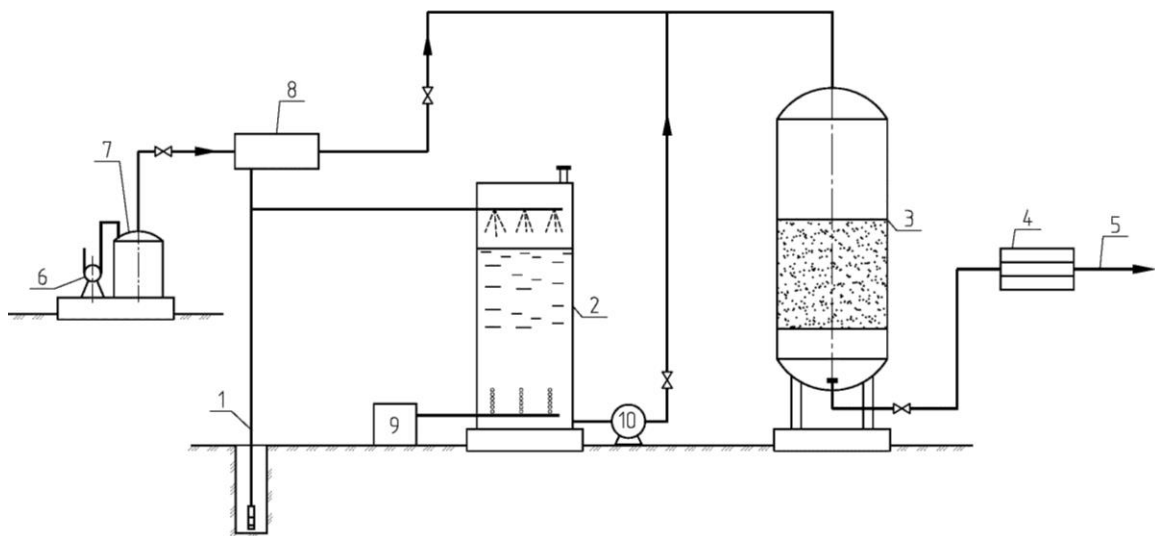


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема очистки подземных вод для г. Сургута [148]:

- 1 – подача исходной воды из скважины; 2 – барботажный дегазатор-аэратор; 3 – напорный фильтр; 4 – бактерицидная установка; 5 – подача воды потребителю; 6 – компрессор; 7 – ресивер; 8 – смеситель; 9 – турбокомпрессор; 10 – насос

Подземный источник хозяйственно-питьевого водоснабжения тюменского Центра реабилитации «Тараскуль» содержит высокие концентрации железа (до 14 мг/дм³) и растворенной углекислоты (до 200 мг/дм³). Станция обезжелезивания выполнена по схеме двухступенчатого фильтрования (контактный и механический фильтры) в напорном варианте, подача воздуха осуществлялась в уста-

новленный перед фильтрами смеситель, который не обеспечивал достаточного смешения воды с воздухом, эффективность удаления углекислоты составляла не более 5–10 %. Было предложено увеличить количество подаваемого воздуха, заменить смеситель-аэратор и установить воздушник-пробоотборник (вантуз) для удаления избытка воздуха, накапливающегося в загрузке фильтров (рисунок 1.4) [18].

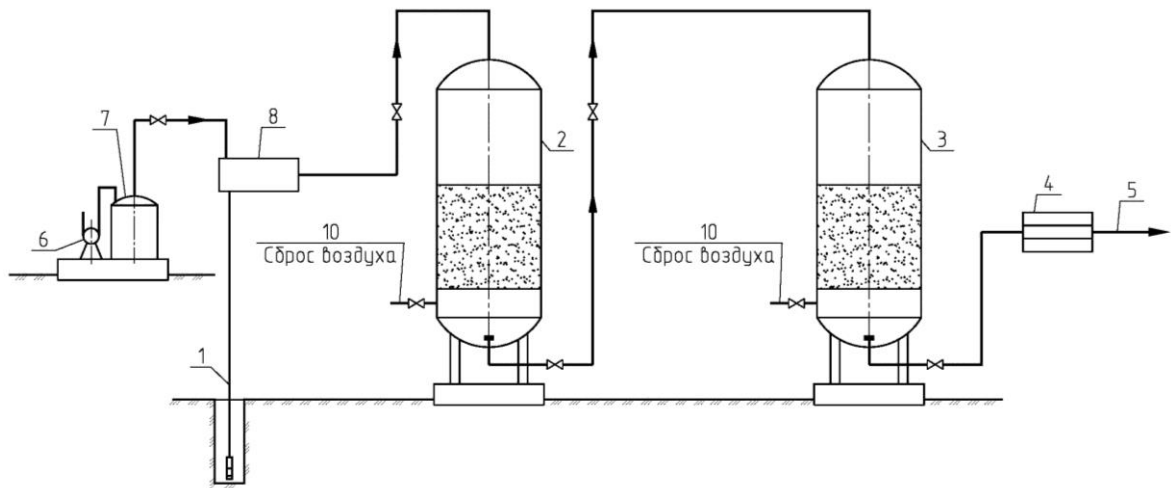


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема очистки подземных вод станции обезжелезивания Центра реабилитации «Тараскуль», Тюменский район [18]:

1 – подача исходной воды из скважины; 2 – напорный контактный фильтр; 3 – напорный осветлительный фильтр; 4 – ультрафиолетовое обеззараживание; 5 – подача воды потребителю; 6 – компрессор; 7 – ресивер; 8 – смеситель-аэратор; 10 – воздушник-пробоотборник (вантуз)

В результате изменения конструкции смесителя и удаления избытка воздуха, концентрация железа в воде после фильтров составила $0,5\text{--}0,6 \text{ мг/дм}^3$, требуемые нормативные показатели не были достигнуты из-за присутствия в воде железоорганических комплексов.

На основании исследований и внедрения различных технологий очистки подземной воды в регионе авторами [49, 73] были определены области применения методов очистки и обезжелезивания: безреагентные – при низкой цветности воды; реагентные – при средней и высокой цветности, обусловленной наличием гуминовых соединений. В связи с наличием практически во всех водоносных горизонтах свободных газов необходимо осуществлять дегазацию воды. Эффективность дегазации для разных объектов региона при различных способах аэрации воды представлена в таблице 1.2 [19].

Таблица 1.2 – Эффективность дегазации для разных объектов региона

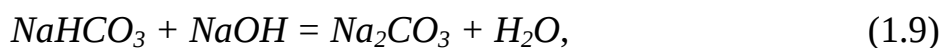
Объект	Типы аэрации	Расход воздуха, м ³ /м ³	Кол-во [CO ₂] в исх. воде, мг/дм ³	Кол-во [CO ₂] в аэрированной воде мг/дм ³	Эффект удаления CO ₂ , %
п. Тараскуль	упрощенная в напорном режиме	4	100	60	40
пгт. Пойковский	«сухая» фильтрация	4	62–79	37–58	12–36
п. Велижаны (г. Тюмень)	барботаж в свободном объеме	3	120	68	43
п. Онохино	упрощенная	—	100	56	44
г. Ялуторовск	упрощенная	—	65	52	20
г. Ханты-Мансийск (в/з Северный)	упрощенная в напорном режиме	0,1	31	25	20
г. Ханты-Мансийск (в/з Южный)	барботаж, (5 мин)	1	86	43,5	49,4
п. Губкинский	барботаж	12	60	10	83
г. Сургут	барботаж (5 мин)	5	40	24	40
г. Сургут	градирня вентиляторная	—	54–67	22–36	40–53
г. Салехард	градирня контактная	—	30	20	33
п. Новотарманск	упрощенная в напорном режиме	2	90	55	26
г. Лангепас	упрощенная в напорном режиме	1	100	80	20
г. Лянтор	градирня контактная	—	32	20	37

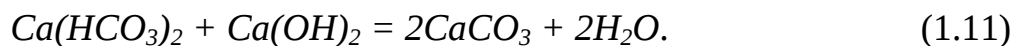
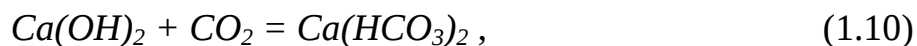
Поскольку метод упрощенной аэрации не всегда обеспечивает требуемых эффектов удаления CO₂ при повышенных ее концентрациях в подземной воде (таблица 1.2), то появляется необходимость внедрения в технологические схемы высокоэффективных дегазаторов [45, 46].

1.1.5 Методы дегазации воды

Методы дегазации по принципу воздействия на обрабатываемую воду делятся на три группы – химические, биохимические и физические.

Для связывания углекислоты химическим методом применяют щелочи (известь, едкий натр), при этом углекислота переходит сначала в ионы бикарбоната, а затем в ионы карбоната, согласно уравнениям [85, 152]





Химические методы устранения углекислоты в хозяйственно-питьевом водоснабжении не применяются из-за их трудоемкости, дороговизны и необходимости строгого соблюдения дозировки реагентов [94].

Широкое распространение в практике дегазации-аэрации воды получили физические методы, основанные на действии закона Генри-Дальтона, согласно которому количество растворенного газа зависит от величины его парциального давления над раствором и температуры воды. Парциальное давление многих газов, в частности углекислоты, в атмосферном воздухе близко к нулю, поэтому при контакте воды и воздуха за счет разности парциальных давлений удаляемого газа происходит переход его молекул из жидкости в воздух (десорбция).

К физическим методам дегазации относятся: 1) упрощенная аэрация – свободный излив, разбрызгивание над водной поверхностью (без и с принудительной подачей воздуха), брызгальные установки; 2) упрощенная аэрация в напорном варианте; 3) насадочные дегазаторы (без и с принудительной подачей воздуха); 4) эжекционная дегазация-аэрация; 5) барботаж (в свободном объеме, двойного действия, пенного типа, с гравийной загрузкой); 6) вихревая деаэрация (без и с принудительной подачей воздуха); 7) вакуумная; 8) термическая; 9) ультразвуковая; 10) волновая дегазация. Эжекционная, термическая, вакуумная деаэрация применяются, в основном, в теплоэнергетике, волновая дегазация [29] находится в стадии исследований.

Процессы удаления растворенной углекислоты и кислорода при водоподготовке в теплоэнергетике исследовали М.С. Шкроб, Ф.Г. Прохоров [159], А.П. Мамет [101], Д.П. Елизаров, В.А. Пермяков [52], В.С. Галустов [26, 27], И.К. Гришук [38], И.Г. Комарчев [87], В.И. Шарапов, М.А. Сивухина [157] и др. Существенное отличие методов дегазации в теплоэнергетике – полное удаление растворенных газов при высокой температуре обрабатываемой воды (60–100 °С) с переходом в парообразное состояние.

В хозяйственно-питьевом водоснабжении физические методы используют не только для достижения минимального газосодержания (десорбция), но и для насыщения воды кислородом воздуха (абсорбция) [42, 45, 105].

Фундаментальные исследования по широко применяемым в водоснабжении барботажным дегазаторам, вентиляторным и контактными градирням были проведены А.А. Кастальским [80], исследования по удалению CO_2 на брызгальных установках – Л.П. Румянцевой [130]. Проблемами дегазации воды, используемой для нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения, занимались В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова [41, 42], Ю.Л. Сколубович [138], Н.Д. Артеменок [8], Д.В. Глазков [31], В.А. Сучков [148], А.Г. Жулин, О.В. Болотова [59, 63, 65] и др.

Методы упрощенной аэрации характеризуются конструктивной простотой, технологической надежностью и низкой себестоимостью, однако из-за малой эффективности удаления углекислоты рекомендуются к применению при исходных концентрациях $[CO_2]$ не более 50 мг/дм^3 [18, 46].

Свободный излив – это ступенчатый каскад, излив с различной высоты в карман, центральный канал или на открытую поверхность фильтра, в этом случае наблюдаются минимальные эффекты снижения содержания углекислоты из-за малых площадей поверхности соприкосновения воды и воздуха, непродолжительности их контакта. В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова рекомендуют применять свободный излив на водную поверхность (или через водослив) с высоты 0,4–0,5 м при исходной концентрации углекислоты в воде не более 20 мг/дм^3 , а разбрызгивание факелом или струями – при концентрациях от 20 до 50 мг/дм^3 [41]. В условиях региона из-за низких температур подземной воды (1–5 °С) излив из отверстий дает эффект удаления CO_2 равный 33 % [65]. Лучшие результаты показывают брызгальные установки, в которых разбрызгивание воды из сопел и отверстий перфорированных труб осуществляется на свободную поверхность [65, 130] или на жесткий контактный слой с развитой поверхностью [42]. Высокий эффект удаления CO_2 (80–85 %) при разбрызгивании воды, полученный Л.П. Румянцевой [130], не достигается в климатических условиях Тюменского региона. К преимуществам брызгальных установок относят малый расход воды на собственные

нужды и возможность применения при любой производительности станции обезжелезивания.

Эффективность удаления углекислоты значительно увеличивается при разбрызгивании воды на свободную поверхность фильтра с принудительной подачей воздуха (поддув под факел), по данным авторов [42] при скоростях излива 18–30 м/ч без поддува эффект удаления углекислоты составил 30 %, а с принудительной подачей воздуха под факел – 70 %. Отмечены недостатки метода – металлоемкость, необходимость соблюдения оптимальных значений скоростей воздушного и водного потоков для исключения капельного уноса и зарастание окислами железа элементов конструкций.

На станциях обезжелезивания с напорными фильтрами при использовании метода упрощенной аэрации в напорном варианте максимальный эффект удаления углекислоты составляет не более 20 % [57].

При высоких исходных концентрациях растворенной углекислоты в подземной воде (от 50 мг/дм³ до 200 мг/дм³) применяются насадочные, барботажные, вихревые дегазаторы.

Насадочные дегазаторы (вентиляторные и контактные градирни) используют для создания большой поверхности контакта воды и воздуха, создания турбулизации потоков [108, 119, 157]. Плотность орошения для насадочных дегазаторов с регулярной насадкой принимают равной 10–12 м³/м²·ч [78], для неупорядоченной насадки из колец Рашига – 60 м³/м²·ч, для деревянной хордовой насадки – 45 м³/м²·ч [80]. Удельный расход воздуха по данным А.А. Кастальского должен составлять не менее 15–20 м³/м³, В.И. Шарапов и О.В. Лифшиц [100, 157], считая эти значения недостаточными, рекомендуют 25–40 м³/м³.

Градирни используются при любых исходных концентрациях растворенной углекислоты на территориях с мягкими климатическими условиями [79, 154, 157]. При низких температурах исходной воды и воздуха эффективность удаления углекислоты на градирнях составляет не более 20–30 % [118, 148], что объясняется невысокими значениями коэффициентов массопередачи из-за ограничения скорости воздуха и обледенения градирен в зимний период года. В условиях региона

применение градирен ограничивается исходным содержанием углекислоты в воде до 100 мг/дм^3 и необходимостью размещения в закрытых помещениях.

Особенности конструктивных решений барботажных дегазаторов определили их разновидности: обычный барботер (в свободном объеме) [65, 80], двухсекционный [80], дегазатор пенного типа [95] и дегазатор с гравийной загрузкой [63, 150].

Первые исследования по снижению содержания углекислоты на обычных барботажных дегазаторах были проведены А.П. Маметом [101], по данным которого удельный расход воздуха следует принимать не более 10 кг на 1 м^3 воды, что при плотности воздуха равной $1,29 \text{ кг/м}^3$ соответствует удельному расходу $7,7 \text{ м}^3$ воздуха на м^3 воды, при этом эффект удаления углекислоты составил около 80% . Однако Ю.Л. Сколубович, Д.В. Глазков, А.А. Агейчик и др. [31, 116, 138] отмечают, что даже при больших значениях удельного расхода воздуха эффекты удаления углекислоты не превышают $50\text{--}60 \%$. По данным французской компании Дегремон [150] при интенсивности подачи воздуха $50\text{--}100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ эффект удаления углекислоты составит $65\text{--}75 \%$.

В условиях региона применение барботажных дегазаторов в свободном объеме ограничивается исходной концентрацией углекислоты в воде не более 100 мг/дм^3 [59].

Для повышения эффекта удаления углекислоты на барботажных дегазаторах А.А. Кастальским была предложена конструкция двухсекционного дегазатора, состоящего из двух одинаковых секций, установленных друг над другом. Обрабатываемая вода разбрызгивается в верхней части секции и, соприкасаясь с потоком восходящего воздуха, стекает, накапливается в нижней части, где продувается воздухом, который равномерно распределяется с помощью дырчатого листа с отверстиями диаметром 2 мм . Подача воды во вторую секцию происходит при переливе ее через переливное отверстие по трубопроводу, где повторяется аналогичный цикл. Максимальный эффект удаления углекислоты составил 80% при расходе воды $60 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и значениях удельного расхода воздуха $9\text{--}10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [80]. Несмотря на заявленные эффекты удаления CO_2 , предложенный дегазатор не на-

шел широкого применения из-за сложности конструкции и металлоемкости.

А.Г. Жулиным, О.В. Болотовой исследовалась конструкция гравийного дегазатора [63], в котором активизация массопереноса происходит за счет загрузки, создаются зоны турбулизации в малом межпоровом пространстве и обеспечивается длительный контакт воды с воздухом. Максимальный эффект удаления углекислоты составил 80 % при продолжительности продувки не более 5 минут, значениях удельного расхода воздуха $4\text{--}6 \text{ м}^3/\text{м}^3$, высоте слоя загрузки до 1 м. К недостаткам барботера отнесены малые скорости движения воды и периодическое забивание слоя окислами железа.

В дегазаторе пенного типа вода тонким слоем протекает вдоль решетки и вспенивается под действием поперечного тока воздуха, подаваемого через отверстия решетки. Несмотря на высокий эффект удаления углекислоты – 97 %, дегазатор не нашел применения в связи малой производительностью (до $100 \text{ м}^3/\text{ч}$) и трудностями в эксплуатации [95, 111, 157].

В водоснабжении Западно-Сибирского региона применяется аэратор-дегазатор вихревого типа, предложенный В.В. Дзюбо. Принцип действия конструкции основан на использовании центробежно-вихревого движения капельного дождя и воздуха, по данным автора эффект удаления углекислоты составил 80–91 % при исходной концентрации $180 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Преимуществом данного дегазатора является сокращение времени обработки воды до 3–5 минут при высокой эффективности, недостатком – вероятность капельного выноса и относительно высокие энергетические затраты [41, 43].

Анализ существующих сооружений по дегазации воды (Приложение А) показал, что конструкция барботажного дегазатора в свободном объеме позволяет взять ее за основу для проведения исследований по интенсификации процесса десорбции углекислоты.

1.2 Теоретические аспекты процесса десорбции углекислоты

1.2.1 Массоперенос при десорбции

При барботаже эффективность десорбции углекислоты зависит от величины поверхности раздела фаз, разности концентраций газа в воде и воздухе, физико-химических свойств системы, скорости движения фаз и конструкции дегазатора. Интенсификация эффективности массопереноса достигается путем развития поверхности контакта фаз вода-воздух, противотока движения фаз и турбулизации [82].

В противоточном режиме при турбулизации фаз вода-воздух имеет место молекулярная диффузия и конвективный перенос. Суммарно поток вещества под действием конвективного переноса и молекулярной диффузии в пограничном слое запишется [114]

$$\overline{j_k} = \overline{u}c + D_d \nabla^2 c \quad (1.12)$$

где $\overline{j_k}$ – конвективный поток, кг/м²·с; $\overline{u}$ – скорость движения среды носителя; c – объемная концентрация этого вещества в потоке; $D_d \nabla^2 c$ – оператор Лапласа (лапласиан) описывает диффузионный массоперенос в однофазном потоке; D_d – коэффициент молекулярной диффузии.

В общем случае решение уравнения (1.12) для расчета процессов массообмена в турбулентном потоке не представляется возможным, поэтому используются упрощенные модели поведения потоков с поверхностью раздела фаз: стационарная пленочная модель массоотдачи, модель обновления поверхности, модель гидродинамических и диффузионных пограничных слоев и др. [112, 114].

Для процесса удаления углекислоты из подземной воды принимается модель гидродинамических и диффузионных слоев, при которой ближе к поверхности раздела располагается диффузионный слой, между ядром потока и диффузионным слоем – гидродинамический слой, толщина которого на порядок больше диффузионного. Для определения коэффициентов массопередачи используется схема двухслойной модели, рисунок 1.5.

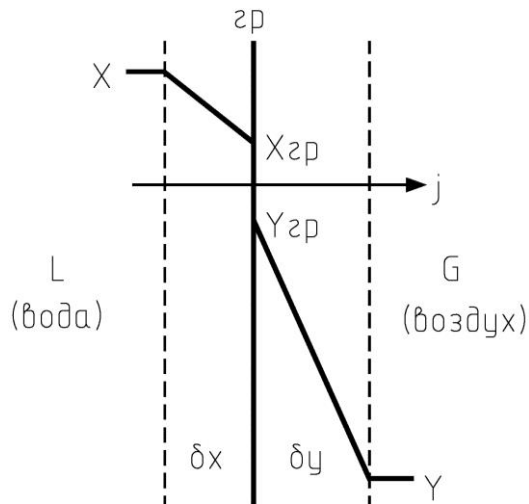


Рисунок 1.5 – Двухслойная модель массопередачи между фазами G (газ) и L (вода) через границу раздела фаз [112]

Перенос газа из основной массы жидкой фазы L , где концентрация компонента X , в газовую фазу G , где концентрация компонента Y , происходит поперек двух пристенных (приграничных) слоев сформировавшихся у каждой фазы

$$j = \beta_Y (Y - Y_{zp}) = \beta_X (X_{zp} - X). \quad (1.13)$$

Численные значения разностей концентраций $(Y - Y_{zp})$ и $(X_{zp} - X)$ обычно не бывают равными и значения коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах β_Y и β_X также имеют различные числовые значения. Коэффициенты массоотдачи отражают реальные процессы (массообменные и гидродинамические), протекающие вблизи границы раздела фаз, однако сложность их определения связана с непостоянством коэффициентов диффузии $D_{x,y}$ и толщины диффузионных пограничных пленок $\delta_{x,y}$ в воде и воздухе, влияющих на значения β_x и β_y . Концентрации газа на границе раздела фаз постоянно изменяются во времени и при десорбции их практически невозможно определить [112, 114].

Обобщенно интенсивность массообмена (j) описывается уравнением массоотдачи

$$j = \beta(c_{zp} - c_0), \quad (1.14)$$

согласно которому массообмен между потоком и границей раздела фаз пропорционален коэффициенту массоотдачи β и разности концентраций вещества на поверхности c_{zp} и в потоке c_0 .

Коэффициент массоотдачи β (м/с), соответствует массе вещества в кг, прохо-

дящей через единичную поверхность 1 м^2 за единицу времени 1 с при разности концентраций на поверхности и в потоке равной 1 кг/м^3 . «Коэффициент массоотдачи β интегрально включает в себя всю сложную совокупность гидродинамических и концентрационных факторов, влияющих на интенсивность массообмена (массоотдачи)» [112], численное значение β находится на основе экспериментальных данных, полученных для конкретных условий массообмена. Результаты экспериментов по определению значения коэффициента массоотдачи представляются в обобщенной критериальной форме – зависимости определяемого критерия Шервуда $Sh = \frac{\beta l}{D}$, характеризующего соотношение конвективного и диффузионного потоков вещества по одну сторону границы раздела фаз от всех иных определяющих критериев и симплексов [112, 114]

$$Sh = f(Re, Sc, Fo, Ar, \Gamma_1 \Gamma_2, \dots), \quad (1.15)$$

где Re – критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил инерции и сил вязкости, также Re трактуют как безразмерную скорость; Sc – критерий Шмидта, описывает связь скоростного и концентрационного полей; Fo – критерий Фурье, выражает соотношение потоков вещества накопленного и перенесенного диффузией; Ar – критерий Архимеда, характеризует интенсивность возникающей естественной и гравитационной конвекции; $\Gamma_1 \Gamma_2$ – геометрические симплексы для геометрически неподобных систем.

В практике анализа и обработки экспериментальных данных обычно используется достаточно универсальная и гибкая форма степенного одночлена

$$Sh = A \cdot Re^a Sc^b Ar^c \Gamma_1^d \Gamma_2^e, \quad (1.16)$$

в котором численные значения множителя A и показателей степеней a, b, c, d, e и др. являются результатом обработки экспериментальных данных.

Иногда для коэффициента массоотдачи получают уравнение типа $Sh = A \cdot Re^a Sc^b$, где в качестве характерного линейного размера, входящего в критерии Re и Sc , принимают размер d , который может быть средним диаметром пузырей воздуха d_{cp} при десорбции газов, либо эквивалентным диаметром насадки в слое кольцевой керамической насадки d_3 .

В ходе экспериментов по определению значения коэффициентов массоотдачи β основная трудность заключается в «невозможности непосредственного измерения концентрации переносимого из одной фазы в другую компонента на самой поверхности раздела фаз» [112]. В связи с невозможностью прямого определения деформируемой поверхности контакта фаз в газо-жидкостных потоках значения коэффициентов массоотдачи относят к единице объема двухфазной системы [30, 82, 141, 157]. Эмпирические зависимости, полученные таким образом, применимы лишь в узкой области проведенного эксперимента, не обладают прогнозностью и ограничиваются моментом разработки достоверных методов определения поверхности контакта [114].

1.2.2 Механизмы образования дисперсной фазы и изменения пузырей в турбулентном потоке

Для эффективного использования воздуха при барботаже применяются различные диспергаторы в виде дырчатых днищ, дырчатых труб, колпачков и др. Продуктом диспергирования являются пузыри разных размеров и конфигураций [163].

Согласно статической модели условием отрыва пузыря является равновесие силы поверхностного натяжения, удерживающей пузырь по периметру отверстия, с силой тяжести и силой Архимеда [112]

$$\frac{\pi \delta^3}{6} \Delta \rho g = \pi d \sigma, \quad (1.17)$$

где $\Delta \rho$ – разность плотностей фаз, кг/м³; δ – размер пузыря, м; d – диаметр отверстия диспергирования, м; σ – поверхностное натяжение, Н/м (для пузырей и капель удельная поверхностная энергия – Дж/м²).

Поверхностное натяжение зависит от свойств фаз и характеризует величину поверхностной энергии. Затраты энергии на диспергирование пузырей уменьшаются при низких значениях удельной поверхностной энергии, что характерно для пузырей больших размеров.

Модель диспергирования воздуха плотностью ρ_d из сопла диаметром d в сплошную среду с плотностью ρ_c представлена на рисунке 1.6 [114].

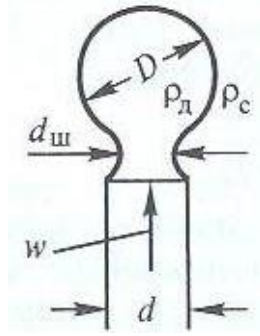


Рисунок 1.6 – Модель диспергирования пузыря

Диаметр пузыря D в момент отрыва можно определить исходя из равновесия

$$P_{II} + P_{\sigma} + P_r - P_a - P_{II} = 0, \quad (1.18)$$

где P_{II} – вес пузыря; P_{σ} – сила поверхностного натяжения; P_r – сила сопротивления при выходе диспергируемой фазы из отверстия; P_a – выталкивающая сила со стороны сплошной среды, сила Архимеда; P_{II} – сила инерции потока

$$D = \sqrt[3]{\frac{6d}{(\rho_c - \rho_d)g} \left[\sigma\psi - \frac{\rho_d w^2 d (1 - \xi)}{8} \right]}. \quad (1.19)$$

ψ – коэффициент, характеризующий тонкую перемычку-шейку; w – скорость истечения воздуха.

При низких скоростях истечения воздуха используется зависимость

$$D = \sqrt[3]{\frac{6d\sigma\psi}{(\rho_c - \rho_d)g}}. \quad (1.20)$$

Частота отрыва пузырей f_q от кромки сопла определяется по найденным размерам пузырей D и секунднему объемному расходу диспергируемой фазы V

$$f_q = \frac{V}{\pi D^3 / 6} = \frac{6V}{\pi D^3}. \quad (1.21)$$

Рассмотренные подходы применимы для пузырей сферической формы при невысоких скоростях истечения газа и диспергировании из одиночного сопла.

В турбулентном потоке происходит дробление пузырей за счет силового воздействия пульсаций, в этом случае гидродинамическая обстановка процесса дис-

пергирования усложняется, что требует получения эмпирических и полуэмпирических зависимостей для конкретных процессов и оборудования [112].

Зарубежными исследователями [162] предложена модель двухстадийной схемы образования пузыря при истечении газа с постоянным расходом для отверстий диаметров (0,2–6 мм), при этом размер пузыря равен

$$\delta = \left(\frac{6\nu}{\pi} \right)^{1/3}. \quad (1.22)$$

При больших скоростях истечения обеспечивается постоянный расход газа через отверстия, объем образующихся пузырей практически не зависит от плотности, вязкости жидкости и от сил поверхностного натяжения. Упрощенная формула для расчета отрывного объема пузыря ν при струйном режиме для постоянного расхода при $\rho_1 \gg \rho_g$, $r \gg r_N$ имеет вид [117]

$$\nu = C \frac{Q_g^{6/5}}{g^{3/5}}, \quad (1.23)$$

где константа $C = 1,090$ (может принимать другие значения); Q_g – объемный расход газа, м³/с; r – текущий объем пузыря, м; r_N – радиус отверстия или сопла, м.

При переходе от ламинарного течения к турбулентному наблюдается гидродинамическая неустойчивость, при которой силы внутреннего трения не способны компенсировать (подавить) инерционные силы, пузыри в области сдвигового течения сплошной среды могут дробиться под действием сил вязкого трения [165]. При соотношении вязкостей $\frac{\mu_{вода}}{\mu_{газ}} > 1$ происходит деформация пузыря в вытянутый эллипсоид до тех пор, пока $L > \pi B$ (где L – большая и B – малая полуоси эллипсоида), при этом поверхность раздела становится неустойчивой и пузырь распадается на две неравные части.

А.Н. Колмогоровым [112] выведено условие разрыва капли или пузыря под воздействием пульсаций турбулентного потока (рисунок 1.7), оно имеет вид

$$c_T \rho_1 v_T^2 = \frac{2\sigma}{\delta}, \quad (1.24)$$

где v_T – пульсационная скорость турбулентного потока, м/с; c_T – эмпирическая константа.

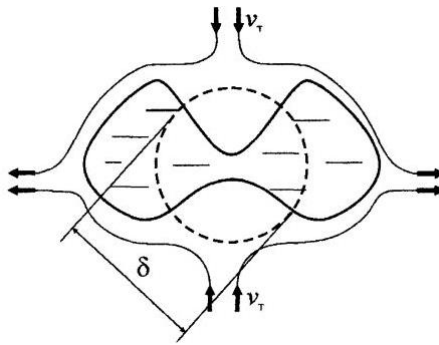


Рисунок 1.7 – Механизм дробления пузыря пульсационными струями турбулентного потока [112]

Г.М. Островский [115] выделил следующие механизмы диспергирования пузырей при движении в технологических аппаратах: колебания на лобовой поверхности пузыря под действием сил Архимеда (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца); колебания боковой поверхности пузыря, вызванные максимальной скоростью обтекания (неустойчивость Релея-Тейлора); турбулентные пульсации, действующие на разные участки поверхности пузыря.

При всплывании сферического пузыря в неограниченном объеме жидкости возникают силы трения между его поверхностным слоем и сплошной средой, в результате поверхностные слои внутри пузыря перемещаются в направлении движения жидкости, вовлекая в циркуляционное движение газ внутри пузыря, происходит его деформация и увеличение поперечного размера (рисунок 1.8 *а, б*).

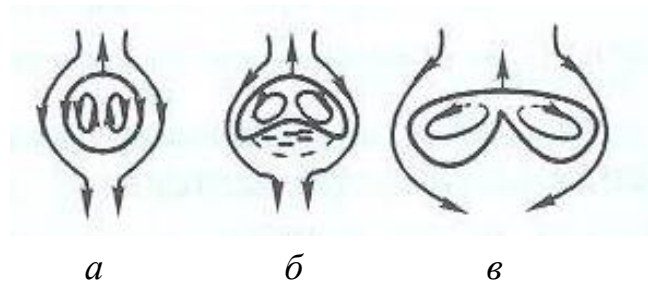


Рисунок 1.8 – Форма одиночного пузыря в процессе перемешивания:
а – сферический пузырь, *б* – деформированный пузырь, *в* – крупный пузырь в стадии разрушения [114]

Циркуляция слабо выражена в мелких (до 1 мм) пузырях из-за их низкой относительной скорости, существенного внутреннего сопротивления при повышенных значениях силы поверхностного натяжения. Интенсивная внутренняя циркуляция, обусловленная высокими скоростями движения крупных пузырей, может привести к их сильной деформации и разрушению (рисунок 1.8, *в*).

Скорость подъема крупных воздушных пузырей определяется по упрощенной зависимости [30, 86, 96]

$$u = k\sqrt{gd_e}, \quad (1.25)$$

где k – коэффициент пропорциональности теоретически равен 0,711; опытам лучше соответствует $k \approx 0,75$; d_e – эквивалентный диаметр пузыря, равный диаметру равновеликой сферы, $d_e = \sqrt[3]{6V/\pi}$; V – объем деформированного пузыря.

При высоких скоростях движения пузырей, согласно критерию Вебера $We = \rho w^2 d / \sigma$, конкурируют силы инерции и поверхностного натяжения. Числитель в критерии Вебера характеризует разности динамических напоров на противоположных концах пузыря, возникающих под действием турбулентных пульсаций скорости $\Delta p = (w_1^2 - w_2^2) \rho_c / 2 = \bar{w}^2 \rho_c / 2$, где w_1, w_2 – скорости сплошной среды на противоположных концах пузыря. Разрыв пузыря при прочих равных условиях определяется величиной усредненной скорости $\bar{w}^2$, которая зависит от масштаба турбулентных пульсаций.

При повышенном газосодержании, в результате гидродинамического взаимодействия дисперсных включений, наблюдаются многократные процессы деформации, разрушения и коалесценции пузырей, при этом их скорость относительно сплошной среды замедляется (стесненное движение).

1.2.3 Гидродинамическая обстановка в массообменном аппарате барботажного типа

Скорость стесненного движения дисперсной фазы зависит от расхода обеих фаз, размеров диспергированных элементов, конструкции аппарата.

Зависимость для объемного газосодержания ε_g газожидкостной смеси имеет вид [112]

$$\varepsilon_g = V_g / V_{гж}, \quad (1.26)$$

где $V_{гж}$ – объем газожидкостной смеси, заполняющей аппарат; V_g – объем газа, заключенного в объеме $V_{гж}$.

Удельная площадь межфазной поверхности S_V газожидкостной смеси, содержащей однородные пузыри шарообразной формы со средним диаметром δ_n , определяется формулой [112, 114]

$$S_V = 6 \cdot \varepsilon_g / \delta_n. \quad (1.27)$$

При барботаже, в зависимости от расхода газа, возникают различные режимы течения двухфазных систем, которые обусловили существование множества моделей. В.В. Кафаров [82] выделяет четыре основных режима движения потоков – пузырьковый, пробковый (снарядный), кольцевой, эмульсионный и несколько переходных: пленочно-эмульсионный, стержневой и др.

В.Н. Соколов [141], в зависимости от скорости газа, отмечает три режима движения газожидкостной смеси в барботажных аппаратах: пузырьковый, динамической ячеистой пены, динамической неячеистой пены (для пенных дегазаторов).

Пузырьковый режим наблюдается в том случае, если скорость газа в отверстии барботера v_o не превышает скорости всплывания газовых пузырей ($v_o \leq v_n$). Если скорость газа в отверстиях газораспределителя v_o больше скорости свободного всплывания пузыря v_n , то происходит переход пузырькового режима в режим динамической ячеистой пены, при этом возрастает сила инерции струи.

Верхняя граница режима динамической ячеистой пены определяется условием

$$K_\sigma = \frac{v_g}{(v_{ж} \cdot g)^{1/3}} \leq 18, \quad (1.28)$$

где K_σ – критерий режима барботажа.

При возрастании значения $K_\sigma > 18$ наступает снарядный или пробковый режим барботажа, когда газ поднимается в виде удлиненных крупных пузырей (снарядов), разделенных прослойками жидкости с мелкими пузырями [141, 161].

В промышленных сооружениях подача воздуха ведется через множество отверстий, во избежание коалесценции пузырьков отверстия истечения размещаются на достаточном удалении друг от друга, при этом шаг отверстий составляет не менее $10d$ [114].

Гидродинамические параметры двухфазного потока определяют математическую модель сооружения. Наиболее распространены модели идеального вытеснения (время пребывания всех частиц одинаково) и идеального смешения (мгновенное перемешивание входных потоков). Для барботажных дегазаторов при движении газа и жидкости в режиме противотока применима модель идеального вытеснения, распределение фаз по времени пребывания определяется экспоненциальной функцией.

Десорбционные процессы описываются диффузионной моделью потока с продольным перемешиванием (конвективный перенос), при этом различают однопараметрическую и двухпараметрическую диффузионные модели [82].

Основой однопараметрической модели служит модель вытеснения, осложненная обратным перемешиванием

$$\frac{dC}{d\tau} = -w \cdot \frac{dC}{dx} + D_L \cdot \frac{d^2 C}{dx^2}, \quad (1.29)$$

главным параметром является коэффициент турбулентной диффузии или продольного перемешивания D_L , который определяется опытным путем.

Уравнение двухпараметрической модели при движении потока в аппарате цилиндрической формы радиуса R с постоянной по длине и сечению скоростью имеет следующий вид

$$\frac{dC}{d\tau} = -w \cdot \frac{dC}{dx} + D_L \cdot \frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{D_R}{R} \cdot \frac{d}{dR} \left(R \cdot \frac{dC}{dR} \right). \quad (1.30)$$

Для нахождения значений коэффициентов продольного D_L и радиального D_R перемешивания опытным путем используют число Пекле Pe : $Pe = w \cdot L / D_L$ или $Pe_R = w \cdot L / D_R$, где L – определяющий линейный размер системы.

Количество вещества, перенесенного в единицу времени за счет молекулярной диффузии нормально к площадке f , составляет $-D_d \frac{\partial C}{\partial n} f$, где D_d – коэффициент диффузии, $\partial C / \partial n$ – градиент концентраций. В потоке с продольным перемешиванием эффективная диффузия, характеризуемая коэффициентом E , значительно превышает молекулярную $E \gg D_d$.

Потоки в реальных химико-технологических аппаратах редко соответствуют основным моделям идеального вытеснения и идеального перемешивания. В ряде случаев поведение этих потоков удастся описать с помощью ячеечной и диффузионной моделей. На практике встречаются случаи (потоки с застойными зонами, коротким байпасом, рециркуляцией), когда продольное перемешивание потоков не укладывается в эти модельные представления, тогда используются более сложные описания, содержащие большее число параметров [114].

При создании математической модели сооружений зачастую используется система с безразмерными комплексами, позволяющая провести анализ изучаемой модели и сократить множество параметров, входящих в систему дифференциальных уравнений процесса [112].

Выводы

1. Геологические, гидрогеологические и климатические факторы определяют особенности качественного состава подземных вод региона, которые имеют низкий окислительно-восстановительный потенциал, повышенное содержание растворенных в воде газов, высокие концентрации примесей органического происхождения, растворенных форм железа, марганца, кремния.

2. Анализ работы станций обезжелезивания региона показал, что процесс обезжелезивания воды зависит от степени насыщения воды кислородом воздуха с параллельным удалением растворенных газов. Предварительная дегазация воды с помощью высокоэффективных дегазаторов является необходимым звеном технологической цепи даже при использовании реагентных методов очистки.

3. Анализ и систематизация существующих дегазаторов для удаления растворенной углекислоты выявил, что несмотря на высокую эффективность некоторых моделей дегазаторов, они имеют сложную конструкцию и требуют значительных затрат на капитальное строительство и эксплуатацию. Возникает необходимость в разработке конструкции дегазатора несложной в исполнении, имеющей высокую эффективность дегазации при низких экономических затратах.

4. При барботаже эффективность десорбции углекислоты зависит от разности ее концентраций в воде и воздухе, физико-химических свойств системы, величины поверхности раздела фаз, скорости движения фаз, конструктивных особенностей дегазатора и характеризуется коэффициентом массоотдачи β .

5. При расчете количества десорбируемого газа с использованием коэффициентов массоотдачи β возникают трудности в определении концентрационного напора по ходу движения пузырей, площади поверхности контакта фаз в связи с изменением формы и размера пузырей в промышленных барботажных аппаратах, что требует перехода от системы дифференциальных уравнений к использованию математических методов статистической обработки данных.

2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методики и приборы измерений

В исследованиях по изучению процесса десорбции углекислоты определялись следующие показатели воды: содержание свободной угольной кислоты, щелочность, водородный показатель pH . Согласно действующим методикам использовались:

– средства измерения: секундомер «Агат», весы электронные HL–100 фирмы «A&D» Company Limited (Япония), измерительная линейка, иономер лабораторный И–120М, ротаметры со стеклянной ротаметрической трубкой РМ–2,5Г и РМ–4Г, дистиллятор Д–8;

– лабораторная посуда: колба мерная 2 класса точности вместимостью 250 см³ по ГОСТ 1770-74, пипетки мерные 2 класса точности вместимостью 1, 2, 5, 10 см³ по ГОСТ 29228-91, мерный стакан В–1 вместимостью 1000 см³ по ГОСТ 25336-82;

– реактивы, приготовленные по стандартным методикам: кислота соляная (ГОСТ 3118-77), едкий натр ($NaOH$) 0,1N раствор, фенолфталеин 0,5 %-ный раствор, метиловый оранжевый 0,05 %-ный раствор.

Искомые значения свободной углекислоты, щелочности, расхода воды определялись косвенными измерениями. Значение физической величины A рассчитывалось на основе прямых измерений ряда величин (аргументов $a_1, \dots, a_i, \dots, a_m$), связанных с измеряемой величиной зависимостью [106]

$$A = f(a_1, \dots, a_i, \dots, a_m). \quad (2.1)$$

Погрешность результата косвенного измерения ΔA определится выражением

$$\Delta A = \frac{\partial f}{\partial a_1} \cdot \Delta a_1 + \frac{\partial f}{\partial a_2} \cdot \Delta a_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial a_i} \cdot \Delta a_i + \dots + \frac{\partial f}{\partial a_m} \cdot \Delta a_m, \quad (2.2)$$

где dA – дифференциал функции A ; da_i – дифференциал аргументов a_i ; $\frac{\partial f}{\partial a_i}$ – первая производная от функции f по аргументу a_i ; Δa_i – отклонение результата изме-

рения аргумента a_i от его среднего арифметического (абсолютная погрешность).

Среднее квадратичное отклонение случайной погрешности результата косвенного измерения $S(\bar{A})$ вычисляется по формуле [106, 107]

$$S(\bar{A}) = \Delta(\bar{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial a_i} \right)^2 \cdot S^2(a_i)}, \quad (2.3)$$

где $S^2(a_i)$ – среднее квадратичное отклонение случайной погрешности результата измерения a_i аргумента, принимается за абсолютную погрешность измерения.

Относительная погрешность измерения, выраженная в процентах, определяется по формуле

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{\bar{A}} \cdot 100 \%, \quad (2.4)$$

где $\bar{A}$ – среднеарифметическое значение функции.

Для прямых измерений с многократными наблюдениями за результат принимается среднее арифметическое результатов наблюдений [35]. Среднее квадратичное отклонение результата измерения $S(\bar{A})$ оценивают по формуле

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{A})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (2.5)$$

где $\bar{A}$ – среднее арифметическое результатов наблюдения; x_i – i -ый результат наблюдений; n – число результатов наблюдений.

При числе результатов наблюдений $n \leq 15$ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют, а доверительные границы $\Delta\varepsilon(P)$ случайной погрешности результата измерения определяют по выражению:

$$\Delta\varepsilon(P) = t \cdot S(\bar{A}), \quad (2.6)$$

где t – коэффициент Стьюдента, определяется в зависимости от числа результатов наблюдений n и доверительной вероятности P согласно таблицам [35, 127].

Концентрация углекислоты определяется методом прямого титрования и рассчитывается по формуле [36]

$$A_{[CO_2]} = \frac{44 \cdot n \cdot N \cdot 1000}{V} = \frac{4400 \cdot n}{V}, \quad (2.7)$$

где 44 – эквивалент CO_2 , соответствующий 1 мг-экв $NaOH$; n – объем раствора $NaOH$, израсходованный на титрование, мл; $N = 0,1$ – нормальность раствора $NaOH$; V – объем воды, взятый для определения, $см^3$.

Погрешность косвенного измерения концентрации углекислоты определяется по формуле

$$\Delta A_{[CO_2]} = \sqrt{\left(-\frac{4400n}{V^2}\right)^2 \Delta V^2 + \left(\frac{4400}{V}\right)^2 \Delta n^2}, \quad (2.8)$$

где V и n определяются прямым измерением, тогда

– для $[CO_2]_{исх} = 200 \text{ мг/дм}^3$

$$\Delta A_{[CO_2]_{исх}} = \sqrt{\left(-\frac{4400 \cdot 4,55}{100^2}\right)^2 0,5^2 + \left(\frac{4400}{100}\right)^2 0,05^2} = 2,42 \text{ мг/дм}^3,$$

относительная погрешность при $[CO_2]_{исх} = 200 \pm 2,42 \text{ мг/дм}^3$ составит

$$\delta([CO_2]_{исх}) = \frac{2,42}{200} \cdot 100 \% = 1,21 \%;$$

– для $[CO_2]_{кон} = 3,52 \text{ мг/дм}^3$

$$\Delta A_{[CO_2]_{кон}} = \sqrt{\left(-\frac{4400 \cdot 0,08}{100^2}\right)^2 0,5^2 + \left(\frac{4400}{100}\right)^2 0,01^2} = 0,44 \text{ мг/дм}^3,$$

относительная погрешность при $[CO_2]_{кон} = 3,52 \pm 0,44 \text{ мг/дм}^3$ составит

$$\delta([CO_2]_{кон}) = \frac{0,44}{3,52} \cdot 100 \% = 12,5 \%.$$

Значение общей щелочности определяется методом прямого титрования соляной кислотой и рассчитывается по формуле [37]

$$A_T = \frac{c(HCl) \cdot V_3 \cdot 1000}{V_1} = \frac{100 \cdot V_3}{V_1}, \quad (2.9)$$

где V_3 – объем раствора соляной кислоты HCl , израсходованный на титрование, $см^3$; $c(HCl) = 0,1 \text{ моль/дм}^3$ – молярная концентрация раствора соляной кислоты; V_1 – объем анализируемой пробы воды, взятой для титрования, $V_1 = 100 \text{ см}^3$.

Погрешность косвенного измерения щелочности определяется по формуле

$$\Delta A_T = \sqrt{\left(-\frac{100 \cdot V_3}{V_1^2}\right)^2 \cdot \Delta V_1^2 + \left(\frac{100}{V_1}\right)^2 \cdot \Delta V_3^2}, \quad (2.10)$$

где V_1 и V_3 определяются прямым измерением, тогда

– для $III_{исх} = 1,88$ ммоль/дм³

$$\Delta A_T = \sqrt{\left(-\frac{100 \cdot 1,88}{100^2}\right)^2 \cdot 0,5^2 + \left(\frac{100}{100}\right)^2 \cdot 0,05^2} = 0,05088 \text{ ммоль/дм}^3,$$

относительная погрешность при $III_{исх} = 1,88 \pm 0,05088$ ммоль/дм³ составит

$$\delta(III_{исх}) = \frac{0,05088}{1,88} \cdot 100 \% = 2,71 \%;$$

– для $III_{кон} = 1,60$ ммоль/дм³

$$\Delta A_T = \sqrt{\left(-\frac{100 \cdot 1,60}{100^2}\right)^2 \cdot 0,5^2 + \left(\frac{100}{100}\right)^2 \cdot 0,05^2} = 0,05064 \text{ ммоль/дм}^3,$$

относительная погрешность при $III_{кон} = 1,60 \pm 0,05064$ ммоль/дм³ составит

$$\delta(III_{кон}) = \frac{0,05064}{1,60} \cdot 100 \% = 3,17 \%.$$

Расход воды определяется по формуле

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.11)$$

где V – объем, заполняемый водой, $V = 1000$ см³; t – продолжительность заполнения емкости, с, определяется прямым измерением.

Погрешность измерения расхода воды определяется по формуле

$$\Delta Q = \sqrt{\frac{1}{t^2} \cdot \Delta V^2 + \frac{V^2}{t^4} \cdot \Delta t^2}, \quad (2.12)$$

– для $Q = 0,033$ дм³/с

$$\Delta Q = \sqrt{\frac{1}{30,3^2} \cdot 0,05^2 + \frac{1^2}{30,3^4} \cdot 0,2^2} = 0,00166 \text{ дм}^3/\text{с},$$

относительная погрешность при $Q = 0,033 \pm 0,00166$ дм³/с составит

$$\delta_Q = \frac{0,00166}{0,033} \cdot 100 \% = 5,03 \%;$$

– для $Q = 0,262$ дм³/с

$$\Delta Q = \sqrt{\frac{1}{3,82^2} \cdot 0,05^2 + \frac{1^2}{3,82^4} \cdot 0,2^2} = 0,01895 \text{ дм}^3/\text{с},$$

относительная погрешность при $Q = 0,262 \pm 0,019$ дм³/с составит

$$\delta_Q = \frac{0,01895}{0,262} \cdot 100 \% = 7,23 \%$$

Погрешности прямых и косвенных измерений приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Погрешности прямых и косвенных измерений исследования

Наименование величины	Тип прибора	Абсолютная погрешность, Δx	Относительная погрешность, δ , %
Прямые измерения			
объем воды для определения расхода, дм^3	мерная емкость	$\pm 0,05$	1
объем пробы воды, см^3	мерная колба	$\pm 0,5$	0,5
объем раствора для титрования, см^3	мерная пипетка	$\pm 0,02$	0,8
pH	иономер И – 120	$\pm 0,1$	
продолжительность, с	секундомер	$\pm 0,2$	0,33
расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$	ротаметр РМ-2,5Г		2,5
расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$	ротаметр РМ-4Г		4
Косвенные измерения			
расход воды, Q , $\text{дм}^3/\text{с}$	$Q = \frac{V}{t}$	0,01895	7,23
концентрация свободной углекислоты, $[CO_2]_{исх}$, $\text{мг}/\text{дм}^3$	$A_{CO_2} = \frac{44 \cdot n \cdot N \cdot 1000}{V}$	2,42	1,21
концентрация свободной углекислоты, $[CO_2]_{кон}$, $\text{мг}/\text{дм}^3$		0,44	12,50
щелочность воды, $Щ_{исх}$, $\text{ммоль}/\text{дм}^3$	$A_T = \frac{c(HCl) \cdot V_3 \cdot 1000}{V_1}$	0,05088	2,71
щелочность воды, $Щ_{кон}$, $\text{ммоль}/\text{дм}^3$		0,05064	3,17

Погрешности прямых измерений составили от 0,33 % до 4 %, косвенных измерений – от 1,21 % до 12,5 %.

2.2 Методика исследования процесса десорбции углекислоты

Исследования по снижению содержания углекислоты проводились при барботаже в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха и в дегазаторе с поперечными горизонтальными направляющими. Схемы экспериментальных установок исследований представлены на рисунке 2.1.

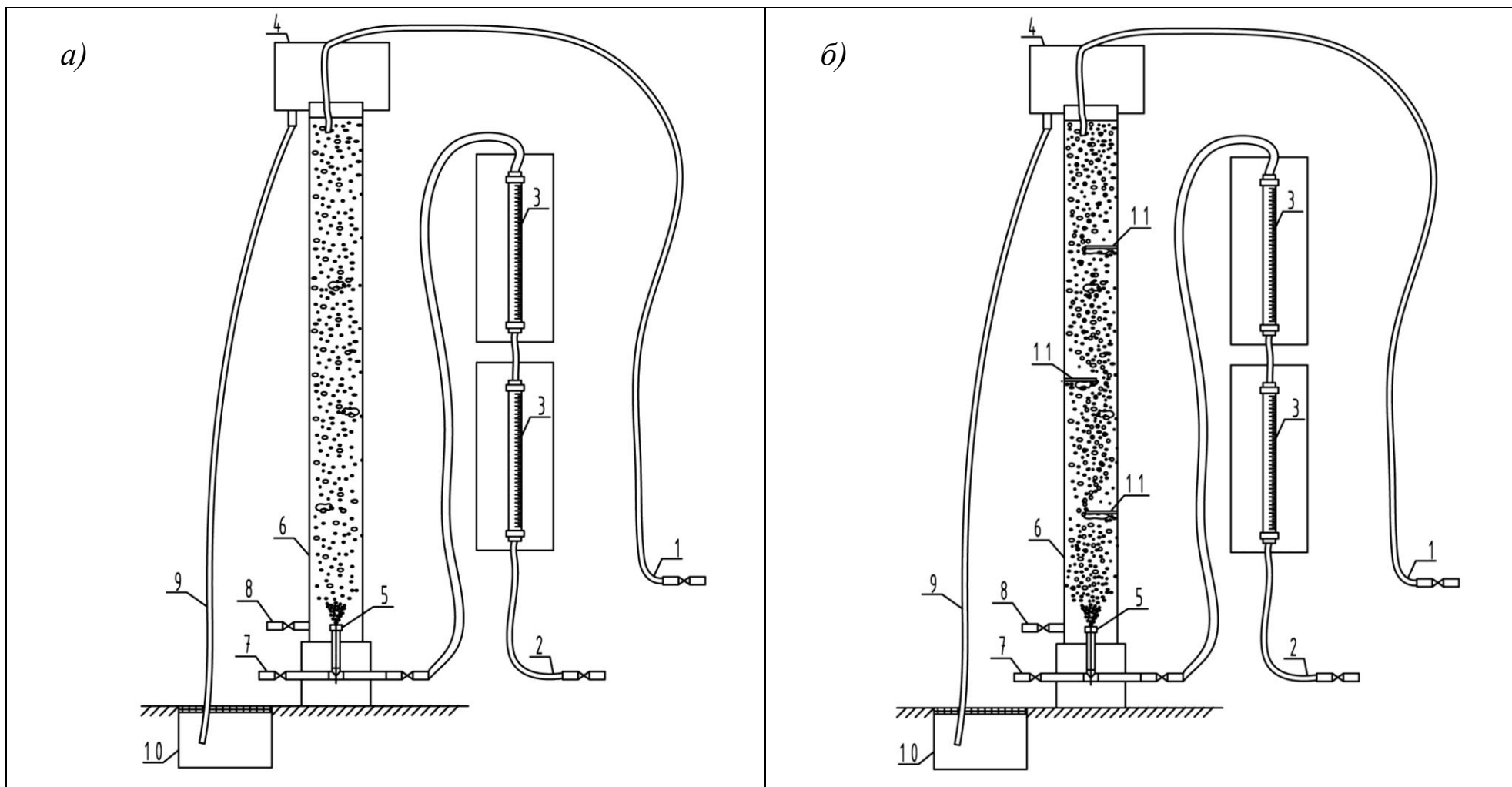


Рисунок 2.1 – Схемы экспериментальных установок для удаления углекислоты при барботаже в свободном объеме (а) и с поперечными горизонтальными направляющими (б):

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 азрированной воды; 9 – перелив; 10 – лоток сбросной канализации; 11 – горизонтальные поперечные направляющие

Исходная вода из скважины подавалась в верхнюю часть барботера, состоящего из прозрачной пластмассовой колонны. Подача сжатого воздуха от компрессора предусмотрена в нижнюю часть установки (режим противотока) с диспергированием его через дырчатые распределители воздуха диаметрами $d_{отв} = 2\text{--}6$ 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.

Экспериментальные исследования по удалению углекислоты в дегазаторе с поперечными горизонтальными направляющими проводились на том же барботере. На пути движения потоков воды и воздуха были установлены поперечные горизонтальные перегородки в виде сегмента круга с центральным углом 173° , расположенные в шахматном порядке по высоте колонны, рисунок 2.1.

Исследования проводились в производственных условиях на станциях обезжелезивания поселков Тараскуль, Боровский и Пойковский Тюменской области на подземной воде с исходным содержанием диоксида углерода от 30 до 200 мг/дм^3 . Вода подавалась из скважины на экспериментальную установку.

Пилотная установка полностью соответствовала натурной по высоте, расстоянию между пластинами, радиусу действия одного дырчатого распределителя воздуха (0,1 м), соотношению площадей живого сечения в аппарате и в местах установки перегородок. Установка представляет собой один модуль, который при увеличении расхода будет составлять n штук.

Отбор проб для определения исходного содержания углекислоты производился из трубопровода на вводе в станцию обезжелезивания, для определения остаточного содержания углекислоты – на выходе из экспериментальной установки по истечении расчетного времени барботажа в зависимости от скорости противотока воды.

В процессе исследований изменялись все значимые факторы, интервалы варьирования которых приведены в главах 3, 4.

На подготовительном этапе осуществлялась замена дырчатого распределителя в дегазаторе или монтаж требуемого количества перегородок в перегородчатом дегазаторе, после чего производился отбор проб исходной воды для определения содержания CO_2 на входе в дегазатор.

Перед началом серии опытов осуществлялась настройка гидравлических параметров согласно плану эксперимента, определялся расход воды по требуемой скорости противотока, который регулировался шаровым краном на подающем трубопроводе.

Подача требуемого количества воздуха для барботажа регулировалась шаровым краном воздушного трубопровода при одновременном отслеживании показаний расхода воздуха по ротаметру. Барботаж воды в режиме противотока с постоянным расходом воздуха производился в течение определенного времени, соответствующего полному обновлению объема воды в дегазаторе. По истечении времени контакта воды с воздухом отбирались 3–4 пробы для определения остаточного содержания углекислоты на выходе из сооружения, в обработку принималось среднее арифметическое значение измерений показателя воды. В Приложении Б приведен образец журнала регистрации с отдельными экспериментальными данными.

2.3 Обоснование выбора метода обработки данных

Для описания зависимости влияющих факторов на эффективность газоудаления исследователи применяют, в основном, два метода – метод анализа размерностей и метод математического планирования эксперимента.

Одним из достоинств представления уравнений в безразмерном виде является использование их для математического описания многих процессов в аппаратах с различными конструктивными размерами, протекающих при различных физических условиях и равенстве значений безразмерных комплексов.

По мнению В.В. Кафарова принципы подобия и физического моделирования применимы для простых систем с однофазными потоками, для сложных (много-

фазных) систем с большим количеством безразмерных комплексов (часто несовместимых) их использование затруднительно. Автор не рекомендует описывать двухфазную систему в виде безразмерных комплексов, выведенных для каждой фазы в отдельности без учета межфазного взаимодействия [82].

Анализ размерностей не является универсальным методом для нахождения зависимостей между физическими величинами по причине недостаточной изученности многих процессов, требует адекватного выбора системы единиц, значений постоянных физических величин [137].

Дифференциальное уравнение скорости десорбции имеет вид

$$dM = \beta \cdot \Delta C \cdot dF, \quad (2.13)$$

где M – количество десорбируемого газа в единицу времени, кг/ч; β – общий коэффициент десорбции, м/ч; ΔC – средняя движущая сила десорбции, выраженная разностью концентраций, кг/м³; F – площадь соприкосновения жидкой и газообразной фаз, м².

Установить значение коэффициента десорбции теоретическим путем сложно, поэтому он определяется на основании экспериментальных данных с привлечением π -теоремы. Для случая десорбции газа при барботаже известны критериальные зависимости

$$Nu' = f(Re, Pr', We, Ar, \Gamma) \quad [123], \quad (2.14)$$

$$Nu' = f(Re, Pr') \quad [80], \quad (2.15)$$

$$Nu = f(Re, Pr) \quad [31], \quad (2.16)$$

$$Sh = f(Re, Sc, q_{y0}) \quad [18], \quad (2.17)$$

где Nu' – диффузионный критерий Нуссельта, определяет интенсивность диффузионного потока вещества; Pr' – критерий Прандтля, характеризует физические свойства среды; q_{y0} – значение удельного расхода воздуха.

Критериальное уравнение В.М. Рамма [123], содержащее большое количество критериев подобия не удалось раскрыть при обработке опытных данных. Для вычисления общего коэффициента десорбции на основе экспериментальных данных необходимо определить значения удельной поверхности контак-

та фаз, которую связывают с усредненным значением диаметра воздушного пузырька d_n , принятым величиной постоянной для соответствующих воздухораспределителей. Так, в исследованиях А.А. Кастальского $d_n = 0,0038$ м для диаметра отверстий воздухораспределителя 2 мм, по данным О.В. Болотовой $d_n = 0,005–0,008$ м для дренажных колпачков ФЭЛ.

Значения коэффициента молекулярной диффузии D , входящие в уравнения для определения коэффициента десорбции, в научных источниках разнятся [126, 164], например, по данным Т. Эрдеи-Груз $D = 0,27 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ [160], В.В. Кафарова $D = 1,835 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ [82].

Коэффициент десорбции в зависимости от исходных условий может изменяться значительно. По мнению А.А. Кастальского коэффициент, полученный для конкретных условий не носит обобщающего характера и не применяется для других условий [80]. Недостатки использования коэффициента проявляются особенно ярко, когда он зависит от движущей силы ΔC [114].

В связи с тем, что на объекте исследований в пос. Тараскуль Тюменского района концентрация углекислоты в подземной воде значительно изменяется в течение года (от $60,0 \text{ мг/дм}^3$ до 200 мг/дм^3), задача исследований состояла в получении обобщенного расчетного уравнения в зависимости от исходных концентраций углекислоты в подземной воде.

В процессе исследований при различных режимах барботажа диаметр пузырей воздуха изменялся от 2–4 мм до 30–80 мм (воздушные пробки), усреднение значений диаметров пузырей для определения площади контакта фаз могло привести к существенным погрешностям при расчете количества десорбируемого газа. В перегородчатом дегазаторе барботажного типа в связи с многократным слиянием пузырей и последующим их дроблением на более мелкие определить суммарную поверхность контакта фаз было затруднительно, этим объясняется применение методов планирования эксперимента и отказ от π -теоремы в дальнейших исследованиях.

В.И. Шарапов [157] отмечает, что эмпирические зависимости, полученные с использованием методов планирования эксперимента, имеют преимущества перед

критериальными уравнениями, так как они позволяют оценить степень влияния каждого фактора и их парных взаимодействий на процесс десорбции, дают возможность проверить точность описания модели путем определения ее адекватности, позволяют определить значения коэффициентов десорбции для различных режимов работы сооружения.

В процессе исследований использовались методики активного многофакторного эксперимента – ортогональные и ротатабельные планы второго порядка [13, 21, 104, 153], результаты исследований по снижению содержания углекислоты представлены в главах 3, 4.

2.4 Выбор влияющих факторов

При проведении исследований по десорбции углекислоты параметром оптимизации принята концентрация угольной кислоты на выходе из дегазатора $[CO_2]_{кон}$. После определения объекта исследования и параметра оптимизации был проведен анализ факторов, влияющих на процесс удаления углекислоты, с целью отсева менее значимых.

Исходная функция отклика, связывающая параметр оптимизации с влияющими факторами имела вид

$$[CO_2]_{кон} = f(t_{воды}, Щ, pH, t_{воздуха}, [CO_2]_{исх}, h_{воды}, q_{уд}, V_{воды}, d_{отв}), \quad (2.18)$$

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.

Выделенные факторы условно можно разделить на три группы:

- *первая группа* – температура, щелочность и pH воды, исходное содержание углекислоты в подземной воде, температура воздуха определяют исходное состояние системы;

- *вторая группа* – высота слоя воды в дегазаторе, удельный расход воздуха и скорость движения воды при противотоке характеризуют режимные параметры барботажа;

- *третья группа* – диаметр отверстий дырчатого распределителя воздуха и количество перегородок для перегородчатого дегазатора отображают конструктивные особенности дегазатора.

Температура подземной воды в течение года меняется незначительно, по многолетним наблюдениям колебания температуры составляют $\pm 1^\circ\text{C}$.

Температура воздуха, подаваемого в дегазатор, напротив, в течение года меняется значительно и это отражается на эффективности дегазации углекислоты, что подтверждается дисперсионным анализом. При обычной технологической схеме с забором наружного воздуха данный фактор является неуправляемым. В летний период эффективность удаления углекислоты повышалась, в зимний период снижалась, в связи с этим, для исключения систематической погрешности, к обработке приняты данные осенне-зимнего периода.

Химические показатели качества воды незначительно влияют на физический процесс десорбции углекислоты. Поскольку *щелочность*, *pH* и свободная углекислота взаимозависимы, влияющим фактором принято *исходное содержание углекислоты* в подземной воде, как показатель движущей силы массообменного процесса (концентрационный напор).

Высота слоя воды в дегазаторе принята значимым фактором при обычном барботаже с дырчатыми распределителями воздуха – чем выше слой воды, тем больше продолжительность контакта воды с воздухом.

Для перегородчатого дегазатора барботажного типа высота слоя воды и количество перегородок являются взаимозависимыми. Процесс десорбции углекислоты интенсифицируется за счет установки горизонтально расположенных пластин, поэтому из двух вышеуказанных факторов к исследованию принято *количество перегородок*.

Удельный расход воздуха, подаваемого в дегазатор, является значимым фактором, влияющим на образование поверхности контакта фаз вода-воздух [79].

Скорость движения воды при противотоке принята основным фактором, интенсифицирующим конвективную диффузию.

При исследовании барботажа в свободном объеме *диаметр отверстий дырчатого распределителя воздуха* был принят значимым фактором, однако при математической обработке результатов он был исключен из уравнения регрессии, как незначимый. Для перегородчатого дегазатора величина диаметра дырчатого распределителя принята постоянной и равной 5 мм.

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

Выводы

1. Исследования проводились в производственных условиях на подземной воде с исходным содержанием диоксида углерода от 30–200 мг/дм³, погрешность прямых измерений составила от 0,33 % до 4 %, косвенных – от 1,21 % до 12,5 %.

2. Анализ влияющих на процесс десорбции углекислоты факторов позволил выделить основные, которые были приняты к дальнейшим исследованиям: исходное содержание диоксида углерода, удельный расход воздуха, количество перегородок в дегазаторе, высота слоя воды в дегазаторе, скорость противотока, диаметр отверстий дырчатого распределителя воздуха.

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

3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УДАЛЕНИЮ УГЛЕКИСЛОТЫ ПРИ БАРБОТАЖЕ В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ

3.1 Исследование влияния десорбции угольной кислоты на изменение качественного состава подземных вод

Распространено мнение, что в процессе десорбции угольной кислоты карбонатная жесткость воды изменяется вместе с бикарбонатной щелочностью и значением pH [111]. Проведенный сравнительный анализ изменения показателей качества до и после очистки воды на двух станциях обезжелезивания в поселках Тараскуль и Боровский Тюменского района (таблицы 3.1, 3.2) показал, что происходит снижение цветности, окисляемости перманганатной, аммония, железа общего, марганца, фторидов за счет окисления кислородом воздуха.

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^- .

Таблица 3.1 – 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	12,0	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, °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 уголекислота, мг/дм ³	118,0	57,0

Таблица 3.2 – Качественная характеристика поступающей и очищенной подземной воды станции обезжелезивания ОАО «Птицефабрика «Боровская»

Контролируемые показатели	Норма ПДК, согласно СанПиН	Значения показателей качества воды		
		Скважина №3	РЧВ	поселок
Запах, балл	до 2	2	0	
Цветность, градус	20	63,58	36,43	48,40
Мутность, мг/дм ³	2,6	25,09	1,82	1,40
Аммоний (по азоту), мг/дм ³	2,0	9,60	0,71	
Нитраты, мг/дм ³	45	0,75	2,25	
Нитриты, мг/дм ³	3,0	<0,02	<0,03	
Кальций, мг/дм ³	30–140	55,97	54,26	
Железо общее, мг/дм ³	0,3	3,47	<0,10	0,11
Хлориды, мг/дм ³	350	16,40		19,95
Общая жесткость, °Ж	7,0	4,67	4,50	5,30
Водородный показатель, ед.	6-9	6,83	7,31	7,06
Сухой остаток, мг/дм ³	1000	328,5	315,50	310,80
Окисляемость перманганатная, мг/дм ³	5,0	6,58	5,60	5,60
Марганец, мг/дм ³	0,1	0,307	0,092	
Фториды, мг/дм ³	1,5	0,62	0,18	
Медь, мг/дм ³	1,0	<0,001	<0,001	
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,1	0,0438	0,0181	0,021
АПВ, мг/дм ³	0,5	<0,025	<0,025	<0,025
Фенолы, мг/дм ³	0,001	<0,0005	<0,0005	
Хлор остаточный, мг/дм ³	0,3–0,5	–	<0,5	
Сероводород, мг/дм ³	0,003	0,0085	<0,005	
Цинк, мг/дм ³	5,0	<0,005	<0,005	
Мышьяк, мг/дм ³	0,05	<0,005	<0,005	
Молибден, мг/дм ³	0,25	<0,025	<0,025	
Кремний, мг/дм ³	10	16,82	16,63	

Определение равновесного количества углекислоты в практике водоснабжения осуществляется по показателям щелочности и солесодержания. Кроме расчетных и номограммных методов используются прямые экспериментальные методы (карбонатные испытания). Приближенное значение концентрации равновесного диоксида углерода, в зависимости от щелочности и pH природной воды (в пределах 5,5–8,3), определяется по формуле [39]

$$[CO_2]_{равн} = \alpha \cdot Щ^3 \quad (3.1)$$

где $\alpha = 0,268$ для воды с солесодержанием 100–400 мг/дм³.

Снижение содержания углекислоты до равновесной ее концентрации в ходе исследований не рассматривалось, было принято рекомендованное нормативными документами значение $[CO_2] \leq 40$ мг/дм³ [140, 143]. В процессе исследований и эксплуатации станций обезжелезивания минимальные значения содержания углекислоты фиксировались в пределах 22–30 мг/дм³.

Изменение величины щелочности и pH исследовалось в производственных условиях при барботаже объема природной воды продолжительностью ($t_{\text{барботажа}}$) 60 минут, с отбором проб через каждые 10 минут. Исходные показатели углекислоты, щелочности и водородного показателя составили, соответственно, $[CO_2]_{\text{исх}} = 81,8$ мг/дм³, $Щ = 1,88$ ммоль/дм³, $pH = 7,02$. Зависимость изменения щелочности воды от содержания угольной кислоты приведена на рисунке 3.1.

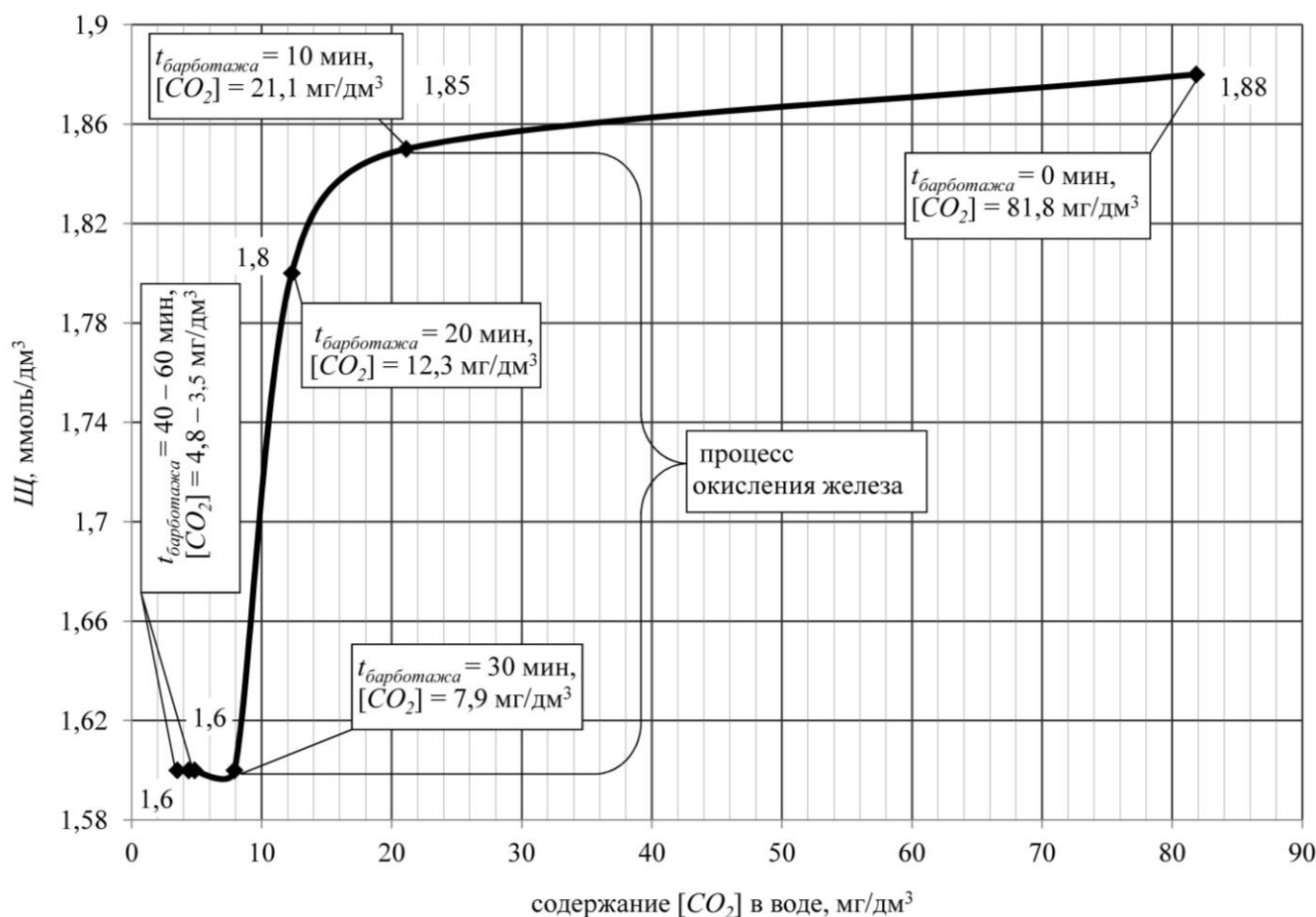


Рисунок 3.1 – Зависимость изменения щелочности от содержания $[CO_2]$ в воде

Первые 10 минут барботирования щелочность воды изменилась незначительно (на $0,03 \text{ ммоль/дм}^3$) несмотря на значительное снижение содержания углекислоты (до $21,1 \text{ мг/дм}^3$). По мере окисления железа и других неустойчивых бикарбонатных соединений (в период от 10 до 30 минут) фиксировалось изменение окраски воды (появлялся желтоватый оттенок), снижение щелочности составило $0,25 \text{ ммоль/дм}^3$, в последующие 30 минут величина щелочности воды не менялась.

Снижение щелочности при обезжелезивании воды обусловлено переходом HCO_3^- в CO_2 , по завершению окисления железа щелочность не меняется, так как концентрация $[\text{CO}_2]$ в воде остается больше равновесной – минимальное содержание $[\text{CO}_2]$ составило $3,5 \text{ мг/дм}^3$ при равновесном содержании $[\text{CO}_2]_{\text{равн}} = \alpha \cdot \text{Щ}^3 = 0,268 \cdot 1,88^3 \approx 1,78 \text{ мг/дм}^3$ (формула 3.1).

Подземная вода региона характеризуется относительно устойчивыми значениями водородного показателя – для одного и того же источника изменяется в пределах ± 1 , что объясняется буферными свойствами воды. Буферность воды обусловлена наличием гидрокарбонатной буферной системы, в состав которой входят растворенная углекислота CO_2 и гидрокарбонатные ионы HCO_3^- [110]. Данные по качественному составу подземной воды г. Сургута Тюменской области, представленные В.В. Дзюбо [45], показали динамику изменения значения pH источника в течение пяти лет, значения pH воды фиксировались в пределах $6,75\text{--}7,50$. Для буферных растворов величина pH в процессе дегазации воды в общем случае определяется по уравнению Henderson – Hasselbalch [23]

$$pH = pK + \lg \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}. \quad (3.2)$$

Принимая к рассмотрению константу диссоциации угольной кислоты первой степени (формула 1.5) определяем концентрацию водородных ионов в воде:

$$[\text{H}^+] = K_1 \cdot [\text{H}_2\text{CO}_3] / [\text{HCO}_3^-]. \quad (3.3)$$

Изменение концентрации водородных ионов в процессе аэрации запишем в виде, где индексы «исх», «кон» – показатели для исходной воды перед аэрацией и на выходе из дегазатора:

$$[H^+]_{исх} - [H^+]_{кон} = K_1 \cdot [H_2CO_3 + CO_2]_{исх} / [HCO_3^-]_{исх} - K_1 \cdot [H_2CO_3 + CO_2]_{кон} / [HCO_3^-]_{кон}. \quad (3.4)$$

Тогда изменение pH воды в процессе дегазации $\Delta pH^{дегазации}$ оценивается разностью логарифмов концентраций водородных ионов до и после аэрации

$$\Delta pH^{дегазации} = \lg[H^+]_{исх} - \lg[H^+]_{кон}. \quad (3.5)$$

Изменение водородного показателя $\Delta pH^{дегазации}$ в логарифмической форме будет иметь вид:

$$\Delta pH^{дегазации} = \lg \left(K_1 \cdot [H_2CO_3 + CO_2]_{исх} / [HCO_3^-]_{исх} : K_1 \cdot [H_2CO_3 + CO_2]_{кон} / [HCO_3^-]_{кон} \right) \quad (3.6)$$

$$\Delta pH^{дегазации} = \lg \frac{K_1 \cdot [H_2CO_3 + CO_2]_{исх} \cdot [HCO_3^-]_{кон}}{[HCO_3^-]_{исх} \cdot K_1 \cdot [H_2CO_3 + CO_2]_{кон}}, \quad (3.7)$$

так как концентрация $[H_2CO_3]$ незначительна, после сокращения получим окончательный вид формулы

$$\Delta pH^{дегазации} = \lg \frac{[CO_2]_{исх} \cdot [HCO_3^-]_{кон}}{[HCO_3^-]_{исх} \cdot [CO_2]_{кон}}. \quad (3.8)$$

Проведенные исследования по изменению величины щелочности, содержания свободной углекислоты, pH и данные автора [131, 132] показали, что концентрация ионов $[HCO_3^-]$ в процессе дегазации воды изменяется незначительно (0,28 ммоль/дм³, рисунок 3.1) в сравнении с изменением содержания $[CO_2]$. Следовательно, в производственных условиях для оперативного контроля процесса допустимо пользоваться упрощенным видом формулы (3.8):

$$\Delta pH^{дегазации} = \lg \frac{[CO_2]_{исх}}{[CO_2]_{кон}}. \quad (3.9)$$

Расчетные данные изменения показателя pH в процессе дегазации, полученные по формулам (3.8) и (3.9), а также экспериментальные данные приведены в таблице 3.3.

Так как относительная погрешность экспериментальных и расчетных данных при применении предложенной упрощенной формулы (3.9) составляет не более 9 %, использование этой зависимости рекомендовано к применению. Подстановка представленных авторами данных [131, 132] в предложенную формулу (3.9) дала

значительную тождественность результатов при конечных значениях углекислоты выше равновесных значений.

Таблица 3.3 – Экспериментальные и расчетные данные по определению изменения величины pH в процессе дегазации

Показатели \ № п/п	1	2	3	4	5	6	7
$t_{\text{барботаж}}, \text{ мин}$	0	10	20	30	40	50	60
$[CO_2]$ 10^{-3} моль $\text{мг} / \text{дм}^3$	$\frac{1,859}{81,8}$	$\frac{0,480}{21,1}$	$\frac{0,280}{12,3}$	$\frac{0,180}{7,9}$	$\frac{0,109}{4,8}$	$\frac{0,100}{4,4}$	$\frac{0,080}{3,5}$
$[HCO_3^-]$ $10^{-3} \text{ моль} / \text{дм}^3$	1,88	1,85	1,80	1,60	1,60	1,60	1,60
$pH_{\text{э}}$	7,02	7,56	7,80	8,11	8,24	8,35	8,37
Погрешность иономера И-120	$\pm 0,10$						
$\Delta pH_{\text{э}}$	-	0,54	0,78	1,09	1,22	1,33	1,35
$\Delta pH^{\text{дегазации}}$ формула 3.8	-	0,582	0,804	0,945	1,161	1,199	1,299
Относительные погрешности экспериментальных и расчетных значений (ф. 3.8), %	-	-7,69	-3,08	+13,30	+4,80	+9,85	+3,78
$\Delta pH^{\text{дегазации}}$ формула 3.9	-	0,588	0,823	1,015	1,231	1,269	1,369
Относительные погрешности экспериментальных и расчетных значений (ф. 3.9), %	-	-8,89%	-5,51	+6,88	-0,90	+3,45	-1,41

При известном значении водородного показателя исходной воды $pH_{\text{исх}}$ можно определить значение pH на выходе из дегазатора $pH_{\text{кон}}^{\text{дегазации}}$ согласно формуле:

$$pH_{\text{кон}}^{\text{дегазации}} = pH_{\text{исх}} + \Delta pH^{\text{дегазации}} = pH_{\text{исх}} + \lg \frac{[CO_2]_{\text{исх}}}{[CO_2]_{\text{кон}}}. \quad (3.10)$$

Сходимость расчетных значений по уравнению (3.10) и экспериментальных данных иллюстрируется рисунком 3.2, расчетные данные имеют хорошую сходимость, уравнение (3.10) может быть использовано для определения значения pH воды на выходе из барботера.

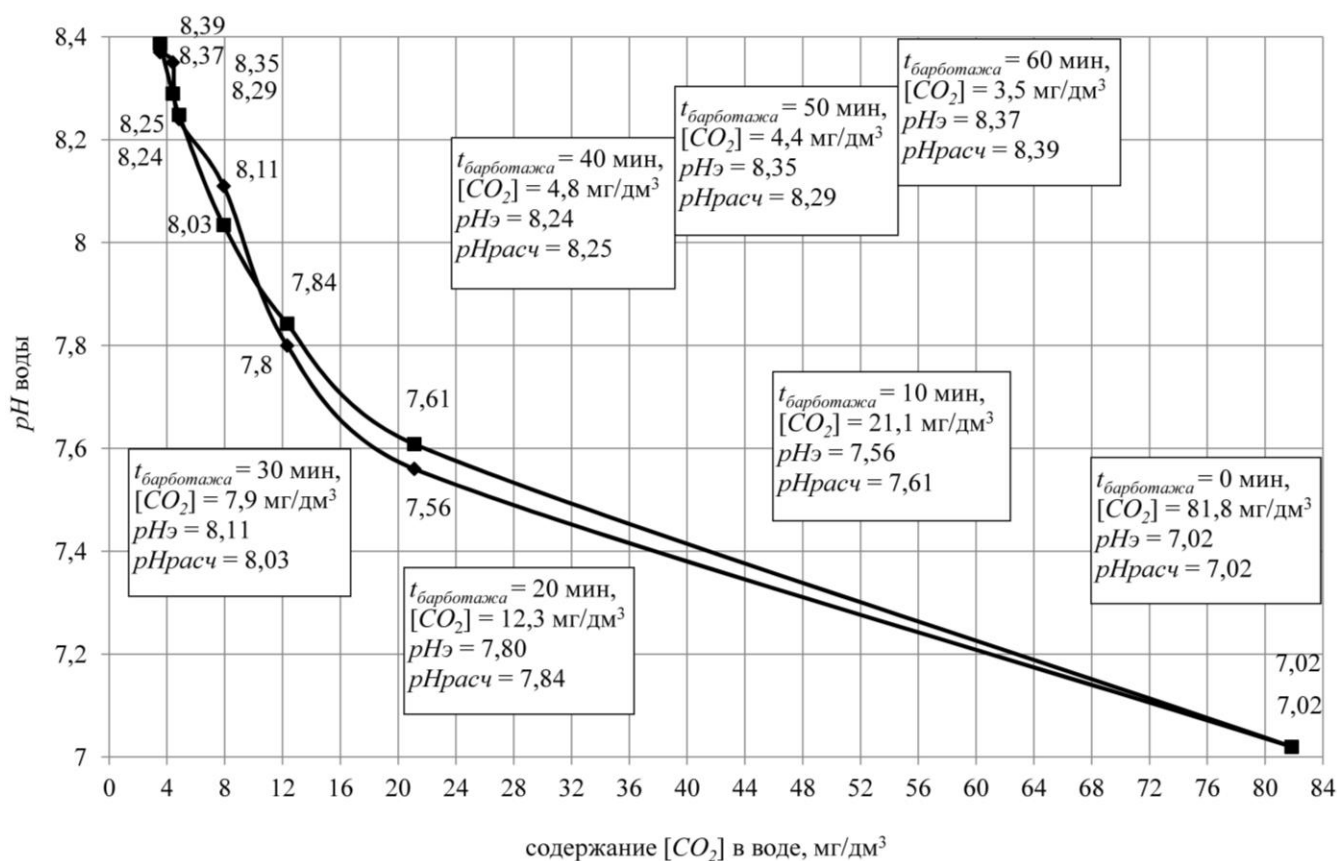


Рисунок 3.2 – Зависимость изменения величины pH от содержания в воде $[CO_2]$:

♦ – экспериментальные данные, ■ – расчетные данные по уравнению 3.10

3.2 Закономерности процесса десорбции углекислоты при барботаже в свободном объеме при противотоке

Известно, что барботажные дегазаторы характеризуются конструктивной и эксплуатационной простотой, но в тоже время отмечаются низкие значения КПД использования воздуха при относительно высоких энергозатратах. Анализ работы станций обезжелезивания в условиях региона показал, что эффект удаления углекислоты при барботаже для различных исходных содержаний углекислоты и водовоздушных соотношений составляет 20–50 %. В целях повышения эффективности проведены исследования по интенсификации процесса десорбции углекислоты с модернизацией конструкции барботажного дегазатора, представленные в главе 4. Данные по эксплуатации барботажных дегазаторов приводятся, как правило, для узкого диапазона наличия углекислоты в подземной воде.

Рекомендуется применять для барботажа в свободном объеме водовоздушное

соотношение не менее 10 м^3 воздуха на м^3 воды, в качестве воздухораспределителя использовать дырчатое днище с отверстиями диаметром 2 мм, при этом значения содержания углекислоты на выходе из сооружения составляют 5–7 мг/дм³ [80, 81]. По данным С.Н. Линевича, после 15-ти минутного барботажа подземной воды, содержащей сероводород и углекислоту (90 мг/дм^3), при водовоздушном соотношении до 1:60 эффективность удаления углекислоты составляла 50 % (сведения по распределителям воздуха не приведены) [99].

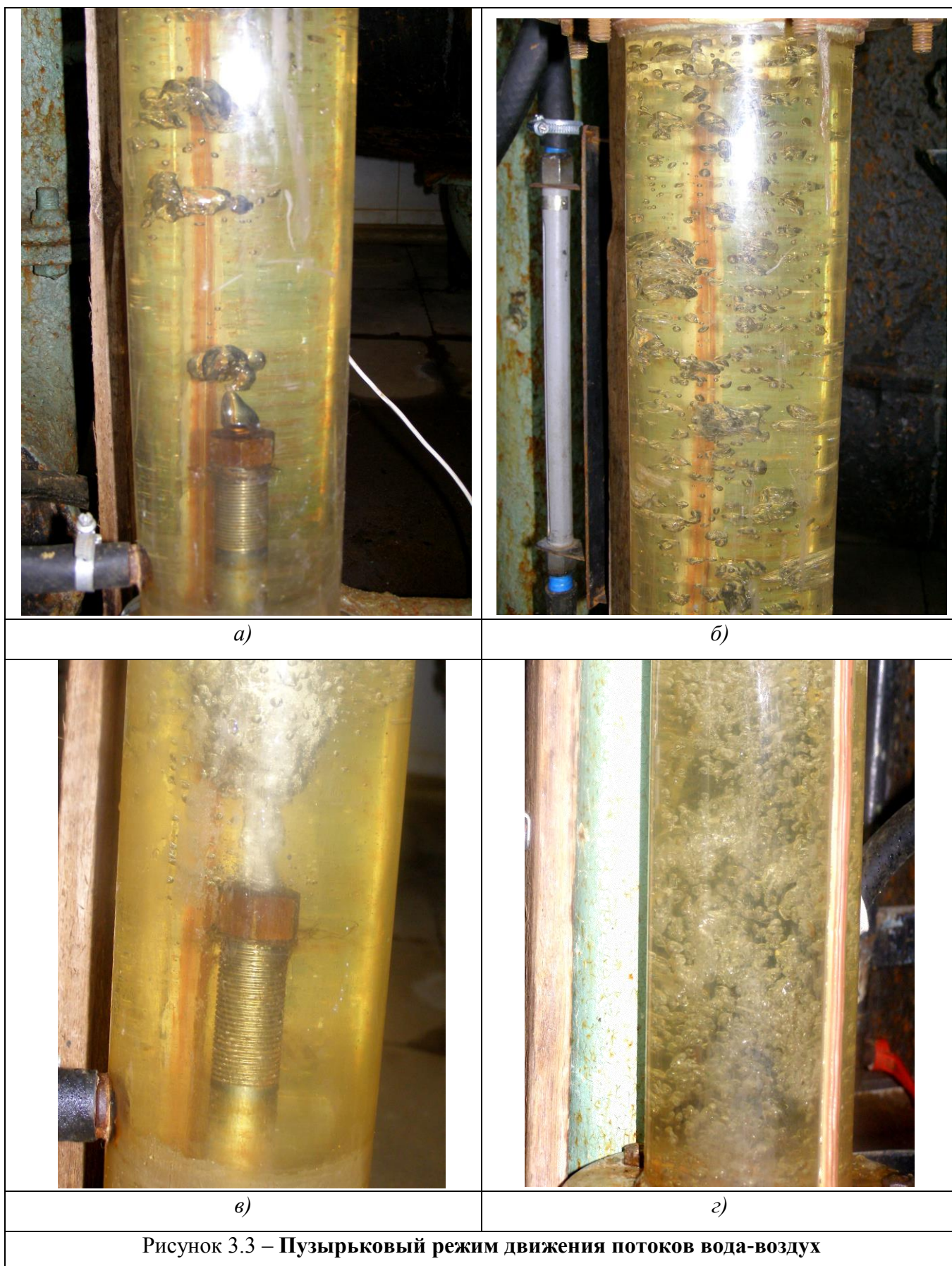
Данные для барботажного дегазатора с использованием в качестве распределителей воздуха грибковых колпачков ВОДГЕО, полученные О.В. Болотовой [18], применять к дырчатым распределителям воздуха нецелесообразно.

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.

Исследование режимов движения потоков вода-воздух [54] показало, что при пузырьковом режиме воздух движется внутри дегазатора в виде отдельных пузырей (рисунок 3.3 *а, б, в*), при эмульсионном – вода и мелкие пузырьки газа приобретают вид однородной сплошной массы (рисунок 3.4 *а*), при пробковом (снарядном) – пузырьки объединяются и двигаются в течение короткого промежутка времени в виде газовых пробок (рисунок 3.4 *б*).

Изучалась структура барботажного слоя (режим барботажа), которая зависит от плотности фаз, высоты слоя воды, количества подаваемого воздуха, скоростей движения воды и воздуха, их перемешивания [82].

При водовоздушном соотношении 1:1 с малыми скоростями истечения воздуха из отверстий (рисунок 3.3 *а*) пузыри образуются через равные промежутки времени, их размеры зависят от высоты слоя воды, скорости противотока и составляют 12–20 мм. При значительном давлении столба воды равном 2,0 м формировались крупные двойные и тройные пузыри, которые при всплывании расплющивались, от них отделялись мелкие единичные пузырьки.



С повышением расхода воздуха при водовоздушных соотношениях 1:2–1:3 отмечено увеличение частоты выхода пузырей, изменение их размеров

от 3 до 10 мм. В процессе вертикального движения к поверхности пузыри укрупняются, при этом эллиптически-круглая форма их не изменяется (рисунок 3.3 б).

При барботажном (В.В. Кафаров) или пузырьковом (В.Н. Соколов) режиме барботажа и малых скоростях противотока воды, изменения поверхности контакта фаз незначительны, эффективность снижения углекислоты низкая.

При водовоздушных соотношениях 1:3–1:1, выходящая из отверстий сплошная струя воздуха (рисунок 3.3 в, г), разрушается и переходит в поток пузырьков малого размера 4–6 мм, увеличивается площадь межфазной поверхности. В этих условиях с возрастанием скорости противотока более 10 м/ч повышается эффект удаления CO_2 в связи с уменьшением толщины пограничного слоя.

С повышением удельного расхода воздуха до 1:12 и более (рисунок 3.4 а) происходит образование воздушно-водной эмульсии, при данном режиме отмечается нестабильное хаотично-циркуляционное движение воды и воздуха, способствуя их быстрому перемешиванию по высоте и образованию воздушных пробок (рисунок 3.4 б).



Несмотря на развитую межфазную поверхность при эмульсионном режиме, увеличение эффекта удаления углекислоты незначительно, что связано с повышенными значениями силы поверхностного натяжения (для малых пузырей), тормозящей молекулярную диффузию при низких температурах воды, что иллюстрируется графиком зависимости эффекта удаления углекислоты от удельного расхода воздуха (рисунок 3.5).

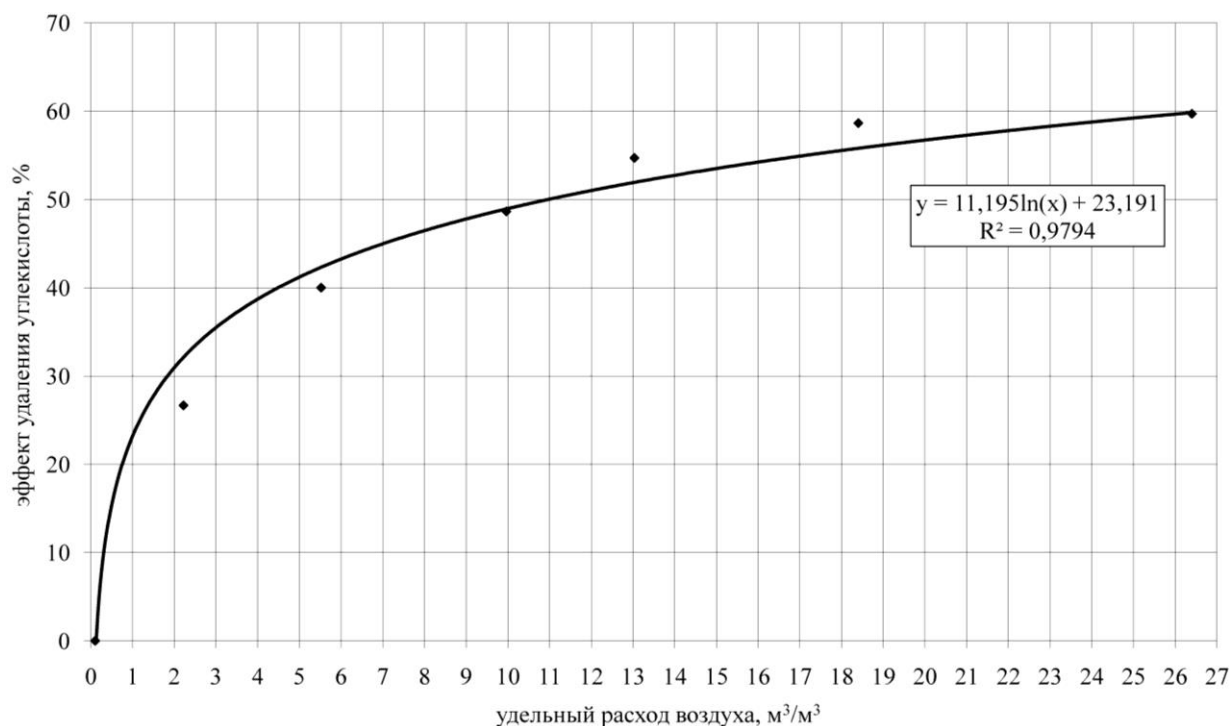


Рисунок 3.5 – Зависимость эффекта удаления углекислоты от удельного расхода воздуха при $d_{отв} = 5$ мм; $h = 0,75$ м; $q_{воды} = \text{const} = 0,026$ дм³/с

Наиболее интенсивно углекислый газ удаляется при водовоздушном соотношении до $12 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при дальнейшем увеличении удельного расхода воздуха до $26 \text{ м}^3/\text{м}^3$ эффект удаления углекислоты повысился всего на 10 %. При исследовании значения удельного расхода воздуха были приняты в интервале $4\text{--}12 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Влияние продолжительности контакта воды и воздуха (регулировалась высота столба воды) на эффект удаления углекислоты для скоростей движения воды $25,5$ м/ч и 40 м/ч проиллюстрировано рисунком 3.6.

Зависимости получены при исходном содержании углекислоты в воде $100 \text{ мг}/\text{дм}^3$, водовоздушном соотношении $1:7,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и диаметре дырчатого распределителя воздуха 4 мм. Увеличение эффекта с повышением скорости противотока связано с дополнительной турбулизацией потоков, которая приводит

к активному обновлению поверхности контакта фаз и участию всего объема воды в процессе массопередачи.

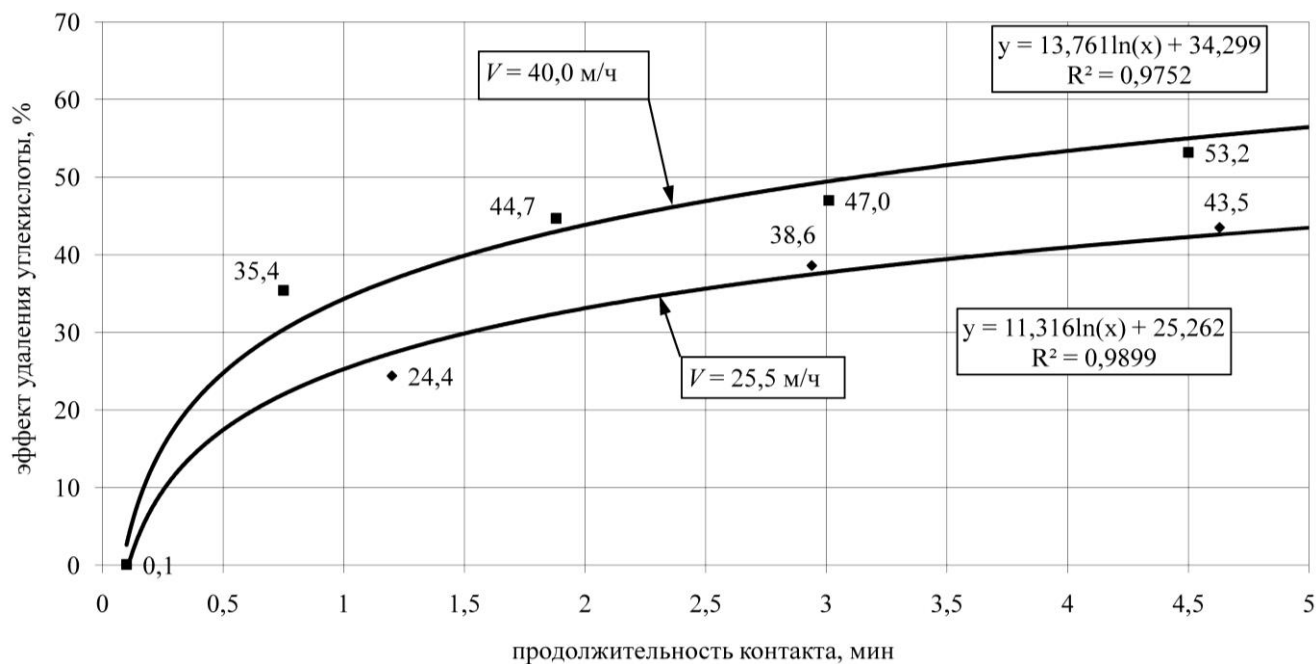


Рисунок 3.6 – Зависимость эффекта удаления углекислоты от продолжительности контакта воды с воздухом при различных скоростях движения воды

Кривые зависимости эффекта удаления углекислоты от скорости движения воды в диапазоне от 25 до 150 м/ч при удельных расходах воздуха 8–10 м³/м³ представлены на рисунке 3.7.

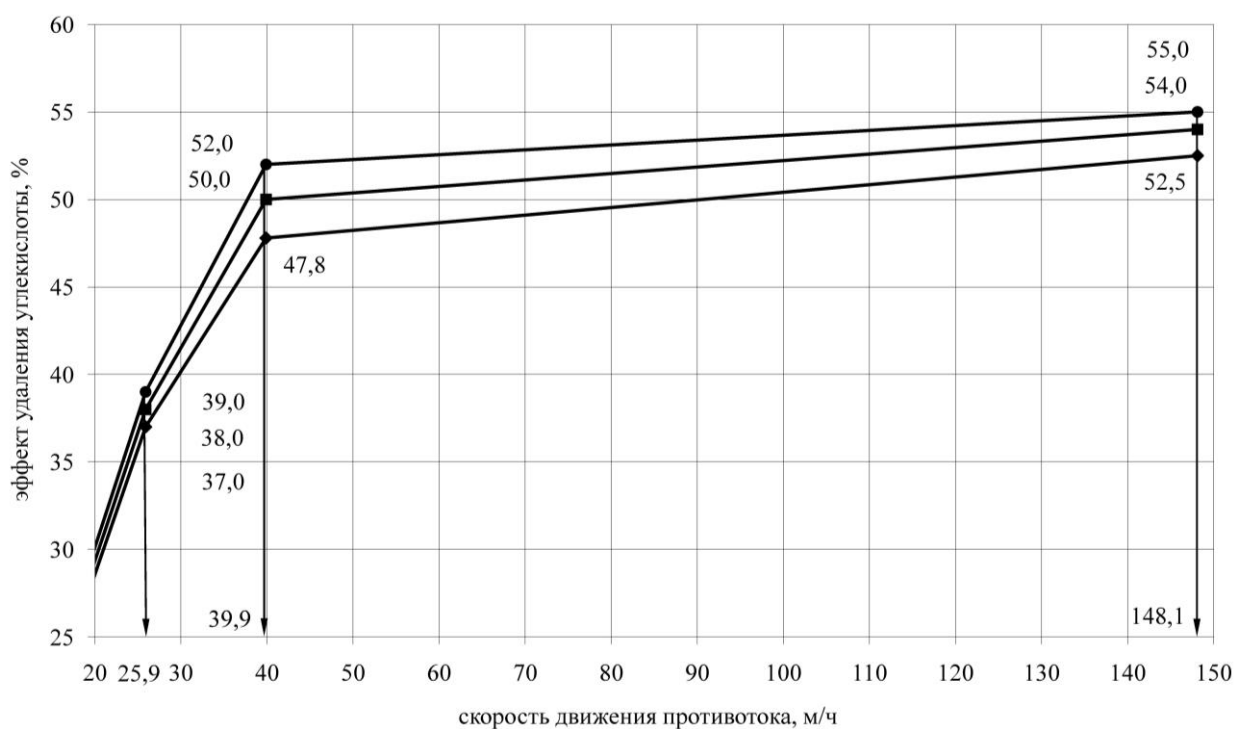


Рисунок 3.7 – Зависимость эффекта удаления CO_2 от скорости движения воды при водо-воздушных соотношениях: $\blacklozenge$ – $q_{y\phi} = 8$ м³/м³; $\blacksquare$ – $q_{y\phi} = 9$ м³/м³; $\bullet$ – $q_{y\phi} = 10$ м³/м³

Представленные зависимости показывают, что при увеличении скорости движения воды до 40 м/ч эффект удаления CO_2 значительно возрастает, в дальнейшем зафиксировано падение интенсивности роста из-за уменьшения продолжительности контакта воды и воздуха.

Зависимости изменения эффекта удаления углекислоты при использовании дырчатых распределителей воздуха разных диаметров показаны на рисунке 3.8.

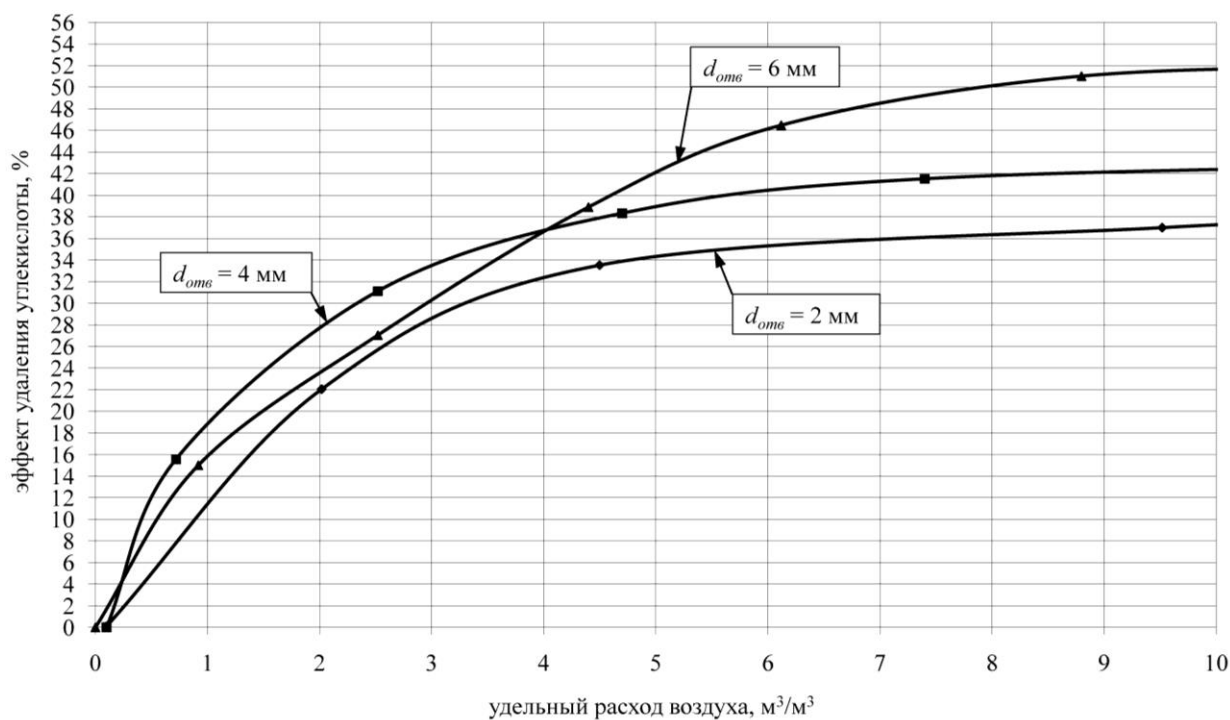


Рисунок 3.8 – Сравнение эффекта снижения содержания углекислоты для отверстий различных диаметров: $\blacklozenge$ – $d_{отв} = 2$ мм; $\blacksquare$ – $d_{отв} = 4$ мм; $\blacktriangle$ – $d_{отв} = 6$ мм

Представленные кривые показывают, что при малых значениях удельного расхода воздуха от 1 до 4 м³/м³ прослеживается зависимость эффекта снижения CO_2 от диаметра пузырьков воздуха. В этом диапазоне водовоздушных соотношений наибольшие эффекты получены для отверстий $d_{отв} = 4$ мм, при диаметре $d_{отв} = 2$ мм, несмотря на большую суммарную площадь поверхности контакта фаз, эффект меньше, что объясняется снижением массопереноса в малые пузырьки круглой формы при низких температурах подземной воды. При диаметре отверстия дырчатого распределителя $d_{отв} = 6$ мм образуются крупные пузыри, неравномерно распределенные по площади барботера, имеющие малую суммарную площадь поверхности контакта фаз.

С увеличением значений удельного расхода воздуха с 4 до $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ наибольшие эффекты удаления углекислоты получены при использовании воздухораспределителя диаметром $d_{отв} = 6 \text{ мм}$. С повышением скорости воздушного потока возрастает энергия противотока, которая приводит к значительным турбулентным пульсациям. Пузыри большего размера, имеющие меньшие силы поверхностного натяжения, под действием турбулентности легче деформируются, разрываются или объединяются, интенсифицируя конвективную и молекулярную диффузию молекул углекислоты в воде и через поверхность раздела фаз.

При изучении закономерностей процесса десорбции углекислоты при барботаже в свободном объеме были определены области изменений параметров, входящих в план эксперимента.

3.3 Математическая обработка экспериментальных исследований по удалению углекислоты при барботаже в свободном объеме

Исходное содержание углекислоты в подземной воде, характеризующее значение движущей силы десорбционного процесса, было принято приоритетным фактором, который позволяет 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 с дырчатыми распределителями воздуха от принятых факторов (глава 2), использовалось ортогональное центральное композиционное планирование эксперимента [134]. Независимыми факторами, влияющими на процесс десорбции углекислоты из подземной воды, приняты: $[CO_2]_{исх}$ – исходное содержание углекислоты, $\text{мг}/\text{дм}^3$; q_{y0} – удельный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $h_{воды}$ – высота слоя воды в барботере, м; $d_{отв}$ – диаметр отверстий истечения воздуха, м; $V_{воды}$ – скорость движения воды, м/ч.

Основной (нулевой) уровень и интервалы варьирования независимых факторов, их значения в звездных точках (при звездном плече $\alpha = 1,547$ [134]), приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Основные уровни и интервалы варьирования факторов 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_{yd} , м ³ /м ³	X_3 $h_{воды}$, м	X_4 $d_{отб}$, 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 ($-\alpha$)	58	3,4	0,50	0,002	4,3
Звездные точки ($+\alpha$)	182	12,6	2,00	0,006	47,7

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 3.5. Число опытов (N) в матрице планирования при пяти факторах ($k = 5$) равно 43, из них 32 опыта образуют полный факторный эксперимент, 10 опытов в звездных точках и один опыт в центре плана [11, 134].

Таблица 3.5 – Матрица планирования ортогонального плана второго порядка и результаты эксперимента

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	[CO ₂] _{кон} , мг/дм ³
1	-1	-1	-1	-1	-1	80	5,0	0,75	0,003	12,0	61,6
2	1	-1	-1	-1	-1	160	5,0	0,75	0,003	12,0	108,0
3	-1	1	-1	-1	-1	80	11,0	0,75	0,003	12,0	51,0
4	1	1	-1	-1	-1	160	11,0	0,75	0,003	12,0	87,0
5	-1	-1	1	-1	-1	80	5,0	1,75	0,003	12,0	48,0
6	1	-1	1	-1	-1	160	5,0	1,75	0,003	12,0	91,0
7	-1	1	1	-1	-1	80	11,0	1,75	0,003	12,0	39,8
8	1	1	1	-1	-1	160	11,0	1,75	0,003	12,0	71,4
9	-1	-1	-1	1	-1	80	5,0	0,75	0,005	12,0	60,0
10	1	-1	-1	1	-1	160	5,0	0,75	0,005	12,0	106,3
11	-1	1	-1	1	-1	80	11,0	0,75	0,005	12,0	52,3
12	1	1	-1	1	-1	160	11,0	0,75	0,005	12,0	90,5
13	-1	-1	1	1	-1	80	5,0	1,75	0,005	12,0	44,5
14	1	-1	1	1	-1	160	5,0	1,75	0,005	12,0	93,4
15	-1	1	1	1	-1	80	11,0	1,75	0,005	12,0	40,5
16	1	1	1	1	-1	160	11,0	1,75	0,005	12,0	73,2

Продолжение таблицы 3.5

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$[CO_2]_{кон},$ мг/дм ³
17	-1	-1	-1	-1	1	80	5,0	0,75	0,003	40,0	53,0
18	1	-1	-1	-1	1	160	5,0	0,75	0,003	40,0	100,0
19	-1	1	-1	-1	1	80	11,0	0,75	0,003	40,0	45,0
20	1	1	-1	-1	1	160	11,0	0,75	0,003	40,0	80,0
21	-1	-1	1	-1	1	80	5,0	1,75	0,003	40,0	42,0
22	1	-1	1	-1	1	160	5,0	1,75	0,003	40,0	86,3
23	-1	1	1	-1	1	80	11,0	1,75	0,003	40,0	34,0
24	1	1	1	-1	1	160	11,0	1,75	0,003	40,0	63,5
25	-1	-1	-1	1	1	80	5,0	0,75	0,005	40,0	52,8
26	1	-1	-1	1	1	160	5,0	0,75	0,005	40,0	90,4
27	-1	1	-1	1	1	80	11,0	0,75	0,005	40,0	47,5
28	1	1	-1	1	1	160	11,0	0,75	0,005	40,0	78,1
29	-1	-1	1	1	1	80	5,0	1,75	0,005	40,0	41,5
30	1	-1	1	1	1	160	5,0	1,75	0,005	40,0	80,1
31	-1	1	1	1	1	80	11,0	1,75	0,005	40,0	35,0
32	1	1	1	1	1	160	11,0	1,75	0,005	40,0	66,0
33	-1,547	0	0	0	0	58	8,0	1,25	0,004	26,0	35,7
34	1,547	0	0	0	0	182	8,0	1,25	0,004	26,0	92,0
35	0	-1,547	0	0	0	120	3,4	1,25	0,004	26,0	76,0
36	0	1,547	0	0	0	120	12,6	1,25	0,004	26,0	53,0
37	0	0	-1,547	0	0	120	8,0	0,50	0,004	26,0	79,4
38	0	0	1,547	0	0	120	8,0	2,00	0,004	26,0	61,0
39	0	0	0	-1,547	0	120	8,0	1,25	0,002	26,0	67,2
40	0	0	0	1,547	0	120	8,0	1,25	0,006	26,0	60,5
41	0	0	0	0	-1,547	120	8,0	1,25	0,004	4,3	68,5
42	0	0	0	0	1,547	120	8,0	1,25	0,004	47,7	59,5
43	0	0	0	0	0	120	8,0	1,25	0,004	26,0	62,0

Дисперсия воспроизводимости определена при неизменном комплексе основных факторов по четырем дополнительным опытам, в результате которых получены следующие значения $[CO_2]_{кон}(y)$: $y_1 = 69,6$ мг/дм³; $y_2 = 66,08$ мг/дм³; $y_3 = 65,2$ мг/дм³; $y_4 = 64,32$ мг/дм³. Среднее арифметическое выборки равно

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i}{4} = \frac{\sum_{i=1}^4 69,6 + 66,08 + 65,2 + 64,32}{4} = \frac{265,2}{4} = 66,3 \text{ мг/дм}^3.$$

Дисперсия воспроизводимости, при числе степеней свободы равном $f_{\text{воспр}} = n - 1 = 4 - 1 = 3$, составит

$$s_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 (y_i - \bar{y})^2}{f_{\text{воспр}}} = \frac{\sum_{i=1}^4 (69,6 - 66,3)^2 + (66,08 - 66,3)^2 + (65,2 - 66,3)^2 + (64,32 - 66,3)^2}{3} = 5,356.$$

Коэффициенты уравнения регрессии второго порядка рассчитывались при помощи табличного редактора Microsoft Office «Excel», определялись с разной точностью, их дисперсии составили

$$s_{b_i}^2 = s_{b_1}^2 = s_{b_2}^2 = s_{b_3}^2 = s_{b_4}^2 = s_{b_5}^2 = \frac{s_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{ji})^2} = \frac{5,356}{36,786} = 0,1456 \rightarrow s_{b_i} = 0,382,$$

$$s_{b_{jk}}^2 = s_{b_{12}}^2 = \dots = s_{b_{45}}^2 = \frac{s_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{ji} X_{jk})^2} = \frac{5,356}{32} = 0,1674 \rightarrow s_{b_{jk}} = 0,409,$$

$$s_{b_{ii}}^2 = s_{b_{11}}^2 = s_{b_{22}}^2 = s_{b_{33}}^2 = s_{b_{44}}^2 = s_{b_{55}}^2 = \frac{s_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{ji}^*)^2} = \frac{5,356}{11,9842} = 0,4469 \rightarrow s_{b_{ii}} = 0,669,$$

$$s_{b_0^*}^2 = \frac{s_y^2}{N} = \frac{5,356}{43} = 0,12456,$$

$$s_{b_0}^2 = s_{b_0^*}^2 + \frac{ns_{b_{ii}}^2}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji}^2 = 0,12456 + \frac{5 \cdot 0,4469}{43} \cdot 36,786 = 2,0361 \rightarrow s_{b_0} = 1,427.$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии проверялась для каждого коэффициента в отдельности по критерию Стьюдента (таблица 3.6).

Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости $p = 0,05$, числа степеней свободы $f = 4$ и количества опытов $N = 43$ составит $t = 2,78$. Коэффициенты уравнения регрессии не коррелированы между собой, их величины характеризуют вклад каждого фактора в величину y , поэтому исключение из уравнения регрессии незначимых коэффициентов не сказалось на остальных коэффициентах [11].

Таблица 3.6 – Определение значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента

Коэффициент уравнения регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента	Значимость коэффициента	Коэффициент уравнения регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента	Значимость коэффициента
b_0	$t_0 = \frac{ 63,50 }{1,427} = 44,5$	2,78	значимый	b_{22}	$t_{22} = \frac{ 0,22 }{0,669} = 0,33$	2,78	незначимый
b_1	$t_1 = \frac{ 19,13 }{0,382} = 50,14$	2,78	значимый	b_{23}	$t_{23} = \frac{ -0,08 }{0,409} = 0,21$	2,78	незначимый
b_2	$t_2 = \frac{ -6,52 }{0,382} = 17,07$	2,78	значимый	b_{24}	$t_{24} = \frac{ 1,01 }{0,409} = 2,47$	2,78	незначимый
b_3	$t_3 = \frac{ -6,57 }{0,382} = 17,33$	2,78	значимый	b_{25}	$t_{25} = \frac{ 0,32 }{0,409} = 0,77$	2,78	незначимый
b_4	$t_4 = \frac{ -0,54 }{0,382} = 1,42$	2,78	незначимый	b_{33}	$t_{33} = \frac{ 2,50 }{0,669} = 3,74$	2,78	значимый
b_5	$t_5 = \frac{ -3,73 }{0,382} = 9,78$	2,78	значимый	b_{34}	$t_{34} = \frac{ 0,18 }{0,409} = 0,45$	2,78	незначимый
b_{11}	$t_{11} = \frac{ -0,04 }{0,669} = 0,06$	2,78	незначимый	b_{35}	$t_{35} = \frac{ 0,52 }{0,409} = 1,26$	2,78	незначимый
b_{12}	$t_{12} = \frac{ -2,73 }{0,409} = 6,69$	2,78	незначимый	b_{44}	$t_{44} = \frac{ -0,04 }{0,669} = 0,06$	2,78	незначимый
b_{13}	$t_{13} = \frac{ -0,55 }{0,409} = 1,34$	2,78	незначимый	b_{45}	$t_{45} = \frac{ -0,48 }{0,409} = 1,17$	2,78	незначимый
b_{14}	$t_{14} = \frac{ -0,28 }{0,409} = 0,68$	2,78	незначимый	b_{55}	$t_{55} = \frac{ 0,021 }{0,669} = 0,03$	2,78	незначимый
b_{15}	$t_{15} = \frac{ -0,92 }{0,409} = 2,25$	2,78	незначимый				

После отсева незначимых коэффициентов, для которых t -отношение меньше табличного, получено окончательное уравнение регрессии в кодированном виде

$$Y = 63,50 + 19,13X_1 - 6,52X_2 - 6,57X_3 - 3,73X_5 - 2,73X_1X_2 + 2,50X_3^2. \quad (3.11)$$

Анализ расчетных значений $[CO_2]_{кон}$, полученных по формуле (3.4) и относительных погрешностей вычислений Δy (%) позволил выявить максимальные от-

клонения, которые составили $\pm (6,33-7,43 \%)$. Проверка адекватности полученного уравнения регрессии осуществлялась с помощью критерия Фишера F

$$s_{ad}^2 = s_{oct}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{i=1}^N (y_j^3 - y_j^p)^2 = \frac{196,92}{43-7} = 5,322,$$

$$F = \frac{\max(s_{ad}^2, s_{воспр}^2)}{\min(s_{ad}^2, s_{воспр}^2)} = \frac{s_{воспр}^2}{s_{ad}^2} = \frac{5,356}{5,322} = 1,01.$$

Табличное значение критерия Фишера $F_{1-p} = 8,6$ при уровне значимости $p = 0,05$ и числах степеней свободы $f_1 = f_{ad} = N - B = 43 - 7 = 36$ и $f_2 = f_{воспр} = 3 \rightarrow F < F_{1-p}(f_1, f_2)$, полученное уравнение регрессии адекватно эксперименту.

Уравнение регрессии в натуральном масштабе примет вид

$$[CO_2]_{кон} = 40,64 + 0,67 \cdot [CO_2]_{исх} + 0,56 \cdot q_{y0} - 38,14 \cdot h_{воды} - 0,27 \cdot V_{воды} - 0,022 \cdot [CO_2]_{исх} \cdot q_{y0} + 10 \cdot h_{воды}^2 \quad (3.12)$$

Области, ограничивающие применение данного уравнения по всем входящим в него параметрам, определены интервалами варьирования факторов, таблица 3.4.

Сравнительные зависимости остаточного содержания углекислоты от удельного расхода воздуха, построенные по экспериментальным и расчетным точкам, приведены на рисунке 3.9 [61, 69].

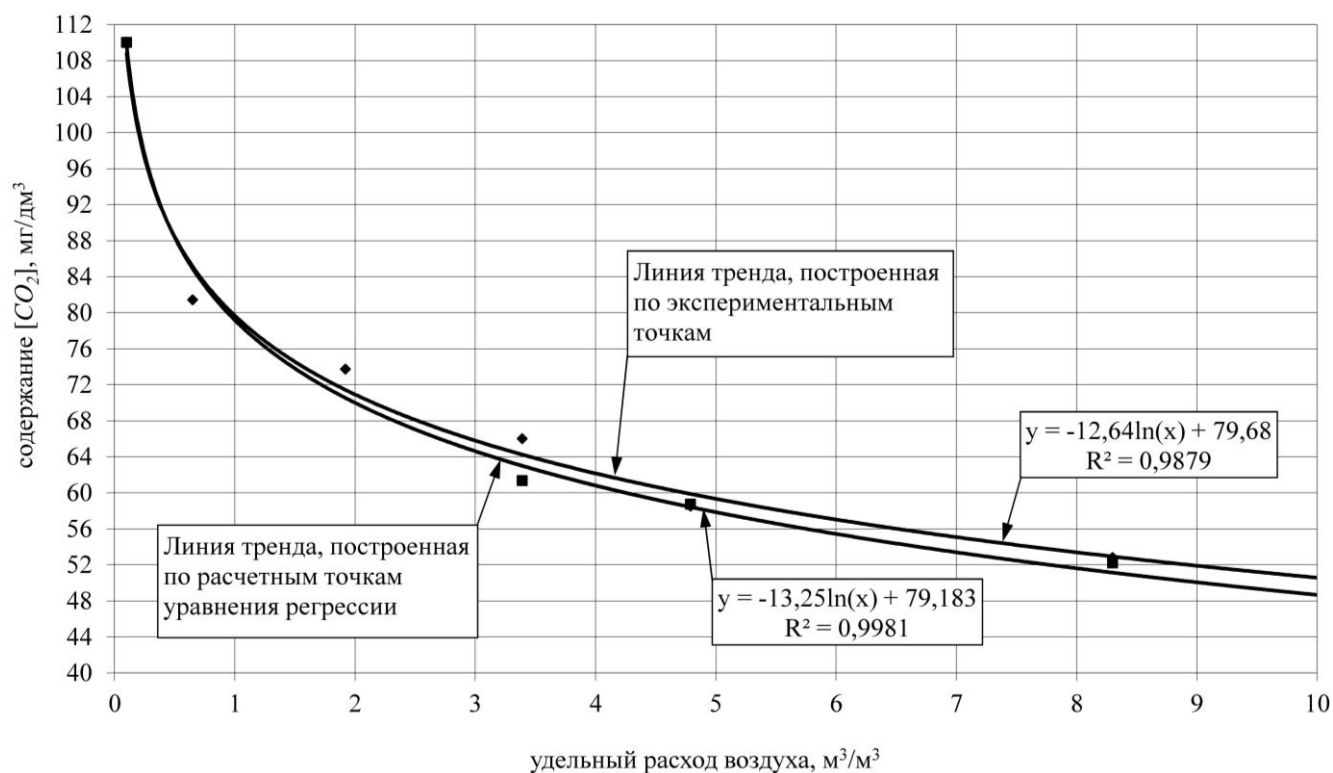


Рисунок 3.9 – Зависимость содержания углекислоты от удельных расходов воздуха для $[CO_2]_{исх} = 110$ мг/дм³, $d_{отв} = 5$ мм, $h_{воды} = 1,75$ м, $V_{воды} = 40,0$ м/ч

Отклонения экспериментальных и расчетных точек находятся в пределах допустимой погрешности не более $\pm 10 \%$. Предложенное уравнение регрессии рекомендуется для определения остаточного содержания углекислоты при барботаже в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха.

Выводы

1. Исследования по оценке влияния десорбции угольной кислоты на изменение качественного состава подземной воды показали, что с уменьшением содержания углекислоты при ее концентрации выше равновесной остаются неизменными карбонатная жесткость и солесодержание, щелочность изменяется незначительно, при этом увеличивается значение водородного показателя, для определения которого получена математическая зависимость.

2. Исследованиями барботажа в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха установлено, что при изменении водовоздушного соотношения и скорости противотока воды создаются различные режимы барботажа независимо от диаметров отверстий истечения воздуха.

3. Получена эмпирическая формула для определения остаточного содержания углекислоты в воде после барботажа в свободном объеме в зависимости от основных технологических параметров – водовоздушного соотношения, скорости движения воды, содержания углекислоты в исходной воде и высоты слоя воды в барботере. Расчетную зависимость можно использовать при проектировании и эксплуатации дегазатора, при этом отклонения расчетных значений от экспериментальных данных не превышают $\pm 10 \%$.

4. Барботаж в свободном объеме с дырчатыми распределителями воздуха рекомендуется для исходных концентраций углекислоты в воде до 100 мг/дм^3 . При конструировании барботажного дегазатора рекомендованы к применению отверстия дырчатых распределителей воздуха 3–6 мм, удельные расходы воздуха в пределах $4\text{--}12 \text{ м}^3/\text{м}^3$, высота слоя воды в дегазаторе до 2,0 м, скорость движения воды до 40 м/ч.

4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОТЫ НА ПЕРЕГОРОДЧАТОМ ДЕГАЗАТОРЕ

4.1 Закономерности процесса десорбции углекислоты в перегородчатом дегазаторе

Авторами [135] выделены основные направления, позволяющие интенсифицировать тепломассообменные процессы в технологических аппаратах путем увеличения удельной поверхности контакта фаз, повышения эффективности перемешивания, совершенствования способов осуществления контакта фаз, увеличения скорости относительного движения фаз, использования нестационарных (по профилям скоростей, концентраций и температур) режимов межфазного обмена, использования неравномерностей систем с большими температурами и концентрационными градиентами, проведения процессов тепло- и массообмена в условиях гидродинамической неустойчивости межфазной поверхности.

Для образования смешения в локальном объеме предлагается обеспечить столкновение струи с препятствием или с другой струей, создать области с пониженными скоростями потока, например, путем установки крутонаклонных пластин в объеме аппарата [135]. Различные виды турбулизаторов применяют для интенсификации теплообмена и массообменных процессов, зоны смешения (турбулентности) могут создаваться в одном или нескольких локальных объемах аппарата, а также периодически вдоль движения потока и т.д. [1, 50].

В целях увеличения эффективности использования воздуха была предложена конструкция барботажного дегазатора, оснащенного поперечными направляющими – турбулизаторами воды, изменяющими структуру воздушных пузырей и траекторию движения встречных потоков вода-воздух по вертикали [56, 66, 72].

Дегазаторы барботажного типа, согласно классификации В.В. Кафарова [82], относятся к аппаратам с поверхностью контакта фаз, образующейся в процессе движения потоков. В барботажных дегазаторах на эффект удаления углекислоты

влияет создаваемая в них гидродинамическая обстановка, которая обусловлена особенностями их конструкции.

Живое сечение в перегородчатом дегазаторе изменяется на пути движения потоков, что влияет на гидродинамическую структуру потока. Визуальные наблюдения показали, что до первой направляющей, расположенной на высоте 0,5 м, в зависимости от водовоздушного соотношения устанавливается пузырьковое отрывное, полуструйное или струйное течение воздуха, с различной степенью турбулизации массы воды.

В дегазаторе с перегородками наблюдались следующие гидродинамические особенности:

1. На подходе газового потока к перегородке происходило его торможение, пузыри воздуха заполняли все поперечное сечение аппарата (рисунок 4.1 *а*) и укрупнялись в связи с их взаимным слиянием (рисунок 4.1 *б*).

2. Пузыри, находящиеся под перегородкой, выталкивались в виде большого пузыря к ее краю и затем, в силу понижения давления на скоростном участке (узкое сечение аппарата), увеличивались в объеме. Поток крупных пузырей под воздействием противотока воды, оттеснялся (рисунок 4.1 *в*) и закручивался, создавая зоны локального смешения, что приводило к деформации пузырей и их дроблению (рисунок 4.1 *а*).

3. Расположение перегородок в шахматном порядке способствовало диагональному движению потоков, что приводило к образованию застойных зон непосредственно над перегородкой (рисунки 4.1 *а*, *б*, *в*) в виде неправильных треугольников высотой 0,03–0,06 м, выше перегородки наблюдалась относительно устойчивая турбулентная область.

4. Процесс разрушения и объединения пузырей повторялся кратно количеству перегородок.

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. Развитие турбулентности потока при высоких

скоростях движения воды в перегородчатом дегазаторе приводит к пульсации поверхности пузырька с образованием напора внутри него, направленного наружу [1]. Если давление превышает силы поверхностного натяжения пузыря, то начинается его дробление, при этом наибольшему влиянию подвержены пузыри неправильной эллиптической формы.

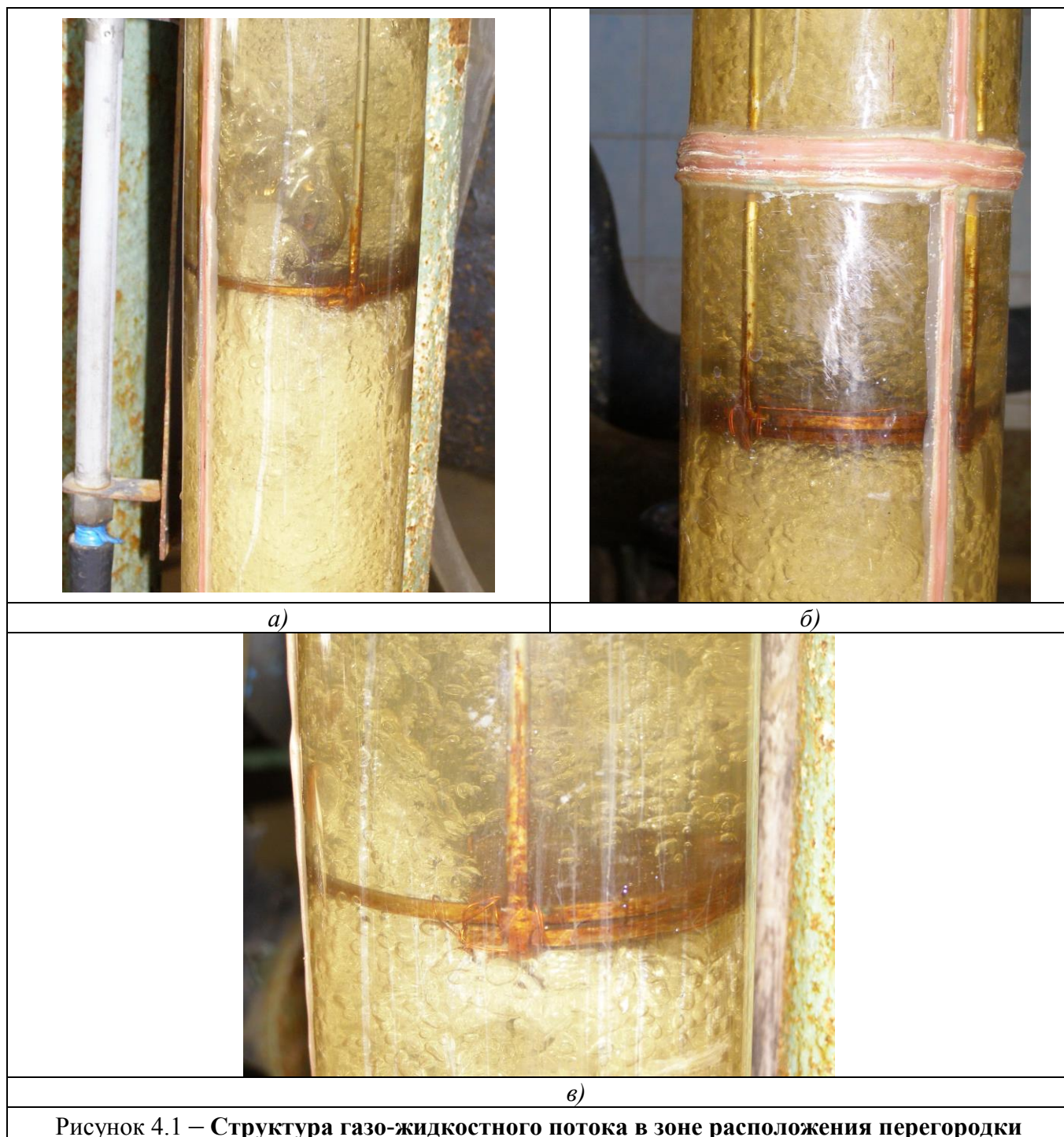


Рисунок 4.1 – Структура газо-жидкостного потока в зоне расположения перегородки

В условиях низких температур воды, при которых молекулярная диффузия снижается, а поверхностное натяжение на границе раздела вода-воздух возраста-

ет, десорбция углекислоты в маленькие пузырьки воздуха затруднена, так как сопротивление пограничного слоя для них выше, чем для крупных пузырей неправильной формы [62, 64, 66].

Площадь живого сечения дегазатора в местах установки горизонтально расположенных перегородок уменьшается, возрастают скорости противотока воды и воздуха, при этом происходит наибольшая трансформация кинетической энергии потока в энергию деформации и дробления пузырей [1]. Создаваемая гидродинамическая обстановка приводит к тому, что турбулентные пульсации влияют на устойчивость поверхности контакта фаз, происходит интенсивное обновление и деформация ее границ [82], уменьшается толщина пограничного слоя. В момент разрыва пузыря диффузия молекул CO_2 из воды в воздух протекает активнее, что ведет к увеличению *КПД* использования воздуха [14, 55, 58].

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.

На эффективность удаления углекислоты оказывает влияние тип распределителя воздуха из-за различной конфигурации вытекающего потока воздуха и последующей турбулизации объема дегазируемой воды.

Проведено сравнение эффективности удаления углекислоты для обычного барботажного, гравийного и перегородчатого дегазаторов с использованием различных распределителей воздуха [18, 53, 68], сравнительные кривые приведены на рисунке 4.2. В обычных барботажных дегазаторах наибольший эффект удаления углекислоты (60 %) получен при использовании грибового колпачка ВОДГЕО, что связано с рассеивающим эффектом выхода воздуха и активной локальной турбулизацией воды в этой зоне [59], для дырчатых распределителей воздуха эффект не превысил 50 %.

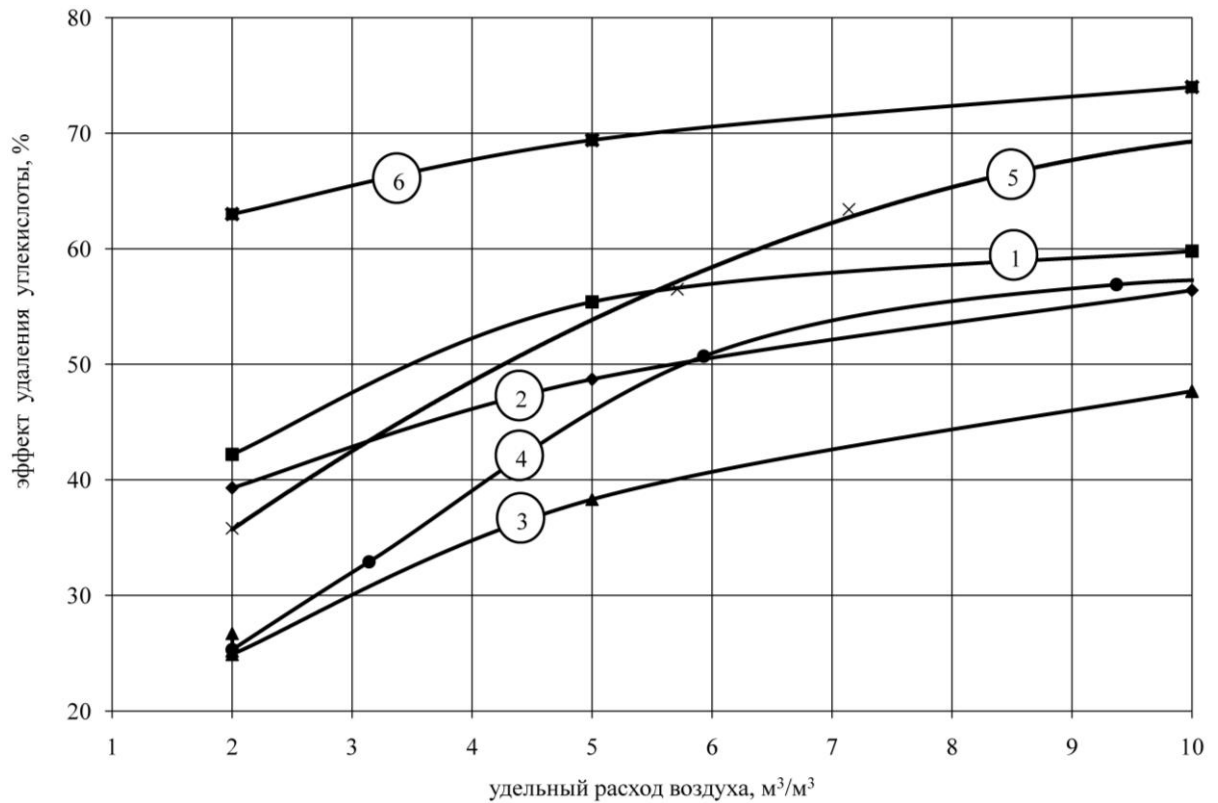


Рисунок 4.2 – Зависимость эффективности удаления CO_2 от типа распределителя воздуха: 1 – грибковый колпачок ВОДГЕО; 2 – сетчатый колпачок ФЭЛ; 3 – отверстия диаметром 5 мм; 4 – отверстия диаметром 5 мм и два уровня перегородок; 5 – отверстия диаметром 5 мм и четыре уровня перегородок; 6 – гравийная загрузка диаметром 5–10 мм

В перегородчатом дегазаторе применялись дырчатые распределители воздуха диаметром 5 мм, в этом случае при двух перегородках, удельном расходе воздуха $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ после продувки в течение 15 мин минимальное содержание углекислоты составило $44 \text{ мг}/\text{дм}^3$, эффект – 56 %. При увеличении скорости противотока и количества перегородок до четырех, эффект удаления углекислоты составил 69 %, минимальное содержание углекислоты после продувки – $30 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

Применять в перегородчатом дегазаторе грибковые колпачки ВОДГЕО, увеличивающие площадь контакта воды и воздуха за счет уменьшения диаметра воздушных пузырей нецелесообразно, так как конструктивные особенности дегазатора приводят к периодическому укрупнению пузырей.

Сравнение эффекта снижения содержания углекислоты в обычном барботажном дегазаторе с дырчатым распределителем воздуха диаметром 3 мм и в перегородчатом при трех пластинах с диаметрами отверстий воздухо-распределителя $d_{отв} = 3, 5, 6 \text{ мм}$ приведено на рисунке 4.3. Зависимости получены при одинако-

вых исходных данных: содержание углекислоты в воде $[CO_2]_{исх} = 100 \text{ мг/дм}^3$, высота слоя воды 2,0 м, скорость движения воды 12–13 м/ч.

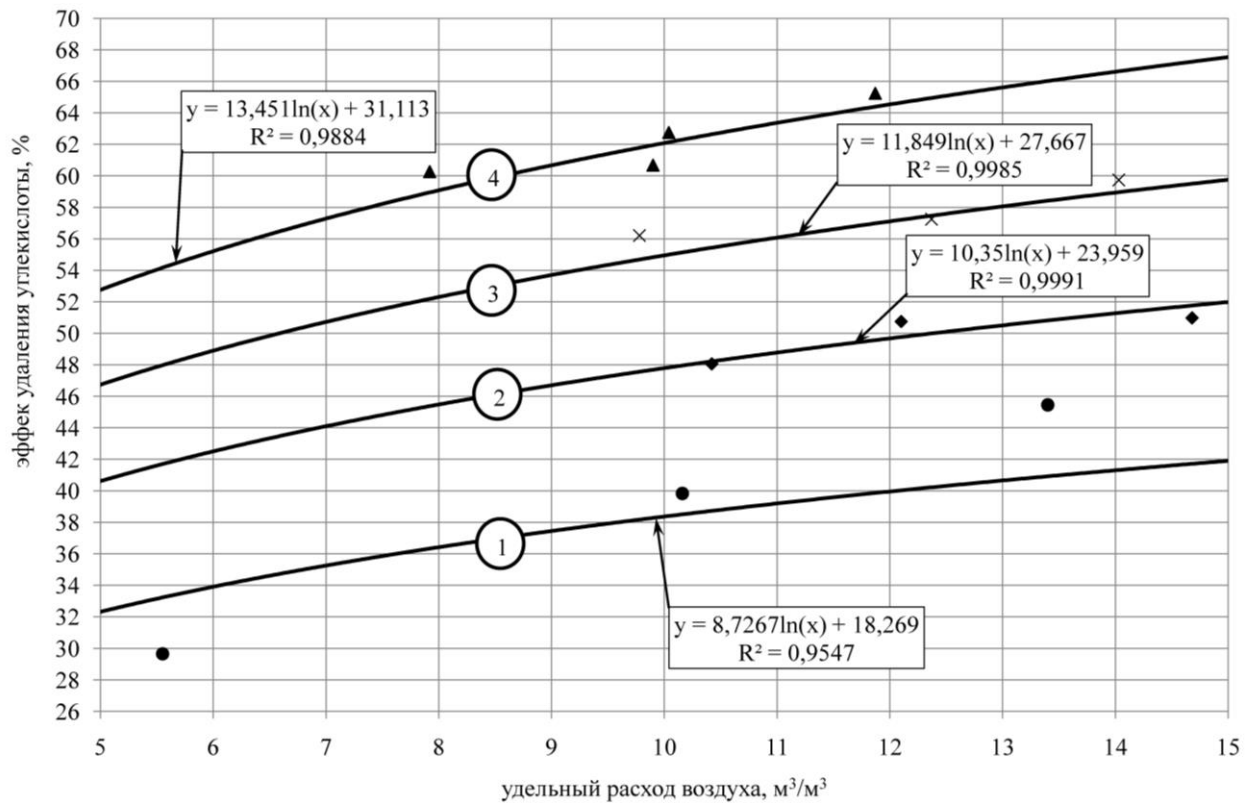


Рисунок 4.3 – Сравнение эффекта снижения содержания углекислоты в барботажном и перегородчатом дегазаторах для различных диаметров дырчатых распределителей:

- 1 – обычный барботаж $d_{отв} = 3 \text{ мм}$; 2 – перегородчатый $d_{отв} = 3 \text{ мм}$;
3 – перегородчатый $d_{отв} = 5 \text{ мм}$; 4 – перегородчатый $d_{отв} = 6 \text{ мм}$

Наибольший эффект удаления углекислоты наблюдается в перегородчатом дегазаторе при диаметре отверстий 6 мм, разность в эффектах при использовании дырчатых распределителей диаметрами 6 мм и 3 мм составляет 12–16 % при удельном расходе воздуха 5–15 $\text{м}^3/\text{м}^3$. Увеличение эффективности удаления углекислоты при установке трех уровней перегородок в перегородчатом дегазаторе по сравнению с барботажным при $d_{отв} = 3 \text{ мм}$ составляет всего 10 %, объясняется это тем, что перегородчатый дегазатор эффективнее работает при повышенных скоростях противотока воды. При низких скоростях и малых водовоздушных соотношениях гидродинамическая обстановка в дегазаторе с перегородками схожа с обстановкой в барботажном дегазаторе.

При высоких начальных концентрациях углекислоты процесс десорбции протекает быстрее за счет повышенной первоначальной движущей силы массо-обменного процесса, что отражают зависимости рисунка 4.4.

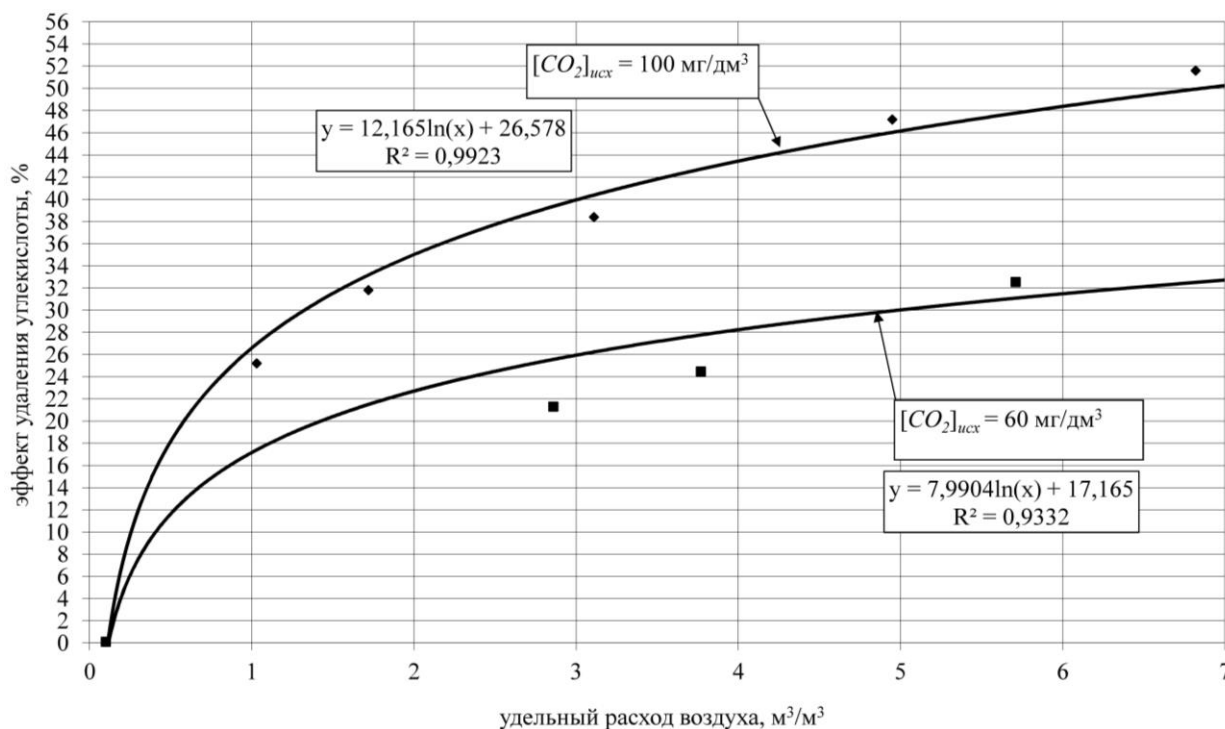


Рисунок 4.4 — Сравнение эффектов удаления CO_2 при различных исходных содержаниях для $d_{отв} = 5 \text{ мм}$, двух перегородках, высоте слоя воды $1,2 \text{ м}$, $h_{\text{между перегородками}} = 0,4 \text{ м}$, скорости $44,0 \text{ м/ч}$

Наиболее значимым параметром, влияющим на десорбцию углекислоты, является удельный расход воздуха. Традиционно считается, что процесс десорбции протекает интенсивнее при большем расходе подаваемого воздуха, однако эта зависимость не носит линейного характера, при увеличении водовоздушного соотношения выше оптимальных значений, увеличение эффективности удаления углекислоты незначительно. Диапазон изменений удельного расхода воздуха для перегородчатого дегазатора установлен на основе экспериментальных данных в пределах $4,0\text{--}14,0 \text{ м}^3$ воздуха на м^3 воды.

Гидродинамическая обстановка в дегазаторе формируется в зависимости от расхода воздуха и скорости противотока воды. Иллюстрации, показывающие изменения гидродинамической обстановки внутри дегазатора, для наглядности выстроены в порядке возрастания скорости противотока (Приложение В). В практике водоснабжения для барботажа в свободном объеме приняты скорости противотока

тока до 20 м/ч, для перегородчатого дегазатора в ходе эксперимента – выше 20 м/ч [70]. Согласно полученным сравнительным зависимостям для трех типов дегазаторов (рисунок 4.5) эффективность удаления углекислоты в перегородчатом дегазаторе, по сравнению с обычным барботажным, увеличивается на 15–25 % и практически равна эффекту в дегазаторе с гравийной загрузкой, но высокие скорости движения воды в предложенной конструкции позволяют значительно уменьшить размеры дегазатора в плане.

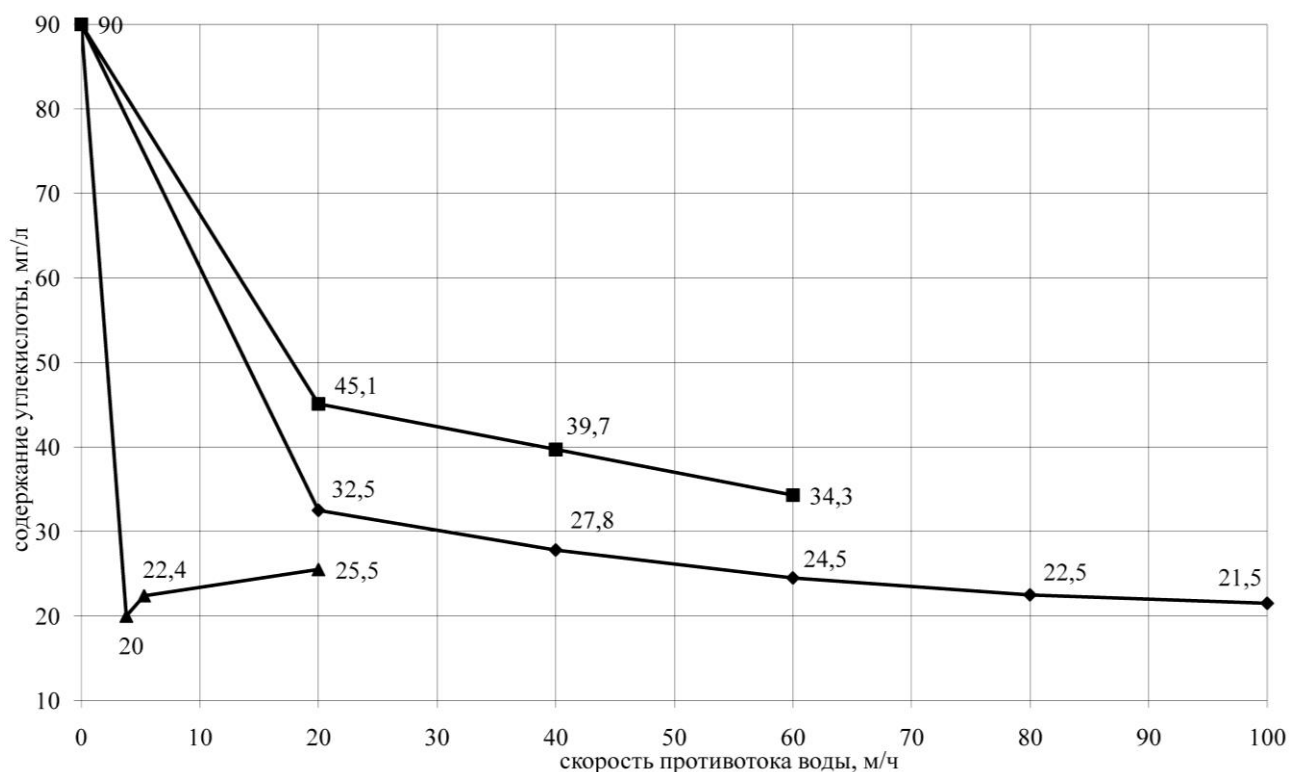


Рисунок 4.5 – Изменение остаточного содержания углекислоты в воде в зависимости от скорости противотока для трех типов дегазатора:

■ – обычный барботажный, ▲ – с гравийной загрузкой, ◆ – перегородчатый

Зависимость эффекта удаления углекислоты при разных скоростях противотока, исходном содержании углекислоты в подземной воде 160 мг/дм^3 и четырех перегородках приведена на рисунке 4.6 [67]. При сверхскоростном режиме $V_{\text{воды}} = 117,6 \text{ м/ч}$ увеличение эффекта удаления углекислоты составило 15 % (при одинаковых водовоздушных соотношениях) по сравнению со скоростью противотока $V_{\text{воды}} = 24 \text{ м/ч}$. При высоких скоростях противотока, для достижения заданного эффекта, потребуется меньшее количество подаваемого в дегазатор воздуха. Например, для получения эффекта удаления углекислоты в

60 % при сверхскоростном режиме потребуется $3,8 \text{ м}^3$ воздуха на м^3 воды, при скорости 24 м/ч – $8,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

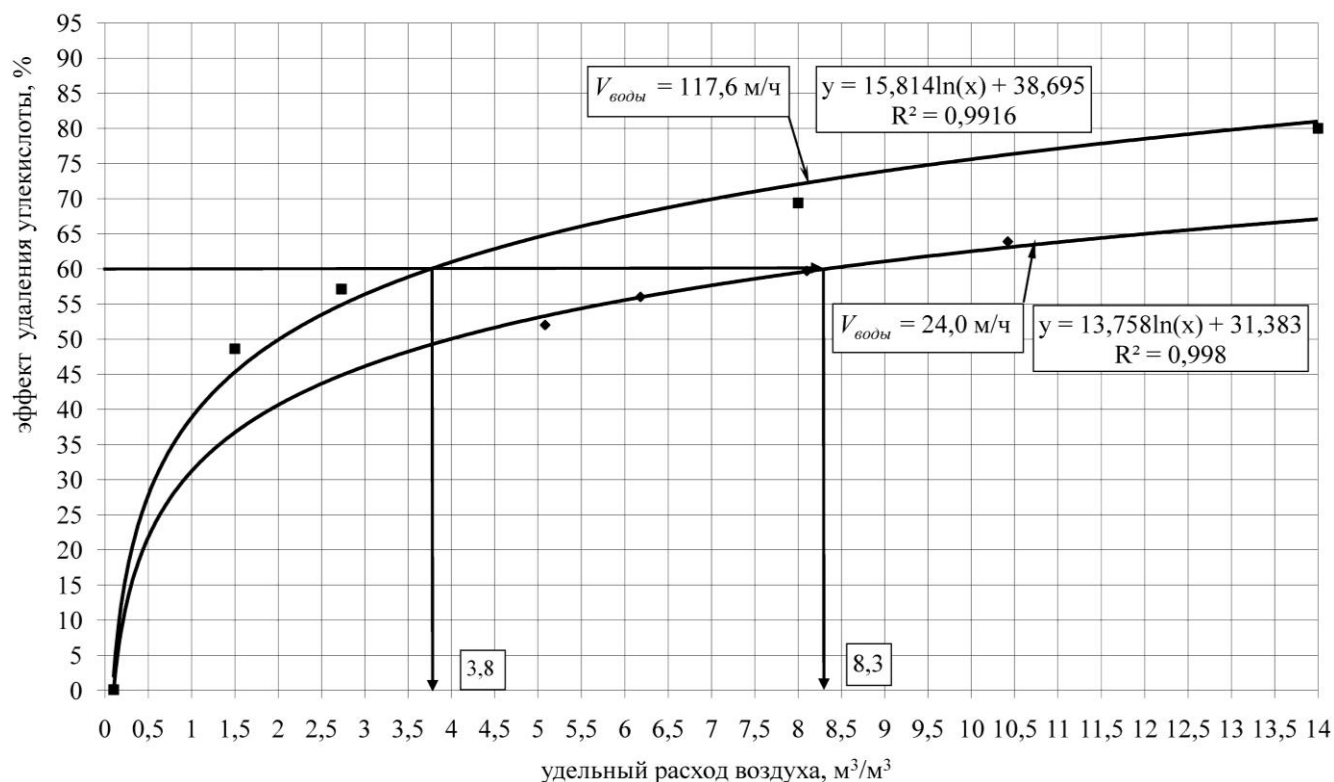


Рисунок 4.6 – Влияние скорости противотока на эффект удаления углекислоты в перегородчатом дегазаторе барботажного типа

Существует связь скоростной характеристики с высотой слоя барботируемой воды, например, при малой высоте слоя воды в дегазаторе $H_{\text{воды}} = 1,2 \text{ м}$ эффект удаления углекислоты при скорости противотока 45 м/ч меньше, чем при скорости 24 м/ч . При малых высотах столба воды не представляется целесообразным увеличивать скорость противотока в дегазаторе из-за снижения продолжительности контакта фаз. Высота перегородчатого дегазатора определяется количеством установленных в нем перегородок и расстоянием между ними. С возрастанием количества перегородок происходит увеличение эффективности удаления углекислоты (рисунок 4.7), при двух перегородках эффект повысился на 4 % по сравнению с барботажным дегазатором, при четырех – на 18 % [71].

Согласно проведенным исследованиям, расстояние между перегородками в дегазаторе влияет на процессы десорбции углекислоты (рисунок 4.8), при водовоздушном соотношении до $5,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ больший эффект наблюдается при расстояниях между перегородками $0,2$ и $0,4 \text{ м}$, при значениях удельного расхода

воздуха более $5,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$, лучший эффект получен при расстояниях 0,4–0,6 м. При расстоянии между перегородками 0,4 м наблюдается стабильно высокий эффект, поэтому данный параметр принят величиной постоянной.

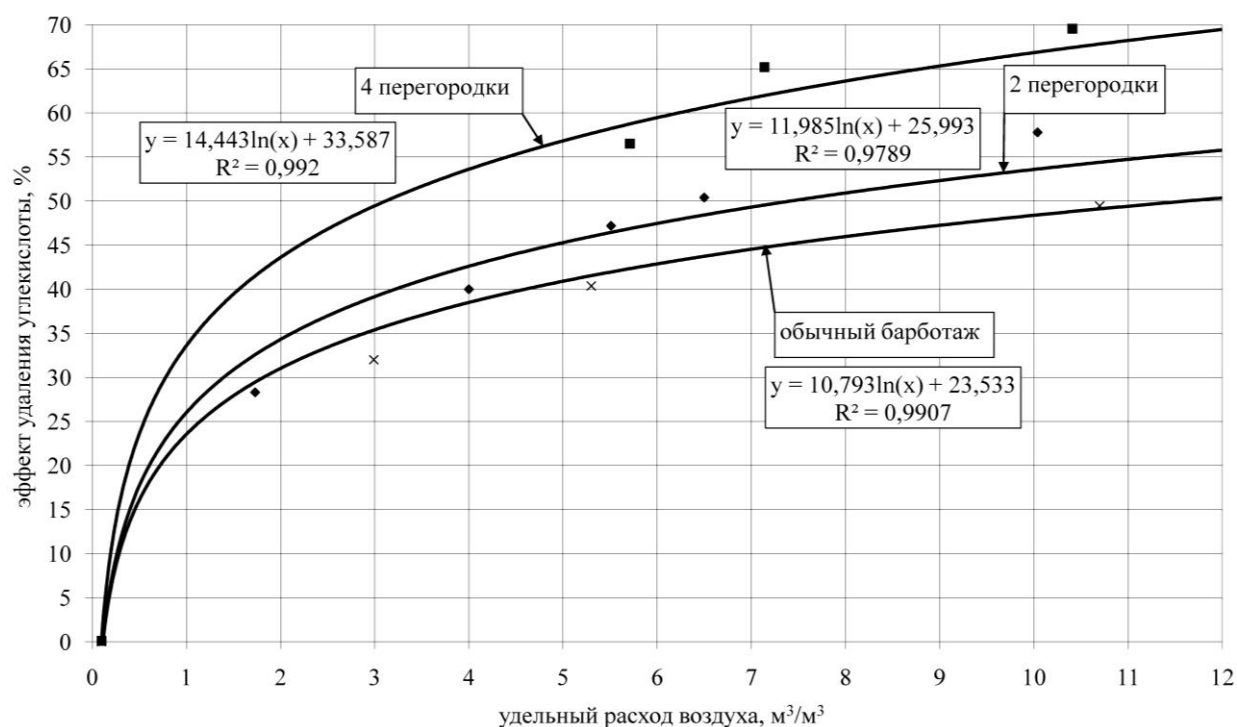


Рисунок 4.7 – Сравнение эффектов удаления углекислоты при разном количестве перегородок по сравнению с обычным барботажем при $[CO_2]_{исх} = 100 \text{ мг/дм}^3$, $V_{воды} = 24,0 \text{ м/ч}$, расстояние между перегородками 0,4 м

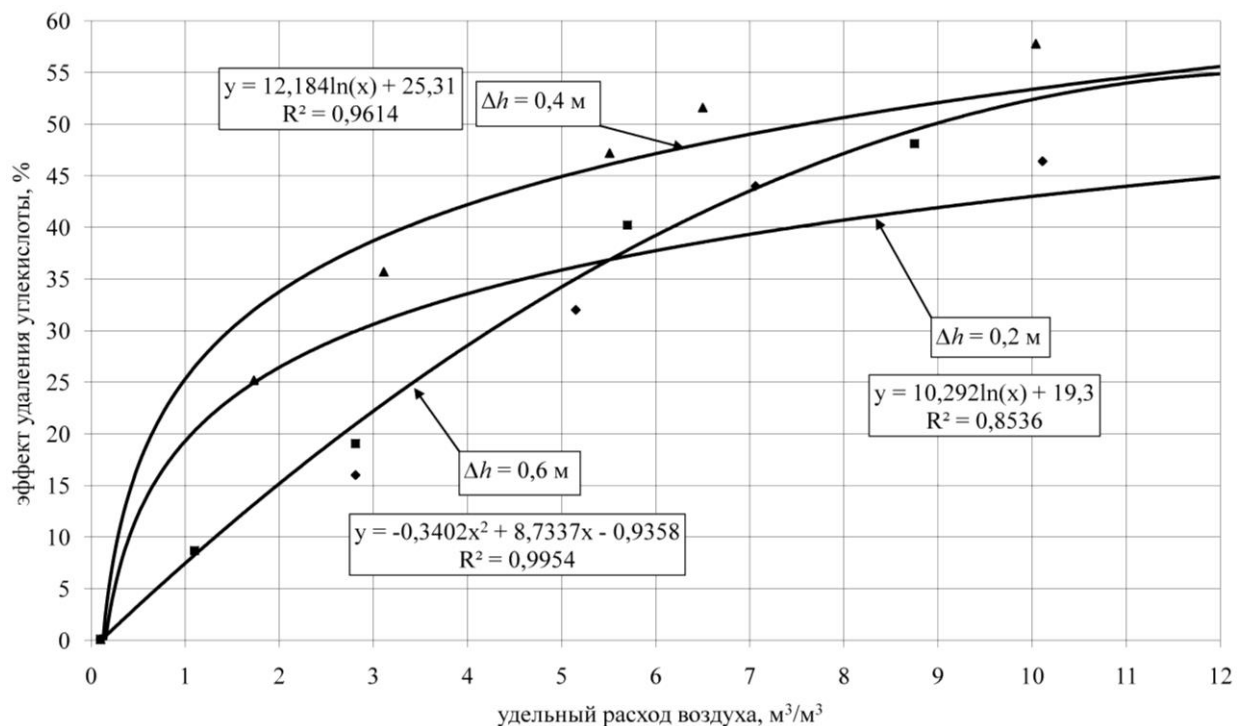


Рисунок 4.8 – Зависимость эффекта удаления CO_2 от удельного расхода воздуха при двух перегородках и разном расстоянии между ними $V_{воды} = 24,0 \text{ м/ч}$, $[CO_2]_{исх} = 100 \text{ мг/дм}^3$

Исследования факторов, влияющих на процесс десорбции углекислоты в перегородчатом дегазаторе, позволили определить интервалы варьирования факторов, необходимые для последующего проведения многофакторного эксперимента.

4.2 Математическая обработка экспериментальных исследований по удалению углекислоты в перегородчатом дегазаторе

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.

При планировании эксперимента использовался ротатбельный план второго порядка в целях получения уравнения регрессии, представляющего зависимость требуемого количества перегородок $N_{треб}$ от влияющих факторов: $[CO_2]_{исх}$ – исходного содержания углекислоты в воде, мг/дм³; $q_{вод}$ – удельного расхода воздуха, м³/м³; $[CO_2]_{треб}$ – требуемого содержания углекислоты в воде после обработки, мг/дм³.

Основной уровень и интервалы варьирования независимых факторов, их значения в звездных точках ($\alpha = 1,682 [134]$), приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные уровни и интервалы варьирования факторов эксперимента по определению требуемого количества перегородок

Наименование показателей	Значения показателей по факторам		
	X_1 $[CO_2]_{исх}$, мг/дм ³	X_2 $q_{вод}$, 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 ($-\alpha$)	63	1,3	23,2
Звездные точки ($+\alpha$)	197	14,7	56,8

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 4.2, при трех факторах содержит восемь экспериментальных точек полного факторного эксперимента, шесть опытов в звездных точках и шесть опытов в центре плана [11].

Таблица 4.2 – Матрица планирования ротatableного плана второго порядка и результаты эксперимента по определению требуемого количества перегородок

№	X_1	X_2	X_3	x_1	x_2	x_3	$N_{пер}$, шт
1	1	1	1	170	12,0	50,0	4
2	-1	1	1	90	12,0	50,0	1
3	1	-1	1	170	4,0	50,0	5
4	-1	-1	1	90	4,0	50,0	3
5	1	1	-1	170	12,0	30,0	6
6	-1	1	-1	90	12,0	30,0	4
7	1	-1	-1	170	4,0	30,0	7
8	-1	-1	-1	90	4,0	30,0	5
9	-1,682	0	0	63	8,0	40,0	2
10	1,682	0	0	197	8,0	40,0	6
11	0	-1,682	0	130	1,3	40,0	7
12	0	1,682	0	160	14,7	40,0	4
13	0	0	-1,682	130	8,0	23,2	6
14	0	0	1,682	130	8,0	56,8	2
15	0	0	0	130	8,0	40,0	4
16	0	0	0	130	8,0	40,0	4
17	0	0	0	130	8,0	40,0	4
18	0	0	0	130	8,0	40,0	5
19	0	0	0	130	8,0	40,0	4
20	0	0	0	130	8,0	40,0	4

Дисперсия воспроизводимости рассчитывалась по шести ($n_0 = 6$) экспериментальным точкам $N_{пер}(y)$ центра плана: $y_1 = 4$ шт; $y_2 = 4$ шт; $y_3 = 4$ шт; $y_4 = 5$ шт; $y_5 = 4$ шт; $y_6 = 4$ шт (таблица 4.2). Среднее арифметическое выборки равно

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^6 y_i}{6} = \frac{\sum_{i=1}^6 4 + 4 + 4 + 5 + 4 + 4}{6} = \frac{25}{6} = 4,17 \text{ шт.}$$

Дисперсия воспроизводимости при числе степеней свободы равном $f_{воспр} = n - 1 = 6 - 1 = 5$ составит

$$s_{воспр}^2 = \frac{\sum_{i=1}^6 (y_i - \bar{y})^2}{f_{воспр}} = \frac{\sum_{i=1}^6 (4 - 4,17)^2 + (4 - 4,17)^2 + (4 - 4,17)^2 + (5 - 4,17)^2 + (4 - 4,17)^2 + (4 - 4,17)^2}{5} = 0,1667.$$

Коэффициенты уравнения регрессии второго порядка определялись с помощью табличного редактора Microsoft Office «Excel».

Коэффициенты определялись с разной точностью и их дисперсии составили

$$s_{b_j}^2 = s_{b_1}^2 = s_{b_2}^2 = s_{b_3}^2 = a_3 \cdot s_y^2 = 0,0732 \cdot 0,1667 = 0,0122 \rightarrow s_{b_j} = 0,110,$$

$$s_{b_{uj}}^2 = s_{b_{12}}^2 = s_{b_{13}}^2 = s_{b_{23}}^2 = a_4 \cdot s_y^2 = 0,125 \cdot 0,1667 = 0,0208 \rightarrow s_{b_{uj}} = 0,144,$$

$$s_{b_{jj}}^2 = s_{b_{11}}^2 = s_{b_{22}}^2 = s_{b_{33}}^2 = (a_5 + a_6) \cdot s_y^2 = (0,0625 + 0,0069) \cdot 0,1667 = 0,0116 \rightarrow s_{b_{jj}} = 0,108,$$

$$s_{b_0}^2 = a_1 \cdot s_y^2 = 0,1663 \cdot 0,1667 = 0,0277 \rightarrow s_{b_0} = 0,166.$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии проверялась по критерию Стьюдента для каждого коэффициента в отдельности (таблица 4.3). Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости $p = 0,05$; числа степеней свободы $f = 5$ и количества опытов $N = 20$ составит $t = 2,57$ [11].

Таблица 4.3 – Определение значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента для эксперимента по определению требуемого количества перегородок

Коэффициент уравнения регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента	Значимость коэффициента	Коэффициент уравнения регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента	Значимость коэффициента
b_0	$t_0 = \frac{4,1654}{0,166} = 25,09$	2,57	значимый	b_{13}	$t_{13} = \frac{0,125}{0,144} = 0,87$	2,57	незначимый
b_1	$t_1 = \frac{1,1513}{0,110} = 10,47$	2,57	значимый	b_{23}	$t_{23} = \frac{-0,125}{0,144} = 0,87$	2,57	незначимый
b_2	$t_2 = \frac{-0,7374}{0,110} = 6,70$	2,57	значимый	b_{11}	$t_{11} = \frac{-0,088}{0,108} = 0,81$	2,57	незначимый
b_3	$t_3 = \frac{-1,1513}{0,110} = 10,47$	2,57	значимый	b_{22}	$t_{22} = \frac{0,4425}{0,108} = 4,10$	2,57	значимый
b_{12}	$t_{12} = \frac{0,125}{0,144} = 0,87$	2,57	незначимый	b_{33}	$t_{33} = \frac{-0,088}{0,108} = 0,81$	2,57	незначимый

После отсева незначимых коэффициентов получено окончательное уравнение в кодированном виде

$$Y = 4,17 + 1,15X_1 - 0,74X_2 - 1,15X_3 + 0,44X_2^2. \quad (4.1)$$

Уравнение регрессии в натуральном масштабе приняло вид

$$N_{\text{переб}} = 8,12 + 0,03 \cdot [CO_2]_{\text{исх}} - 0,63 \cdot q_{\text{уд}} - 0,12 \cdot [CO_2]_{\text{переб}} + 0,03 \cdot q_{\text{уд}}^2. \quad (4.2)$$

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии осуществлялась с помощью критерия Фишера F

$$s_{a\partial}^2 = s_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (y_j^3 - y_j^p)^2 = \frac{1,917}{20-5} = 0,128,$$

$$F = \frac{\max(s_{a\partial}^2, s_{\text{воспр}}^2)}{\min(s_{a\partial}^2, s_{\text{воспр}}^2)} = \frac{s_{\text{воспр}}^2}{s_{a\partial}^2} \approx \frac{0,17}{0,13} = 1,31.$$

Табличное значение критерия Фишера $F_{1-p} = 4,65$ при уровне значимости $p = 0,05$ и числах степеней свободы $f_1 = f_{a\partial} = N - l = 20 - 5 = 15$ и $f_2 = f_{\text{воспр}} = 5 \rightarrow F < F_{1-p}(f_1, f_2)$, полученное уравнение регрессии адекватно эксперименту.

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

Основной уровень, интервалы варьирования факторов, их значения в звездных точках, приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Основные уровни и интервалы варьирования факторов эксперимента по определению остаточного содержания углекислоты при скорости противотока 20 м/ч

Наименование показателей	Значения показателей по факторам		
	X_1 $[CO_2]_{\text{исх}}$, мг/дм ³	X_2 $q_{\text{уд}}$, м ³ /м ³	X_3 $N_{\text{пер}}$, 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

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 4.5, число опытов в матрице для трех факторов составило $N = 20$.

Таблица 4.5 – Матрица планирования ротатбельного плана второго порядка и результаты эксперимента по определению остаточного содержания углекислоты при скорости противотока 20 м/ч

№	X_1	X_2	X_3	x_1	x_2	x_3	$[CO_2]_{кон}$, мг/дм ³
1	1	1	1	170	12,0	3	68,0
2	-1	1	1	90	12,0	3	31,0
3	1	-1	1	170	4,0	3	93,0
4	-1	-1	1	90	4,0	3	45,0
5	1	1	-1	170	12,0	1	84,0
6	-1	1	-1	90	12,0	1	46,0
7	1	-1	-1	170	4,0	1	110,0
8	-1	-1	-1	90	4,0	1	60,0
9	-1,682	0	0	63	8,0	2	25,0
10	1,682	0	0	197	8,0	2	95,0
11	0	-1,682	0	130	1,3	2	95,0
12	0	1,682	0	160	14,7	2	61,0
13	0	0	-1,682	130	8,0	0	76,0
14	0	0	1,682	130	8,0	4	50,0
15	0	0	0	130	8,0	2	65,0
16	0	0	0	130	8,0	2	68,5
17	0	0	0	130	8,0	2	63,8
18	0	0	0	130	8,0	2	63,0
19	0	0	0	130	8,0	2	67,8
20	0	0	0	130	8,0	2	66,0

Среднее арифметическое шести экспериментальных точек центра плана $[CO_2]_{кон}(y)$: $y_1 = 65,0$ мг/дм³; $y_2 = 68,5$ мг/дм³; $y_3 = 63,8$ мг/дм³; $y_4 = 63,0$ мг/дм³; $y_5 = 67,8$ мг/дм³; $y_6 = 66,0$ мг/дм³ составило

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^6 y_i}{6} = \frac{\sum_{i=1}^6 65,0 + 68,5 + 63,8 + 63,0 + 67,8 + 66,0}{6} = \frac{394,1}{6} = 65,68 \text{ мг/дм}^3.$$

Значение дисперсии воспроизводимости при $f_{воспр} = n - 1 = 6 - 1 = 5$ равно

$$s_{воспр}^2 = \frac{\sum_{i=1}^6 (y_i - \bar{y})^2}{f_{воспр}} = \frac{\sum_{i=1}^6 (65,0 - 65,68)^2 + (68,5 - 65,68)^2 + (63,8 - 65,68)^2 + (63,0 - 65,68)^2 + (67,8 - 65,68)^2 + (66,0 - 65,68)^2}{5} = 4,746.$$

Коэффициенты уравнения регрессии второго порядка определены при помощи табличного редактора Microsoft Office «Excel». Дисперсии коэффициентов уравнения регрессии составили

$$s_{b_j}^2 = s_{b_1}^2 = s_{b_2}^2 = s_{b_3}^2 = a_3 \cdot s_y^2 = 0,0732 \cdot 4,746 = 0,347 \rightarrow s_{b_j} = 0,589,$$

$$s_{b_{uj}}^2 = s_{b_{12}}^2 = s_{b_{13}}^2 = s_{b_{23}}^2 = a_4 \cdot s_y^2 = 0,125 \cdot 4,746 = 0,593 \rightarrow s_{b_{uj}} = 0,77,$$

$$s_{b_{jj}}^2 = s_{b_{11}}^2 = s_{b_{22}}^2 = s_{b_{33}}^2 = (a_5 + a_6) \cdot s_y^2 = (0,0625 + 0,0069) \cdot 4,746 = 0,329 \rightarrow s_{b_{jj}} = 0,574,$$

$$s_{b_0}^2 = a_1 \cdot s_y^2 = 0,1663 \cdot 4,746 = 0,789 \rightarrow s_{b_0} = 0,888.$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии проверялась по критерию Стьюдента и представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Определение значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента для эксперимента по определению остаточного содержания углекислоты при скорости противотока 20 м/ч

Коэффициент уравнения регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента	Значимость коэффициента	Коэффициент уравнения регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента	Значимость коэффициента
b_0	$t_0 = \frac{ 65,591 }{0,888} = 73,86$	2,57	значимый	b_{13}	$t_{13} = \frac{ -0,375 }{0,770} = 0,49$	2,57	незначимый
b_1	$t_1 = \frac{ 21,282 }{0,589} = 36,13$	2,57	значимый	b_{23}	$t_{23} = \frac{ 0,125 }{0,770} = 0,16$	2,57	незначимый
b_2	$t_2 = \frac{ -9,969 }{0,589} = 16,93$	2,57	значимый	b_{11}	$t_{33} = \frac{ -1,976 }{0,574} = 3,44$	2,57	значимый
b_3	$t_3 = \frac{ -7,813 }{0,589} = 13,26$	2,57	значимый	b_{22}	$t_{22} = \frac{ 4,390 }{0,574} = 7,65$	2,57	значимый
b_{12}	$t_{12} = \frac{ -2,875 }{0,770} = 3,73$	2,57	значимый	b_{33}	$t_{33} = \frac{ -0,915 }{0,574} = 1,59$	2,57	незначимый

Окончательное уравнение регрессии в кодированном виде после отсева незначимых коэффициентов запишется

$$Y = 65,591 + 21,282X_1 - 9,969X_2 - 7,813X_3 - 1,976X_1^2 + 4,390X_2^2 - 2,875X_1X_2. \quad (4.3)$$

В натуральном масштабе уравнение регрессии примет вид

$$[CO_2]_{кон} = 9,9887 + 0,9969 \cdot [CO_2]_{исх} - 4,5460 \cdot q_{y\partial} - 7,8128 \cdot N_{пер} - 0,0012 \cdot [CO_2]_{исх}^2 + 0,2744 \cdot q_{y\partial}^2 - 0,0180 \cdot [CO_2]_{исх} \cdot q_{y\partial} \quad (4.4)$$

Отклонения экспериментальных и расчетных значений $[CO_2]_{кон}$, полученных по формуле (4.4), составили $\pm (0,05-4,90 \%)$.

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии осуществлялась с помощью критерия Фишера F

$$s_{ad}^2 = s_{ост}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (y_j^a - y_j^p) = \frac{47,225}{20-5} = 3,148,$$

$$F = \frac{\max(s_{ad}^2, s_{воспр}^2)}{\min(s_{ad}^2, s_{воспр}^2)} = \frac{s_{воспр}^2}{s_{ad}^2} \approx \frac{4,746}{3,148} = 1,51.$$

Табличное значение критерия Фишера $F_{1-p} = 4,65 \rightarrow F < F_{1-p}$, полученное уравнение регрессии адекватно эксперименту.

Попытка получить расчетную зависимость остаточного содержания углекислоты после дегазации, в зависимости от влияющих факторов $[CO_2]_{кон} = f([CO_2]_{исх}, q_{y\partial}, N_{пер}, V_{воды})$, не принесла результатов в связи с взаимозависимостью факторов [11]. Было решено построить расчетную номограмму (рисунок 4.9), позволившую объединить несколько переменных при отсутствии функциональной зависимости между ними. Для определения остаточного содержания углекислоты при различных скоростях противотока (более 20 м/ч) проводились дополнительные исследования.

Первое и второе поле номограммы построены на основе уравнения (4.4), имеющего общий вид $[CO_2]_{кон} = f([CO_2]_{исх}, q_{y\partial}, N_{пер})$ для $V_{воды} = 20$ м/ч, преобразованного в серию уравнений с двумя переменными $[CO_2]_{кон} = f(q_{y\partial}, N_{пер})$ для соответствующих значений $[CO_2]_{исх} = const$ (приложение Г, таблица Г.1). Кривые первого поля номограммы получены путем последовательной подстановки значений $q_{y\partial}$ в серию уравнений с двумя переменными (приложение Г, таблица Г.2).

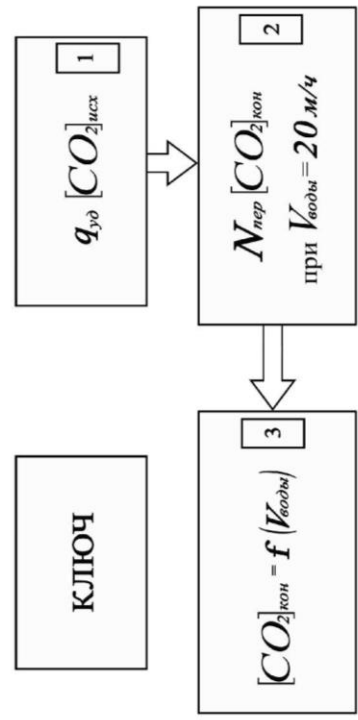
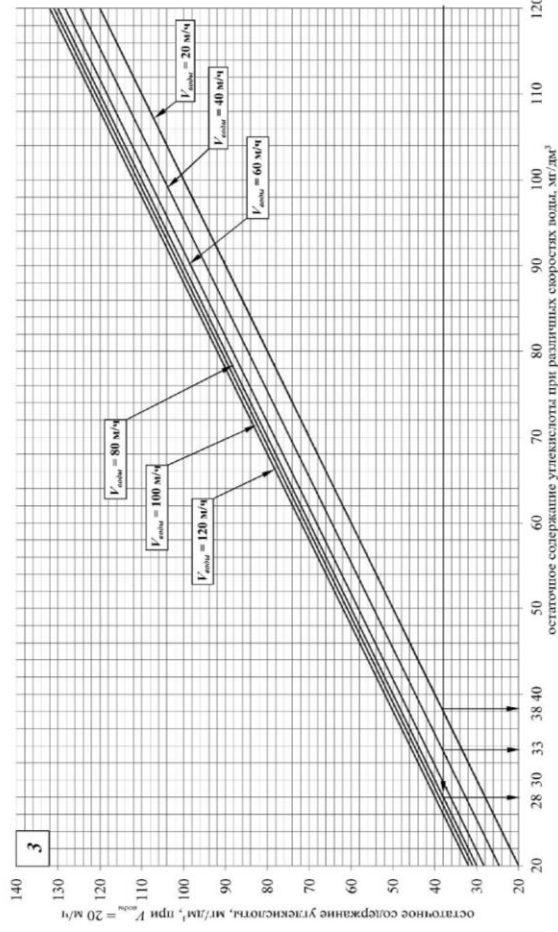
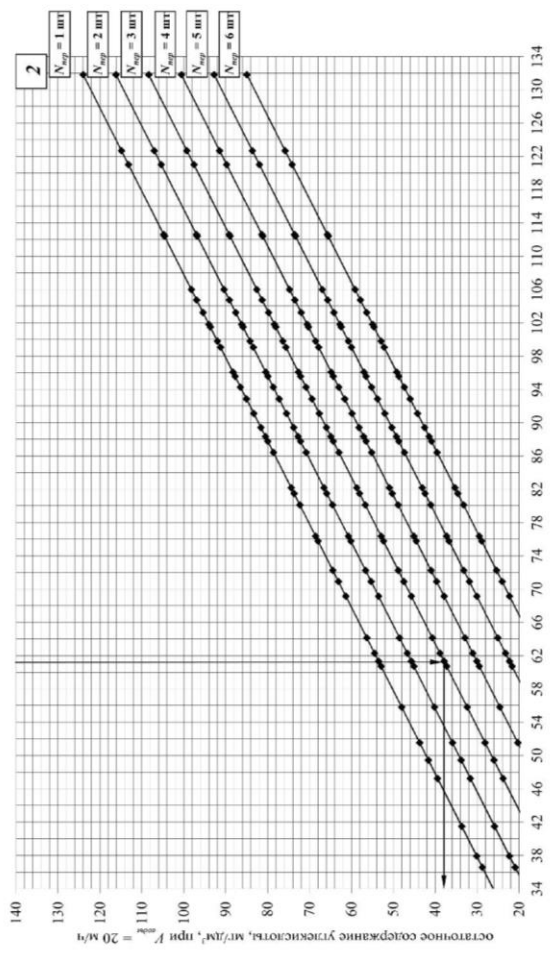
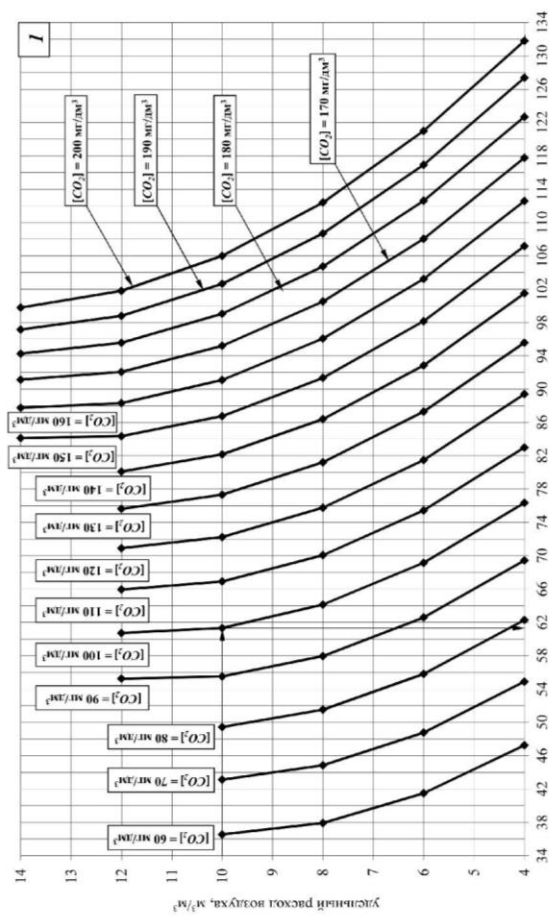


Рисунок 4.9 – Номограмма для определения остаточного содержания углекислоты для перегородчатого дегазатора барботажного типа

Значения расчетных точек без учета значения выражения $(-7,81 \cdot N_{пер})$ являются промежуточными, они не дают окончательного значения $[CO_2]_{кон}$. Первое поле номограммы позволяет определить интервал значений удельного расхода воздуха $q_{уд}$ для различных исходных концентраций $[CO_2]_{исх}$. Прямые второго поля номограммы построены по расчетным значениям $[CO_2]_{кон}$, которые определены путем последовательной подстановки значений $N_{пер}$ в уравнения (приложение Г, таблица Г.3).

Изменения конечного содержания углекислоты при различных скоростях противотока определялись на основании экспериментальных данных (частично приведенных в Приложении Б), после их обработки в редакторе Microsoft Office «Excel» получены прямые третьего поля номограммы.

Номограмма, построенная для перегородчатого дегазатора, позволяет определить остаточное содержание углекислоты при любых значениях переменных.

4.3 Алгоритм расчета перегородчатого дегазатора

Алгоритм расчета перегородчатого дегазатора рассматривался на примере станции обезжелезивания ОАО «Птицефабрика «Боровская», расположенной в поселке Боровский Тюменского района Тюменской области.

Для расчета перегородчатого дегазатора исходными данными являются: производительность станции обезжелезивания $Q = 6790 \text{ м}^3/\text{сут} = 282,9 \text{ м}^3/\text{ч}$, исходное содержание углекислоты в подземной воде $[CO_2]_{исх} = 110 \text{ мг/дм}^3$, требуемое конечное содержание углекислоты после обработки $[CO_2]_{треб} = 30 \text{ мг/дм}^3$.

Алгоритм расчета включает пять этапов последовательных действий:

1. *Выявляется оптимальное количество перегородок и минимальное значение удельного расхода воздуха.* По формуле (4.2) определяются значения $N_{треб}$ при различных показателях удельного расхода воздуха $q_{уд}$ при постоянных значениях $[CO_2]_{треб} = 30 \text{ мг/дм}^3$ и $[CO_2]_{исх} = 110 \text{ мг/дм}^3$. По полученным данным построена

лепестковая диаграмма (рисунок 4.10) в табличном редакторе Microsoft Office «Excel», позволяющая установить требуемое количество перегородок $N_{\text{треб}} = 4$ шт., значение удельного расхода воздуха – не менее $q_{\text{уд}} \geq 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

2. *Определяется конечное содержание углекислоты на выходе из дегазатора при скорости противотока $V_{\text{воды}} = 20,0 \text{ м/ч}$. Согласно формуле (4.4) рассчитывается $[CO_2]_{\text{кон}}$ по принятым значениям $[CO_2]_{\text{исх}} = 110 \text{ мг/дм}^3$, $N_{\text{пер}} = 4$ шт, $q_{\text{уд}} = 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$.*

$$[CO_2]_{\text{кон}} = 9,99 + 0,997 \cdot [CO_2]_{\text{исх}} - 4,55 \cdot q_{\text{уд}} - 7,81 \cdot N_{\text{пер}} - 0,001 \cdot [CO_2]_{\text{исх}}^2 + 0,27 \cdot q_{\text{уд}}^2 - 0,018 \cdot [CO_2]_{\text{исх}} \cdot q_{\text{уд}} =$$

$$= 9,99 + 0,997 \cdot 110 - 4,55 \cdot 10 - 7,81 \cdot 4 - 0,001 \cdot (110)^2 + 0,27 \cdot 10^2 - 0,018 \cdot 110 \cdot 10 = 38,02 \text{ мг/дм}^3.$$

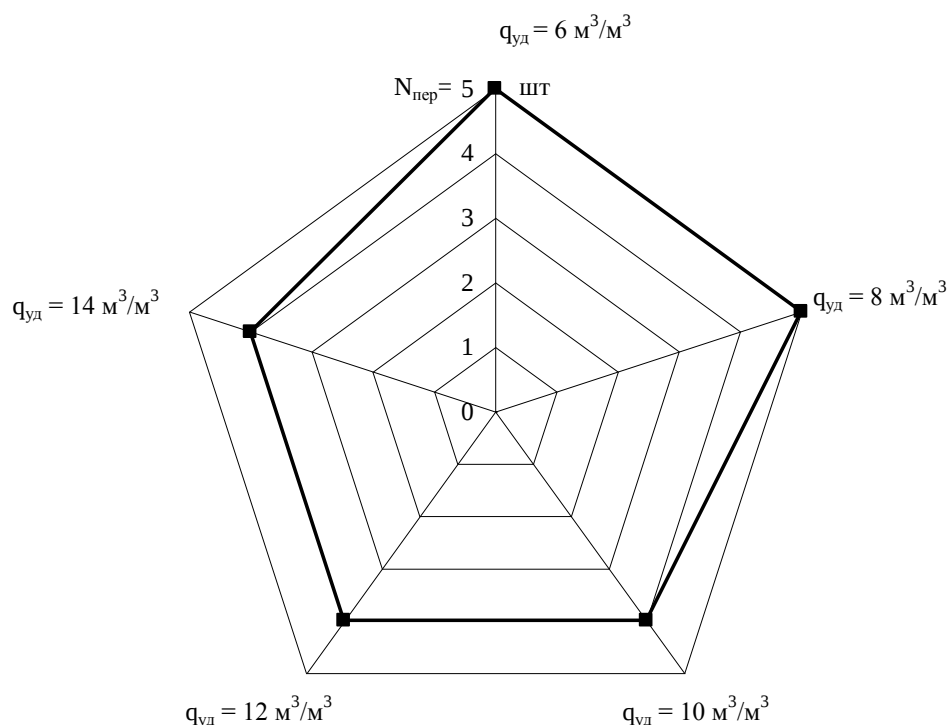


Рисунок 4.10 – Диаграмма для определения количества перегородок при различных удельных расходах воздуха $q_{\text{уд}}$ ($[CO_2]_{\text{исх}} = 110 \text{ мг/дм}^3$ и требуемой $[CO_2]_{\text{треб}} = 30 \text{ мг/дм}^3$)

3. *Назначается рабочая скорость противотока воды в дегазаторе для достижения требуемого $[CO_2]_{\text{треб}}$. Расчетное значение $[CO_2]_{\text{кон}} = 38 \text{ мг/дм}^3$ при скорости $V_{\text{воды}} = 20,0 \text{ м/ч}$ является базовым при использовании рисунка 4.11: от числа 38 по оси ординат проводится горизонтальная прямая до пересечения с линиями, построенными для различных скоростей противотока воды, от точек пересечения проводятся перпендикуляры к оси абсцисс с определением значений $[CO_2]_{\text{кон}}$ для соответствующих скоростей.*

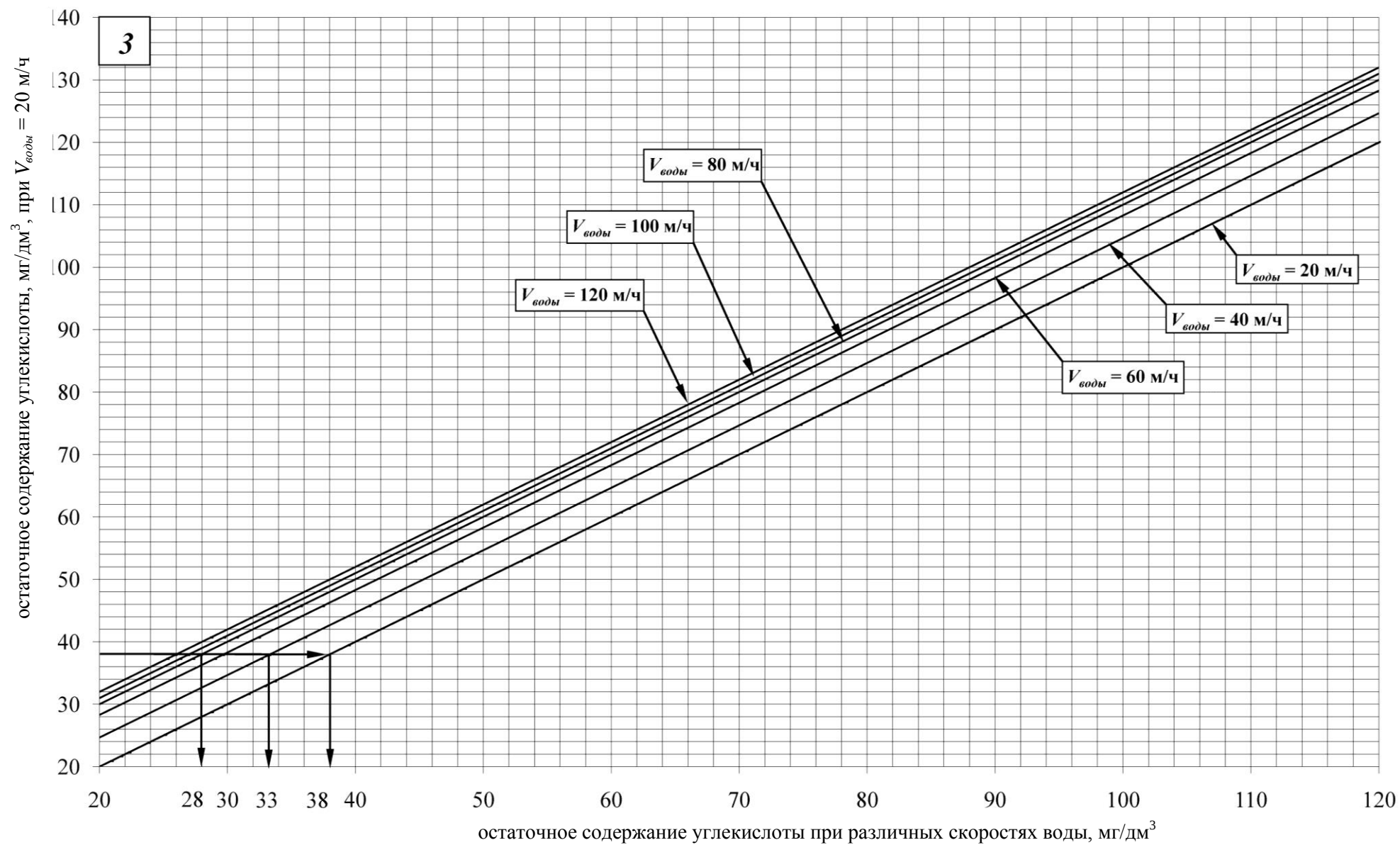


Рисунок 4.11 – Диаграмма определения $[CO_2]_{\text{кон}}$ в зависимости от скорости противотока $V_{\text{воды}}$

В рассматриваемом примере назначена скорость противотока $V_{\text{воды}} = 80,0$ м/ч, при этом конечное содержание углекислоты составит $[CO_2]_{\text{кон}} = 28,0$ мг/дм³.

4. Рассчитывается высота дегазатора и его размеры в плане.

4.1 Высота дегазатора H_0 определяется по формуле

$$H_0 = H_{\text{воды}} + H_{\text{возд}} + H_{\text{расш}} + H_{\text{стр}}, \quad (4.5)$$

где $H_{\text{воды}}$ – высота слоя обрабатываемой воды, м, которая определяется исходя из требуемого количества перегородок по формуле

$$H_{\text{воды}} = (N_{\text{пер}} + 1) \cdot 0,4 \quad (4.6)$$

0,4 – оптимальное расстояние между перегородками, м, выявленное в результате исследований;

$H_{\text{возд}}$ – высота, необходимая для устройства системы распределения воздуха (трубчатая система с отверстиями $d_{\text{отв}} = 5$ мм) и отвода воды (рисунок 4.12), определяется конструктивно по диаметрам трубопроводов. Диаметр трубопровода подачи воздуха рассчитывается по скорости 10–15 м/с., диаметр отверстий 15–20 м/с;

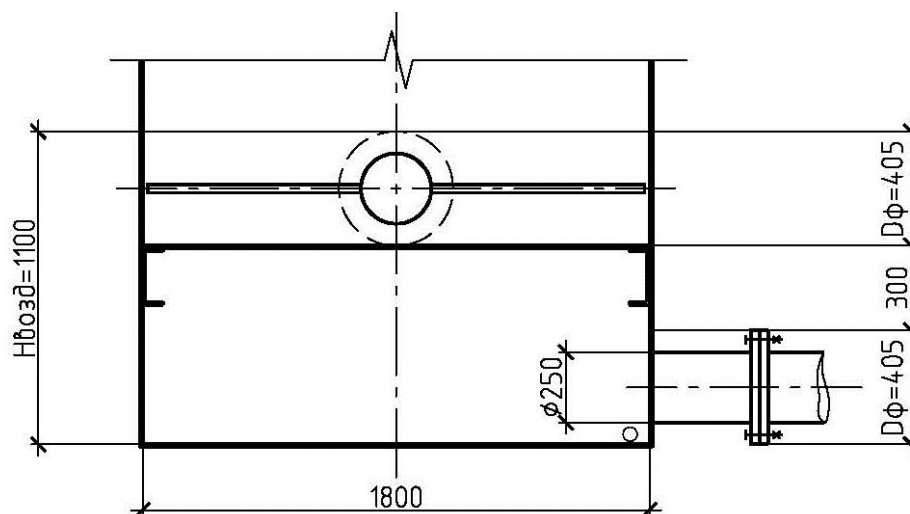


Рисунок 4.12 – Определение высоты $H_{\text{возд}}$ в перегородчатом дегазаторе

$H_{\text{стр}}$ – строительная высота; м, $H_{\text{стр}} = 0,5$ м;

$H_{\text{расш}}$ – высота расширения столба воды при продувке воздухом, м, определяется по формулам или ориентировочно равным (0,3–0,6) $H_{\text{воды}}$, в рассматриваемом примере $H_{\text{расш}} = 0,5 \cdot H_{\text{воды}} = 0,5 \cdot 2,0 = 1,0$ м.

Для точного расчета высоты расширения (динамического слоя) $H_{расш}$ рекомендуется использовать зависимость [96]

$$H_{расш} = \frac{H_{воды}}{1 - \varphi}, \quad (4.7)$$

φ – среднее газосодержание по объему дегазатора, для условий барботажа ($Fr < 1$) определяется по формуле [3]

$$\varphi_0 = 0,97 \cdot Fr^{0,11} \cdot e^{-0,097 \cdot Fr}, \quad (4.8)$$

φ_0 – газосодержание барботажного слоя для непроточной системы;

Fr – число Фруда, характеризует влияние сил тяжести

$$Fr = \frac{v_{возд}^2}{g \cdot H_{воды}}, \quad (4.9)$$

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

$v_{возд}$ – скорость воздуха в дегазаторе, м/с.

Газосодержание для системы с противоточным движением жидкости составит [82]

$$\varphi = (1 + 0,04 \cdot v_{воды}) \cdot \varphi_0, \quad (4.10)$$

где $v_{воды}$ – скорость воды в дегазаторе, см/с.

Высота дегазатора равна $H_d = (4+1) \cdot 0,4 + 1,10 + 1,0 + 0,5 = 4,61 \text{ м}$.

4.2 Площадь живого сечения дегазатора для рассматриваемого примера составит $\omega = \frac{Q}{v} = \frac{282,9}{80} = 3,54 \text{ м}^2$, размеры прямоугольного дегазатора в плане равны $1,8 \times 2,0 \text{ м}$, круглого – $D = 2,2 \text{ м}$.

5. *Определяется расход воздуха $Q_{возд}$, подаваемого в дегазатор и подбирается воздухоподувное оборудование.* Расход воздуха рассчитывается по формуле

$$Q_{возд} = q_{y\partial} \cdot Q. \quad (4.11)$$

По найденному значению $Q_{возд} = q_{y\partial} \cdot Q = 10 \cdot 282,9 = 2829,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ принята воздухоподушка ТВ-42-1,4 (1 рабочая, 1 резервная) производительностью $3600 \text{ м}^3/\text{ч}$, $N_{yct} = 55 \text{ кВт}$, $m = 3650 \text{ кг}$ ТУ 26-12-741-86.

Конструкция перегородчатого дегазатора барботажного типа для рассматриваемого примера представлена на рисунках 4.13, 4.14.

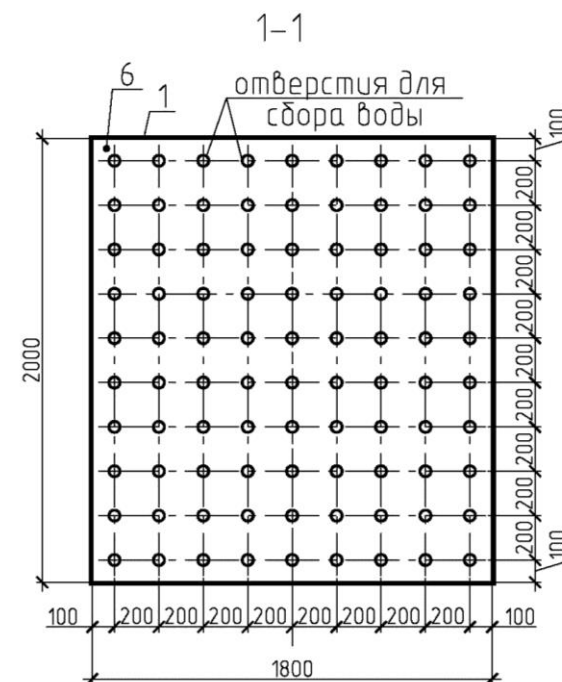
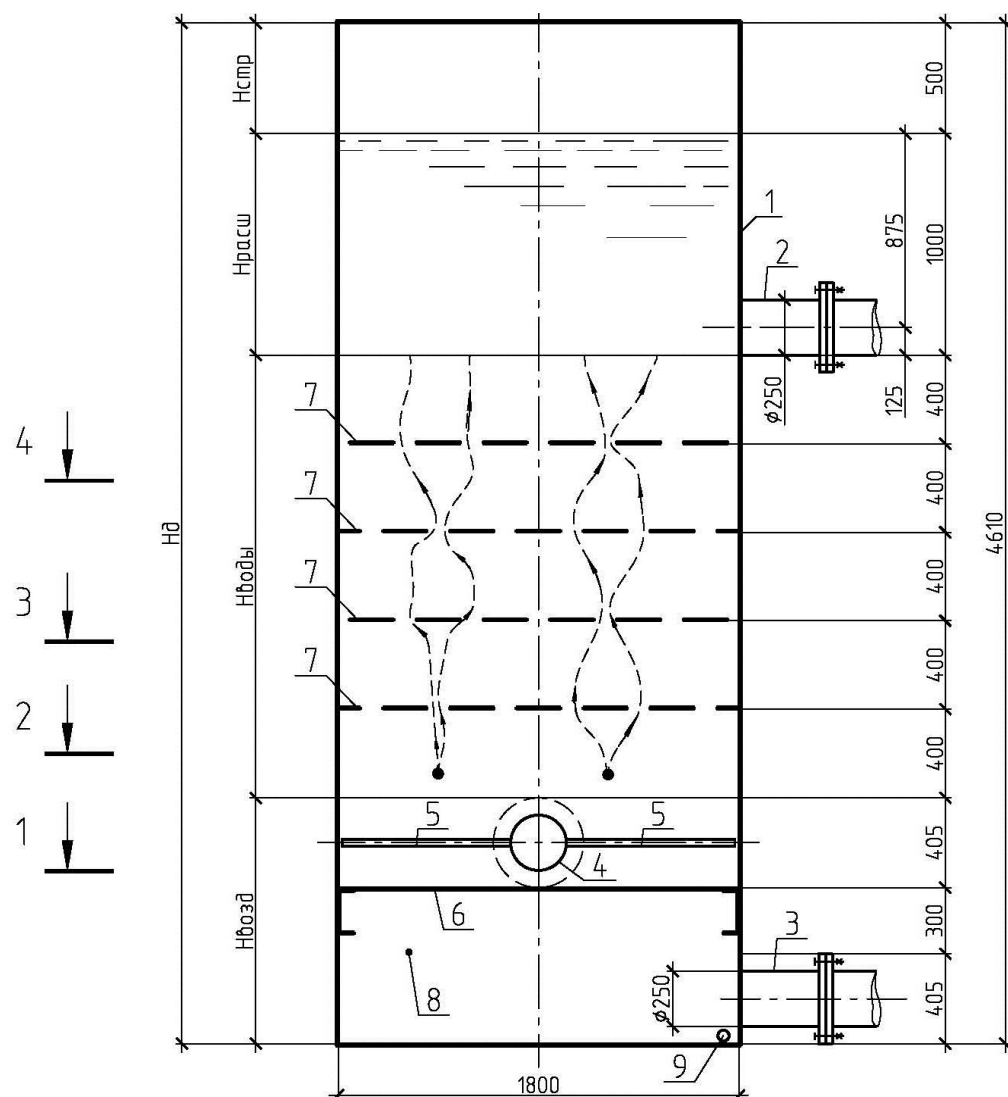


Рисунок 4.13 – Перегородчатый дегазатор барботажного типа. Разрез 1-1:

1 – корпус; 2 – подводящий трубопровод воды; 3 – отводящий трубопровод дегазированной воды; 4 – коллектор воздухоподачи; 5 – воздухораспределительные трубы с отверстиями; 6 – дырчатое днище для равномерного отвода воды; 7 – ряды горизонтальных перегородок с проходами в шахматном порядке; 8 – поддонное пространство; 9 – полное опорожнение

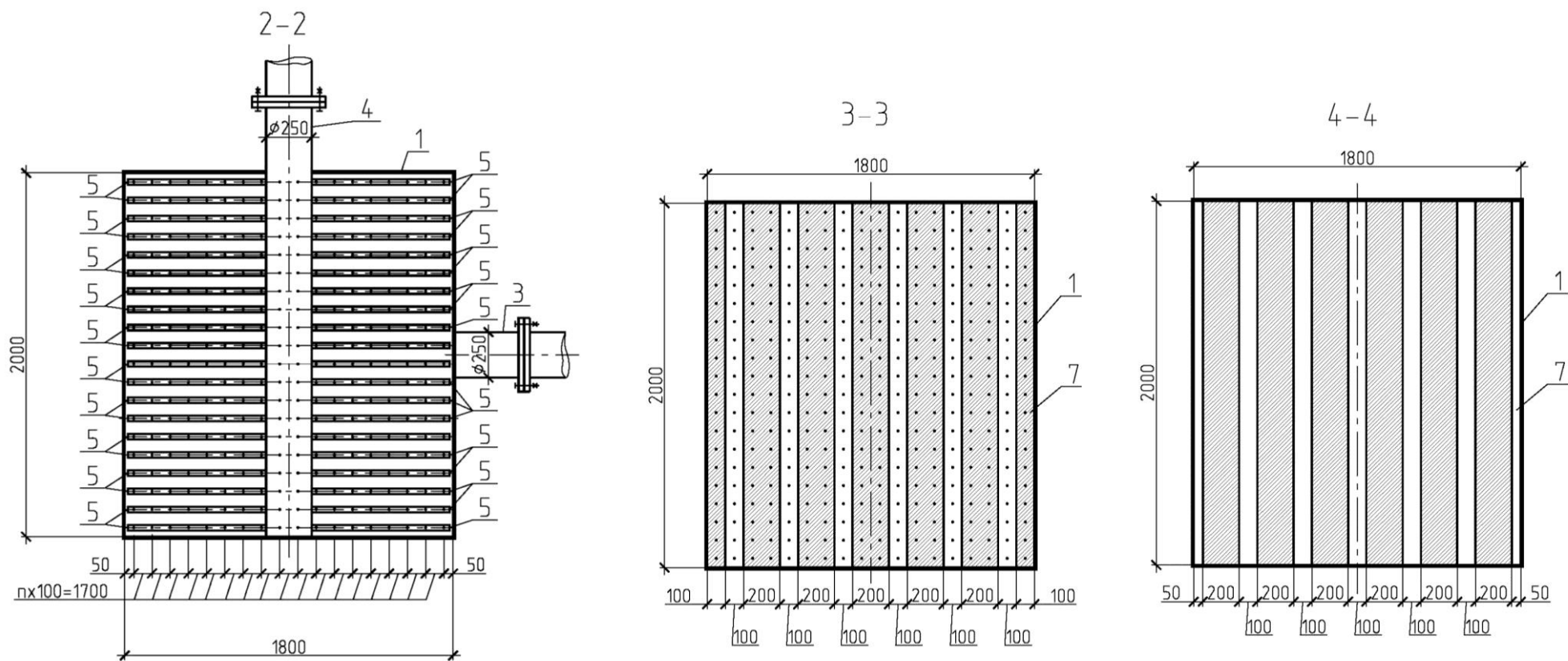


Рисунок 4.14 – Перегородчатый дегазатор барботажного типа. Разрезы 2-2, 3-3, 4-4

Общие рекомендации по применению и расчету барботажного дегазатора (в свободном объеме) с дырчатыми распределителями воздуха и перегородчатого даны в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Рекомендации по применению и расчету дегазаторов барботажного типа

Основные рабочие параметры и зависимости	Тип барботажного дегазатора	
	Барботаж в свободном объеме	Перегородчатый
Исходное содержание $[CO_2]_{исх}$ в подземной воде, мг/дм ³	до 100	до 200
Максимальная эффективность удаления углекислоты, %	до 60	до 80
Удельный расход воздуха, м ³ /м ³	4–12	4–14
Рекомендуемый тип распределителей воздуха	дырчатый распределитель воздуха ($d = 3–6$ мм)	дырчатый распределитель воздуха ($d = 5–6$ мм)
Расстояние между отверстиями дырчатых распределителей	0,1 м	0,1 м
Скорость движения воды, м/ч	до 40	20–120
Высота слоя воды в дегазаторе, м	до 2,0 м	зависит от количества перегородок
Особые параметры	-	количество перегородок – 1–6 штук
Расчетные зависимости	формула (3.12)	формулы (4.2) и (4.4)

Выводы

1. Предложенная конструкция перегородчатого дегазатора барботажного типа интенсифицирует процесс десорбции углекислоты за счёт увеличения массопереноса при турбулизации потока и повышения *КПД* использования воздуха. Рост эффективности зафиксирован при повышенных скоростях противотока с увеличением количества перегородок, что в свою очередь позволяет уменьшить расходы подаваемого в сооружение воздуха для достижения требуемых эффектов удаления углекислоты. Максимальная эффективность газоудаления на перегородчатом дегазаторе составляет 70–80 %.

2. В результате математической обработки экспериментальных данных с использованием ротатбельного плана второго порядка получены уравнения регрессии, определяющие требуемое количество перегородок в перегородчатом дегазаторе и конечное содержание углекислоты на выходе из дегазатора при скоро-

сти противотока равной 20 м/ч, отклонения расчетных значений от экспериментальных данных не превысили $\pm 10\%$.

3. Разработан алгоритм расчета для проектирования перегородчатого дегазатора. В связи со значимостью взаимного влияния технологических параметров, которые не вошли в одну функциональную зависимость, была построена расчетная номограмма, позволяющая определить остаточное содержание углекислоты на выходе из сооружения при разных скоростях противотока от 20 до 120 м/ч.

4. Перегородчатый дегазатор применяется для исходных концентраций углекислоты в воде до 200 мг/дм^3 , при этом рекомендуется диаметр отверстий дырчатых распределителей воздуха 5–6 мм, удельный расход воздуха $4\text{--}14 \text{ м}^3/\text{м}^3$, количество перегородок 1–6 рядов, расстояние между ними 0,4 м, скорость движения воды 20–120 м/ч.

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕГОРОДЧАТОГО ДЕГАЗАТОРА

5.1 Опыт внедрения перегородчатого дегазатора при реконструкции станции обезжелезивания ВОС-8000 пгт. Пойковский

Опыт эксплуатации станции обезжелезивания ВОС-8000 пгт. Пойковский Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа, работающей в режиме водовоздушного фильтрования, показал, что качество обработанной воды не соответствует требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода»: содержание железа более $0,3 \text{ мг/дм}^3$, углекислоты $40\text{--}45 \text{ мг/дм}^3$. В результате коррозионных процессов в водопроводной сети содержание железа у потребителей было на $0,2\text{--}0,4 \text{ мг/дм}^3$ больше, чем на выходе из станции. Для улучшения показателей воды после водоочистки была проведена реконструкция станции [60].

В процессе реконструкции были проведены исследования по снижению содержания углекислоты и метана пропуском воды через градирню и заменена загрузка фильтра на фракции диаметром $1,2\text{--}2,0 \text{ мм}$. Проведенные мероприятия дали положительные результаты по удалению углекислоты (эффект составил $40\text{--}47 \%$) и снижению содержания железа до $0,12\text{--}0,32 \text{ мг/дм}^3$. Для перевода всей станции в режим работы с градирнями требовалось дополнительное устройство пяти градирен, что привело бы к капитальной реконструкции строительных элементов блочной станции.

Во избежание дополнительных затрат на строительство было предложено удалять газы и насыщать воду кислородом на барботажном дегазаторе с горизонтальными перегородками (рисунок 5.1). Рекомендациям предшествовали исследования в производственных условиях станции обезжелезивания ФБУ Центра реабилитации «Тараскуль» на экспериментальной установке.

В ходе исследований внимание акцентировалось на увеличении скоростей противотока с целью использования существующего оборудования – воздуходу-

вок, рассчитанных на четырехкратное водовоздушное соотношение. Для обработки всего объема воды потребовались два барботажных дегазатора с горизонтальными перегородками.

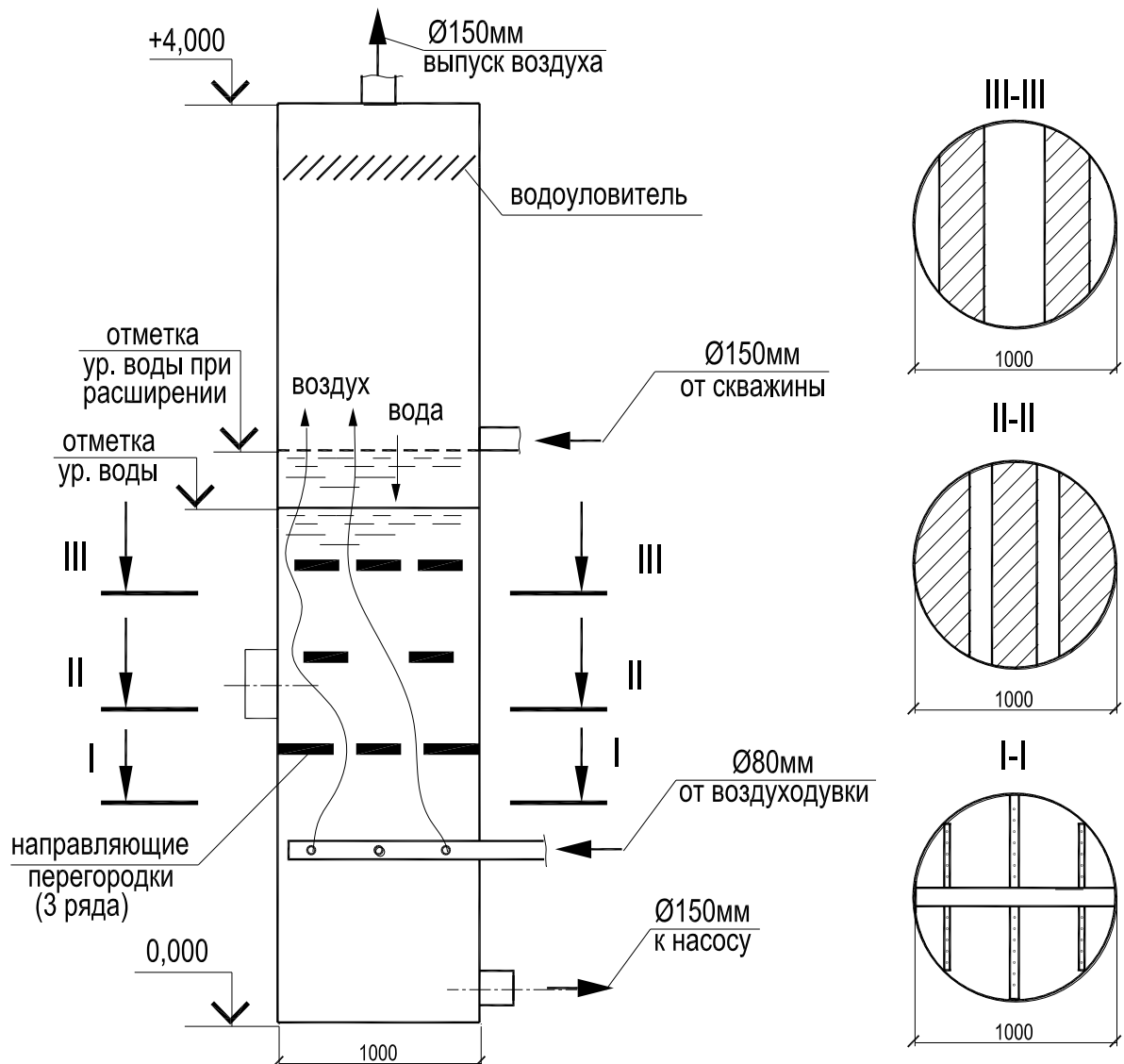


Рисунок 5.1 – Барботажный дегазатор с горизонтальными перегородками станции обезжелезивания ВОС-8000 пгт. Пойковский

Экспериментальные исследования предложенной конструкции дегазатора в реальных условиях показали, что желаемый эффект удаления углекислоты (40–50 %) достигается при водовоздушном соотношении равном 1:4 и скорости противотока воды 150–160 м/ч.

При реконструкции станции обезжелезивания удаление газовых составляющих подземной воды (углекислота и метан) осуществлялось перед фильтрами

обезжелезивания на дегазаторах с тремя рядами горизонтальных перегородок диаметром 1,0 м.

По результатам исследований конструкция перегородчатого дегазатора барботажного типа внедрена в производство на ВОС-8000 пгт. Пойковский ХМАО, акт внедрения представлен в Приложении Д.

5.2 Оценка экономической эффективности

Для оценки экономической эффективности перегородчатого дегазатора было проведено технико-экономическое сравнение четырех вариантов блока дегазации технологической схемы очистки воды со следующими сооружениями: пленочным дегазатором с загрузкой из колец Рашига (рисунок 5.2), гравийным дегазатором барботажного типа (рисунок 5.3), барботажным дегазатором в свободном объеме (рисунок 5.4), перегородчатым дегазатором барботажного типа (рисунок 5.5).

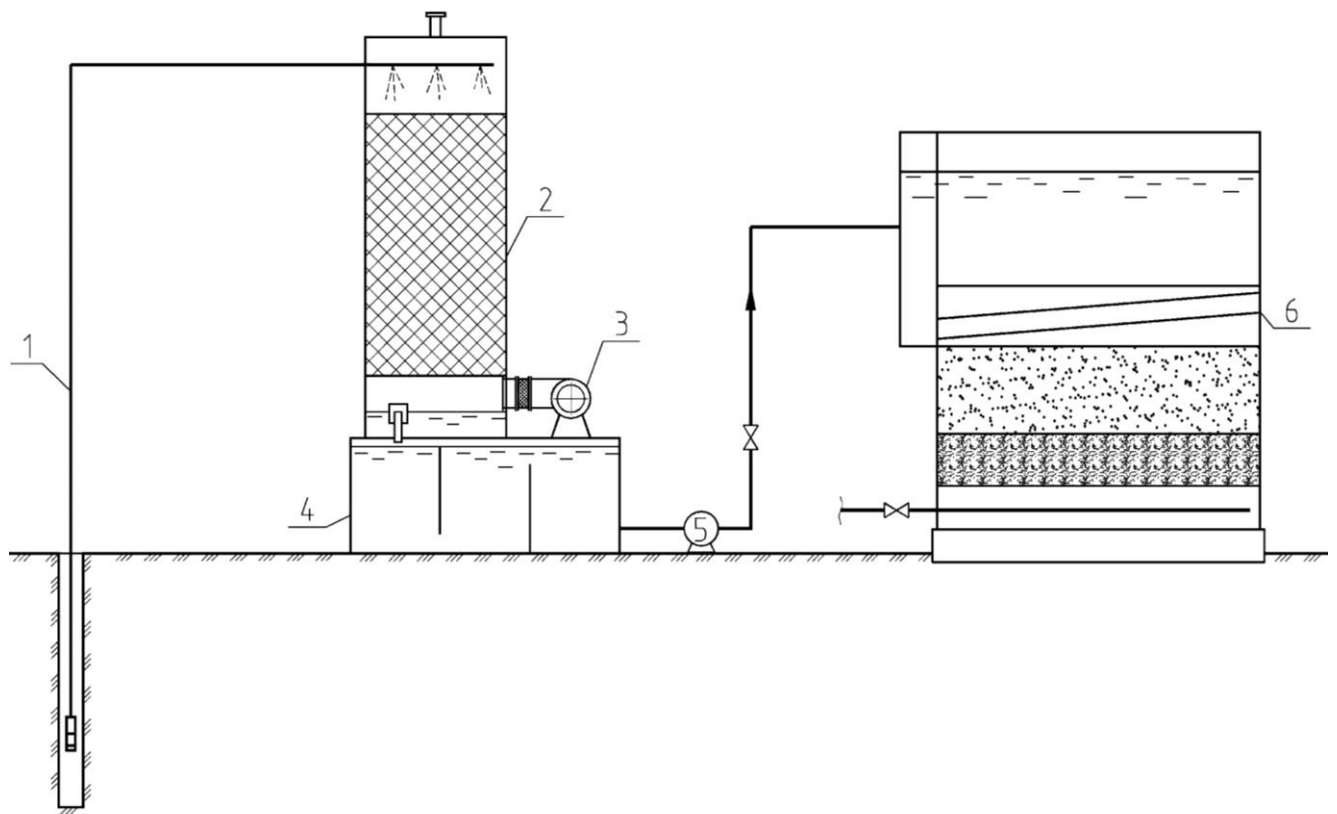


Рисунок 5.2 – Технологическая схема с пленочным дегазатором:

1 – подача исходной воды из скважины; 2 – пленочный дегазатор с загрузкой из колец Рашига; 3 – вентилятор; 4 – контактный резервуар; 5 – насос; 6 – скорый фильтр

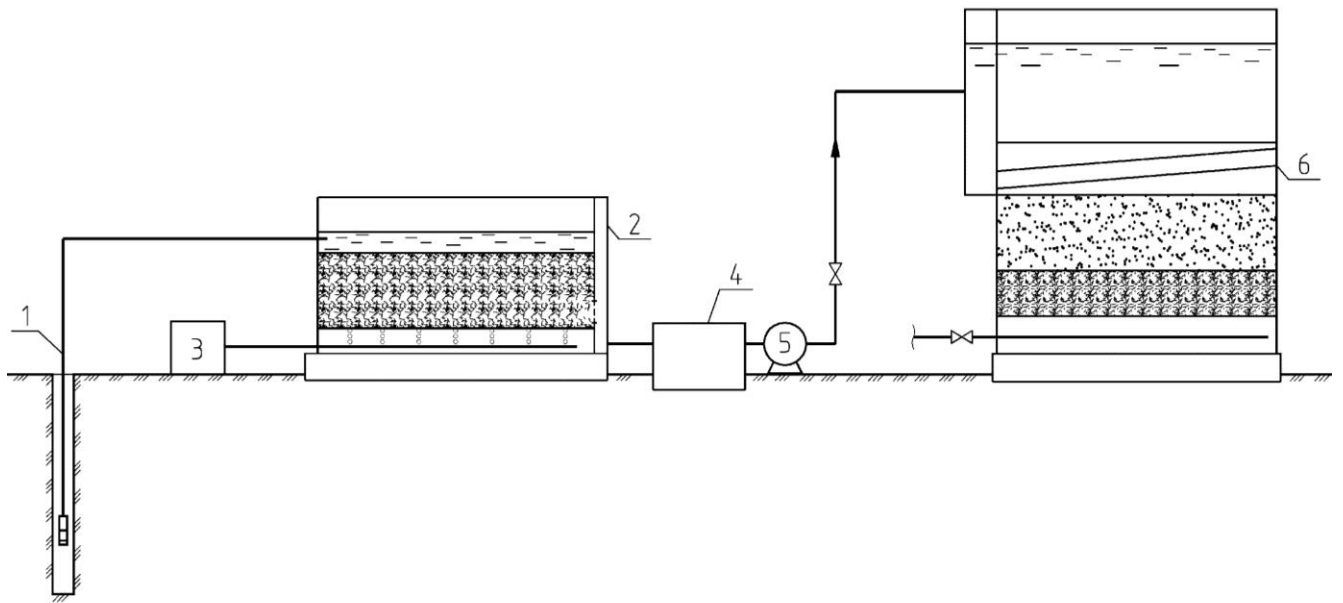


Рисунок 5.3 – Технологическая схема с гравийным дегазатором барботажного типа:
 1 – подача исходной воды из скважины; 2 – гравийный дегазатор; 3 – турбокомпрессор;
 4 – промежуточный бак; 5 – насос; 6 – скорый фильтр

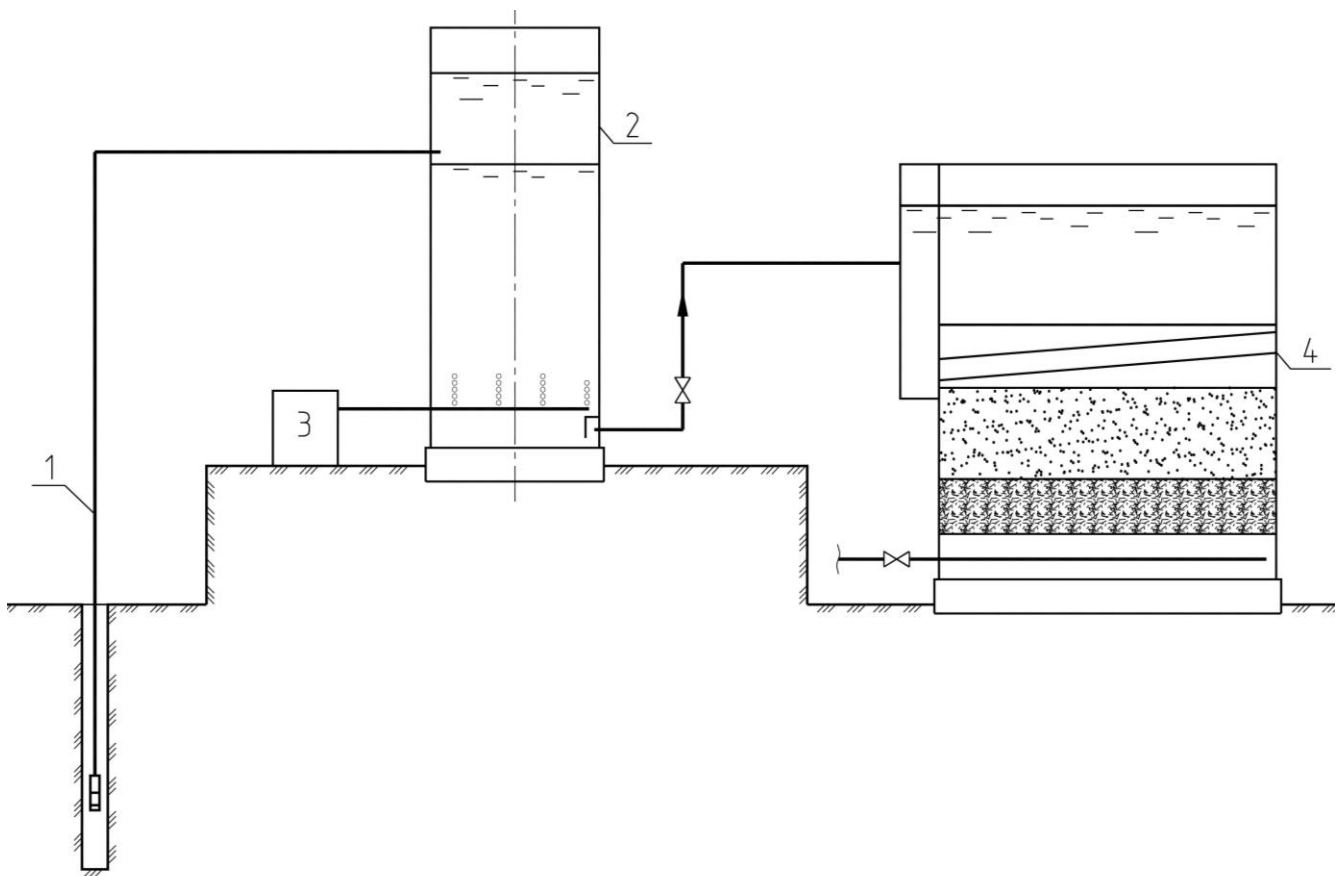


Рисунок 5.4 – Технологическая схема с барботажным дегазатором в свободном объеме:
 1 – подача исходной воды из скважины; 2 – барботажный дегазатор;
 3 – турбокомпрессор; 4 – скорый фильтр

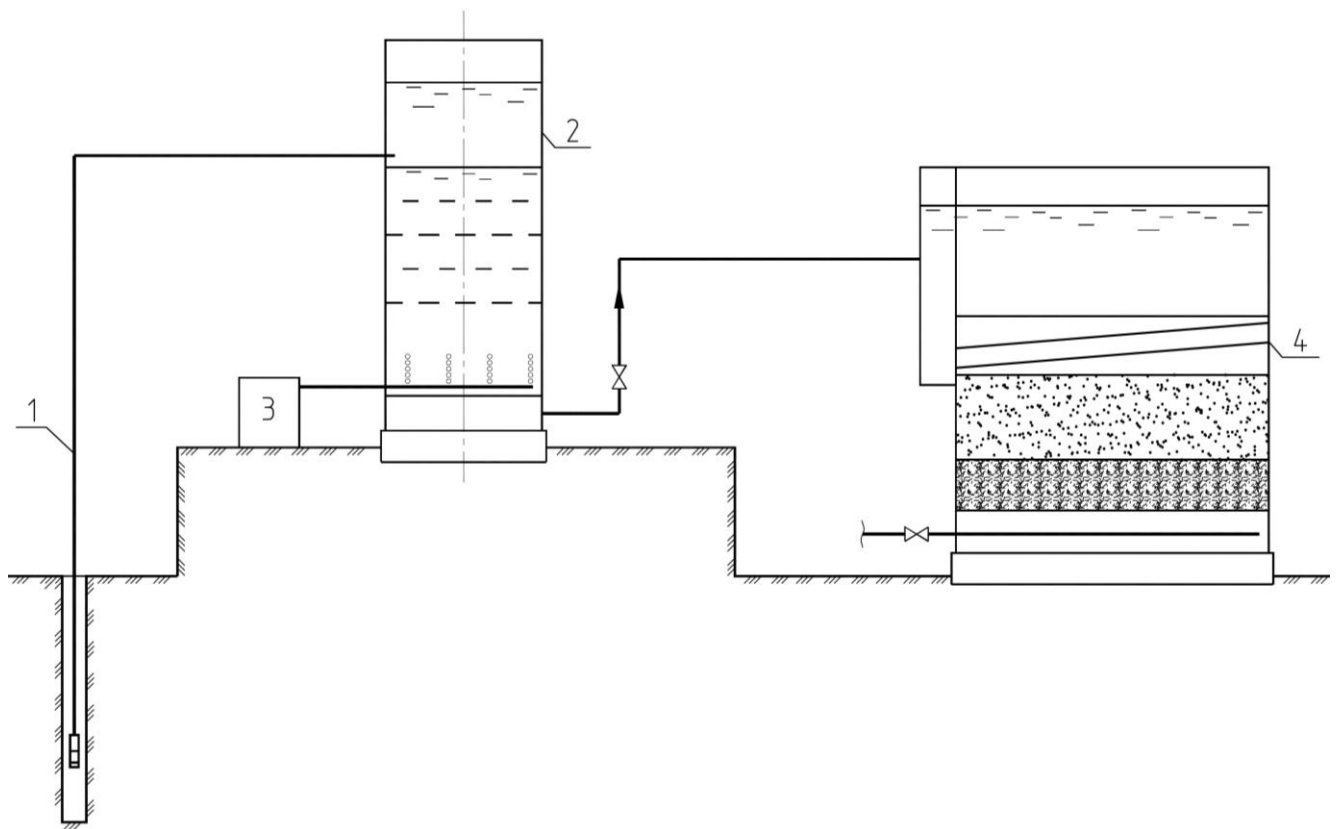


Рисунок 5.5 – Технологическая схема с перегородчатым дегазатором:
 1 – подача исходной воды из скважины; 2 – перегородчатый дегазатор;
 3 – турбокомпрессор; 4 – скорый фильтр

Расчет параметров каждого рассматриваемого дегазатора производился для станции обезжелезивания ОАО «Птицефабрика «Боровская», расположенной в поселке Боровский Тюменского района Тюменской области: производительность станции обезжелезивания $Q = 6790,0 \text{ м}^3/\text{сут} = 282,9 \text{ м}^3/\text{ч}$, содержание углекислоты в исходной воде $[CO_2]_{\text{исх}} = 110 \text{ мг/дм}^3$, требуемое конечное содержание углекислоты в воде после дегазатора $[CO_2]_{\text{треб}} = 30 \text{ мг/дм}^3$.

Расчет параметров дегазации и размеров сооружений для барботажа в свободном объеме и перегородчатого дегазатора осуществлялся на основе проведенных исследований (глава 3, 4). Параметры для пленочного дегазатора с загрузкой из колец Рашига и для барботажного дегазатора с гравийной загрузкой приняты согласно опубликованным данным [149]. Сравнительные данные по параметрам дегазации и размерам сооружений представлены в таблице 5.1, конструктивные особенности дегазаторов – в таблице 5.2, параметры электрооборудования – в таблице 5.3, особенности распределительной воздушной системы дегазаторов – в таблице 5.4.

Таблица 5.1 – Сравнительные характеристики параметров дегазации и размеров дегазаторов

Наименование дегазатора	Исходные данные	Конечное содержание, $[CO_2]_{кон}$, мг/дм ³	Удельный расход воздуха, м ³ /м ³	Скорость движения воды, м/ч	Габаритные размеры			Особенность конструкции	Высота производственного здания, м
					высота, м	$B \times L$	диаметр		
Перегородчатый дегазатор барботажного типа	$[CO_2]_{исх} = 110$ мг/дм ³ , Производительность $Q = 6790 \text{ м}^3/\text{сут} = 282,9 \text{ м}^3/\text{ч}$	28,0	10,0	80	4,61	1,8x2,0	2,20	перегородки поперечные	6,0
Гравийный дегазатор барботажного типа		30,2	6,0	5	2,50	5,3x6,0	—	гравийная загрузка	6,0
Пленочный дегазатор с загрузкой из колец Рашига		30,2	25,0	57	5,40	2,0x2,5	2,52	загрузка из колец Рашига 25x25x3	8,4
Барботажный дегазатор в свободном объеме		45,0	12,0	40	4,61	2,7x2,7	3,00	—	6,0

Таблица 5.2 – Сравнительные характеристики конструктивных особенностей дегазаторов

Наименование дегазатора	Габаритные размеры			Характерный элемент конструкции	Требуемый объем характерных элементов, м ³	Строительный объем сооружения, м ³	Наличие дополнительных емкостей, м ³	Металлоемкость, кг (т)		
	высота, м	<i>B</i> x <i>L</i>	диаметр					основного сооружения	дополнительных емкостей	итого
Перегородчатый дегазатор барботажного типа	4,61	1,80x2,00	2,20	перегородки поперечные	включен в металлоемкость конструкции	17,53	—	3361 (3,36) в том числе: колонна - 2760; перегородки поперечные - 601	—	3361 (3,36)
Гравийный дегазатор барботажного типа	2,50	5,30x6,00	—	гравийная загрузка (щебень) $d_{\phi p} = 7,5$ мм	33,71	79,50	промежуточный бак размерами 2,0x2,4x2,0 м, объемом 9,6 м ³ (2-мин. хранение)	8090 (8,09)	1396 (1,40)	9486 (9,49)
Пленочный дегазатор с загрузкой из колец Рашига	5,40	2,00x2,50	2,52	загрузка из колец Рашига 25x25x3	19,94	27,00	промежуточный бак размерами 6,8x7,0x2,0 м, объемом 70,7 м ³ (15-мин. хранение)	4301 (4,30)	10656 (10,66)	14957 (14,96)
Барботажный дегазатор в свободном объеме	4,61	2,70x2,70	3,00	—	—	35,50	—	4197 (4,20)	—	4197 (4,20)

Примечание: плотность стали принята 7800 кг/м³; стоимость патрубков и распределительных трубопроводов не учтена

Таблица 5.3 – Сравнительные характеристики параметров электрооборудования для различных дегазаторов

Наименование дегазатора	Требуемое оборудование			Электрооборудование									Стоимость, руб.	Стоимость, итого
	Наименование	Q, м³/ч	H, м.в.с	Наименование оборудования и технические характеристики		Характеристики электродвигателя			Марка, тип оборудования	Завод-изготовитель	Масса оборудования, кг			
				Q, м³/ч	H, м.в.с	Тип ЭД	n, об/мин	N, кВт						
Перегородчатый дегазатор барботажного типа	Турбокомпрессор воздушный	1697,4	4	Турбокомпрессор воздушный марки «ТВ»	4AM22 5M2Y3	—	55,0	ТВ-42-1,4	ООО «КОМПРЕССОР САС», Рязанский компрессорный завод ООО «САС» г.Рязань	3650	750000 руб.	750000 руб.		
				3600									14	
Гравийный дегазатор барботажного типа	Турбокомпрессор воздушный	1697,4	4	Турбокомпрессор воздушный марки «ТВ»	4AM22 5M2Y3	—	55,0	ТВ-42-1,4	ООО «КОМПРЕССОР САС», Рязанский компрессорный завод ООО «САС» г.Рязань	3650	750000 руб.	822600 руб.		
				3600									14	
	Насос	282,9	12,5-16,0	Насос центробежный горизонтальный консольный типа «К»	АИР18 0S4	1450	22,0	К 200-150-250а	ЗАО «Катайский насосный завод», г.Курган	440	72600 руб.			
				290							17		Дилер Компания «Энергоснабкомплект», г.Тюмень	

Продолжение Таблицы 5.3

Наименование дегазатора	Требуемое оборудование			Электрооборудование								Стоимость, руб.	Стоимость, итого
	Наименование	Q, м³/ч	H, м.в.с	Наименование оборудования и технические хар-ки		Характеристики электродвигателя			Марка, тип оборудования	Завод-изготовитель	Масса оборудования, кг		
				Q, м³/ч	H, м.в.с	Тип ЭД	n, об/мин	N, кВт					
Пленочный дегазатор с загрузкой из колец Рашига	Вентилятор	7073,0	6-8	Вентиляторы радиальные (центробежные) низкого давления		100S4	1500	3,0	ВР 80-75 № 5	ООО «Уральский Завод Газоочистой Аппаратуры», г.Челябинск	107	50070 руб.	122670 руб.
				4200-8500	6,2-8,8							Дилер ООО ТД «Урал-ЭнергоСантехКомплект», Свердловская обл., г.В.Пышма	
	Насос	282,9	12,5-16,0	Насос центробежный горизонтальный консольный типа «К»		АИР18 0S4	1450	22,0	К 200-150-250а	ЗАО «Катайский насосный завод», г.Курган	440	72600 руб.	
				290	17							Дилер Компания «Энергоснабкомплект», г.Тюмень	
Барботажный дегазатор в свободном объеме	Турбокомпрессор воздушный	1697,4	4	Турбокомпрессор воздушный марки «ТВ»		4AM22 5M2Y3	—	55,0	ТВ-42-1,4	ООО «КОМПРЕССОР САС», Рязанский компрессорный завод ООО «САС» г.Рязань	3650	750000 руб.	750000 руб.
				3600	14								

Таблица 5.4 – Сравнительные характеристики распределительной воздушной системы дегазаторов

Наименование дегазатора	Характерный элемент конструкции	Требуемый объем характерных элементов, м ³	Цена за единицу, руб.	Стоимость, руб.	Воздухо-распределители	Количество воздухо-распределителей, шт	Цена за единицу, руб.	Стоимость, руб.	Стоимость итого
Перегородчатый дегазатор барботажного типа	перегородки	включен в металлоемкость конструкции	—	—	—	—	—	—	—
Гравийный дегазатор барботажного типа	гравийная загрузка (щебень) $d_{\phi p} = 7,5$ мм	33,71	Щебень гранитный $d_{\phi p} = 5,0 \div 10,0$ мм 2020 руб./т с учетом НДС и доставки, Новосмолинский карьер месторождения Челябинской области, г. Челябинск	1,1x46,2x2020 ≈ 102660 руб $m = V \times \rho$ $\rho = 1,37$ т/м ³ $m = 46,2$ т	Дренажные колпачки ФЭЛ	5,3x5,3x25x1,1 = 772 шт с учетом 10% запаса (из расчета 20-30 шт на 1 м ²)	700 руб./шт с НДС ООО «Рем-Фильтр», г.Москва	540000 руб.	643060 руб.
Пленочный дегазатор с загрузкой из колец Рашига	загрузка из колец Рашига 25x25x3	19,94	Кислотоупорные цилиндрические кольца Рашига фарфоровые тип А1 25x25 70000 руб/т ООО «ХимСтрой-Ресурс», г. Тула	1,1x14,0x70000 = 1078000 руб $m = V \times \rho$ $\rho = 0,702$ т/м ³ $m = 14,0$ т	—	—	—	—	1078000 руб.
Барботажный в свободном объеме	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание: стоимость патрубков и распределительных трубопроводов воздушной системы не учтена

Из таблицы 5.2 видно, что обычный барботажный дегазатор не обеспечивает требуемого эффекта удаления углекислоты $\Xi = 72,7 \%$ (эффект десорбции углекислоты составил $\Xi = 59 \%$).

В результате удаления избыточного количества агрессивной углекислоты происходит повышение значения pH воды, обогащение воды кислородом воздуха, что приводит к более глубокому процессу окисления железа, в результате которого образуются соединения железа, отличающиеся по своим физическим свойствам – осадок более плотный и менее влагоемкий. В связи с этим увеличивается период фильтроцикла и, соответственно, уменьшается количество промывок в год и годовой расход промывной воды.

В связи с улучшением процесса десорбции углекислоты перед фильтрами обезжелезивания, работающими по методу упрощенной аэрации, продолжительность фильтроцикла увеличилась, период между промывками с двух суток увеличен до трех суток.

Таблица 5.5 – Экономический эффект, связанный с улучшением работы фильтров обезжелезивания

Наименование сравниваемых показателей	до внедрения перегородчатого дегазатора	после внедрения перегородчатого дегазатора
Период фильтроцикла, сут	2	3
Количество фильтров	6	6
Общая площадь всех фильтров, м ²	60,0	60,0
Интенсивность промывки, л/с·м ²	18	18
Продолжительность промывки, мин	6	6
Количество промывок в год, шт	183	122
Расход воды на одну промывку всех фильтров, м ³	388,8	388,8
Годовой расход воды на промывку фильтров, м ³ /год	71150,4	47433,6
Себестоимость воды станции обезжелезивания ОАО «Птицефабрика «Боровская», руб.	16,05	16,05
Годовые эксплуатационные затраты на промывку фильтров обезжелезивания, руб.	1141964	761310

Экономическая эффективность вариантов устанавливалась по приведенным затратам (Π) на строительство и эксплуатацию

$$П = E + k \cdot C, \quad (5.1)$$

где E – годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.; C – капитальные вложения в строительство, тыс. руб.; k – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Для расчета затрат на капитальное строительство были составлены локальные сметные расчеты по каждому варианту, разработанные согласно требованиям Методики определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации (МДС 81-35.2004), введенной в действие постановлением Госстроя России № 15/1 от 05.03.2004.

Сметная стоимость определена базисно-индексным методом. Базисная стоимость принята в соответствии с:

- сборниками территориальных единичных расценок на строительные, монтажные работы и указаниями по их применению (ТЕР-2001, ТЕРм-2001) (1 зона), утвержденными Постановлением Правительства Тюменской области № 490-п от 27.12.2011;

- сборниками средних сметных цен на строительные конструкции, изделия и материалы, книги 1– 5 (ТССЦ-2001) (5 зона), утвержденными Постановлением Правительства Тюменской области № 490-п от 27.12.2011;

- прайс-листами и коммерческими предложениями товаропроизводителей.

Перевод базисной стоимости в уровень цен 2 кв. 2016 г. произведен с помощью индекса к строительно-монтажным работам $I = 6,88$ (Письмо Минстроя России № 17269 хм/09 от 03.06.2016). Расчет смет произведен с применением программного комплекса «Гранд-Смета».

Накладные расходы определены от фонда оплаты труда в соответствии с Методическими указаниями по определению величины накладных расходов (МДС 81-33.2004), введенными в действие постановлением Госстроя России № 15 от 28.02.2001.

Величина сметной прибыли определена от фонда оплаты труда в соответствии с Методическими указаниями по определению величины сметной прибыли в строительстве (МДС 81-25.2001, приложение 3 с изменениями

согласно письму Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству № АП-5536/06 от 18.11.2004). Нормативный коэффициент эффективности k принят равным 0,12 на основании инструкции СН 423-71.

Затраты на капитальное строительство по четырем типам дегазаторов приведены в таблице 5.6. Годовые эксплуатационные затраты рассматривались в части амортизационных отчислений и затрат на электроэнергию. Амортизационные отчисления приняты равными 10 %, на основании «Единых норм амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства» (таблица 5.6).

Годовой расход электроэнергии, определенный, исходя из мощности электрооборудования, при трехсменном режиме работы с коэффициентом загрузки оборудования равным 0,9, составил:

- Перегородчатый дегазатор барботажного типа – 433,62 тыс. кВт;
- Гравийный дегазатор барботажного типа – 607,068 кВт;
- Пленочный дегазатор с загрузкой из колец Рашига – 197,1 тыс. кВт;
- Барботажный дегазатор в свободном объеме – 433,62 тыс. кВт.

Годовые затраты на электроэнергию определены при стоимости 1 МВт равной 1755,75 руб. (согласно прайсу ОАО «Тюменьэнергосбыт» – филиал ОАО «ЭК «Восток», май 2016 г.).

Итоговые годовые эксплуатационные затраты и приведенные затраты по рассматриваемым вариантам приведены в таблице 5.6.

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

Таблица 5.6 – Сравнительные показатели приведенных затрат для технологических схем с различными дегазаторами

Тип дегазатора	Затраты на капитальное строительство, руб.	Годовые эксплуатационные затраты				Приведенные затраты, руб.
		Амортизационные отчисления, руб.	Годовые затраты на электроэнергию, руб.	Затраты на промывку фильтров обезжелезивания, руб.	Итого, руб.	
Перегородчатый дегазатор барботажного типа	1 195 861,98	119 586,20	761 328,32	761 310,00	1 642 224,51	1 785 727,95
Гравийный дегазатор барботажного типа	2 757 104,29	275 710,43	1 065 859,64	761 310,00	2 102 880,07	2 433 732,58
Пленочный дегазатор с загрузкой из колец Рашига	3 527 091,06	352 709,11	346 058,33	761 310,00	1 460 077,43	1 883 328,36
Барботажный дегазатор в свободном объеме	1 324 776,17	132 477,62	761 328,32	1 141 964,00	2 035 769,93	2 194 743,07

Выводы

1. На основании научно-исследовательской работы, проведенной в процессе реконструкции станции обезжелезивания ВОС-8000 пгт. Пойковский Ханты-Мансийского автономного округа, рекомендованы к внедрению перегородчатые дегазаторы, которые за счет повышенных скоростей противотока позволили снизить затраты на реконструкцию здания станции в сравнении с градирнями.

2. Оценка экономической эффективности показала, что перегородчатый дегазатор имеет наименьшие затраты на капитальное строительство и годовые приведенные затраты в сравнении с другими типами дегазаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования получены следующие научные результаты.

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 солесодержание и карбонатная жесткость не изменяются при остаточной концентрации углекислоты в воде выше равновесной, щелочность изменяется незначительно. 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. 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, определяющих требуемое количество перегородок и конечное содержание углекислоты при скорости противотока равной 20 м/ч.

7. Построена расчетная номограмма для определения остаточного содержания углекислоты при скоростях противотока воды от 20 до 120 м/ч, 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 градирями и другими типами барботажных дегазаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абиев, Р.Ш. Исследование течения газожидкостной системы в трубе с периодически меняющимся сечением [Текст] / Р.Ш. Абиев //Химическая промышленность. – 2003, т. 80. – № 12. – С. 10-17.
- 2 Акользин, П.А. Предупреждение коррозии оборудования технического водо- и теплоснабжения [Текст] / П.А. Акользин. – М. : Металлургия, 1988. – 208 с.
- 3 Александров, И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных систем [Текст]. – Л. : Химия, 1975. – 320 с.
- 4 Алексеев, М.И. Формирование состава подземных вод Западно-Сибирского региона и особенности их использования для питьевого водоснабжения [Текст] / М.И. Алексеев, В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова // Вестник ТГАСУ, № 1, 1999. – С. 183–199.
- 5 Алексеева, Л.П. Очистка подземных вод городов Тюменского региона [Текст] / Л.П. Алексеева, В.Л. Драгинский // ВиСТ. – 2004. – № 10. – С. 9–12.
- 6 Алферова, Л.И. Оценка потенциала и характеристика водных ресурсов территорий Сибирского региона на фоне их водохозяйственной деятельности (Томская, Новосибирская, Кемеровская и Омская области) [Текст] / Л.И. Алферова, В.В. Дзюбо, М.В. Бутовский // Вода: технология и экология. – 2007. – № 4. – С. 7–8.
- 7 Алферова, Л.И. Оценка потенциала и характеристика водных ресурсов территорий Сибирского региона на фоне их водохозяйственной деятельности (Тюменская область, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа) [Текст] / Л.И. Алферова, В.В. Дзюбо // Вода: технология и экология. – 2007. – № 3. – С. 7–8.
- 8 Артеменок, Н.Д. Разработка технологии очистки подземных вод для целей питьевого водоснабжения в Западной Сибири [Текст] / Н.Д. Артеменок // Вестник Сиб. Гос ун-та путей сообщения. – 1999. – вып. 1. – С. 54–58.
- 9 Асс, Г.Ю. Очистка подземной воды от железа и марганца [Текст] / Г.Ю. Асс, Б.Е. Трубецкой // ВиСТ. – 1979. – № 10. – С. 13–14.

- 10 Ахметов, Н.С. Общая и неорганическая химия [Текст] : учебник для вузов / Н.С. Ахметов. – М. : Высш. шк., Изд. центр «Академия», 2001. – 743 с.
- 11 Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М. : Высш. школа, 1978. – 319 с.
- 12 Баженова, О.К. Геология и геохимия нефти и газа [Текст] : учебник / О.К. Баженова, Ю.К. Бурлин, Б.А. Соколов и др. ; под ред. Б.А. Соколова. – М. : Изд-во МГУ, 2000. – 384 с.
- 13 Барабашук, В.И. Планирование эксперимента в технике [Текст] / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко. – К. : Техника, 1984. – 200 с.
- 14 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.
- 15 Бердышев, В.А. Практика очистки подземных вод безреагентным методом [Текст] / В.А. Бердышев, Д.Г. Зверев // ВиСТ. – 2007. – № 3. – С. 22–24.
- 16 Беус, А.А. Геохимия окружающей среды [Текст] / А.А. Беус, Л.И. Грабовская, Н.В. Тихонова. – М. : Недра, 1976. – 248 с.
- 17 Бешенцев, В.А. Экология подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа [Текст] / В.А. Бешенцев, Ю.К. Иванов, О.Г. Бешенцева // Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2005. – 69 с.
- 18 Болотова, О.В. Исследования по снижению содержания углекислоты из подземной воды Тюменского региона [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 28.10.05 / О.В. Болотова; ТюмГАСУ. – Нижний Новгород, 2005. – 17 с.
- 19 Болотова, О.В. Исследования по снижению содержания углекислоты из подземной воды Тюменского региона [Текст] : диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук : 28.10.05 / О.В. Болотова ; ТюмГАСУ. – Нижний Новгород, 2005. – 161 с.
- 20 Бычинский, В.А. Гидрогеология нефти и газа : учеб. пособие / В.А. Бычинский, Н.Г. Коновалова. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. – 221 с.

- 21 Винарский, М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях [Текст] / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – Киев: Техника, 1975. – 212 с.
- 22 Вихрев, В.Ф. Водоподготовка [Текст] : учебник для вузов / В.Ф. Вихрев, М.С. Шкроб. – М. : Энергия, 1973 – 416 с.
- 23 Возная, Н.Ф. Химия воды и микробиология [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Возная. – М. : Высш. шк. , 1979. – 340 с.
- 24 Войткевич, Г.В. Основы геохимии [Текст] : учеб. пособие / Г.В. Войткевич, В.В. Закруткин. – М. : Высшая школа, 1976. – 368 с.
- 25 Войткевич, Г.В. Справочник по геохимии [Текст] : справочное издание / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.Е. Мирошников, В.Г. Прохоров. – М. : Недра, 1990. – 480 с.
- 26 Галустов, В.С. Декарбонизация воды [Текст] / В.С. Галустов // Энергия и менеджмент. – 2003. – № 6. – С. 23–25.
- 27 Галустов, В.С. Расчет и использование прямоточных распылительных декарбонизаторов [Текст] / В.С. Галустов, А.А. Махнин, Е.Л. Белороссов // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 55–57.
- 28 Галустов, В.С. Термическая деаэрация воды [Текст] / В.С. Галустов // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 1. – С. 13–16.
- 29 Ганиев, Р.Ф. Волновое диспергирование газа в жидкости / Р.Ф. Ганиев, Д.А. Жебынев, А.С. Корнеев, Л.Е. Украинский // Механика жидкости и газа. – 2008. – № 2. – С. 149–155.
- 30 Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. [Текст] / Н.И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с.
- 31 Глазков, Д.В. Очистка подземных вод нефтегазоносных районов Западной Сибири от газовых примесей [Текст] : автореф. дис. канд. тех. наук: 12.11.01 / Д.В. Глазков; Сиб. Гос ун-т. путей сообщения. – Новосибирск, 2001. – 20 с.
- 32 Глинка, Н.Л. Общая химия [Текст] / Н.Л. Глинка. – Л. : «Химия», 1977. – 720 с.

- 33 Гончарук, В.В. Использование ультразвука при очистке воды [Текст] / В.В. Гончарук, В.В. Маляренко, В.А. Яременко // Химия и технология воды. – 2008. – т. 30, № 8. – С. 253–277.
- 34 Городские инженерные сети и коллекторы [Текст] : Учеб. для вузов / М.И. Алексеев, В.Д. Дмитриев [и др.] – Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 384 с.
- 35 ГОСТ 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Текст] : переизд. апрель 2006. – М.: Стандартиформ, 2006. – 21 с.
- 36 ГОСТ 26449.2 – 85 – ГОСТ 26449.5 – 85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа при опреснении соленых вод [Текст]. – Введ. 01.01.87. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 91 с.
- 37 ГОСТ 31957-2012 (ISO 9963-1:1994, MOD; ISO 9963-2:1994 MOD). Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов [Текст]. – Введ. 01.01.2014. – М.: ФГУП «Стандартиформ», 2013. – 25 с.
- 38 Гришук, И.К. О механизме деаэрации в струях [Текст] / И.К. Гришук // Теплоэнергетика. – 1957. – № 4. – С. 14–18.
- 39 Громогласов, А.А. Водоподготовка: процессы и аппараты [Текст] / А.А. Громогласов, А.С. Копылов, А.П. Пильщиков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
- 40 Гуревич, А.Е. Процессы миграции подземных вод, нефти и газов [Текст] / А.Е. Гуревич. – Л.: Недра, 1969. – 112 с.
- 41 Дзюбо, В.В. Аэрация-дегазация подземных вод в процессе очистки [Текст] / В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова // ВиСТ. – 2003. – № 6. – С. 21–25.
- 42 Дзюбо, В.В. Изучение кинетических параметров процесса аэрации-дегазации подземных вод [Текст] / В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова // Вестн. Томского гос. арх.-стр. ун-та. – Томск, 2002. – С. 18–21.

43 Дзюбо, В.В. Исследование массообменных характеристик вихревых аэра-
торов-дегазаторов [Текст] / В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова // Изв. вузов. Строи-
тельство. – 2005. – № 3. – С. 83–90.

44 Дзюбо, В.В. К вопросу об использовании подземных вод Сибирского ре-
гиона для питьевого водоснабжения [Текст] / В.В. Дзюбо // Журнал «Питьевая во-
да», 2004. – № 5. – 32 с.

45 Дзюбо, В.В. Повышение эффективности удаления углекислоты как спо-
соб интенсификации процесса очистки подземных вод [Текст] / В.В. Дзюбо,
Л.И. Алферова // Питьевая вода. – 2005. – № 2. – С. 21–27.

46 Дзюбо, В.В. Способ выбора технологических приемов дегазации-аэрации
и очистки подземных вод [Текст] / В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова // Питьевая вода. –
2005. – № 6. – С. 2–7.

47 Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2011 году.

48 Драгинский, В.Л. Очистка подземных вод от соединений железа, марган-
ца и органических загрязнений [Текст] / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева //
ВиСТ. – 1997. – № 12. – С. 16–19.

49 Драгинский, В.Л. Реагентная обработка подземных вод на примере
Нефтеюганского района [Текст] / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева, В.Г. Баландин
// ВиСТ. – 2006. – № 8. – С. 3–7.

50 Дрейцер, Г.А. Проблемы создания высокоэффективных трубчатых тепло-
обменных аппаратов [Текст] / Г.А. Дрейцер // Теплоэнергетика. № 4, 2006. –
С. 31–38.

51 Драйвер, Дж. Геохимия природных вод [Текст] / Дж. Драйвер ; пер. с англ.
– М. : Мир, 1985. – 440 с.

52 Елизаров, Д.П. Исследования барботажа в деаэраторах [Текст] / Д.П. Ели-
заров, В.А. Пермяков // Труды / МЭИ. – М. 19. – Вып. XXV. – С. 121–124.

53 Жулин, А.Г. 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.

54 Жулин, А.Г. Десорбция углекислоты в динамических условиях при противотоке [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2007. – С. 25–30.

55 Жулин, А.Г. 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.

56 Жулин, А.Г. 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.

57 Жулин, А.Г. К выбору способа удаления углекислоты из подземной воды станций обезжелезивания [Текст] / А.Г. Жулин, О.В. Болотова, С.В. Максимова // Энергетика Тюменского региона. – 2002. – № 1. – С. 40–43.

58 Жулин, А.Г. К исследованию дегазатора барботажного типа с горизонтальными перегородками [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». – Тюмень: 2008. – С. 102–106.

59 Жулин, А.Г. К назначению параметров барботажа при удалении углекислоты из подземной воды при обезжелезивании [Текст] / А.Г. Жулин, О.В. Болотова // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 12. – С. 66–70.

60 Жулин, А.Г. К опыту эксплуатации станции обезжелезивания, работающей в режиме водовоздушного фильтрования [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова, И.А. Титова // Межвузовская НПК «Вода: проблемы и решения». Тюмень: 2006. – С.51-53.

61 Жулин, А.Г. К остаточному содержанию углекислоты после барботажного дегазатора [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова, Е.В. Соловьева // Сборник докладов конференции «Вода: проблемы и решения». – Тюмень: РИО ВПО ТюмГАСУ. 2009. – С. 35–37.

62 Жулин, А.Г. К процессам удаления углекислоты из подземной воды в перегородчатом дегазаторе барботажного типа [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник научных трудов ТюмГАСУ. – Тюмень: ИПЦ «Экспресс», 2006. – С. 31–34.

63 Жулин, А.Г. К расчету гравийных дегазаторов [Текст] / А.Г. Жулин, О.В. Болотова // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – № 7. – С. 108–112.

64 Жулин, А.Г. 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.

65 Жулин, А.Г. К снижению содержания углекислоты из подземной воды при ее обезжелезивании [Текст] / А.Г. Жулин, О.В. Болотова // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 4. – С. 89–92.

66 Жулин, А.Г. О барботере с горизонтальными направляющими [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». – Тюмень: ИПЦ «Экспресс», 2006. – С. 101–104.

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

68 Жулин, А.Г. Распределители воздуха барботажных устройств [Текст] / А.Г. Жулин, О.В. Сидоренко, Л.В. Белова // Сборник докладов Всероссийской НПК «Вода: проблемы и решения», выпуск 8. – Тюмень, 2011. – С. 5–9.

69 Жулин, А.Г. Расчетное уравнение к определению остаточного содержания углекислоты при дегазации подземных вод в барботажных

устройствах / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Изв. вузов. «Строительство», 2008, № 10. – С. 69–74.

70 Жулин, А.Г. Сверхскоростной дегазатор [Текст] / А.Г. Жулин, Л.В. Белова // Сборник докладов региональной НПК ТюмГАСУ «Вода. Проблемы и решения». – Тюмень, 2008. – С. 29–32.

71 Жулин, А.Г. 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.

72 Жулин, А.Г. 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.

73 Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание второе переработанное и дополненное. Учебное пособие [Текст] / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 496 с.

74 Журба, М.Г. Кондиционирование мягких агрессивных подземных вод Западной Сибири [Текст] / М.Г. Журба, Ж.М. Говорова, Г.А. Ивлева и др. // ВиСТ. – 1999. – № 5. – С. 7–10.

75 Зверев, В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов [Текст] / В.П. Зверев. – М.: Недра, 1982. – 184 с.

76 Золотова, Е.Ф. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода [Текст] / Е.Ф. Золотова, Г.Ю. Асс. – М.: Стройиздат, 1975. – 176 с.

77 Информационный отчет «Государственное гидрогеологическое изучение масштаба 1:200 000. Составление сводной легенды Западно-Сибирской серии листов гидрогеологической карты – 1000 в комплекте Госгеолкарты – 1000/3 и макета гидрогеологической карты листа R-42 Госгеолкарты – 1000/3». Т. 1 [Текст]. – Санкт-Петербург: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2002. – 26 с.

78 Калатузов, В.А. Влияние эффективности систем технического водоснабжения с градирнями на эксплуатационные показатели электростанций [Текст] / В.А. Калатузов // Энергетик. – 2002. – № 1. – С. 83–90.

79 Кастальский, А.А. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.А. Кастальский, Д.М. Минц. – М. : Высшая школа, 1962. – 558 с.

80 Кастальский, А.А. Проектирование устройств для удаления из воды растворенных газов в процессе водоподготовки [Текст] / А.А. Кастальский. – М. : Госстройиздат, 1957. – 186 с.

81 Кастальский, А.А. Технические указания по проектированию и расчету дегазаторов различных типов, применяемых на водоподготовительных установках [Текст] / А.А. Кастальский. – М. : Водгео, 1956. – 40 с.

82 Кафаров, В.В. Основы массопередачи [Текст] / В.В. Кафаров. – М. : Высш. школа, 1979. – 439 с.

83 Кирюхин, В.А. Гидрогеохимия [Текст] : учеб. для вузов / В.А. Кирюхин, А.И. Коротков, С.Л. Шварцев. – М. : Недра, 1993. – 384 с.

84 Клячко, В.А. Очистка природных вод [Текст] / В.А. Клячко, И.Э. Апельцин. – М. : Стройиздат, 1971. – 579 с.

85 Клячко, В.А. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения [Текст] / В.А. Клячко, И.Э. Апельцин. – М. : Стройиздат, 1962. – 918 с.

86 Коган, В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии [Текст] / В.Б. Коган. – Л.: Химия, 1977. – 592 с.

87 Комарчев, И.Г. Безреагентный метод удаления диоксида углерода из воды [Текст] / И.Г. Комарчев // Электрические станции. – 1988. – № 8. – С. 43–45.

88 Корценштейн, В.Н. Растворенные газы подземной гидросферы Земли [Текст] / В.Н. Корценштейн. – М. : Недра, 1984. – 230 с.

89 Крайнов, С.Р. Геохимия подземных вод [Текст] / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. – М. : Недра, 2004. – 677 с.

90 Крайнов, С.Р. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения [Текст] / С.Р. Крайнов, В.М. Швец. – М. : Недра, 1987. – 237 с.

- 91 Крайча, Я. Газы в подземных водах [Текст] / Я. Крайча; пер. с чешск. – М. : Недра, 1980. – 343 с.
- 92 Крамаренко, Л.Е. Геохимическое поисковое значение микроорганизмов подземных вод [Текст] / Л.Е. Крамаренко. – Л. : Недра, 1983. – 181 с.
- 93 Кругликов, Н.М. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна и особенности формирования залежей углеводородов [Текст] / Н.М. Кругликов, В.В. Нелюбин, О.Н. Яковлев. – Л. : Недра, 1985. – 279 с.
- 94 Кувшинов, О.М. Щелевые деаэраторы КВАРК – современный способ деаэрации жидкости [Текст] / О.М. Кувшинов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 3. – С. 45–52.
- 95 Кульский, Л.А. Технология очистки природных вод [Текст] / Л.А. Кульский, П.П. Строкач. – Киев : Вища шк, 1986. – 352 с.
- 96 Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем [Текст] / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М. : Энергия, 1976. – 296 с.
- 97 Легенда Западно-Сибирской серии листа Государственной гидрогеологической карты масштаба 1:200000 (по Тюменской области, вне криолитозоны) [Текст] Книга 1. Тюмень: ОАО «Тюменьнедра», Филиал ТКГРЭ, 1996. – 19 с.
- 98 Лидин, Р.А. Химические свойства неорганических веществ [Текст] : учеб. пособие для вузов / Р.А. Лидин, В.А. Молочко, Л.Л. Андреева ; под ред. Р.А. Лидина. – М. : Химия, 2000. – 480 с.
- 99 Линевич, С.Н. Комплексная обработка и рациональное использование сероводородсодержащих природных и сточных вод [Текст] / С.Н. Линевич. – М. : Стройиздат, 1987. – 88 с.
- 100 Лифшиц, О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок [Текст] / О.В. Лифшиц. – М. : Энергия, 1976. – 288 с.
- 101 Мамет, А.П. Коррозия теплосилового оборудования электростанций [Текст] / А.П. Мамет. – М. : ГЭИ, 1952. – 164 с.
- 102 Матусевич, В.М. Нефтегазовая геология. Учебное пособие. Ч. 1. Теоретические основы нефтегазовой гидрогеологии. Ч. 2. Нефтегазовая гидрогеология

Западно-Сибирского мегабассейна [Текст] / В.М. Матусевич, Л.А. Ковяткина // Тюмень: «Вектор Бук», 2010. – 115 с.

103 Матусевич, В.М. Нефтегазовая гидрогеология Западно-Сибирского мегабассейна [Текст] Учебное пособие. / В.М. Матусевич, А.Р. Курчиков, Т.В. Семенова, О.Л. Павленко // Тюмень: ТюмГНГУ, 2008. – 4 с.

104 Методологические основы научных исследований [Текст] : учеб. пособие / Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. – Тюмень. : Издательство «Вектор Бук», 2005. – 288 с.

105 Мешенгиссер, Ю.М. Математическая модель формирования пузырьков воздуха при аэрации воды [Текст] / Ю.М. Мешенгиссер // Химия и технология воды. – 1999. – т. 21. – № 2. – С. 122–129.

106 МИ 2083-90. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей [Текст] – М.: НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1991. – 11 с.

107 МИ 2246-93. Погрешности измерений. Обозначения [Текст] – М.: НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1993. – 9 с.

108 Насадки для тепломассообменных аппаратов [Электронный ресурс] // www.nasadki.narod.ru.

109 Никаноров, А.М. Гидрохимия [Текст] : учебник / А.М. Никаноров. – Л. : Гидрометеиздат, 2001. – 444 с.

110 Николадзе, Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод [Текст] / Г.И. Николадзе. – М. : Стройиздат, 1978. – 160 с.

111 Николадзе, Г.И. Улучшение качества подземных вод [Текст] / Г.И. Николадзе. – М. : Стройиздат, 1987. – 240 с.

112 Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. I [Текст]. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848 с., ил. 11.

113 Обезжелезивание природных вод [Текст] / состав. В.С. Животнев, Д.Б. Сукасян // ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре : обзор. Серия «Инженерное оборудование населенных мест, жилых и общественных зда-

ний» / Ротапринт ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре. – М., 1975. – 44 с.

114 Общий курс процессов и аппаратов химической технологии [Текст] : в 2 т. / под ред. В.Г. Айнштейна. – М. : Химия, 2000. – 1760 с.

115 Островский, Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. – 359 с.

116 Отчет о результатах разведочных работ для хозяйственно-питьевого водоснабжения п. Лангепас с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 01.05.85 г. Авторы: А.А. Агейчик, Ф.Р. Тимошенко, Тюмень, 1985. – 118 с.

117 Охотский, В.Б. // Теор. основы. хим. технологии. – 1997. – Т. 31, № 5. – С. 458–464.

118 Пат. 2008275 Российская Федерация, МКИ 5 С 02 F 1/64. Окислитель для обезжелезивания воды [Текст] / В.В. Петрашкевич. – № 4932681/26 ; заявл. 04.03.91 ; опубл. 28.02.94, Бюл. № 4. – 2 с. : ил.

119 Пат. 2089514 Российская Федерация, МКИ 5 С 02 F 1/64. Установка для очистки подземных вод [Текст] / И.А. Шеренков, Ч.Б. Парияр, Ю.С. Меженцев. – опубл. 10.09.97.

120 Пат. 2278718 Российская Федерация, МПК В 01 D. Способ дегазации воды и дегазатор [Текст] / А.А. Новик. – опубл. 27.06.2006.

121 Перельман, А.И. Геохимия природных вод [Текст] / А.И. Перельман. – М. : Наука, 1982. – 154 с.

122 Поворов, А.А. Новая технология получения глубокообессоленной воды на основе ионного обмена без использования фильтров смешанного действия [Текст] / А.А. Поворов // реконструкция энергетики : сборник . докл. 2 Всеросс. конф. / – М. : ООО «ИНТЕХЭКО», 2010. – С. 118–120.

123 Рамм, В.М. Абсорбция газов [Текст] / В.М. Рамм. – М. : Химия, 1976. – 656 с.

124 Рейзин, Б.Л. Коррозия и защита коммунальных водопроводов [Текст] / Б.Л. Рейзин, И.В. Стрижевский, Ф.А. Шевелев [и др.]. – М. : Стройиздат. , 1979. – 398 с.

125 Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского бассейна [Текст] / Сост. И.М. Земскова, Ю.К. Смоленцев, М.П. Полканов и др. Редкол. Е.В. Пиннекер и др. – М. : Недра, 1991. – 26 с.

126 Рид, Р. Свойства газов и жидкостей [Текст] : справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд ; пер. с англ. Б.И. Соколова. – Л. : Химия, 1982. – 592 с.

127 РМГ 43-2001. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» [Текст] : введ. в действие ГК РФ по стандартизации и метрологии с 1 июля 2003 г. – Минск, ИПК Издательство стандартов, 2003. – 20 с.

128 Роддатис, К.Ф. Котельные установки [Текст] : Учеб. пособие для студентов неэнергетических специальностей вузов / К.Ф. Роддатис. – М. : «Энергия», 1977. – 432 с.

129 Розин, А.А. Подземные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна и их формирование [Текст] / А.А. Розин. – Новосибирск : Наука, 1977. – 104 с.

130 Румянцева, Л.П. Брызгальные установки для обезжелезивания воды [Текст] / Л.П. Румянцева. – М.: Стройиздат, 1973. – 104 с.

131 Рушников, А.Ю. Влияние аэрации на углекислотное равновесие в воде. Часть 1 [Текст] / А.Ю. Рушников // Сантехника, отопление, кондиционирование : СОК. — 2015. — № 11. — С. 32-35.

132 Рушников, А.Ю. Влияние аэрации на углекислотное равновесие в воде. Часть 2 [Текст] / А.Ю. Рушников // Сантехника, отопление, кондиционирование : СОК. — 2016. — № 2. — С. 30-35.

133 СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения [Текст] : утв. Госкомсанэпиднадзором РФ 26.10.01 : дата введ. 01.01.02. – М., 2001. – 48 с.

134 Саутин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии [Текст] / С.Н. Саутин. – Л. : Химия, 1975. – 48 с.

135 Свистер, В.Г. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов [Текст] / В.Г. Свистер, Ю.В. Мартынов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 1998. – 508 с.

136 Селюков, А.В. Обезжелезивание подземных вод с использованием перекиси водорода [Текст] / А.В. Селюков, Ю.И. Скурлатов и др. // ВиСТ. – 2007. – № 2. – С. 41–43.

137 Сена, Л.А. Единицы физических величин и их размерности [Текст] / Л.А. Сена. – М. : Изд-во Наука, 1977. – 336 с.

138 Сколубович, Ю.Л. Подготовка питьевой воды из подземных источников угледобывающих регионов [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 14.06.02 / Ю.М. Сколубович ; Новосиб. гос. арх.-стр. ун-т. - Новосибирск, 2002. – 34 с.

139 Смоленцев, Ю.Г. Особенности формирования подземных вод зоны гипергенеза Западно-Сибирской плиты [Текст] / Ю.Г. Смоленцев, В.С. Кусковский // Подземные воды юга Западной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1987 – С. 4-65.

140 СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст]: утв. Госстроем СССР 27.07.84 : взамен СНиП I I-31-74 : дата введ. 01.01.85. – М., 1986. – 136 с.

141 Соколов, В.Н. Газожидкостные реакторы [Текст] В.Н. Соколов, И.В. Доманский. – Л. : Машиностроение, 1976. – 216 с.

142 Соколова, А.В. Оценка обеспеченности населения южной части Тюменской области ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Отчет в 2-х книгах. Книга 1. Текст отчета. ЗАО ТКГРЭ. Тюмень, 2001.

143 СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст]: утв. Минрегион России 29.12.2011 : дата введ. 01.01.2013. – М., 2012. – 123 с.

144 Справочное издание «Большая Тюменская энциклопедия» [Текст]. – Тюмень. – 2004. – Т.1. А–З. – С. 251-253 с.

145 Станкявичюс, В.И. Обезжелезивание воды фильтрованием [Текст] / В.И. Станкявичюс. – Вильнюс : Мокслас, 1978. – 120 с.

- 146 Стерман, Л.С. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС [Текст] : Учебник для вузов / Л.С. Стерман, В.Н. Покровский. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 328 с.
- 147 Суворов, А.В. Общая химия [Текст] : Учебник / А.В. Суворов, А.Б. Никольский. – СПб. : Химия, 1995. – 624 с.
- 148 Сучков, В.А. Работа дегазаторов-аэраторов в схеме обезжелезивания подземных вод г. Сургута [Текст] / В.А. Сучков // ВиСТ. – 2001. – № 8. – С. 32–35.
- 149 Сюткина Е.В. Сравнительные расчеты дегазаторов для удаления растворенной углекислоты из подземной воды [Текст] / Е.В. Сюткина, О.В. Болотова // Сборник докладов Всероссийской НТК «Вода: проблемы и решения». – Тюмень: РИФ «КоЛеСо», 2007. – С. 61–66.
- 150 Технические записки по проблемам воды [Текст] : пер. с англ. в 2 т. / К. Бараке, Ж. Бебен, Ф. Берне [и др.] – М. : Стройиздат, 1983. – 1064 с.
- 151 Угай, Я.А. Общая и неорганическая химия [Текст] / Я.А. Угай. – М. : Высш. шк. , 1997. – 527 с.
- 152 Фрог, Б.Н. Водоподготовка [Текст] : учеб. пособие для вузов / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – М. : Издательство МГУ, 1996. – 680 с.
- 153 Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
- 154 Чайковский, Г.П. Обезжелезивание и деманганация подземных вод [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г.П. Чайковский, В.В. Кулаков, Е.В. Сошников. – Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 89 с.
- 155 Чибисов, В.Т. Влияние ультразвука на дегазацию геотермальных вод [Текст] / В.Т. Чибисов, Ю.И. Султанов, А.Г. Кадыров // Гидрогеология и гидрохимия подземных вод Дагестана. – Махачкала, 1984. – С. 90–96.
- 156 Шапров, М.Ф. Водоподготовка для промышленных и отопительных котельных [Текст] / М.Ф. Шапров. – М. : Стройиздат, 1976. – 112 с.

- 157 Шарапов, В.И. Декарбонизаторы водоподготовительных установок систем теплоснабжения [Текст] / В.И. Шарапов, М.А. Сивухина. – М. : Изд-во АСВ, 2000. – 200 с.
- 158 Шварцев, С.Л. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия [Текст] / С.Л. Шварцев, Е.В. Пиннекер, А.И. Перельман и др. – Новосибирск : Наука, 1982. – 286 с.
- 159 Шкроб, М.С. Водоподготовка и водный режим паротурбинных электростанций [Текст] / М.С. Шкроб, Ф.Г. Прохоров. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 471 с.
- 160 Эрдеи-Груз, Т. Явления переноса в водных растворах [Текст] / Т. Эрдеи-Груз ; пер. с англ. Н.С. Лидоренко, Ю.А. Мазитова. – М. : Мир, 1976. – 592 с.
- 161 Яблокова, М.А. Аппараты с инжектированием и диспергированием газа турбулентными струями жидкости // Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 1995. – 20 с.
- 162 Gaddis E. S., Vogelpohl A. // Chem. Eng. Sci. 1986. V. 41. P. 97–105.
- 163 Grace J.R. Shapes and velocities of bubbles rising in infinite liquids. [Текст] //Trans. Inst. Chem. Eng., 1973, 51, №2, S. 116–120.
- 164 Himmelblan, D. M. // Chem. Rev. – 1964. – 527 p.
- 165 Mietus W.G.P., Matar O.K., Lawrence C.J., Briscoe S.J. Droplet deformation in confined shear and extensional flow // Chem. Eng. Sci. 2002. V. 57. P. 1217-1230.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица — Физические методы дегазации воды

Способ дегазации	Область применения	Принцип действия	Эффекты дегазации	Преимущества	Недостатки	Ссылки
Свободный излив	Водоснабжение [CO ₂] ≤ 50 мг/дм ³ [CO ₂] ≤ 20 мг/дм ³	Излив струи воды над поверхностью фильтра для обеспечения контакта воды с воздухом	33 %	– применяют для станций любой производительности; – не требуют расхода воды на собственные нужды	– незначительные эффекты удаления углекислоты при низких температурах подземных вод	[42], [130], [65]
Брызгальные установки: – без принудительной подачи воздуха; – с принудительной подачей воздуха	Водоснабжение [CO ₂] ≤ 50 мг/дм ³ [CO ₂] ≤ 100 мг/дм ³	Разбрызгивание над водной поверхностью под остаточным напором. Низконапорный поддув воздуха под факел разбрызгиваемой воды	30–70 %	– применяют для станций любой производительности; – не требуют расхода воды на собственные нужды; – значительные эффекты удаления углекислоты	– металлоемкость, сложность трубопроводной развязки; – капельный унос; – зарастание окислами железа элементов конструкций	[42], [130]
Метод упрощенной аэрации в напорном варианте	Водоснабжение [CO ₂] ≤ 50 мг/дм ³	Воздух вводится в трубопровод (или смеситель) перед фильтрами. Процесс удаления углекислоты протекает попутно	15–20 %	– простота применения оборудования; – простота эксплуатации и экономичность	– невысокие эффекты удаления углекислоты; – завоздушивание загрузки фильтров	[41], [65], [57]
Распылительные декарбонизаторы	Водоподготовка в теплоэнергетике [CO ₂] ≤ 100 мг/дм ³	Декарбонизатор перегородкой делится на зоны контакта и сепарации. Распыление воды форсунками. Воздух эжектируется распыленной водой	80 %	значительные эффекты удаления углекислоты	– металлоемкость; – сложность трубопроводной развязки	[157]

Способ дегазации	Область применения	Принцип действия	Эффекты дегазации	Преимущества	Недостатки	Ссылки
Вакуумно-эжекторные декарбонизаторы	Водоснабжение, водоподготовка в теплоэнергетике [CO ₂] >100 мг/дм ³	Основной элемент эжектор, который состоит из вакуумно-распылительной головки. Внутри головки создаются зоны разряжения, в результате через зазоры происходит эжекция наружного воздуха. Температура воды 35–42 °С	80–95 %	– отсутствие оборудования для подачи воздуха; – высокий эффект удаления углекислоты (остаточное содержание углекислоты 3–5 мг/дм ³)	– большая высота эжекторов затрудняет монтаж и обслуживание; – в зимних условиях наблюдается обледенение эжекторов; – большие затраты электроэнергии для создания требуемого напора перед соплами (более 25–35 м)	[87]
Вакуумные дегазаторы	Водоподготовка в теплоэнергетике [CO ₂] = 20 мг/дм ³	Принцип работы – снижение температуры кипения при давлении 0,028–0,039 МПа	100 %	полное удаление всех растворенных газов (углекислоты и кислорода)	– значительные энергозатраты на создание и поддержание вакуума; – сложность наладки и эксплуатации из-за повышенных требований к герметичности труб и арматуры	[157], [159], [156]
Термические дегазаторы	Водоподготовка в теплоэнергетике [CO ₂] = 20 мг/дм ³	Вода в деаэрационной колонне, стекая по тарелкам в противотоке с паром, подогревается до температуры 103–104 °С и освобождается от газов	100 %	полное удаление всех растворенных газов (углекислоты и кислорода)	– греющей средой является водяной пар, образующийся в процессе работы паровых котлов	[156], [28]
Прямоточные щелевые декарбонизаторы МП «КВАРК»	Водоподготовка в теплоэнергетике [CO ₂] ≤ 100 мг/дм ³	Разбрызгивание подогретой до $t = 98\text{--}104\text{ }^{\circ}\text{C}$ воды через щелевые насадки под давлением от 0,25 до 0,59 МПа. Это приводит к увеличению поверхности контакта фаз	41–99 % (зависит от давления)	– высокий эффект удаления углекислоты; – габаритные размеры и вес меньше, чем у насадочных дегазаторов	– требуется нагрев воды; – необходимо поддерживать высокое давление перед декарбонизатором; – повышенные энергетические затраты	[94]

Способ дегазации	Область применения	Принцип действия	Эффекты дегазации	Преимущества	Недостатки	Ссылки
Насадочные дегазаторы (градирни)	Водоснабжение [CO ₂] ≤ 100 мг/дм ³	Вода стекает по насадке (деревянная, кольца Рашига, Палля и т.д.) сверху вниз в виде пленки, навстречу воде движется воздух, нагнетаемый вентилятором	25–40 % (в зависимости от климатических условий)	создается высокая площадь поверхности контакта фаз	– ограничение скорости воздуха из-за уноса капель и захлебывания; – зарастание загрузки осадком гидроксида железа; – обледенение в зимний период; – невозможность устройства сооружений в помещениях	[148], [52]
Барботажные дегазаторы (в свободном объеме)	Водоснабжение [CO ₂] ≤ 100 мг/дм ³	Продувка движущегося объема воды воздухом	40–60 %	– конструктивная и эксплуатационная простота; – возможность регулирования эффекта удаления углекислоты	– низкие эффекты удаления углекислоты; – повышенные расходы электроэнергии из-за низкого КПД использования воздуха	[148], [59], [31]
Барботажный дегазатор двойного действия (двухсекционный)	Водоснабжение [CO ₂] > 100 мг/дм ³	Вода поступает в верхнюю секцию, разбрызгивается и продувается воздухом, накапливается до переливного отверстия и по переливному трубопроводу поступает во вторую секцию аналогичного действия	80 %	– высокий эффект удаления углекислоты; – значительная продолжительность контакта воды и воздуха	конструкция достаточно сложна и металлоемка	[80]
Дегазатор пенного типа	Водоснабжение [CO ₂] > 100 мг/дм ³	Вода тонким слоем протекает вдоль перфорированной решетки и под действием поперечного тока воздуха, подаваемого через решетку, вспенивается	97 %	высокий эффект удаления углекислоты	– невысокая производительность (до 100 м ³ /ч); – трудность в эксплуатации при поддержании оптимальных скоростных режимов	[157], [95]

Способ дегазации	Область применения	Принцип действия	Эффекты дегазации	Преимущества	Недостатки	Ссылки
Барботер с гравийной засыпкой	Водоснабжение [CO ₂] ≤ 180 мг/дм ³	Продувка воды воздухом через слой загрузки (гравий, щебень)	75–80 %	высокий эффект удаления углекислоты	забивание загрузки окислами железа	[18], [63], [150]
Аэратор-дегазатор вихревого типа	Водоснабжение [CO ₂] ≤ 180 мг/дм ³	Вихревой низконапорный аппарат, в котором вода набегающим потоком воздуха распределяется в виде тонкой пленки по внутренней поверхности аппарата с переходом в капли дождя	80–91 %	позволяет в несколько раз сократить время обработки воды по сравнению с барботажными дегазаторами	соблюдение оптимальных режимных параметров для исключения капельного выноса обрабатываемой воды из аппарата	[43]
Ультразвуковая дегазация	Водоснабжение, металлургия, нефтепереработка, пищевые и фармацевтические предприятия, теплоэнергетика	—	—	в стадии освоения	– требует предварительного подогрева воды до 30–80° С; – невозможность удаления химически связанных форм CO ₂ .	[155], [33], [120]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Экспериментальные данные по снижению содержания углекислоты при различных скоростях противотока на перегородчатом дегазаторе

№ опыта	Количество перегородок, $N_{пер}$, шт	Высота слоя воды в дегазаторе, м	Скорость противотока, $V_{воды}$, м/ч	Удельный расход воздуха, $м^3/м^3$	Содержание $[CO_2]_{кон}$ на выходе из дегазатора, $мг/дм^3$
Содержание углекислоты в исходной воде $[CO_2]_{исх} = 160,0 \text{ мг/дм}^3$					
1	4	2,0	23,8	2,0	94,0
2	4	2,0	23,8	4,0	78,0
3	4	2,0	23,8	5,1	74,8
4	4	2,0	23,8	6,2	70,4
5	4	2,0	23,8	10,4	52,8
6	4	2,0	23,8	14,3	49,3
7	4	2,0	117,6	2,0	68,2
8	4	2,0	117,6	4,0	56,3
9	4	2,0	117,6	6,0	50,3
10	4	2,0	117,6	8,0	46,6
11	4	2,0	117,6	10,0	42,7
12	4	2,0	117,6	14,0	40,0
Содержание углекислоты в исходной воде $[CO_2]_{исх} = 92,4 \text{ мг/дм}^3$					
1	3	1,6	15,0	2,0	56,0
2	3	1,6	15,0	4,0	47,6
3	3	1,6	15,0	6,0	42,6
4	3	1,6	15,0	8,0	38,0
5	3	1,6	15,0	10,0	36,0
6	3	1,6	15,0	12,0	33,0
7	3	1,6	35,0	2,0	52,0
8	3	1,6	35,0	4,0	42,3
9	3	1,6	35,0	6,0	36,7
10	3	1,6	35,0	8,0	32,0
11	3	1,6	35,0	10,0	30,2
12	3	1,6	35,0	12,0	28,0

Примечание: приведен образец журнала регистрации экспериментальных данных.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Рисунок В.1



Рисунок В.2



Рисунок В.3



Рисунок В.4



Рисунок В.5



Рисунок В.6



Рисунок В.7



Рисунок В.8

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Серия уравнений с двумя переменными

Значение переменной $[CO_2]_{исх}$, мг/дм ³	Серия расчетных уравнений <i>при</i> $V_{воды} = 20$ м/ч $[CO_2]_{кон} = f(q_{y\partial}, N_{nep})$ при $[CO_2]_{исх} = const$
60	$[CO_2]_{кон} (60) = 65,36 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 1,08 \cdot q_{y\partial}$
70	$[CO_2]_{кон} (70) = 73,72 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 1,26 \cdot q_{y\partial}$
80	$[CO_2]_{кон} (80) = 81,84 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 1,44 \cdot q_{y\partial}$
90	$[CO_2]_{кон} (90) = 89,70 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 1,62 \cdot q_{y\partial}$
100	$[CO_2]_{кон} (100) = 97,33 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 1,80 \cdot q_{y\partial}$
110	$[CO_2]_{кон} (110) = 104,70 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 1,98 \cdot q_{y\partial}$
120	$[CO_2]_{кон} (120) = 111,83 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 2,16 \cdot q_{y\partial}$
130	$[CO_2]_{кон} (130) = 118,71 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 2,34 \cdot q_{y\partial}$
140	$[CO_2]_{кон} (140) = 125,35 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 2,52 \cdot q_{y\partial}$
150	$[CO_2]_{кон} (150) = 131,74 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 2,70 \cdot q_{y\partial}$
160	$[CO_2]_{кон} (160) = 137,88 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 2,88 \cdot q_{y\partial}$
170	$[CO_2]_{кон} (170) = 143,77 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 3,06 \cdot q_{y\partial}$
180	$[CO_2]_{кон} (180) = 149,42 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 3,24 \cdot q_{y\partial}$
190	$[CO_2]_{кон} (190) = 154,82 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 3,42 \cdot q_{y\partial}$
200	$[CO_2]_{кон} (200) = 159,97 - 4,55 \cdot q_{y\partial} - 7,81 \cdot N_{nep} + 0,27 \cdot q_{y\partial}^2 - 3,60 \cdot q_{y\partial}$

Таблица Г.2 – Расчетные уравнения первого поля номограммы

Расчетные уравнения из серии уравнений с двумя переменными $[CO_2]_{кон} = f(q_{y0}, N_{пер})$ при $V_{воды} = 20$ м/ч, $[CO_2]_{исх} = const$	Значения удельного расхода воздуха, q_{y0} , м ³ /м ³	Расчетные уравнения первого поля номограммы
$[CO_2]_{кон} (60) = 65,36 - 4,55 \cdot q_{y0} - 7,81 \cdot N_{пер} + 0,27 \cdot q_{y0}^2 - 1,08 \cdot q_{y0}$	4,0	$[CO_2]_{кон} (60 / 4) = 47,25 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	6,0	$[CO_2]_{кон} (60 / 6) = 41,49 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	8,0	$[CO_2]_{кон} (60 / 8) = 37,92 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	10,0	$[CO_2]_{кон} (60 / 10) = 36,55 - 7,81 \cdot N_{пер}$
$[CO_2]_{кон} (100) = 97,33 - 4,55 \cdot q_{y0} - 7,81 \cdot N_{пер} + 0,27 \cdot q_{y0}^2 - 1,80 \cdot q_{y0}$	4,0	$[CO_2]_{кон} (100 / 4) = 76,35 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	6,0	$[CO_2]_{кон} (100 / 6) = 69,15 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	8,0	$[CO_2]_{кон} (100 / 8) = 64,14 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	10,0	$[CO_2]_{кон} (100 / 10) = 61,33 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	12,0	$[CO_2]_{кон} (100 / 12) = 60,72 - 7,81 \cdot N_{пер}$
$[CO_2]_{кон} (160) = 137,88 - 4,55 \cdot q_{y0} - 7,81 \cdot N_{пер} + 0,27 \cdot q_{y0}^2 - 2,88 \cdot q_{y0}$	4,0	$[CO_2]_{кон} (160 / 4) = 112,58 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	6,0	$[CO_2]_{кон} (160 / 6) = 103,23 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	8,0	$[CO_2]_{кон} (160 / 8) = 96,07 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	10,0	$[CO_2]_{кон} (160 / 10) = 91,10 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	12,0	$[CO_2]_{кон} (160 / 12) = 88,33 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	14,0	$[CO_2]_{кон} (160 / 14) = 87,76 - 7,81 \cdot N_{пер}$
$[CO_2]_{кон} (200) = 159,97 - 4,55 \cdot q_{y0} - 7,81 \cdot N_{пер} + 0,27 \cdot q_{y0}^2 - 3,60 \cdot q_{y0}$	4,0	$[CO_2]_{кон} (200 / 4) = 131,80 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	6,0	$[CO_2]_{кон} (200 / 6) = 121,00 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	8,0	$[CO_2]_{кон} (200 / 8) = 112,41 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	10,0	$[CO_2]_{кон} (200 / 10) = 106,00 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	12,0	$[CO_2]_{кон} (200 / 12) = 101,80 - 7,81 \cdot N_{пер}$
	14,0	$[CO_2]_{кон} (200 / 14) = 99,79 - 7,81 \cdot N_{пер}$

Таблица Г.3 – Расчетные значения для построения второго поля номограммы

Расчетные уравнения первого поля номограммы	Количество перегородок, $N_{пер}$, шт	Конечное содержание угле- кислоты при $V_{воды} = 20$ м/ч, $[CO_2]_{кон}$, мг/дм ³
$[CO_2]_{кон} (60/4) = 47,25 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 60,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 4,0$ м ³ /м ³	1	39,44
	2	31,62
	3	23,81
$[CO_2]_{кон} (60/6) = 41,49 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 60,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 6,0$ м ³ /м ³	1	33,67
	2	25,86
	3	18,05
$[CO_2]_{кон} (60/8) = 37,92 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 60,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 8,0$ м ³ /м ³	1	30,11
	2	22,30
	3	14,48
$[CO_2]_{кон} (60/10) = 36,55 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 60,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 10,0$ м ³ /м ³	1	28,74
	2	20,92
	3	13,11
$[CO_2]_{кон} (100/4) = 76,35 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 100,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 4,0$ м ³ /м ³	1	68,53
	2	60,72
	3	52,91
	4	45,09
	5	37,28
	6	29,47
$[CO_2]_{кон} (100/6) = 69,15 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 100,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 6,0$ м ³ /м ³	1	61,33
	2	53,52
	3	45,71
	4	37,90
	5	30,08
	6	22,27
$[CO_2]_{кон} (100/8) = 64,14 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 100,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 8,0$ м ³ /м ³	1	56,33
	2	48,52
	3	40,70
	4	32,89
	5	25,08
	6	17,27

Продолжение таблицы Г.3

Расчетные уравнения первого поля номограммы	Количество перегородок, $N_{пер}$, шт	Конечное содержание угле- кислоты при $V_{воды} = 20$ м/ч, $[CO_2]_{кон}$, мг/дм ³
$[CO_2]_{кон} (100/10) = 61,33 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 100,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 10,0$ м ³ /м ³	1	53,52
	2	45,71
	3	37,90
	4	30,08
	5	27,27
	6	14,48
$[CO_2]_{кон} (100/12) = 60,72 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 100,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 12,0$ м ³ /м ³	1	52,91
	2	45,09
	3	37,28
	4	29,47
	5	21,66
	6	13,84
$[CO_2]_{кон} (160/4) = 112,58 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 160,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 4,0$ м ³ /м ³	1	104,77
	2	96,96
	3	89,14
	4	81,33
	5	73,52
	6	65,70
$[CO_2]_{кон} (160/6) = 103,23 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 160,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 6,0$ м ³ /м ³	1	95,41
	2	87,60
	3	79,79
	4	71,98
	5	64,16
	6	56,35
$[CO_2]_{кон} (160/8) = 96,07 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 160,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 8,0$ м ³ /м ³	1	88,25
	2	80,44
	3	72,63
	4	64,82
	5	57,00
	6	49,19

Продолжение таблицы Г.3

Расчетные уравнения первого поля номограммы	Количество перегородок, $N_{пер}$, шт	Конечное содержание угле- кислоты при $V_{воды} = 20$ м/ч, $[CO_2]_{кон}$, мг/дм ³
$[CO_2]_{кон} (160/10) = 91,10 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 160,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 10,0$ м ³ /м ³	1	83,29
	2	75,48
	3	67,66
	4	59,85
	5	52,04
	6	44,22
$[CO_2]_{кон} (160/12) = 88,33 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 160,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 12,0$ м ³ /м ³	1	80,51
	2	72,71
	3	64,89
	4	57,08
	5	49,27
	6	41,45
$[CO_2]_{кон} (160/14) = 87,76 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 160,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 14,0$ м ³ /м ³	1	79,94
	2	72,13
	3	64,32
	4	56,50
	5	48,69
	6	40,88
$[CO_2]_{кон} (200/4) = 131,80 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 200,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 4,0$ м ³ /м ³	1	123,99
	2	116,17
	3	108,36
	4	100,55
	5	92,74
	6	84,92
$[CO_2]_{кон} (200/6) = 121,00 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 200,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 6,0$ м ³ /м ³	1	113,19
	2	105,38
	3	97,57
	4	89,76
	5	81,94
	6	74,13

Продолжение таблицы Г.3

Расчетные уравнения первого поля номограммы	Количество перегородок, $N_{пер}$, шт	Конечное содержание угле- кислоты при $V_{воды} = 20$ м/ч, $[CO_2]_{кон}$, мг/дм ³
$[CO_2]_{кон} (200/8) = 112,41 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 200,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 8,0$ м ³ /м ³	1	104,60
	2	96,78
	3	88,97
	4	81,16
	5	73,35
	6	65,53
$[CO_2]_{кон} (200/10) = 106,00 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 200,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 10,0$ м ³ /м ³	1	98,19
	2	90,38
	3	82,57
	4	74,76
	5	66,94
	6	59,13
$[CO_2]_{кон} (200/12) = 101,80 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 200,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 12,0$ м ³ /м ³	1	93,99
	2	86,17
	3	78,36
	4	70,55
	5	62,73
	6	54,92
$[CO_2]_{кон} (200/14) = 99,79 - 7,81 \cdot N_{пер}$ для $[CO_2]_{исх} = 200,0$ мг/дм ³ $q_{уд} = 14,0$ м ³ /м ³	1	91,97
	2	84,16
	3	76,35
	4	68,53
	5	60,72
	6	52,91

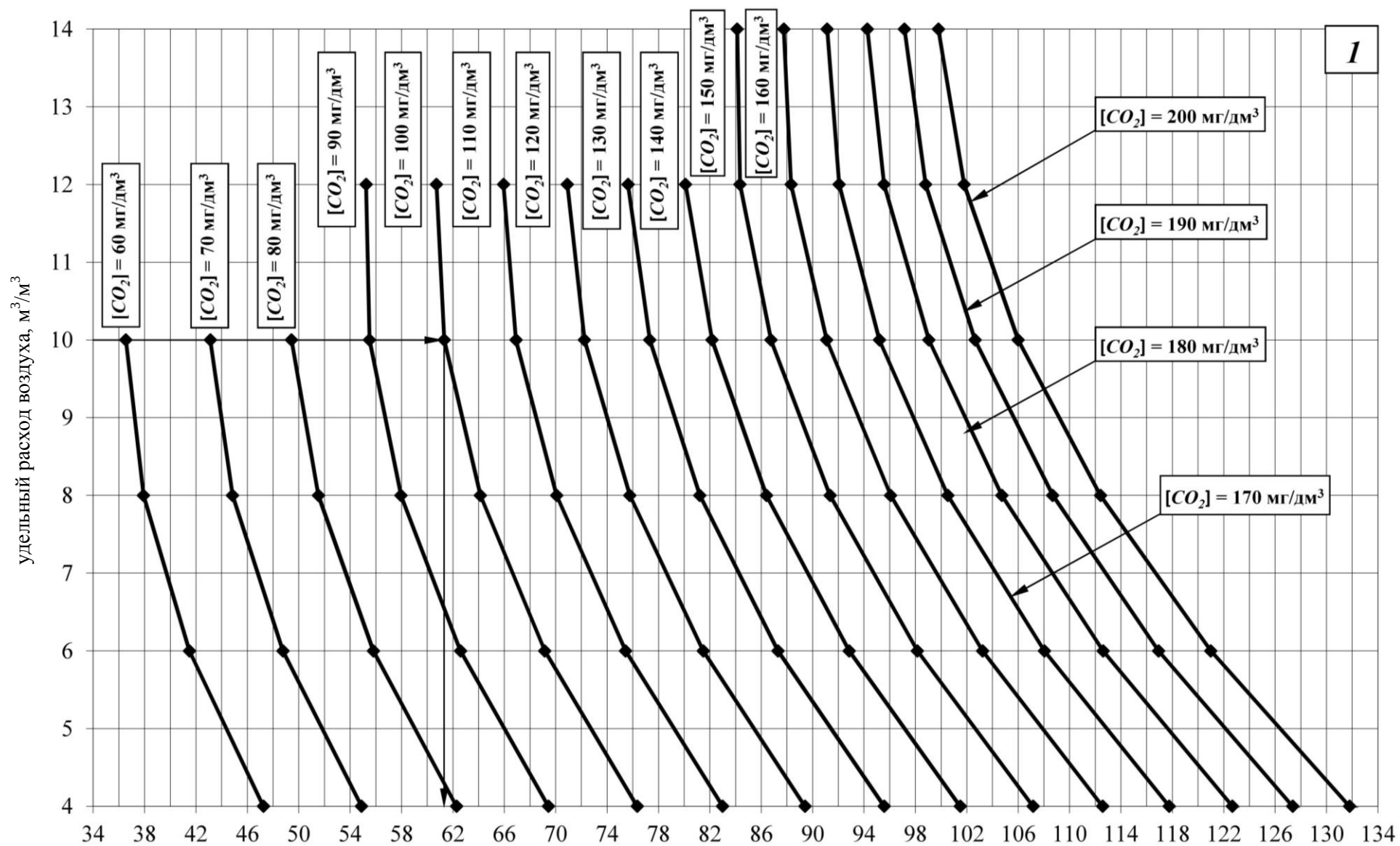


Рисунок Г.1 – Номограмма для определения остаточного содержания углекислоты
для перегородчатого дегазатора барботажного типа (первое поле)

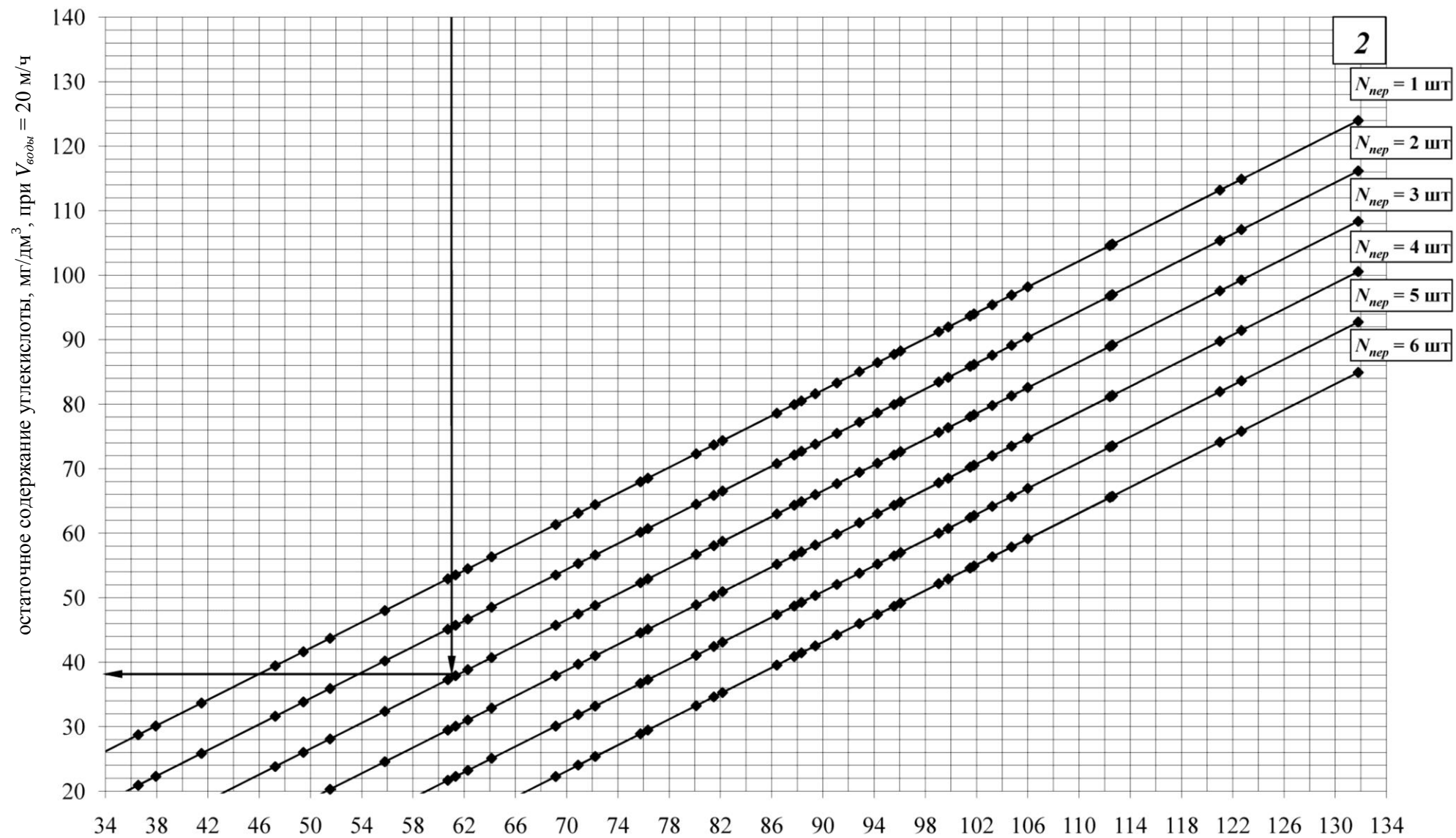


Рисунок Г.2 – Номограмма для определения остаточного содержания углекислоты
для перегородчатого дегазатора барботажного типа (второе поле)

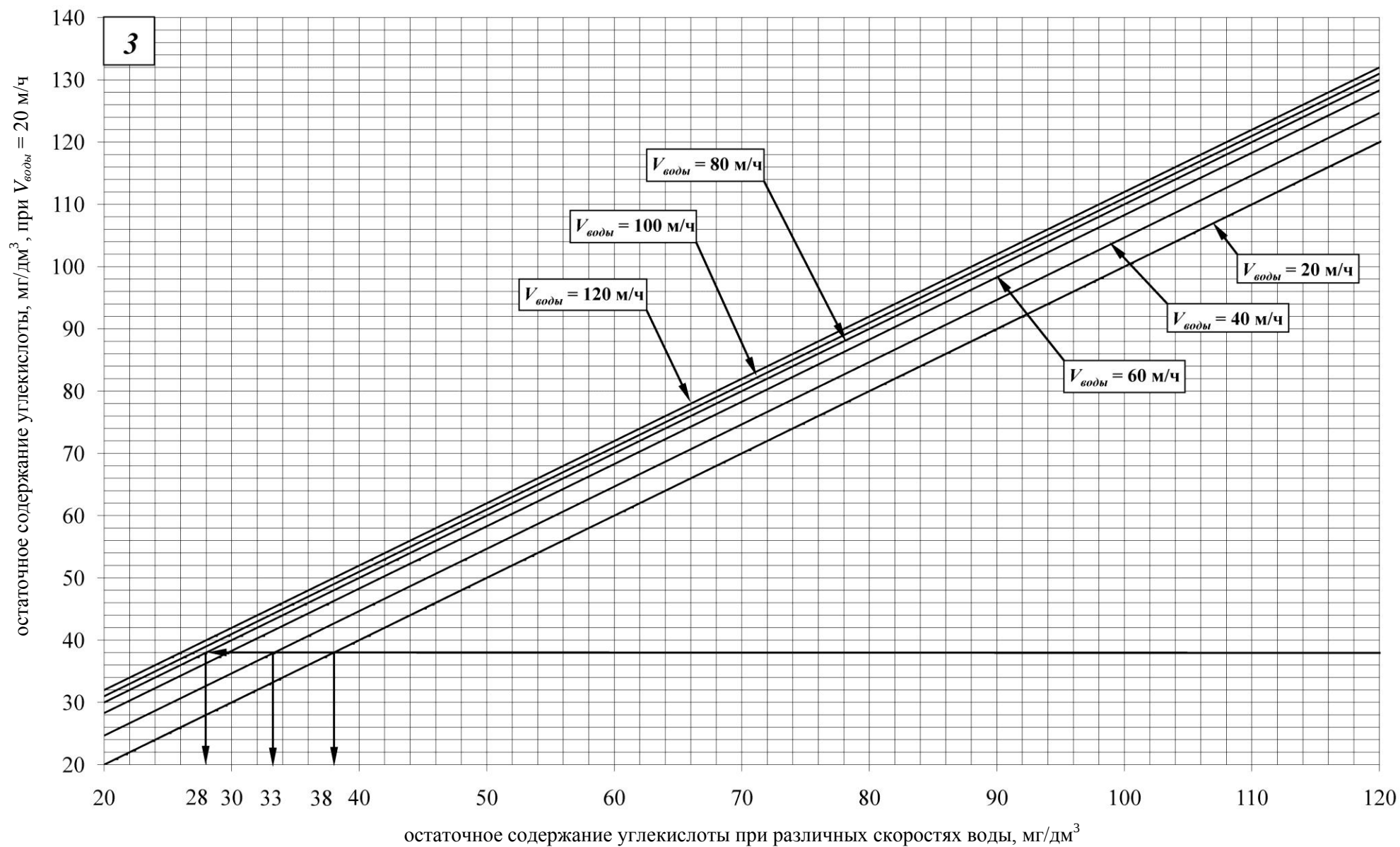


Рисунок Г.3 – Номограмма для определения остаточного содержания углекислоты для перегородчатого дегазатора барботажного типа (третье поле)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной
работе ТюмГАСУк.т.н., доцент
Я.А. Пронозин
2006 г.

"УТВЕРЖДАЮ"

Начальник ПМУП УТВС

пгт. Пойковский

В.И. Сидоренко



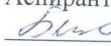
" " 2006 г.

АКТ

о внедрении научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, в лице заместителя начальника цеха ПМУП УТВС Фархутдинова И.Г. с одной стороны и представителей кафедры «Водоснабжения и водоотведения» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета доцента, к.т.н. Жулина А.Г. и аспиранта Беловой Л.В. с другой стороны, составили настоящий акт о производственных испытаниях дегазатора с горизонтальными перегородками, разработанного по результатам НИР «Обследование, разработка проекта модернизации и наладка станции обезжелезивания ВОС-8000 пгт. Пойковский».

Результаты производственных испытаний дегазатора с горизонтальными перегородками диаметром 1,0 м показали, что при его производительности $111 \text{ м}^3/\text{ч}$ и водовоздушном соотношении 1 : 4: содержание углекислоты снизилось до $29,6 \div 32,5 \text{ мг/дм}^3$ при исходном $57 \div 65 \text{ мг/дм}^3$ (эффект $48,4 \div 50,2 \%$); содержание метана до $2 \div 5 \text{ мг/дм}^3$ - при исходном растворенном $36,6 \div 20,3 \text{ мг/дм}^3$; значение водородного показателя (рН воды) составило $7,15 \div 7,25$ - при исходном $6,5 \div 6,6$; содержание растворенного кислорода в воде $8,5 \div 9,2 \text{ мг/дм}^3$ (исходное 0 мг/дм^3). Выявлены оптимальные параметры работы дегазатора с горизонтальными перегородками.

Представители ТюмГАСУ:
К.т.н., доцент кафедры ВиВ
 Жулин А.Г.
Аспирант кафедры ВиВ
 Белова Л.В.

Представитель ПМУП
«Управления Тепловодоснабжения»
пгт. Пойковский
Заместитель начальника цеха
 Фархутдинов И.Г..

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной работе
ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ»
"23" декабря 2014 г.

Т.В. Мальцева

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ОАО «Птицефабрика «Боровская»


"23" декабря 2014 г.

В.В. Ожигбесов

АКТ

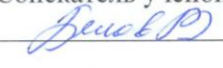
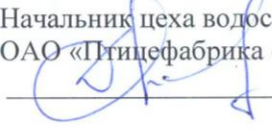
о проведении опытно-промышленных испытаний перегородчатого дегазатора
для снижения содержания углекислоты из подземной воды

Комиссия в составе: начальника цеха водоснабжения ОАО «Птицефабрика «Боровская» Д.В. Моисеева и представителей кафедры водоснабжения и водоотведения ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ» к.т.н., доцента А.Г. Жулина и ассистента Л.В. Беловой составили настоящий акт в том, что на станции обезжелезивания цеха водоснабжения проводились исследования по снижению содержания углекислоты из подземной воды на перегородчатом дегазаторе.

Подтверждаем, что перегородчатый дегазатор, предложенный ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ» и испытанный в условиях производства при исходном содержании углекислоты в подземной воде $CO_2^{исх} = 110 \text{ мг/дм}^3$ обеспечил снижение ее содержания на 72-77%, при этом остаточное содержание углекислоты в воде составило $CO_2^{кон} = 25-30 \text{ мг/дм}^3$. В результате уменьшения содержания углекислоты значение водородного показателя pH повысилось и составило $pH = 7,08$ при исходном его значении равном $pH = 6,53$.

Процесс дегазации воды на перегородчатом дегазаторе с четырьмя уровнями перегородок производился при следующих параметрах - значение удельного расхода воздуха $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$, скорость противотока воды 80 м/ч .

Снижение углекислоты положительно повлияло на процесс удаления железа из подземной воды, кроме того, попутное удаление из воды сероводорода снизило явление цементации загрузки фильтров обезжелезивания.

Представители
ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ»:К.т.н., доцент кафедры ВиВ
 А.Г. ЖулинСоискатель ученой степени к.т.н.
 Л.В. БеловаПредставитель
ОАО «Птицефабрика «Боровская»:Начальник цеха водоснабжения
ОАО «Птицефабрика «Боровская»
 Д.В. Моисеев