

На правах рукописи



Григорьева Анастасия Николаевна

РАЗРАБОТКА ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО  
СУСПЕНДИРОВАНИЯ В АППАРАТАХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА НА ПРИМЕРЕ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель   | доктор технических наук, профессор<br><b>Абиев Руфат Шовкет оглы</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Официальные оппоненты: | <b>Промтов Максим Александрович</b> , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», профессор<br><br><b>Мидуков Николай Петрович</b> , доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор |
| Ведущая организация    | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования « <b>Казанский национальный исследовательский технологический университет</b> », г.Казань                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

Защита состоится **14 октября 2021** года в **15.00** часов на заседании диссертационного совета 24.2.383.05 созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» по адресу: 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26, Белоколонный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), <http://technolog.edu.ru/university/dissovet/autoreferats/file/8557-...html>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Ученый совет, e-mail: [dissowet@technolog.edu.ru](mailto:dissowet@technolog.edu.ru)

Автореферат разослан

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Клементьев Василий Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Перемешивание – один из наиболее распространённых процессов химической технологии. Аппараты с перемешивающими устройствами используются для проведения разнообразных технологических процессов, таких как кристаллизация, абсорбция, экстрагирование, гомогенные и гетерогенные химические реакции и т.д. Аппараты с механическими мешалками применяются в различных отраслях: химической, фармацевтической, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности и др. Большинство процессов реализуется в гетерогенных системах.

Важным направлением, позволяющим существенно снизить энергозатраты на перемешивание, является разработка новых конструкций и методов их инженерного расчета.

Сфера применения аппаратов с перемешивающими устройствами достаточно широка. Экспериментальная часть настоящей работы выполнена на примере перемешивания при аппаратурном оформлении процесса очистки сточных вод. Одной из актуальных задач данной отрасли является снижение затрат на перемешивание иловой смеси, а также аэрацию сточных вод, так как 80% потребляемой предприятиями электроэнергии приходится именно на эти процессы. Наиболее эффективными способами интенсификации массообменных процессов, наряду с поиском методов эффективного повышения коэффициентов массоотдачи, является создание развитой межфазной поверхности. На сегодняшний день данная задача решается путем использования аэраторов (барботеров) с малым диаметром отверстий, что сопряжено с высокими эксплуатационными затратами, так как мелкие поры подвержены чрезмерному забиванию. Таким образом, совершенствование данного способа является одной из важнейших задач отрасли.

### **Степень разработанности**

Известные методы расчета перемешивающих устройств основаны на использовании эмпирических коэффициентов, выведенных на основе экспериментальных данных. В России действует ГОСТ 20680-2002 «Аппараты с перемешивающими устройствами. Общие технические условия», в котором подробно описаны требования к материалам, конструкции и комплектующим

для изготовления аппаратов. Однако выбор мешалок конкретного типа, их параметров и размеров в зависимости от вида технологического процесса не регламентирован. Большой вклад в изучение гидродинамики перемешивания и разработку алгоритмов расчета при проектировании аппаратов с мешалками внесла группа ученых из ЛенНИИХиммаша: В.М. Барабаш, В.И. Бегачев, Л.Н. Брагинский, Э.А. Васильцов, О.Е. Вишневецкая, Г.В. Горбачева, Г.Г. Егорова, Е.Г. Козлова, Л.Л. Лалакина, С.С. Максимова, В.Л. Садовский, В.Г. Ушаков, А.В. Черников, В.В. Ярошенко, разработавших руководящий документ 26-01-90-85 «Механические перемешивающие устройства. Метод расчета». К сожалению, этот документ не корректировался с 80-х годов прошлого столетия. Данный факт затрудняет расчеты мешалок новой геометрической формы, предприятия вынуждены применять стандартные, хорошо изученные аппараты, что часто приводит к неоправданным затратам и снижению эффективности. Другой подход к проектированию мешалок для аппаратов больших объемов предложили И.В. Доманский, А.И. Мильченко и др.<sup>1</sup> Следует отметить, что данные о внедрении подобных мешалок в технологию очистки сточных вод, где аппараты имеют преимущественно прямоугольную форму, на сегодняшний день в литературе отсутствуют.

### **Цель и задачи работы**

Целью данной диссертационной работы является разработка механического перемешивающего устройства, обладающего высокой эффективностью, малой энергоемкостью, а также создание методов расчета основных параметров аппарата с мешалкой.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка устройства с улучшенной геометрией для перемешивания в системе жидкость-твердое и жидкость – газ;
2. Разработка методики расчета аппарата с конической мешалкой;
3. Экспериментальное исследование поля скоростей в аппарате с конической мешалкой, определение критерия мощности;

---

<sup>1</sup> Опыт проектирования и надежной эксплуатации прецессионных мешалок рудных пульп для аппаратов большого объема / И. В. Доманский, А. И. Мильченко, Ю. В. Саргаева [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – Т. 51. – № 6. – С. 687-699. – DOI 10.7868/S0040357117060021.

4. Выявление механизма диспергирования газа в аппарате с мешалками улучшенной геометрии. Изучение эффективности диспергирования в аппарате с конической мешалкой в сопоставлении со стандартными аппаратами;
5. Получение критериальных уравнений для расчета предельной частоты вращения мешалки для суспензий, твердые включения которых подвержены быстрому разрушению из-за чрезмерных касательных напряжений;
6. Экспериментальное исследование процесса насыщения жидкости кислородом с использованием конической мешалки и оценка эффективности от ее применения.

### **Научная новизна**

Установлены закономерности движения жидкости в аппарате с конической мешалкой при различных скоростях ее вращения; исследовано поле скоростей; предложено выражение для расчета критерия (коэффициента) мощности; разработана методика расчета основных параметров перемешивающего устройства, позволяющая определить оптимальные технологические и энергетические характеристики процесса; найдена константа Айранчи-Креста для конической мешалки, позволяющая прогнозировать необходимую и достаточную частоту вращения перемешивающего устройства для обеспечения отсутствия отложений на дне аппарата в процессе суспендирования твердых частиц; новизна технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Проведенные экспериментальные исследования показали более эффективное осуществление процесса суспендирования в аппарате с вновь разработанной конической мешалкой по сравнению с традиционными типами мешалок. На основе полуэмпирической модели турбулентности Прандтля разработана методика расчета допустимой частоты вращения перемешивающего устройства для частиц, склонных к разрыву (на примере флокулянта). Использование разработанных мешалок позволяет уменьшить затраты электроэнергии и, тем самым, снизить себестоимость готового продукта. Конструкция мешалки внедрена на предприятиях ФГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» для перемешивания избыточного активного

ила, АО «Полиметалл» для растворения медного купороса, ФПУП «Тепло Коломны» для перемешивания иловой смеси, ОАО «Святогор», г. Красноуральск Свердловской области. Например, в результате внедрения конических мешалок предприятие ОАО «Святогор» смогло увеличить скорость реакции нейтрализации серной кислоты известняковым молоком в 1,6 раза при одновременном снижении энергозатрат на 40% по сравнению с традиционной лопастной мешалкой.

### **Методология и методы исследования**

Методологическую основу исследования составили методы физического и математического моделирования, а также элементы статистики. Теоретической базой послужили работы отечественных и зарубежных исследователей в области химической технологии.

Методами исследования являлись физические эксперименты и численное моделирование при помощи CFD модуля в программном пакете FlowVision. В работе применялась программа Microsoft Excel и многофункциональная программа научных расчетов MathCad.

### **Положения, выносимые на защиту**

- новая конструкция устройства для перемешивания жидких сред;
- методика выбора перемешивающего устройства для аппаратов больших объёмов;
- результаты экспериментальных исследований процессов перемешивания систем жидкость-твёрдое и жидкость-газ в аппарате с мешалкой конического типа;
- результаты экспериментального исследования массопереноса в аппарате с мешалкой конического типа в системах жидкость-твёрдое и жидкость-газ.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом выполненных экспериментальных исследований и подтверждается сходимостью полученных зависимостей с результатами численных и теоретических расчетов, а также с данными других исследователей. Основные положения и результаты диссертационной работы апробированы на международных и всероссийских конференциях: «Неделя науки – 2019»: IX научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в

рамках мероприятий, посвященной 150-летию открытия Периодического закона химических элементов Д.И. Менделеевым (Санкт-Петербург, 01–03 апреля 2019 года), «Яковлевские чтения»: XIV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева (Москва, 24–25 октября 2019 года), "ТЕХНОВОД-2019": XII Международной научно-практической конференции (Москва, 22–23 октября 2019 года), The 12th European Congress of Chemical Engineering (Флоренция, Италия, 15-19 сентября 2019), «Передовые технологии в системах водоотведения населенных мест» : международной научно-практической конференции (Минск, Белоруссия, 12–13 февраля 2020 года).

Диссертация изложена на 121 странице машинописного текста, содержит 57 рисунков, 20 таблиц и 55 формул. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Список использованных источников включает 98 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

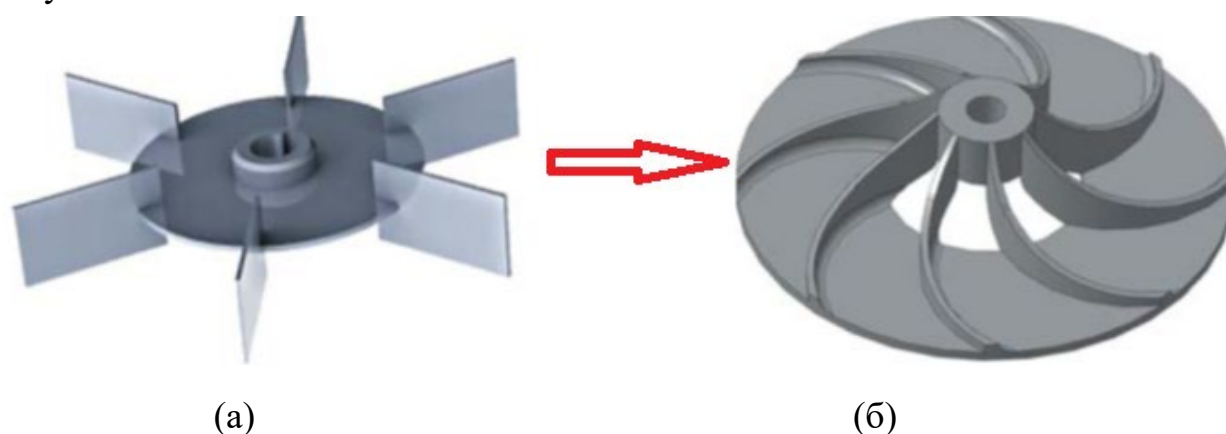
Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень разработанности темы диссертации.

В **первой главе** проведен анализ литературных данных, характеризующий современное состояние теории и практики перемешивания в жидких средах. Рассмотрена классификация перемешивающих устройств, приведен обзор рекомендаций по их выбору на основании изученной литературы. Биологическая очистка сточных вод представляет собой технологические процессы, основанные на способности биологических организмов разлагать загрязняющие вещества на безопасные для природы продукты. При реализации биологических процессов очистки сточных вод в аэротенках биологические организмы, участвующие в разложении загрязнений, которые поступают со сточными водами, пребывают во взвешенном состоянии и представляют собой «флоки» (хлопья) - зооглейные скопления микроорганизмов, простейших, червей, водных грибов и дрожжей. Ил, содержащий микроорганизмы, которые сорбируют и разлагают загрязняющие вещества в сточных водах, называется активным илом. Одним из условий жизнедеятельности микроорганизмов является эффективное

перемешивание иловой смеси, в противном случае происходит загнивание. Таким образом, в технологическом процессе биологической очистки сточных вод ключевую роль играет перемешивание и аэрация (насыщение кислородом) активного ила. В свою очередь, повышение эффективности перемешивания иловой смеси в аэротенках позволяет повысить эффективность микробиологических процессов окисления аммиака до азотистой кислоты или её самой далее до азотной кислоты без увеличения эксплуатационных затрат на аэрацию.

Для процессов перемешивания в технологии очистки сточных вод предпочтительными являются мешалки с вертикальным валом. В отличие от мешалок с горизонтальной осью и погружным приводом при таком расположении удастся избежать застойной зоны в центре емкости. Тихоходные мешалки способствуют эффективному перемешиванию без разрыва хлопьев активного ила. Перемешивающее устройство должно иметь обтекаемую форму, обеспечивающую малое энергопотребление (не более 5 Вт/м<sup>3</sup>). Основная цель перемешивания в очистке сточных вод – обеспечение придонной скорости не менее 0,3 м/с для исключения образования залежей на дне резервуара, что позволяет предотвратить загнивание активного ила.

Для достижения сформулированной цели было разработано новое устройство, прототипом для которого явилась хорошо известная турбинная мешалка. Внешний вид конической мешалки и ее прототипа представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1-** Внешний вид турбинной (а) и конической (б) мешалок

**Вторая глава** посвящена теоретическому анализу процессов перемешивания в системах жидкость-твердое и жидкость-газ.

Изучена гидродинамические особенности в аппарате с мешалкой конического типа. На основе модели комбинированного вихря рассмотрены методы расчета параметров распределения скоростей в периферийной зоне аппарата. Дополнительно исследовано перемешивание в аппарате прямоугольной формы, так как в очистке сточных вод аэротенки традиционно имеют прямоугольную форму.

Окружная скорость  $v$  на радиусе  $d_m/2$  описывается уравнением:

$$v \left( \frac{d_m}{2} \right) = (1 + \psi_1 + \psi_2) \omega_0 \frac{d_m}{2}, \quad (1)$$

где  $d_m$  – диаметр мешалки, м;  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – параметры распределения окружной скорости;  $\omega_0$  – угловая скорость вращения мешалки, 1/с.

Параметры распределения скорости связаны между собой соотношением:

$$\psi_2 = -0,5 - 1,25 \psi_1. \quad (2)$$

Таким образом, посредством измерения радиальной скорости потока на радиусе  $r$  (при помощи CFD-моделирования и путем измерения инструментальными методами) с использованием выражений (1) и (2) были определены параметры распределения скоростей.

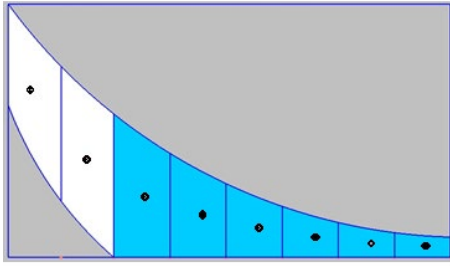
При расчете аппарата с перемешивающим устройством для суспендирования твердых частиц в жидкости одним из важных показателей являются минимальные значения необходимой для подъема частиц со дна скорости вращения мешалки  $N_{js}$ , для определения которой использована формула<sup>2</sup>:

$$N_{js} = A \left( \frac{g (\rho_q - \rho)}{\rho} \right)^{0,5} \frac{d_q^{\frac{1}{6}} x^n}{k_N^{\frac{1}{3}} d_m^{\frac{2}{3}}} \frac{D}{d_m}, \quad (3)$$

где  $A$  – константа Айранчи-Креста, зависящая от геометрии мешалки и свойств твердых частиц;  $\rho_q$  и  $\rho$  – плотности частиц и жидкости соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $d_q$  – диаметр частиц, м;  $x$  – массовая концентрация твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – частота вращения мешалки, с<sup>-1</sup>;  $D$  – диаметр аппарата, м.

---

<sup>2</sup> Inci Ayrançi, Suzanne M. Kresta, Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks, Chemical Engineering Research and Design, Volume 92, Issue 3, 2014, Pages 413-422, ISSN 0263-8762, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.09.005>.



**Рисунок 2** – Схема лопасти конической мешалки, разделенной на отдельные элементы (точками отмечены центры масс каждого элемента)

При разработке мешалки с улучшенной геометрией важной задачей является определение критерия мощности  $k_N$ . Для перемешивающих устройств традиционной формы таблицы значений критерия мощности представлены в справочной литературе. На основе модели лопасти конической мешалки как суммы плоских пластин (рисунок 2) было выведено критериальное уравнение для расчета коэффициента мощности  $k_N$ :

$$k_N = \frac{N_{\text{сум}}}{\rho n^3 d_m^5}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{сум}}$  – суммарная мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления лопасти, определяемая по формуле

$$N_{\text{сум}} = \sum_1^i \frac{\varphi_i F_{\text{ли}} \omega_0^3 \rho}{2}. \quad (5)$$

Здесь  $\varphi_i$  – геометрический симплекс, учитывающий отношение длины лопасти к ее средней ширине;  $F_{\text{ли}}$  – площадь лобовой поверхности лопатки, вытесняющей жидкость,  $\text{м}^2$ ;  $\omega_0$  – угловая скорость вращения мешалки,  $1/\text{с}$ .

Из анализа литературных источников, посвященных массообмену в системе жидкость-газ в очистке сточных вод, установлены следующие критерии оценки эффективности переноса кислорода:

1. Показатель SOTE (%), который вычисляется как отношение количества растворившегося кислорода к количеству поданного кислорода, являющийся в свою очередь произведением расхода воздуха  $Q_{\text{air}}$  на удельное содержание кислорода в воздухе  $C_{\text{O}_2}$  ( $0,2765 \text{ кг/м}^3$ ):

$$SOTE = \frac{SOTR}{Q_{\text{air}} C_{\text{O}_2}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где SOTR – скорость растворения кислорода  $dC/dt$  (в водоочистке данный показатель часто называют окислительной способностью),  $\text{кг/ч}$ .

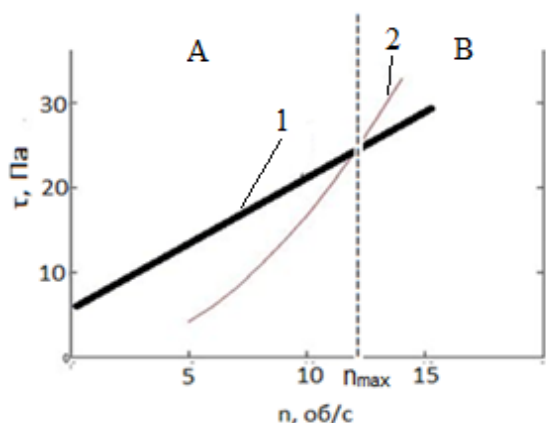
2. Показатель SAE,  $\text{кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$

$$SAE = SOTR/N, \quad (7)$$

где  $N$  – потребляемая мощность, кВт.

В настоящее время для насыщения сточных вод кислородом широкое распространение получила пневматическая система аэрации в виде дисковых аэраторов. Основные недостатки системы: изменения в материале мембраны в процессе эксплуатации; резкое снижение эффективности при увеличении расхода воздуха; потребность в большом количестве аэраторов, расположенных по поверхности дна аппарата; чрезмерно высокая длительность и сложность монтажа аэраторов, особенно при большом их количестве; необходимость в специальных водосбросных стояках. Применение пневмомеханической системы (когда воздух подводится под мешалку и дробится посредством турбулентных пульсаций) позволит устранить все перечисленные недостатки.

Массообмен в системе жидкость-твердое в условиях конической мешалки исследован на примере растворения флокулянтов в воде.



**Рисунок 3** - Совмещенный график зависимости вводимых конической мешалкой турбулентных напряжений (линия 2) и напряжений сдвига флокулянта Магнафлок M155 (линия 1) от частоты вращения  $n$ : А-зона допустимой частоты вращения мешалки, В – зона разрушения цепочек флокулянта турбулентными пульсациями,  $n_{\max}$  – пороговая частота вращения мешалки

Эффективность растворения частиц флокулянта во многом определяется конструкцией аппарата и частотой вращения мешалки. Таким образом, надо удовлетворить двум противоречащим друг другу требованиям: 1) подвести достаточное количество энергии для растворения флокулянтов; 2) не допустить разрушения уже развернувшихся частиц флокулянта. На основе модели турбулентности Прандтля, дополненной Карманом, предложена методика определения пороговой частоты вращения мешалки. Пример совмещенного графика зависимости создаваемых мешалкой турбулентных напряжений и напряжений сдвига раствора



**Таблица 1** – Результаты CFD моделирования и измерения окружной скорости на различных расстояниях от оси мешалки.

| Расстояние от оси мешалки, мм                                            | 100     | 200    | 300    |
|--------------------------------------------------------------------------|---------|--------|--------|
| Скорость жидкости $v_{CFD}$ по результатам CFD моделирования, м/с        | 0,126   | 0,118  | 0,098  |
| Скорость жидкости $v_{экс}$ по результатам измерения микровертушкой, м/с | 0,136   | 0,0968 | 0,0789 |
| Отношение $v_{CFD}/v_{экс}$                                              | 107,94% | 82,03% | 80,51% |
| Относительная погрешность, %                                             | 7,94%   | 17,97% | 19,49% |

Авторы статьи <sup>3</sup> исследовали перемешивающие устройства и проводили измерение скорости потока более точными методами (с использованием метода лазерной доплеровской анемометрии). Средняя относительная погрешность между расчетными и экспериментальными значениями скорости в их работе составила от 9,5 до 32 % для традиционной турбинной мешалки (мешалки Раштона) и от 11 до 39 % для турбинной мешалки с наклонными лопастями. Таким образом, достигнутое в настоящей работе отклонение расчетных данных от экспериментальных (менее 20 %) следует считать приемлемым результатом.

Численное значение параметров распределения скоростей, найденных с использованием формул (1) и (2) составили:  $\psi_1 = 1.68$ ,  $\psi_2 = 2.6$ .

Экспериментальное исследование с целью определения минимально необходимой скорости вращения мешалки для суспендирования  $N_{js}$  проводилось в цилиндрической емкости. В качестве материала модельной среды использованы частицы различной плотности: карбонат кальция (средний размер частиц – 42 мкм, форма частиц – хлопья, плотность частиц – 2600 кг/м<sup>3</sup>) и шарики ионообменной смолы (средний размер частиц – 677 мкм, форма частиц – шар, плотность частиц – 1370 кг/м<sup>3</sup>). В цилиндрической прозрачной емкости готовили суспензию определенной концентрации (таблица 2) и при постепенном увеличении частоты вращения мешалки путем

<sup>3</sup> Войтович, Р. О возможности использования различных моделей турбулентности для расчета гидродинамических и энергетических характеристик аппаратов с турбинными мешалками / Р. Войтович, А. А. Липин, Я. Талага // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 4. – С. 386. – DOI 10.7868/S0040357114020146.

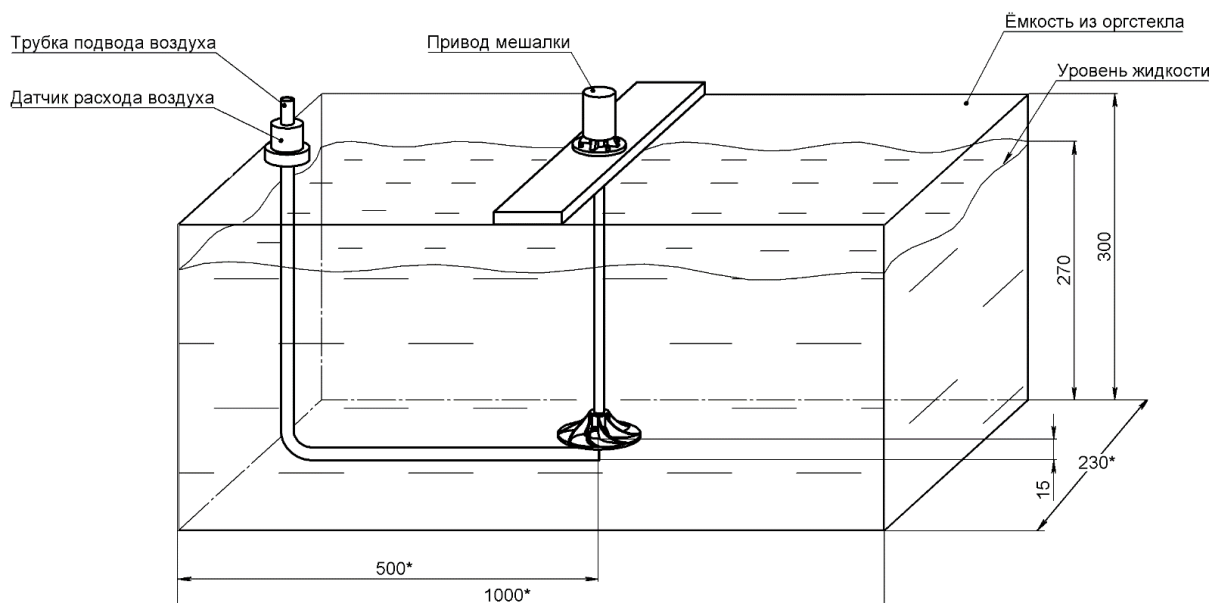
визуального наблюдения определяли  $N_{js}$ . Коэффициент Айранчи–Креста  $A$  рассчитывали по формуле (3).

**Таблица 2** – Экспериментальные данные по определению частоты суспендирования частиц и коэффициента Айранчи–Креста  $A$ .

| Твердая фаза       | $\rho_{ТВ},$<br>кг/м <sup>3</sup> | $d_{ч},$ мм | Концентрация<br>$x_{ТВ},$ % масс. | $N_{js},$ об/мин | $N_{jscp},$<br>об/мин | $A$  |
|--------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------|------|
| Ионообменная смола | 1370                              | 0,677       | 2,5                               | 315/319/314      | 316                   | 0,83 |
|                    |                                   |             | 5                                 | 336/341/337      | 338                   |      |
|                    |                                   |             | 0                                 | 381/378/379      | 379                   |      |
|                    |                                   |             | 15                                | 423/425/419      | 422                   |      |
| Микрокальцит       | 2600                              | 0,042       | 2,5                               | 419/422/421      | 421                   | 0,87 |
|                    |                                   |             | 5                                 | 448/452/455      | 452                   |      |
|                    |                                   |             | 10                                | 486/495/489      | 490                   |      |
|                    |                                   |             | 15                                | 514/518/522      | 518                   |      |

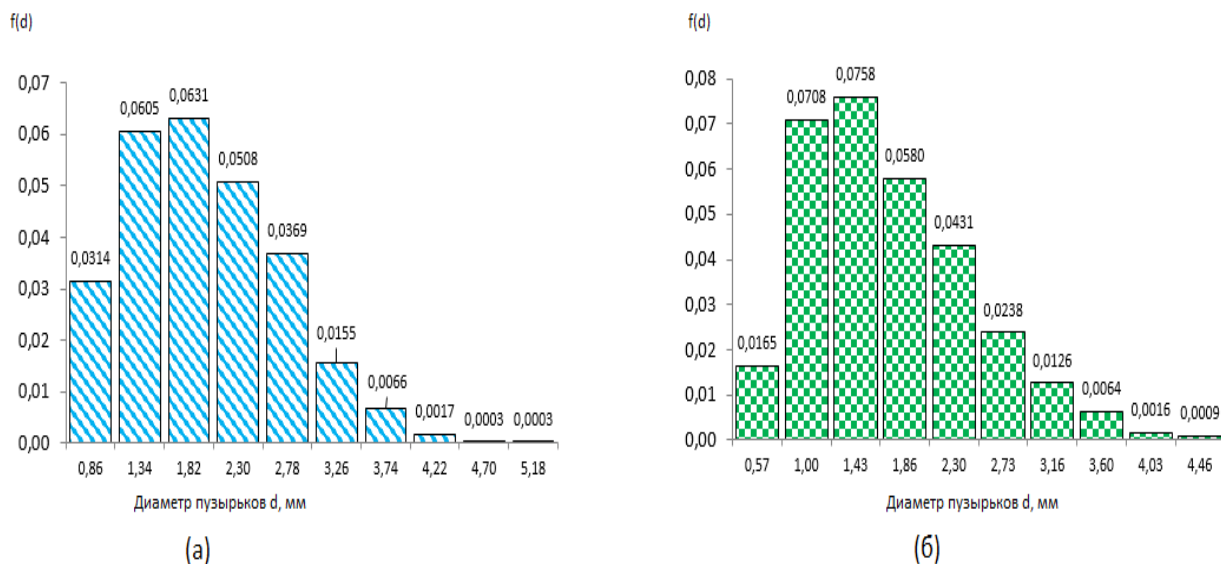
Таким образом, в результате экспериментальных исследований получено значение константы Айранчи-Креста  $A = 0,85$ , что открывает возможность в дальнейшем производить расчеты для промышленных аппаратов большого объема.

В лабораторном аппарате исследовано влияние частоты вращения мешалки на диаметр пузырьков воздуха. Эксперименты по оценке среднего размера диаметров пузырьков проводились в прямоугольном сосуде из оргстекла (полиметилметакрилат) с плоским дном. Форма емкости максимально приближена к реальным сооружениям (аэротенкам), а ее геометрические размеры велики по отношению к диаметру мешалки, т.е. лабораторный аппарат геометрически подобен промышленной установке. Схема экспериментального аппарата представлена на рисунке 5.



**Рисунок 5** - Схема экспериментальной установки

При сравнении конической мешалки с турбинной установлено, что область распространения пузырьков с обеими мешалками приблизительно равна и превосходит диаметр лопастей по ширине приблизительно в 10 раз. На основании расчета среднего диаметра по Заутеру (результаты представлены на рисунке 6) установлено, что турбинная мешалка несколько более эффективно диспергирует воздух, однако мощность, расходуемая на перемешивание, существенно меньше для конической мешалки.



**Рисунок 6** - Распределение размеров пузырьков воздуха при диспергировании газа конической (а) и турбинной (б) мешалками в сопоставимых условиях

В турбулентном режиме (при высоких числах Рейнольдса) диаметр создаваемых обеими мешалками пузырьков находится преимущественно в

промежутке от 1,0 до 2,5 мм. Эти размеры удовлетворяют требованиям, при которых достигается максимальный эффект очистки сточных вод. По принятому критерию эффективности (отношение диаметра Заутера к мощности, расходуемой на перемешивание) разработанная коническая мешалка превосходит турбинную в 3,8 раза. Это объясняется малым потреблением энергии, т.к. лопасти новой мешалки скруглены и имеют более обтекаемую форму.

Результаты экспериментального исследования массообмена в аппарате с конической мешалкой в системе жидкость-газ и жидкость-твердое представлены **в главе 4**. В ходе проведения эксперимента по сульфитной методике исследованы зависимости концентрации растворенного кислорода в воде от времени для конической и турбинной мешалок. По критерию эффективности SOTE все исследованные мешалки сопоставимы, хотя наблюдается тенденция роста коэффициента массоотдачи от пузырей  $k_{La}$  с увеличением диаметра мешалки. Если проанализировать теоретический расчет  $k_{La}$ , приведенный в статье<sup>4</sup>, то на величину объемного коэффициента массоотдачи от пузырей в жидкость оказывает влияние объем зоны аэрации, т. е. зоны, в которой распределены пузырьки. При увеличении диаметра мешалки объем зоны распространения пузырьков возрастает, что и объясняет рост SOTE.

На основе выполненных исследований установлено, что коническая мешалка по скорости насыщения воды кислородом работает так же эффективно, как и турбинная, потребляя при этом гораздо меньше электроэнергии. При использовании перемешивающего устройства предложенной конструкции вследствие низкого сопротивления лопастей перемешивание в системе жидкость-газ оказывается возможным в аппаратах больших размеров, что особенно актуально для аэротенков небольшой глубины при биологической очистке сточных вод, когда эффективность пневматической системы существенно снижается. Применение системы пневмомеханической аэрации позволит избежать достаточно трудоемкого процесса монтажа и обслуживания барботеров, а также решить проблему

---

<sup>4</sup> Rutherford, K. The influence of Rushton impeller blade and disc thickness on the mixing characteristics of stirred vessels / K. Rutherford // Chemical engineering research & design. — 1996. — N. 74 (3). — P. 369-378.

периодического забивания отверстий в них. Кроме того, появляется возможность подавать кислород в объемах, необходимых для насыщения сточной воды с активным илом, а перемешивание производить мешалками и, соответственно, снизить мощность воздуходувок – наиболее энергоемкого оборудования на водоканалах.

Экспериментальное исследование массообмена в системе жидкость-твердое проводилось на примере растворения флокулянтов. Результаты расчета пороговой частоты вращения мешалки, времени растворения и мощности, затрачиваемой на перемешивание, представлены в таблице 3.

**Таблица 3** – Показатели процесса растворения флокулянта с использованием различных перемешивающих устройств (диаметр всех мешалок 50 мм).

| Тип мешалки   | Пороговая частота вращения, об/мин | Расчетная мощность, расходуемая на перемешивание N, Вт | Время растворения T, мин | Производительность аппарата P (60/T), 1/ч | Отношение P/N, 1/(Вт·ч) |
|---------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|
| Трехлопастная | 450                                | 0,158                                                  | 60                       | 1                                         | 6,32                    |
| Турбинная     | 360                                | 0,554                                                  | 50                       | 1,2                                       | 2,1                     |
| Коническая    | 720                                | 0,205                                                  | 40                       | 1,5                                       | 7,31                    |

Отношение P/N характеризует количество циклов растворения в час, приходящееся на каждый Ватт мощности, затраченной на перемешивание. Чем выше этот показатель, тем эффективнее используется вводимая в аппарат энергия. Очевидно, что при использовании конической мешалки можно перемешивать флокулянт при наибольшей среди исследованных мешалок частоте вращения, т.к. она создает наименьший уровень сдвиговых напряжений во время работы за счет обтекаемой формы лопастей. Применение турбинной мешалки на высоких частотах вращения ограничено из-за опасных сдвиговых напряжений вблизи острых кромках лопаток, расположенных под углом 90° к плоскости вращения. При этом аппарат с конической мешалкой оказывается не только наиболее производительным, но

и обладает наибольшим КПД (кратность объемов аппарата, которое можно перемешать за час, к затратам мощности, расходуемой на перемешивание).

Установлено, что применение новой конической мешалки позволяет интенсифицировать процесс приготовления флокулянтов в 1,5 раза по сравнению с наиболее распространенной на практике лопастной мешалкой и в 1,25 раза по сравнению с турбинной.

**Пятая глава** посвящена разработке алгоритма выбора конической мешалки для аппаратов различных геометрических размеров - рисунок 7.



**Рисунок 7** – Алгоритм выбора перемешивающего устройства

Предложенная методика проверена при расчете промышленного аппарата с мешалкой для суспендирования известнякового молочка при нейтрализации серной кислоты на предприятии ОАО «Святогор». Установлены преимущества мешалки конической формы в сопоставлении с традиционными лопастными мешалками с вертикальным валом для суспендирования твердых частиц в жидкости. Положительный эффект достигнут исходя из следующих положений:

– поскольку вертикальная составляющая средней скорости вблизи днища обращается в нуль, источником возникновения подъёмной силы могут служить только горизонтальная (радиальная) составляющая скорости и турбулентные пульсации вблизи днища. Для суспендирования применена геометрия мешалки, создающая преимущественно радиальную скорость потока, что привело к отсутствию осадка на всем дне;

– лопасти предложенной мешалки скруглены, имеют обтекаемую форму, что положительно сказывается на энергопотреблении. В результате удалось снизить мощность, расходуемую на перемешивание, по сравнению с существующей мешалкой на 40%;

– реакция нейтрализации протекает вблизи дна емкости, кислота подается в реактор в зону максимальных турбулентных пульсаций, что приводит к значительному сокращению времени реакции (в 1,6 раза);

– поток жидкости в зоне вала мешалки направлен от поверхности жидкости к дну аппарата, поэтому сила, действующая на подшипники мотор-редуктора направлена не вверх (как у лопастных мешалок с восходящим потоком), а вниз. Данное обстоятельство позволяет отказаться от промежуточных подшипниковых опор, что обеспечивает удешевление и упрощение оборудования и снижает затраты на проведение периодического технического обслуживания.

Проведено экономическое обоснование от внедрения мешалок конического типа на основании расчета стоимости жизненного цикла изделий (по аналогии с насосными системами). Выполнено сравнение конической мешалки с импортной гиперболической мешалкой. Наиболее существенными факторами в стоимости жизненного цикла перемешивающих устройств является их закупочная стоимость, а также энергозатраты. Установлено, что коническая мешалка имеет более низкую стоимость жизненного цикла даже при работе на более высоких оборотах с увеличенным энергопотреблением. Если сравнивать работу устройств в одинаковых условиях, то закупочная стоимость российской мешалки ниже импортной в 2,6 раза. Вместе с тем необходимо отметить, что при технико-экономическом анализе использован ряд допущений. В дальнейшем подобное обоснование следует проводить отдельно для каждого конкретного случая.

### **Заключение:**

1. Разработана конструкция устройства – конической мешалки – для перемешивания в системе жидкость-твердое и жидкость-газ.
2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено низкое значение критерия мощности новой конструкции.
3. Выявлены условия суспендирования твердых частиц в жидкости в аппарате с коническими мешалками, определены параметры распределения скоростей.
4. Получено уравнение для расчета предельной частоты вращения мешалки для суспензий, твердые включения которых подвержены быстрому разрушению из-за чрезмерных касательных напряжений, образующихся вблизи концов лопаток (на примере флокулянтов).
5. Выполнен сопоставительный анализ эффективности диспергирования пузырей воздуха в аппарате с конической и турбинной мешалками.
6. Экспериментальным путем исследованы процесс насыщения жидкости кислородом и эффективность массообмена в аппарате с конической мешалкой. Предложена система аэрации сточных вод, позволяющая существенно снизить эксплуатационные затраты, особенно для водоканалов малых населенных пунктов.
7. Разработана инженерная методика расчета аппарата с конической мешалкой.
8. Выполнено экономическое обоснование эффективности внедрения мешалок предложенной конструкции, установлена быстрая окупаемость данного оборудования.

### **По теме диссертации опубликованы следующие основные работы:**

1. Абиев, Р. Ш. Применение перемешивающих устройств для очистки сточных вод: сравнение гиперболических мешалок с ближайшими аналогами / Р. Ш. Абиев, А. Н. Григорьева // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 9(213). – С. 25-31.
2. Григорьева, А. Н. Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ-жидкость / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Химическая промышленность сегодня. – 2019. – № 5. – С. 18-22.

3. Григорьева, А. Н. Сравнительный анализ влияния геометрической формы рабочих колес перемешивающих устройств на эффективность суспендирования в системе жидкость - твердое / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2018. – № 45(71). – С. 94-97.

4. Григорьева, А. Н. К выбору типа и частоты вращения мешалки для эффективного перемешивания флокулянтов в воде / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Вода и экология: проблемы и решения. – 2020. – № 2(82). – С. 27-36. – DOI 10.23968/2305-3488.2020.25.2.27-36.

5. Григорьева, А. Н. Влияние конструкции перемешивающего устройства на эффективность массообмена при пневмомеханической аэрации сточных вод / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 6. – С. 25-32. – DOI 10.35776/MNP.2020.06.04.

6. Григорьева, А. Н. Исследование процесса суспендирования с использованием конической мешалки на примере процесса нейтрализации серной кислоты ОАО "Святогор" / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 12. – С. 11-20.

7. Ануфриев, А. В. Биологическая очистка сточных вод с использованием системы пневмомеханической аэрации / А. В. Ануфриев, А. Н. Григорьева // Неделя науки - 2019 : Сборник тезисов IX научно-технической конференции (с международным участием) студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках мероприятий, посвященных 150-летию открытия Периодического закона химических элементов Д.И. Менделеевым, Санкт-Петербург, 01–03 апреля 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2019. – С. 222.

8. Григорьева, А. Н. Сравнительный технико-экономический анализ пневматического и механического перемешивания биологической загрузки в устройствах для очистки сточных вод / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2020. – № 10(154). – С. 20-28.

9. Григорьева, А. Н. Перемешивающее устройство нового типа для эффективного суспендирования в аппаратах больших объемов / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2019": Материалы XII Международной научно-практической конференции, Москва, 22–23 октября 2019 года. – Москва: ООО "Лик", 2019. – С. 297-301.

10. Григорьева, А. Н. Сравнительный технико-экономический анализ пневматического и механического перемешивания биологической загрузки в

устройствах для очистки сточных вод / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Водоочистка. – 2021. – № 1. – С. 24-35.

11. Абиев, Р. Ш. Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при пневмомеханической аэрации сточных вод / Р. Ш. Абиев, А. Н. Григорьева // Сборник докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня образования факультета водоснабжения и водоотведения МИСИ - МГСУ : Сборник докладов, Москва, 24–25 октября 2019 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. – С. 9-15.

12. Abiev, R. Sh. Mass transfer intensification in wastewater aeration system with novel conical mixer [Электронный документ] / R. Sh. Abiev, A. N. Grigoreva // Материалы конференции «12th European Congress of Chemical Engineering», 15-19 сентября, Флоренция, Италия.– 2019.– С.3.

(URL: <https://www.aidic.it/ecce12/programma/pro.html#343grigoreva.docx>).

13. Григорьева, А. Н. Оценка интенсивности массообмена и затрат энергии при пневмомеханической аэрации сточных вод / А. Н. Григорьева // Передовые технологии в системах водоотведения населенных мест: Материалы международной научно-практической конференции, Минск, 12–13 февраля 2020 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2020. – С. 56-60.

14. Патент № 2683078 С1 Российская Федерация, МПК В01F 7/18, В01F 7/26. Перемешивающее устройство : № 2018120860 : заявл. 06.06.2018 : опубл. 26.03.2019 / Р. Ш. Абиев, А. Н. Григорьева ; заявитель Непубличное акционерное общество "Астерион".

15. Патент № 2738083 С1 Российская Федерация, МПК В01F 3/08. Перемешивающее устройство : № 2020121166 : заявл. 26.06.2020 : опубл. 07.12.2020 / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев; заявитель Непубличное акционерное общество "Астерион".

16. Патент № 2732709 С1 Российская Федерация, МПК В01F 1/00, В01F 3/12, В01F 7/16. Способ приготовления раствора флокулянта и аппарат для его осуществления : № 2020110509 : заявл. 13.03.2020 : опубл. 22.09.2020 / Р. Ш. Абиев, А. Н. Григорьева ; заявитель Непубличное акционерное общество "Астерион".

17. Патент № 2693155 С1 Российская Федерация, МПК В01F 3/08, В01F 3/12, В01F 7/16. Устройство для предотвращения воронок в аппарате с мешалкой : № 2018145217 : заявл. 20.12.2018 : опубл. 01.07.2019 / Р. Ш. Абиев, А. Н. Григорьева, И. С. Борисенко ; заявитель Непубличное акционерное общество "Астерион".