

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Теплотехники и гидрогазодинамика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.А. Кулагин

« ____ » _____ 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Математическое моделирование процессов в кавитационных аппаратах
промышленной теплоэнергетики
13.04.01. Теплоэнергетика и теплотехника
13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий

Научный руководитель _____ докт.техн.наук, профессор
подпись, дата

В.А. Кулагин

Выпускник _____
подпись, дата

М.И. Отман

Рецензент _____ канд.техн.наук, доцент
подпись, дата

Л. В. Кулагина

Красноярск 2024

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Теплотехники и гидрогазодинамика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.А. Кулагин
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2024 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студенту Отману Мохаммаду Исмаилу
Группа ФЭ22-01М
Направление (специальность) 13.04.01. Теплоэнергетика и теплотехника

программа 13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий
Тема выпускной квалификационной работы: «Математическое моделирование процессов в кавитационных аппаратах промышленной теплоэнергетики».

Утверждена приказом по университету №17417/с от 20.10.2022 г.
Руководитель ВКР – В.А. Кулагин, докт. техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «ТТиГД» ПИ СФУ

Исходные данные для ВКР:

- 1) справочная литература;
- 2) учебная литература;
- 3) патенты, монографии;
- 4) электронные научные журналы и базы данных online.

Перечень разделов ВКР:

- 1) Теоретико-методологические основы математического моделирования;
- 2) Роль кавитационных аппаратов в промышленной теплоэнергетике;
- 3) Анализ эффективности математического моделирования процессов в кавитационных аппаратах промышленной теплоэнергетики.

Руководитель
докт.техн.наук, профессор

подпись, дата

В.А. Кулагин

Задание принял к исполнению

подпись, дата

М.И. Отман

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Математическое моделирование процессов в кавитационных аппаратах промышленной теплоэнергетики» содержит 81 страницу текстового документа, 10 иллюстрации, 5 таблиц, 123 использованных источников.

В первой главе приведен анализ литературных источников по теме исследования «Математическое моделирование процессов в кавитационных аппаратах промышленной теплоэнергетики», рассмотрены основы моделирования, приведены виды моделей применительно к инженерной области знаний.

Во второй главе рассмотрены роли кавитационных аппаратов в промышленности и, в частности, теплоэнергетике, приведены особенности кавитационных установок и особенности их применения на промышленных предприятиях.

В третьей главе представлена комплексная математическая модель возникновения эффектов кавитации с параметризацией показателей возникающей при этом энергии и физико-химических процессов модифицирования загрязняющих веществ; модельная зависимость между параметрами кавитации и эффективностью очистки промышленных стоков и сделан вывод.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. СУЩНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.2. ВИДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ГЛАВА 2. РОЛЬ КАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

2.1. РАЗНОВИДНОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ УСТАНОВОК И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

2.2. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В КАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

3.1. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭФФЕКТОВ КАВИТАЦИИ С ПАРАМЕТРИРОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ЭТОМ ЭНЕРГИИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

3.2. МОДЕЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ КАВИТАЦИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ

Заключение

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Сущность математического моделирования

Всестороннее и углубленное изучение термина «математическое моделирование» не представляется возможным без рассмотрения такого понятия, как «модель», которое широко используется в разных сферах жизни человека. Оно имеет несколько значений в связи с тем, что многие исследователи дают свое толкование этому термину.

В.А. Штофф полагает: «Модель - это представляемая в мыслях либо материально реализованная система, демонстрирующая и воспроизводящая объект таким образом, что посредством ее рассмотрения можно получить новую информацию о данном объекте» [4].

По мнению А.И. Уемова, «под моделью следует понимать систему, изучение которой позволяет получить сведения о другой системе» [7].

Д. Марч и Ч. Лейв утверждают: «Модель представляет собой упрощенную картину реального мира. У нее имеются некоторые, однако не все свойства реального мира. Модель включает в себя множество предположений о мире, которые тесно связаны между собой. Она сама по себе является более простой, чем те явления, которые она объясняет» [1].

В. А. Поляков считает, что «модель – это идеальное формализованное представление системы и динамики ее поэтапного формирования. Она нацелена на то, чтобы интегрированно имитировать реальные задачи и ситуации. Модель должна быть компактной, правильно отражать смену состояний и соответствовать изучаемой ситуации» [3].

Согласно мнению Н.В. Голубевой, «модель представляет собой представляемый в мыслях либо материальный объект, заменяющий в процессе исследования объект-оригинал таким образом, что посредством его рассмотрения становится возможным получить новые знания об объекте-оригинале» [8].

Схожей точки зрения придерживаются С.А. Яковлев и Б.Я. Советов. С.А. Яковлев и Б.Я. Советов утверждают: «Модель является объектом-заместителем объекта-оригинала, который позволяет исследовать определенные свойства последнего. Замещение одного объекта другим для того, чтобы получить информацию о главных свойствах объекта-оригинала посредством объекта-модели следует называть моделированием» [10]. Яковлев и Советов добавляют: «Модель является системой либо объектом, позволяющим придать этой информации конкретное содержание» [10].

В общепринятом понимании модель представляет собой любой аналог какого – то явления или объекта, которые выступает в роли его заместителя. Само явление принято называть «образцом» этой модели.

Стоит отметить, что сам термин «модель» возник в результате эмпирического познания окружающего мира.

Каждый изучаемый процесс можно описать различными моделями, при этом ни одна модель не может сделать это абсолютно полно и всесторонне. Однако использование упрощенной модели, отражающей отдельные черты исследуемого объекта, позволяет яснее увидеть взаимосвязь причин и следствий, входов и выходов, быстрее сделать необходимые выводы, принять правильные решения.

Среди целей моделирования можно выделить следующие:

- научиться управлять объектом или процессом, определить наилучшие способы управления при заданных целях и критериях;
- понять, как устроен конкретный объект: какова его структура, внутренние связи, основные свойства, законы развития, саморазвития и взаимодействия с окружающим миром;
- прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации заданных способов и форм воздействий на объект.

При этом требования к модели устанавливаются решаемой задачей и имеющимися средствами. Существует ряд отдельных требований к моделям:

1. Адекватность - модель считается адекватной, если отражает заданные свойства с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных параметров модели и объекта. Точность модели различна в разных условиях функционирования объекта. Эти условия характеризуются внешними параметрами. В пространстве внешних параметров выделить область адекватности модели, где погрешность меньше заданной предельно допустимой погрешности. Определение области адекватности моделей - сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат, которые быстро растут с увеличением размерности пространства внешних параметров. Эта задача по объему может значительно превосходить задачу параметрической оптимизации самой модели, поэтому для вновь проектируемых объектов может не решаться;

2. Экономичность - модель характеризуется затратами вычислительных ресурсов для ее реализации - затратами машинного времени и памяти;

3. Универсальность - определяется в основном числом и составом учитываемых в модели внешних и выходных параметров;

4. Потенциальность (предсказательность) - возможность получения новых знаний об исследуемом объекте с помощью применения модели;

5. Простота - модель, при которой желаемый результат достигается за то же время с той же точностью при учете меньшего количества факторов при расчете называется простой;

6. Способность к совершенствованию модели без ее коренной переделки;

7. Достаточная точность результатов решения задачи, надежность функционирования модели;

8. Простота форм исходных данных и их заполнения при выдаче задания на расчет [13].

При моделировании используются модели трех типов:

- объясняющие причину такого поведения и получение таких результатов;
- описывающие поведение объектов или результаты наблюдений за явлениями;
- позволяющие предсказать поведение и результаты в будущем [11].

Вычислительные эксперименты, проводимые на основе математических моделей, помогают увидеть за частным общее, развить универсальные методы анализа объектов различной физической природы, познать свойства изучаемых процессов и систем.

Кроме того, математическое моделирование является основой интенсивно разрабатываемых автоматизированных систем проектирования, управления и обработки данных.

Следует также обратить внимание на то, что существует множество определений математической модели.

Е.В. Гатауллина заявляет: «Математическая модель относительно точно демонстрирует некоторые особенности исследуемых явлений и помогает тщательно изучить их» [3].

Математическая модель в широком смысле слова представляет собой только особый способ описания, который дает возможность применять формально-логический аппарат математики для осуществления аналитической деятельности. Исследование математических моделей выступает ключевым методом познания в прикладных и фундаментальных науках [8].

По утверждению Самарского и Михайлова, «математическая модель выступает эквивалентом объекта. Она демонстрирует в математической форме самые главные свойства объекта, а именно, связи, существующие между его частями, а также законы их функционирования» [9]. Михайлов и Самарский заявляют, что математическая модель находит отражение в триаде «модель-алгоритм-программа» [9]. Они утверждают, что, благодаря созданию такой триады, у ученых появляется недорогой и вместе с тем универсальный инструмент, который сначала тестируют в пробных вычислительных экспериментах. А.П. Михайлов и А.А. Самарский обращают особое внимание на то, что «после установления достаточного соответствия триады исходному объекту, над моделью ставят различные похожие опыты, демонстрирующие характеристики, а также свойства объекта» [9].

Соответственно, моделированием следует рассматривать как метод, помогающий перенести информацию от реальной системы к модели и обратно.

А.А. Ляпунов полагает: «Моделирование – это опосредованное теоретическое либо практическое исследование объекта, в ходе которого непосредственным образом рассматривают не сам объект, а вспомогательную естественную либо искусственную модель» [12]. Он подчеркивает, что данная модель отличается тем, что:

- объективно соответствует изучаемому объекту;
- может заменять его в некотором смысле;
- предоставляет сведения о самом моделируемом объекте [12].

С точки зрения науки моделирование не является расширением теории или эксперимента, его следует рассматривать как отдельную позицию между теорией и экспериментом. Более того, моделирование является новым видом получения научных знаний с некоторыми общими чертами, заимствованными из теории и эксперимента.

Математическое моделирование является важной научной дисциплиной, которая изучает процесс создания и использования математических моделей для описания и анализа реальных систем. Оно объединяет математику, физику, информатику и другие научные дисциплины для разработки и применения моделей, которые помогают понять и предсказать поведение сложных систем.

Математическое моделирование – это процесс создания абстрактных математических моделей, которые описывают реальные системы и их взаимодействие. Модели могут быть представлены в виде уравнений, графов, статистических моделей и других математических структур. Они позволяют анализировать и предсказывать поведение системы в различных условиях и с разными параметрами.

Математическое моделирование позволяет до создания реальной системы (объекта) или возникновения реальной ситуации рассмотреть возможные режимы работы, выбрать оптимальные управляющие воздействия, составить объективный прогноз будущих состояний системы.

Математическое моделирование – это процесс создания абстрактной математической структуры, которая представляет собой упрощенное описание реальной системы или явления. Математическая модель используется для анализа, предсказания и оптимизации поведения системы в различных условиях.

Математическое моделирование является важным инструментом в науке, инженерии, экономике и других областях, где требуется изучение сложных систем и принятие обоснованных решений.

Основная идея математического моделирования заключается в том, чтобы представить реальную систему или явление в виде математических уравнений, функций или алгоритмов. Эти математические выражения

описывают взаимодействие различных компонентов системы и их изменение во времени.

Основная цель математического моделирования – это понять и объяснить сложные явления и процессы в реальном мире. Моделирование позволяет исследовать системы, которые трудно или невозможно изучать экспериментально, а также предсказывать и оптимизировать их поведение.

Задачи математического моделирования включают:

- создание математической модели, которая наиболее точно описывает реальную систему;
- анализ модели и изучение ее свойств и характеристик;
- проведение виртуальных экспериментов с моделью для проверки гипотез и теорий;
- оптимизация системы на основе модели для достижения желаемых результатов;
- прогнозирование поведения системы в различных условиях и с разными параметрами.

Математическое моделирование имеет ряд преимуществ, которые делают его полезным инструментом в научных и инженерных исследованиях:

- позволяет проводить виртуальные эксперименты и анализировать их результаты;
- позволяет изучать сложные системы, которые трудно или невозможно изучать экспериментально;
- позволяет предсказывать поведение системы в различных условиях и с разными параметрами;
- позволяет проверять и подтверждать гипотезы и теории;
- позволяет оптимизировать систему для достижения желаемых результатов;
- позволяет экономить время и ресурсы, которые могут быть затрачены на экспериментальное исследование.

Однако математическое моделирование также имеет свои ограничения:

- модели могут быть упрощенными и не учитывать все аспекты реальной системы;
- модели могут быть сложными для разработки и требовать высокой математической подготовки;
- модели могут быть чувствительными к начальным условиям и параметрам, что может привести к неточным результатам;
- модели могут быть ограничены в своей применимости и не могут быть применены к некоторым системам.

Математическое моделирование позволяет исследовать систему в различных условиях, проводить эксперименты и анализировать результаты.

Оно также позволяет предсказывать поведение системы в будущем и оптимизировать ее работу.

Любая математическая модель должна адекватно отражать сущность явлений, протекающих в объекте моделирования и с помощью определенного алгоритма позволять прогнозировать поведение объекта при изменении входных и управляющих параметров. Полная математическая модель включает в себя статическую и динамическую модели, которые отражают поведение объекта в статике и динамике.

Под математическим моделированием, в узком смысле слова, понимают описание в виде уравнений и неравенств реальных физических, химических, технологических, биологических, экономических и других процессов. Для того чтобы использовать математические методы для анализа и синтеза различных процессов, необходимо уметь описать эти процессы на языке математики, то есть описать в виде системы уравнений и неравенств.

Как методология научных исследований математическое моделирование сочетает в себе опыт различных отраслей науки о природе и обществе, прикладной математики, информатики и системного программирования для решения фундаментальных проблем. Математическое моделирование объектов сложной природы – единый сквозной цикл разработок от фундаментального исследования проблемы до конкретных численных расчетов показателей эффективности объекта. Результатом разработок бывает система математических моделей, которые описывают качественно разнородные закономерности функционирования объекта и его эволюцию в целом как сложной системы в различных условиях. Вычислительные эксперименты с математическими моделями дают исходные данные для оценки показателей эффективности объекта.

По своей сути математическое моделирование есть метод решения новых сложных проблем, поэтому исследования по математическому моделированию должны быть опережающими. Следует заранее разрабатывать новые методы, применять эти методы для решения новых практических задач.

Математическая модель может возникнуть тремя путями:

- в результате прямого изучения реального процесса. Такие модели называются феноменологическими;
- в результате процесса индукции. Новая модель является обобщением элементарных моделей. Такие модели называют моделями ансамблей;
- в результате процесса дедукции. Новая модель является частным случаем некоторой общей модели. Такие модели называются асимптотическими.

Процесс моделирования начинается с моделирования упрощенного процесса, который с одной стороны отражает основные качественные явления, с другой стороны допускает достаточно простое математическое описание. По мере углубления исследования строятся новые модели, более

детально описывающие явление. Факторы, которые считаются второстепенными на данном этапе, отбрасываются. Однако на следующих этапах исследования, по мере усложнения модели, они могут быть включены в рассмотрение. В зависимости от цели исследования один и тот же фактор может считаться основным или второстепенным.

Тем не менее, не стоит забывать о том, что математическая модель и реальный процесс не тождественны между собой. Как правило, математическая модель строится с некоторым упрощением и при некоторой идеализации. Она лишь приближенно отражает реальный объект исследования, и результаты исследования реального объекта математическими методами носят приближенный характер. Точность исследования зависит от степени адекватности модели и объекта и от точности применяемых методов вычислительной математики.

Схема построения математических моделей следующая:

1. Выделение параметра или функции, подлежащей исследованию;
2. Выбор закона, которому подчиняется эта величина;
1. Выбор области, в которой требуется изучить данное явление.

Таким образом, математическое моделирование является мощным инструментом для исследования, анализа и оптимизации сложных систем. Оно позволяет предсказывать результаты, принимать решения и улучшать работу системы на основе математических моделей и алгоритмов. Однако, необходимо учитывать его ограничения и быть внимательными при интерпретации результатов моделирования.

1.2. Виды математического моделирования

Большое количество типов моделирования и их постоянное изменение не позволяют создать логически законченную классификацию.

В настоящее время моделирование можно условно разделить на материальное, или физическое моделирование и идеальное моделирование.

Материальным (физическим) моделированием принято называть моделирование, при котором реальному объекту противопоставляется увеличенная или уменьшенная копия, изученные свойства которой переносятся на объект при помощи теории подобия. При материальном моделировании исследование объекта происходит при его воспроизведении в ином масштабе. Здесь возможен количественный перенос результатов эксперимента с модели на оригинал. Однако для анализа сложных объектов и процессов, каковыми являются большинство технологических процессов промышленных отраслей, применение материального моделирования затруднительно, поскольку приходится использовать большое число критериев и ограничений, которые могут быть несовместимы, а зачастую и невыполнимы. Примерами материального моделирования являются макеты

моделей и экспериментальных образцов при создании различных транспортных и летательных средств.

Идеальным моделированием называется моделирование, при котором реальному объекту противопоставляется описание его в форме речи, графики, таблиц, математических выражений. Главное отличие идеального моделирования от материального в том, что оно основано не на материализованной аналогии объекта и модели, а на аналогии идеальной, мыслимой и всегда носит теоретический характер.

Натурное и аналоговое моделирование являются составляющими материального моделирования.

Натурное моделирование - моделирование, при котором реальному объекту ставится в соответствие его увеличенный или уменьшенный материальный аналог, допускающий исследование с помощью последующего перенесения свойств изучаемых процессов и явлений с модели на объект на основе теории подобия. В качестве примера натурного моделирования можно привести испытание нового автомобиля или самолета в аэродинамической трубе.

Аналоговое моделирование - моделирование, основанное на аналогии процессов и явлений, имеющих различную физическую природу, но одинаково описываемых формально.

Идеальное моделирование можно разделить на следующие типы: интуитивное, знаковое и научное.

Интуитивное моделирование - моделирование, основанное на интуитивном представлении об объекте исследования, не поддающемся формализации или не нуждающемся в ней.

Научное моделирование - всегда логически обоснованное моделирование, использующее минимальное число предположений, принятых в качестве гипотез на основании наблюдений за объектом моделирования. К примеру интуитивной модели можно отнести жизненный опыт человека по лечению заболеваний с помощью методов народной медицины.

Знаковое моделирование - моделирование, использующее в качестве моделей знаковые изображения какого-либо вида: схемы, графики и т.д. Примером знакового моделирования являются химические формулы.

В зависимости от целей модели классифицируются на описательные, объяснительные и прогностические.

Описательной моделью можно назвать любое описание объекта. Объяснительная модель должна обеспечить объяснение причин нахождения системы в текущем состоянии.

Прогностическая модель должна обеспечивать понимание поведения объекта в будущем.

Концептуальной моделью принято называть содержательную модель, при формулировке которой используются понятия и представления

предметных областей знания, занимающихся изучением объекта моделирования.

Выделяют три вида концептуальных моделей:

- логико-семантические - модель с описанием объекта в терминах и определениях соответствующих предметных областей;
- причинно-следственные - модель, применяемая для объяснения и прогнозирования поведения объекта.
- структурно-функциональные - модель рассмотрения объекта как единого целого, с последующим изучением его отдельных элементов или подсистем.

Существуют также формальные и информационные модели.

Формальная модель является представлением концептуальной модели с помощью одного или нескольких формальных языков.

Информационная модель - модель, содержащая автоматизированные справочники, реализованные с помощью систем управления базами данных.

Формальная классификация моделей основывается на классификации используемых математических средств. Часто строится в форме дихотомий. Например, один из популярных наборов дихотомий:

- линейные или нелинейные модели;
- статические или динамические;
- сосредоточенные или распределенные системы;
- детерминированные или стохастические;
- дискретные или непрерывные и т.д.

Каждая построенная модель является линейной или нелинейной, детерминированной или стохастической. Возможны и смешанные типы: в одном отношении сосредоточенные (по части параметров), в другом - распределенные модели и т.д.

Классификация по способу представления объекта. Наряду с формальной классификацией, модели различаются по способу представления объекта:

- структурные;
- функциональные.

Структурные модели представляют объект как систему со своим устройством и механизмом функционирования.

Функциональные модели не используют таких представлений и отражают только внешне воспринимаемое поведение (функционирование) объекта. В их предельном выражении они называются также моделями «черного ящика».

Возможны также комбинированные типы моделей, которые иногда называют моделями «серого ящика».

Модели, замещающие технологический объект, в зависимости от типа образа разделяют на три вида: абстрактные, аналоговые и физические.

Абстрактные модели основываются на возможности описания технического объекта (системы) на языке символов, принятом в той или иной области науки путем отвлечения от несуществующих признаков.

Абстрактные модели могут быть математическими и нематематическими. Процесс исследования технического объекта с помощью абстрактной модели включает три этапа:

- построение описательной модели процесса, которая должна отвечать на вопросы «что происходит», «почему так происходит», «при каких условиях это возможно», «что может произойти при изменении данных параметров и внешних условий»;
- запись информативной модели с помощью определенной системы символов;
- исследование функционирования созданной абстрактной модели различными методами анализа, большинство из которых опирается на математический анализ.

Аналоговые модели основаны на подобии явлений, имеющих различную физическую природу, но описываемых одинаковыми математическими уравнениями. Подобие математического описания этих процессов позволяет экспериментально и теоретически подтверждать результаты, полученные в одной области, соответствующими результатами из другой. Примерами аналоговых моделей могут служить электрические и механические колебания.

В химической технологии применяют физические модели - уменьшенные копии реальных аппаратов и технологических процессов. Физические модели имеют ту же физическую природу, что и исследуемый объект, и в реальных применяются в тех случаях, когда трудно провести испытания реальных объектов условиях.

Таким образом, существуют следующие виды классификаций математических моделей в зависимости от:

- сложности объекта моделирования;
- оператора модели;
- входных и выходных параметров;
- цели моделирования;
- способа исследования модели;
- объектов исследования;
- принадлежности модели к иерархическому уровню описания объекта;
- характера отображаемых свойств;
- порядка расчета;
- использования управления процессом.

По сложности объекта исследования модели делятся на простые и исследующие объекты-системы.

В простых моделях внутреннее строение объекта не рассматривается и составляющие его элементы и подпроцессы не учитываются. Объект-система является совокупностью взаимосвязанных элементов, которые взаимодействуют с окружающей средой как с единым целым.

В зависимости от оператора модели они делятся на линейные, нелинейные, алгоритмические, простые и сложные. При наличии линейной зависимости выходных параметров от входных математическая модель называется линейной, соответственно в случае нелинейной зависимости модель - нелинейная. При обеспечении оператором модели функциональной зависимости выходных параметров от входных в виде алгебраического выражения модель является простой. Модель, включающая системы дифференциальных и интегральных соотношений, называется сложной. В случае построения имитатора модели поведения объекта с помощью алгоритма его называют оператором модели. При этом сама модель является алгоритмической.



Рисунок 1 - Классификация математических моделей в зависимости от оператора модели

По характеру моделируемого процесса модели подразделяются на:

- детерминированные, которые соответствуют детерминированным процессам, имеющим строго однозначную связь между физическими величинами, характеризующими состояние системы в какой-либо момент времени. Детерминированная модель позволяет однозначно вычислить и предсказать значения выходных величин по значениям входных параметров и управляющих воздействий;
- неопределенные, которые исходят из того, что изменение определяющих величин происходит случайным образом.

Модели с неопределенными параметрами можно подразделить на следующие группы:

- стохастические - значения всех или отдельных параметров модели определяются случайными величинами, заданными плотностями вероятности;
- случайные - значения всех или отдельных параметров модели определяются случайными величинами, которые зависят от оценки плотностей вероятности, определяемой в результате обработки ограниченной экспериментальной выборки данных параметров;
- интервальные - значения всех или отдельных параметров модели описываются интервальными величинами, заданным интервалом, образованным минимальными и максимально возможными значениями параметра;
- нечеткие - значения всех или отдельных параметров модели описываются функциями принадлежности соответствующему нечеткому множеству.

Модели по отношению к размерности пространства классифицируются на одномерные, двухмерные и трехмерные. Такое разделение применимо для моделей, имеющих в качестве параметров координаты пространства.

По отношению ко времени модели делят на динамические и статические. Некоторые характеристики моделей являются неизменными, то есть не меняют своих значений в течение времени, а некоторые изменяются по определенным законам. Если состояние системы меняется со временем, то модели называют динамическими, в противном случае - статическими.

Статическое моделирование служит для описания состояния объекта в фиксированный момент времени, а динамическое - для исследования объекта во времени.

Разделение моделей на качественные и количественные, дискретные и непрерывные, а также на смешанные происходит в зависимости от вида используемых множеств параметров модели.

По целям моделирования модели делятся на дескриптивные, оптимизационные и управленческие.

Среди целей дескриптивных моделей можно выделить установление законов изменения параметров модели.

С помощью оптимизационных моделей можно рассчитывать оптимальные критерии параметров объекта моделирования. С другой стороны, данные модели могут применяться для поиска оптимального режима управления процессом. К оптимизационным моделям можно отнести модель ракеты из предыдущей модели с целью подъема на необходимую высоту за ограниченное время.

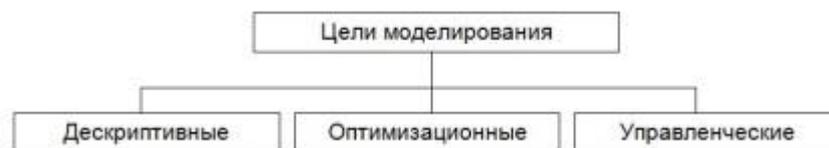


Рисунок 2 - Классификация математических моделей в зависимости от целей моделирования

В зависимости от метода реализации модели делят на аналитические, если возможно получить выходные параметры в виде аналитических выражений и на алгоритмические, позволяющие получить лишь приближенные значения искомых параметров.



Рисунок 3 - Классификация математических моделей в зависимости от метода реализации модели

По объектам исследования математические модели классифицируют на:

- объекты с высокой степенью информации, если в процессе моделирования известны полные системы уравнений, описывающие все стороны моделируемого процесса и все числовые значения параметров этих уравнений;
- объекты с нулевым уровнем информации;
- математическая модель такого объекта строится на основе статистических экспериментальных данных;
- объекты с известными основными закономерностями;
- значения констант в математических уравнениях описания модели устанавливают из опыта;
- объекты, о поведении которых имеются сведения эмпирического характера; для них используют методы физического моделирования с применением математического планирования эксперимента.

Кроме того, важное значение имеет также классификация по принадлежности модели к иерархическому уровню описания объекта.

Иерархический уровень включает:

- микроуровень (типowymi процессами являются массообменные, теплофизические, гидродинамические) - моделирование осуществляется в целях синтеза технологического процесса для отдельного или нескольких агрегатов;
- макроуровень - моделирование процессов, имеющих более высокий уровень агрегации. Такие модели применяют для синтеза текущего управления технологическим процессом для одного агрегата или технологического комплекса в целом;
- метауровень - моделирование процессов в совокупности агрегатов и связывающих их материально-энергетических потоков. Такие модели служат для синтеза техно-логического комплекса как единого целого, то есть для синтеза управления развитием.

По характеру отображаемых свойств модели подразделяют на:

- функциональные модели, используемые для описания физических и информационных процессов, протекающих при функционировании объекта;
- структурные, описывающие состав и взаимосвязи элементов системы (процесса, объекта).

Особого внимания заслуживает классификация математических моделей по порядку расчета:

- прямые применяются для определения кинетических, статических и динамических закономерностей процессов;
- обратные (инверсионные) используются для определения, например, допустимых отклонений режимов обработки;
- индуктивные применяются для уточнения математических уравнений кинетики, статики или динамики процессов с использованием новых гипотез или теорий.

Специфические особенности всех видов моделей отражаются, прежде всего, в задании и форме начальных и граничных условий. В прямых моделях кинетические закономерности характеризуют течение процесса во времени и устанавливают изменение во времени его параметров: концентраций, температур, химического состава при известных потоках и параметрах рабочих тел.

Статические закономерности определяют конечные критические и равновесные значения параметров процесса и рабочего компонента. Уравнения статики получают в основном при обработке экспериментальных данных.

Динамические закономерности определяют свойства объектов при разработке систем автоматического регулирования. Динамические свойства

задаются характером выходной реакции объекта на стандартные возмущения на входе.

Под стандартными возмущениями в химической технологии подразумевают, например, изменение концентрации, давления, температуры и т.д. Решение применяемой в модели системы дифференциальных уравнений представляется в виде отношения изображения выходного сигнала к изображению входного сигнала, которое называется передаточной функцией.

Обратные (инверсные) модели применяют для определения значения входных параметров или других заданных свойств обрабатываемых веществ или продуктов, а также для определения допустимых отклонений режимов обработки, не оказывающих существенного влияния на качество продукта или показатели процесса. При определении входных параметров исходят из продолжительности процесса, заданных величин конечных параметров или оптимальных свойств выходных продуктов (химического состава, физических свойств и др.). Обратные модели применяют для моделирования кинетических, статических и динамических обратных задач. Как правило, обратными задачами являются задачи оптимизации процессов и параметров аппаратов.

Индуктивные модели необходимы для установления или уточнения математических уравнений кинетики, статики и динамики процессов и чаще всего реализуются экспериментально или аналитически с использованием новых гипотез, форм описания или теорий с последующей проверкой адекватности математического описания. Адекватность математического описания в регрессионных моделях оценивается сопоставлением результатов статистической обработки пробных опытов, проведенных при одних и тех же параметрах процесса, с расчетными значениями величин, вычисленных на основе математической модели.

Рассмотрим также классификацию математических моделей в зависимости от использования управления процессом:

1. Модели прогноза или расчетные модели без управления. Основное назначение этих моделей - дать прогноз о поведении системы во времени и в пространстве, зная начальное состояние и информацию о поведении ее на границе. Примерами могут служить модели распределения тепла, электрического поля, химической кинетики, гидродинамики;

2. Оптимизационные модели:

– стационарные модели используются на уровне проектирования различных технологических систем;

– динамические - как на уровне проектирования, так и, главным образом, для оптимального управления различными процессами - технологическими, экономическими и др.

В задачах оптимизации имеется два направления. К первому относятся детерминированные задачи. Вся входная информация в них является

полностью определяемой. Второе направление относится к стохастическим процессам. В этих задачах некоторые параметры носят случайный характер или содержат элемент неопределенности.

Методы отыскания экстремума функции многих переменных с различными ограничениями часто называются методами математического программирования.

Можно сделать вывод, что существует множество различных классификаций математических моделей. Математические модели и их классификации могут меняться со временем, может случиться так, что новые данные и теории подтвердят феноменологические модели и те будут повышены до статуса гипотезы. Аналогично, новое знание может постепенно прийти в противоречие с моделями-гипотезами первого типа и те могут быть переведены во второй.

ГЛАВА 2. РОЛЬ КАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

2.1. Разновидности кавитационных установок и особенности их применения на промышленных предприятиях

Изучение различных кавитационных установок, на наш взгляд, не является возможным без исследования сущности кавитации. Этот термин появился в 1894 году. Его основоположником был Р. Фруд.

По словам О.Б. Хаврошкина, «кавитация является физическим процессом образования пузырьков в жидкостях в результате местного понижения давления» [13]. О.Б. Хаврошкин добавляет: «Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением или во время полупериода сжатия, кавитационный пузырек схлопывается, излучая при этом ударную волну. В своей основе кавитация имеет тот же механизм действия, что и ударная волна в воздухе, возникающая в момент преодоления твердым телом звукового барьера. Явление кавитации носит локальный характер и возникает только там, где есть условия. Перемещаться в среде возникновения не может».

К. Бреннен утверждает: «Когда жидкость подвергается давлению ниже порогового (напряжению растяжения), тогда целостность ее потока нарушается, и образуются парообразные полости. Это явление называется кавитацией. Когда местное давление жидкости в некоторой точке падает ниже величины, соответствующей давлению насыщения при данной окружающей температуре, тогда жидкость переходит в другое состояние, образуя, в основном, фазовые пустоты, которые называются кавитационными пузырями. Возможно и другое образование кавитационных пузырей путем местной подачи энергии. Это может быть достигнуто фокусировкой интенсивного лазерного импульса (оптическая кавитация) или искрой электрического разряда» [11].

Большинство исследователей придерживаются мнения, что физический процесс кавитации близок процессу закипания жидкости. Основное различие между ними заключено в том, что при закипании изменение фазового состояния жидкости происходит при среднем по объему жидкости давлении, равном давлению насыщенного пара, тогда как при кавитации среднее давление жидкости выше давления насыщенного пара, а падение давления носит локальный характер.

Тем не менее, более поздние исследования показали, что ведущую роль в образовании пузырьков при кавитации играют газы, выделяющиеся внутрь образующихся пузырьков. Эти газы всегда содержатся в жидкости, и при местном снижении давления начинают интенсивно выделяться внутрь указанных пузырьков. Поскольку под воздействием переменного местного давления жидкости пузырьки могут резко сжиматься и расширяться, то

температура газа внутри пузырьков колеблется в широких пределах, и может достигать нескольких сот градусов по Цельсию. Имеются расчетные данные, что температура внутри пузырьков может достигать 1500 градусов по Цельсию. Следует также учитывать, что в растворенных в жидкости газах содержится больше кислорода в процентном отношении, чем в воздухе, и поэтому газы в пузырьках при кавитации химически более агрессивны, чем атмосферный воздух - вызывают в итоге окисление многих обычно инертных материалов.

Ученые отмечают, что кавитация оказывает как отрицательное влияние, так и положительное. К негативным последствиям относится то, что кавитация разрушает поверхность гребных винтов, гидротурбин, акустических излучателей, деталей амортизаторов, гидромурфт и т.д. К положительным, то, что ее применяют в промышленности, медицине, военной технике и других смежных областях.

Стоит отметить, что в последние годы процесс кавитационного воздействия стал широко использоваться для интенсификации многих промышленных производств. Только за последние годы в отечественной и зарубежной литературе можно встретить большое число научных публикаций, посвященных применению кавитационных технологий в различных областях промышленности. Основы кавитационной технологии в СССР, а затем в России заложены, обобщены и развиты в работах В.М. Ивченко, В.А. Кулагина, А.Ф. Немчина и других ученых, а также их учеников [14]. Они отмечали, что принцип действия кавитационного теплогенератора заключается в эффекте нагрева за счет преобразования механической энергии в тепловую.

Устройство самого простого кавитационного теплогенератора заключается в нагнетании насосом воды к месту сужения трубопровода. При достижении водяным потоком сопла давление жидкости значительно возрастает и начинается образование кавитационных пузырьков. При выходе из сопла пузырьки выделяют тепловую мощность, а давление после прохождения сопла значительно снижается. На практике может устанавливаться несколько сопел или трубок для повышения эффективности.

Идеальным вариантом установки считается теплогенератор Потапова, который имеет вращающийся диск, установленный напротив стационарного. Подача холодной воды осуществляется с трубы расположенной внизу кавитационной камеры, а отвод уже нагретой с верхней точки той же камеры. Однако широкого распространения устройство не получило из-за отсутствия практического обоснования его работы.

По мнению А.А. Иргалева, «основная задача кавитационного теплогенератора - это образование газовых включений, а от их количества и интенсивности будет зависеть качество нагрева» [17].

Как известно, в современной промышленности существует несколько видов таких теплогенераторов, отличающихся принципом выработки пузырьков в жидкости. Наиболее распространенными являются три вида:

- роторные теплогенераторы – рабочий элемент вращается за счет электропривода и вырабатывает завихрения жидкости;
- трубчатые – изменяют давление за счет системы труб, по которым движется вода;
- ультразвуковые – неоднородность жидкости в таких теплогенераторах создается за счет звуковых колебаний низкой частоты [17].

Помимо вышеперечисленных видов существует также лазерная кавитация, но промышленной реализации этот метод еще не нашел. Рассмотрим каждый из видов теплогенераторов более подробно.

Роторный теплогенератор состоит из электрического двигателя, вал которого соединен с роторным механизмом, предназначенным для создания завихрений в жидкости. Особенностью роторной конструкции является герметичный статор, в котором и происходит нагревание. Сам статор имеет цилиндрическую полость внутри – вихревую камеру, в которой происходит вращение ротора. Ротор кавитационного теплогенератора представляет собой цилиндр с набором углублений на поверхности, при вращении цилиндра внутри статора эти углубления создают неоднородность в воде и обуславливают протекание кавитационных процессов.

Количество углублений и их геометрические параметры определяются в зависимости от модели вихревого теплогенератора. Для оптимальных параметров нагрева расстояние между ротором и статором составляет порядка 1,5 миллиметров. Данная конструкция является не единственной в своем роде, за долгую историю модернизаций и улучшений рабочий элемент роторного типа претерпел массу преобразований.

Одной из первых эффективных моделей кавитационных преобразователей был генератор Григгса, в котором использовался дисковый ротор с несквозными отверстиями на поверхности.

Несмотря на простоту конструкции, агрегаты роторного типа достаточно сложные в применении, так как требуют точной калибровки, надежных уплотнений и соблюдения геометрических параметров в процессе работы, что обуславливает трудности их эксплуатации. Такие кавитационные теплогенераторы характеризуются достаточно низким сроком службы, который составляет два-четыре года из-за кавитационной эрозии корпуса и деталей. Помимо этого, они создают достаточно большую шумовую нагрузку при работе вращающегося элемента. К преимуществам такой модели относится высокая продуктивность, которая на 25% выше, чем у классических нагревателей.

В отличие от предыдущей модели трубчатое отопительное оборудование не производит большого шума и не изнашивается так быстро. При установке и эксплуатации не нужно заботиться о точной балансировке,

а при разрушении нагревательных элементов их замена и ремонт дешевле, чем роторных моделей. К недостаткам трубчатых теплогенераторов относят значительно меньшую производительность и большие габариты.

Ультразвуковой теплогенератор имеет камеру-резонатор, настроенную на определенную частоту звуковых колебаний. На ее входе устанавливается кварцевая пластина, которая производит колебания при подаче электрических сигналов. Вибрация пластины создает волновой эффект внутри жидкости, который достигая стенок камеры-резонатора и отражается. При возвратном движении волны встречаются с прямыми колебаниями и создают гидродинамическую кавитацию. Далее пузырьки уносятся водным потоком по узким входным патрубкам тепловой установки. При переходе в широкую область пузырьки разрушаются, выделяя тепловую энергию. Ультразвуковые кавитационные генераторы также обладают хорошими эксплуатационными показателями, так как не имеют вращающихся элементов.

В промышленности и в быту кавитационные теплогенераторы нашли реализацию в самых различных сферах деятельности. В зависимости от поставленных задач они применяются для:

- отопления – внутри установок происходит преобразование механической энергии в тепловую, благодаря чему нагретая жидкость двигается по системе отопления. Кавитационные теплогенераторы могут отапливать не только промышленные объекты, но и населенные пункты;
- нагревание проточной воды – кавитационная установка способна быстро нагревать жидкость;
- смешение жидких веществ – за счет разрежения в слоях с получением мелких полостей такие агрегаты позволяют добиться надлежащего качества перемешивания жидкостей, которые естественным образом не совмещаются из-за разной плотности.

В сравнении с другими теплогенераторами, кавитационные агрегаты отличаются рядом преимуществ и недостатков.

Преимущества этих аппаратов включают в себя:

- намного более эффективный механизм получения тепловой энергии;
- расход значительно меньшего количества ресурсов, чем топливные генераторы;
- то, что их можно использовать для обогрева как маломощных, так и крупных потребителей;
- то, что они полностью экологичны, то есть не выделяют в окружающую среду вредных веществ во время работы.

Среди недостатков кавитационных теплогенераторов стоит выделить:

- сравнительно большие габариты – электрические и топливные модели имеют меньшие размеры, что немаловажно при установке в уже эксплуатируемом помещении;

- большая шумность за счет работы водяного насоса и самого кавитационного элемента, что затрудняет его установку в бытовых помещениях;
- неэффективное соотношение мощности и производительности для помещений с малой площадью.

На ТЭС эксплуатируются технологические системы и установки, химическое качество теплоносителя в которых является нормируемым по содержанию коррозионно-активных газов. К ним относятся, например, конденсационные установки паровых турбин и системы водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением.

На многих электростанциях существуют проблемы с обеспечением нормативной массовой концентрации растворенного кислорода и свободного диоксида углерода в таких системах.

Так, в конденсационных установках паровых турбин, особенно для теплофикационных ТЭС с прямоточными системами технического водоснабжения в зимний период, то есть при сочетании факторов: малой паровой нагрузки конденсатора и относительно низкой температуры охлаждающей воды перед конденсатором, практически невозможно обеспечить удовлетворяющие нормативным требованиям значения массовой концентрации растворенного в турбинном конденсате кислорода, причиной чего являются объективные физические ограничения при реализации в условиях конденсатора турбины процессов деаэрации.

В системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением нормируется не только массовая концентрация растворенного кислорода, но и водородный показатель pH воды, зависящий от содержания в воде диоксида углерода. Опубликованные данные указывают, что из-за коррозионных повреждений полых охлаждаемых медных проводников в таких системах наблюдается до 10% от общего числа инцидентов и аварий с остановом энергоблоков по причинам, связанным с турбогенераторами [19]. Однако на многих ТЭС не уделяется должного внимания обеспечению нормативных требований к химическому качеству дистиллята в таких системах. Основной причиной этого является отсутствие данных о зависимости скорости коррозии медных проводников от показателей химического качества циркулирующего через них дистиллята.

Следует обратить внимание на то, что основными конструкционными материалами, применяемыми в элементах энергетических установок являются стали различных классов и марок, а также медьсодержащие сплавы типа латуни. Во всех случаях при контакте указанных материалов с водным теплоносителем имеют место условия, которые являются коррозионно опасными, однако механизм коррозионных процессов отличается как для различных материалов, так и для различных условий их работы.

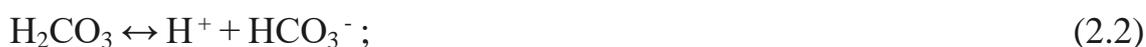
Основными коррозионно опасными газовыми примесями теплоносителя являются растворенные кислород и диоксид углерода.

Таким образом, кислород расходуется в катодных реакциях, при этом образуются гидроксид-анионы OH^- . В случае с углекислотной коррозией в этом аспекте наблюдается существенное различие: диоксид углерода в коррозионных процессах не расходуется, что видно из рассмотрения механизма соответствующего процесса:

– гидратация свободного диоксида углерода:



– диссоциация угольной кислоты:



– катодный процесс с участием катионов водорода:



– анодный процесс с участием гидрокарбонат-анионов:



– термическое разложение или гидрокарбоната железа:



В каждом из рассмотренных механизмов коррозии важное значение имеют факторы, формирующие условия протекания процесса, к которым относятся, прежде всего, следующие: температура теплоносителя, наличие внешнего подвода теплоты, скорость движения теплоносителя, наличие и характеристик напряженного состояния (нагрузки, заземления и т.д.), состав и характеристики примесей теплоносителя и не только.

Базовым средством защиты от коррозии при реализации водно-химических режимов восстановительного типа является деаэрация, как правило термическая деаэрация, что и отражено в соответствующих нормативных документах энергетической отрасли. При закритических параметрах водного теплоносителя и вода тоже начинает проявлять окислительные свойства, поэтому водно-химические режимы

восстановительного типа оказываются неэффективными: используются режимы окислительного типа, удаление из теплоносителя летучих кислот при которых все же необходимо.

Процессы коррозии меди и медьсодержащих сплавов имеют особенности. При отсутствии молекулярного кислорода процесс коррозии меди сильно затруднен практически при любых значениях рН теплоносителя (для меди окислительный потенциал катионов водорода недостаточен). Риск увеличения скорости коррозии при этом несколько возрастает при увеличении температуры среды. В присутствии молекулярного кислорода скорость коррозии меди существенно возрастает.

Очевидным решением проблемы в обоих рассматриваемых случаях является применение деаэраторов.

Традиционно на ТЭС деаэрации специально подвергают:

- питательную воду паровых котлов;
- добавочную воду цикла неблочных ТЭС на докритические параметры свежего пара;
- подпиточную воду тепловых сетей;
- питательную воду испарителей и паропреобразователей [21].

Кроме того, термическая деаэрация протекает как сопутствующий процесс в других установках и системах ТЭС:

- регенеративных подогревателей смешивающего типа;
- расширителях горячих конденсатов;
- конденсаторах турбин и т.д. [24].

Для каждой из указанных систем и установок применяются термические деаэраторы или деаэрационные элементы различных типов (струйные, барботажные, пленочные, капельные, комбинированные и другие) и рабочего давления (деаэраторы атмосферные, вакуумные и повышенного давления).

Наибольшей тепломассообменной и энергетической эффективностью при этом обладают комбинированные термические деаэраторы, конструктивно выполненные в виде деаэрационной колонки, располагаемой на деаэрационном баке. Комбинации деаэрационных устройств внутри деаэрационных колонок и деаэрационных баков могут быть различными: струйно-барботажными, капельно-барботажными, пленочно-барботажными, одно-, двух- или даже трехступенчатыми и т.д. Для конкретных условий эксплуатации оказываются эффективными различные аппараты. Эффект деаэрации, представляющий собой разность между единицей и отношением массовой концентрации растворенного кислорода в деаэрированной воде к массовой концентрации растворенного кислорода в исходной воде, в таких аппаратах составляет обычно 99,2 % и более.

Однако термические деаэраторы рассматриваемых конструкций являются сравнительно громоздкими, требуют сооружения для своего размещения и обслуживания специальных этажерок и площадок. Кроме того,

рассматриваемые деаэраторы используют водяной пар в качестве греющего теплоносителя, что также накладывает ограничения на их применение в отдельных случаях.

На ТЭС имеются технологические системы и установки, в которых термическая деаэрация необходима или желательна, но установка рассматриваемых высокоэффективных деаэраторов невозможна из-за ограничений по массогабаритным характеристикам либо невозможности по тем или иным причинам использовать греющий пар. Среди таких систем и установок следует отметить:

- системы возврата конденсата пара внешних потребителей;
- системы возврата конденсата пара отдаленных потребителей собственных нужд (например, паровых сушилок твердого топлива, преимущественно бурых углей);
- конденсационные установки паровых турбин;
- системы водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением;
- установки приготовления консервирующих растворов для энергооборудования и др. [20].

Таблица 1 - Результаты испытаний деаэратора «АВАКС» в режиме рециркуляции

Результаты измерений. Расход воды через деаэратор 20 ± 1 м ³ /ч								
Время от начала измерений мин	Избыточное давление кгс/см ²		Температура воды, °С		Избыточное давление в начале отсоса пара кгс/см ²	Удельный расход пара кг/т	Содержание кислорода, да, мкг/дм	
	перед деаэратора	после деаэратора	перед деаэратора	после деаэратора			перед деаэратора	после деаэратора
0	0	0	72	72	-	0	7000	7000
5	3	0,02	72	69	-0,70	5,4	4780	750
10	3	0,02	71	68	-0,71	5,4	3230	490
15	3	0,02	71	68	-0,71	5,4	2250	320
20	3	0,02	70	66	-0,73	7,1	1550	230
25	3	0,02	70	66	-0,73	7,1	1030	160
30	3	0,02	71	67	-0,73	5,4	700	100
40	3	0,02	70	67	-0,72	5,4	330	50

Тем не менее, существуют малогабаритные деаэрационные устройства, работающие без подачи греющего пара, в которых деаэрация воды протекает за счет так называемого начального эффекта – при вскипании перегретой воды, попадающей в зону разрежения. Такие устройства, как правило, используют явление кавитации в вихревом потоке жидкости. Среди

кавитационных деаэрационных устройств, которые могут применяться в рассматриваемых условиях, следует отметить деаэраторы «АВАКС» и центробежно-вихревые деаэраторы ДЦВ. Эффективность этих деаэраторов, по сравнению со струйно-барботажными деаэраторами, невелика, однако их малые габариты и возможность работы в беспаровом режиме составляют преимущества, делающие эти устройства потенциально полезными при повышении эффективности рассматриваемых технологических систем ТЭС.

Далее определим факторы, препятствующие применению эффективных деаэраторов для удаления из теплоносителя коррозионно активных газов.

Наличие систем возврата конденсата пара внешних потребителей характерно для промышленных ТЭЦ, снабжающих паром какие-либо технологические установки основного производства соответствующего предприятия. Как правило, такие схемы характеризуются разветвленной и протяженной системой паропроводов, собственно технологических установок, баков сбора конденсата пара, насосных установок и соответствующих трубопроводов возврата конденсата пара.

Часто количество пара, отпускаемого в такие системы, велико. Соответственно и расходы возвратного конденсата существенны. Тем не менее, обычно какой-либо защиты баков сбора конденсата от аэрации в технологических цехах основного производства не предусматривается. Кроме того, насыщение конденсата растворенными газами часто имеет место еще до его попадания в конденсатный бак из-за специфики пароиспользующего оборудования предприятия (например, текстильные производства), и тогда защита баков от аэрации оказывается вовсе бесполезной. Перекачка конденсата, обогащенного растворенными коррозионно-активными газами, на источник тепловой энергии - ТЭЦ - сопряжена с коррозионными разрушениями как соответствующих насосных групп, так и трубопроводов возврата конденсата. В результате на многих предприятиях частые ремонты или замены указанного оборудования и трубопроводов составляют существенную статью расходов.

В химической промышленности кавитационные реакторы при производстве биодизеля обеспечивают более высокую скорость реакции по сравнению с обычными реакторами, поскольку значительно сокращается время, необходимое для смешивания и диффузии молекул реагентов, и, следовательно, устраняется потребность в высокой энергии для перемешивания. Микропузырьки воздуха, полученные методом гидравлической кавитации с использованием сопла Вентури, рассматриваются в качестве топливной присадки в двигателях внутреннего сгорания. Преимуществом их использования является простота производства и низкая стоимость.

Смесительные устройства и системы на их основе часто используются во многих отраслях промышленности для таких технологических операций,

как смешивание, диспергирование, процессы тепло- и массообмена. Основным направлением совершенствования таких устройств является повышение степени диспергирования эмульсий и суспензий. Одним из наиболее перспективных способов улучшения условий работы смесителей и повышения степени диспергирования смеси является использование гидродинамической кавитации.

Таким образом, деаэрация теплоносителя необходима:

- в плохо обессоленной воде, поскольку в этом случае требуется подавление катодных реакций; в такой воде есть анионы, способные вытеснять кислород из оксидной пленки – в этом случае коррозия прогрессирует;
- в глубоко обессоленной воде, поскольку здесь необходимо вывести из теплоносителя летучие кислоты; если содержание анионов в таких условиях мало, кислород образует на поверхности металла пассивирующую пленку, которая практически не подавляет катодные процессы, но подавляет анодные; если же толщина пленки мала (например, из-за присутствия летучих кислот), то анодные процессы протекают и вызывают дальнейшее разрушение пленки; для увеличения толщины пленки необходимо дозировать окислитель (например, кислород), чтобы подавлять анодные процессы за счет увеличения толщины пассивирующей пленки на поверхности металла [20].

Следовательно, необходимость разработки и применения эффективных технологий современного энергосберегающего теплового оборудования является актуальной задачей для многих промышленных предприятий. Для этих целей могут быть применены различные кавитационные аппараты.

На энергетических предприятиях весьма перспективным является создание высокодисперсных водо-мазутных эмульсий на основе кавитационной обработки. Предпочтение отдается аппаратам статического типа, отличающимся высокой производительностью, надежностью и низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

Среди новых угольных технологий большой интерес представляет сжигание низкосортного угля в виде водоугольного шламового топлива. Технология кавитационной обработки воды приводит к изменению динамики горения водоугольного топлива и дополнительному снижению содержания NO_x и CO₂.

В качестве сырья для теплоэнергетики широко используется уголь. Ряд недостатков угля, таких как воспламеняемость, не могут быть легко устранены. Использование водоугольного топлива на водошламовой основе вместо угля устраняет эту проблему. Водоугольное топливо, сокращенно ВУТ, относится к жидкому топливу, а это означает, что основным направлением исследований является изучение его седиментационных и реологических свойств, обеспечивающих транспорт и распыление в котле, и теплофизических свойств, определяющих целесообразность и

эффективность его использования. Конечные эксплуатационные свойства угольного суспензионного топлива могут быть определены на стадии приготовления ВУТ путем гидродинамической обработки водно-угольного шлама.

В ходе исследований, которые проводились в России на углях Канско-Ачинского угольного бассейна в лабораторных условиях с гидродинамической роторной мешалкой, позволяющей добиться кавитационных эффектов в обрабатываемой среде были рассмотрены два типа ВУТ: первый изготавливался путем кавитационного диспергирования твердой угольной фракции в дистиллированной воде, а второй - по аналогии, но в качестве дисперсионной среды использовалась вода, предварительно обработанная кавитацией [10]. Были сделаны выводы, что кавитационный способ получения ВУТ улучшает реологические и седиментационные свойства целевого топлива, снижает вредные выбросы при горении, влияет на параметры горения [23].

Представленные результаты разработки конструкций теплогенераторов малой и средней мощности указывали на то, что вихревые адиабатические камеры сжигания различаются по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера либо располагается рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла. Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7 МВт. Экспериментальные исследования, испытания в опытно-промышленных и промышленных условиях теплогенераторов, работающих на ВУТ, показали их высокую техническую эффективность (механический недожог составил не более 5%, КПД котлов - 86%), а количество вредных выбросов в уходящих газах существенно меньше предельно допустимых значений в 2-3 раза.

Вместе с тем, в последнее время все чаще встречается информация об использовании экологически чистого биотоплива. Повышение эффективности его применения является актуальной задачей. Ученые предлагают использовать в качестве предварительной обработки кавитационные процессы при производстве биотоплива. Изначально измельчаются сушеные листья и стебли кукурузы с раствором перкарбоната натрия. Эта смесь проходит через гидродинамическую кавитационную систему с системой кругового потока и трубкой Вентури. Образующиеся в процессе кавитации пузырьки схлопываются, разрушая волокна целлюлозы.

Таким образом, можно сделать вывод, что рассмотренные нами особенности кавитационных аппаратов указывают на актуальность использования кавитационных технологий в различных областях науки и техники, особенно в сфере промышленности, для решения важных

практических задач и, как следствие, необходимости их всестороннего изучения.

2.2. Перспективы использования кавитационных аппаратов в энергетике и теплоснабжении

О том, что механическое воздействие на жидкость приводит к ее нагреву, говорили еще Д. Джоуль и Р. Майер. Однако даже спустя много времени их идея остается востребованной. Было также доказано, что в тепло может быть превращена и внутренняя энергия жидкости (в режиме кавитации), при этом температура воды может не соответствовать затраченной механической энергии, а для создания кавитационного режима используется вихревой эффект. Создателем вихревого нагревателя жидкости (сокращенно ВНЖ) был профессор Куйбышевского авиационного института А.П. Меркулов. Это произошло в шестидесятых годах двадцатого века. В то время не осуществлялся тщательный контроль за энергоресурсами, поэтому его открытие еще долго не получало развития.

В настоящее время в России ВНЖ производятся рядом фирм Москвы, Санкт-Петербурга, Тулы и некоторых других городов. Использование ВНЖ выгодно при строительстве электрифицированных объектов, прокладке газовых коммуникаций и труб ТЭЦ. КПД аппаратов может быть весьма высоким, поскольку «потери» в насосе полностью идут на нагрев отапливаемой системы. С помощью ВНЖ можно нагревать любые жидкости, в то время, как ТЭНы пожароопасны и подвержены воздействию накипи.

Известно два типа ВНЖ.

Статические аппараты не содержат подвижных деталей и отличаются низкой себестоимостью, высокой надёжностью в работе; содержат завихритель, камеру с выходным патрубком и тормозным устройством. Эффективность статических ВНЖ мала, они неэкономичны.

К динамическому типу относятся ВНЖ, в которых имеются роторы, связанные кинематически с источником крутящего момента. Динамические ВНЖ обеспечивают значительно большую эффективность, чем статические, но имеют свои недостатки.

В статических кавитационных аппаратах отсутствуют подвижные конструктивные элементы и необходимо наличие тормозного устройства, имеющего большое гидравлическое сопротивление.

Динамические кавитационные аппараты имеют роторные (перфорированные, либо лопаточные) активаторы, жестко скрепленные с приводными валами, а также образованные полостью корпуса неподвижные рабочие камеры с входным и выходным патрубками. Большой момент инерции роторов, кинематически связанных с валом приводного электродвигателя является общим недостатком всех известных ВНЖ динамического типа. Среди кавитационных аппаратов такого типа известны

такие, в которых организованы автоколебания в рабочей камере, а зона кавитации совмещена с рабочим колесом насоса, что снижает его КПД и ресурс.

Сферы перспективного использования кавитационных аппаратов:

- отопление зданий, лишенных газовых и ТЭЦ коммуникаций как автономная отопительная система (альтернатива котельным);
- снижение токсичности выбросов и повышение эффективности сжигания тяжелых фракций нефти путем кавитационно-волнового воздействия на мазут и попутной организации оптимальных теплотехнических условий для сгорания активированной паромазутной смеси как система дооснащения топок, есть менее совершенные аналоги - миксеры, в которых на водомазутную смесь производится энергоемкое механическое воздействие, а также ультразвуковые форсунки для сжигания мазута;
- повышение КПД существующих газовых и мазутных котлов путем придания нового качества штатным питательным насосам как встраиваемый между экономайзером и кипяtilьными трубами модуль;
- снижение расхода дизтоплива установок нагрева рабочих растворов при гидроразрыве пласта (сокращенно ГРП) на нефте- и газопромыслах как система дооснащения автоцистерны ГРП.

Таким образом, современные кавитационные аппараты являются основой для создания двух линий продукции:

- мини-котельных на базе стандартных насосных агрегатов;
- мобильных тепловых агрегатов, приводимых ДВС транспортного средства, в частности, мобильных установок для гидроразрыва пласта при нефте- и газодобыче).

Более того, они могут быть эффективно применены в качестве:

- нагревательного элемента без электропривода, приводимого потенциальной энергией магистрали холодной воды – «донора»;
- дополнения к действующим котлоагрегатам, снижающего удельный расход топлива;
- средства повышения полноты сгорания тяжелых углеводородных топлив, сопутствующего снижению токсичности процессов сгорания.

Стоит отметить, что к научным направлениям, развиваемым в данный момент и направленным на экономию энергоресурсов, повышение надежности эксплуатации оборудования и снижение вредного воздействия на окружающую среду объектов энергетики и промышленных предприятий, относятся:

- развитие лабораторной базы исследований технологических эффектов кавитации и совершенствование техники эксперимента;
- исследования в направлении снижения радиационной опасности при обращении с радиоактивными и особо опасными токсичными отходами;

- технологии кондиционирования и обеззараживания технологической и сточных вод в энергетике, водоснабжении и канализации;
- теоретические и экспериментальные исследования многофазных суперкавитационных течений;
- расширение приложений кавитационной технологии в различных отраслях производства;
- анализ эффективности использования всех видов энергоресурсов на этапах получения, транспортирования, хранения, потребления тепловой и электрической энергии и утилизации с целью разработки новых энергоресурсосберегающих технологий в энергетике и теплотехнологии;
- оптимизация тепловых, электрических и водопроводных сетей, систем кондиционирования жилых и промышленных зданий с целью повышения энергоэффективности их работы, снижения аварийности;
- способы получения многофазных гетерогенных композиций для использования в биотехнологии и теплотехнологических установках, техносферной безопасности, стройиндустрии, медицине, микробиологии, сельском хозяйстве и т.д.;
- исследования в области создания новых композиционных и смазочных материалов, разработки по созданию новых видов эмульгированных (суспензионных) топливных смесей и т.д.;
- работы по обеспечению долговечности и надежности магистральных трубопроводов высокого давления и т.д.

Подводя итоги вышесказанному, следует подчеркнуть, что повышение энергоэффективности любого предприятия является одной из важных задач его производственно-хозяйственной деятельности. Особенно остро эта проблема встала в условиях роста цен на энергоносители и приближения их к мировым. В связи с этим реализация энергосберегающих технологий в промышленном производстве является актуальной задачей.

Для снижения потребления энергоресурсов и планирования внедрения энергосберегающих технологий каждое предприятие, по нашему мнению, должно располагать средствами для их реализации и информацией об:

- основных потерях энергии и их причинах;
- энергоэффективных технологиях и оборудовании;
- сроках окупаемости и технико-экономическом обосновании конкретных энергосберегающих мероприятий в различных отраслях [10].

Иными словами, в современных реалиях использование кавитационных технологий играет важную роль в сфере промышленности.

3. ЭЛЕМЕНТЫ КАВИТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Феноменологическая модель механолиза воды

Рассматриваемый феномен лежит в основе специфических свойств и связанных с ними явлений, происходящих в воде, подвергнутой

механическому (гидродинамическому) воздействию. Модифицированная в результате гидромеханической обработки (или, как называют, активированная) вода способна интенсифицировать примерно на 30 % ряд технологических процессов [1]. Здесь под термином «активированная вода» будем иметь в виду общепринятое понятие активной среды, т. е. вещества, в котором распределение частиц (атомов, молекул, ионов) по энергетическим состояниям не является равновесным и хотя бы для одной пары уровней энергии осуществляется инверсия населенности.

Активация твердых и жидких систем, приводящая к изменению их физических и химических свойств, реакционной способности, дефектной (примесной) структуры и т. п., может быть осуществлена различными внешними воздействиями: слабыми и сильными. К таким воздействиям можно, в частности, отнести механическую, магнитную, ультразвуковую обработку, радиационное воздействие (например облучение гамма-квантами и ионными пучками), а также термообработку. Методы активации можно подразделить на методы, разрушающие образцы в целом (диспергация) и не разрушающие, а изменяющие только дефектную структуру.

Исследования гидромеханической обработки воды (как достаточно сильного воздействия) показали, что последующая активность воды проявляется как в макромасштабе, так и на микроуровнях (на молекулярном и субмолекулярном).

Суть гидродинамического воздействия может быть сведена к действию двух механизмов: распространению ударных волн вблизи схлопывающегося кавитационного микропузырька и ударному действию кумулятивных микроструек при несимметричном коллапсе кавитационных микропузырьков. Причем в данном контексте способ получения кавитационных микропузырьков не имеет значения. Этим основным механизмам сопутствует повышение температуры и давления вблизи пузырька, делая локальную область около него уникальным реактором для проведения различных реакций и процессов.

В работах [1, 2] рассмотрена краевая задача сопряжения для парогазового пузырька в жидкости, позволяющая путем детальных расчетов определить все особенности развития пузырька из зародыша и его схлопывания у твердой стенки.

Рассмотрим на базе этой задачи частный случай для сферического пузырька в неподвижной жидкости. В силу сферической симметрии

$$\operatorname{rot} \vec{W}_1 = 0, \quad (3.1)$$

тогда

$$\vec{w}_1 = \vec{e}_r v_1 = \operatorname{grad} \varphi_1. \quad (3.2)$$

При условии $\rho \cong \text{const}$ и полагая жидкость несжимаемой, имеем

$$\operatorname{div} \vec{W}_1 = \Delta \varphi_1 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_1) = 0. \quad (3.3)$$

При интегрировании уравнения (4.3) получаем фундаментальные уравнения:

$$V_1 = \frac{\text{const}}{r^2} \quad \text{и} \quad \varphi_1 = -\frac{C}{r}. \quad (3.4)$$

Из уравнения баланса масс на границе пузырька получаем условие сопряжения по нормальной составляющей скорости:

$$j = \rho_g j_g = \rho_g \left[\frac{-\frac{\partial \Omega}{\partial t} - (\vec{w}_g \cdot \vec{\nabla}) \Omega}{|\vec{\nabla} \Omega|} \right] = \rho_g j_\delta + \rho_l j_l = \rho_l \left[\frac{-\frac{\partial \Omega}{\partial t} - (\vec{w}_l \cdot \vec{\nabla}) \Omega}{|\vec{\nabla} \Omega|} \right]. \quad (3.5)$$

Для сферически симметричного пузырька (в сферической системе координат) $\Omega = r - R(t) = 0$. (3.6)

Из условия (4.5) с учетом (4.6) имеем

$$V_1|_{r=R} = \dot{R} - j_l, \quad (3.7)$$

где $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$.

Отсюда константа в (4.4) примет вид

$$\begin{cases} \text{const} = R^2(\dot{R} - j_l), \\ V_1 = \frac{R^2}{r^2}(\dot{R} - j_l), \\ \varphi_1 = -\frac{R^2}{r^2}(\dot{R} - j_l) \end{cases} \quad (3.8)$$

(источник обильностью $Q = 4\pi R^2(\dot{R} - j_l)$).

После подстановки (12.8) в уравнение движения, записанное в тензорно-инвариантной форме, для ньютоновских сплошных сред при последующем интегрировании по r от R до ∞ получим динамическое уравнение для расширения границы пузырька:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 - j_l(\dot{R} + \frac{j_l}{2}) = \frac{P_{l|r=R} - P_{l|\infty}}{\rho_l} + 2 \int_R^\infty \frac{\partial \mu_1}{\partial r} \frac{\partial V_1}{\partial r} dr, \quad \frac{\partial \mu_1}{\partial r} = \frac{\partial \mu_1^0}{\partial T_1^0} \frac{\partial T_1^0}{\partial r}. \quad (3.9)$$

Связь давления в жидкости $P_{l|r=R}$ на границе раздела фаз ($r = R$) с давлением в пузырьке устанавливается из условия сопряжения по импульсу, которое при пренебрежении движением парагаза в пузырьке (в силу $\rho_g \ll \rho_l$) дает выражение

$$P_{l|r=R} = P_g - 4 \frac{\mu_l}{R} V_{l|r=R} - \frac{2\sigma_1}{R} + \rho_g j_g (V_1 - V_g), \quad (3.10)$$

где $P_g = P_g^0 + P_v$ – сумма парциальных давлений соответственно газовой и паровой фракций.

Из (4.5) следует, что

$$V_1 - V_g = \left(\dot{R} + j_1 + \frac{\rho_g}{\rho_1} j_\partial \right) - (\dot{R} + j_g) = j_g \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1 \right), \quad (3.11)$$

т. е. последним членом в (12.10) можно пренебречь.

В случае малости или отсутствия фазовых переходов ($j_g = 0$) и при $T_1^0 \approx \text{const}$ из (12.9) имеем форму нелинейного уравнения Рэлея:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{4\mu_1}{\rho_1} \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\sigma_1}{\rho_1 R} = \frac{(P_g^0 + P_v) - P_{1\infty}}{\rho_1} = \frac{\delta P}{\rho_1}. \quad (3.12)$$

Для простого случая $P_g = 0, \delta P = P_{1|r=R} - P_{1\infty} = \text{const}$ с начальными условиями

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0 \\ \dot{R} &= \frac{dR_0}{dt} = \dot{R}_0 \end{aligned} \right\} t = 0. \quad (3.13)$$

Рэлеем получены следующие решения:

для расширения:

$$\dot{R}^2 = \frac{2}{3} \frac{\delta P}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \right]; \quad (3.14)$$

для сжатия:

$$\dot{R}^2 = \frac{2}{3} \frac{\delta P}{\rho_1} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right]. \quad (3.15)$$

Время коллапса определяют по формуле

$$\tau = 0,915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_1}{P_{1\infty}}}. \quad (3.16)$$

Начальное давление газа в пузырьке радиуса R_0 находится по уравнению Лапласа:

$$P_{g0} + P_v = P_{10} + \frac{2\sigma}{R_0}. \quad (3.17)$$

Результаты, полученные различными авторами, указывают на то, что при симметричном схлопывании пузырька создаются высокоинтенсивные поля давлений (до 5–10 тыс. атм.) и температур (до 2000 °С).

В случае несимметричного коллапса пузырька, в частности вблизи стенки, картина схлопывания существенно меняется – схлопывание происходит с образованием высокоскоростной кумулятивной микроструйки, механизм образования которой достаточно полно описан в [1, 3, 4]. Здесь же нас интересует случай асимметричного коллапса пузырька вдали от стенки.

Как показано в [5], микроструйки могут образовываться и вдали от стенки и соударяться одна с другой. Следует отметить, что в момент схлопывания системы пузырьков у стенки возможно образование струек между соседними пузырьками.

На рис. 3.1, б представлены результаты численного эксперимента для схлопывания пузырька у стенки [5]. Вещественные показатели к схеме на рис. 4.1, б приведены в табл. 4.1. На рис. 4.1, а показана пространственная интерпретация численного эксперимента, проведенного Плессетом и Чепменом. Скорость кумулятивных струек, по их расчетам, для $P_0 - P_v = 1,0$ атм. составила $V_C = 130$ м/с ($\delta P \approx 2000$ атм). В результате дополнительных расчетов [6] было показано, что параметры образующейся струйки сильно зависят от плавности начальной деформации пузырька. Так, при деформации в 10 % характерная толщина образующейся струйки в пять раз меньше, а ее скорость вдвое больше ($V_C = 130$ м/с; $\delta P \approx 2000$ атм.), и при дальнейшем увеличении начальной деформации скорость V_C возрастает на порядок, чрезвычайно усиливая разрушающую способность струйки. Продолжительность конечной стадии коллапса пузырька $t \approx 10^{-9} - 10^{-8}$ с [7].

Таблица 2 -

Данные численного эксперимента Плессета и Чепмена

Обозначения на схеме (рис. 12.1, б)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
t / t_3	0,630	0,885	0,986	1,013	1,033	1,048	1,066	1,082	1,098	1,119
V_C , м/с	7,7	19	42	65	100	123	129	129	128	128

Примечание: $t_K - 1,1R_0 \cong \sqrt{\rho / \Delta P}$; $V_C \cong 12,8\sqrt{\Delta P / \rho}$.

Молекула H_2O является самым легким и малым представителем химических и изоэлектронных гомологов. Ее свойства определяются максимально неоднородным распределением средней плотности электронов по молекуле, в результате чего на атомах молекулы H_2O сосредоточены наибольшие эффективные заряды [8].

Уникальные свойства, парадоксы жидкой воды в большей степени объясняются наличием и развитостью водородных связей. В системе молекул H_2O водородная связь носит кооперативный характер, во многом определяя структуру воды при различных внешних условиях. Водородные связи примерно в 10 раз сильнее межмолекулярных взаимодействий, характерных для большинства других жидкостей.

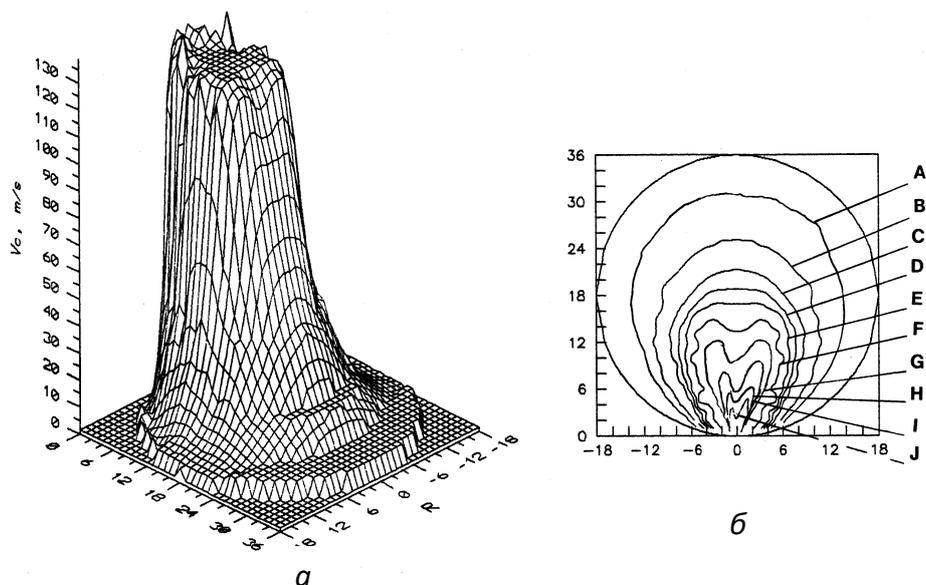


Рисунок 4 - Картина схлопывания парового пузырька в воде вблизи твердой стенки: *a* – пространственная эпюра скоростей (графическое представление образовавшейся кумулятивной струйки – интерпретация авторов); *б* – результаты численного эксперимента (расстояние от центра пузырька до стенки равно начальному радиусу пузырька R_0).

В общем случае можно сказать, что взаимодействия большого количества молекул, ансамблей молекул, организация той или иной структуры, определяющей свойства воды и соответственно ее реакционную способность, обуславливаются коллективными силами Ван-дер-Ваальса. Приблизительно закон соответственных состояний может быть выражен уравнением Ван-дер-Ваальса в виде

$$\frac{PV}{NkT} = \frac{V}{V-b} - \frac{a'N}{VkT}. \quad (3.18)$$

Силы Ван-дер-Ваальса известны как дисперсионные, дальнодействующие. Они захватывают области $> 1000 \text{ \AA}$ и определяют устойчивость той или иной структуры, физическую сорбцию и др.

Время релаксации для ряда процессов в воде при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $t = 10^{-11} - 10^{-13} \text{ с}$ [9], а для некоторых – до $t \cong 10^{-14} \text{ с}$ [7]. В связи с тем, что продолжительность конечной стадии коллапса пузырька $t = 10^{-9} - 10^{-8} \text{ с}$, становятся возможными процессы передачи энергии и перезарядки с участием молекул воды, благородных и активных газов, а также диссоциация молекул воды.

Таким образом, под действием гидродинамической кавитации, как сильного воздействия, происходит разложение (механолиз) воды [4]. Возбужденная молекула воды, наряду с излучением и диссипацией избыточной энергии в тепло, может диссоциировать:



За счет механолиза воды на $\text{H}\cdot$ и $\dot{\text{O}}\text{H}$ в результате кавитационного воздействия происходит увеличение концентрации O_2 при протекании в процессе механохимических реакций типа



Одновременно происходит и изменение структуры воды с образованием свободных водородных связей, что обуславливает ее повышенную активность и реагентную способность.

В случае водных систем активация, кроме механолиза воды, заключается в изменении степени равномерности распределения примесей по объему системы, агрегации и дезагрегации (диспергации) примесей, а также в изменении их активного состояния. Важнейшей особенностью водных систем, в частности, является гетерогенность по примесям, которая в процессе кавитационного воздействия может существенно меняться. Под воздействием кавитации в водном растворе, содержащем инертные и активные газы, возможно существование разнообразных химических реакций [1, 4, 9].

Кавитационная обработка (в отличие, например, от омагничивания, воздействия различных полей электромагнитного происхождения и т. п.) дает устойчивые повторяющиеся результаты в получении модифицированной в процессе механолиза воды, воспроизводимые независимо от места и времени. Наряду с указанными, в кавитационной полости протекают реакции трансформирования радикалов с участием химически активных газов и рекомбинации радикалов за время $t \cong 10^{-7} - 10^{-6}$ с. В результате этих процессов после коллапса кавитационного пузырька в раствор переходят продукты радикального разложения молекул H_2O , обнаруженные с помощью метода спиновых ловушек [202], и рекомбинации радикалов, что приводит к накоплению в воде молекулярного O_2 , H_2O_2 и других соединений. Высокая скорость протекания реакций свидетельствует о том, что они происходят непосредственно в зоне схлопывания пузырька.

В итоге, наряду с микротурбулентным перемешиванием и активацией поверхности водных полуфабрикатов, процесс механолиза воды при ее гидромеханической обработке позволяет создавать и использовать кавитационную технологию для интенсификации различных технологических процессов и служит основой для разработки новых приложений [11–19 и др.].

3.2. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, растворы, смеси и твердые границы потоков

В гидродинамических процессах с развитой пузырьковой кавитацией, используемых в различных технологиях [1, 20], наблюдаются сложнейшие пространственные интерференционные картины волн разрежения-сжатия как результат динамики коллапса кавитационных микропузырьков. Одновременно необходимо учитывать быстроменяющиеся поля высоких давлений и температур, а также турбулентные микропотоки, обуславливающие микропеременные среды. Анализ обобщения ранее полученных результатов свидетельствует о необходимости дальнейших более углубленных исследований с целью расширения сфер применения кавитационной технологии, уточнения исходных данных для расчета и проектирования суперкавитирующих механизмов, уточнения физических и математических моделей процессов кавитационного воздействия на жидкие системы и твердые границы потоков.

В данном разделе сделана попытка реализации новых подходов для решения задач физики кавитации в области использования импульсных воздействий ее пузырьковых форм.

3.2.1. Задача сопряжения для пузырька в жидкости

Свойства потоков при наличии кавитации значительно отличаются от свойств обычных потоков вследствие увеличения объема потока из-за бурного испарения жидкости с образованием кавитационных микропузырьков [21]. Необходимо учитывать сжимаемость жидкости и усложненные уравнения состояния газа в пузырьках. Кавитация – явление, в котором участвуют несколько агрегатных состояний в развитом турбулентном режиме. В этом случае жидкость возможно рассматривать как своеобразную жидкую среду со структурой, образованной хаотически движущимися и взаимодействующими между собой и потоком молями [22]. Возникает необходимость более четкой интерпретации и учета в общем случае изменяющейся вязкости потока. Рассмотрев уравнения Навье–Стокса как запись второго закона Ньютона для моля жидкости, можно сказать, что скорость деформации должна учитывать возможную частоту актов молекулярного взаимодействия, вызванную гидродинамическим фактором относительного послойного смещения [23]. Там же отмечается, что коэффициент динамической вязкости, учитывающий физико-химическую природу жидкости, должен учитывать размеры и массы молекул, их взаимное расположение, т. е. геометрический объем среды, приходящийся на «возбужденную» молекулу.

Формы течений для пузырька в жидкости можно условно разделить на четыре типа [1]: с образованием кумулятивной струйки; «холодное» кипение; газификация пограничного слоя; пульсация парогазового пузырька.

В начальной стадии коллапса парогазового пузырька с образованием кумулятивной ультраструйки (по Корнфельду–Суворову, 1944) необходимо учитывать гидро- и термодинамические процессы вне и внутри него. Для

парогазовой (внутри пузырька, $i=g$) и жидкой (вне пузырька, $i=1$) сред можно записать исходные, (базовые) уравнения физики (законы сохранения):

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + (\vec{V}_i \cdot \vec{\nabla}) \rho_i + \rho_i \operatorname{div} \vec{V}_i = 0; \quad (3.21)$$

$$\rho_i \left[\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} + (\vec{V}_i \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_i \right] = \rho_i \vec{F}_i + \operatorname{div} \Pi_i, \quad (3.22)$$

$$\rho_i \left[\frac{\partial U_i}{\partial t} + (\vec{V}_i \cdot \vec{\nabla}) U_i \right] = \rho_i q_i^1 + \Pi_i : \dot{S}_i, \quad (3.23)$$

где Π_i – симметричный тензор напряжений; ρ_i – массовая плотность; \vec{V}_i – скорость; \vec{F}_i – плотность газовых сил;

$$\rho_i q_i^1 = \operatorname{div}(\lambda_i \operatorname{grad} T_i^0) \quad (3.24)$$

при передаче тепла лишь теплопроводностью по закону Фурье, U_i – внутренняя энергия; \dot{S}_i – тензор скоростей деформаций.

Замыкающими для системы (4.21)–(4.23) являются уравнения состояния:

калорическое:

$$\rho_i = \rho_i(P_i, T_i^0); \quad (3.25)$$

для воды по Тэту:

$$\frac{P+B}{P_0+B} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n; \quad (3.26)$$

$$\Pi_i = \Pi_i(\dot{S}_i); \quad (3.27)$$

механическое для ньютоновских жидкостей:

$$\Pi_i = - \left(P_i + \frac{2}{3} \mu_i \operatorname{div} \vec{V}_i \right) \mathbf{I} + 2\mu_i \dot{S}_i. \quad (3.28)$$

На границе раздела фаз Ω_{gl} высчитываются условия сопряжения по массе, скорости, импульсу энергии и температуре [24]:

$$M_{lg} = \rho_e j_l = \rho_l \left[\frac{-\frac{\partial \Omega_{gl}}{\partial t} + (\vec{V}_l \cdot \vec{\nabla}) \Omega_{gl}}{|\vec{\nabla} \Omega_{gl}|} \right] = \rho_g j_g = \rho_g \left[\frac{-\frac{\partial \Omega_{gl}}{\partial t} + (\vec{V}_g \cdot \vec{\nabla}) \Omega_{gl}}{|\vec{\nabla} \Omega_{gl}|} \right], \quad (3.29)$$

$$\text{где } \vec{\tau} \cdot \vec{V}_l = \vec{\tau} \cdot \vec{V}_g \text{ – условие прилипания}; \quad (3.30)$$

$$\bar{n} \Pi_l + \rho_{lj} \vec{V}_l = \bar{n} \Pi_g + \rho_{gjl} \vec{V}_g + \bar{n} \sigma_{gl} \left(\frac{1}{M_{gl}} + \frac{1}{N_{gl}} \right); \quad (3.31)$$

$$(\bar{n} \cdot \Pi_l) \vec{V}_l - \lambda_l \frac{\partial T_l^0}{\partial n} + \rho_{lj} \left(\frac{V^2}{2} + h_l \right) = (\bar{n} \cdot \Pi_g) \vec{V}_g + q_g^1 + \rho_{gjl} \left(\frac{V_g^2}{2} + h_g \right); \quad (3.32)$$

$$T_1^0 = T_g^0 + \Delta T_{g1}^0. \quad (3.33)$$

При задании начальных и граничных условий на твердой стенке ($\vec{V}_1 = 0$), $T_1^0 = T_0^0$ получаем задачу сопряжения для системы сред «жидкость–газ». Частные случаи этих задач со сферической симметрией были получены Си-Дин-Ю (1965), Л.И. Седовым (1970), Р.И. Нигматулиным (1975–1978), В. М. Ивченко (1971–1977) [25, 26].

Для задач со сферической симметрией решение может быть представлено графиком рис. 3.2 [27], из которого видно хорошее совпадение с экспериментальной зависимостью радиуса R_0 от времени τ .

Однако при рассмотрении данной задачи не все физические переменные были учтены (например, такие, как возрастание давления паров при $R \ll R_{\max}$, отклонение от сферичности вблизи стенок, влияние вязкости и др.). В этой связи имеем лишь качественно правильную картину.

Используя подход к рассмотрению турбулентных потоков, описанный в [28], попытаемся уточнить влияние вязкости в кавитационных течениях. Как отмечается в [29], влияние вязкости сводится к демпфированию и связано с диссипацией механической энергии в процессе роста и схлопывания пузырьков. Такие расчеты в несжимаемой жидкости с учетом поверхностного натяжения были выполнены Порицким [29] и обнаружили существенное влияние вязкости при значениях, значительно превышающих вязкость воды в обычных условиях. По методу [29] движение стенки пузырька описывается уравнением

$$\frac{P_i - P_\infty}{\rho} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4\frac{\mu}{\rho} \frac{1}{2}\dot{R}, \quad (3.34)$$

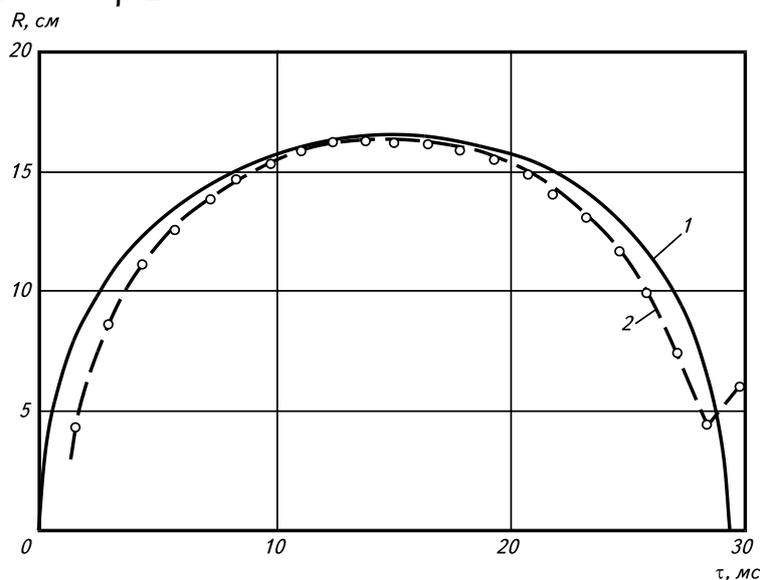


Рисунок 3.2 - Зависимость радиуса пузырька от времени: 1 – расчет; 2 – эксперимент

Из формулы (4.34) можно получить уравнение энергии

$$\frac{(P_i - p_\infty)(R_0^3 - R)}{3} + \frac{\rho}{2} R^3 \dot{R}^2 + 4\mu \int_0^t R \dot{R}^2 dt = 0, \quad (3.35)$$

где последний член учитывает диссипацию энергии вследствие вязкости (на один стерадиан). Время схлопывания, определенное по (12.34), для пузырька без поверхностного натяжения становится бесконечно большим, если параметр

$$\mu' = \frac{4\mu}{R_0 \sqrt{\rho(p_\infty - P_i)}} \quad (3.36)$$

превышает критическое значение, равное 0,46.

В работе Айвени [30] вязкость и поверхностное натяжение учитывалось в сжимаемой жидкости. Был использован метод Порицкого, который Гилмор [31] применил в условиях сжимаемости, основываясь на гипотезе Кирквуда–Бете [32]. Вязкость и поверхностное натяжение учитывались в граничном условии для давления в жидкости с помощью уравнения

$$P = P_i - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{1}{2} \dot{R}. \quad (3.37)$$

Согласно Айвени, вязкость и поверхностное натяжение не влияют на общий характер поведения каверны. Кажущиеся противоречия его результатов детально проанализированы в [29]. Результаты последующих работ, обобщенные в [1, 24, 26, 27 и др.], показывают, что вязкость, входящая в уравнение Навье – Стокса в виде коэффициента динамической вязкости, может быть учтена более или менее удачно. Однако физическая интерпретация этого коэффициента недостаточна [137].

Условимся, как это сделано в [28] на основании работ [22, 23], под частицами жидкости понимать молекулы, надмолекулярные образования, ассоциаты и более крупные образования как турбулентные вихри. Тогда и кавитационные микропузырьки и микровихри, образующиеся в результате их коллапса, можно ассоциировать с частицами жидкости. Исходя из этого, можно сформулировать следующую феноменологическую модель кавитирующей жидкости (в отсутствии твердых границ потока): кавитационный микропузырек в своей динамике движется в пространстве, структурированном микротурбулентными вихрями, образованными интерференцией волн разрежения-сжатия, возникающих в результате пульсации кавитационных микропузырьков.

Для изотропной среды (стохастически и статистически принимая поля кавитационных микропузырьков изотропной средой), физических констант, выражающих ее свойства, существует связь между тензором напряжений и скоростей деформации в виде соотношения [33]

$$\Pi = a\dot{S} + bI, \quad (3.38)$$

где a и b – скаляры. Скаляр a представляет собой физическую константу, которая из условия совпадения (12.38) со своим частным случаем, законом жидкостного трения Ньютона

$$\tau = \mu \frac{d\vec{V}}{dn}, \quad (3.39)$$

полагается равной 2μ . Скаляр b может быть линейно связан с Π и \dot{S} через их линейные инварианты.

С помощью действий альтернирования и симметрирования уравнение движения в напряжениях возможно разбить на два, как это сделано в [28]:

$$\nabla_k (\Pi_{ki}) = \nabla_k \left[\frac{1}{2} \rho (V_{dk} \dot{S}_{ij} \delta_{rj} + V_{di} \dot{S}_{kj} \delta_{rj}) \right] - \nabla_k (\Pi_{ki}), \quad (3.40)$$

$$\nabla_k (\Pi_{ki})_* = \nabla_k \left[\frac{1}{2} \rho (V_{dk} \dot{S}_{ij} \delta_{rj} + V_{di} \dot{S}_{kj} \delta_{rj}) \right] + \rho I_{ijk} \omega_k \delta_{rj}, \quad (3.41)$$

где V_d – скорость деформации движения; δ_{rj} – элементарный отрезок; ω – угловая скорость.

Первое из этих уравнений характеризует движение сплошной среды в случае «симметричной» гидродинамики, а уравнение (3.41) – «несимметричной», когда в жидкости присутствуют непрерывно распределенные пары сил. Из уравнения (3.40) следует новое реологическое уравнение

$$\Pi_{ki} = \frac{1}{2} (\rho V_{dk} \delta_{rj} \dot{S}_{ij} + \rho V_{di} \delta_{rj} \dot{S}_{kj}) - \Pi_{ki} \quad (3.42)$$

или

$$\Pi_{ki} = \rho V_{dk} V_{di} - \Pi_{ki} = \rho \dot{S}_{kj} \dot{S}_{ij} (\delta_{rj})^2 - \Pi_{ki}. \quad (3.43)$$

Применительно к (3.42) вводится обозначение

$$M_{kj} = \frac{1}{2} \rho V_{dk} \delta_{rj} = \frac{1}{2} \rho \dot{S}_{kj} (\delta_{rj})^2. \quad (3.44)$$

Размерность тензора M_{kj} совпадает с размерностью коэффициента динамической вязкости μ в (3.39). По физическому смыслу M_{kj} описывает внутренний момент импульса элемента жидкости, появляющийся вследствие его деформации при движении. Тогда

$$\Pi_{ki} = (M_{kj} \dot{S}_{ij} + M_{kj} \dot{S}_{kj}) - \Pi_{ki} = 2M_{kj} \dot{S}_{ij} - \Pi_{ki}. \quad (3.45)$$

В случае анизотропии переноса импульса и вещества с учетом (3.45) уравнение движения в напряжениях принимает вид

$$\rho_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = \rho_i \vec{F}_i + 2\vec{V}_k (M_{kj} \dot{S}_{ij} - \Pi_i I_{ki}). \quad (3.46)$$

При задании тензора напряжений одним из выражений (4.42), (4.43) или (3.45) в уравнении Навье–Стокса (4.46) дополнительная вязкость как фактор

регуляризации проявляется в любом сдвиговом течении (например, введение дополнительной вязкости необходимо для удержания детерминированности процесса, особенно в области больших скоростей [34]).

Таким образом, задача сопряжения для пузырька в жидкости может быть замкнута новым реологическим уравнением или задана уравнением (12.46) с учетом тензора вязкости. Решение для случая динамики сферического пузырька с учетом новой постановки задачи привело к более точному совпадению с результатами эксперимента.

3.2.2. Разрушительные эффекты развитой кавитации

Глобально существуют два механизма, оказывающие разрушительное воздействие на тела в зоне развитой кавитации: механизм образования кумулятивной струйки по Корнфельду–Суворову вследствие несимметричного схлопывания кавитационного микропузырька вблизи стенки или обтекаемой потоком поверхности, обуславливающий кавитационную эрозию [10, 57, 90, 94, 100, 122, 170 и др.]; механизм действия сферичных ударных волн, возникающих при симметричном схлопывании пузырьков в «безграничной» жидкости, в отсутствие в жидкости достаточно больших по размеру твердых примесей.

Как правило, эффекты, связанные с кавитацией, крайне нежелательны в технике (разрушение рабочих органов насосов, гидротурбин, корабельных винтов; вибрация оборудования; износ трубопроводов и гидроарматуры и многое другое). В данном случае интерес к теории кавитационного воздействия вызван поиском путей использования кавитационных эффектов в создании новых технологий, способов применения уникальных возможностей, возникающих в условиях развитой пузырьковой кавитации [1].

Обзоры по этим вопросам можно найти в монографиях Д. Кнеппа [35], В. М. Ивченко [1, 25, 26], Ю.Л. Левковского [36], В.А. Кулагина [37] и др., а к специальной области акустической кавитации относятся работы Флинна [38] и Розенберга [39], Плессета [40] и Маргулиса [41] и др.

О модели кавитационного воздействия в ряде технологических процессов [1] и феноменологической модели действия кавитации на различные объекты достаточно подробно излагается в обзоре [42]. Однако остается актуальной задача разработки теоретических методов расчета и оценки кавитационных воздействий в жидких системах и на твердофазные включения (с технологической точки зрения, эрозионные разрушения стенок, или, в общем случае, твердых границ потока нежелательны и должны быть исключены).

Эрозия различных материалов определяется не только их свойствами, но также общим числом схлопывающихся пузырьков и распределением возникающих при этом импульсов давления по амплитуде. Рассмотрим

разрушительный эффект отдельного пузырька и связь этого эффекта с механическими свойствами материала.

Пусть пузырек, имеющий в стадии максимального расширения диаметр D_{\max} , обладает максимальной потенциальной энергией E_x , часть которой E_m , зависящая от механизма схлопывания, передается поверхности материала. Энергия E_m частично отражается, а часть ее E_n поглощается материалом. Введем также энергию E_p , необходимую для разрушения материала.

Для пузырька с критической скоростью удара (согласно [35] она составляет ≈ 100 м/с)

$$E_{p\text{кр.}} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 E_{\text{кр.}}, \quad (3.47)$$

где $\alpha_1 = \frac{E_m}{E_k}$, $\alpha_2 = \frac{E_n}{E_k}$, $\alpha_3 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$ – коэффициенты поглощения плоской

акустической волны, падающей по нормали к поверхности; $Z_1 = \rho_1 c_1$ и $Z_2 = \rho_2 c_2$ – волновые сопротивления жидкости и материала соответственно.

Связь потенциальной энергии и диаметра пузырька может быть выражена следующей формулой:

$$E_{ki} \cong \frac{1}{6} \pi (P_0 + P_a) D_{\max}^3. \quad (3.48)$$

Здесь P_0 – гидростатическое давление; P_a – амплитуда акустического давления; $P_0 + P_a$ – полное давление, действующее в стадии максимального расширения пузырька [43]. Методом амплитудной спектрометрии [44] получена однозначная связь

$$D_{\max} \leftrightarrow U_i \Delta m_i, \quad (3.49)$$

где U_i – амплитуда импульса напряжения при схлопывании пузырька D_{\max} на прямой части гидрофона; Δm_i – убыль массы материала в результате однократного действия такого импульса.

Таким образом, возможно определение энергии разрушительного действия одного пузырька заданием коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, принимая, согласно работе [1], энергию разрушения единицы объема равной предельной энергии упругой деформации:

$$E_{p\text{кр.}} = 0,5 \frac{\sigma_b^2}{E}, \quad (3.50)$$

где σ_b и E – соответственно предел прочности и модуль упругости материала [46]. В результате потерь при сжатии пузырька в энергию удара о твердую поверхность преобразуется не более 0,01 % ее исходной потенциальной энергии [44].

Ранее было показано теоретически [35, 38, 47], что схлопывание каверны сопровождается распространением в жидкости импульса давления в виде ударной волны, величина которой может достигать 10^3 МПа. Затухание волны от одиночного пузырька происходит настолько быстро, что пузырек может

вызвать разрушение поверхности твердого тела, если оно находится от него на расстоянии, сопоставимом с начальным радиусом пузырька [30, 47].

В этой связи вызывает интерес физическая задача (рис. 4.3) о движении одиночного пузырька вблизи обтекаемого плоскопараллельным потоком изолированного профиля (наиболее распространенная задача в гидромашинах с целью определения интенсивности и места кавитационной эрозии). Жидкость принимается однородной и несжимаемой.

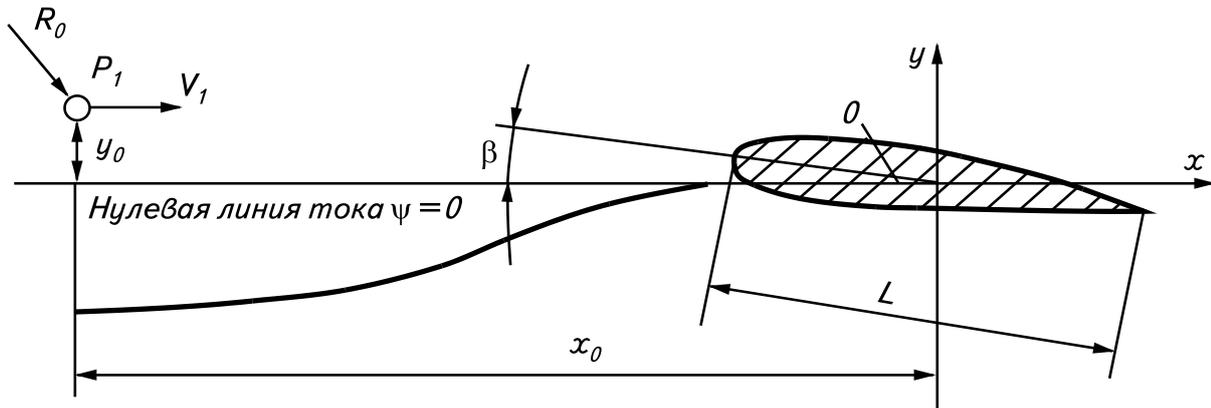


Рисунок. 3.3- Схема движения пузырька в поле обтекаемого профиля: x_0, y_0, R_0 – координаты и радиус пузырька в начальный момент времени; V_1, P_1 – поле скоростей и давлений вдали от профиля; β – угол атаки; L – длина хорды профиля

При решении задачи сопряжений (см. выше) для модели схлопывания по Чэпмену и Плессету [4, 48] скорость микроструи

$$V_{\text{стр}} = 12,8 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \quad (3.51)$$

а время замыкания

$$t_3 = 1,109 \frac{R_{\text{max}}}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}}, \quad (3.52)$$

откуда

$$V_{\text{стр}} = 15 \frac{R_{\text{max}}}{t_{\text{к}}}. \quad (3.53)$$

Максимальный размер пузырька и время его жизни, необходимое для расчета скорости микроструи и определения места его удара, находят из уравнения движения пузырька в поле обтекаемого профиля. Зная скорость $V_{\text{стр}}$ и скорость звука в жидкости a , можно легко определить давление, оказываемое струйкой на материал [6, 48]:

$$P_{\text{стт}} = \rho a V_{\text{стр}}. \quad (3.54)$$

С применением функции Лагранжа [49] система дифференциальных уравнений, описывающих радиальное и поступательное движение изолированного пузырька (рис. 4.3) в потоке жидкости, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\vec{r}} &= \frac{3}{2} \text{grad } V^2 - 2\vec{g} - \left(3 \frac{\dot{R}}{R} + 9C_1 \right) (\dot{\vec{r}} - \vec{V}), \\ R\ddot{R} + \frac{3}{2} R^2 - \frac{1}{4} (\dot{\vec{r}} - \vec{V})^2 &= \frac{P_g - P}{\rho} - 4v \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\sigma}{\rho R}, \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

где \vec{r} – радиус-вектор центра пузырька; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; C_1 – приведенный коэффициент сопротивления поступательного движения пузырька в жидкости:

$$C_1 = \frac{v}{R^2} \left[1 + 0,065 \left(\frac{2R}{v} \sqrt{(\dot{x} - V_x)^2 + (\dot{y} - V_y)^2} \right)^{2/3} \right]^{3/2}. \quad (3.56)$$

Решая (4.55), определяем траекторию движения пузырька, в общем случае совпадающую с линией тока, а также зависимость $R(t)$. Для определения полей скоростей и давлений около профиля используют метод конформных отображений. Обтекаемый профиль задается коэффициентами конформного отображения в комплексной плоскости $Z = X + iY$ в виде ряда

$$Z = a_{-1} \frac{1}{\zeta} + \sum_{k=0}^{\infty} a_k \zeta^k, \quad (3.57)$$

где $a_k (k=0, 1, 2, \dots)$ – комплексные коэффициенты; a_1 всегда положителен; $\zeta = \zeta + i\eta$ – комплексная плоскость единичного круга.

Для плоскопараллельного потока вдоль оси x (рис. 3.3) комплексный потенциал записывается в виде

$$W = a_{-1} V_{1x} \left(\frac{1}{\zeta} + \zeta \right) - \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \zeta, \quad (3.58)$$

где Γ – циркуляция по контуру профиля, определяется из условия Чапыгина о конечности скорости жидкости у задней кромки [50]:

$$\Gamma = -4\pi V_{1x} a_{-1} \sin(\delta + \beta). \quad (3.59)$$

Давление внутри пузырька P_g из условия силового равновесия пузырька вдали от профиля

$$P_g = \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_0} - P_d \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 + P_d, \quad (3.60)$$

т. е. принимается, что при изменении объема газ ведет себя изотермически. В работах различных исследователей [35, 51, 52] отмечается, что только пузырьки, касающиеся стенки или отстоящие от нее на расстоянии не более R , опасны в плане их разрушающего воздействия. Однако в скоплении пузырьков их схлопывание, по-видимому, происходит согласованно (схлопывание одного пузырька вызывает схлопывание других [52]) и результирующая ударная

волна (также $\approx 10^3$ МПа) может вызвать разрушение поверхности твердого тела на значительно больших расстояниях [53]. Кроме того, известно, что схлопывание пузырька вблизи поверхности твердого тела не является сферически-симметричным.

Выполненный Тирувенгадамом [54] анализ физики кавитационной эрозии позволяет получить выражение для интенсивности эрозии I_e в виде

$$I_e = p_i R f, \quad (3.61)$$

где p_i – давление удара; f – частота удара; R – радиус ударной волны или струи. Наблюдения Тирувенгадама показали значительное изменение скорости эрозии при изменении скопления пузырьков при данной скорости (т. е. при изменении физических размеров системы). В зависимости от механизма схлопывания (с образованием сферической ударной волны; с образованием кумулятивной струйки, действующей в течение длительного промежутка времени при асимметричном схлопывании за счет давления торможения; с возникновением гидравлического удара от короткой струи малой продолжительности, также возникающей при асимметричном коллапсе) эрозия может быть описана следующими выражениями:

сферическая ударная волна:

$$\theta = \frac{\chi}{\delta} \sqrt{\Delta\chi} \exp\left[\frac{2}{3} \frac{P_0}{Q_0} - \frac{2,67}{We(\Delta\chi)}\right], \quad (3.62)$$

удар струи:

$$\theta = \frac{\chi}{\delta} \sqrt{\Delta\chi} \exp\left[-\frac{2,67}{We(\Delta\chi)}\right], \quad (3.63)$$

гидравлический удар:

$$\theta = \frac{\chi}{\delta M} \sqrt{\Delta\chi} \exp\left[-\frac{2,67}{We(\Delta\chi)}\right], \quad (3.64)$$

где $\theta = I_e / (0,5\rho V_0^2)$; $\delta = d/l$ – относительный размер ядра кавитации (d – диаметр ядра, l – длина каверны); $We = (0,5V_0^2 d) / \sigma$ – число Вебера; $\chi = (P_0 - P_d) / (0,5\rho V_0^2)$ – число кавитации; $\chi_1 = (P_0 - P_d) / 0,5V_0^2$ – критическое число кавитации (начало кавитации); $\Delta\chi = \chi_1 - \chi$ – степень кавитации; $M = V_0/a$ – число Маха (a – скорость звука); Q_0 – парциальное давление неконденсирующегося газа в пузырьке перед началом схлопывания (то же, что P_g).

Эти зависимости качественно согласуются с экспериментальными [143]. Однако приведенные выше выкладки и рассуждения в большей степени описывают поведение одиночных пузырьков. В лучшем случае используются интегральные зависимости, например (4.62)–(4.64), когда оценивается конечный результат на основе механистических представлений о совместном воздействии групп пузырьков. Но здесь нельзя обойтись арифметическим

суммированием действия отдельных пузырьков даже в рамках модели сферической симметрии при их схлопывании. На самом деле пузырьки в динамике влияют друг на друга, теряя свою сферическую форму, как показано ранее: схлопывание одного влияет на коллапс остальных. При быстром сжатии и коллапсе пузырька возникают деформации, теряется устойчивость пузырьков и они распадаются на более мелкие [9, 55, 56 и др.].

Хотя анализ коллапса сферической каверны в несжимаемых жидкостях дает приблизительно верную картину большей части процесса, на конечной стадии схлопывания и при повторном образовании пузырька этот анализ перестает давать правильные качественные результаты, которые являются важными при определении разрушающих воздействий кавитации.

Для сжимаемых жидкостей исследования Хиклинга и Плессета [57] схлопывания и повторного образования каверны численными методами можно рассматривать как точные. Здесь частично были использованы работы Гилмора, основанные на приближении Кирквуда – Бете, очень близкие к точным решениям.

По данным различных исследователей, максимальное давление внутри пузырька достигает от 20 до 100 МПа (в зависимости от принятых граничных условий). Причем давление в ударной волне затухает по геометрическому закону обратно пропорционально расстоянию от центра пузырька.

При несферическом схлопывании пузырька с образованием кумулятивной ультраструйки давление удара возможно получить из уравнения гидравлического удара:

$$P = \frac{\rho a V_0 \rho_s a_s}{\rho a + \rho_s a_s}, \quad (3.65)$$

где ρ и a – плотность и скорость звука; V_0 – скорость струи. Индекс s относится к материалу поверхности, о которую ударяется струя.

Расчеты без учета теплообмена, без учета пространственно-временного распределения температуры в сжимающемся пузырьке и прилегающей к нему области не дают полной картины процесса и не позволяют построить достоверную и полную модель образования ударных волн, физического механизма их возникновения.

Максимальная скорость стенки пузырька \dot{R} меньше скорости звука при учете теплообмена (не более 600 м/с), и образование ударных волн, наблюдаемое экспериментально, трудно объяснить. Расчеты, приведенные в работах М. А. Маргулиса, показали, что на конечном этапе схлопывания осуществляется повышение температуры в пузырьке со скоростью $\dot{T} > 10^{11}$ К/с [9]; при этом испарение через свободную поверхность жидкости и через стенки гетерогенных зародышей кавитации должно быть незначительным. Импульсный нагрев метастабильной жидкости, близкий к предельному ($\approx 10^8$ К/с), может привести к так называемому фазовому взрыву жидкости. Можно предположить, что ударные волны при кавитации обусловлены фазовым взрывом жидкости, перегретой до

сверхкритических параметров в кавитационном пузырьке. Такого рода перегрев может осуществляться и при электрическом разряде в кавитационном пузырьке. Судя по временным параметрам возникновения соновспышек (примерно 2 нс), импульсный перегрев может осуществляться со скоростью $\dot{T} \approx 10^{11}$ К/с даже при повышении эффективной температуры всего на 200 К [9].

Анализ и расчеты Мёрча [35], проведенные для динамики схлопывания групп (скопления, ансамбля) кавитационных пузырьков, показали, что совместное схлопывание повышает энергию каверн, расположенных вблизи центра скопления, на порядок величины. Направленные внутрь взрывные волны, образующиеся при одновременном схлопывании слоя каверн, могут привести к увеличению давления на порядок величины, по сравнению с давлением, возникающим при схлопывании одиночной каверны вблизи стенки. Энергия схлопывания и ее направленность определяются конфигурацией ансамбля кавитационных пузырьков.

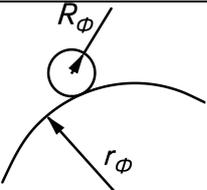
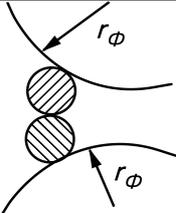
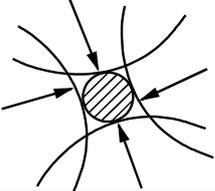
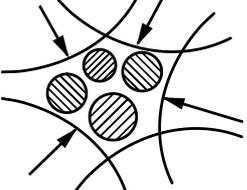
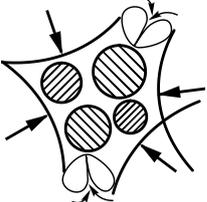
3.2.3. Диспергация твердой фазы, полимеров, клеток и микроорганизмов

Рассмотрим действие кавитационных пузырьков для организации различных технологических процессов [1, 20]. Особое значение имеет случай диспергирования частиц, имеющих достаточно малые размеры, сопоставимые с размерами молекул или межмолекулярными расстояниями несущей фазы. Частицы таких размеров будут увлекаться движущейся жидкостью с большой легкостью, на их перемещение будет оказывать влияние механизм броуновского движения, т. е. такие тела в первом приближении будут вести себя как частицы жидкости. Вероятно, здесь основную роль в измельчении движения должны играть механизмы ударного воздействия групп пузырьков при их коллективном схлопывании, а также механизмы воздействия, изложенные выше.

По-видимому, описать все возможные схемы взаимодействий схлопывающихся микропузырьков и дисперсной фазы не представляется возможным. Имеет смысл остановиться на наиболее очевидных (см. табл. 4.2), предполагая, что равновероятно существование множества других схем и их всевозможных комбинаций. В табл. 4.2 отмеченные схемы можно рассматривать как элементарные «трибологические ячейки» взаимодействия кавитационных микропузырьков и дисперсной фазы; сферическая форма частиц дисперсной фазы – только первое приближение к реальной форме, которая в общем случае произвольна.

Различные по физической сущности методы диспергации описаны в [5, 6, 9, 20, 49, 55, 58, 57, 52, 46, 56, 54, и др.]. Следует отметить, что измельчение полимеров [9, 59–61], клеток и микроорганизмов [62, 63], твердофазных включений в растворах и смесях имеет свои, в каждом конкретном случае, специфические особенности, рассмотрению которых целесообразно посвятить отдельное исследование.

Измельчение размера частиц дисперсной фазы (геля, золя, полимерного раствора и т. д.) можно охарактеризовать зависимостью, представленной на рис. 4.4. В общем случае размер дисперсной фазы R_{ϕ} должен зависеть от следующих факторов: концентрации дисперсной фазы C_{ϕ} ; концентрации пузырьков заданного размера C_R ; параметров потока, определяемых числами Вебера We , кавитации χ , Рейнольдса Re ; температуры T° ; давления P ; скорости V ; времени

№	Схема	Описание
1		Взаимодействие одиночной частицы дисперсной фазы с фронтом ударной волны
2		Взаимодействие частицы с кумулятивной струйкой при несимметричном коллапсе пузырька (при соответствующем размере частицы)
3		Кроме гидродинамического, проявляется и трибомеханическое разрушение частиц из-за возникающих при таком контакте сил трения, качения и сдвиговых деформаций
4		Взаимодействие одиночной частицы с системой ударных волн при схлопывании групп пузырьков
5		Воздействие ударных волн при схлопывании групп пузырьков на скопление частиц дисперсной фазы
6		Одновременное воздействие ударных волн и кумулятивных ультразвуков
7	Для воды	Деструкция несущей фазы в результате кавитационного воздействия и вызванных им механических реакций

$\text{H}_2\text{O}^* \rightarrow \text{H}\cdot + \dot{\text{O}}\text{H}^*,$ $\dot{\text{O}}\text{H}^* \rightarrow \dot{\text{O}}\text{H} + h\nu,$ $\dot{\text{O}}\text{H} + \dot{\text{O}}\text{H} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2,$ $\dot{\text{O}}\text{H} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O},$ $\dot{\text{O}}\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2.$	
--	--

Таблица 3.2 – Схемы силового взаимодействия ударных волн и полидисперсной фазы в жидкости

τ ; преобладания того или иного механизма разрушения, учитываемого коэффициентом воздействия K_B ; начальных размеров (в общем случае спектра размеров) дисперсной фазы R_0 ; коэффициента, учитывающего вероятность или частоту события разрушающего взаимодействия K_f и др. Формализованно эта зависимость в неявной форме будет иметь вид

$$R_\Phi = f(C_\Phi, R_0, C_R, We, \chi, Re, T^0, V, P, \tau, K_B, R_T^0, K_f, \dots). \quad (3.66)$$

Задачей исследований на перспективу является отыскание конкретных функций влияния отдельных факторов на процесс диспергации, а также конкретизация и уточнение определения различных коэффициентов, входящих в (4.66) для дисперсной и несущей фаз различного состава. Кроме того, необходимо определить влияние всех факторов на процесс диспергации с целью возможного упрощения зависимости (4.66) путем исключения факторов, влияющих на процесс разрушения незначительно.

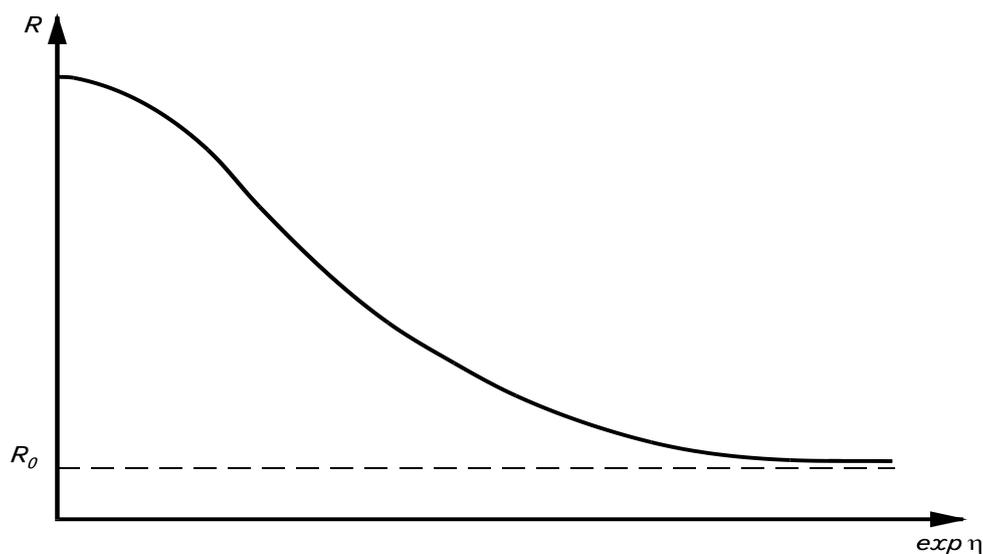


Рис. 3.4 - Зависимость размера частицы R от числа кавитации и времени обработки
(комплексный показатель $\exp \eta$)

Так, кинетику распада макромолекул в ультразвуковом поле можно описать уравнением первого порядка относительно средней степени полимеризации \bar{P} [9]:

$$\frac{dX}{d\tau} = kN_A(\bar{P} - P_\infty), \quad (3.67)$$

где X – число разрывающихся связей в единице объема; k – константа скорости; \bar{P}_∞ – конечная степень полимеризации.

Предложенная Бретом и Джелинеком [64] более сложная формула, пригодная для описания скорости деструкции макромолекул при вибрационной кавитации, имеет вид

$$\frac{dX}{d\tau} = k'V_0(\bar{P} - \bar{P}_\infty)X(t)nf \quad (3.68)$$

Здесь X(t) – число имеющихся в системе связей C–C в полимерных молекулах; k' – константа скорости; V_0 – коэффициент, характеризующий активность кавитации, зависит от частоты f, интенсивности ультразвука I, природы растворенного газа, растворителя и т. д.; n – число кавитационных пузырьков в жидкости. В [61] предлагается учитывать накопление энергии деформации частицами твердой фазы (энергию механоактивации). Показано, что степень измельчения i зависит от исходного радиуса частицы R_0 , удельного энергопривода E, длительности обработки τ :

$$E = A_1 \cdot i \cdot \exp\left[\frac{b}{R_T^0} i\tau\right], \quad (3.69)$$

где A_1 и b – коэффициенты, определяющие физико-механические свойства материала. Конечный размер частиц определяет степень механической активации ε материала:

$$\varepsilon = AR_\phi g \left[1 - \left(-\frac{C}{R_\phi} \tau \right) \right], \quad (3.70)$$

где g – скорость удельного энергопривода; A и C – коэффициенты, учитывающие физико-химические свойства материала. Подставляя (3.70) в (3.69), определяют энергию механической активации в функции от конечного радиуса частицы.

Разрушение клеток идет в основном за счет возникновения поперечных градиентов скорости и неоднородного распределения скоростей [62]. Собственно говоря, клетка при механической дезинтеграции испытывает на себе действие суммы факторов, определяющих общую микромасштабную картину процессов трения – объемного (внутреннего) или поверхностного (внешнего). Воздействие сил внутреннего трения при очень неоднородном

сдвиговом течении жидкой, реологически сложной «аморфной» и твердой среды наиболее эффективно, если имеется диаметральный перепад скоростей среды $\Delta V_{\text{ср}}$, определяемый выражением

$$\Delta V_{\text{ср}} \cong \frac{\pi \sigma_{\text{пр}} d_{\text{кл}}^2}{\mu}, \quad (3.71)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – предел прочности материала клеточной оболочки; $d_{\text{кл}}$ – диаметр клетки; μ – эффективная вязкость среды.

Анализ литературных источников показал малую степень изученности оценки взаимодействия силовых полей в жидкости с материалом (веществом) дисперсной фазы. Затруднения, встречающиеся при исследовании данной проблемы, – неопределенность форм, структур, размеров, схемы взаимодействия и т. п. Однако исследования такого рода важны и с научной, и с практической сторон для обеспечения конструирования новых технологических процессов, прогнозирования конечного результата, проектирования технологического оборудования и т. д.

3.3. Некоторые экспериментальные результаты

В работе [65] изучалось влияние кавитационной обработки в суперкавитационном миксере [66] на содержание кишечной палочки и золотистого стафилококка в питьевой воде. Опыты проводились с клиновидным кавитатором (угол при вершине клина составлял $\alpha=20^\circ$) при температуре 20–22 °С. Варьировалось число оборотов ротора в диапазоне от 2 до 10 тыс. об/мин соответственно. Число кавитации, подсчитанное для диаметра крыльчатке, составило $\chi = 0,56-0,02$, время обработки – τ . Измерения проводились с помощью метода светорассеяния и электронного микроскопа. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.5.

Как видно из рис. 4.5, характер изменения концентрации для кишечной палочки стафилококка одинаков, близки и количественные характеристики, что, видимо, объясняется примерно одинаковыми характеристиками клеток. Модуль Юнга равен соответственно $\sim 5 \cdot 10^9$ и $4 \cdot 10^8$ дин/см², а предел прочности клеточных оболочек составляет $\sim 10^6-10^{11}$ дин/см² [62]. Учтя эти данные и уровень расчетных значений при кавитационном воздействии ($P \sim 10000$ атм; $\dot{T} \sim 10^{11}$ к/с; $T \sim 2000^\circ\text{K}$; $P_m \sim 10^8$ Па), можно сделать заключение о достаточности силового воздействия для разрушения клеточного материала. При дезинтеграции оценивают напряжения, возникающие в оболочках клеток, по следующим зависимостям [62]:

$$\sigma_{\varphi\theta} = P \frac{R}{h} \cdot \frac{\theta - 0,5 \sin 2\theta}{2 \sin^2 \theta}, \quad (3.72)$$

$$F_i = P_{n_i} + \eta \left(\frac{\partial V_i}{\partial X_k} + \frac{\partial V_k}{\partial X_i} \right) n_{k/s}, \quad (3.73)$$

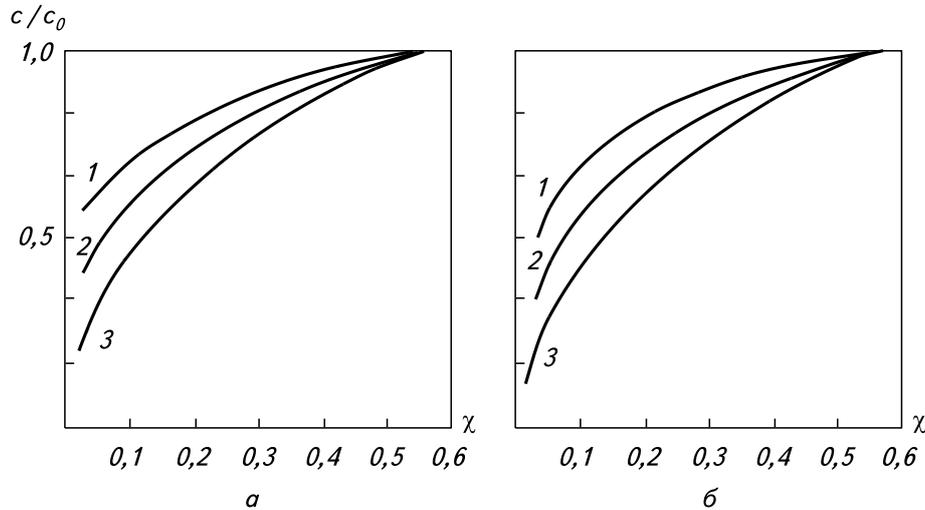


Рис. 3.5 - Зависимость безразмерной концентрации c/c_0 от числа кавитации $\chi = \frac{2(P_\infty - P_d)}{\rho V^2}$: а – кишечная палочка; б – золотистый стафилококк; 1 – $\tau = 30$ с – 1 мин; 3 – 3 мин; C_0 – исходная концентрация

где σ – напряжение в оболочке; K – радиус клетки; h – толщина оболочки; P – давление в среде; η – вязкость среды; n_i – единичный вектор нормали к поверхности клетки; V – скорость; θ – угловая константа.

Говоря о кавитационном разрушающем воздействии, всегда следует помнить о многофакторности этого воздействия, о вторичных механизмах, способствующих диспергации, инспирированных кавитацией. Поэтому интерпретация полученного результата вызывает определенные трудности и, говоря о кавитационном воздействии, надо подразумевать то интегральное разрушающее воздействие, вызванное интенсивными полями переменных давлений, скоростей, температур; микротурбулентными градиентными потоками; ударными волнами; температурным и осмотическим шоками, а также и бактерицидными свойствами воды, проявляющимися в результате происходящих в ней механохимических реакций (увеличение pH, появление перекиси водорода, O_2 , O_3) [1] и т. д.

В данном случае, не вдаваясь в детали процесса разрушения клеток, достаточно хорошо описанных в литературе, например в [60], можно констатировать обеззараживающее действие кавитации на питьевую воду. Одновременно наблюдается гомогенизация по размерам дисперсной и, в общем случае, гетерогенной фазы.

Следующая задача экспериментальных исследований состояла в сравнении результатов гидромеханической (ГМ) и вибрационной ультразвуковой (УЗ) водных суспензии ультрадисперсного алмаза.

Ультрадисперсный алмаз (УДА), получаемый методом детонационного синтеза, является одним из основных материалов нанотехнологий. Он незаменим в суперфинишной обработке тел, обеспечивает шероховатость поверхности в пределах единиц нанометров, причем нарушенный слой отсутствует. Это определяется малостью размеров зерен УДА (порядка 4–10 нм), которая, однако, делает его склонным к коагуляции с образованием агрегатов в десятые доли микрометра. Поэтому перед использованием технологических суспензий на основе УДА необходимо проведение диспергирования, которое обычно осуществляется УЗ обработкой [67].

При исследованиях влияния внешних воздействий и для успешного практического использования суспензий необходим контроль за размерами зерен УДА или, по крайней мере, обнаружение присутствия субмикронных агрегатов. Контроль должен быть достаточно оперативным и не должен содержать отбор проб и специальную подготовку образцов к измерениям, чтобы исключить изменение при этом дисперсного состава системы. Этим требованиям отвечают методы определения дисперсности, основанные на рассеянии света мутными средами. Это рабочие суспензии УДА, характеризующиеся низкими концентрациями (менее 1%) и иными оптическими свойствами алмаза и воды (относительные показатели преломления соответственно $m_i = 2,4$; $m_a = 1,33$). Количественно рассеяние света малыми частицами описывается теорией Ми [68]. Наиболее простое описание дифрагированного поля монохроматического излучения (длина волны λ) соответствует монодисперсной системе сферических частиц радиуса r при однократном рассеянии света на частицах. Такая теоретическая модель была принята к исследуемым зольам УДА. Доступными для измерения характеристиками рассеянного излучения являются индикатриса рассеяния, т. е. интенсивность рассеянного излучения под углом β от направления распространения света, угловая зависимость $I(\beta)$ и фактор эффективности рассеяния K_r , являющийся отношением интенсивности рассеянного по всем направлениям света к интенсивности падающего света I_0 . Вид индикатрисы и величина фактора эффективности рассеяния определяются величиной дифракционного параметра ρ и относительного показателя преломления рассеивающей сферы и дисперсионной среды:

$$\rho = \frac{2\pi r}{\lambda} \frac{m_i}{m_a}, \quad m = \frac{m_i}{m_a} \quad (4.74)$$

В пределе очень малых «мягких» частиц ($\rho \rightarrow 0$, $m \rightarrow 1$) интенсивность рассеяния мала ($K_r \approx 0$), а угловая зависимость $I(\beta)$ отсутствует, т. е. индикатриса круговая. С увеличением ρ и m индикатриса вытягивается в

направлении распространения света и становится несимметричной: рассеяние «вперед» преобладает над рассеянием «назад». На этих эффектах изменения радиусов рассеивающих частиц и основаны методы определения их радиусов.

Наиболее легко реализуются методы, основанные на измерении несимметрии индикатрисы и спектра прозрачности мутной монодисперсной системы [69, 70]. Первый из них требует измерения относительной интенсивности рассеянного света под одинаковыми углами «вперед» и «назад» (обычно $\beta_1 = 45^\circ$ и $\beta_2 = 135^\circ$, т.е. измеряют $I_{45}/I_{135} = f(\rho, m)$, нахождения соответствующего значения ρ и из него радиуса r . Метод спектра прозрачности основан на изменении фактора эффективности рассеяния K_p и соответственно доли излучения, прошедшего без рассеяния I/I_0 , при изменении длины волны λ из-за изменения величины ρ . В [70] показано, что при отсутствии полос поглощения средой в диапазоне измерения спектра $I/I_0(\lambda)$ его вид в координатах $[\ln | \ln(I/I_0) | \ln \lambda]$ является прямой линией, угловой коэффициент которой

$$\eta(\rho, m) = \frac{\Delta \ln | \ln(I/I_0) |}{\Delta \ln \lambda} = \frac{\lambda}{K_p(\rho, m)} \cdot \frac{\partial K(\rho, m)}{\partial \lambda} \quad (3.75)$$

может быть предварительно просчитан по теории в виде калибровочных зависимостей как функция ρ и m , что позволяет из измеренного спектра прозрачности определить соответствующие ρ и r .

Рассмотренные методы определения радиусов частиц были использованы для контроля дисперсности суспензий УДА при исследовании действия ГМ и УЗ обработки. Основные измерения выполнялись по методу спектра прозрачности, а метод несимметрии индикатрисы использовался как контрольный. Поскольку приводимые в литературе таблицы $K_p(\rho, m)$ и $I(\beta, \rho, m)$ ограничиваются малыми значениями относительного показателя преломления ($m \leq 1,4$), для системы «алмаз–вода» ($m = 1,8$) были проведены расчеты и табулирование этих величин по уравнениям точной теории [68]. Затем численным дифференцированием с последующим «сглаживанием» строились калибровочные зависимости $I_{45}/I_{135}(\rho, m)$ и $\eta(\rho, m)$.

Следует отметить одно обстоятельство, связанное с монодисперсной моделью рассеивающей системы, принятой в наших измерениях для суспензий УДА. Вычисляемый при этом радиус частиц r является средним эффективным размером, определяемым формой индикатрисы. Последняя же из-за полидисперсности реальной суспензии УДА формируется частицами всех размеров, причем из-за возрастающей зависимости $K_p(r)$ наибольший вклад в формирование индикатрисы дают наиболее крупные частицы, не являющиеся самыми многочисленными в спектре размеров. Таким образом, определяемая величина r не выступает как средний размер частиц в суспензии, а есть некий

«среднерассеивающий» эффективный радиус, позволяющий делать лишь качественные оценки изменения дисперсности в реальной системе.

Для выполнения измерений реализованы экспериментальные установки [71]. Для регистрации спектров прозрачности использован с незначительными доработками (для угловой селекции нерассеянного света) комплекс спектральный универсальный КСВУ-12 на базе решеточного монохроматора МДР-12 (диапазон длин волн от 0,2 до 1,2 мкм). Конструкция кюветного отделения допускает возможность измерений прошедшего излучения I на трех образцах, интенсивность падающего излучения I_0 регистрируется после прохождения света через кювету, заполненную чистой дисперсионной средой. Обработка измеренных спектров проводилась на ЭВМ с использованием пакета программ MATCAD. В конструкцию кюветного отделения были введены доработки, позволяющие осуществлять измерения на трех высотах столба исследуемой суспензии в кювете (рис. 4.6) с целью обнаружения седиментационных процессов.

Установка для измерений индикатрисы выполнена на базе призматического монохроматора ЗМР-3. Ее оригинальной частью является измерительное отделение, содержащее освещаемую монохроматическим излучением кювету с образцом и фотоприемник (ФЭУ-55), прецизионно перемещаемый по окружности вокруг образца в пределах угла β от -10 до 160° относительно направления падающего излучения. Измерения индикатрисы выполнялись на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм, угловая селекция регистрируемого излучения и точность отсчета по углу не хуже 1° .

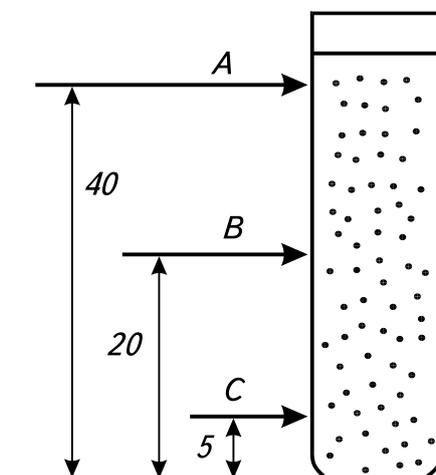


Рис. 3.6 - Схема измерения прозрачности на разных высотах столба суспензии

В качестве экспериментальных образцов использовались технологические суспензии УДА (используемые для суперфинишной обработки поверхностей) с концентрацией частиц алмаза 0,1%; дисперсионная среда – вода с добавлением ПАВ. Приготовленные суспензии подвергались УЗ либо ГМ диспергированию различной продолжительности от 1 до 9 мин.

УЗ диспергирование производилось на установке УЗДН-1, рабочая частота 22 кГц. Для ГМ, обработки использовался суперкавитационный миксер [66], активным элементом которого являлась кавитирующая крыльчатка с клиновидным профилем; угол при вершине α клина 20 и 40 градусов. При ГМ диспергировании кроме продолжительности воздействия, варьировалась частота вращения крыльчатки. Эксперименты выполнялись при частоте 2000, 4500 и 7000 об/мин.

Образцы суспензии подвергались измерениям непосредственно после диспергации и затем периодически в процессе отстоя в течение 48 часов. Из измеренных спектров прозрачности обработкой по вышеописанной методике определялись средние рассеивающие радиусы частиц. Приводимые ниже экспериментально найденные значения эффективных радиусов частиц получены усреднением не менее чем по трем проведенным измерениям.

На рис. 4.7 показаны зависимости размеров зерен УДА от продолжительности УЗ и ГМ диспергирования при различных величинах угла клина крыльчатки и частоты вращения. При этом измерения выполнялись непосредственно после динамического воздействия и занимали не более 5 минут. Начальный размер частиц в данной суспензии без диспергирования составлял 164 нм. Качественно кривые $r(\tau)$ для УЗ и ГМ обработки идентичны. Обращает на себя внимание немонотонный характер полученных зависимостей, а именно наличие оптимальной продолжительности воздействия τ , обеспечивающей наиболее тонкую структуру гидрозоля УДА. В отношении УЗ обработки возрастание размеров частиц при продолжительности выше оптимальной предположительно связывалось с разогревом суспензии, ускоряющей процессы агрегатирования [20]. Для используемой установки УЗДН-1 оптимальное время составило примерно 5 минут. Если сравнить зависимости $r(\tau)$ для УЗ и ГМ диспергирования при угле крыльчатки 20° (рис. 4,а), обнаруживается хорошее согласование кривых для УЗ обработки и ГМ при частоте вращения ротора 2000 об/мин (кривая 1) как по численным значениям получаемых радиусов, так и по положению экстремума. Это позволяет говорить о своего рода эквивалентности этих двух видов и режимов диспергирования. Увеличение частоты вращения до 7500 об/мин (кривые 2, 3) монотонно уменьшает размеры получаемых зерен УДА и одновременно приводит к сдвигу экстремумов кривых $r(\tau)$ в область меньших τ , т. е. с увеличением частоты вращения крыльчатки необходимая продолжительность обработки для достижения оптимальной структуры золя уменьшается.

При угле клина крыльчатки 40° картина несколько иная. Каждая из кривых $r(\tau)$ при различных частотах вращения ротора имеет экстремум, т. е. оптимальное время диспергирования, которое уменьшается с увеличением частоты. Однако при этом размеры зерен, образующихся при минимальной скорости, превышают значения, получаемые при угле 20°, а минимально достигаемые радиусы, наоборот, меньше, чем при малом угле клина. Кроме

того, зависимость размеров от частоты перестает быть монотонной: при любой продолжительности обработки вращение с частотой 4000 об/мин обеспечивает большую степень раздробленности, чем более низкая (2000) и более высокая (7500 об/мин) частоты.

Изменения размеров частиц в суспензиях, подвергнутых УЗ и ГМ диспергированию, в процессе отстоя после приготовления показаны на рис. 4.8. Здесь использовались образцы, имеющие эффективный рассеивающий размер до обработки 170 нм. Измерения во времени t выполнялись на трех уровнях кюветы по схеме, приведенной на рис. 4.6. Характер кривых $r(t)$ после УЗ и ГМ воздействия идентичен, что позволяет предполагать и идентичность механизмов протекающих во времени процессов.

На верхнем уровне кюветы (кривые А) наблюдается монотонное уменьшение размеров, сопровождающееся снижением оптической плотности системы, т. е. концентрации взвешенных частиц. На среднем и нижнем уровнях (кривые В и С) в течение первых 5 часов радиусы возрастают, затем уменьшаются; причем на нижнем уровне это уменьшение наименее выражено. Непосредственно на дне кюветы, ниже уровня С, наблюдается образование осадка.

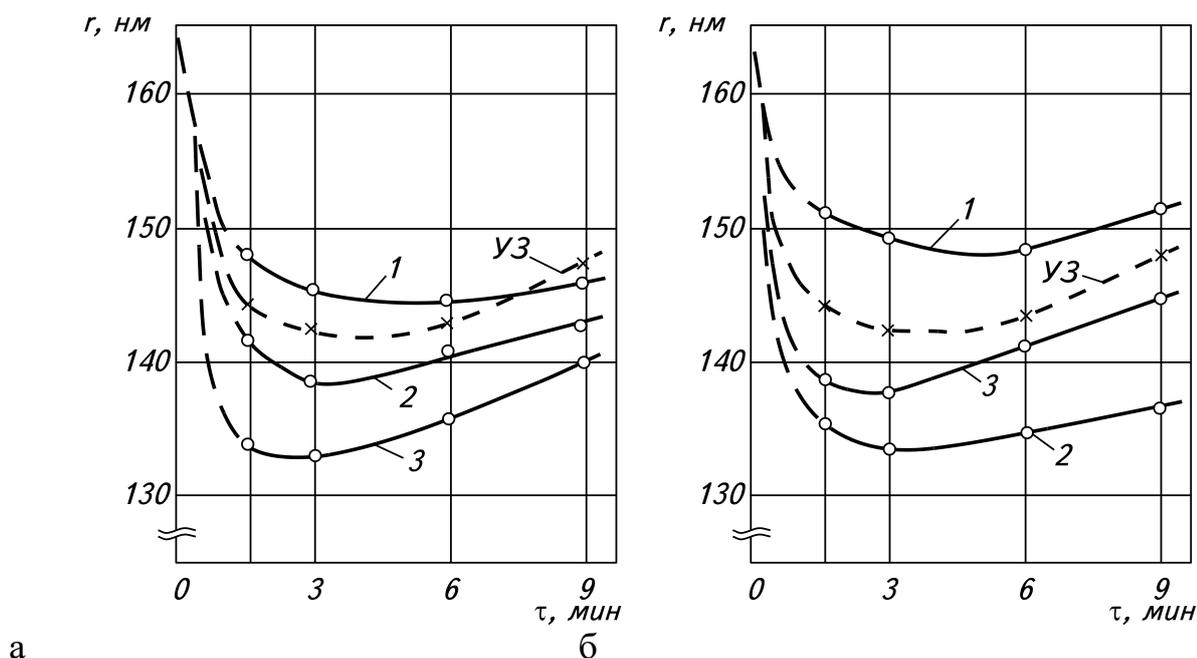


Рис. 3.7 - Зависимость средних радиусов УДА от продолжительности ультразвуковой (УЗ) и гидромеханической (1,2,3) обработки при угле клина 20° (а) и 40° (б). Частота вращения, об/мин: 1 – 2000, 2 – 4000, 3 – 7500

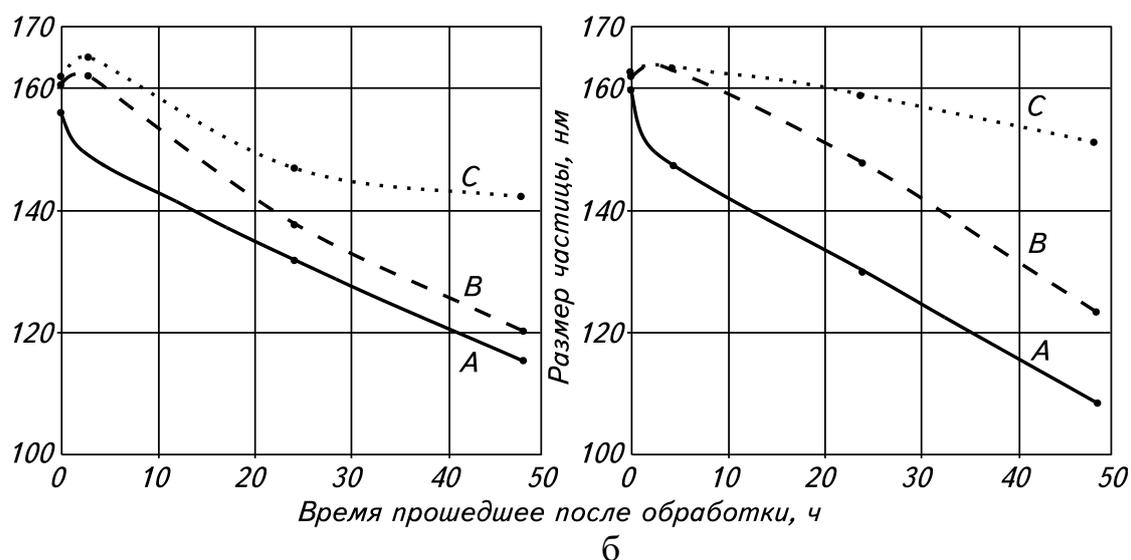


Рис. 3.8 - Зависимость средних радиусов УДА от времени отстоя после УЗ (а) и ГМ (б) обработки на трех уровнях кюветы (см. рис. 12.6): верхнем (А), среднем (В), нижнем (С)

Указанные закономерности могут быть объяснены сосуществованием в системе процессов агрегации и седиментации. Непосредственно после диспергирования структура гидрозоля во всем объеме кюветы достаточно однородна, однако уже в первые часы оседание наиболее крупных агрегатов из верхних слоев уменьшает средние размеры на уровне А и увеличивает их на уровне В и С. Дальнейшее изменение $r(t)$ в большей мере определяется седиментацией, исключаяющей из верхнего, а затем и из среднего уровня все более мелкие агрегаты, «подпитывающие» при этом нижний уровень измерения С. Низкая скорость оседания из-за малости размеров частиц, а также «подпитка» с высших уровней и образование осадка из наиболее крупных конгломератов приводят к более пологой временной зависимости радиуса r на нижнем уровне измерений.

Результаты экспериментального сравнительного исследования УЗ и ГМ диспергирования гидрозолей УДА позволяют заключить следующее.

Действие УЗ и ГМ обработки качественно и количественно идентичны, однако последняя из-за большого числа контролируемо измеряемых параметров (частота, продолжительность воздействия, угол клина) позволяет более точно обеспечить оптимальные режимы обработки. При этом ГМ обработка не вносит в систему каких-либо дополнительных факторов, влияющих на агрегативную устойчивость суспензии. С учетом дешевизны, производительности и возможности построения непрерывного процесса гидромеханический метод диспергирования оказывается предпочтительнее УЗ, особенно в промышленном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов / Ю.Н. Алпатов. - СПб.: Лань, 2018. - 136 с.
2. Белов Н.Н. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов / Н.Н. Белов. - М.: АСВ, 2023. - 562 с.
3. Гатауллина Е.В. Классификация математических моделей / Е.В. Гатауллина // Научный журнал. - 2022. - №3. – С. 44-48.
4. Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов / Н.В. Голубева. - СПб.: Лань, 2023. - 192 с.
5. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач. - СПб.: Лань, 2022. - 292 с.
6. Гумеров А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов / А.М. Гумеров. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
7. Жирков А.М. Математическое моделирование систем и процессов / А.М. Жирков. - СПб.: Лань КПТ, 2022. - 192 с.
8. Зайдель А.Н. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / А.Н. Зайдель. - СПб.: Лань, 2023. - 304 с.
9. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин. - М.: МГТУ им. Баумана, 2021. - 496 с.
10. Кудинов И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях / И.В. Кудинов. - СПб.: Лань, 2022. – 206 с.
11. Маркелов Г.Е. Математическая модель в узком смысле / Г.Е. Маркелов // Инженерный журнал: наука и инновации. – М.: Наука, 2023. – 400 с.
12. Хазанов Е.Е. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Е.Е. Хазанов. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
13. Шеманаева Л.И. Моделирование быстротекущих тепловых процессов / Л.И. Шеманаева // Восточно-европейский научный журнал. - 2022. - №1. – С. 103-109.
14. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов / Ю.Н. Алпатов. - СПб.: Лань, 2018. - 136 с.
15. Белов Н.Н. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов / Н.Н. Белов. - М.: АСВ, 2023. - 562 с.
16. Гатауллина Е.В. Классификация математических моделей / Е.В. Гатауллина // Научный журнал. - 2022. - №3. – С. 44-48.
17. Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов / Н.В. Голубева. - СПб.: Лань, 2023. - 192 с.
18. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач. - СПб.: Лань, 2022. - 292 с.

19. Гумеров А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов / А.М. Гумеров. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
20. Жирков А.М. Математическое моделирование систем и процессов / А.М. Жирков. - СПб.: Лань КПТ, 2022. - 192 с.
21. Зайдель А.Н. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / А.Н. Зайдель. - СПб.: Лань, 2023. - 304 с.
22. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин. - М.: МГТУ им. Баумана, 2021. - 496 с.
23. Кудинов И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях / И.В. Кудинов. - СПб.: Лань, 2022. – 206 с.
24. Маркелов Г.Е. Математическая модель в узком смысле / Г.Е. Маркелов // Инженерный журнал: наука и инновации. – М.: Наука, 2023. – 400 с.
25. Хазанов Е.Е. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Е.Е. Хазанов. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
26. Шеманаева Л.И. Моделирование быстротекущих тепловых процессов / Л.И. Шеманаева // Восточно-европейский научный журнал. - 2022. - №1. – С. 103-109.
27. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов / Ю.Н. Алпатов. - СПб.: Лань, 2018. - 136 с.
28. Белов Н.Н. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов / Н.Н. Белов. - М.: АСВ, 2023. - 562 с.
29. Гатауллина Е.В. Классификация математических моделей / Е.В. Гатауллина // Научный журнал. - 2022. - №3. – С. 44-48.
30. Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов / Н.В. Голубева. - СПб.: Лань, 2023. - 192 с.
31. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач. - СПб.: Лань, 2022. - 292 с.
32. Гумеров А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов / А.М. Гумеров. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
33. Жирков А.М. Математическое моделирование систем и процессов / А.М. Жирков. - СПб.: Лань КПТ, 2022. - 192 с.
34. Зайдель А.Н. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / А.Н. Зайдель. - СПб.: Лань, 2023. - 304 с.
35. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин. - М.: МГТУ им. Баумана, 2021. - 496 с.
36. Кудинов И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях / И.В. Кудинов. - СПб.: Лань, 2022. – 206 с.

37. Маркелов Г.Е. Математическая модель в узком смысле / Г.Е. Маркелов // Инженерный журнал: наука и инновации. – М.: Наука, 2023. – 400 с.
38. Хазанов Е.Е. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Е.Е. Хазанов. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
39. Шеманаева Л.И. Моделирование быстротекущих тепловых процессов / Л.И. Шеманаева // Восточно-европейский научный журнал. - 2022. - №1. – С. 103-109.
40. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов / Ю.Н. Алпатов. - СПб.: Лань, 2018. - 136 с.
41. Белов Н.Н. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов / Н.Н. Белов. - М.: АСВ, 2023. - 562 с.
42. Гатауллина Е.В. Классификация математических моделей / Е.В. Гатауллина // Научный журнал. - 2022. - №3. – С. 44-48.
43. Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов / Н.В. Голубева. - СПб.: Лань, 2023. - 192 с.
44. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач. - СПб.: Лань, 2022. - 292 с.
45. Гумеров А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов / А.М. Гумеров. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
46. Жирков А.М. Математическое моделирование систем и процессов / А.М. Жирков. - СПб.: Лань КПТ, 2022. - 192 с.
47. Зайдель А.Н. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / А.Н. Зайдель. - СПб.: Лань, 2023. - 304 с.
48. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин. - М.: МГТУ им. Баумана, 2021. - 496 с.
49. Кудинов И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях / И.В. Кудинов. - СПб.: Лань, 2022. – 206 с.
50. Маркелов Г.Е. Математическая модель в узком смысле / Г.Е. Маркелов // Инженерный журнал: наука и инновации. – М.: Наука, 2023. – 400 с.
51. Хазанов Е.Е. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Е.Е. Хазанов. - СПб.: Лань, 2021. - 176 с.
52. Шеманаева Л.И. Моделирование быстротекущих тепловых процессов / Л.И. Шеманаева // Восточно-европейский научный журнал. - 2022. - №1. – С. 103-109.
53. Ивченко В. М., Кулагин В. А., Немчин А. Ф. Кавитационная технология. Красноярск, 1990. 200 с.
54. Кулагин В. А. Краевая задача сопряжения кавитационного пузырька в жидкости // Численные методы механики сплошной среды: Тез. докл. II Всесоюзн. школы. Красноярск: ВЦ СО АН СССР, 1989. С. 42–44.
55. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. М. –Л.: ГИТТЛ,

1951. 107 с.

56. Кулагин В. А. О феноменологической модели механолиза воды // Вестник КГТУ. Вып. 2. Красноярск: КГТУ, 1996. С. 61–68.

57. Plesset M. S., Chapman R. B. Collapse of an Initially Spherical Vapour in the Neighbourhood of a Solid Boundary // Journal of Fluid Mechanics, 1971. V. 47. P. 125–141.

58. Воинов О. В., Петров А. Г. Движение сферы переменного объема в идеальной жидкости около плоской поверхности // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1971. № 5. С. 94–103.

59. Ивченко В. М., Кулагин В. А., Есиков С. А., Лаврик Н. Л. Кинетика кавитационного воздействия на элементы гидротехнических сооружений и гидроэнергетического оборудования // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Л.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 200. С. 43–48.

60. Кулагин В. А., Турутин Б. Ф., Матюшенко А. И. Гидрофизика. Учеб. пособие. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2000. 243 с.

61. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М.: Химия, 1986. 288с.

62. Rosental I., Mossoba M., Ries P. J. // Magnet. Reson., 1981. Vol. 45. P. 359.

63. Кулагин В. А. и др. Интенсификация биохимических процессов микробиологической переработки отходов угледобывающей промышленности // Автоматизация биотехнологических производств: Материалы II Всесоюзн. НТК. Тушино, 1990. С. 94–96.

64. Кулагин В. А. Кавитационная биомеханика и технология // Компрессорная техника. 1992. №1. С. 34–35.

65. Кулагин В. А. О кавитационной биохимической технологии в восстановлении нарушенных земель // Системные аспекты ресурсосбережения и охраны окружающей среды: Тезисы докл. Всесоюзн. НТК. Черновцы, 1990. С. 98–101.

66. Кулагин В. А. О феноменологической модели кавитационного воздействия на биологические объекты // Проектирование, производство и эксплуатация жидкостно-газовых систем: Тезисы докл. Всесоюзн. НТК. Киев, 1989. С. 124–126.

67. Кулагин В. А., Сидоренко С. И., Шевченко Н. М. Интенсификация биотехнологических процессов при использовании водоугольных суспензий // Биотехнология и биофизика микробных популяций: Тезисы докл. Всесоюзн. НТК. Алма-Ата: ИБФ СО АН СССР, 1991. С. 43–45.

68. Kulagin V. A. Cavitation Biomechanic // Journal of Soviet Science and Technology. Harbin, 1971. № 4. P. 1124–1140.

69. Kulagin V. A., Sidorenco S. I. Использование суперкавитационных реакторов для активации полидисперсных субстратов с целью интенсификации биотехнологических процессов // Prog. International SYMKOM' 91. Lodz, 1991. P. 131–135.

70. Kulagin V. A. Cavitation technology and know-how in production of turbomachines // Proc. International SYMKOM'91. Lodz, 1991. p. 27–41.
71. Kulagin V. A. Cavitation Technology in Industry // Zeszyty Naukowe Politechniki Lodzkiej. Lodz, 1993. P. 103–115.
72. Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружицкий В. П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 331 с.
73. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М.: Изд-во иностранной литературы, 1949. 520 с.
74. Скворцов Г. Е., Тимохов Л. А. К теории турбулентности // Вестник ЛГУ. Вып. 2. №13, 1980. С. 106–110.
75. Репин Н. Н., Телевин Л. А. Возникновение турбулентности. Уфа: Башкирское кн. изд-во, 1977. 96 с.
76. Седов Л. И. Механика сплошной среды: В 2 т. Т 1 и 2. М.: Наука, 1973. 536 с., 584 с.
77. Ивченко В. М. Гидродинамика многофазных жидкостей – кавитация. Красноярск, 1980. 81 с.
78. Ивченко В. М. Гидродинамика суперкавитирующих механизмов. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1985. 232 с.
79. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. М.: Мир, 1964. 466 с.
80. Никулин В. А. Основные уравнения движения реальных жидкостей // Гидродинамика течений с теплообменом. Устинов: УМИ, 1986. С. 4–15.
81. Poritsky H., Chapmen R. B. Collaps or Growth of a Spherical Bubble or Cavity in a Viscous Fluid // Proc. First U. S. Natl. Congr. Appl. Mech. (ASME), 1952. P. 813–821.
82. Айвени Р. Д., Хэммит Ф. Г. Численный анализ явления схлопывания кавитационного пузырька в вязкой жидкости // Тр. ASME. Сер. D. Теоретические методы инженерных расчетов. 1965. № 4. С. 140–150.
83. Glimore F. R. The Growth and Collaps of a Spherical Bubble in a Viscous Compressible Liquid // Rept 26–4, Calif. Inst. Of Tech. Hydrodyn, 1952.
84. Kirkwood J. G., Bethe h. a. The Pressure Wave Produced by an Underwater Explosion / OSRD Rept 588, 1942.
85. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
86. Ладыженская О. А. Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1970. 288 с.
87. Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974, 688 с.
88. Левковский Ю. Л. Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1978. 224 с.
89. Кулагин В. А. Суперкавитация в энергетике и гидротехнике: Монография. Красноярск: КГТУ, 2000. 107 с.
90. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика. М.: Мир, 1967: В 3 т. Т. 1. Ч. Б. С. 7–138.

91. Розенберг Л. Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Резенберга. М.: Наука, 1968. Ч. IV. С. 25–31.
92. Plesset M. S. Prosperetti A. // *Ann. Rev. Fluid Mech*, 1977. №9. P. 145–185.
93. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М.: Химия, 1986. 288с.
94. Ивченко В. М. Кавитация и некоторые задачи гидродинамики // Исследование по прикладной гидродинамике. Киев: Наук. Думка, 1965. С. 70–78.
95. Сиротюк М. Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Резенберга. М.: Наука, 1968. Ч. IV. С. 75–81.
96. Катина Л. В., Кортнев А. А., Макаров В. К., Околелов Г. И. О разрушительных эффектах кавитационного пузырька // Акустическая и ультразвуковая техника. 1979. №14. С. 6–10.
97. Hobbs J. M. Experience with a 20kc Cavitation Erosion Test // *Erosion by Cavitation or Impingement*. Atlantic City. ASTM, STR, №408. 1967. P. 159-185.
98. Тирувенгадам А. Обобщенная теория кавитационных разрушений // Труды ASME. Сер. D. Техническая механика. 1969. №3. С. 48–62.
99. Plesset M. S. Prosperetti A. // *Ann. Rev. Fluid Mech*, 1977. №9. P. 145–185.
100. Plesset M. S., Chapman R. B. Collapse of an Initially Spherical Vapour in the Neighbourhood of a Solid Boundary // *Journal of Fluid Mechanics*, 1971. V. 47. P. 125–141.
101. Воинов О. В., Петров А. Г. Функция Лагранжа газового пузырька в неоднородном потоке // ДАН СССР. 1973. Т. 21. С. 1036–1039.
102. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.
103. Ксендзовский П. Д. Расчет эрозионного воздействия на обтекаемый профиль при пузырьковой кавитации // Исследование и расчет гидромашин. Тр. ВНИИГидромаша. М.: Энергия, 1978. С. 27–42.
104. Прис К. М. Кавитационная эрозия // Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 269–331.
105. Неустановившиеся течения воды с большими скоростями. М.: Наука, 1973. 496 с.
106. Thiruvengadam A. Scaling Law for Cavitation Erosion // Неустановившиеся течения воды с большими скоростями: Труды JUTAM. М.: Наука, 1973. С. 405–427.
107. Гривин Ю. А., Зубрилов С. П., Ларин В. А. // ЖФХ. 1980. Т. 54. С. 56.
108. Lauterborn W. // 9 Intern. Congr. on Acoustics. Madrid, 1977.
109. Мёрч К. Д. Динамика кавитационных пузырьков и кавитационных жидкостей // Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 331–382.
110. Мартынюк М. М. // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13. С. 213.

111. Научно-информационный сборник СКТБ «Дезинтегратор». Таллин: Валгус, 1980. 138с.
112. УДА-технология // Тезисы докладов III семинара. Тамбов, 1984. 125 с.
113. Универсальная дезинтеграторная активация // Сб. статей. Таллин: Валгус, 1980. 112 с.
114. Фихте Б. А., Гуревич Г. А. Дезинтеграторы клеток. М.: Наука, 1988. 224 с.
115. Описание научных принципов устройства новых приборов и методики пользования ими. Сер. Дезинтеграционная аппаратура для биологических исследований АН СССР в Пущине. М., 1988. 32 с.
116. Schmid G., Rommel O. // Z. phys. Chem., 1939. В. А185. S. 97.
117. Кулагин В. А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси и твердые границы потоков // Вестник КГТУ. Вып. 8. Проблемы развития теплоэнергетики и пути их решения: Тр. науч. -практ. конф. Красноярск, 1997. С. 26–43.
118. Кулагин В. А. Суперкавитационный миксер // Гидродинамика больших скоростей. Красноярск, 1992. С. 134–140.
119. Захаров А. А., Юзова В. А. Анализ устойчивости высокодисперсных полировальных композиций // Вестник КГТУ. Вып. 8. Проблемы развития теплоэнергетики и пути их решения: Тр. научн. -практ. конф. Красноярск, 1997. С. 215–223.
120. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М. -Л.: Гостехтеоретиздат, 1951. 288 с.
121. Слоним И. Я. Определение размера частиц по светорассеянию // Оптика и спектроскопия. 1960. Т. 8. №1. С. 98–108.
122. Слуцкер А. И., Марихин В. А. Изучение прозрачности рассеивающей свет среды как метод изучения неоднородностей в ней // Оптика и спектроскопия. 1961. Т. 10. № 4. С. 512–517.
123. Захаров А. А., Королев В. Л. Определение размеров частиц ультрадисперсного алмаза методами светорассеяния // Вестник КГТУ. Вып. 3. Гидродинамика больших скоростей. Красноярск, 1996. С. 202–204.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Теплотехники и гидрогазодинамика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
В.А. Кулагин

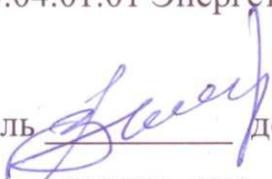
«26» июня 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Математическое моделирование процессов в кавитационных аппаратах
промышленной теплоэнергетики

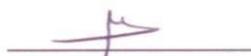
13.04.01. Теплоэнергетика и теплотехника

13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий

Научный руководитель  докт.техн.наук, профессор В.А. Кулагин

подпись, дата

Выпускник



М.И. Отман

подпись, дата

Рецензент



канд.техн.наук, доцент Л. В. Кулагина

подпись, дата

Красноярск 2024