

*На правах рукописи*

**АВЕРИНА ЮЛИЯ МИХАЙЛОВНА**

**Интенсификация процесса аэрации при удалении ионов железа из воды**

**05.17.01 - Технология неорганических веществ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2016**

Работа выполнена на кафедре инновационных материалов и защиты от коррозии  
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Меньшиков Владимир Викторович  
профессор кафедры инновационных  
материалов и защиты от коррозии  
Российский химико-технологический  
университет имени Д.И. Менделеева

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Харламова Татьяна Андреевна  
профессор кафедры  
общей и неорганической химии  
Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»

Доктор технических наук, доцент  
Воротынцев Илья Владимирович  
профессор кафедры  
«Нанотехнологии и биотехнологии»  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

**Ведущая организация:** Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова

Защита диссертации состоится «16» марта 2016 г. в 10 часов 00 минут  
в конференц-зале (ауд. 443) на заседании диссертационного совета Д 212.204.05  
в РХТУ имени Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре  
РХТУ имени Д.И. Менделеева

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.204.05

О.В. Яровая

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Вода, наряду с продуктами питания, всегда являлась важнейшим компонентом, обеспечивающим существование жизни на нашей планете. Исследования влияния воды на биохимические процессы, протекающие в организмах, однозначно указывают на примесный состав воды как на фактор, во многом однозначно их определяющий. Одной из наиболее важных примесей в воде является железо. Повышенное содержание железа придает воде неприятный вкус, наносит вред здоровью человека, приводит к быстрому износу оборудования, является причиной брака в текстильной, бумажной, косметической и др. отраслях промышленности. Для решения этих проблем используют различные процессы обезжелезивания. Существующие в настоящее время научные исследования и практика их применения подтверждают, что в ближайшее время в технологических процессах обезжелезивания природных вод будут преобладать методы, основанные на окислении ионов  $Fe^{2+}$  кислородом с последующим фильтрационным выделением примесей.

Наиболее экономичным, технологически простым и экологически рациональным способом, основанном на окислении ионов  $Fe^{2+}$  кислородом воздуха, является аэрация. Сложности с выбором оптимального метода аэрации и конструкции аэратора, необходимость подробного анализа физико-химических свойств исходных и образующихся систем для каждой конкретной задачи, убеждают в необходимости дополнительных исследований, направленных на совершенствование процесса аэрации в технологии обезжелезивания воды и обеспечение высокой надежности и эффективности. Поэтому задача интенсификации процесса аэрации является **актуальной**.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект №3268).

**Целью работы** является интенсификация процесса аэрации при удалении ионов железа из воды. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать зависимость скорости процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  в воде от удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух»;
- исследовать влияние параметров процесса барботирования на удельную поверхность контакта фаз «вода-воздух»;
- разработать алгоритм расчета технологических и конструктивных параметров процесса очистки воды, позволяющего оптимизировать процесс очистки воды от ионов  $Fe^{2+}$  для конкретных задач;
- создать и испытать промышленную установку для заданных параметров состава и расхода воды.

**Научная новизна.** Впервые показано, что скорость процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  в воде при барботировании воздуха определяется скоростями двух параллельно протекающих процессов: гомогенного процесса окисления растворенным в воде кислородом и гетерогенного процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  на границе раздела фаз «вода-воздух».

Установлена зависимость скорости гетерогенного и суммарного процессов окисления  $Fe^{2+}$  от удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух».

Установлено влияние режимов процесса барботирования воздуха и конструктивных параметров установки обезжелезивания на величину удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух».

Полученные эмпирические формулы зависимости скорости процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  и остаточного содержания ионов железа в воде от величины удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» и времени проведения процесса позволяют осуществлять расчет установок и режимных параметров процесса по скорости, энергозатратам, занимаемым площадям, материалоемкости конструкции при заданных начальных и конечных концентрациях ионов  $Fe^{2+}$  в воде и требуемой производительности процесса.

**Практическая значимость.** Созданы экспериментальные установки для изучения различных стадий технологического процесса: аэрации и ультрафильтрации, на базе которых было выполнено шесть дипломных работ. Предложен способ подготовки керамических трубок для аэрации и метод регенерации блока фильтрации для практического использования в процессах обезжелезивания.

Предложен алгоритм расчета технологического процесса обезжелезивания воды различного состава, позволяющий оптимизировать процесс по различным параметрам в зависимости от требований потребителя. Разработана и внедрена технология аэрационной и микрофильтрационной комплексной очистки железосодержащих вод предложенным методом (Солнечногорский район МО, пос. Ложки). Технология характеризуется эффективностью извлечения ионов железа - 99,5–99,8%. При этом достигаются требуемые значения по СанПиН 2.1.4.1175-02 и улучшаются органолептические качества воды.

По теме диссертационной работы получены патенты РФ №2400295 на «Способ обработки жидкостей газами»; № 2525177 на «Способ очистки воды» и в РХТУ имени Д.И. Менделеева зарегистрировано НОУ-ХАУ «Способ очистки железосодержащих вод сложного состава мембранными методами».

Разработанная технология позволила снизить себестоимость получаемой воды в условиях реального производства на 10% по сравнению с установками безнапорной аэрацией серий «SWPF-A0» и ПВО-АЭК-14.

**На защиту выносятся:**

- определение зависимости скорости процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  в воде от величины удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух»;
- определение зависимости удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» от режимных параметров процесса барботирования и геометрических параметров установки;
- оптимизация технологических решений конструкций, параметров процесса (давления, скорости и т.д.) для увеличения удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух»;
- отработка технологических приемов фильтрации воды с повышенным содержанием железа;
- разработка методики регенерации микрофильтрационных мембран после процесса обезжелезивания.

**Апробирование работы.** Основные материалы работы докладывались на V, VI, IX и XI международных конгрессах «МКХТ-2009», «МКХТ-2010», «МКХТ-2013» и «МКХТ-2015» (Москва, Россия); the 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010 and the 7th European Congress of Chemical Engineering ECCE-7 (Prague, Czech Republic) 2010; научном Форуме БРИКС в рамках саммита БРИКС, Международной научно-практической конференции «Вода: оборудование, технологии, материалы в промышленности и энергетике», 2015 г. (Санкт-Петербург, Россия); выставках «Экватек» 2008 и «Экватек» 2010; втором международном форуме по интеллектуальной собственности «Ехрорpriority-2010» (Москва, Россия); IX и X Всероссийских выставках научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2009» и «НТТМ-2010» (2 золотые медали Лауреата ВВЦ);

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликована 21 работа, из них 5 статей в журналах, рекомендуемых ВАК.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 157 страницах, состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка литературы из 121 наименования, приложений и содержит 7 таблиц, 56 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Кратко рассмотрены основные проблемы водоподготовки и обеспечения населения качественной питьевой водой, обоснована актуальность работы.

**Глава 1. Литературный обзор.** Проанализировано современное состояние проблемы очистки природных вод с повышенным содержанием соединений железа и проведен аналитический обзор существующих методов удаления соединений железа в процессе водоподготовки. Приведена сравнительная оценка их основных достоинств и недостатков.

Проведен обзор современных устройств для осуществления технологического процесса барботаж и конструкций различных типов аэраторов, приведена их классификация.

Рассмотрены теоретические аспекты процесса барботирования, применяемые при изучении аэрационных методов окисления и дан анализ различных режимов барботирования, характеризующихся определенным размером пузырьков, скоростью их всплытия и газосодержанием, а также особенности протекания массообменных процессов при барботировании. Описана кинетика процесса окисления ионов  $\text{Fe}^{2+}$ , содержащихся в природной воде. Приведено суммарное уравнение реакций окисления и гидролиза в виде:

$4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 10\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 8\text{H}^+$ , где на окисление 1 мг железа расходуется 0,143 мг кислорода. Так как скорость реакции окисления:

$-d(\text{Fe}^{2+})/dt = K[\text{Fe}^{2+}]$ , где  $K=K_1[\text{O}_2]$ , то при избытке кислорода она в большей степени должна определяться концентрацией ионов  $\text{Fe}^{2+}$ , а различные источники приводят концентрацию ионов  $\text{Fe}^{2+}$  как в первой, так и во второй степени, но во всех случаях рассматривается влияние на скорость процесса окисления только концентрация растворенного в воде кислорода.

На основании анализа литературных данных был выбран метод принудительной аэрации с последующим фильтрованием, сформулированы цель и задачи исследования.

**Глава 2. Методическая часть.** Содержит методики приготовления модельных растворов с различным содержанием  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ .

Представлены методики определения рН, содержания ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и общего железа в модельных растворах с использованием спектрофотометра СФ-2000.

Приведена методика определения концентрации растворенного в воде кислорода и методика определения размеров диспергированных в воде пузырьков воздуха, полученных в результате барботирования.

Приведены схемы и описания, разработанных и созданных экспериментальных установок для изучения процесса ультрафильтрации соединений железа с последующей регенерацией блока разделения, а также установки для проведения барботирования с использованием керамических мелкопористых трубок. Представлены разработанные методики проведения эксперимента и регенерации фильтрующих элементов. Приведен план эксперимента для определения оптимальной модификации керамической трубчатой мембраны для аэрации. Выведена формула для расчета поверхности контакта фаз «вода-воздух» в технологической ячейке с изменяемой геометрией.

### **Глава 3. Результаты экспериментов и их обсуждение.**

Для проведения исследований зависимости скорости процесса окисления ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в воде от удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» и возможных дальнейших путей оптимизации процесса очистки воды от железа методом принудительной аэрации с последующим фильтрованием были выбраны отечественные

керамические мелкопористые трубчатые мембраны марки АкваКонМет (АКМ 1.4) фирмы ООО «Генос».

Исследование зависимости изменения концентрации железа в фильтрате от удельного расхода воздуха для двухслойной мембраны показало, что оптимальным удельным расходом воздуха в данных условиях является  $0,25 \text{ л}_{\text{возд.}}/\text{л}_{\text{воды}}$ , так как при дальнейшем увеличении расхода, а, следовательно, и энергозатрат, существенного снижения концентрации не наблюдается.

Эксперименты с разным количеством нанесенных слоев (рис.1) показали, что оптимальным является нанесение двух слоев, т.к. при нанесении трех и более слоев расход воздуха при фиксированном рабочем давлении уменьшается, а для того, чтобы достичь того же расхода воздуха через трех- и четырехслойные мембраны, необходимо большее давление. При этом концентрация железа в фильтрате уменьшается незначительно. Трёх- и четырехслойные мембраны обладают слишком большим гидравлическим сопротивлением и применение их для барботаж нецелесообразно, т.к. необходимо увеличить давление в 2-3 раза и более.

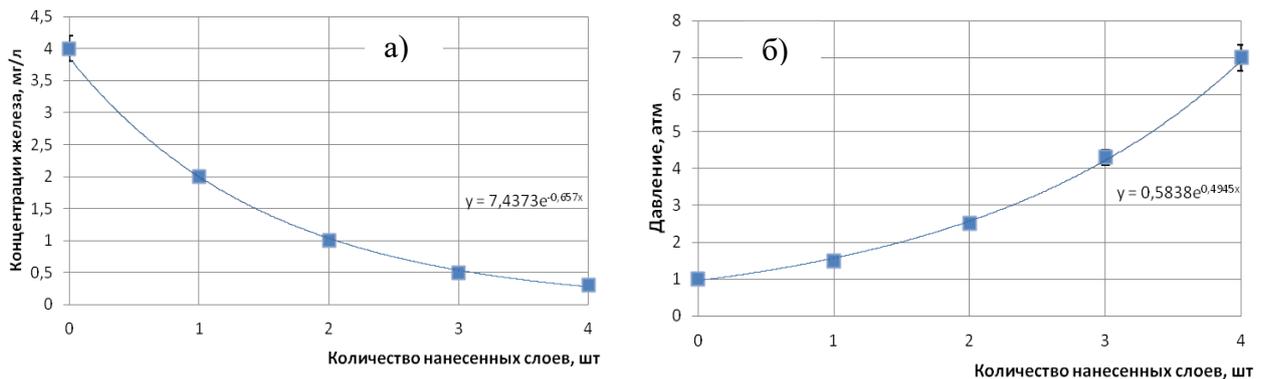


Рисунок 1 - Зависимость концентрации железа в фильтрате (а) и давления (б) от числа нанесенных слоев при фиксированных расходах барботируемого воздуха и воды.

На основе экспериментов была выбрана оптимальная модификация керамической мембраны с наружным диаметром 10 мм и двумя нанесенными селективными слоями мелкодисперсного оксида алюминия.

В результате экспериментов по окислению растворенного в воде железа посредством барботирования воздуха было установлено, что при постоянных концентрациях  $\text{Fe}^{2+}$  и кислорода скорость процесса окисления железа возрастает при интенсификации процесса аэрации.

Экспериментально показали, что на скорость окисления ионов  $\text{Fe}^{2+}$  влияет не газосодержание, а величина удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух». В дальнейшем было изучено влияние удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» на скорость процесса окисления  $\text{Fe}^{2+}$ .

На основании этого было сделано предположение, что окисление ионов  $Fe^{2+}$  происходит не только в объеме, но и на границе раздела газообразной и жидкой фазы, т.е. имеет гомогенную и гетерогенную составляющую.

Зависимости концентрации ионов  $Fe^{2+}$  от времени обработки воды при различных удельных поверхностях контакта фаз «вода-воздух» для начальных концентраций железа 5 мг/л, 10 мг/л и 15 мг/л представлены на рисунках 2а, 2б и 2в соответственно.

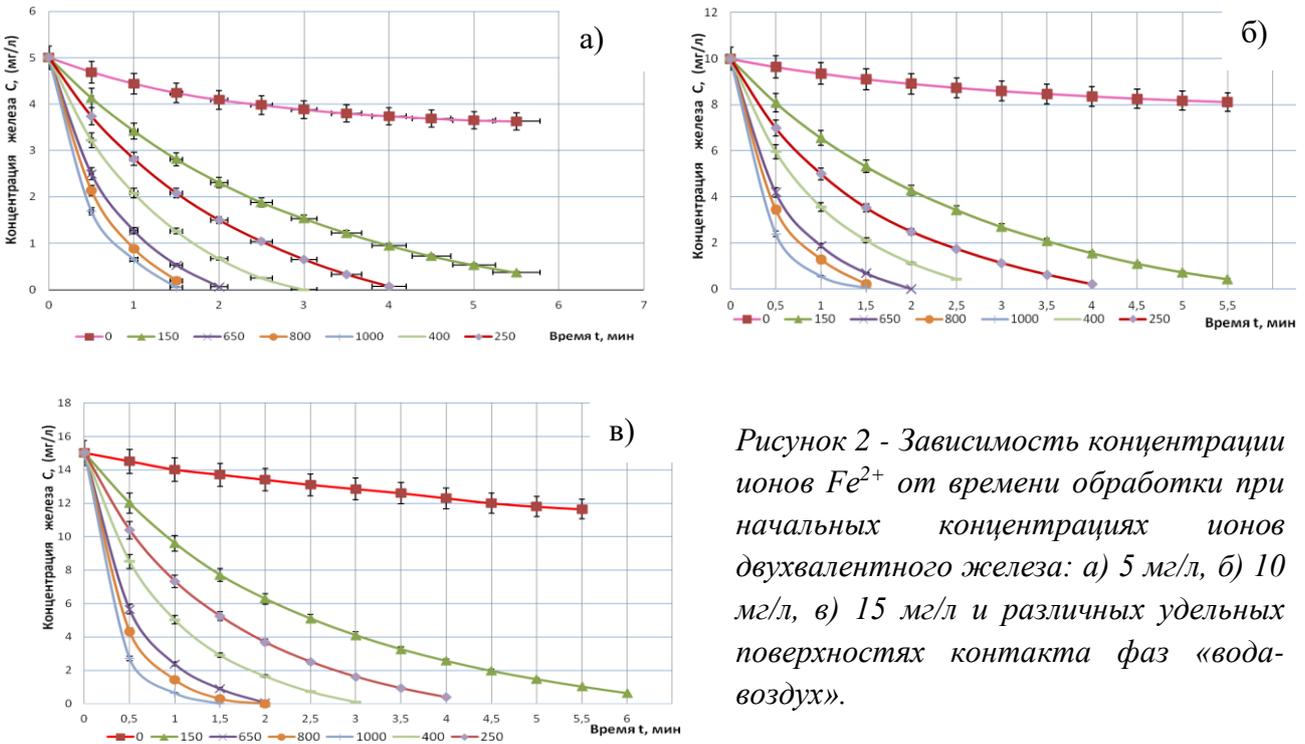


Рисунок 2 - Зависимость концентрации ионов  $Fe^{2+}$  от времени обработки при начальных концентрациях ионов двухвалентного железа: а) 5 мг/л, б) 10 мг/л, в) 15 мг/л и различных удельных поверхностях контакта фаз «вода-воздух».

Изменение концентрации ионов  $Fe^{2+}$  при удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» равной нулю, происходит за счет гомогенной составляющей процесса.

Характер представленных зависимостей демонстрирует существенно больший вклад в суммарную скорость процессов окисления ионов  $Fe^{2+}$  его гетерогенной составляющей.

Вычитая убыль концентрации железа за счет гомогенной составляющей процесса окисления из суммарной убыли концентрации, был определен вклад в суммарную убыль концентрации железа только гетерогенной составляющей процесса. Таким образом, были построены зависимости убыли концентрации железа только за счёт гетерогенной составляющей процесса во времени для различных удельных площадей контакта фаз «вода-воздух» при различных начальных концентрациях железа (5 мг/л, 10 мг/л и 15 мг/л). На рисунке 3 приведены зависимости, полученные при начальной концентрации железа 5 мг/л.

Параметры барботаж в экспериментах были подобраны таким образом, что рассчитанные удельные поверхности раздела фаз «вода-воздух» составляли соответственно  $150 m^2/m^3$ ,  $250 m^2/m^3$ ,  $400 m^2/m^3$ ,  $650 m^2/m^3$ ,  $800 m^2/m^3$  и  $1000 m^2/m^3$ .

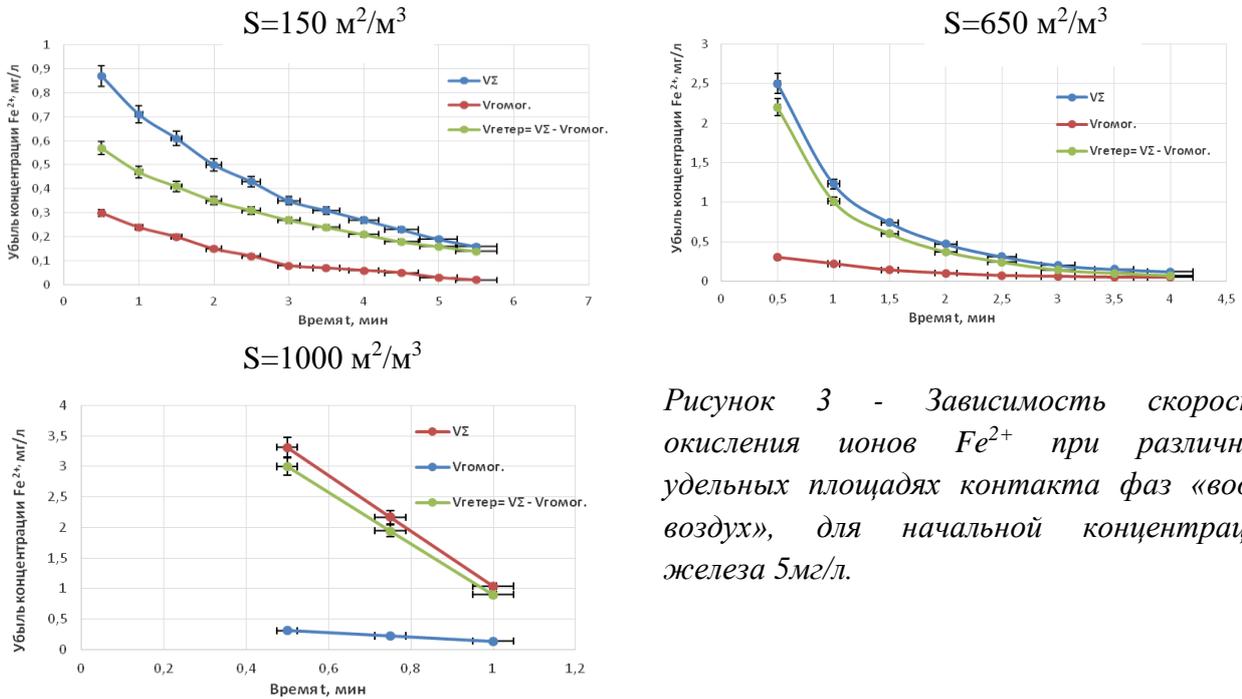
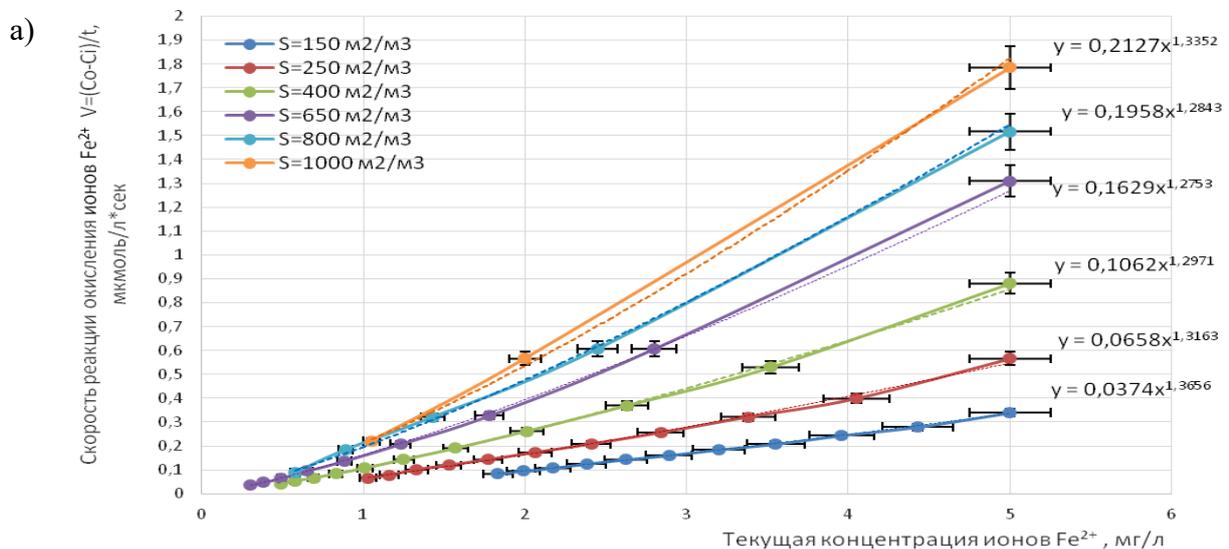


Рисунок 3 - Зависимость скорости окисления ионов  $Fe^{2+}$  при различных удельных площадях контакта фаз «вода-воздух», для начальной концентрации железа 5 мг/л.

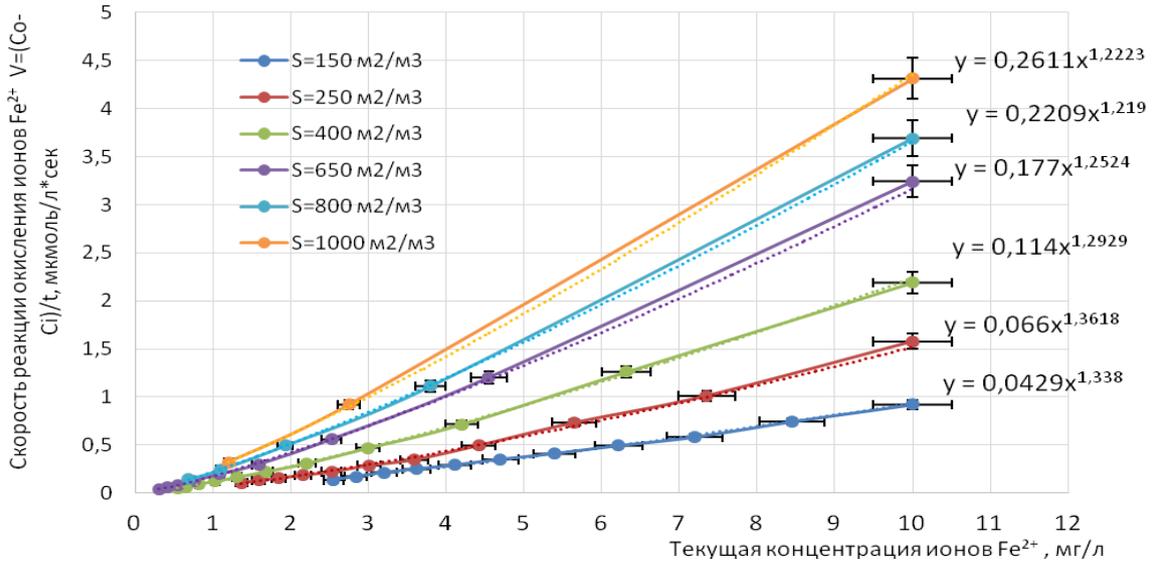
Схожие закономерности были получены и для суммарной скорости процесса окисления железа и её различных составляющих для разных удельных площадей контакта фаз «вода-воздух» при начальных концентрациях железа 10 мг/л и 15 мг/л.

Как видно из графиков, что чем больше начальная концентрация ионов  $Fe^{2+}$ , тем существеннее убыль концентрации ионов  $Fe^{2+}$  и тем интенсивнее идет окисление, особенно при больших удельных площадях контакта фаз.

С учетом разделения процесса окисления  $Fe^{2+}$  на составляющие была построена зависимость скорости гетерогенной составляющей процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  от текущей концентрации  $Fe^{2+}$  для исходных концентраций 5 мг/л, 10 мг/л и 15 мг/л в модельных растворах при различных  $S_{уд}$ , которая представлена на рисунке 4.



б)



в)

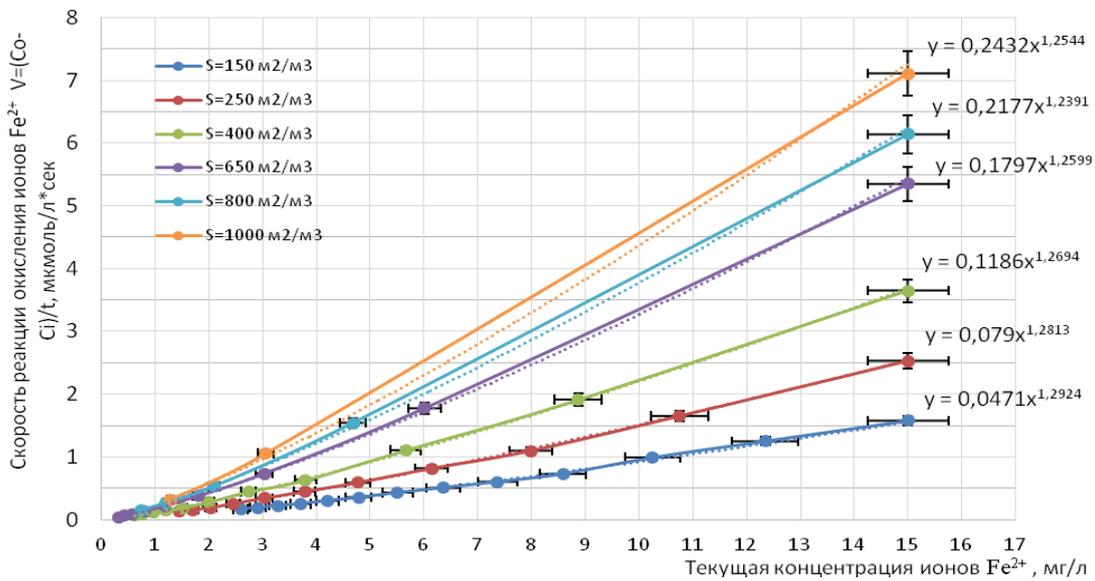


Рисунок 4 - Зависимость скорости гетерогенной составляющей процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  от их текущей концентрации при различных удельных поверхностях контакта фаз «вода-воздух» с начальной концентрацией ионов  $Fe^{2+}$  а) 5 мг/л, б) 10 мг/л, в) 15 мг/л.

Данные зависимости имеют степенной характер, где  $x$  – это текущая концентрация ионов  $Fe^{2+}$  в мг/л. Показатель степени для всех кривых близок к 1.3, (что коррелирует с литературными данными), а коэффициент увеличивается с увеличением удельной площади контакта фаз «вода-воздух».

Получена зависимость скорости гетерогенной составляющей процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  от удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» для различных концентраций железа при исходных концентрациях железа в модельных растворах 5 мг/л, 10 мг/л и 15 мг/л (рис. 5).

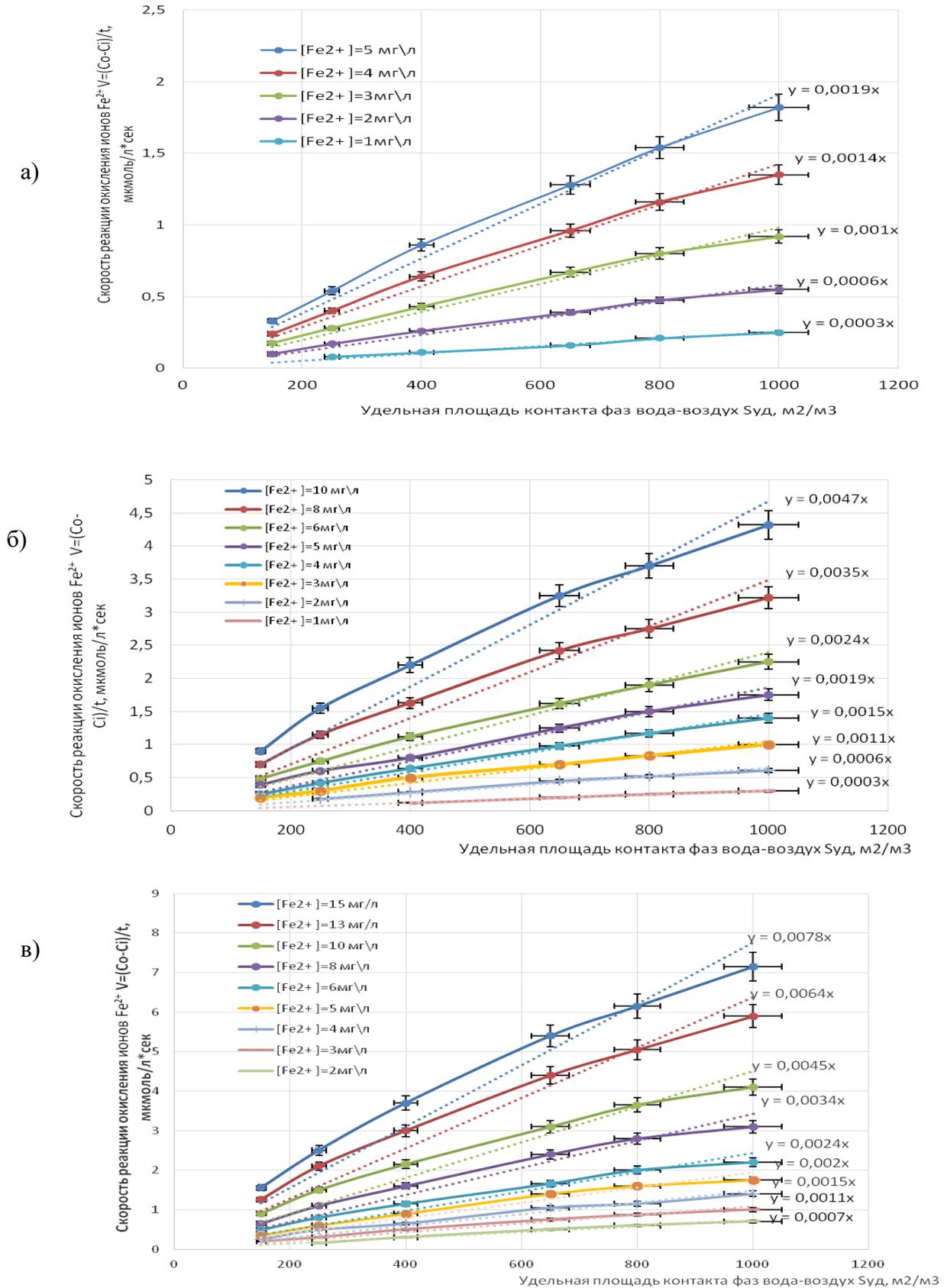


Рисунок 5 - Зависимость скорости гетерогенной составляющей процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  от удельной площади контакта фаз «вода-воздух» для различных концентраций железа при начальной концентрации ионов  $Fe^{2+}$  в модельном растворе а) 5 мг/л, б) 10 мг/л, в) 15 мг/л

При увеличении удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» скорость реакции растет. Данные зависимости аппроксимированы как прямые выходящие из начала координат, что есть проявление физического смысла данной зависимости – при нулевой поверхности контакта фаз «вода-воздух» скорость гетерогенной составляющей процесса окисления равно нулю. Можно заметить тенденцию нелинейности, которая возникает при многократном увеличении удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» и прямой пропорциональности нет, а зависимость будет иметь вид натурального логарифма. Однако для площадей, достигаемых барботированием, зависимость можно считать близкой к линейной.

Далее были сопоставлены данные о зависимости скорости гетерогенной составляющей процесса окисления  $Fe^{2+}$  от удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух» для текущей концентрации железа 5 мг/л при различных начальных концентрациях  $Fe^{2+}$  в модельных растворах 5 мг/л, 10 мг/л и 15 мг/л и представлены графически на рисунке 6.

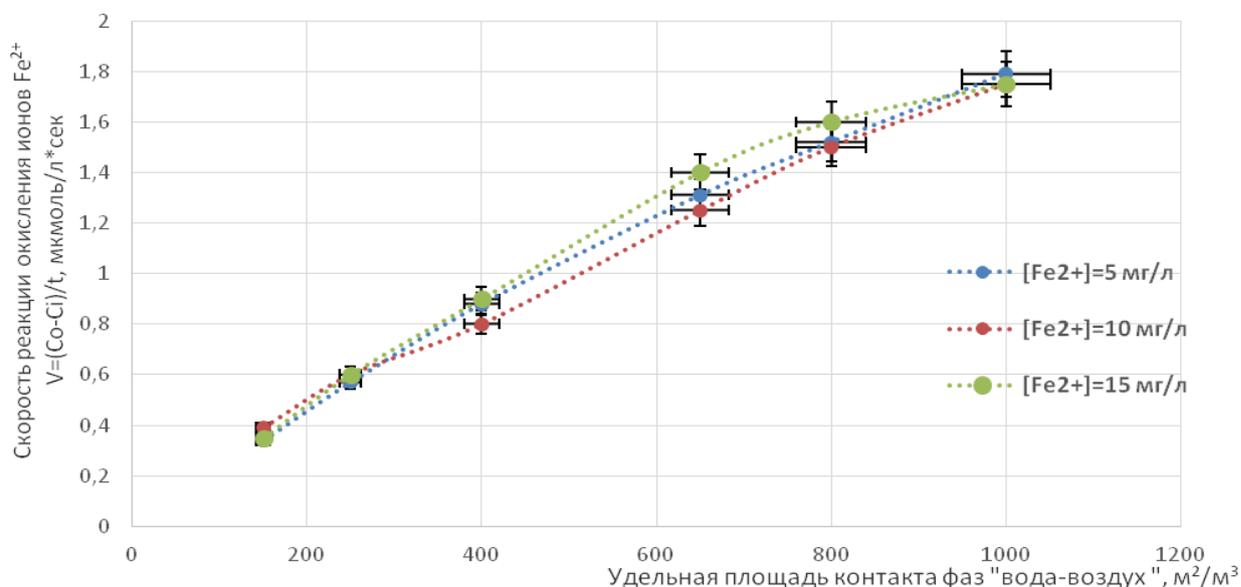


Рисунок 6 - Зависимости скоростей гетерогенной составляющей процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  от удельных площадей контакта фаз «вода-воздух» для текущей концентрации ионов железа 5 мг/л при их различных начальных концентрациях в модельном растворе.

Из рисунка 6 видно, что данные, полученные для трех различных видов модельных растворов, хорошо коррелируются между собой с указанной на графике стандартной погрешностью. Тем самым было показано, что скорость гетерогенной составляющей реакции независимо от начальной концентрации и других параметров процесса одинакова для разных модельных растворов, что позволило подтвердить правильность выдвинутой гипотезы о зависимости гетерогенной составляющей скорости процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  в воде от удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух». В дальнейшем было осуществлено математическое моделирование этой зависимости.

Модель написана с помощью методов регрессионного анализа, а именно множественной регрессии, параметры уравнения регрессии определялись с помощью метода наименьших квадратов. По результатам моделирования для гетерогенной составляющей процесса математически получена зависимость концентрации ионов  $Fe^{2+}$  в растворе от начальной концентрации ионов  $Fe^{2+}$ , удельной поверхности контакта фаз и времени обработки, и получена формула для расчета скорости гетерогенного процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$ :

$$V = \Delta C / \Delta t = 7 \times 10^{-4} \times C^{1.3} \times S^{0.84},$$

где  $V$  – скорость реакции, мкмоль/(л\*сек),  $C$  – концентрация ионов  $Fe^{2+}$ , мг/л,  $S$  – величина удельной площади поверхности контакта фаз «вода-воздух»,  $m^2/m^3$ .

По приведенной математической модели зависимости скорости гетерогенного процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  были построены (рис.7) зависимости изменения концентрации ионов  $Fe^{2+}$ , которые хорошо коррелируются с зависимостями, представленными на рис.3.

Пример расчётных зависимостей для начальной концентрации железа 5 мг/л приведён на рисунке 7. Расчетные зависимости также получены и для начальных концентраций железа 10 мг/л и 15 мг/л и представлены в диссертации.

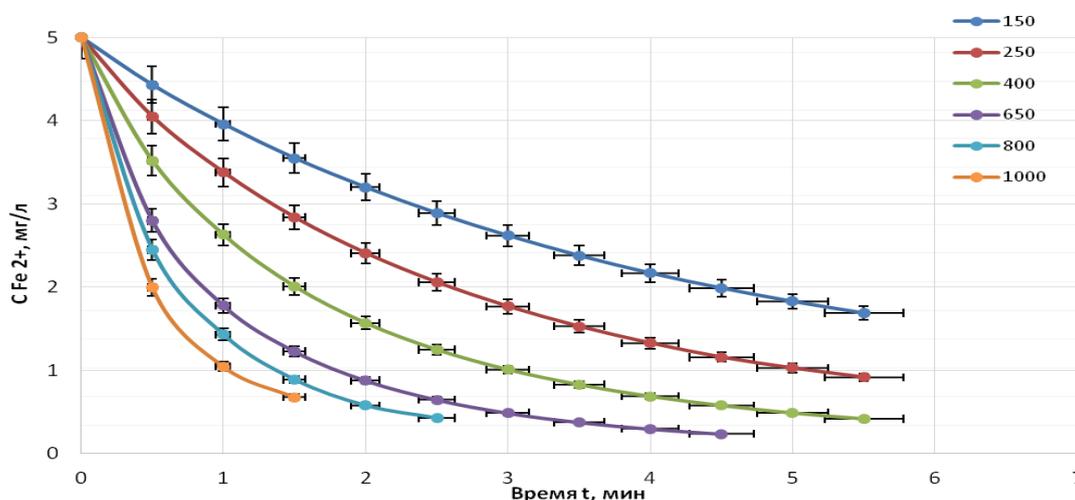


Рисунок 7 - Расчетные зависимости изменения во времени концентрации ионов  $Fe^{2+}$  при различных удельных поверхностях контакта фаз «вода-воздух» за счет протекания только гетерогенного процесса.

Была получена зависимость, связывающая текущую концентрацию ионов  $Fe^{2+}$  в растворе с начальной концентрацией ионов  $Fe^{2+}$ , удельной площадью контакта фаз и временем обработки -  $C_k = f(C_n; t; S)$ . Уточненная в данной работе формула позволяет учитывать при проектом расчете удельную площадь контакта фаз «вода-воздух», а,

следовательно, и вклад гетерогенной составляющей процесса в скорость процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$ .

Для организации технологического процесса водоочистки необходимо отделить нерастворимые соединения железа. Для этого использовались такие же керамические мембраны, что и на стадии аэрации.

В связи с этим были изучены основные режимы организации процесса фильтрации через мембраны (при  $t = 20^{\circ}C$ , давлении  $P = 2,5$  атм и концентрации железа в исходном растворе 10 мг/л), а именно режим с поперечным потоком и тупиковый режим. Проведенные исследования показали, что тупиковая схема более экономична и проста в эксплуатации и поэтому именно она была выбрана для проведения дальнейших экспериментов.

В результате экспериментов по регенерации мембран была показана принципиальная возможность регенерации керамических мелкопористых трубчатых мембран после процесса фильтрации соединений железа. Разработан метод реагентной регенерации, но наиболее простым и экологически рациональным методом регенерации признан метод безреагентной противоточной регенерации, также разработанный в ходе выполнения данной работы, рекомендованный для ежедневной регенерации. Для ППР рекомендована реагентная регенерация гипохлоритом натрия с добавлением ПАВ для быстрого восстановления фильтровальных свойств мембраны.

С учетом полученных экспериментальных данных работы керамических мелкопористых трубчатых мембран была разработана и создана пилотная установка, где одни и те же мембраны использовались и для процесса окисления железа, и для процесса его последующей фильтрации.

**Глава 4. Опытная установка технологической очистки воды от железа.** Описана разработанная при поддержке Фонда содействия инновациям технология обезжелезивания природных вод, примененная для технологического процесса специальной водоподготовки на ЗАО «Орионис», который заключается в переводе железа в нерастворимую форму с последующим фильтрованием образовавшихся частиц. При фильтрации одна часть потока воды проходит через керамические мембраны с образованием на их поверхности осадка. Другая часть потока воды возвращается в начало технологического цикла, т.к. содержащиеся в воде частицы коллоидных соединений трехвалентного железа являются катализатором окисления ионов двухвалентного железа.

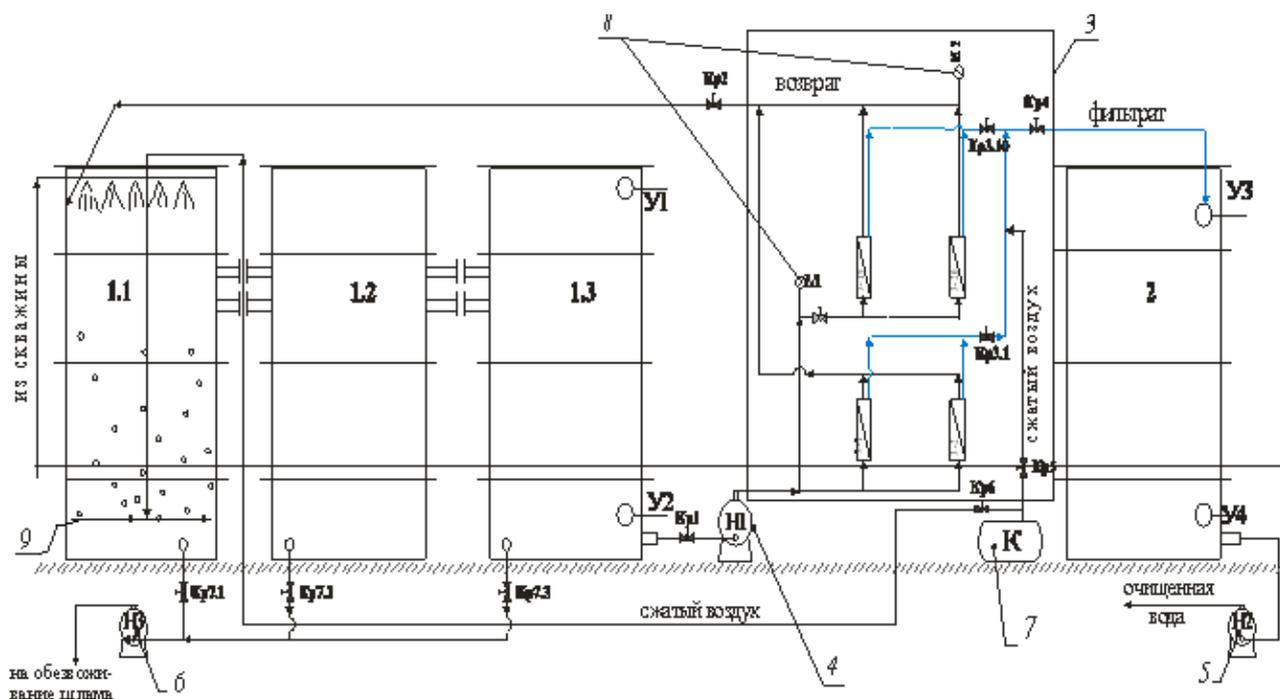
Данная технология является наиболее эффективной при промышленной реализации, т.к. позволяет снизить концентрации железа, марганца, сероводорода и уголекислоты, а также комплексно очистить воду по всем требуемым показателям, в том числе и микробиологическим.

Отдувку сероводорода и дополнительное насыщение воды кислородом проводили мелкопузырьковым барбатированием сжатого воздуха, поступающего из ресивера компрессора (К) с фильтром и маслоулавливающим устройством (рис. 8). Для

барботирования используется специально разработанный барботер, обеспечивающий необходимую расчетную удельную поверхность контакта фаз «вода-воздух».

В соответствии со схемой очистки природной воды, представленной на рисунке 8, очищенная от механических примесей артезианская вода с расходом до  $15 \text{ м}^3/\text{час}$  подается в аэрационную емкость (поз.1.1) для насыщения воды кислородом и отдувки сероводорода во время мелкопузырчатого барботирования сжатым воздухом, подаваемого через аэрационное устройство конструкции ООО «Генос» - аэратор (поз.9).

Аэратор включает в себя шесть аэрационных элементов в виде пористых керамических трубок длиной по 800 мм с наружным диаметром 10 мм при толщине стенки 2 мм, помещенных в трубы-держатели с торцевым уплотнением. Аэрационные элементы соединяются между собой радиально в виде «звездочки» и опускаются в нижнюю часть емкости (поз.1.1) на штанге, по которой подается сжатый воздух. Площадь рабочей поверхности составила  $0,15 \text{ м}^2$ . В аэратор подавался воздух, очищенный от масла и пыли. После включения аэратора устанавливали заданный расход воздуха, а, следовательно, и требуемую удельную поверхность контакта фаз «вода-воздух» для заданной производительности.



1.1-1.3 - резервуары исходной воды РИВ; 2 - резервуар чистой воды РЧВ; 3 - блок ультрафильтрации БУФ (1-я очередь на  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), 4 - рециркуляционный насос БУФ; 5 - насос раздачи чистой воды; 6 - шламовый насос; 7 – компрессор (К), 8 – манометры (М1 - М6), 9 – аэратор, Кр – краны регулирующие.

*Рисунок 8 - Принципиальная схема станции водоподготовки (СВП) ЗАО «Орионис» (пос. Ложки, Солнечногорского района Московской области).*

В емкостях (поз.1.1-1.3) происходит окисление двухвалентного железа кислородом воздуха до нерастворимых соединений. Наиболее крупные частицы оседают на дно емкостей. Для удаления мелких частиц, микроорганизмов и снижения содержания других вредных компонентов, т.е. комплексной очистки, вода из расходной емкости (поз.1.3) направляется в блок ультрафильтрации (БУФ). Образующийся в этом блоке фильтрат представляет собой очищенный от железа, сероводорода и взвесей целевой продукт - питьевую воду, которая собирается в резервуаре чистой воды (поз.2). Осадок с поверхности трубчатых фильтрующих элементов периодически удаляется обратной продувкой аппаратов сжатым воздухом с последующей промывкой артезианской водой. Разработана и апробирована методика регенерации керамических мембран от железосодержащего шлама.

### **Глава 5. Выводы**

1. Впервые показано, что скорость процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  в воде при барботаже воздуха определяется скоростями двух параллельно протекающих процессов:

- гомогенного процесса окисления растворенным в воде кислородом;
- гетерогенного процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  на границе раздела фаз «вода-воздух».

2. Установлена зависимость скорости гетерогенного процесса окисления ионов  $Fe^{2+}$  от удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух».

3. Выявлено влияние режимов процесса барботирования воздуха и конструктивных параметров установки обезжелезивания на величину удельной поверхности контакта фаз «вода-воздух».

4. Созданы оригинальные экспериментальные установки для проведения исследований и методики к ним.

5. Разработана методика регенерации микрофильтрационных мембран после процесса обезжелезивания.

6. На основании полученных экспериментальных данных по окислению ионов  $Fe^{2+}$  и уточнения формулы скорости реакции, а именно выделения гетерогенной составляющей, был сформулирован алгоритм расчета технологических режимов и конструктивных параметров, позволяющий спроектировать наиболее эффективную (для решения каждой конкретной задачи) установку для очистки вод, с возможностью оптимизации по различным параметрам (материалоемкость, энергоемкость, стоимость очистки, производительность, занимаемая площадь).

7. Разработана технология очистки железосодержащих природных вод, включающая стадии окисления и разделения и создана промышленная установка для реального объекта; проведен её пуск в эксплуатацию и получены технико-экономические показатели. Имеется Акт внедрения, подтверждающий эффективность и целесообразность данной технологии.

**Список основных опубликованных работ по теме диссертации:**

1. Аверина Ю.М., Терпугов Г.В., Комягин Е.А., Мынин В.Н., Ляпин И.Ф., Терпугов Д.Г., Лопатюк Ю.Ю. Пути решения проблемы очистки сточных вод от тяжелых и радиоактивных металлов // Экология и промышленность России.- 2008. ноябрь. - С. 21-23.
2. Аверина Ю.М., Павлов Д.В., Вараксин С.О. Комплексный подход к проблеме обезжелезивания воды // Водоочистка. - 2010. №12, декабрь. - С. 23-26. - Издательский дом «Панорама», ISSN 7420-7381
3. Аверина Ю.М., Павлов Д.В., Вараксин С.О. Обезжелезивание воды с замкнутым циклом водопользования // Вода: Химия и экология – 2011. №2 (февраль) – С. 18-22.
4. Аверина Ю.М., Павлов Д.В., Вараксин С.О. Современная ресурсосберегающая система очистки промышленных сточных вод // Водоочистка – Москва, 2012. - №1 (январь) – С. 10-14.
5. Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю., Меньшиков В.В., Аснис Н.А., Ваграмян Т.А., Юрьева Г.А., Мамателашвили М.Т. Окисление двухвалентного железа в различных водных средах // Химическая промышленность сегодня – 2013. - №10 (октябрь) – С. 36-41.
6. Аверина Ю.М., Сальникова О.Ю., Труберг А.А., Терпугов Г.В., Кабанов О.В., Кацерева О.В., Комляшов Р.Б. Обезжелезивание природных вод с применением наномембран // Успехи в химии и хим. технологии – 2009. - Том. XXIII, №2 (95) - С. 14-17.
7. Аверина Ю.М., Труберг А.А., Терпугов Г.В., Кабанов О.В., Кацерева О.В., Комляшов Р.Б., Куренков Р.А. Очистка сточных вод от тяжелых и радиоактивных металлов // Успехи в химии и химич. технологии – 2009. - Том. XXIII, №2 (95) - С. 18-21.
8. Аверина Ю.М., Никитин В.А., Павлов А.А., Терпугов Г.В. Обезжелезивание природных вод с применением наномембран // Сборник трудов 8 Междунар. Научн.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» - 2009. ISBN 978-5-7422-2398-6, Спб.: Изд-во Политех. ун-та, С. 207-208.
9. Аверина Ю.М., Терпугов Г.В. Обезжелезивание природных вод с применением наномембран//Сборник материалов IX Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи НТТМ-2009, Всероссийского конкурса научно-технического творчества молодежи – Мск ОАО «ГАО ВВЦ» 2009г.: С. 163-165.
10. Averina J. M. , Terpugov G. V. Deironing of natural water using nanomembranes [P3.79] (Mendeleev Univ. Chem. Technol. Russia, Moskva, RU) [1124] // Materials of the 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010 and the 7th European Congress of Chemical Engineering ECCE-7, Prague/Czech Republic, 28 August – 1 September 2010, Published by: Process Engineering Publisher. Ing. Jan Novosad Krohova 75/2212, 160 00 Praha 6, Czech Republic / First Edition, 2010 ISBN 978-80-02-02247-3 Summaries 2, Separation processes, P 573-574.
11. Аверина Ю.М., Терпугов Г.В., Никитин В.А., Канделаки Г.И. Керамические трубчатые мембраны в качестве диспергирующего материала // Успехи в химии и химической технологии – 2010. - Том. XXIV, №2 (107) - С. 47-51.

12. Аверина Ю.М., Терпугов Г.В., Канделаки Г.И., Быков Е.Д. Обезжелезивание воды в процессе организации замкнутого цикла водоподготовки в лакокрасочной промышленности // Технология лакокрасочных покрытий: сборник научных трудов / Науч.-исслед. ин-т лакокрасоч. покрытий с опыт. машиностроит. заводом «Виктория»; – Москва: «Пейнт-Медиа», 2011. – С. 42-45.
13. Аверина Ю.М., Шумова В.С., Меньшиков В.В., Тыквинский С.Ю., Субчева А.Н. Эколого-экономические аспекты рационального водопользования // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том. XXVII, №1 (141) – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. - С. 133-136. ISSN 1506-2017.
14. Аверина Ю.М., Меньшиков В.В., Субчева А.Н. Разработка энергосберегающей технологии очистки воды от железа и других примесей // ЛЭРЕП-8-2014 сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции 19-20.11.2014. – С. 232-234. ISSN 978-5-4426-0001-8.
15. Аверина Ю.М., Меньшиков В.В., Курбатов А.Ю. Изучение технологии окисления растворенного в природных водах железа, методом принудительной аэрации с применением керамических мембран // Сборник научных работ «Современные концепции научных исследований» Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) ежемесячный научный журнал часть 6 (15), 2015. – С. 6-10. ISSN 2411-6467
16. Аверина Ю.М., Алдошина О.Н. Разработка организационно-экономической модели бизнес-процесса создания систем водоподготовки и водоочистки для предприятий московской области// Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том. XXVI, № 11(140) – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012. - С. 81-84
17. Аверина Ю.М., Меньшиков В.В. Практическое изучение основ технологии обезжелезивания природных вод до питьевого качества различными режимами фильтрации с применением керамических мелкопористых трубчатых мембран// Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том. XXIX, №1 (160) – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. - С. 82-85. УДК: 628.162.1(043)
18. Аверина Ю.М. «Опыт коммерциализации РИД и организации инновационного производства» Тезисы докладов Научного Форума БРИКС в рамках саммита БРИКС, Международной научно-практической конференции «Вода: оборудование, технологии, материалы в промышленности и энергетике», 2015 г., Санкт-Петербург, С. 39-40.
19. ПАТЕНТ на изобретение № 2400295 «Способ обработки жидкостей газами», Заявка №20008116341, Приоритет изобретения 28.04.2008, Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 27.09.2010 / Авторы: Аверина Ю.М., Александрин А.П., Кабанов О.В., Комягин Е.А., Ляпин И.Ф., Мынин В.Н., Петров В.В., Скопин А.Л., Терпугов Г.В., Терпугов Д.Г.
20. ПАТЕНТ «Способ очистки воды», РФ № 2525177, приоритет изобретения 28.11.2012 / Курбатов А.Ю., Аснис Н.А., Баталов Р.С., Борткевич С.В., Аверина Ю.М., Ваграмян Т.А.
21. Ноу-Хау «Способ очистки железосодержащих вод сложного состава мембранными методами» приказ ФГУП ВПО РХТУ им. Д.И. Менделеева №109-А от 28.04.2011.