

На правах рукописи

КУРБАТОВ АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ
ЖЕЛЕЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛНОВЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

02.00.04 – Физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ваграмян Тигран Ашотович
заведующий кафедрой 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”

кандидат технических наук, доцент
Свитцов Алексей Александрович
директор научно-производственной
фирмы “Гелла-ТЭКО”

Ведущая организация: Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана

Защита диссертации состоится 24 сентября 2014 г. в 11 часов 00 минут в
аудитории 443 (конференц-зал) на заседании диссертационного
совета Д. 212.204.05 в Российском химико-технологическом университете
имени Д.И. Менделеева по адресу: 125047 г. Москва, Миусская пл., 9.

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

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.204.05

Яровая О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. По прогнозам ООН, к середине третьего десятилетия XXI в. более 4 млрд. человек будут испытывать нехватку воды питьевого качества, что связано как с изменением климата, так и с деятельностью человека. В настоящее время около 90% поверхностных и 30% подземных вод, забираемых для нужд водоснабжения, подвергаются дополнительной очистке.

В большинстве случаев подготовка воды для питьевого водоснабжения предусматривает очистку её от железа.

Наиболее дешевым, технологически простым и экологически рациональным способом очистки воды от железа можно считать окисление содержащихся в ней ионов Fe^{2+} кислородом воздуха с последующей фильтрацией.

Основным недостатком этого способа является низкая скорость окисления ионов Fe^{2+} . Поэтому увеличение скорости окисления ионов Fe^{2+} в природной воде за счет использования волновой технологии является актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 10905р/13948 от 20.08.2012 г., реализованного по программе "СТАРТ" Фонда Содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

- **Цель работы.** Интенсификация процесса очистки воды от растворенных соединений железа с использованием волновых гидродинамических устройств (ВГУ).

Научная новизна. Впервые установлено, что волновая обработка воды в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, значительно ускоряет процесс окисления ионов Fe^{2+} .

Разработан акустический способ регистрации наличия сонолюминесценции при волновой обработке воды, с использованием которого была оптимизирована конструкция ВГУ, позволившая добиться стабильного возникновения сонолюминесценции в процессе волновой обработки воды при заданных гидродинамических режимах.

Установлено, что скорость окисления ионов Fe^{2+} в воде после волновой обработки в значительной степени зависит от ее минерального состава.

Практическая значимость. Разработан экологически безопасный способ очистки воды от растворенного железа с использованием волновой обработки с помощью ВГУ, работающих в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, позволяющем повысить скорость окисления ионов Fe^{2+} в 3-4 раза по сравнению с волновой обработкой при схожих гидродинамических параметрах без использования режима сонолюминесценции.

Создана опытная установка для очистки воды от железа, работающая при давлении до 1,5 МПа, позволяющая достигать требуемых по СанПиН 2.1.4.1074-01 концентраций железа

в воде после волновой обработки с последующей фильтрацией на серийном песчаном фильтре.

Установка прошла опытно-промышленные испытания на очистных сооружениях экспериментальной базы “Дашковка” Могилевской области Республики Беларусь с положительным результатом.

Результаты диссертационного исследования используются в инновационном проекте по очистке воды в рамках реализации Государственного Контракта №10905р/13948 от 20.08.2012 г. между Обществом с ограниченной ответственностью "БИНАКОР-ХТ" и Фондом Содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Предложенная схема очистки воды и полученные результаты могут быть использованы для создания экологически безопасных станций подготовки питьевой воды и воды для хозяйственно-бытового назначения.

На защиту выносятся:

- экспериментальные данные по влиянию эжектирования воздуха и параметров волновой обработки водо-воздушной смеси на скорость процесса окисления ионов Fe^{2+} ;
- результаты исследования влияния волновой обработки в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, на скорость окисления ионов Fe^{2+} в воде и водо-воздушной смеси;
- разработка конструкции опытной установки очистки воды от железа с исходной концентрацией ионов Fe^{2+} до 15 мг/л, позволяющей обеспечить выполнение требуемых норм ПДК по содержанию железа в воде.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы представлены на Международной конференции “Новости научного прогресса”. – София, 2013 г.; Международной научно-практической конференции “Инновационные процессы и технологии в современном мире”. – Уфа, 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, 5 из которых в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Объём и структура работы. Диссертационная работа изложена на 119 страницах, содержит 32 рисунка, 3 таблицы и состоит из введения, обзора литературы, методик эксперимента, экспериментальной части, выводов и библиографического списка из 153 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Кратко рассмотрены основные причины, вызывающие необходимость очистки воды от железа. Обоснована актуальность и сформулирована цель работы.

Раздел 1. Литературный обзор. На основе анализа литературных данных сделан вывод о том, что наиболее простым, дешевым и экологически рациональным способом удаления железа из природных вод можно считать способ окисления ионов Fe^{2+} кислородом воздуха с последующей фильтрацией образовавшихся нерастворимых соединений железа. Недостатком данного способа является необходимость длительной выдержки обрабатываемой воды в контакте с воздухом, насыщающим ее кислородом. Скорость процесса окисления ионов Fe^{2+} , находящихся в воде, зависит от концентрации растворенного в воде кислорода и площади поверхности раздела фаз вода-воздух.

Сделано предположение о том, что ускорения процесса окисления ионов Fe^{2+} можно добиться за счет значительного увеличения площади контакта фаз вода-воздух, используя приемы волновой механики.

Теоретические основы волновой механики были заложены советскими учеными из Института машиноведения им. А.А.Благонравова АН СССР под руководством профессора Ганиева Р.Ф. в 80-х годах прошлого столетия. Ими была предложена принципиальная конструкция и разработан математический аппарат для расчета ВГУ, использующих энергию перекачиваемой жидкости для реализации волновых и кавитационных явлений в обрабатываемой среде, что позволяет существенно интенсифицировать протекающие в ней тепло- и массообменные процессы.

Обоснована перспективность выбора ВГУ для интенсификации процесса окисления ионов Fe^{2+} , находящихся в воде.

Раздел 2. Методическая часть. Приведена схема экспериментальной установки для проведения экспериментов по волновой обработке воды. Описаны методики определения содержания в воде ионов Fe^{2+} и общего железа с использованием спектрофотометра СФ-2000 (Россия).

Представлена методика приготовления модельных растворов. Приведена методика определения размеров диспергированных в воде пузырьков воздуха.

Указаны характеристики оборудования, использованного для регистрации спектра звуковых частот и сонолюминесценции, возникающих в процессе волновой обработки.

Описаны методики определения рН и измерения электропроводности обрабатываемой воды.

Раздел 3. Результаты экспериментов и их обсуждение. Для увеличения удельной поверхности контакта воды с воздухом использовали волновую обработку с помощью ВГУ, диспергирующих пузырьки воздуха в перекачиваемой водо-воздушной смеси.

При прохождении через ВГУ в обрабатываемой среде возникают пульсации давления с определенной частотой и амплитудой. Благодаря разрежению, создаваемому по оси потока жидкости в рабочей камере ВГУ, в процессе волновой обработки имеется возможность эжектировать атмосферный воздух непосредственно в ВГУ.

Для сравнения с обработкой водо-воздушной смеси было исследовано влияние режимов волновой обработки воды без эжектирования воздуха на скорость окисления ионов Fe^{2+} в модельном растворе. В качестве модельного раствора использовали дистиллированную воду насыщенную кислородом воздуха при температуре $22^{\circ}C$ с концентрацией Fe^{2+} 15 мг/л. При этом растворенного в воде кислорода вполне достаточно для полного окисления данного количества Fe^{2+} .

Исследования проводились на лабораторной установке, схема которой представлена на рисунке 1.

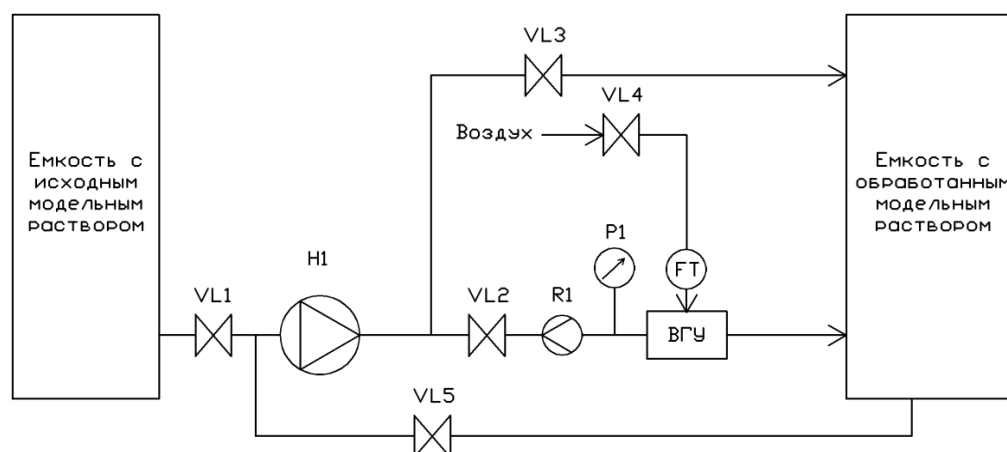


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

H1 – насос, *P1* – манометр, *VL1-VL5* – вентили, *FT* – ротаметр, *R* – расходомер, *ВГУ* – волновое гидродинамическое устройство

Основными факторами, определяющими характер процесса волновой обработки, являются скорость потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ и геометрические параметры последнего.

Из рисунка 2 видно, что скорость окисления ионов Fe^{2+} растет с увеличением скорости жидкости в тангенциальных каналах. Наилучший результат получен при скорости около 47-48 м/с, что соответствует максимально высокой скорости, которой удалось достичь на используемом насосе, развивающем давление до 1,5 МПа при расходе $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

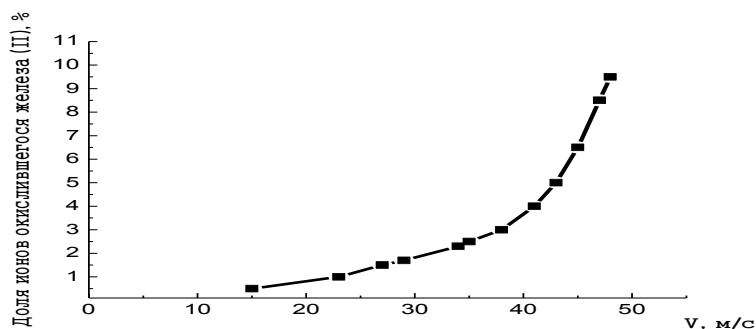


Рис. 2. Зависимость доли окислившихся ионов железа (II) от скорости потока в тангенциальных каналах ВГУ.

В ходе экспериментов по определению скорости окисления ионов Fe^{2+} было установлено, что при выдержке на воздухе воды, прошедшей волновую обработку, скорость окисления ионов Fe^{2+} в ней значительно превышает скорость естественного окисления при одинаковых удельных поверхностях контакта воды с воздухом (рис. 3).

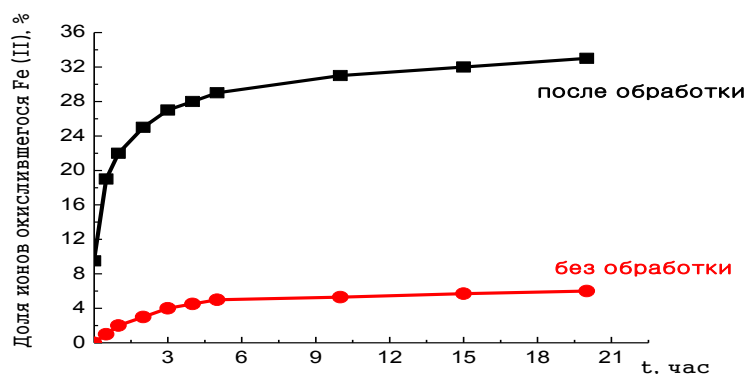


Рис. 3. Зависимость доли окислившихся ионов Fe^{2+} от времени выдержки на воздухе воды, подвергавшейся волновой обработке при скорости потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ 47- 48 м/с и воды, не подвергавшейся обработке

Возможно, это связано как с тем, что в процессе волновой обработки образуются не регистрируемые оптическим микроскопом микро-пузырьки воздуха, которые не всплывают длительное время, так и с частичным разрушением гидратных оболочек ионов железа и образованием химически активных радикалов и продуктов их рекомбинации.

В ходе экспериментов были измерены такие показатели воды как рН и электропроводность. Результаты показали, что в процессе волновой обработки показатель рН обрабатываемой воды не изменялся. Электропроводность воды после волновой обработки изменялась на 1-2% от первоначальных показаний, но уже через 5-10 минут конечное значение электропроводности принимало своё первоначальное значение.

После фильтрации на песчаном фильтре воды, прошедшей волновую обработку, также наблюдалось значительное уменьшение содержания ионов железа в сравнении с фильтрацией воды, не подвергавшейся волновой обработке.

На рисунке 4 представлена зависимость остаточного содержания ионов железа в воде после фильтрации через песчаный фильтр от линейной скорости фильтрации.

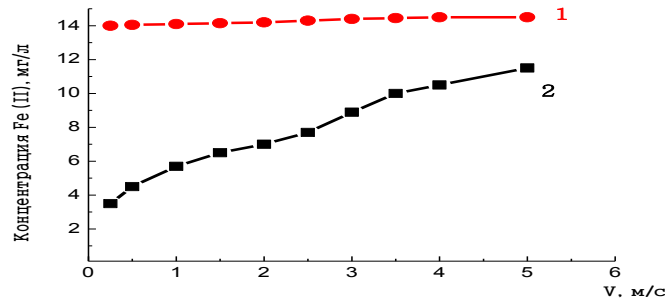


Рис. 4. Зависимость остаточного содержания ионов двухвалентного железа в воде от линейной скорости фильтрации на песчаном фильтре воды, подвергавшейся волновой обработке (кривая 2) при скорости потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ 47- 48 м/с и воды, не подвергавшейся обработке (кривая 1)

При скоростях фильтрации до 0,1 м/с содержание ионов железа в воде, подвергавшейся волновой обработке, снижается в 3-5 раз относительно исходной концентрации.

С целью ускорения процесса окисления содержащихся в воде ионов Fe^{2+} было исследовано влияние удельного расхода воздуха, эжектируемого в ВГУ, на скорость окисления ионов Fe^{2+} .

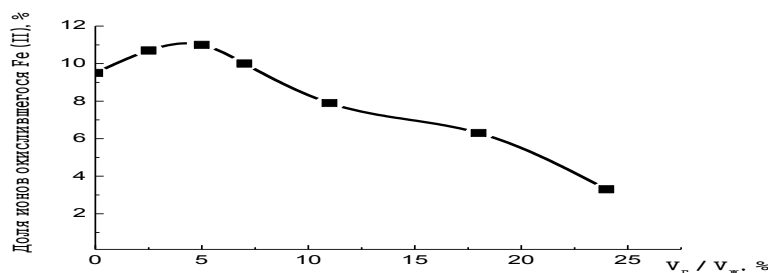


Рис. 5. Зависимость доли окислившихся ионов железа (II) от соотношения объемов газ/жидкость после волновой обработки при скорости потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ 47- 48 м/с.

Характер представленной зависимости объясняется тем, что при волновой обработке газо-жидкостной смеси с ростом удельного расхода воздуха происходит с одной стороны увеличение поверхности раздела фаз вода-воздух, с другой – уменьшение интенсивности кавитации.

Как видно из рисунка 5, оптимальным объемным соотношением воздуха к воде является 1:20 (т.е. 5% объема воздуха от объема жидкости). При увеличении доли воздуха эффективность окисления начинает уменьшаться в сравнении с экспериментами без эжектирования воздуха, что можно объяснить снижением плотности водо-воздушной смеси и интенсивности кавитационных процессов в гидродинамическом устройстве. Дальнейшее увеличение объемного соотношения воздуха к воде приводит к полному исчезновению кавитационных явлений в связи с тем, что увеличиваются демпфирующие свойства обрабатываемой многофазной среды.

С помощью микроскопа МБС-10, оснащенного приставкой для съемки фотографий МФУ и программного обеспечения “ImageScope” для анализа фотографий было установлено, что при оптимальном соотношении Г/Ж средний размер пузырьков диспергированного воздуха составил 10 мкм и средняя скорость их всплытия – $3 \cdot 10^{-3}$ м/с. В сравнении с литературными данными по барботированию воздуха через керамические мелкопористые трубчатые мембраны средний объем единичного пузырька диспергированного воздуха уменьшился в 40 раз, а скорость его всплытия – почти в 30 раз. Таким образом, при одинаковом удельном расходе воздуха поверхность контакта воды с воздухом после волновой обработки увеличилась более чем в 1000 раз. Однако это не привело к ожидаемому заметному ускорению процесса окисления ионов Fe^{2+} . Как видно из рисунка 2, увеличение скорости жидкости в тангенциальных каналах ВГУ в значительно большей степени влияет на скорость процесса окисления ионов Fe^{2+} , чем увеличение площади контакта воды с воздухом.

Для дальнейшего увеличения скорости окисления ионов Fe^{2+} были проведены эксперименты с использованием высоконапорного мембранно-плунжерного насоса, способного развивать давление до 7,0 МПа при расходе 4 куб.м./час.

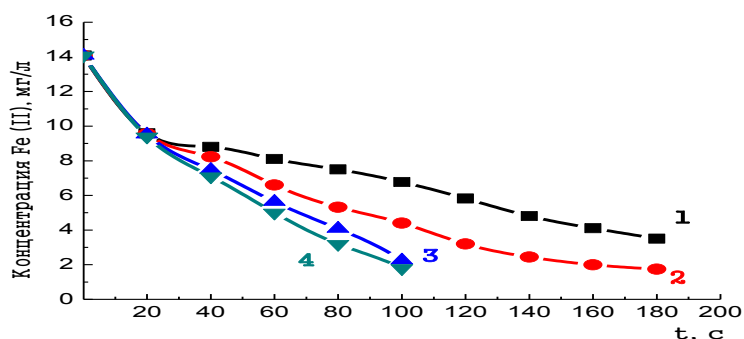


Рис. 6. Влияние времени выдержки на воздухе воды, подвергшейся волновой обработке при скорости потока в тангенциальных каналах ВГУ 143 м/с (кривая 1), 172 м/с (кривая 2), 202 м/с (кривая 3) и 212 м/с (кривая 4) без эжектирования воздуха на концентрацию ионов железа (II)

Из рисунка 6 видно, что при высоких скоростях потока в тангенциальных каналах ВГУ удается окислить ионы Fe^{2+} до концентраций ниже ПДК уже после двухминутной выдержки обработанной воды.

Было установлено, что диспергирование воздуха в воде в процессе волновой обработки при скоростях потока в тангенциальных каналах ВГУ более 50 м/с, так же не приводит к существенному изменению скорости окисления железа.

Вероятно, ускорение процесса за счет диспергирования воздуха в воде компенсируется снижением его скорости за счет ослабления кавитационных процессов, вызванного ростом демпфирующих свойств перекачиваемой многофазной среды.

После фильтрации на песчаном фильтре остаточное содержание ионов Fe^{2+} в воде, подвергшейся волновой обработке без эжектирования воздуха при скоростях в тангенциальных каналах ВГУ свыше 150 м/с, не превышало норм ПДК. Однако, использование насоса, обеспечивающего такие скорости жидкости в тангенциальных каналах ВГУ, связано с резким увеличением расхода электроэнергии на обработку воды и удорожанием волновой установки.

В ходе экспериментов по изучению влияния гидродинамических параметров волновой обработки на процесс окисления ионов Fe^{2+} иногда наблюдались необъяснимо высокие скорости окисления ионов Fe^{2+} при относительно низких скоростях потока в тангенциальных каналах ВГУ. Как видно из рис. 7, при скорости потока 35-36 м/с, что соответствует развиваемому насосом давлению 0,7 МПа, наблюдается резкий скачок скорости окисления ионов Fe^{2+} , характерный для более высоких давлений (свыше 1,5 МПа).

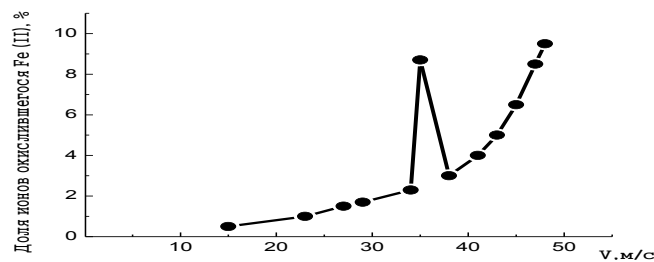


Рис. 7. Зависимость доли окислившихся ионов железа (II) от скорости потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ

Было сделано предположение, что такое ускорение процесса окисления ионов Fe^{2+} в узком интервале линейных скоростей потока в тангенциальных каналах ВГУ связано с изменением характера схлопывания кавитационных пузырьков.

Как известно из литературных данных, при определенном характере схлопывания кавитационного пузырька, когда граница его поверхности с нарастающей скоростью устремляется к центру и сжимает парогазовую смесь, находящуюся в пузырьке, происходит

локальное повышение температуры сжимаемой парогазовой смеси до 5000-7000°C и давления до 950 МПа.

Поскольку судить о характере схлопывания кавитационных пузырьков по акустическому спектру не представилось возможным, была сделана попытка фиксировать наличие данного вида схлопывания по возникновению вспышек света, называемых сонолюминесценцией.

С этой целью была создана специальная светоизолированная ячейка, внутрь которой помещалось ВГУ, гидрофон и фотоэлектронный умножитель, подключенный к усилителю, соединенному с осциллографом (Рис. 8).

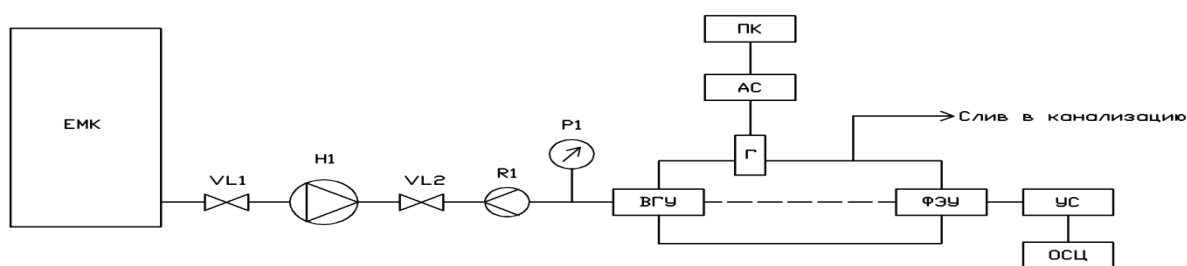


Рис 8. Экспериментальная установка для определения наличия сонолюминесценции в процессе волновой обработки воды

VL1, VL2 – кран шаровый, Н1 – насос, R1 – расходомер, P1 – манометр, ЕМК – емкость, ВГУ – волновое гидродинамическое устройство, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, УС – усилитель сигнала, ОСЦ – осциллограф, Г – гидрофон, АС – анализатор спектра, ПК – персональный компьютер.

Путем подбора гидродинамических параметров волновой обработки был обнаружен узкий диапазон давлений, где периодически удавалось зафиксировать наличие сонолюминесценции, частота вспышек которой составляла около 570-580 Гц.

На этой же частоте на звуковом спектре был идентифицирован всплеск амплитуды звуковых колебаний, появление которого совпадало с возникновением сонолюминесценции (рис. 9).

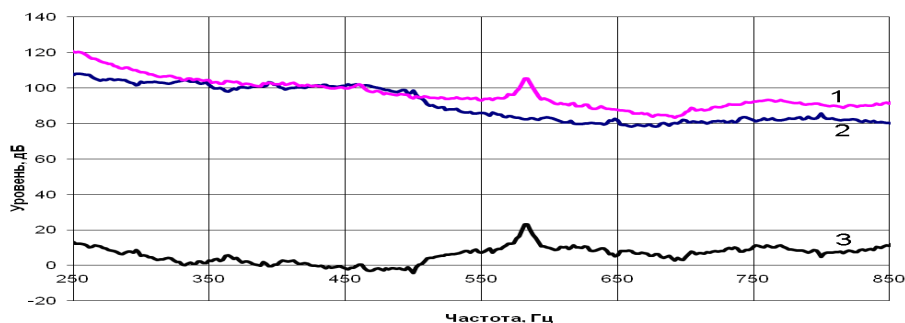


Рис. 9. Частотная характеристика (ЧХ)

Линия 1 – режим кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией.

Линия 2 – режим кавитации, не сопровождающейся сонолюминесценцией, при схожих гидродинамических параметрах обработки

Линия 3 – разница акустического давления

Отслеживая возникновение и перемещение указанного всплеска амплитуды звуковых колебаний при изменении параметров процесса волновой обработки, удалось определить диапазон оптимальных конструктивных параметров ВГУ и процесса волновой обработки, обеспечивающих стабильную реализацию режима кавитации, сопровождающегося сонолюминесценцией.

Эксперименты по волновой обработке воды в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, показали заметное увеличение скорости процесса окисления ионов Fe^{2+} .

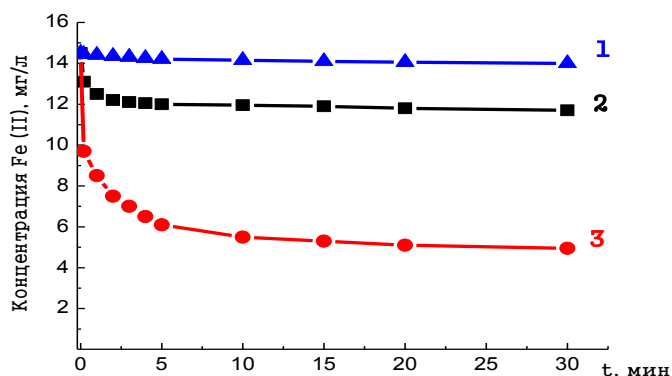


Рис. 10. Зависимость концентрации двухвалентного железа в воде от времени ее выдержки без волновой обработки и после волновой обработки при близких скоростях потока в тангенциальных каналах ВГУ

1 – без волновой обработки

2 – волновая обработка в режиме кавитации без сонолюминесценции (47-48 м/с)

3 – волновая обработка в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией (44-45 м/с)

Как видно из рисунка 10, в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, скорость процесса окисления ионов Fe^{2+} , находящихся в воде, возрастает более чем в 3 раза в сравнении с волновой обработкой без сонолюминесценции при схожих гидродинамических режимах обработки.

Из сравнения с рисунком 6 видно, что эффективность волновой обработки при давлении на входе в ВГУ 1,5 МПа в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, примерно такая же, как при 4-5 МПа без сонолюминесценции.

Исследования влияния эжектирования воздуха в ВГУ в процессе волновой обработки в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, показали снижение скорости процесса окисления ионов Fe^{2+} вплоть до скорости этого процесса при волновой обработке в режиме кавитации, не сопровождающейся сонолюминесценцией.

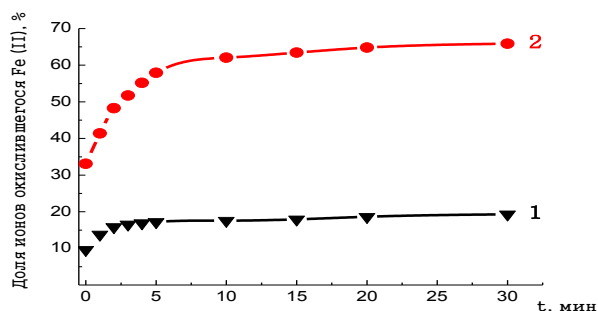


Рис. 11. Влияние времени выдержки воды после волновой обработки в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценции, при скорости потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ 44- 45 м/с на долю ионов окислившегося Fe^{2+}

1 – при эжектировании воздуха в оптимальном соотношением Г/Ж

2 – без эжектирования воздуха

Как видно из рисунка 11, скорость процесса окисления ионов Fe^{2+} уменьшилась более чем в 3 раза при эжектировании воздуха в оптимальном соотношении Г/Ж, из чего можно сделать вывод о том, что эжектирование воздуха приводит к исчезновению сонолюминесценции. Это подтверждается исчезновением на звуковом спектре, регистрируемом гидрофоном, всплеска амплитуды звуковых колебаний, вызванных кавитацией, сопровождающейся сонолюминесценцией.

Исследования влияния волновой обработки на скорость окисления ионов Fe^{2+} в природных водах показали, что скорость процесса окисления заметно изменяется в зависимости от состава воды. Для экспериментов готовились модельные растворы на основе дистиллята, воды из скважины и водопровода, составы которых приведены в табл. 1.

Таблица №1 Химический состав воды, для приготовления модельных растворов

| Определяемый показатель | Водопроводная вода, мг/л | Артезианская вода, мг/л | Дистиллированная вода, мг/л |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Fe^{2+} | 0,03 | 0,01 | < 0,03 |
| Mg^{2+} | 8,51 | 0.29 | - |
| Ca^{2+} | 31,85 | 0.66 | < 0,8 |
| Mn^{2+} | 0,01 | 0.005 | - |
| K^+ | 1,12 | 1 | - |
| Na^+ | 5,52 | 170 | - |
| NH_4^+ | 0,35 | 0,05 | < 0,02 |
| SO_4^{2-} | 33,82 | 26.6 | < 0,5 |
| Cl^- | 23,5 | 27.1 | < 0,02 |
| HCO_3^- | 90,52 | 387 | - |
| Жесткость общая, мг-экв/л | 2,3 | 0,1 | - |
| Щелочность общая, мг-экв/л | 1,48 | 6,35 | - |

Как видно из рисунка 12, скорость окисления ионов Fe^{2+} в модельном растворе, приготовленном на водопроводной воде, более чем в 2 раза превышает скорость окисления ионов Fe^{2+} в модельном растворе, приготовленном на дистилляте.

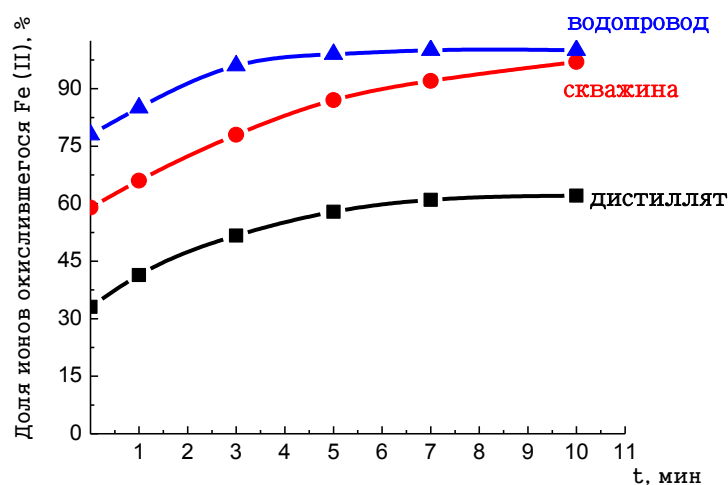


Рис. 12. Зависимость доли окислившихся ионов Fe^{2+} от времени выдержки воды после волновой обработки в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, при скорости потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ 44-45 м/с

Возможно, зависимость скорости окисления ионов Fe^{2+} в воде от ее минерального состава связана с образованием в результате волновой обработки различных химически активных радикалов.

Были проведены экспериментальные исследования по возможному уничтожению содержащихся в воде патогенных микроорганизмов в процессе волновой обработки в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией. Результаты показали возможность снижения показателя общих колиформных бактерий КОЕ на 95-97% после 3-х минутной волновой обработки.

Было исследовано влияние волновой обработки воды на изменение энергии активации процесса окисления ионов Fe^{2+} .

Согласно литературным данным, суммарное уравнение реакций окисления ионов Fe^{2+} может быть записано в виде:



На рисунке 13 представлены полученные кинетические кривые процесса окисления ионов Fe^{2+} в воде из артезианской скважины при температурах 25 и 40°C после волновой обработки и без нее.

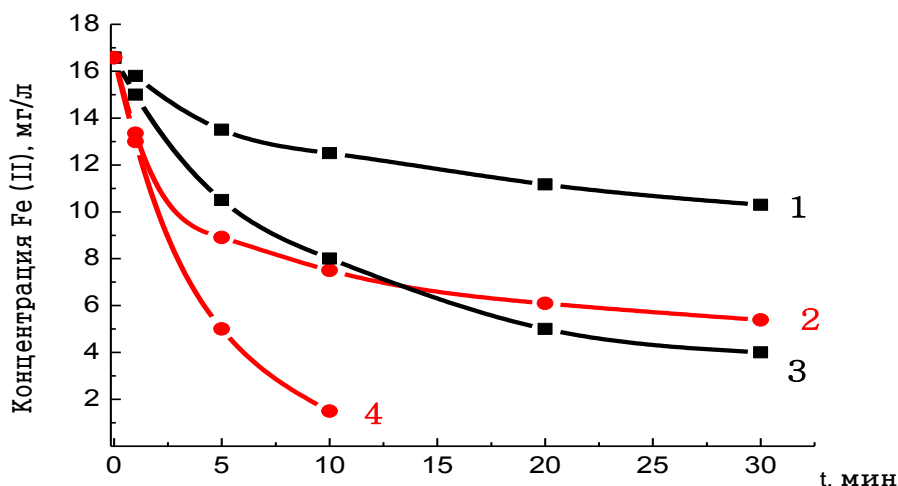


Рис. 13. Зависимость концентрации ионов Fe^{2+} в воде от времени ее выдержки после волновой обработки (кривые 2 и 4) и без нее (кривые 1 и 3) при температурах 25 и 40°C

Расчитанный по данным кинетическим кривым порядок реакции окисления ионов Fe^{2+} составил 1 по железу, а общий порядок реакции составил 2.

Энергию активации процесса рассчитывали через константы скорости химической реакции в зависимости от температуры, при которой проводились эксперименты.

Полученные таким образом значения энергии активации процесса окисления ионов Fe^{2+} в артезианской воде составили **45,2** кДж/моль•К для воды, подвергавшейся волновой обработке в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, и **60,1** кДж/моль•К для воды, не подвергавшейся волновой обработке. Энергия активации процесса окисления ионов Fe^{2+} в артезианской воде после волновой обработки без сонолюминесценции составила **51,8** кДж/моль•К.

Эти данные позволяют высказать предположение, что аномально высокая скорость окисления ионов Fe^{2+} в воде (рис.7) после волновой обработки в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, объясняется снижением энергии активации процесса. Возможно, это связано с частичным разрушением гидратных оболочек ионов железа в процессе волновой обработки.

Фильтрация на песчаном фильтре всех 3-х типов воды, подвергавшейся волновой обработке в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, позволила достичь концентрации остаточного железа ниже норм ПДК.

Таким образом, полученные в ходе работы результаты позволили перейти к созданию опытно-промышленной установки для очистки воды от железа.

Раздел 4. Опытные-промышленные испытания.

В качестве прототипа промышленной установки в лаборатории была создана опытная установка для очистки воды от железа с модулем волновой обработки.

В основу опытной установки очистки воды от железа был положен разработанный способ волновой обработки воды в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, с последующей фильтрацией образовавшихся соединений трехвалентного железа.

Схема опытной установки для волновой обработки воды, содержащей ионы Fe^{2+} , с ее последующей фильтрацией представлена на рисунке 14.

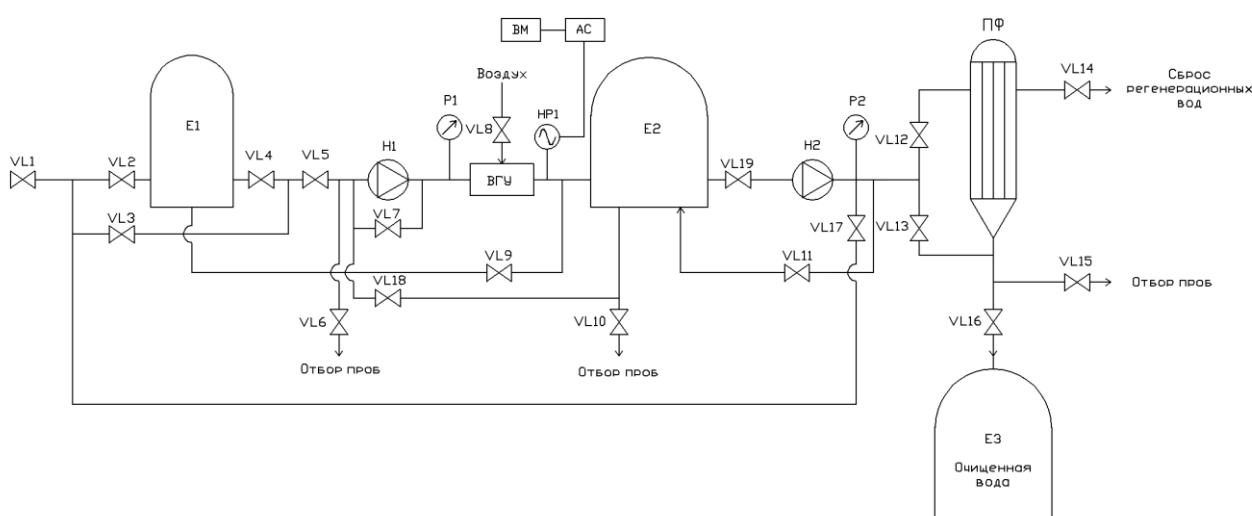


Рис. 14. Схема опытной установки для волновой обработки воды

H1, H2 – насосы, E1, E2, E3 – накопительные емкости, VL1-VL19 – вентили, P1, P2 – манометры, ВГУ – волновое гидродинамическое устройство, ПФ – песчаный фильтр, НР1 – гидрофон, АС – анализатор спектра, ВМ – вычислительная машина;

Наличие сонолюминесценции в процессе волновой обработки железосодержащей воды фиксируется при помощи гидрофона и анализатора спектра по принципу, описанному выше.

На данной установке можно очищать воду с любым исходным содержанием растворенного в ней кислорода. Если обрабатываемая вода имеет низкое содержание растворенного в ней кислорода, то сначала проводят насыщение воды кислородом воздуха с применением эжектирования воздуха непосредственно в ВГУ. После насыщения обрабатываемой воды воздухом автоматически подача воздуха перекрывается, осуществляется волновая обработка в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, обработанная вода проходит через песчаный фильтр и собирается в сборнике очищенной воды. При достижении заданного давления на входе в песчаный фильтр

автоматически открываются/закрываются соответствующие вентили, отключается волновая обработка и происходит регенерация песчаного фильтра “противотоком” со сбросом промывных вод в канализацию.

Представленная опытная установка для волновой обработки воды позволяет производить очистку природных вод от растворенного железа с исходной концентрацией до 15 мг/л с производительностью 0,5 м³/ч. При этом стоимость очистки 1м³ воды составляет около 35 рублей, что является конкурентоспособным показателем среди самых распространенных установок со схожими характеристиками.

Раздел 5. Выводы.

1. Обоснована целесообразность применения волновой обработки природных вод с целью очистки их от железа для использования в питьевых и хозяйственно-бытовых целях.
2. Установлено, что волновая обработка очищаемой воды приводит к снижению энергии активации процесса окисления железа и росту скорости процесса. Показано, что рост скорости потока жидкости в тангенциальных каналах ВГУ в значительно большей степени ускоряет процесс окисления ионов Fe²⁺, чем увеличение площади поверхности контакта воды с воздухом.
3. Определены оптимальные параметры процесса волновой обработки и количества эжектируемого в ВГУ воздуха для интенсификации процесса окисления ионов Fe²⁺, содержащихся в воде.
4. Впервые установлено, что волновая обработка воды в режиме кавитации, сопровождающейся сонолюминесценцией, позволяет более чем в 3 раза увеличить скорость процесса окисления ионов Fe²⁺, содержащихся в воде. Показано, что эжектирование воздуха в данном режиме волновой обработки приводит к снижению скорости процесса окисления ионов Fe²⁺.
5. Разработан способ контроля наличия режима схлопывания кавитационных пузырьков, сопровождающегося сонолюминесценцией, по спектру звуковых колебаний, фиксируемых гидрофоном в процессе волновой обработки очищаемой от железа воды.
6. На основании полученных результатов создана опытная установка для очистки воды от железа, позволяющая достигать требуемых норм ПДК по содержанию железа.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**Статьи**

1. Курбатов А.Ю., Аснис Н.А., Ваграмян Т.А. Способы очистки воды от растворенного железа и марганца. // Химическая промышленность сегодня 2012. №4. С.48-56.
2. Аснис Н.А., Баталов Р.С., Борткевич С.В., Ваграмян Т.А., Курбатов А.Ю. Очистка воды от железа с использованием волновых гидродинамических устройств. // Химическая промышленность сегодня 2012. №9 С.36-39.
3. Бродский В.А., Кондратьева В.С., Якушин Р.В., Курбатов А.Ю., Артемкина Ю.М. Анализ перспективных физико-химических методов обработки и обезвреживания воды, содержащей высокотоксичные химические вещества и микроорганизмы. // Химическая промышленность сегодня 2013. №2. С.52-56.
4. Курбатов А.Ю., Аверина Ю.М., 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. С.36-41.
5. Аснис Н.А., Баталов Р.С., Борткевич С.В., Курбатов А.Ю., Дежкунов Н.В., Ваграмян Т.А. Очистка природных вод от железа с использованием волновой технологии. // Химическая промышленность сегодня 2014. №4. С.20-28.

Тезисы

1. Курбатов А.Ю., Аснис Н.А., Ваграмян Т.А. Очистка природных вод от железа с использованием волновой технологии. // Тез. докл. конф. “Новости научного прогресса”. – София, “Бял ГРАД-БГ”, 2013, том № 8.
2. Курбатов А.Ю., Аснис Н.А. Очистка различных типов вод от ионов Fe^{2+} с применением волновой механики. // Тез. докл. конф. “Инновационные процессы и технологии в современном мире”. – Уфа, 2013 г.

Патент

Способ очистки воды: пат. № 2012150980 Российская Федерация / Курбатов А.Ю., Аснис Н.А., Баталов Р.С., Борткевич С.В., Аверина Ю.М., Ваграмян Т.А. - № 2012150980/05; заявл. 28.11.2012; опубл. 10.06.2014.