

На правах рукописи



ПЕТРУНИН Алексей Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ  
НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОТОРНО-  
ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пенза 2016

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

**Андреев Сергей Юрьевич**

Официальные оппоненты –

Назаров Владимир Дмитриевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет», профессор  
кафедры «Водоснабжение и водоотведение»

Москвичева Елена Викторовна,  
Доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», заведующая кафедрой «Водоснабжение и водоотведение»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится « 25 » марта 2016 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, ПГУАС, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/>.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



М. В. Бikuнова

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Одним из наиболее опасных загрязнителей окружающей природной среды являются недостаточно очищенные нефтесодержащие сточные воды машиностроительных заводов, сбрасываемые в водоемы.

В настоящее время получили широкое распространение флотационные методы очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты.

В отличие от методов гравитационного выделения загрязнений сточных вод эффективность метода флотационной очистки мало зависит от седиментационных свойств загрязняющих компонентов. Она определяется свойствами образующихся флотокомплексов, что значительно повышает эффективность и надежность процесса сепарации загрязнений производственных сточных вод.

Существенным фактором, влияющим на эффективность процесса флотационной очистки производственных сточных вод, является степень дисперсности используемой в нем водовоздушной смеси, определяемой величиной среднего диаметра пузырьков воздуха  $d_{п}$ .

Вероятность образования флотокомплекса «извлекаемая частица – пузырек воздуха» зависит от величины коэффициента эффективности захвата  $E$ , являющегося функцией соотношения квадрата диаметров извлекаемой частицы  $d_{ч}$  и пузырька воздуха  $d_{п}$ , в связи с чем эффективная флотационная очистка сточных вод, как правило, возможна лишь при среднем размере пузырьков в водовоздушной смеси не более  $d_{п} = 20-100$  мкм. Водовоздушные смеси с такими характеристиками в настоящее время получают лишь в процессе напорной (компрессионной) флотации.

Основным недостатком процесса напорной флотации, ограничивающим возможность дальнейшего повышения эффективности этого метода, является низкое значение коэффициента газонаполнения ( $\varphi = 0,001 - 0,003$ ) получаемой водовоздушной смеси.

Существующие в настоящее время альтернативные методы механического диспергирования не позволяют получить мелкодисперсную водовоздушную смесь, содержащую пузырьки требуемого диаметра.

Экспериментальные исследования показали, что мелкодисперсная водовоздушная смесь с высоким газонаполнением ( $\varphi = 0,05 - 0,11$ ) может быть получена гидромеханическим способом в процессе ее обработки в роторно-

диспергирующем устройстве, поверхность которого покрыта силикатной эмалью.

Представленная работа посвящена проблеме разработки и исследования новой технологии получения мелкодисперсной водовоздушной смеси с высоким газонаполнением для интенсификации процесса флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, что подтверждает ее актуальность.

Работа выполнялась в рамках «Программы социально-экономического развития Пензенской области до 2020 г.», в которой важное место отведено совершенствованию функционирования и повышению экологичности систем водоотведения.

**Степень разработанности темы исследования.** Фундаментальные исследования по теории взаимодействия фаз в процессе флотации инерционных и безынерционных дисперсных частиц были описаны в работах А.Н. Фрумкина, Б.В. Дерягина, Я.Б. Зельдовича, С.С. Духина, Н.Н. Рулева, В.И.Классена, В.А. Глембоцкого.

Вопросы, связанные с флотационной очисткой хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод, рассматривались в работах Н.А. Лукиных, И.Л. Монгайт, И.Д. Родзиллера, П.А. Ребиндера, В.Г. Перевалова, И.И. Караваева, Н.Ф. Резника, А.И. Мацнева, Е.А. Стахова, Б.С. Ксенофонта, В.Г. Пономарева, Е.В. Алексеева, В.А. Копылова, В.Д. Назарова.

Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных теоретическим и практическим аспектам процесса флотации, актуальной остается задача исследования гидромеханических способов получения мелкодисперсных водовоздушных смесей с высоким газонаполнением и их использования в технологиях флотационной очистки сточных вод, содержащих нефтепродукты.

Предлагаемый в диссертации способ, предусматривающий использование для подготовки водовоздушной смеси роторно-диспергирующего устройства, положительно отличается от известных аналогов, прежде всего, по технологическим и экономическим характеристикам.

**Цель работы** заключается в разработке и исследовании новой энерго-сберегающей технологии флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, предусматривающей использование роторно-диспергирующего устройства для подготовки водовоздушной смеси.

**Задачи исследования.** Цель работы предопределила постановку следующих задач:

- анализ российского и зарубежного опыта по методам интенсификации процесса флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты;

- теоретическое обоснование возможности использования роторно-диспергирующего устройства в процессе получения мелкодисперсных водовоздушных смесей с повышенным газонаполнением;

- проведение экспериментальных исследований и анализ работы роторно-диспергирующего устройства, предназначенного для получения тонкодисперсных водовоздушных смесей с повышенным газонаполнением;

- проведение экспериментальных исследований и установление особенностей протекания процессов разделения водовоздушных смесей в поле действия центробежных сил и процесса реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод в циклонном флотаторе;

- апробация технологии флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты с использованием роторно-диспергирующего устройства в производственных масштабах;

- разработка рекомендаций по расчету и проектированию аппаратного оформления технологии флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, с использованием роторно-диспергирующего устройства.

**Научная новизна работы:**

- теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения нового способа интенсификации флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, за счет использования мелкодисперсных водовоздушных смесей с повышенным газонаполнением, полученных в процессе их обработки в роторно-диспергирующем устройстве;

- предложена новая конструкция роторно-диспергирующего устройства, позволяющего интенсифицировать флотационную очистку нефтесодержащих сточных вод;

- определена степень влияния технологических характеристик работы роторно-диспергирующего устройства на эффективность флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод с применением реагентов;

- получены аналитические зависимости, адекватно описывающие изменение дисперсности водовоздушной смеси после ее обработки в роторно-диспергирующем устройстве, а также эффективность удаления нефтесодержащих примесей из сточных вод флотацией при использовании различных реагентов.

#### **Теоретическая и практическая значимость диссертации:**

- теоретически обоснована возможность использования роторно-диспергирующего устройства в технологических процессах получения мелкодисперсной водовоздушной смеси с высоким газонаполнением.

- предложена и апробирована в промышленных условиях новая технология флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты с использованием роторно-диспергирующего устройства;

- разработаны рекомендации к расчету и проектированию аппаратного оформления предложенной технологической схемы флотационной очистки производственных сточных вод.

- разработанная технология интенсификации флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, внедрена на локальных очистных сооружениях ОАО «Пензтяжпромарматура» г. Пензы производительностью 40 м<sup>3</sup>/сут. Подтвержденный среднегодовой экономический эффект от внедрения составляет более 303 тыс. руб/год в ценах 2015 г.

#### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Методология исследования диссертационной работы включает системный подход к аналитическому обобщению сведений, содержащихся в научно-технической и специальной литературе, использование методов химического анализа и планирования экспериментов, автоматизированную обработку полученных экспериментальных данных с применением компьютерных программ.

В диссертации проводились теоретические и экспериментальные исследования, включающие работы с моделями и натурными установками в лабораторных и промышленных условиях.

Объектом исследований являлись сточные воды, образующиеся в процессе промывки поверхности изделий предприятия машиностроительного профиля, а предметом исследования – способ и технология интенсификации

флотационной очистки сточных вод, предусматривающая использование роторно-диспергирующего устройства.

**Достоверность полученных результатов** оценена с помощью современных математических методов обработки экспериментов. При постановке экспериментов использовались общепринятые методики, оборудование и приборы, обеспечивающие необходимую точность и надежность получаемых результатов. Экспериментальные данные полученные на моделях, соответствуют результатам, полученным на промышленных установках.

**Апробация работы и публикации.** По материалам диссертации опубликованы 15 работ (в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК). Получен патент РФ на полезную модель №157201. «Устройство для приготовления диспергированной водовоздушной смеси». Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях в г. Пензе, в 2011 - 2015 гг.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса получения мелкодисперсной водовоздушной смеси с повышенным газонаполнением с использованием роторно-диспергирующего устройства;

- результаты экспериментальных исследований процесса разделения водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и процесса последующей реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод;

- математические зависимости, адекватно описывающие изменения дисперсности водовоздушной смеси в процессе ее обработки в роторно-диспергирующем устройстве и эффективность процесса реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод;

- рекомендации к расчету и проектированию аппаратного оформления предложенной технологии флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 161 страницах машинописного текста, включает 4 таблицы, 59 рисунков и состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка использованной литературы из 149 наименований и 1 приложения.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы. Приведены основные положения диссертации: сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, данные о внедрении и апробации результатов работы, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен аналитический обзор литературных источников, в которых рассматриваются технологические и конструктивные решения, применяемые для флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты. Приводится классификация методов флотационной очистки нефтесодержащих производственных сточных вод. Дается описание и анализ технологических схем флотационной очистки с механическим и гидродинамическим диспергированием водовоздушной смеси, рассматривается процесс флотации с подачей воздуха через пористые материалы, анализируются методы электрофлотации, химической флотации, флотации с выделением воздуха из пересыщенного раствора в жидкости.

Анализ литературных источников показал, что наибольшее распространение в практике очистки нефтесодержащих производственных сточных вод получил компрессионный метод флотации, предусматривающий выделение воздуха из пересыщенного раствора, в результате чего образуется мелкодисперсная водовоздушная смесь со средним диаметром пузырьков воздуха  $d_{п}=20-100$  мкм. Недостатком компрессионного метода флотации является малая величина коэффициента газонаполнения ( $\varphi \leq 0,001-0,003$ ) получаемой водовоздушной смеси.

Методы механического и гидродинамического диспергирования водовоздушной смеси позволяют достичь максимального значения величины коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси  $\varphi=0,3$  но не обеспечивают получение пузырьков воздуха размером менее  $d_{п}=500$  мкм.

Приводимые в литературе сведения не содержат всего комплекса данных, необходимых для разработки технологического процесса интенсификации флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод за счет использования мелкодисперсной водовоздушной смеси ( $d_{п}=20-100$  мкм) с высоким значением газонаполнения ( $\varphi=0,05-0,11$ ), в связи с чем была сформулирована задача разработки и исследования гидромеханического способа диспергирования водовоздушной смеси с использованием роторно-диспергирующего устройства.

**Вторая глава** посвящена теоретическому обоснованию выбора направлений повышения эффективности флотационного метода очистки



производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты. В ней рассматриваются теоретические основы элементарного акта взаимодействия единичной флотируемой дисперсной частицы с единичным пузырьком воздуха.

Описываются стадии процессов сближения дисперсной частицы с пузырьком воздуха и ее закрепления на поверхности пузырька.

Анализируются кинетические закономерности процессов флотации инерционной и безинерционной дисперсной частицы. Поскольку эмульсии нефтепродуктов в производственных сточных водах имеют размер порядка 5-20 мкм, а их плотность незначительно отличается от плотности воды, процесс флотационной очистки происходит по безинерционному механизму, при котором величина коэффициента эффективности захвата дисперсной частицы пузырьком воздуха, всплывающим в стоксовском режиме, пропорциональна квадрату отношения характерных размеров дисперсной частицы и пузырька воздуха.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что эффективная флотационная очистка нефтесодержащих производственных сточных вод возможна при использовании водовоздушных смесей, содержащих пузырьки воздуха диаметром менее 100 мкм.

Приводится анализ теоретических основ процесса образования пузырька воздуха из пересыщенного раствора жидкости, в результате которого и происходит флотационная очистка при компрессионном методе получения водовоздушной смеси.

Процесс выделения газовых пузырьков из пересыщенного раствора в жидкости протекает в две стадии: стадии образования зародышевых пузырьков газа и стадии их роста вследствие диффузии в них растворенного газа. Первая из этих стадий протекает с увеличением энергии Гиббса в системе и поэтому термодинамически затруднена. Вторая стадия образования газовых пузырьков идет самопроизвольно со значительным убыванием энергии Гиббса. Увеличение исходного пересыщения газового раствора в сатураторе обуславливает как повышение относительного объемного содержания газа в газожидкостной смеси  $\varphi$ , так и существенное увеличение размеров пузырьков  $d_{\text{п}}$  вследствие интенсивного протекания процессов диффузии газа и слипания (коалесценции) образующихся пузырьков.

Противоположность влияния этих факторов приводит к тому, что эффективность процесса флотации будет иметь максимум при некотором определенном значении пересыщения жидкости.

Приводится анализ теоретических основ процесса гидромеханического диспергирования водовоздушной смеси, позволяющего достичь высоких значений коэффициента газонаполнения.

Рассматриваются два механизма уменьшения размеров находящихся в водовоздушной смеси пузырьков воздуха: 1) при их взаимном столкновении; 2) в результате воздействия на пузырек микровихрей, образующихся в турбулентном потоке.

Теоретический анализ соотношения величин элементарной работы, совершаемой против действия силы поверхностного натяжения пузырька воздуха при воздействии на него турбулентного вихря и элементарной мощности, обеспечивающей перемещение пузырька воздуха на некоторое расстояние, позволил получить уравнение, устанавливающее взаимосвязь между величиной среднего диаметра пузырька воздуха в водовоздушной смеси  $d_{\Pi}, (м)$  подвергшейся гидромеханическому воздействию при величине средней удельной секундной диссипации энергии в объеме водовоздушной смеси,  $\varepsilon_T (Вт/кг)$ .

$$d_{\Pi} = K_{zo} \left( \frac{\sigma_{\Pi}^3}{\varepsilon_T^2 \rho^3} \right)^{1/5}, \text{ м} \quad (1)$$

где:  $K_{zo}$  - коэффициент, зависящий от гидродинамических условий;  $\rho$  - плотность воды,  $кг/м^3$ ;  $\sigma_{\Pi}$  - коэффициент поверхностного натяжения пузырька,  $Дж/м^2$ .

Формула (1) свидетельствует о том, что получить водовоздушную смесь с диаметром пузырьков менее 100 мкм в процессе ее гидромеханического диспергирования возможно лишь при величине средней удельной диссипации энергии в объеме смеси  $\varepsilon_T$  более 500Вт/кг.

Наряду с процессами, протекающими в объеме газожидкостной смеси, существенную роль при диспергировании пузырьков воздуха играют и явления, имеющие место на границе раздела фаз «жидкость – твердая поверхность». Основное влияние на интенсивность процесса диспергирования при этом оказывают характеристики пограничного слоя, которые зависят от условий течения перемешиваемой среды в непосредственной близости к межфазовой поверхности. Использование технологического приема, предусматривающего взаимодействие вращающегося ротора, поверхность которого покрыта силикатной эмалью, с потоком водовоздушной смеси позволит достичь высокой плотности энергии в локальной пристеночной области предлагаемого

роторно-диспергирующего устройства, что приведет к существенному интенсифицированию процесса диспергирования смеси.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований технологии получения тонкодисперсной водовоздушной смеси в роторно-диспергирующем устройстве.

Целью проведения данного этапа исследований являлось определение оптимальных параметров процесса диспергирования водовоздушной смеси, образующейся в результате пропускания промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля через эжектор и последующей ее обработки в роторно-диспергирующем устройстве. Исследования процесса диспергирования водовоздушной смеси проводилось на установке, схема которой представлена на рисунке 1.

Промывные сточные воды из бака 1 подавались центробежным насосом 2 в водовоздушный эжектор 8. Расход сточных вод регулировался запорной арматурой 3 и измерялся расходомером 5. Расход подсасываемого водовоздушным эжектором 8 воздуха контролировался поплавковым ротаметром 7 и регулировался вентилем 6. Давление на выходе из насоса 2 контролировалось манометром 4. Напор, развиваемый насосом 2 при этом составлял  $H=8-14$  м. Водовоздушная смесь, образующаяся в эжекторе 8 поступала в роторно-диспергирующее устройство 9, состоящее из ротора 10 и электродвигателя 11, где осуществлялось ее диспергирование. Величина удельного газонаполнения водовоздушной смеси на выходе из эжектора 8 регулировалась вентилем 6 и изменялась в пределах  $\varphi_3=0,1-0,7$ .

Расход водовоздушной смеси, подаваемой в стеклянную колонну 14, регулировался вентилями 12 и 13. В стеклянной колонне 14 происходило отделение пузырьков воздуха, имеющих диаметр более  $d_{пс}=0,5$  мм. В результате отделения крупных пузырьков воздуха величина газонаполнения водовоздушной смеси на выходе из колонны 14 уменьшалась до значения  $\varphi$ .

Частота вращения ротора 10, имеющего диаметр  $d_p = 14 \cdot 10^{-3}$  м изменялась в пределах  $n_p = 1,7 - 100$  с<sup>-1</sup> регулятором на электродвигателе 11. Окружная скорость на наружном радиусе при этом составляла  $v_{ок} = 0,08 - 4,4$  м/с. Внутренний диаметр вихревой камеры роторно-диспергирующего устройства составлял  $40 \cdot 10^{-3}$  м, длина камеры 0,4 м. Время обработки водовоздушной смеси в роторно-диспергирующем устройстве составляло 0,5-2,5 с.

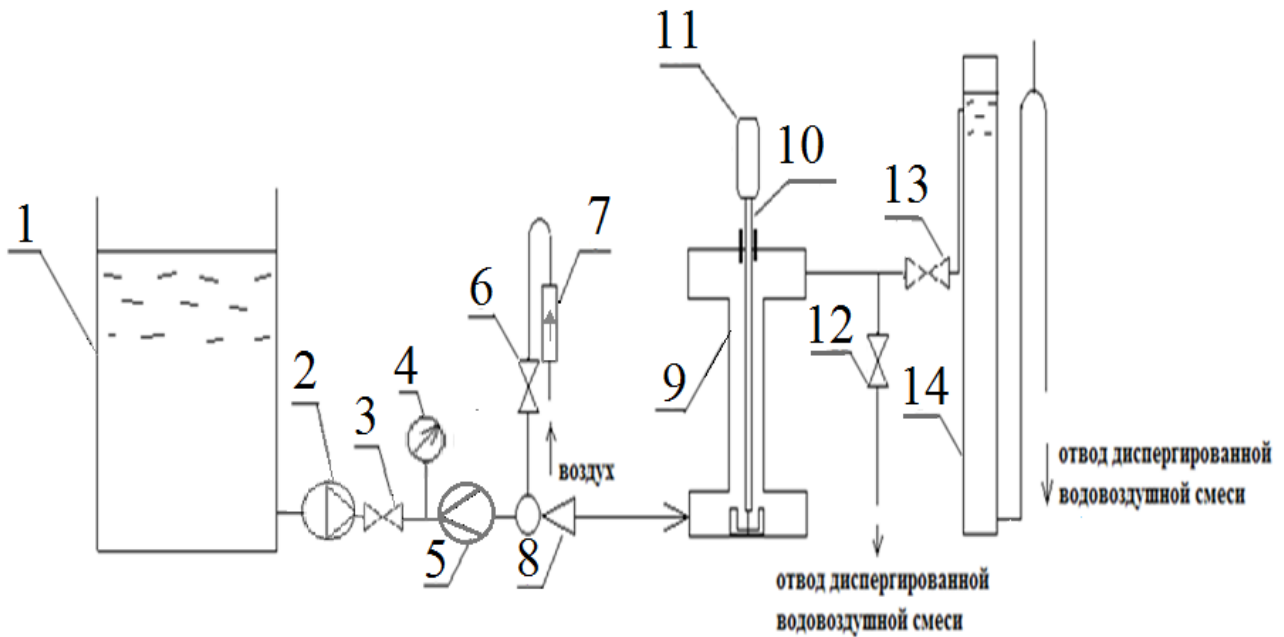


Рисунок 1. Схема лабораторной установки для исследования процесса диспергирования водовоздушной смеси

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-диспергирующем устройстве, от величины окружной скорости движения ротора и материала поверхности ротора при  $\varphi_3 = 0,1$  и  $\varphi_3 = 0,5$  представлены в виде графиков, изображенных на рисунке 2.

Математическая обработка экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов позволила получить зависимости, описывающие процесс диспергирования водовоздушной смеси в роторно-диспергирующем устройстве.

Для роторно-диспергирующего устройства с ротором покрытым силикатной эмалью марки МК-5

$$d_{II} = 90,754 \cdot 10^{-6} \cdot v_{ок}^{-0,264} \cdot v_{кв}^{-0,114} \cdot \varphi_3^{-0,0574} \quad (2)$$

Для роторно-диспергирующего устройства со стальным ротором без покрытия

$$d_{II} = 180,766 \cdot 10^{-6} \cdot v_{ок}^{-0,192} \cdot v_{кв}^{-0,0967} \cdot \varphi_3^{-0,0476} \quad (3)$$

где:  $d_{II}$  - средний диаметр пузырьков воздуха в диспергированной водовоздушной смеси, м;  $v_{ок}$  - скорость движения поверхности ротора, м/с;  $v_{кв}$  - скорость водовоздушной смеси в патрубке входа роторно-диспергирующего устройства, м/с;  $\varphi_3$  - величина газонаполнения исходной водовоздушной смеси.

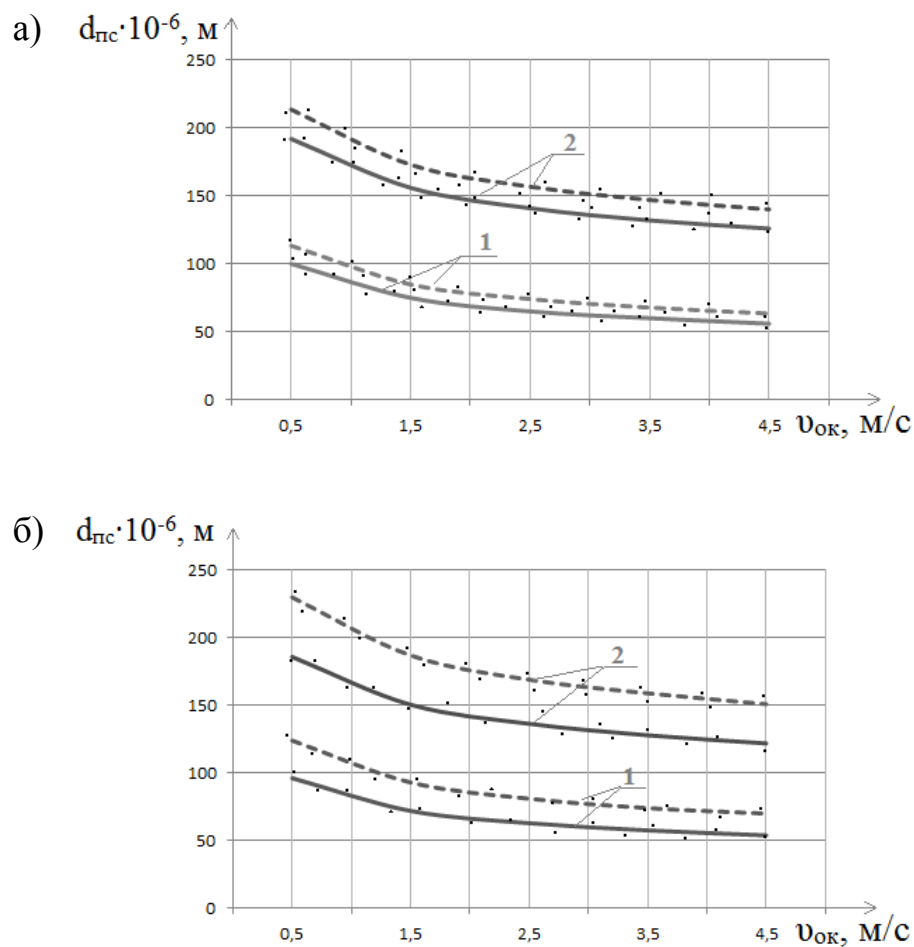


Рисунок 2. Зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-диспергирующем устройстве, от величины окружной скорости движения ротора и материала поверхности ротора:

а) при газонаполнении исходной водовоздушной смеси  $\varphi_{\text{г}} = 0,5$ ; б) при газонаполнении исходной водовоздушной смеси  $\varphi_{\text{г}} = 0,1$

1 – поверхность ротора, покрытая силикатной эмалью марки МК-5;

2 – поверхность ротора без покрытия;

---  $v_{\text{кв}} = 1,0 \text{ м/с}$  ;

—  $v_{\text{кв}} = 3,0 \text{ м/с}$

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что обработка водовоздушной смеси, полученной при пропускании промывочных сточных вод машиностроительного предприятия через эжектор в роторно-диспергирующем устройстве является эффективным способом ее диспергирования, позволяющим получить мелкодисперсную водовоздушную смесь ( $d_{\text{пс}}=50-100\text{мкм}$ ) с высоким газонаполнением ( $\varphi=0,06-0,11$ ).

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований процессов разделения водовоздушной смеси в поле действия

центробежных сил и реагентной флотационной очистки промывных сточных вод на циклонном флотаторе.

Целью проведения данного этапа исследований являлось определение оптимальных параметров процессов разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и реагентной флотационной очистки промывных сточных вод. Исследования проводились на установке схема которой представлена на рисунке 3.

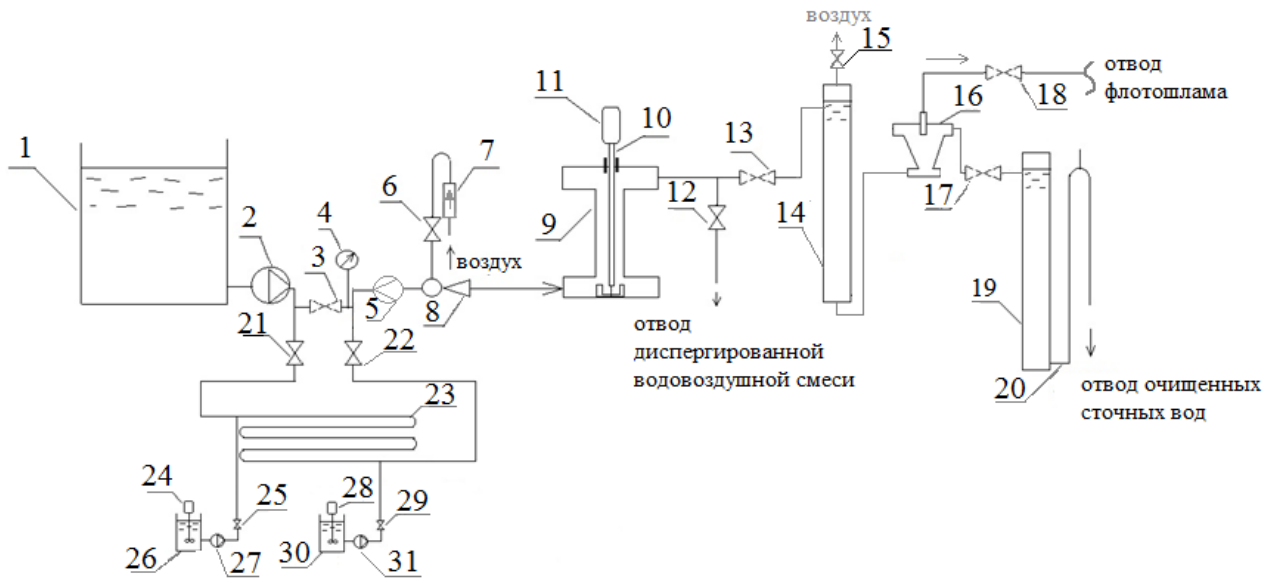


Рисунок 3. Схема установки для исследования процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил.

Общий вид роторно-диспергирующего устройства, циклонного флотатора и эжектора представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. Общий вид роторно-диспергирующего устройства, циклонного флотатора и эжектора.

В состав установки были дополнительно включены (см. рисунки 1 и 3): вантуз 15; циклонный флотатор 16; запорная арматура 17,18,21,22,25,29; трубчатый смеситель 23; расходные баки коагулянта 26 и флокулянта 30; механические мешалки раствора коагулянта 24 и флокулянта 28, насосы дозаторы коагулянта 27 и флокулянта 31.

В ходе проведения первого этапа исследований решались следующие задачи:

1. Определение целесообразности применения циклонного флотатора для разделения диспергированной водовоздушной смеси.
2. Установление влияния скорости диспергированной водовоздушной смеси в патрубке камеры входа циклонного флотатора  $v_{цф}$  на эффективность процесса ее разделения.
3. Установление зависимости эффективности процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси циклонного флотатора от величины относительного расхода  $\overline{Q_{цф}}$ , определяемого как отношение расхода отводимой с циклонного флотатора водовоздушной смеси  $Q_{вс}$  к расходу осветленной жидкости  $Q_{ож}$ .

Результаты экспериментальных исследований показали, что циклонный флотатор предложенной конструкции позволяет эффективно разделять диспергированную в роторно-диспергирующем устройстве водовоздушную смесь. Значение величины относительного расхода, при которой наблюдается проскок водовоздушной смеси в отводимых с камеры выхода циклонного флотатора осветленных сточных вод увеличивается с 0,1м/с до 0,25м/с при снижении величины скорости диспергированной водовоздушной смеси в патрубке входа циклонного флотатора с 2,5м/с до 0,5м/с.

В ходе проведения второго этапа исследований изучались два варианта реагентной флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля.

1. Коагуляционная очистка, предусматривающая дозирование в сточные воды хлорного железа и флокулянта (катионный сополимер акриламида серии АК636Р марки КП555).
2. Очистка сточных вод известковым молоком и флокулянтном (катионный сополимер акриламида серии АК636Р марки КП555).

Результаты экспериментальных исследований процесса реагентной флотационной очистки промывных сточных вод предприятия

машиностроительного профиля показали, что известковое молоко является более эффективным реагентом, чем коагулянт хлорное железо. Использование метода известкования в отличие от коагуляционной обработки позволяет избежать дополнительного загрязнения сточных вод кислотными остатками, что существенно упрощает возможность их повторного использования в качестве промывных растворов.

Реагентная обработка при дозе извести  $D_{и} = 250-450$  мг/л позволяет снизить в сточных водах, прошедших флотационную очистку по предложенной технологии концентрации взвешенных веществ с  $C_{вв} = 85-180$  мг/л до  $C_{вв} = 21-30$  мг/л, нефтепродуктов с  $C_{нп} = 44-52$  мг/л до  $C_{нп} = 12-16$  мг/л. Дополнительное использование флокулянта (катионного сополимера акриламида серии АК636Р марки КП555) при дозе  $D_{ф} = 1-4$  мг/л позволяет уменьшить концентрации загрязняющих веществ в очищенных сточных водах: взвешенных веществ до  $C_{вв} = 4,8-6,8$  мг/л, нефтепродуктов до  $C_{нп} = 2,8-3,6$  мг/л.

Хлорное железо при его использовании в процессе реагентной флотационной очистки по предложенной технологии показало меньшую эффективность по сравнению с известковым молоком. Концентрация взвешенных веществ в очищенных сточных водах при этом увеличилась в 1,8-2,1 раза, концентрация нефтепродуктов увеличилась в 1,4-1,5 раза.

Обработка экспериментальных данных, полученных в ходе процесса реагентной флотационной очистки отработанных промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля (при концентрации в исходных сточных водах взвешенных веществ  $C_{вв} = 1400-2000$  мг/л, нефтепродуктов  $C_{нп} = 340-500$  мг/л) по методу наименьших квадратов позволила получить следующие математические зависимости:

1. Зависимость величины концентрации нефтепродуктов  $C_{нп}$  (мг/л) в сточных водах на выходе с циклонного флотатора от дозы гашеной извести  $D_{и}$  (мг/л) и дозы флокулянта  $D_{ф}$  (мг/л) (при  $D_{и} = 250 - 450$  мг/л и  $D_{ф} = 0-4$  мг/л)

$$C_{нп} = 238,014D_{и}^{-0,438}(1 - 0,668D_{ф}^{0,0959}), \text{ мг/л} \quad (4)$$

2. Зависимость величины концентрации взвешенных веществ  $C_{вв}$  (мг/л) в сточных водах на выходе с циклонного флотатора от дозы гашеной извести  $D_{и}$  (мг/л) и дозы флокулянта  $D_{ф}$  (мг/л) (при  $D_{и} = 250-450$  мг/л и  $D_{ф} = 0-4$  мг/л)

$$C_{вв} = 855,492D_{и}^{-0,607}(1 - 0,725D_{ф}^{0,0458}), \text{ мг/л} \quad (5)$$



**В пятой главе** приводятся результаты производственного внедрения предлагаемой технологии реагентной флотационной очистки, которое было осуществлено в процессе строительства и пуска в эксплуатацию локальных очистных сооружений промывочных сточных вод ОАО «Пензтяжпромарматура» производительностью 40м<sup>3</sup>/сут.

На основании приведенных экспериментальных исследований была разработана следующая технологическая схема флотационной очистки сточных вод от промывочных ванн ОАО «Пензтяжпромарматура» (рисунок 5).

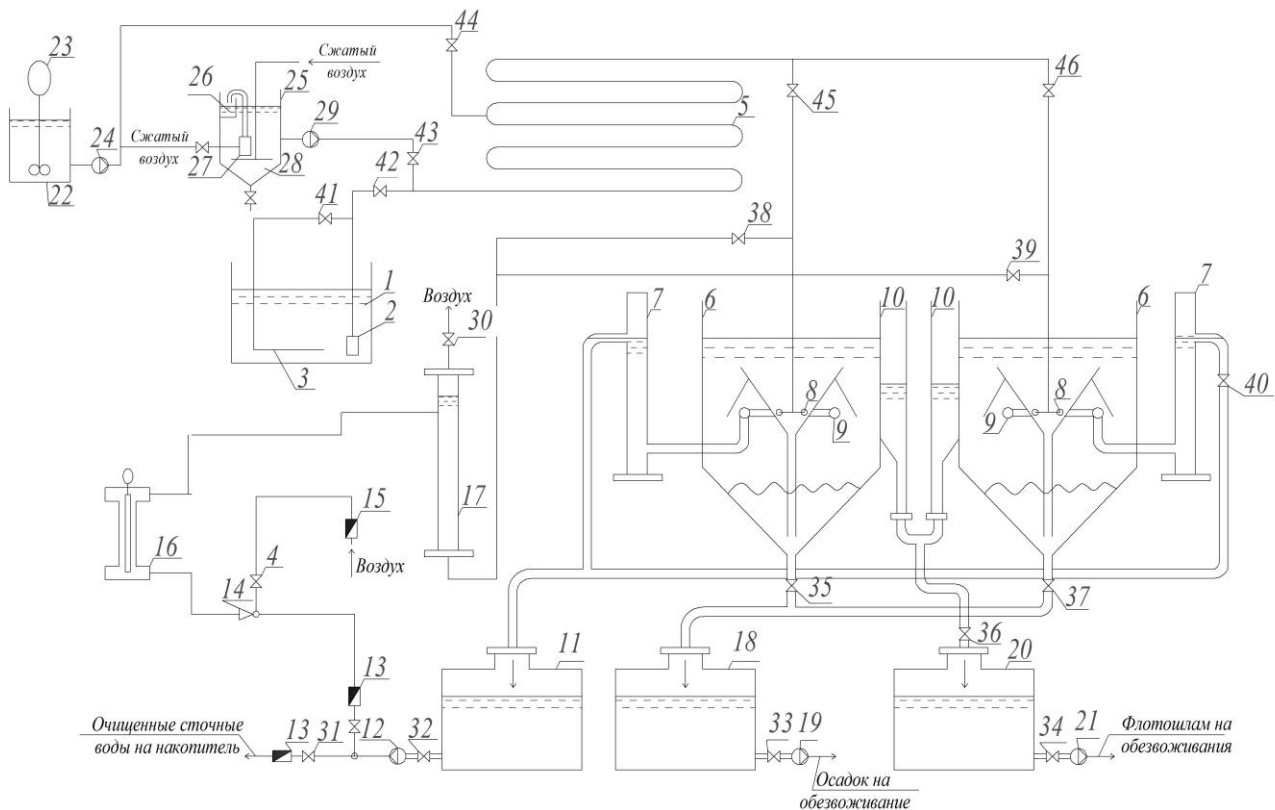


Рисунок 5. Технологическая схема флотационной очистки сточных вод от промывочных ванн ОАО «Пензтяжпромарматура»

Промывные сточные воды самотеком поступают в приемный резервуар-усреднитель 1, где происходит усреднение концентрации содержащихся в них загрязнений. Приемный резервуар-усреднитель 1 оснащен гидравлической системой перемешивания 3. Погружной насос 2 подает сточные воды в систему гидравлического перемешивания 3 и трубчатый смеситель 5.

Трубчатый смеситель в связи со значительной площадью раздела фаз «жидкость-стенка» позволяет существенно интенсифицировать процессы перемешивания сточных вод с реагентами на микроуровне. В трубчатый смеситель 5 насосом дозатором 29 из растворо-расходного бака коагулянта 25 подается известковое молоко.

Растворно-расходный бак 25 снабжен эрлифтом 27, подающим жидкость в карман 26. В карман 26 загружается известь, которая растворяется в процессе фильтрования через нее жидкости перекачиваемой эрлифтом 27. С целью интенсификации процесса хлопьеобразования и флокулирования образовавшихся микрочастиц и микрохлопьев в трубчатый смеситель 5 из растворно-расходного бака 22 насосом дозатором 24 подается раствор флокулянта. Растворно-расходный бак 22 оборудован механической мешалкой 23, интенсифицирующей процесс растворения порошкообразного флокулянта.

В качестве флокулянта используется катионоактивный сополимер акриламида серии АК636Р марки КП555, выпускаемый по ТУ 2216-012-55373366-2007. Прошедшие обработку в трубчатом смесителе 5 промывные воды поступают в систему подачи сточных вод 8 циклонного флотатора 6. Расход промывных вод в процессе их перемещения по очистным сооружениям регулировался запорной арматурой 31-46.

Общий вид циклонного флотатора представлен на рисунке 6.



Рисунок 6. Общий вид циклонного флотатора

В циклонном флотаторе 6 реализована схема флотационной очистки с выделением пузырьков воздуха под действием центробежного поля из диспергированной водовоздушной смеси, образующейся в рециркуляционном потоке очищенных сточных вод перекачиваемых насосом 12. Проходя через водовоздушный эжектор 14, рециркуляционный поток очищенных сточных вод подсасывает атмосферный воздух, расход которого измеряется ротаметром 15 и регулируется запорной арматурой. Водовоздушная

смесь, получаемая на выходе с эжектора 14, поступает в роторно-диспергирующее устройство 16, в котором в результате вращения ротора, поверхность которого покрыта стеклоэмалью, происходит диспергирование пузырьков воздуха водовоздушной смеси.

Поскольку в водовоздушной смеси на выходе из роторно-диспергирующего устройства 16 присутствуют отдельные пузырьки диаметром более  $d_{п} = 0,5 \cdot 10^{-6}$  м, свободное всплывание которых в объеме циклонного флотатора 6 может создать локальные зоны с повышенной турбулентностью, была предусмотрена ее обработка в стояке классификаторе фракций 17.

При движении водовоздушной смеси сверху вниз со скоростью 0,15 м/с пузырьки воздуха диаметром менее  $d_{п} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м увлекаются потоком, а более крупные пузырьки воздуха всплывают на поверхность. Избыточный воздух из воздушной пробки, образующейся в верхней части классификатора 17, удаляется посредством вантуза 30.

Полученная таким образом диспергированная водовоздушная смесь подается в поток сточных вод, прошедших реагентную обработку.

Система подачи сточных вод 8 представляет собой ряд сопел, выполненных в виде «сегнерова» колеса. Выходя из сопел со скоростью 2-3 м/с поток водовоздушной смеси приобретает вращательное движение и перемещается снизу вверх вдоль образующей конуса. Возникающие при вращательно-поступательном движении водовоздушной смеси центробежные силы интенсифицируют процессы образования флотоагрегатов «загрязняющая частица – пузырек воздуха» и их всплывания на поверхность жидкости во флотаторе. Образующийся на поверхности жидкости пенный слой собирается в карман 10, где в процессе гашения пены образуется флотоконденсат, который отводится в бак 20. Флотоконденсат из бака 20 периодически откачивается насосом 21 на участок мехобезвоживания.

Часть загрязнений выпадает на дно циклонного флотатора 6. Образовавшийся осадок под гидростатическим давлением отводится в бак 18. Насосом 19 осадок из бака 18 перекачивается на участок мехобезвоживания. Очищенные сточные воды направляются вниз и собираются кольцевой системой 9 в бак 11, откуда насосом 12 они перекачиваются в бак накопитель. После добавления в очищенные сточные воды необходимого количества реагентов, они повторно используются в качестве промывочных растворов.

Результаты, полученные от внедрения технологии флотационной очистки промывочных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего

устройства на локальных очистных сооружениях ОАО «Пензтяжпромарматура», представлены в таблице 1.

В пятой главе также приводится методика расчета аппаратного оформления предложенной технологии, даются рекомендации к проектированию.

Приводится расчет среднегодового экономического эффекта, полученного от внедрения предлагаемой технологии, по сравнению с технологией компрессионной флотации. Для ОАО «Пензтяжпромарматура» полученный среднегодовой экономический эффект составил более 303 тыс. руб/год в ценах 2015 года.

Таблица 1.

Результаты, полученные от внедрения технологии флотационной очистки промывочных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства на локальных очистных сооружениях  
ОАО «Пензтяжпромарматура»

№	Показатели	Концентрации загрязнений в промывных сточных водах, мг/л	Концентрации загрязнений в очищенных сточных водах, мг/л	Эффект очистки, %	Предельно допустимые концентрации в очищенных сточных водах, мг/л
1	2	3	4	5	6
1	Взвешенные вещества	$\frac{1400 - 2000}{1700}$	$\frac{4,6 - 6,2}{5,4}$	99,7	20
2	Нефтепродукты	$\frac{340 - 500}{420}$	$\frac{0,9 - 2,5}{2,05}$	99,5	4,5
3	Железо общее	$\frac{1,5 - 4,0}{2,75}$	$\frac{0,06 - 0,17}{0,1}$	99,4	0,3

*Примечание: в знаменателе показано среднее значение рассматриваемого показателя.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе теоретического анализа процессов флотационной очистки сточных вод установлено, что эффективность удаления нефтепродуктов при реагентной флотации в значительной мере определяется газонаполнением и степенью дисперсности приготовленной водовоздушной смеси.

2. Предложен новый энергосберегающий способ получения мелкодисперсной водовоздушную смесь с высоким газонаполнением ( $\varphi=0,06-$

0,11), предусматривающий обработку водовоздушной смеси, образующейся на выходе с эжектора, в роторно-диспергирующем устройстве, конструкция которого запатентована автором.

3. Для создания мелкодисперсной водовоздушной смеси ( $d_{\text{пс}}=50-100\text{мкм}$ ) с газонаполнением  $\varphi=0,06-0,11$  наиболее рациональным с точки зрения энергозатрат являются следующие технологические параметры работы роторно-диспергирующего устройства: скорость водовоздушной смеси в патрубке входа  $v_{\text{кв}}=3$  м/с, скорость движения ротора  $v_{\text{ок}}=3$  м/с, число оборотов ротора 4000 об/мин, время обработки водовоздушной смеси в роторно-диспергирующем устройстве 0,5-2,5 с, покрытие ротора – силикатная эмаль марки МК-5 .

4. Разработаны математические зависимости, адекватно описывающие закономерности изменения среднего диаметра пузырьков воздуха при диспергировании водовоздушной смеси в роторно-диспергирующем устройстве от газонаполнения смеси и параметров ее обработки.

5. Экспериментально установлено, что технология реагентной флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля на циклонном флотаторе предложенной конструкции, предусматривающая использование диспергированной водовоздушной смеси, полученной в роторно-диспергирующем устройстве, известкование и флокулирование, позволяет снизить концентрацию взвешенных веществ в сточных водах в 456-641 раз, нефтепродуктов в 124-168 раз.

6. Получены математические зависимости, адекватно описывающие зависимость эффективности процесса реагентной флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля на циклонном флотаторе с использованием диспергированной водовоздушной смеси по предлагаемому способу, от доз реагентов.

7. Технология флотационной очистки нефтесодержащих производственных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства была внедрена в процессе строительства локальных очистных сооружений промывных сточных вод ОАО «Пензтяжпромарматура». Ввод в эксплуатацию локальных очистных сооружений обеспечил снижение концентраций загрязняющих веществ в очищенных сточных водах: взвешенных веществ до 4,6-6,2 мг/л; нефтепродуктов до 0,9-2,5 мг/л; железа общего до 0,06-0,17 мг/л., что позволило после добавления необходимого количества реагентов повторно

использовать очищенные промывные сточные воды в технологическом процессе. Суммарный годовой экономический эффект, полученный от промышленного внедрения предложенной технологии флотационной очистки промывных сточных вод, составил более 303 тыс. руб. в ценах 2015 года.

**Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

1. Петрунин, А.А. Флотационная очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий машиностроительного профиля с применением эмалированных вихревых смесительных устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, А.А. Петрунин // Сб. тр. Международ. науч.-прак. конф.: Совершенствования работы систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий. – Пенза: ПГУАС. - 2011. – С. 33-39.

2. Петрунин, А.А. Математическое моделирование процессов флотации без инерционных дисперсных частиц природных и сточных вод / С.Ю. Андреев, В.В. Димидочкин, Н.И. Ишева, А.А. Петрунин // Сб. тр. Международ. науч.-прак. конф.: Совершенствования работы систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий. – Пенза: ПГУАС. - 2011. – С. 308-318

3. Петрунин, А.А. Математическое моделирование процессов работы трубчатого гидродинамического флокулятора / С.Ю. Андреев, В.А. Князев, Г.П. Давыдов, А.А. Петрунин // Сб. тр. Международ. науч.-прак. конф.: Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов. – Пенза: ПГУАС. - 2012. – С. 72-75.

4. Петрунин, А.А. Математическое моделирование процессов градиентной флокуляции в трубчатых смесительных аппаратах / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин // Сб. ст. XVII Международ. науч.-тех. конф.: Математическое и компьютерное моделирование в решении задач строительства, техники, управления и образования. – Пенза: ПГУАС. - 2012. – С. 9-17.

**5. Петрунин, А.А. К вопросу гидравлического расчета трубчатого гидравлического флокулятора / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, А.М. Исаева, М.В. Бикунова, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство.– Пенза: ПГУАС. – 2013. - №1. - С. 107-114.**

6. Петрунин, А.А. Теоретические основы процессов работы трубчатого гидродинамического флокулятора / С.Ю. Андреев, В.А. Князев, Г.П. Давыдов, А.А. Петрунин // Сб. тр. II –й Международ. науч.-прак. конф.: Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов. – Пенза: ПГУАС. – 2013. – С. 206-209.

7. Петрунин, А.А. Теоретические основы технологии флотационной очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, А.М. Исаева, В.А. Князев, А.А. Петрунин // Сб. тр. II–й Международ. науч.-прак. конф.: Актуальные проблемы

инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов. – Пенза: ПГУАС. – 2013. – С. 33-45.

**8. Петрунин, А.А. Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи и всплывающих газовых пузырьков в технологиях очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, В.А. Князев, Г.П. Давыдов, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство. - Пенза: ПГУАС. - 2013. - №3. - С. 134-139.**

9. Петрунин, А.А. Количественная оценка эффективности метода флотационной очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, А.А. Петрунин // Сб. тр. XV-ой Международ. науч.-прак. конф.: Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. – Пенза: ПГУАС. - 2014г. - С. 19-21.

**10. Петрунин, А.А. Кинетические закономерности процесса флотации из сточных вод без инерционных дисперсных частиц / С.Ю. Андреев, Т.В. Алексеева, И.А. Гарькина, А.М. Исаева, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство.– Пенза: ПГУАС. - 2014. - №3. - С. 131-136.**

11. Петрунин, А.А. Повышение эффективности флотационной очистки сточных вод за счет использования гидродинамических устройств / С.Ю. Андреев, А.А. Петрунин // Энциклопедия инженера химика.– Москва. - 2014. - №10. - С. 30-34.

**12. Петрунин, А.А. Совершенствование флотационной очистки производственных сточных вод / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство.– Пенза: ПГУАС. - 2014. -№2(19). – С. 157-162.**

**13. Петрунин, А.А. Теоретические основы процесса диспергирования водовоздушной смеси используемой для флотационной очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство.– Пенза: ПГУАС. - 2015. - №3. - С. 78-82.**

**14. Петрунин, А.А. Лабораторные исследования технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, Н.Н. Ласков, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство.– Пенза: ПГУАС. - 2015. - №3. - С. 83-88.**

15. Патент 157201 Российской Федерации, МПК В01F 3/04, В01F 7/00, В04С 5/04. Устройство для приготовления водовоздушной смеси / С.Ю. Андреев, А.А. Петрунин, П.А. Полубояринов; патентообладатель ФГБОУ ВО ПГУАС. – заявлено 30.03.2015, опубликовано 27.11.2015. Бюл. №33.

**\*Примечание.** Жирным шрифтом выделены работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОТОРНО-ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО  
УСТРОЙСТВА**

Петрунин Алексей Алексеевич

05.23.04 - Водоснабжение, канализация, строительные  
системы охраны водных ресурсов

**Автореферат**

Подписано к печати      Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 1 усл.- печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ №      Бесплатно.

---

Издательство Пензенского государственного университета  
архитектуры и строительства  
440028, г. Пенза, ул. Г.Титова, 28