

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



КУЛАГИНА
Людмила Владимировна

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
доцент К. А. Штым

Казань – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СИНТЕЗ-АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ И ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕПЛОТУ СИСТЕМАХ И УСТАНОВКАХ	20
1.1 Использование эффектов кавитации в различных тепло технологических системах и процессах	21
1.1.1 Физико-химические процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии в водных системах, вызванных гидродинамической кавитацией	23
1.1.1.1 Характеристики качества морской воды и их влияние на динамику кавитации	23
1.1.1.2 Термодинамические процессы и циклы применительно к установкам опреснения морской воды	27
1.1.1.3 Кондиционирование вод питьевого назначения и стоков	31
1.1.2 Топливоподготовка и особенности сжигания водотопливных смесей в теплотехнических системах и установках	33
1.1.3 Обращение с особо опасными отходами производственных процессов	40
1.1.4 Использование кавитационных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности	44
1.2 Моделирование суперкавитационных течений в теплотехнологических аппаратах и оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты	45
1.2.1 Анализ тенденций отечественных и зарубежных исследований суперкавитационных потоков с взаимодействием интенсивных потоков	47

энергии и вещества

1.2.2 Моделирование многофазной турбулентности кавитационных потоков в условиях взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом	56
1.2.3 Прогресс в реализации принципа кавитационного орошения воды	56
1.3 Особенности моделирования кавитационных течений в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях	61
1.3.1 Анализ методов вычислительной гидродинамики процессов тепло- и массообмена	64
1.4 Вычислительные проблемы систем с распределенными параметрами в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках	65
2 РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СУПЕРКАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТАХ	70
2.1 Обтекание различных типов лопастных механизмов двухфазным сжимаемым потоком	75
2.1.1 Эффективные методы суммирования последовательностей	76
2.1.2 Задача обтекания профиля вблизи границы раздела	83
2.1.3 Преобразование расходящихся последовательностей и рядов	92
2.2 Метод решения задач обтекания решетки суперкавитирующих профилей гидродинамических реакторов	97
2.3 Расчет крыльчатки кавитационного смесителя для получения топливных эмульсий и суспензий с целью повышения энергоэффективности	104
2.4 Об одной модели кавитационной эрозии материалов	113
2.5 Трехмерное моделирование эффектов кавитации	114
2.6 Параметрическое описание явлений кавитации	123

2.7 Влияние вязкости в кавитационных течениях	130
2.8 Математическая модель тепломассообменных и гидродинамических процессов в суперкавитирующих испарителях	130
2.9 Численное решение прямой задачи течения двухфазной жидкости	138
3. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	149
3.1. Экспериментальные стенды	151
3.2. Методология и методы исследований	154
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	155
4.1. Физико-химическое воздействие гидродинамической кавитации на водные системы	156
4.2 Кондиционирование промышленных стоков	159
4.3 Проблема ингерентности и ликвидности перспективных энергогенерирующих систем	167
4.4 Разработка теоретических основ и методологии вовлечения в топливно-энергетический комплекс непроектных топлив	170
4.5 Использование биомассы в смесевом водоугольном топливе (БиоВУТ) на базе отходов животноводства	175
4.6 Математическое моделирование сжигания БиоВУТ	177
4.7 Повышение энергоэффективности и экологической безопасности работы малогабаритных печей за счет добавления водотопливной смеси и органических компонентов	184
4.8 Описание теплотехнологического процесса в трубчатой печи	193
4.9 Задача оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах с целью повышения энергоэффективности	228
4.9.1 Численный анализ режимов работы технологических печей	239

5 КОНЦЕПЦИЯ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УЩЕРБА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВРЕДНЫМИ ВЫБРОСАМИ	244
5.1. Комплексная методика определения эффективности и техносферной безопасности теплотехнологий, способствующая защите окружающей среды	245
 5.1.1 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ (LSTM)	246
5.1.2 Метод прогнозирования количественного состава вредных веществ в атмосфере мегаполиса	251
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	256
ЛИТЕРАТУРА	258
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты об использовании результатов исследования	316

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы объясняется и подтверждается настоятельными требованиями повышения эффективности технологий и оборудования в промышленности путем нахождения и практического применения новых научноемких процессов. Это в полной мере можно отнести к кавитационным технологиям в промышленной теплоэнергетике (оборудование топливо- и водоподготовки, очистки стоков и др., использующее эффекты суперкавитации). Речь идет о разрешении стратегических проблем перехода страны к устойчивому развитию на базе ресурсосберегающих технологий с учетом повышения техносферной безопасности в соответствие Указу Президента РФ от 01.12.2016 № 642.

В последние годы кавитационные технологии широко используются во многих промышленных производствах. Интенсификация различных теплотехнологических процессов получения многокомпонентных сред (водотопливных смесей в виде эмульсий, суспензий и др.), кондиционирование вод и стоков происходит за счет синергетического воздействия высокоэнергетических полей давлений и температур в результате механохимического воздействия эффектов гидродинамической кавитации, реализующего эффект « $1 + 1 > 2$ ».

Степень разработанности темы. Результаты технологического применения эффектов кавитации, различного оборудования топливоподготовки и обеспечения эффективности сжигания смесевых топлив отражено в работах А.М. Балабышко, М.П. Барановой, Г.Н. Делягина, А.К. Звездина, В.М. Ивченко, Г.В. Кузнецова, В.А. Кулагина, Л.И. Мальцева, В.И. Мурко, В.П. Ружицкого, П.А. Стрижака, С.В. Сыродоя, А. Шёргера и др., в которых отмечается влияние дисперсионных характеристик топлива на качество его сжигания. Отмечено, что гидродинамические задачи для парогазового пузырька в жидкости играют определяющую роль в широких технических приложениях, как-то: течения в кавитационных реакторах и эмульгаторах. Вопросы математического

моделирования теплотехнических и физико-химических процессов в промышленной теплоэнергетике, использования водоугольной смеси совместно с биомассой – биоводоугольного топлива (БиоВУТ) и вредного воздействия на окружающую среду рассматривались в работах С.В. Алексеенко, Д.М. Марковича, В.А. Мунца, И.А. Султангузина, П.А. Щинникова и др. Техника эксперимента базируется на результатах работ В.М. Ивченко, В.А. Кулагина, Ю.Л. Левковского, П.А. Стрижака, Ф. Хэммита, Л.А. Эпштейна и др. Методы определения предотвращенного ущерба окружающей среде и критерий экологической эффективности разработаны и предложены в работах Т.А. Кулагиной. Наиболее близкие к теме диссертации результаты получены зарубежными учеными: Г. Мерло, А. Шёргером, К. Ямамото и др. Однако теория суперкавитационного (СК) оборудования в каждом отдельном случае развита недостаточно и, как следствие, возникает необходимость детальной разработки этой проблемы. Например, несмотря на то, что имеющийся экспериментальный материал весьма обширен, до настоящего времени не создано адекватной физической модели процессов, сопровождающих пульсации кавитационного пузырька. Суперкавитация, обусловленная наличием сложных деформируемых микроструктур (отдельных пузырей, пузырьковых кластеров и «облаков» кавитационно активных микропузырьков), создает различные формы течения и, как следствие, трудности применения к ней численных методов. Образующаяся в СК- установках пузырьковая газожидкостная смесь обладает специфическими особенностями, как-то: повышенная сжимаемость, что, в частности, приводит к резкому снижению значения скорости звука в смеси; изменение структуры потока, что в режиме «ламинарного» течения приводит к значительному возрастанию гидравлических потерь; возможность коагуляции или дробления пузырьков, т.е. изменение форм течения, вплоть до пленочных, «пробковых» или «снарядных» режимов (с газовой фазой внутри или снаружи жидкости).

В связи с этим возникает ряд проблем в таких направлениях, как анализ процессов обработки воды, водных растворов и смесей (аэрация, дегазация, смешение жидкостей, химические реакции в потоках и др.); разработка энерго- и

ресурсосберегающих технологий в сфере жизнеобеспечения мегаполисов; кавитационное кондиционирование природных и сточных вод и т. п., ответы на которые должны быть найдены в процессе всесторонних исследований. Этими обстоятельствами обусловлена актуальность работы, посвященной решению проблем энергосбережения путем развития методологических основ повышения энергетической и экологической эффективности теплотехнологических установок, базирующихся на использовании кавитационных технологий обработки многофазных смесей в промышленной теплоэнергетике и других отраслях промышленности. Существенным фактором модернизации этих установок является повышение их эффективности за счет совершенствования процессов суперкавитации.

Основная идея диссертации – предложить и обосновать подходы по повышению эффективности теплотехнологического оборудования с использованием суперкавитационных течений вследствие изменения физико-химического состояния материальных систем (воды, гомогенных и гетерогенных смесей и т. п.), уточняющих представления о кавитационных процессах в результате синергетического механизма воздействия высокоэнергетических полей температур и давлений; показать эффективность БиоВУТ с использованием отходов животноводства на примере процесса теплообмена в технологических печах с учетом влияния различных факторов на окружающую среду.

Объекты исследования – СК-установки и процессы, используемые в промышленной теплоэнергетике.

Предмет исследования – характеристики технологических процессов, модели и методы расчета СК-оборудования.

Цель диссертации – развитие теоретических и методологических подходов, направленных на увеличение энергоэффективности теплотехнологического оборудования, использующего эффекты суперкавитации, и способствующих защите окружающей среды в результате рационального проектирования за счет совершенствования математических

моделей кавитационных течений и методов расчета СК-установок различного назначения.

Для реализации указанной цели решены следующие задачи:

1. Определение механизма воздействия ансамбля кавитационно-активных микропузырьков в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях в процессе взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом как основы создания математических моделей суперкавитационных потоков в проточной части СК-установок с целью повышения их энергоэффективности.

2. Создание метода проектирования СК-оборудования для кавитационной обработки многокомпонентных гетерогенных сред (водотопливных смесей в виде эмульсий и суспензий и др.), кондиционирования стоков и воды технического и питьевого назначения с учетом методов интенсивного энергосбережения, способствующих защите окружающей среды.

3. Установление термодинамических параметров, способных влиять на процесс кавитации в наиболее распространенных случаях с целью упрощения решения задач проектирования СК-установок в тепловых технологических системах и процессах.

4. Обоснование технологии получения композиционного топлива – БиоВУТ с использованием отходов животноводства; проведение численного исследования процесса его сжигания на примере процесса тепло- и массообмена в технологических печах.

5. Создание комплексной методики определения эффективности и техносферной безопасности теплотехнологий, состоящей из метода расчета предотвращенного ущерба окружающей среде, критерия оценки экоэффективности и метода прогнозирования качества атмосферы с помощью рекуррентных нейронных сетей LSTM (Long Short-Term Memory).

На рисунке 1 представлена условная дорожная карта решения поставленных задач.

Методология и методы исследований. Численный анализ проводился с применением методов решения дифференциальных уравнений с обыкновенными производными (метод Рунге – Кутта – Мерсона и др.) и программного комплекса COMSOL Multiphysics; для систем уравнений с частными производными – FEMLAB, а также пакеты прикладных программ ANSYS CFX. Для выработки рекомендаций по оздоровлению экологической обстановки в мегаполисах применено прогнозирование загрязнения городской атмосферы на базе рекуррентных нейронных сетей LSTM с использованием программного комплекса Google TensorFlow. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных и промышленных условиях в России и Китае.

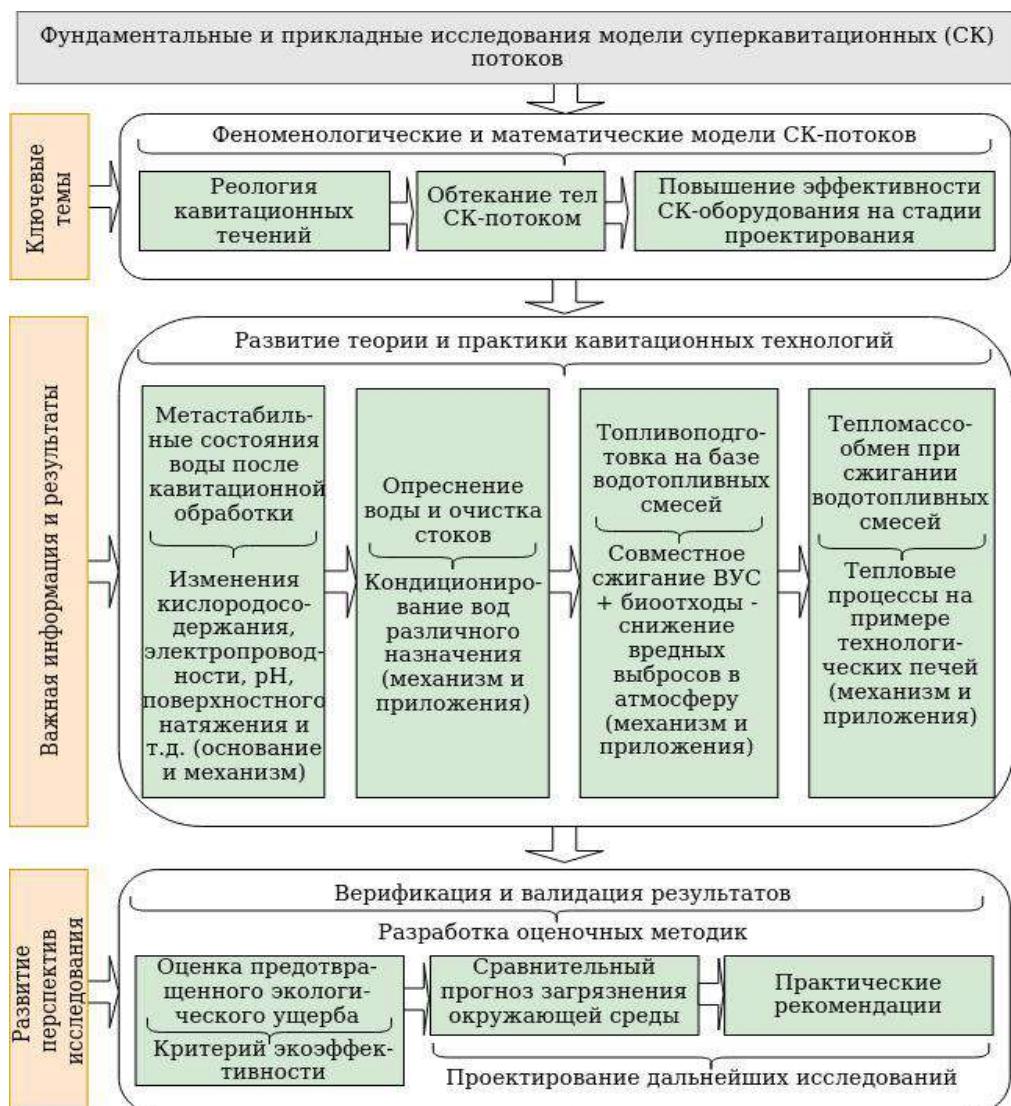


Рисунок 1 – Дорожная карта диссертации

Научная новизна полученных результатов заключается в комплексном подходе к формированию научно-технических основ повышения эффективности теплотехнологического оборудования, использующего эффекты кавитации:

1. Уточнена феноменологическая модель суперкавитирующих потоков, отличающаяся от известных, введением понятия микровихрей как квазичастиц жидкости, позволяющая учесть изменения в определении кавитационного сопротивления уже на стадии проектирования СК-установок с целью повышения их энергоэффективности на базе нового реологического уравнения и тем самым достичь увеличения точности определения конструктивных и технологических параметров оборудования примерно на 10 %; установлен механизм воздействия ансамбля кавитационных микропузырьков на обрабатываемые среды, заключающийся в синергетическом воздействии на дисперсионную среду (как правило это вода) и на дисперсную fazу (жидкую или твердую) вследствие интенсивного микроперемешивания или диспергирования в процессе взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях.
2. Предложен и научно обоснован метод проектирования технологических СК-установок на базе численного алгоритма решения задач о суперкавитационных течениях в проточной части данного оборудования с учетом методов интенсивного энергосбережения, способствующих защите окружающей среды.
3. Установлены термодинамические параметры, влияющие на процесс кавитации в наиболее распространенных случаях технологического применения.
4. Впервые предложена и обоснована кавитационная технология получения и сжигания БиоВУТ с использованием трехступенчатого процесса суперкавитации для смеси угля с добавлением отходов животноводческих ферм с целью улучшения параметров горения и снижения потерь теплоты.

Верификация и валидация технологии проведена на примере процессов тепло- и массообмена в технологических печах.

5. Создана комплексная методика определения эффективности и техносферной безопасности теплотехнологий, состоящая из метода расчета предотвращенного ущерба окружающей среде, критерия оценки экоэффективности и метода прогнозирования качества атмосферы с помощью рекуррентных нейронных сетей LSTM, отличающегося повышенной точностью и комплексно учитывающий сразу несколько видов метеоданных.

Значение для теории состоит в том, что полученные результаты вносят вклад в развитие методологии построения и численной реализации математических моделей для широкого круга быстропротекающих процессов, в частности в системах и установках, использующих эффекты суперкавитации, тем самым существенно расширяя возможности научного направления – кавитационной технологии в промышленной теплоэнергетике.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что создана методика проектирования СК-оборудования и средства ее реализации; определены области практического применения предлагаемого методологического подхода при выполнении прогнозов предполагаемых ущербов окружающей среде от эксплуатации теплотехнологического оборудования и определения экономической эффективности разрабатываемых проектов; создана система практических рекомендаций прогнозирования качества городского воздуха – модель LSTM может способствовать предотвращению ущерба от загрязнения для населения городов за счет принятия своевременных мер по защите атмосферы от вредных выбросов и контролю опасных загрязнителей; представлены методические рекомендации развития кавитационных технологий в промышленной теплоэнергетике

Положения, выносимые на защиту:

1. Кавитационные микропузырьки и микровихри, образующиеся в результате их коллапса, можно ассоциировать с частицами жидкости. Тогда феноменологическая модель кавитирующей жидкости представляет собой движение кавитационного микропузырька в пространстве, структурированном микротурбулентными вихрями, образованными в результате интерференции волн разрежения-сжатия, возникающих в результате пульсации кавитационных пузырьков в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях в процессе взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом.

2. Уравнение движения в напряжениях можно разложить на две составляющие, характеризующие движение сплошной среды в случае «симметричной» и «несимметричной» гидродинамики, когда в жидкости присутствуют непрерывно распределенные пары сил. При этом полученное новое реологическое уравнение описывает внутренний момент импульса элемента жидкости, появляющегося вследствие его деформации при движении. Решение для случая динамики сферического пузырька с учетом новой постановки задачи привело к более точному совпадению с результатами эксперимента с учетом методов интенсивного энергосбережения, способствующих защите окружающей среды.

3. Различные термодинамические параметры, способные влиять на динамику процесса кавитации, можно в наиболее распространенных случаях свести к двум независимым безразмерным параметрам, по меньшей мере один из которых включает отношение плотностей двух фаз в тепловых технологических системах и процессах.

4. Механизм воздействия ансамбля кавитационных микропузырьков на обрабатываемые жидкости, заключается в синергетическом воздействии на дисперсионную среду (как правило это вода) и на дисперсную фазу (жидкую или твердую) вследствие интенсивного микроперемешивания или

диспергирования в процессе взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом.

5. Создание методики определения эффективности и техносферной безопасности теплотехнологий, состоящей из метода расчета предотвращенного ущерба окружающей среде, критерия оценки экоэффективности и метода прогнозирования количественного состава вредных веществ в воздухе с помощью рекуррентных нейронных сетей LSTM, отличающегося повышенной точностью и комплексно учитывающий несколько видов метеоданных, позволяет своевременно разрабатывать мероприятия по снижению отрицательной экологической нагрузки на население мегаполисов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена применением основных постулатов теплофизики и сертифицированного оборудования с использованием калиброванных средств измерений, имеющих государственную поверку, воспроизводимостью результатов лабораторных исследований в различных условиях, степенью достоверности данных – 95 %. Верификация разработанного расчетного метода выполнялась с использованием современных программных комплексов. Разработанные автором компьютерные программы имеют государственную регистрацию.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника в части направлений исследования:

1. Термофизические свойства чистых веществ и их смесей, ..., в широкой области параметров состояния; связи между строением веществ и их феноменологическими свойствами; методы расчета термодинамических и переносных свойств в различных агрегатных состояниях;
3. Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; совместный перенос массы, импульса и энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси;

10. Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды.

Результаты использованы в ходе выполнения работ по гранту ККФПНиНТД – КФ-260 «Проект программы реконструкции и развития высоконапорной гидравлической лаборатории при плотине Красноярской ГЭС и формирования научного кластера «Чистая энергия Дивногорска» (2012); грантов РФФИ: № 18-41-242004 р_мк «Теоретические основы кондиционирования вод питьевого назначения на базе эффектов гидродинамической кавитации» (2018–2019); № 18-48-242001 р_мк «Теплофизические и гидродинамические особенности кинетики смесеобразования при иммобилизации радиоактивных отходов в цементную матрицу с использованием эффектов кавитации» (2018–2019); № 17-48-240386 р_a «Изучение кинетики смесеобразования и стабилизации высококонцентрированных водоугольных суспензий с применением метода квантовой полирезонансной активации (КПРА) на базе исследований двухфазных суперкавитационных течений» (2016–2018); № 16-41-242156 р_офи_м «Создание новых технологических комплексов на базе эффектов суперкавитации для использования в различных производственных процессах» (2016–2017) и выполнении шести х/д НИР. Разработанные алгоритмы и программы (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025666958, № 2024615022, № 2024611904, № 2023665492) прошли экспериментальную проверку и используются соответствующими специалистами: в процессе режимно-наладочных испытаний оборудования ЗАО «Красноярский завод минераловатных изделий «Минвата», ООО «КрасТЭК», АО «КрасЭко», ОАО «Дорожно-передвижная механизированная колонна Красноярская»; при расчетах статических и динамических режимов работы для трубчатых печей, установленных в технологической цепочке Ачинского НПЗ; при прогнозе неблагоприятных условий в атмосфере мегаполисов ГУ МЧС РФ по Красноярскому краю (свидетельство о государственной регистрации программы

для ЭВМ № 2023616496); созданные математические и физические модели многофазных течений прошли апробацию и приняты к использованию в ООО «КрасКом», АО «Красноярский институт «Водоканалпроект». В «ОНО Красноярский опытный завод ГОСНИТИ РАСХН» создана и внедрена промышленная установка обработки многокомпонентных сред (патент на изобретение РФ № 2356611). Используется также оборудование, построенное на базе патентов на полезную модель РФ № 205015, № 214710. Предложены новые конструкции и нанокомпозиции (евразийский патент на изобретение № 019884, патент на изобретение РФ № 2447036), применяемые в различных отраслях производства.

Научные результаты исследований использованы в учебном процессе обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Техносферная безопасность» при изучении дисциплин «Теоретические основы защиты окружающей среды», «Численные методы моделирования теплотехнологических процессов», «Тепломассообменное оборудование предприятий», «Информационные технологии в сфере безопасности», «Управление рисками, системный анализ и моделирование» в СФУ, а также в научно-исследовательской деятельности политехнического института СФУ. Полученные в диссертации результаты вошли в состав шести авторских учебных пособий.

Личный вклад автора состоит в постановке проблемы и задач исследования, разработке, обосновании и формулировке всех положений, определяющих научную новизну и практическую значимость, постановке экспериментов, анализе и обобщении результатов, формулировке выводов и рекомендаций для принятия решений. Общая научная идея, направления и задачи исследований были сформулированы при участии К.А. Штыма, за что автор приносит свою искреннюю признательность.

Апробация работы. Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований

докладывались и обсуждались: на VIII, IX и XVIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Решетнёвские чтения» (Красноярск, 2004, 2005, 2014), International SYMKOM'05 и International SYMKOM'08 (Poland, Lodz, 2005, 2008), Всерос. НТК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения» (Красноярск, 2003–2005), V–VIII Всерос. НПК и выставках по проблемам энергоэффективности (Красноярск, 2004–2007), III Науч. конф. с междунар. участием «Современные научноемкие технологии» (Египет, Хургада, 2005), Межрегион. НПК «Инновационное развитие регионов Сибири» (Красноярск, 2006), V и VI Школах-семинарах молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (Казань, 2006, 2007), III Междунар. летней научной школе «Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование» (Кемерово, 2006), VI Междунар. НПК «Экология и безопасность жизнедеятельности» (Пенза, 2007), Междунар. конгрессе «Энергетика в глобальном мире», НТК «Гидродинамика больших скоростей» (Красноярск, 2010), 10th European Fluid Mechanics Conference (EFMC10, Denmark, Lyngby, Copenhagen, 2014), World Congress and Expo on Oil, Gas and Petrochemistry (Dubai, UAE, 2015), VII Междунар. НПК «Экологические и экономические приоритеты альтернативной, малой распределенной энергетики» (Красноярск, 2020), 10th Computer Science On-line Conference Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems (Krasnoyarsk, 2021), 10th Computer Science On-line Conference CSOC-2021 (Zlin, 2021), EPS Web of Conferences WFSDI-2021 (2021), III International Scientific Conference «Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources» (St-Petersburg, 2021), Межрегион. конф. «ЖКХ. Энергетика. Экология» (Красноярск, 2021), III и IV Всерос. НТК с междунар. участием «Борисовские чтения» (Красноярск, 2021, 2023), XVIII Междунар. молодежном научном экологическом форуме стран Балтийского региона «ЭКОБАЛТИКА» (Санкт-Петербург, 2021), XIII Сибирском энергетическом форуме (Красноярск, 2022), I Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Енисейская ТеплоФизика» (Красноярск, 2023), Междунар. науч. конф. «Безопасность

жизнедеятельности и климатические риски развития территории Енисейской Сибири» (Красноярск, 2023), VIII Всерос. конф. с междунар. участием «Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем» (Красноярск, 2023), Китайско-российском форуме по фундаментальному исследованию и применению гидравлической кавитации на основе технологий AI (Харбин, Китай, 2023), Третьем Китайско-Российском научно-техническом форуме «Наукоёмкие технологии: от науки к внедрению» (Харбин, Китай, 2023), Междунар. НПК «Современные географические исследования: теория практика, инновации» (Самарканд, Узбекистан, 2023), XV–XXI Междунар. науч. конф. студ., аспир. и молодых ученых «Проспект Свободный» (Красноярск, 2019–2025), IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024), 24-я и 25-я Междунар. науч. конф. «Сахаровские чтения: экологические проблемы XXI-го века» (Минск, Беларусь, 2024, 2025), Китайско-восточноевропейской конференции по обмену экспертами (Харбин, Китай, 2024), VI Всерос. НПК Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций (Железногорск, 2024), Междунар. научно-техническом симпозиуме «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны (Москва, 2024), Conference on thermal Science and Engineering 2024 (Ulan-Bator, Mongolia, 2024), XV Междунар. научной конференции «Технические и технологические системы» (Краснодар, 2024), Всерос. форуме «Енисейская Теплофизика 2025» (Красноярск, 2025), Xalqaro ilmiy-texnik konferensiya Arxitektura, muhandislik, ta'lim va atrof-muhitni muhofaza qilish sohasidagi innovatsion texnologiyalar TAQU-2025 (O'zbekiston, Toshkent, 2025).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 94 печатных работы, из них: четыре монографии, 11 статей в изданиях из Белого списка, 12 – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus, Web of Science, GeoRef, Web of Science: RSCI; 6 патентов РФ на изобретения и полезные модели, один евразийский патент на изобретение, пять свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ; 17 статей в других изданиях

и за рубежом; 32 работы опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов, а также 6 учебных пособий, два из которых с грифом Минобрнауки РФ.

1 СИНТЕЗ-АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ И ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕПЛОТУ СИСТЕМАХ И УСТАНОВКАХ

На современном этапе развития науки и техники особое значение приобрела комплексная проблема энергоресурсосбережения и, связанная с ней, не менее важная проблема экологической безопасности. Решению этих проблем посвящают свои исследования ученые всех промышленно развитых стран. Интенсификация производства с учетом этих проблем может быть осуществлена за счет использования кавитационной технологии, в которой реализуется синергия высокоэнергетических полей температур и давлений.

С явлением кавитации в инженерной практике сталкиваются с конца XIX века и в течение длительного времени кавитация рассматривалась как исключительно вредное явление, и разрабатывались различные меры по ее удалению и устраниению. Хотя эта задача остается в некоторых случаях актуальной и сейчас, начиная с сороковых годов истекшего столетия, предпринимаются попытки использования кавитации для достижения положительных эффектов. Первые предложения по использованию кавитации для улучшения КПД винтов скоростных судов принадлежат академику В.Л. Поздюнину, важные результаты по снижению сопротивления тел, движущихся на больших скоростях, за счет применения искусственной кавитации достигнуты академиком Г.В. Логвиновичем и его коллегами, а также А.Н. Ивановым и специалистами его школы. Однако все это работы направлены на улучшение суммарных гидродинамических характеристик.

В работах В.М. Ивченко (1975 г.) впервые показана целесообразность использования кавитационных эффектов во многих областях производства, имеющих перспективу для усовершенствования и интенсификации технологических процессов в различных отраслях производства. Однако знания об изменении физических свойств воды (реологических, структурных,

электромагнитных и др.) и влиянии их на макроуровне на ход и результат технологических процессов на современном этапе носят недостаточный характер.

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 Советском Союзе, а затем в России заложены, обобщены и развиты в работах В.М. Ивченко, В.А. Кулагина, А.Ф. Немчина и др. [1–6], а затем и их учениками [7–18].

1.1 Использование эффектов кавитации в различных теплотехнологических системах и процессах

1.1.1 Физико-химические процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии в водных системах, вызванных гидродинамической кавитацией

Значение чистой воды для человека трудно переоценить. От ее недостатка страдают населения целых стран, в особенности в экваториальной области планеты [19]. К недостаткам оборота пригодной для питья чистой воды следует отнести сбросы промышленных стоков в естественные водоемы, снижение качества очистки стоков и многое другое. Поэтому так быстро развиваются технологии добычи пресной воды [21]. Чтобы получить пресную питьевую воду, нужно довести содержание в ней солей до одного грамма на литр. Как правило, опреснение осуществляется одним из следующих способов: дистилляцией, обратным осмосом, электродиализом, вымораживанием и ионным обменом.

Альтернативой ионообменному и мембранным методам выступает термическое обессоливание воды – испарение кипящей жидкости с последующим охлаждением и конденсацией паров. Отдельно стоят

разрабатываемые в настоящее время кавитационные технологии [20, 22–24], которые отличаются легкой реализуемостью и энергоэффективностью. Эффектам кавитационных технологий в различных производственных процессах, а также их влияние на изменение физико-химических свойств обрабатываемых жидкостей и смесей посвящен ряд исследований [1, 25–29 и др.].

Воды морей и океанов являются огромным ресурсом получения пресной воды. Учитывая универсальность кавитации и уникальное применение эффекта суперкавитации (СК) во многих важных ситуациях. В исследованиях кавитации и СК был достигнут значительный прогресс. Однако до сих пор исследования кавитации и СК в основном используют лабораторное качество воды, а понимание характеристик качества морской воды и ее эволюции является относительно предварительным, что не может удовлетворить потребности исследований механизма СК морской воды, опреснения и т.д. Статус исследований во всем мире анализируется в трех аспектах, непосредственно связанных с проблемой получения воды питьевого качества: характеристики морской воды и параметры кавитации, модель многофазной турбулентности кавитационных микропузьрьков, а также механизм и технология СК-опреснения морской воды.

Существующее описание турбулентного СК-потока обычно основано на модели однородного потока, а для описания кавитационного турбулентного потока используется усредненная по времени модель Рейнольдса или модель больших вихрей, аналогичная однофазному потоку или ее улучшенной форме. Однако эти модели не учитывают механизм взаимодействия между кавитационными пузырьками и турбулентностью, а в кавитационном потоке часто происходят сложные процессы, такие как образование, дробление и коллапс кавитационных пузырьков, которые вносят важный вклад в возникновение/рассеивание турбулентности. Поэтому построение математической модели, способной точно описать кавитационный многофазный

поток морской воды, является ключевой научной задачей повышения точности численного прогнозирования кавитационного течения.

Другая научная проблема заключается в установлении механизма влияния газосодержания (пара) на гидродинамические характеристики естественной суперкавитации. Не конденсирующийся газ в морской воде и структура паровой фазы, отделившаяся от хвоста пузырьков естественной кавитации, окажут влияние на гидродинамические характеристики СК-реакторов, а затем повлияют на эффективность охлаждения. Специально для ротационного СК-реактора (RSCE) [20], когда кавитатор вращается с высокой скоростью в закрытой рабочей зоне с образованием естественного СК-потока, образуется и распространяется большое количество пузырьков. Следовательно, необходимо уточнить процесс и механизм формирования высоко паровой среды в RSCE. Поэтому актуальным является систематическое изучение влияния газопаросодержания на гидродинамические характеристики природных СК-течений, выявление механизма формирования вращающихся каверн с высоким паросодержанием в закрытой зоне, чтобы освоить метод контроля содержания газа (пара) и управлять производственным процессом СК-охлаждения морской воды.

Надо отметить, что подобные исследования за рубежом развиваются довольно интенсивно. Отличие наших исследований заключается в использовании модельной установки, которая полностью воспроизводит всю геометрию проточного тракта реального СК-реактора как проточного, так и ротационного типов.

1.1.1.1 Характеристики качества морской воды и его влияние на динамику кавитации

Морская вода представляет собой комплексный солевой раствор со сложными компонентами, а также содержит растворенные газы, такие как кислород, углекислый газ и азот, а также твердые частицы, такие как жир, микроорганизмы, продукты их метаболизма и многое другое. Ее

теплофизические свойства сильно отличаются от качества чистой воды и лабораторной воды, что неизбежно влияет на процесс кавитации и динамику кавитации [1].

Поскольку ядра пара жидкой фазы изменяются, твердые частицы и микропузырьки в морской воде значительно снижают предел прочности морской воды, а ее уровень растяжения намного меньше, чем прогнозируемое значение чистой воды. Путем теоретических исследований Стум Л.А. установил теоретические соотношения о пороге акустической кавитации равновесного давления, поверхностного натяжения и температуры, которые хорошо согласовались с экспериментальными результатами [30]. Исследования кавитации на подводных крыльях показывают, что при испытании на воде с высокой прочностью на растяжение, явление кавитации не наблюдается, а кавитация концевой части лопасти или задней части крыла возникает при нулевой прочности на растяжение, а при отрицательной прочности на разрыв – вихревая кавитация уже полностью развилаась [31]. В соответствии с характеристиками качества воды в различных экспериментах Мørch К.А. обсудил влияние кавитационного парового ядра на свободный поток, поверхность или стенку микрочастиц и объяснил его влияние на прочность на разрыв [32]. В то же время была создана модель кавитационного парового ядра, объясняющая значительное изменение прочности воды на разрыв [33]. В частности, Marschall Н.В. экспериментально исследовал инициирование кавитации, вызванное микрочастицами в воде, и обнаружил, что для микрочастиц диаметром в несколько микрон ее смачиваемость мало влияет на предел прочности воды, тогда как для микрочастиц диаметром нескольких десятков микрон, прочность на разрыв снижалась в той же степени, что и у не дегазированной воды [34]. Приведенные выше выводы показывают, что кавитационное паровое ядро связано со структурой поверхности [35], а паровое ядро глубоко связано с прочностью на разрыв и кавитационной морфологией воды.

С другой стороны, микропузырьки считаются важнейшим источником ядер микропаров в природной воде, а характеристики спектра ядер пара (размер и количество) являются решающими факторами для начальной формы и условий кавитации. В спектре ядер в основном преобладает содержание воздуха в воде, включая растворенный и нерастворенный или свободный воздух. Влияние характеристик ядер пара привело к различиям во многих кавитационных экспериментах 1980-х годов [36]. Очевидно, что важное влияние на характеристики ядер пара лежит в динамике пузырьков. Например, микропузырьки оказывают сильное нелинейное воздействие на исходные пузырьки в окружающей жидкости, а процесс их роста определяется эволюцией поля давления. Помимо микропузырьков возникновение кавитации и динамика пузырьков могут быть связаны и с другими источниками ядер пара, такими как асферическая геометрия (захваченный газ), поверхностно-активные вещества, транспорт пара (газа) и т.д., которые тесно связаны с составом и движением паровых пузырьков в морской воде – Jenkinson I.R. [37]. В настоящее время понимание связи спектра ядер пара с возникновением кавитации и динамикой пузырьков еще недостаточно глубоко. Gindroz B. и Billet M.L. протестировали кавитационные характеристики трех винтов с разным количеством паровых ядер в большом водном туннеле GTH. Результаты показывают, что распределение ядер пара оказывает непосредственное влияние на возникновение и устранение кавитации рабочего колеса, а начальное число кавитации уменьшается с увеличением прочности на разрыв. При пузырьковой кавитации коэффициент первичной кавитации может быть снижен на 76 % [38]. При кавитации важное влияние на возникновение и макроскопический ее вид оказывают пограничный слой, взаимодействие ядер пара с жидкостью, масштабный эффект наблюдаемых пузырьков и взаимодействие соседних ядер пара. Liu Z. и Brennen C.E. провели модельный анализ частоты возникновения кавитации и количества поступающих ядер пара и результаты показывают, что величину возникновения кавитации можно правильно предсказать [39]. Рассел и др. изучил характеристики ядер пара с помощью эксперимента с генератором

пузырьков в водном туннеле и измерил диаметр и распределение ядер пара методом рассеяния. Результаты экспериментов показывают, что диаметр распределения искусственных ядер пара составляет 10–200 мкм, а концентрация – 0–60/мл. В то же время обнаружено, что распределение ядер пара демонстрирует степенную характеристику изменения при испытаниях в водном туннеле с различными скоростями потока [40]. Ядра пара с указанным диаметром укладываются в модель нуклеации, однако следует отметить, что ядра пара диаметром 0,5–5 мкм также часто встречаются в природных водоемах [41], а также наноразмерные пузыри, которые сложно удалить, также значительно снижают прочность воды на разрыв и эффективно способствуют процессу кавитации [42, 43]. Эти пузырьки представляют собой в основном нерастворимые газы. Alamé K. и Mahesh K. отметили, что газ выполняет функцию стабилизации ядер пара (которая отличается от характеристик системы жидкость-пар), уменьшая энергетический барьер зародившихся пузырьков пара, а при особых обстоятельствах он может полностью устраниить энергетический барьер [44]. В присутствии газа они описали процесс перехода от гомогенной нуклеации к гетерогенной на основе метода свободной энергии Гиббса. Приведенный выше анализ хорошо согласуется с экспериментальными результатами Khoo M.T. [41].

В настоящее время исследования влияния качества морской воды на кавитационные течения и турбулентность весьма ограничены. Jenkinson I.R. изучал теплофизические и реологические свойства морской воды и сравнил влияние качества морской воды на временной и пространственный масштаб турбулентности [37]. На 37 пробах морской воды из разных морских районов исследованы вязкость и упругость воды под действием сдвигового течения океана. Динамическая вязкость морской воды была примерно на 10 % выше, чем у пресной воды, а число Рейнольдса потока (Re) соответствующего испытания уменьшилось примерно на 8 %. При этом указывается, что изменение поверхностного натяжения приведет к изменению критических ядер пара, но макроскопическое явление кавитации не должно измениться. На

основании стандартного эксперимента с телом ITTC Ceccio S. et al. изучили возникновение кавитации, кавитационные характеристики и различия акустического излучения пресной и морской воды и предварительно получили закон развития кавитации [45]. Указывается, что разница обусловлена количеством поступающих паровых ядер, и делается вывод, что раствор соли уменьшает количество и диаметр паровых ядер. В то же время растворимость морской воды в воздухе примерно на 27 % ниже, чем у пресной воды, а коэффициент возникновения кавитации в морской воде примерно в 0,85–0,89 раза выше, чем в пресной воде. Kamiirisai H. изучал влияние морской воды на кавитационный шум в эксперименте с водометом. Контролируя содержание газа и распределение ядер пара, можно получить спектр кавитационного шума в морской воде и результаты показывают, что низкочастотный шум в морской воде выше, чем в пресной воде, а высокочастотный шум – наоборот [46]. В области исследований морской воды команда Li F-C также добилась важных успехов в исследованиях характеристик качества морской воды, турбулентности, вызванной пузырьками, и технологии использования СК морской воды. Всесторонне изучены характеристики качества морской воды под влиянием поверхностно-активных веществ, получены теплофизические свойства, реологические и межфазные свойства [47, 48]. Результаты показывают, что морская вода оказывает важное влияние на кавитацию.

1.1.1.2 Термодинамические процессы и циклы применительно к установкам опреснения морской воды

Со вступлением в XXI век опреснение морской воды признано всеми странами мира как наиболее экономичный и осуществимый способ получения пресной воды [49–64]. В настоящее время в промышленности широко используются три технологии опреснения морской воды: многоступенчатая фланш-дистилляция (MSF), многокорпусная дистилляция (MED) и обратный осмос (RO). Поскольку поверхности теплообмена в MSF и MED представляют собой сплошные стенки, существуют некоторые недостатки, такие как

образование накипи и загрязнений, что приводит к снижению плотности энергии, в то время как RO ограничивается загрязнением мембранны и низкой степенью рекуперации. Сырая вода требует строгой предварительной обработки. Для преодоления указанных недостатков предложена новая технология СК-опреснения морской воды на основе гидравлической кавитации. В настоящее время большая часть исследований по применению гидродинамической кавитации при опреснении морской воды сосредоточена преимущественно в России. В 1984 году Machinski A.S. [65] внедрил статический конический СК-испаритель в систему опреснения морской воды и получил пресную воду, подключив вакуумную систему. Система включает в себя множество каскадно расположенных конических СК-испарителей, при этом пар отбирается из образующихся на каждой СК-ступени. Однако применение системы ограничивают следующие проблемы: в системе необходимо постоянно циркулировать большое количество сырой воды, для изготовления системы необходимо большое количество металлических материалов, соотношение объемов образующийся к общему объему оборотной воды очень мало. В Российском научно-технологическом центре ТЬЕРОС-МИФИ разработана установка «ВОДОПАД-1200» [66] – коммерческое кавитационное устройство для опреснения морской воды производительностью 1200 м³/сут. После того, как перегретая вода после электромагнитной обработки протекает через специально сконструированное неподвижное препятствие, за ним образуется СК-поток, а отбираемый из него пар конденсируется с получением пресной воды. Это устройство можно использовать для опреснения морской воды и очистки сточных вод. Для сырой воды с TDS 65 000 мг/л степень удаления загрязняющих веществ составляет более 99 %.

Кроме того, Langenecker B. и Zeilinger C.E. [67–69] разработали гидравлическую кавитационную систему для опреснения морской воды. В отличие от упомянутой выше экстракции пара из образовавшегося СК-потока, он использует синонимической эффект, вызванный коллапсом кавитационных пузырьков, для разрушения механических связей NaCl и других солей, а также

образования новых нерастворимых веществ с добавлением в сырую воду поверхностно-активных частиц. Наконец, опреснение морской воды может быть реализовано путем удаления этих частиц посредством простой фильтрации. Энергопотребление прототипной системы составляет 1,1 кВтч/м³ [67, 68], а сырая вода с общим содержанием растворенных твердых веществ (TDS) 1400 мг/л может быть опреснена с TDS 400 мг/л [69]. Помимо гидравлической кавитации, акустическая кавитация также может применяться для опреснения морской воды в виде ультразвукового распыления [70, 71].

В последние годы китайская группа Likhachev D.S., Li F-C. и др. выдвинула концепцию вращающегося суперкавитационного испарителя (RSCE) [72] и провела проектирование и исследования [73–79]. Основная работа включает в себя трехмерное проектирование профиля лопасти RSCE, построение экспериментальной системы, экспериментальные измерения и анализ, а также соответствующее трехмерное численное моделирование. Получены временные и пространственные характеристики эволюции вращающегося естественного кавитационного течения, выявлено взаимодействие кавитации и вихревой структуры, обобщена эмпирическая связь между длиной вращающегося естественного кавитатора и числом кавитации. Получены предварительные результаты исследований влияния отбора пара и температуры на гидродинамические характеристики вращающейся естественной кавитации. Российская группа этого проекта выдвинула концепцию прямоточного естественного СК-испарителя [80–84], провела серию экспериментов и исследований по численному моделированию, а также получила предварительные результаты исследования структуры кавитационного течения, генерируемого после конического кавитатора. Получены динамические характеристики кавитатора, влияние температуры и скорости потока воды на масштаб СК, эффективность опреснения морской воды и т.д.

Из статуса исследований во всем мире, как упомянуто в трех вышеупомянутых аспектах, можно видеть, что процесс суперкавитации представляет собой сложное явление, и начальная кавитация отклоняется от идеального начального числа кавитации из-за реального воздействия жидкости. Начальная кавитация жидкости связана не только с качеством воды (спектр ядер пара или прочность на растяжение), но также с теплофизикой (вязкость, теплопроводность) и условиями испытаний (размер модели, скорость входящего потока, степень турбулентности) воды. На протяжении всего процесса от зарождения кавитации, ее развития до формирования СК остается еще много пробелов, которые необходимо заполнить в исследованиях влияния морской водной среды и оценке ее влияния. В принципиальном аспекте необходимо выяснить влияние реального воздействия жидкости на динамику кавитации. Для дальнейшего изучения механизма кавитации морской воды необходимо установить единое описание характеристик морской воды и модели кавитации в методах исследования. Модель кавитационной турбулентности очень важна для точного прогнозирования кавитационного течения. Существующее описание турбулентного СК-потока обычно основано на концепции однородного потока, а для описания кавитационной турбулентности используется RANS или LES, аналогичный однофазному потоку или его улучшенная форма. Однако эти модели не учитывают механизм взаимодействия между кавитационными пузырьками и турбулентностью, а в кавитационном потоке часто происходят сложные процессы, такие как образование, дробление и коллапс кавитационных пузырьков, которые вносят важный вклад в возникновение/рассеивание турбулентности. Кроме того, многомасштабная модель кавитационной турбулентности может быть более точной, но она все еще находится на ранней стадии разработки. Поэтому крайне важно провести углубленное исследование характеристик и моделей меж масштабной многофазной турбулентности кавитации, а также обеспечить точную модельную поддержку для исследований и инженерных приложений кавитации в морской воде. Используя эффект суперкавитации, можно разработать новые

технологии опреснения морской воды, такие как концепция RSCE и концепция прямоточного СК-испарителя, предложенные китайскими и российскими учеными. Исследования этих новых технологий все еще находятся на ранней стадии. Несмотря на то, что был достигнут ряд результатов исследований, все еще остается много неясных аспектов влияния различных структурных параметров, параметров потока и параметров экстракции на производительность СК-испарителя. На основе разработки усовершенствованного метода исследования кавитации морской воды и явления суперкавитации необходимо срочно провести углубленное исследование новой технологии опреснения морской воды с использованием эффекта суперкавитации, выявить влияние и механизм естественных гидродинамических характеристик суперкавитации на эффективность опреснения морской воды, получить сочетание структурных параметров устройства и условий эксплуатации с отличными характеристиками опреснения морской воды, а также создать надежную и эффективную технологию СК-опреснения морской воды.

Подводя итог, в этой работе и на перспективу предлагается изучить механизм влияния реальных характеристик качества морской воды на динамические характеристики кавитаторов, разработать кавитационную модель качества морской воды и многомасштабную модель турбулентности, вызванной кавитационными пузырьками, выявить многофазные турбулентные характеристики и гидродинамические характеристики кавитационных аппаратов, и разработать технологию повышения эффективности СК-опреснения морской воды, которая имеет важное академическое значение и ценность практического применения

1.1.1.3 Кондиционирование вод питьевого назначения и стоков

Очистка сточных вод от фенола с помощью технологии гидравлической кавитации рассматривается в работе [85]. В качестве кавитационного устройства использовалась комбинация трубы Вентури и различных диафрагм.

Было изучено влияние времени работы, давления на входе, расположения отверстий и числа кавитации на скорость разложения фенола. В статье [86] представлены результаты исследований по химической очистке стоков от производства битумов нефтяного происхождения. Было изучено несколько процессов усовершенствованного окисления, включая использование гидроксильных и сульфатных радикалов-окислителей, гидродинамическую и ультразвуковую кавитацию. Результаты показали эффективное разложение большинства летучих органических соединений, присутствующих в сточных водах, при использовании этих технологий.

На основе лабораторных исследований и пилотных экспериментов в статье [87] была разработана промышленная система очистки воды, сочетающая озонирование с гидродинамической кавитацией для удаления водорослей, которая может применяться для уменьшения экологического ущерба и экономических потерь, которые могут быть вызваны цветением водорослей и мертвыми водорослями. Описание процесса гидродинамической кавитации, используемого для улучшения флотации минералов и обеззараживания воды, приводится в работе [88], где в качестве гидродинамического кавитационного устройства использовалась трубка Вентури. В работе [89] рассмотрена эффективность системы очистки балластных вод на основе усовершенствованных окислительных процессов сильного разряда электрического поля при атмосферном давлении и технология гидродинамической кавитации. Оценка эффективности озонирования и гидродинамической кавитации при очистке сточных вод является целью исследования в работе [90]. Очистке стоков промышленных производств химической, нефтегазовой, металлургической, радиотехнической и др. отраслях промышленности посвящены работы [15, 16, 91–102].

Обессоливание промышленных стоков и опреснение морских вод рассматривается как один из наиболее перспективных путей решения проблем водообеспечения. В этом направлении перспективно использование режимов

развитой кавитации, поскольку особенности конструктивного исполнения и принципа действия термокавитационных аппаратов обуславливают некоторые преимущества этого способа обессоливания по сравнению с известными [10, 18, 103–110]. Следовательно, проведение исследований по созданию новых суперкавитационных аппаратов с целью интенсификации процессов обессоливания жидкостей является частью общей актуальной задачи водообеспечения промышленности и создания замкнутых систем водоснабжения [111]. За последние годы появился ряд публикаций технологических решений, направленных на экономию затрат на ресурсы, повышение производительности и увеличение срока службы оросительных установок, экологичность их работы.

Ротационный суперкавитационный испаритель был предложен как новая технология для орошения морской воды [112, 113]. На базе численного моделирования суперкавитационных потоков в испарителе проводится анализ эффективности работы СК-аппарата при различных температурах и скоростях вращения. Исследование влияния на пространственно-временную эволюцию вращательной естественной кавитации, гидродинамические характеристики кавитирующих потоков в ротационном испарителе при различных скоростях вращения с помощью экспериментов по визуализации и трехмерного стационарного численного моделирования было продолжено в работе [114]. Метод орошения морской воды на основе суперкавитации предлагается в работе [115]. Проводится изучение влияния отбора пара на гидродинамические характеристики и производительность орошения, а также определение диапазонов и давления экстракции, подходящих для работы испарителя на основе трехмерного численного моделирования суперкавитационных потоков при различных скоростях вращения и давлениях экстракции [116].

1.1.2 Топливоподготовка и особенности сжигания водотопливных смесей в теплотехнических системах и установках

Производство биодизеля из микроводорослей является одним из решений энергетической проблемы будущего [117]. Одним из механических методов разрушения клеток с наименьшими затратами энергии является гидродинамическая кавитация. В данной работе сравнивается эффективность липидной экстракции микроводорослей с помощью гидродинамической кавитации и обычной экстракцией. Результаты показали значительное преимущество гидродинамической кавитационной технологии по сравнению с традиционной.

Комплексное воздействие на гомогенные и гетерогенные жидкости, которые могут быть использованы в технологических целях, привлекли внимание исследователей в различных науках. Кавитационное воздействие на нефть является одним из эффективных методов интенсифицирующие химико-технологические, гидромеханические и массообменные процессы и разрушения веществ. В работе [118] подробно рассматриваются и анализируются механизмы воздействия и применения кавитации в различных процессах в нефтяной промышленности, в том числе процессы нефтепереработки, которые связаны с сырой нефтью и нефтяными отходами, такие как снижение вязкости, деэмульгирование, десульфурация и улучшение качества тяжелой нефти и продукты нефтепереработки, в том числе нефтешламы и отработанные маслосодержащие воды. Различным аспектам, связанным с нефтепереработкой и сжиганием смесей, содержащих нефтепродукты посвящены работы [119–123].

В качестве сырья для теплоэнергетики широко используется уголь. Ряд недостатков угля, таких как воспламеняемость, не могут быть легко устранены. Использование водоугольного топлива (ВУТ) на водошламовой основе вместо угля устраняет эту проблему [124]. ВУТ является жидким топливом, 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. заявление. В работе [124] показано, что конечные эксплуатационные свойства угольного суспензионного топлива могут быть определены на стадии его приготовления путем гидродинамической обработки водно-угольного шлама. Исследованы реологические и седиментационные свойства и параметры горения водоугольного топлива, время воспламенения капли, полнота ее сгорания, количество техногенных выбросов. Исследования проводились на углях Канско-Ачинского угольного бассейна (Россия). Исследования проводились в лабораторных условиях с гидродинамической роторной мешалкой, позволяющей добиться кавитационных эффектов в обрабатываемой среде. Рассмотрены два типа ВУТ: первый изготавливается путем кавитационного диспергирования твердой угольной фракции в дистиллированной воде, а второй – по аналогии, но в качестве дисперсионной среды использовалась вода, предварительно обработанная кавитацией. В работе показано, что кавитационный способ получения ВУТ улучшает реологические и седиментационные свойства целевого топлива, снижает вредные выбросы при горении, влияет на параметры горения.

Кавитационные технологии получения водотопливных смесей позволяют получить топливо с экологически менее опасными свойствами при сжигании за счет снижения вредных выбросов по сравнению со сжиганием чистого угля. Получены экспериментальные результаты по зависимости параметров гидродинамического воздействия от основных эксплуатационных характеристик угольных шламов [125]: во-первых, показано, что кавитационная обработка увеличивает дисперсность твердой угольной фракции в ВУТ, изменяя преобладающую категорию крупности со 180–0, 100 мкм до 50–0,0 мкм. Предварительная кавитационная обработка воды не влияет на доизмельчение угольных частиц; во-вторых, динамическая вязкость ВУТ2, приготовленного на кавитационно-активированной воде, меньше, чем у ВУТ1, приготовленного на дистиллированной воде, а предел текучести τ_0 ВУТ2 в 2,5 раза меньше, чем у ВУТ1; в-третьих, коагуляционная способность образца дисперской фазы ВУТ2

к пред активированной дисперсионной среде ниже (объем осадка меньше), а увеличение количества связанной воды вокруг первичных адсорбционных (гидрофильных) центров на поверхности угольной частицы в ВУТ2 способствует увеличение коагуляционных структур; в-четвертых, кавитационная обработка всей суспензии или отдельно дисперсионной среды водоугольного топлива позволяет снизить оксид азота при сжигании на 38 %; в-пятых, кавитационная обработка изменяет электронную структуру дисперсионной фазы ВУТ, а поверхность угля дополнительно окисляется, что способствует повышению стабильности ВУТ. Таким образом, гидродинамическая обработка является эффективным методом управления эксплуатационными свойствами ВУТ.

Целый ряд работ научной школы кавитационной технологии СФУ представлен в области топливоподготовки в виде водотопливных смесей с изучением различных аспектов этой проблемы [11–14, 123–135]. На энергетических предприятиях создание высокодисперсных водомазутных эмульсий на основе кавитационной обработки является весьма перспективным [136, 137]. В данных работах рассмотрены конструкции оборудования для кавитационной обработки вязких жидкостей на стадии хранения и подготовки к сжиганию на котельных и ТЭЦ. Предпочтение отдается аппаратам статического типа, отличающимся высокой производительностью, надежностью и низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

В работе [138] исследовано влияние предварительного окисления вакуумного остатка для снижения содержания серы в коксе с помощью технологии гидродинамической кавитации. Среди новых угольных технологий, большой интерес представляет сжигание низкосортного угля в виде водоугольного шламового топлива. В статье [139] представлены результаты влияния предварительной кавитационной обработки воды в составе водоугольного топлива на динамику сгорания топлива и на его экологические характеристики. В режиме суперкавитации использовался гидродинамический

осциллятор роторного типа. Показано, что технология кавитационной обработки воды приводит к изменению динамики горения водоугольного топлива и дополнительному снижению содержания NO_x и CO_2 . В статье [137] также рассматривается кавитационная обработка водоугольных шламов, увеличивающая степень дисперсности угля, следовательно, и его более эффективное сжигание.

Представленные результаты разработки конструкций теплогенераторов малой и средней мощности [140] указывают 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).

Всё чаще в последнее время встречается информация об использовании экологически чистого биотоплива [141–145]. Повышение эффективности его применения является актуальной задачей. В работе [141] авторы предлагают использовать в качестве предварительной обработки кавитационные процессы при производстве биотоплива. Изначально измельчаются сущеные 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.

В [144] представлены результаты разработки технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики. Лабораторные исследования, испытания в опытно-промышленных условиях показали возможность получения такого топлива с требуемыми структурно-реологическими и теплотехническими характеристиками. Разработана пластифицирующая добавка, позволяющая достичь значений вязкости менее 500 мПа·с при содержании твердой фазы 53 % и низкой теплоте сгорания не менее 10,5 МДж/кг (2500 ккал/кг).

Наиболее доступны на данный момент угли Кавакского буроугольного бассейна. Сложные горно-геологические условия залегания угля и его добычи не позволяют использовать общепринятые схемы транспортировки. Решением вопроса может стать применение трубопроводного гидравлического транспорта угля к потребителям в виде водоугольных суспензий [128]. Ранее проведены исследования реологических характеристик и стабильности водоугольных суспензий на основе бурого угля месторождения Агулак этого же бассейна. Была показана возможность получения высококонцентрированных водоугольных топливных суспензий, пригодных для гидротранспортирования и последующего прямого сжигания. В настоящее время наиболее подготовлено к освоению Кара-Кеченское буроугольное месторождение, которое считается крупнейшим в стране: его запасы составляют 312,6 млн т (23,3 % запасов Киргизии). Добыча угля осуществляется открытым способом. Угли месторождения Кара-Кече имеют достаточно высокую низкую теплоту сгорания, малосернистые, с низкими значениями зольности и влажности [128].

Как отмечается в работе [145] в последние десятилетия мировая зависимость от ископаемого топлива стала критической из-за нескольких факторов: непрерывного роста населения, урбанизации, истощения запасов нефти, непрерывного роста цен на нефтепродукты, глобального потепления. Отрасли промышленности, зависящие от невозобновляемого топлива (уголь, природный газ), вызвали резкое увеличение выбросов парниковых газов, что

привело к высокому уровню загрязнения окружающей среды [146, 147]. Возобновляемые источники являются самыми быстрорастущими источниками мировой энергии, потребление увеличивается на 3 % в год. Известно, что состав и количество отходящих газов напрямую зависит от вида сжигаемого топлива. Сжигание природного газа ведёт к эмиссии в атмосферу NOx и CO₂. Использование органического топлива (в первую очередь мазута) является причиной выбросов NOx, SO₂, золы, соединений ванадия, солей натрия и др. Твердое топливо, помимо вышеупомянутых компонентов, способствует накоплению золовых частиц, сажи, несгоревших минеральных частиц, золошлаковых отходов [148].

Кризисное состояние энергетического и промышленного секторов стимулировало рост использования возобновляемых источников энергии, таких как, солнечная, ветровая и геотермальная энергия, биомасса и сельскохозяйственные отходы. Эти источники доступны везде и хорошо известны как альтернативные источники, эта чистая и неисчерпаемая энергия может уменьшить загрязнение окружающей среды; тем не менее, ее полный потенциал еще не реализован из-за проблем, связанных с обращением, транспортировкой, хранением и сжиганием сырья [147, 149]. Вероятно, энергетические системы в будущем будут базироваться на интеграции как традиционных, так и нетрадиционных источников тепловой и электрической энергии, систем ее транспортировки, накопления и распределения. Экологические требования современности создают предпосылки для разработки новых эколого-эффективных альтернативных видов топлива, а также математических и вычислительных систем для моделирования процессов горения композиционных смесей с учетом разности состава конечных продуктов [150].

Особенности резко континентального климата большей части территории РФ обуславливают значительную составляющую систем теплоснабжения в суммарном потреблении топливно-энергетических ресурсов (около 400 млн. т/год, 45 % от общего расхода). Вследствие этого достижение реальных

показателей энергоэффективности в целом по стране невозможно без повышения эффективности одной из наиболее энергозатратных отраслей народного хозяйства – теплоснабжения [147]. В сфере теплоснабжения присутствует сегмент, который зачастую недооценивается – автономные источники тепла (АИТ) мощностью до 1 МВт, к ним можно отнести котлы в домах частного сектора и на объектах малого и среднего бизнеса. В 2022 году Правительство РФ выделило 12,9 млрд. рублей на перевод частных домов в Омске, Красноярске, Новокузнецке и Чите с угля на альтернативное топливо [151], это дает предпосылки для развития предлагаемой технологии.

Одним из направлений повышения эффективности в энергетике является комплексное использование сырья, создание замкнутых газо- и водооборотных систем; разработка принципиально новых и совершенствование действующих процессов производства; переработка и использование энергетических отходов (теплота, зола, шлак, продукты очистки дымовых газов и т.п.). В настоящее время, несмотря на успешный опыт эксплуатации ветроустановок и солнечных панелей в Европе, США и Канаде, нет ясности в стратегии развития энергетики на ближайшие годы. В связи с этим, в настоящее время слабо разработаны теоретические основы процессов производства, зажигания и горения смесевых композиционных топлив, это в основном связано с тем, что древесина является сложным (с химической точки зрения) композиционным материалом, состоящим из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, пентозанов и других полисахаридов и кислот [152–157].

1.1.3 Обращение с особо опасными отходами производственных процессов

Необходимость разработки и применения эффективных технологий очистки и современного энергосберегающего оборудования, реализующего их, является актуальной задачей для многих нефтегазодобывающих и сервисных организаций. Для этих целей могут быть применены различные установки для гидродинамической кавитационной очистки [157]. Проблемы использования гидродинамической кавитации в нефтегазовой отрасли развиваются в работе

[158]. Кавитация интенсифицирует процессы диспергирования, эмульгирования, гомогенизации, очистки отложений и т.д. Авторы обобщили свой опыт разработки научно обоснованных теоретических и технологических решений в проектировании оборудования и технологий использования кавитационно-струйного течения для решения задач нефтегазовой отрасли, предложив многокомпонентные дисперсные среды (буровые и цементные растворы) с использованием кавитации. В статье [158] исследуется технология гидродинамической кавитационной обработки вязкой и высоковязкой нефти и возможность ее применения в трубопроводной транспортной системе с целью повышения реологических свойств, транспортируемой нефти, в том числе динамических вязкостных напряжений сдвига. Использование ультразвуковой кавитации для снижения вязкости тяжелой нефти приведено в работе [159]. В работе [160] показано, что волновая обработка бурового раствора проточными гидродинамическими вихре генераторами значительно повышает качество бурового раствора и сокращает время приготовления его приготовления. Генерация нано пузырьков за счет гидродинамической кавитации используется для получения большого объема стабилизованных нано пузырьков для практической флотации путем непрерывной рециркуляции потока через резервуар для насыщения газа или кавитационную трубку при аэрации нефтеносных суспензий в гидротранспортных трубопроводах в работе [161].

Комплексное воздействие на гомогенные и гетерогенные жидкости, которые могут быть использованы в технологических целях, привлекли внимание исследователей в различных науках. Кавитационное воздействие на нефть является одним из эффективных методов интенсифицирующие химико-технологические, гидромеханические и массообменные процессов и разрушения веществ. В работе [31] подробно рассматриваются и анализируются механизмы воздействия и применения кавитации в различных процессах в нефтяной промышленности, в том числе процессы нефтепереработки, которые связаны с сырой нефтью и нефтяными отходами, такие как снижение вязкости, деэмульгирование, десульфурация и улучшение качества тяжелой нефти и

продукты нефтепереработки, в том числе нефтешламы и отработанные маслосодержащие воды. Различным аспектам, связанным с нефтепереработкой и сжиганием смесей, содержащих нефтепродукты посвящены работы [119–122].

Разработке новых методов производства композиционных материалов с использованием гидродинамической кавитации посвящены статьи [17, 162–174]. В работе [174] авторы исследуют возможность получения композиционного материала на основе эластичного пенополиуретана с углеродными наполнителями с использованием пропитки полиуретаном в неравновесной суспензии сажи. Неравновесную суспензию получали обработкой в гидродинамическом генераторе роторного типа в режиме кавитации.

Кавитационный механизм абляции материала, который обычно имеет место при импульсном лазерном воздействии на твердую мишень в жидкой среде сказывается на формировании популяции наночастиц металла [174]. Метод получения наночастиц коллоидных сплавов путем импульсной лазерной абляции в жидкостях рассматривается в работе [171]. Расслоение абляционного факела в формирующемся кавитационном пузыре приводит к образованию наночастиц разного размера и состава. В данной работе используются расчетно-экспериментальные исследования механизмов формирования наночастиц в ультракороткой импульсно-лазерной абляции тонких двухслойных пленок Ag/Cu и Cu/Ag.

В работе [173] рассмотрен механизм совместного влияния магнитного поля и гидродинамической кавитации на свойства солевых растворов, используемых для смешивания цементных паст. Гидродинамическая кавитация приводит к образованию активных форм кислорода,nano пузырьков диоксида углерода и инициирует взаимодействие новых форм с примесными катионами металлов, растворенными в воде. Получаемый цементный камень отличается повышенной прочностью и морозостойкостью по сравнению с камнем, полученным традиционным способом. Влияние кавитационной обработки на реологические свойства щелочно-алюмосиликатного связующего для

вспучивающихся покрытий с целью улучшения теплотехнических и механических свойств рассмотрено в работе [174]. Определены временные и физические параметры, при которых ускоряются процессы наноструктурирования. В стройиндустрии увеличение удельной поверхности цемента непосредственно в водной среде с помощью кавитационного диспергирования позволяет полнее использовать его потенциальные свойства и повышать степень гидратации и поверхностную энергию частиц. Разрушая мало прочную первичную алюминатную крупнозернистую структуру, удается получить мелкокристаллическую структуру цементного камня, прочность которого возрастает в 2–3 раза по сравнению с приготовлением раствора в обычных смесителях [1, 7, 82]. Влиянию кавитационно активированной воды на характеристики цементного компаунда при захоронении радиоактивных отходов посвящены исследования [175–177].

Надежности работы технологического оборудования повсеместно уделяется большое внимание. Экспериментально-расчетное исследование нестационарного потока в насосе водометных движителей, с целью предотвращения явления вращающегося срыва и кавитации и улучшения их конструкции и комплексных характеристик приводится в работе [178]. Исследования кавитационной эрозии сталей, работающим при высоких гидродинамических нагрузках, приведены в работе [179]. Показано, что азотирование поверхности стали приводит к повышению сопротивления эрозии. Влияние кавитации на работу гидростатического привода исследовалось в работе [180]. Эффект кавитации учитывается в численных полуаналитических исследованиях работы [181] с целью определения характеристик смазки текстурированного подшипника скольжения. Исследование влияния кавитационной модели для устойчивости работы подшипника скольжения приводится в работе [182]. Модель газовой кавитации используется для изучения влияния на напряжение сдвига и механические потери подшипника в работе [183]. Исследованию проточного химического процесса и его засорению при непрерывной химической обработке посвящена работа [184, 185]. Выявлено,

что осаждение твердых частиц, вызывается гидродинамической кавитацией. Характеристики вращающейся кавитации, которая может вызвать сильную вибрацию, поломку насоса и потерю работы в турбонасосах численно рассчитываются в работе. В монографии [186] приводится обзор и анализ основных результатов исследований по истечению струйных потоков из сопел различных конструкций в условиях суперкавитации, применительно к использованию данного явления в современных вибротехнологиях промышленного производства.

Целый ряд исследований проведен в СФУ в области обращения с радиоактивными отходами – отходами от переработки отработавшего ядерного топлива [7, 8, 187–201].

1.1.4 Использование кавитационных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности

Широко используются кавитационные технологии в сельском хозяйстве, пищевой промышленности и различных биотехнологиях [28, 202–211]. Так в работе [206] исследуется влияние древесного угля после кавитации на химические и биохимические свойства почвы. Результаты показали значительное снижение содержание тяжелых металлов в биомассе при использовании древесного угля после кавитационной обработки. Установлено, что за счет эффектов паро- конденсационной кавитации происходят структурные превращения макромолекулярных соединений диффузионного сока и коллоидных дисперсионных веществ, что приводит к увеличению электропроводности жидкости за счет дезагрегации веществ коллоидной дисперсии и высвобождения компонентов ионных носителей [205]. Этот эффект используется в свекольно-обрабатывающей промышленности для повышения чистоты конечного продукта увеличения его объема производства. В работе [207, 208] представлен механизм оптимизации результатов исследований комплексной системы переработки отходов свекловичного производства сахара с использованием кавитационных гидродинамических генераторов. В

результате исследований подтвержден синергетический эффект при использовании кавитатора совместно с другими методами воздействия. Процессы экстракции посредством гидродинамической кавитации отработанной кожуры лимона в воде на предприятиях по переработке лимонного сока рассматриваются в работе [214]. Возможность использования замкнутого цикла, примененного к переработке цитрусовых, позволяет повысить производство пектина и эфирного масла лимона и водорастворимого красителя.

Получение нано эмульсий эмульгированием жидкости за счет комбинированного воздействия кавитации, сдвига и удара демонстрирует превосходную эффективность эмульгирования при использовании порошка молочной сыворотки для получения стабильных фракций [209]. Роторный кавитатор для обработки суспензий с разрушением клеток микроорганизмов и эмульгированием несмешивающихся смесей представлен в работе [202].

1.2 Моделирование суперкавитационных течений в теплотехнологических аппаратах и оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты

В зависимости от специфики технологического процесса, физико-химических свойств нагреваемой среды и вида топлива, применяют печи различных конструкций и параметров. Неизменно важным остается требование повышения энергоэффективности и экологической безопасности производственного процесса, учитывая его высокую энергоемкость. Вместе с тем, габаритные размеры трубчатых печей и другие конструктивные особенности не позволяют в полной мере осуществить совершенствование их конструкций на базе экспериментальных исследований.

Современные требования к совершенствованию теплотехнологий, широкое внедрение процессорных методов измерения, контроля и управления ставят в число приоритетных задач более детальную разработку физико-математических

моделей гидродинамических, тепломассообменных и термодинамических процессов.

Явление суперкавитации предполагает взаимодействие поля скорости, поля давления и распределения фаз. Точное описание мульти физических полей в процессе развития кавитации является ключевой технологией построения механизма турбулентного СК-течения, модели кавитации и модели турбулентности. Сосредоточив внимание на взаимодействии между кавитационными пузырьками и турбулентностью возможно исследование технологии сопряжения измерения мульти физических полей с высоким пространственно-временным разрешением и методом прямого численного моделирования в процессе эволюции кавитационных пузырьков/каверн и получение информации о мульти физических полях, таких как поле скоростей, поле давления и поле компонентов в процессе эволюции кавитационных пузырьков/каверн, что обеспечивает техническую и информационную поддержку для выяснения механизма турбулентности и построения ее модели.

В настоящее время нет единой обобщающей модели, позволяющей рассматривать химико-технологические процессы тепломассообмена в широком диапазоне изменения начальных и граничных условий с учетом различных возмущающих воздействий и оценивать статические и динамические характеристики всего технологического процесса. Создание такой модели часто тормозится отсутствием данных по нестационарным режимам при различных возмущениях и т.д. В связи со сложностью решаемой проблемы очевидна необходимость перехода к численным оптимизационным методам решения краевых задач и задач оптимального управления, обеспечивающим машинный поиск глобального оптимума для многомерных функционалов.

Как отмечается в работе [212], вычислительные технологии на базе современных математических методов становятся главным инструментом при разработке принципиально новых технологий и технических систем. Математическое моделирование является неотъемлемой частью уникальных

физических экспериментов и прогнозирования. С другой стороны, развитие методов математического описания должно, безусловно, сопровождаться широким набором верификационных экспериментов, выполненных на установках различного масштаба. Результатом этого эволюционного процесса могут стать научно обоснованные методы расчёта основных технологических и конструктивных параметров (геометрических, гидротермодинамических и кавитационных) при проектировании надёжных и высокопроизводительных технологических аппаратов в отраслях промышленности, где существенную роль играют процессы тепломассообмена и гидродинамики взаимодействующих потоков [1–3, 212]. Значимым элементом вычислительных технологий являются системы с распределенными параметрами, которыми могут быть СК-аппараты и их системы и которые функционируют в условиях управления, в том числе оптимального. Распределенность параметров процесса требует особых подходов при синтезе систем контроля и управления. В частности, для таких систем естественным образом необходимо применять распределенный контроль и распределенное управление.

1.2.1 Анализ тенденций отечественных и зарубежных исследований суперкавитационных потоков с взаимодействием интенсивных потоков энергии и вещества

Разработка и использование морских ресурсов, подземных засоленных вод и т.п. являются важными компонентами изучения проблем орошения. Морская вода представляет собой комплексный солевой раствор сложного состава, в ней также содержатся растворенные газы, такие как кислород, углекислый газ и азот. Кавитация – это явление фазового перехода жидкость, широко распространенное в жидкости. Используя характеристики суперкавитации морской воды (СК), можно не только значительно снизить ходовое сопротивление подводных аппаратов, но и ороснить морскую воду. Технология использования морских ресурсов на основе СК должна решить основные проблемы механики многофазного потока морской воды, преодолеть проблемы контроля и регулирования, вызванные сложностью многофазного

потока в процессе кавитации, и нуждается в надежных и экономически эффективных методах и средствах исследования. Ввиду огромных инвестиций в экспериментальные СК-установки, следует подчеркнуть важность технологии моделирования суперкавитационных течений средствами вычислительной гидродинамики. Поэтому для создания надежного численного метода описания СК необходимо создать и обосновать модель турбулентности, вызванной кавитационными пузырьками, и модель кавитации, более соответствующую характеристикам кавитационного потока с учетом теплообмена в морской воде, что заложит основу для исследования ключевых технологий управления транспортным средством входа и выхода воды во внешнюю среду и опреснения морской воды.

В настоящее время исследования СК в стране и за рубежом сосредоточены на турбулентной модели и модели кавитации, основанной на концепции смешанного потока, что недостаточно для точного моделирования турбулентных характеристик области раздела газ-жидкость, а это является основой для точного описания характеристик сопротивления транспортного средства при движении в многофазной среде. В то же время, в соответствии с характеристиками качества морской воды и эволюции СК, понимание этих проблем является относительно предварительным, и механизм и закон СК-опреснения морской воды не может быть эффективно продвинут. Поэтому для индустриализации морской науки и техники очень важно изучить механические характеристики и механизм многофазного СК-потока морской воды и, в общем случае, засоленных вод.

Последние достижения и перспективы развития. Для решения проблем неопределенности основного процесса и механизма использования СК морской воды, а также нестабильности нагрузки, был достигнут значительный прогресс в исследованиях характеристик качества морской воды, турбулентности, вызванной пузырьками, и технологии использования СК в морской воде.

Качество морской воды и характеристики кавитации. Команда Jenkinson во Франции изучала теплофизические и реологические свойства морской воды, сравнивала и анализировала влияние качества морской воды на турбулентный, временной и пространственный масштаб. Мичиганский университет и ВМС США изучили эволюцию первичной кавитации и спектр шума в растворе морской воды и предварительно получили закономерности развития кавитации. Команда Харбинского политехнического университета (НРУ) под руководством Li Feng-Chen всесторонне изучила характеристики качества морской воды под влиянием ПАВ, получила данные о теплофизических и реологических свойствах и свойствах поверхности – внешней среды и установила характеристики их влияния на формирование суперкавитации. Команда текущего проекта провела исследования характеристик потока, нагрузки и снижения сопротивления для СК с естественным притоком, СК с вентиляцией и СК с поперечным притоком и оттоком воды, и получила внутреннюю взаимосвязь между распределением сопротивления, морфологией кавитации и динамическими характеристиками.

Многофазная турбулентная модель кавитирующей жидкости. Группа Ishii из Университета Пердью создала двух жидкостную турбулентную модель для описания кавитационного потока, которая может адаптироваться к прогнозированию широкого спектра пузырьков и процесса их слияния. Институт механики Китайской академии наук создал модель кавитации на основе рассмотрения группы кавитационных пузырьков, которая может точно описать локальное высокое давление, вызванное неравномерным распределением числа и плотности пузырьков. Команда Wang Guoyu из Пекинского технологического института предложила многомасштабную модель и проанализировала механизм эволюции морфологии пара и масштаба в различных моделях. Команда данного проекта разработала пакет прямого численного моделирования газожидкостной двухфазной турбулентности и получила характеристики межфазного потока и законы влияния турбулентности, вызванной пузырьками.

Подводный СК-аппарат и управление его работой. Массачусетский технологический институт (MIT) в США провел экспериментальное исследование характеристик многофазного потока и нагрузки при кавитации в низкоскоростном потоке воды и выяснил влияние различных условий на поток и сопротивление движению тел. Университет штата Юта провел экспериментальные исследования по снижению сопротивления с помощью водяной струи и двойных шаров, и уточнил механизм снижения ударной нагрузки.

Механизм и технология СК-опреснения морской воды: новый процесс СК-опреснения морской воды преодолевает недостатки технологии многоступенчатого испарения и дистилляции, такие как легкое загрязнение, низкая степень извлечения пресной воды методом обратного осмоса и сложная предварительная обработка. В настоящее время исследования по применению СК в опреснении морской воды в основном сосредоточены в России, например, разработка технологии опреснения с использованием статического конического СК-испарителя. Команда Харбинского технологического института (НИТ) выдвинула концепцию ротационного СК-испарителя (RSCE) и провела системный анализ и исследование его принципа действия и конструкции. Были получены пространственно-временные характеристики потока в RSCE, влияние отбора пара и температуры на гидродинамические характеристики RSCE, выявлено взаимодействие между кавитацией и вихревой структурой.

Вышеуказанное содержание исследований ориентировано на фундаментальные исследования и развитие морской науки и техники и промышленное развитие. Технология опреснения морской и подземных вод реализует открытый прирост использования водных ресурсов. В следующем десятилетии мощность отрасли, согласно различным прогнозам, будет иметь более чем 5-кратный рост, и перспективы оптимистичны. Проект также сталкивается с основным национальным спросом многих стран мира. Благодаря освоению механизма суперкавитации морской воды и точным методам

исследования, он сформирует достоверные основания использования достижений гидродинамики, а также обеспечит и будет способствовать эффективному функционированию экономики многих стран.

Подводя итог, можно сказать, что в настоящее время численные исследования эволюции кавитации в стране и за рубежом все еще опираются на рамки смешанных фазовых потоков, которые не могут точно отразить межфазное течение, вызванное кавитационными пузырьками в процессе эволюции суперкавитации. Более того, существует мало исследований по реальной кавитации морской воды и СК, и результаты исследований не могут удовлетворить спрос на тонкие исследования взаимосвязи между кавитационным многофазным потоком и его динамикой. Таким образом, в области снижения сопротивления подводных аппаратов и опреснения морской воды СК необходимо срочно решить проблему технического узкого места – создать эффективные средства для изучения характеристик и механизма СК морской воды, а также выяснить механизм многофазной турбулентности и межфазного взаимодействия в реальных средах.

Такие характеристики потока, как сильная пульсация давления, вызванная облачной кавитацией, и механические эффекты, такие как образование микроструек и ударной волны, вызванные схлопыванием облака кавитационных пузырьков, будут вызывать шум, вибрацию и эрозию гидравлических машин. В отличие от этого, при суперкавитации возможно избежать негативного воздействия облачной кавитации из-за ее стабильной формы и закрытой полости в исходящем течении твердых границ потока. Основываясь на характеристиках потока и эффекте суперкавитации, эта работа выдвигает инновационные исследовательские идеи, такие как механические характеристики и механизм двухфазного потока суперкавитации, высокоточное теоретическое моделирование и специальные проблемы в типичной системе использования эффекта суперкавитации. Диссертация направлена на изучение характеристик и механизма суперкавитационного потока вокруг

высокоскоростных движущихся объектов и взаимосвязи между ними и внешними характеристиками в потенциальных приложениях. Результаты настоящего исследования помогут глубже понять характеристики и механизм различных СК, разработать высокоточные теоретические модели, обогатить и развить понимание эффекта кавитации, а также имеют важное академическое и прикладное значение.

Широкое применение кавитационных технологий сопровождается их аналитическим и экспериментальным изучением [9, 202, 212–266]. Для повышения надежности работы технологического оборудования в ряде работ проводятся исследования гидравлических характеристик на основе моделирования процессов кавитации в зависимости от таких параметров, как числа кавитации [240], где выявлен диапазон безопасной работы в условиях отсутствия кавитации гидродинамических турбин. Изучение развития (эволюции) кавитации численно проводилось в работе [253] для двумерного подводного крыла NASA, используя модель кавитации с переносом массы и k - ε модель. Результаты теоретических исследований процесса гидродинамического измельчения суспензии целлюлозы на основе кавитационных потоков приведены в работе [244], где используется комплексная модель возникновения кавитационного эффекта, основанная на методах математического моделирования.

Использование математических моделей позволяет разработать наиболее оптимальную конструкцию без изготовления прототипов [222]. Моделирование процессов в термочувствительном кавитирующем потоке, возникающем вокруг судна на подводных крыльях, предложена в работах [250, 251]. В работе [249] численными методами выявлены основные закономерности истечения погружных и не погружных струй на разрушение отложений с высоким сцеплением с поверхностью нефтегазопромыслового оборудования. Численное моделирование течения многофазных потоков выполнялось в программном комплексе для решения задач вычислительной гидродинамики методом

конечных элементов. Проведен ряд математических экспериментов: моделирование течений, а также сравнение течений для трех типов сопел: конического сужения с цилиндрическим выходным отверстием; цилиндрические и конические расходящиеся. Полученные результаты подтверждены практическими испытаниями в полевых условиях. Численному моделированию кавитационного потока посвящены и работы [257–260]. В работе [255] исследуется эффект кавитации в сопле с прямым конусом. Численное моделирование с учетом внутреннего и внешнего полей потока сопла проводилось в режиме объема жидкости с помощью пакета CFD.

Экспериментальные методы являются наиболее очевидными и надежными в исследованиях кавитации. На кавитационные процессы оказывает влияние большое число различных факторов. Количество пузырьков нерастворимого кислорода в движущемся потоке исследовалось в работе [258], где описан экспериментальный стенд с ресорбером для уменьшения количества растворенных газов. Проведено сравнение экспериментальных результатов формирования кавитационных условий до и после установки ресорбера. Опыты проводились с технической водопроводной водой, достоверность результатов подтверждена сравнением их с литературными данными. Развитие кавитации при запуске вверх подводных объектов, приближающихся с большой скоростью к поверхности моря, рассматривается в работе [261]. С помощью моделирования больших вихрей исследуется кавитационный отрыв и схлопывание во время выхода из воды осесимметричного снаряда.

Испытания на эрозию чистого алюминия в зависимости от геометрии сопла рассматривается в работе [263]. С помощью высокоскоростной видеокамеры, проведены измерения напорного давления кавитирующей струи, чтобы понять влияние геометрии форсунки на интенсивность агрессивного воздействия. В работе [264] экспериментально исследуется взаимосвязь между условиями работы, геометрией сопла, диаметром сопла и поведением струи кавитационной струи с целью определения скорости эрозии в различных

условиях. На основе математического анализа полученных результатов предложена новая форма расчета числа кавитации. В статье [265] изучается термодинамический эффект с помощью кавитации в трубке Вентури с использованием воды при температурах до относительно высоких уровней и при контролируемом содержании растворенного газа в резервуаре подачи. Характеристики кавитации (средняя длина прикрепленного облака полости) анализируются на основе экспериментов, полученным с холодной водой и горячей водой. В работе [266] представлены экспериментальные результаты исследования влияния нелинейных волновых и кавитационных процессов, протекающих в рабочих элементах потока в гидродинамических вихревых и плоских генераторах с проточными телами различной формы, на реологические свойства буровых растворов. Лабораторные исследования подтверждены промышленными экспериментами, позволившими значительно повысить эффективность бурения. Экспериментальные исследования механизма образования и развития кавитации в соплах рассмотрены и описаны в работе [264]. Обобщены различные эмпирические формулы, связывающие коэффициент расхода с гидродинамическими параметрами. Особенности работы колебательно-резонансных кавитаторов по сравнению с гидродинамическими кавитаторами исследуются в работе [262]. Выяснено, что повышение напряженности кавитационного поля, а, следовательно, и увеличение производительности кавитационной обработки жидкости обеспечивают именно колебательно-резонансные кавитаторы. Лабораторный стенд для исследования реологических свойств вязких и высоковязкой нефти при их гидродинамической кавитационной обработке приводится в работе [158], здесь же представлены результаты моделирования и лабораторных исследований. Влияние физических параметров на характеристики образовавшихся субмикронных пузырьков, созданных путем смешивания воды и газа методом гидродинамической кавитации, было рассмотрено в работе [266]. Было показано, что скорость образования пузырьков и их плотность в воде впрямую зависят от давления газа. В статьях [234–237] описан подход к

определению режима течения с использованием экспериментального гидродинамического стенда для исследования кавитационных процессов. Эксперименты с технической водопроводной водой подтвердили достоверность полученных натурных результатов с теоретическими значениями. Исследована зависимость гидродинамических режимов от средней скорости потока, числа Рейнольдса и числа кавитации. Математическое моделирование движения жидкостей, сопровождающегося явлением суперкавитации рассматривается в статьях [239–241, 269], где представлен общий подход к математическому моделированию. Предложенная математическая модель учитывает геометрию, начальные параметры и физические константы, характеризующие процесс. Важность крупномасштабных гидравлических исследований была также подчёркнута на заседании секции «Гидроэлектростанции и гидротехнические сооружения» Научно-технического совета Единой энергетической системы по расследованию причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС [267]. Общим вопросам, относящимся к данной проблематике, относятся также работы [4, 5, 19, 245, 246, 270–286].

Представленный обзор позволяет сделать вывод об актуальности использования кавитационных технологий в различных областях науки и технике для решения важных практических задач и, как следствие, необходимости их всестороннего изучения. Появляется необходимость разработки новых, экологически безопасных технологий с более низкими затратами на техническое обслуживание и производство. Вышеуказанные цели возможно достичь, используя гидротермодинамические эффекты кавитации. Таким образом, исследование суперкавитирующих потоков с отбором пара из суперкаверны для проектирования устройств орошения с высокими энергетическими и экономическими характеристиками является актуальной проблемой, как часть общей фактической миссии обеспечения доступа к безопасным пресным водным ресурсам и повторного использования сточных вод в закрытых системах водоснабжения.

1.2.2 Моделирование многофазной турбулентности кавитационных потоков в условиях взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом

Кавитация тесно связана с турбулентным движением, и выбор турбулентной модели существенно влияет на точность прогнозирования кавитационного течения. Существующие численные методы турбулентности включают прямое численное моделирование (DNS), усредненную по времени модель турбулентности Навье-Стокса по Рейнольдсу (RANS), моделирование больших вихрей (LES) и модели смешанной турбулентности. Для кавитационного течения в практической инженерии широко используется RANS-модель, которая может прогнозировать средние характеристики потока в диапазоне точности, требуемом инженерий, и требует меньших вычислительных ресурсов, но трудно получить точные результаты расчета для условий нестационарности, крупномасштабных вычислений разделения потока, моделирование обратного градиента давления и других задач. Чтобы преодолеть вышеупомянутые проблемы, ученые разработали серию моделей кавитационной турбулентности, чтобы улучшить эффективность этих моделей при прогнозировании нестационарного кавитационного потока.

Некоторые исследователи повышают точность прогнозирования нестационарного кавитационного течения, решая проблему, заключающуюся в том, что традиционная модель турбулентности переоценивает коэффициент турбулентной вязкости в расчетной области (включая кавитационные и некавитационные области). Например, Wang G. [49] использовали метод LES для расчета слоевой и облачной кавитации на подводных крыльях NACA0015 и уловил детали нестационарного сброса кавитационных облаков. Чтобы решить задачу, заключающуюся в том, что стандартная RANS-модель завышает коэффициент вязкости в кавитационном потоке, Kinzel M.P. et al. [50] использовали моделирование отдельных вихрей (DES) для моделирования кавитационного обтекания трехмерного осесимметричного врачающегося тела и сравнивали его с результатами, полученными стандартной RANS-моделью. Исследование показывает, что модель DES хорошо моделирует явление

обратной струи в области кавитации и общее выделение крупномасштабных кавитационных кластеров. Wu J.Y. и др. [51] предложили модель турбулентности на основе фильтров (FBM), объединив стандартную k - ε модель и метод LES, рассчитали зарождающуюся, слоевую и облачную кавитацию двумерного подводного крыла и обнаружили, что модель FBM может лучше отражать нестационарное движение и характеристики кавитационного поля течения. Kim S. и Brewton S.A. [52] использовали модель RANS, метод LES и смешанную модель RANS/LES для моделирования кавитационного потока вокруг подводного крыла NACA66, соответственно. Результаты показывают, что метод LES и модель RANS/LES имеют большие преимущества в прогнозировании нестационарных характеристик, таких как выделение кавитационных кластеров.

Некоторые ученые считают, что кавитационное течение представляет собой сложный многофазный поток, а в области кавитации находится газожидкостная двухфазная среда, и отмечают, что для повышения точности модели турбулентности необходимо учитывать характеристики многофазного потока. Например, Coutie R. и др. [53], Zhou L.J. и др. [54], Wang G. и др. [55] и Li X. и др. [56] рассмотрели характеристики сжимаемого кавитационного многофазного потока, ввели смешанную функцию плотности воды и водяного пара в традиционный коэффициент турбулентной вязкости, предложили метод коррекции плотности (DCM), основанный на модели турбулентности RANS, и на основе этого провели устранение кавитации двумерных и трехмерных крыльев на подводных крыльях. Хотя модели FBM и DCM могут снизить коэффициент турбулентной вязкости в определенном диапазоне, существуют очевидные различия в физическом значении этих двух моделей. Модель FBM не учитывает влияние характеристик кавитационного многофазного потока, а в основном фильтрует и корректирует область вихревых пульсаций кавитационных облаков вдали от стенки и с высоким содержанием водяного пара. Модель DCM в основном корректирует плотность смешения в области кавитации, и объем ее влияния в основном сосредоточен в пристеночной

области ядра кавитации, чтобы учитывать сжимаемость газожидкостной смешанной фазы. В области, расположенной далеко от стенки, его эффект неудовлетворителен, поскольку нет явного процесса кавитации. В соответствии с характеристиками модели FBM и модели DCM при моделировании кавитационного потока Huang B. et al. [57] разделили область кавитационного потока на основе распределения смешанной плотности, применили различные методы коррекции турбулентной вязкости в разных регионах, предложили модель коррекции плотности на основе фильтров FBDCM и использовали эту модель для моделирования явления нестационарной кавитации двумерного подводного крыла – в итоге результаты более соответствовали результатам эксперимента.

Две вышеупомянутые идеи основаны на теории жидкости Эйлера, однако метод Эйлера может получить только макроскопическую морфологию кавитации и гидродинамические характеристики, игнорируя важные факторы, такие как распределение пузырьков по размерам, межфазное скольжение, взаимодействие между пузырьками и турбулентность. В последние годы построение многомасштабных моделей стало горячим и сложным моментом в численных исследованиях кавитационных течений. Основываясь на модели Эйлера-Лагранжа и принимая во внимание многомасштабный эффект кавитации, некоторые ученые провели исследование многомасштабной модели кавитационной турбулентности. Например, Tomar G. и др. [58] реализовали преобразование между методом VOF (объема жидкости) и методом Лагранжа с использованием алгоритма соседних ячеек, но для этого необходимо искать все ячейки сетки на каждом временном шаге, что требует большого количества вычислений. Hsiao C.T. и др. предложили многомасштабную модель кавитации [59], основанную на модели дискретной сингулярности (DSM) и методе набора уровней. По сравнению с глобальным поиском элементов сетки существенно сократилось потребление вычислительных ресурсов. Модель применялась к зарождающейся кавитации, генерации ядер пара в вихревом потоке, переходу слоевой кавитации вокруг подводных крыльев и других потоков и показала

хороший эффект захвата. Li L.M. и др. [60] объединили модель дискретного пузырька (DBM), основанную на методе моделирования квазибольших вихрей, для решения поля непрерывного фазового потока и изучили генерацию дискретной кавитации в канале сжатия-расширения и характеристики эволюции крупномасштабной кавитации от слоевой к облачной кавитации. Впоследствии они рассмотрели влияние различных параметров модели на результаты многомасштабного расчета кавитации, дополнительно модифицировали модель дискретного пузырька и изучили многомасштабные временные и пространственные характеристики эволюции хвостовой вихревой кавитации [61]. Ebrahim G. и др. [62] применили метод Эйлера-Лагранжа для несжимаемой жидкости в условиях многомасштабной кавитации вокруг затупленного тела, ввели новую подмодель в модель Лагранжа, полностью учли эффекты столкновения и разрыва пузырьков и получили первичную кавитацию, вихревое образование и дискретное облако – как кавитация на поверхности затупленного тела. Wang Z.Y. и др. в работе [63] создали совместную кавитационную модель ВОФ и ДБМ, на основе которой исследовано кавитационное обтекание подводного крыла. Tian B.C. и др. [64] использовали метод Эйлера-Лагранжа для изучения кавитационного обтекания подводного крыла, установили алгоритм взаимодействия и взаимной трансформации между микропузырьками и пузырьками подсеточного масштаба, а также изучили процесс развития многомасштабного кавитационного течения, трансформации между микромасштабом и сплошным средним масштабом, а также влияние кавитационного турбулентного потока на пространственные и временные характеристики распределения микро масштабных пузырьков.

1.2.3 Прогресс в реализации принципа кавитационного опреснения воды

Существенный прогресс в реализации принципа кавитационного опреснения воды связан с развитием вычислительных технологий [1–3, 5, 248 и др.]. В работах разных лет [82, 156, 218, 220–236] приводятся результаты численного моделирования ротационных СК-испарителей (RSCE). С учетом

важности существенных достижений в области очистки стоков и кондиционирования технических вод в энергетике [132–144, 223] в Российской–Китайской международной лаборатории кавитационных технологий Сибирского федерального университета системно проводится работа по развитию техники эксперимента в области суперкавитационных течений на базе прототипа ступени проточного СК-испарителя [222–226], получая результаты на уровне мировых данных [279].

К научным направлениям, развивающимся в настоящее время [280–282], направленных 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 теплотехнологиях;
 - 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 др.;

- исследования в области создания новых композиционных и смазочных материалов, разработки по созданию новых видов эмульсированных (сuspensionных) топливных смесей и др.
- работы по обеспечению долговечности и надежности магистральных трубопроводов высокого давления и др.

1.3 Особенности моделирования кавитационных течений в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях

Предприятия энергетической отрасли, как известно, являются одними из крупнейших потребителей воды из природных источников. Как правило, ими используется вода из поверхностных источников, которая содержит различные примеси. Для обеспечения надежной, долговечной и безаварийной работы системы теплоснабжения необходима качественная подготовка подпиточной воды, которая, в общем случае, включает следующие стадии обработки: удаление из воды катионов накипеобразователей умягчением или обессоливанием; удаление из воды агрессивных газов O_2 и CO_2 атмосферной, вакуумной или химической деаэрацией. Особенное значение имеет водоподготовка в открытых системах теплоснабжения, где подпиточная вода должна, согласно требованиям санитарного надзора, соответствовать по всем показателям питьевой воде.

Наименее надежным звеном систем теплоснабжения является транспорт тепла. Основными проблемами тепловых сетей являются коррозионные разрушения и загрязнения трубопроводов. Более 25 % всех повреждений связано с внутренней язвенной коррозией. Как правило, все это является следствием технического и технологического несовершенства применяемых методов обработки воды.

Общей проблемой физико-химической очистки природных вод в энергетических системах является необходимость дальнейшего

усовершенствования процессов очистки и коррекции свойств воды на базе новых наукоемких энергоэффективных технологий. Возникающие проблемы энергоресурсосбережения и экобезопасности в системах водоподготовки в энергетических комплексах могут быть решены с помощью кавитационной технологии, основанной на использовании эффектов кавитации и являющейся по своей сути экологически чистой. Однако вопросы изменения физико-химических свойств воды (реологических, структурных и др.) и их влияния (на макроуровне) на ход и результат технологических процессов на современном этапе изучены недостаточно.

Кроме того, эффекты кавитации играют существенную роль в различных технических системах и технологических процессах. Известно, что кавитация является причиной разрушения трубопроводов и гидроарматуры, гидротехнического и гидравлического оборудования, судовых движителей и многое другое, находящегося в потоках жидкости в условиях режимов течений, способствующих возникновению кавитации (например, как правило эти явления возникают при открытии-закрытии регулирующей арматуры).

В начальной стадии кавитационной эрозии происходит пластическая деформация поверхности под действием кумулятивных микроструек и импульсов давления, возникающих в результате схлопывания кавитационных пузырьков. При этом образуются следы скольжения, поверхность становится волнистой, а через некоторое время появляются экструзии и интрузии (вспучивания поверхности, образование складок, вмятин и т.д.). При дальнейшем кавитационном воздействии после значительных пластических деформаций происходит разрушение поверхности трубопровода с образованием большого количества микро-кратеров, которые в процессе своего роста сливаются в макро-кратеры – полости в материале с размерами до нескольких миллиметров. Образующиеся раковины являются концентраторами напряжений. При действии высоких давлений и ударных нагрузок, являющихся следствием возникновения гидроудара, на внутренней поверхности трубопровода в зонах

кавитационной эрозии происходит образование и быстрое распространение микротрешин, которые развиваются и проникают вглубь материала. При этом создаются критические условия для разрыва трубопровода. Таким образом, в потоке происходит взаимодействие кавитационных эффектов и гидроудара в процессе разрушения материала трубопроводов.

Исходя из вышеизложенного, существуют, по крайней мере, две предпосылки для изучения кавитационных течений – при использовании их в целях водоподготовки и для предотвращения преждевременного износа трубопроводов тепловых сетей. В связи с этим возникает много важных вопросов: о нахождении устойчивых режимов обработки воды, о влиянии кавитационного воздействия на физико-химические характеристики и релаксацию полученных свойств и др., ответы на которые должны быть найдены в процессе всесторонних исследований [1, 2, 217, 218, 221–226, 283–286]. Для выработки мер борьбы с разрушительными следствиями кавитации существует ряд способов, которых на данный момент времени недостаточно. Требуются дальнейшие научные исследования в направлении создания гидротермодинамических условий бескавитационных течений, разработке новых кавитационно стойких конструкционных материалов, проектировании оборудования и технологических процессов новых типов. Вследствие чрезвычайной сложности физических процессов, происходящих при кавитации, механизм действия последней трудно поддается теоретическому и экспериментальному исследованию. Важную роль здесь играет численное моделирование кавитационных течений.

Физическое моделирование кавитационных течений и воздействий основано на идеях и исследованиях Г.В. Логвиновича, Р. Кнеппа, В.М. Ивченко, В.А. Кулагина и др. В исследования искусственных кавитационных течений внесли вклад ученые: А.Ф. Болотин, А.А. Бутозов, Л.А. Эпштейн и др., работы которых в значительной степени раскрыли физические процессы, характеризующие явление кавитации, и позволили установить ряд

закономерностей. Теоретическим и экспериментальным исследованиям начальной стадии кавитации, в частности статики и динамики одиночного пузырька в безграничной жидкости и вблизи стенки, посвящены работы В.К. Андреева, Херринга и др. Однако при проектировании технологических аппаратов для различных производств с применением гидротермодинамических эффектов кавитации и необходимости учета специфических особенностей конкретного технологического процесса не всегда удается воспользоваться предложенными формулами и методами. Существующие теория и методы расчета, развитых кавитационных течений, не позволяют с достаточной точностью рассчитать суперкавитационные аппараты, возможные экстремальные условия, возникающие в трубопроводах и арматуре и т.п.

1.3.1 Анализ методов вычислительной гидродинамики процессов тепло- и массообмена

С расширением области приложения кавитационной технологии в различных отраслях производства, возрастает потребность в исследовании кавитационных течений. Однако одновременное существование граничной динамики, фазового перехода и сильного изменения плотности значительно затрудняет эту задачу. В последнее десятилетие становится распространенным применение вычислительной гидродинамики (CFD) для анализа кавитационных течений. Усовершенствование CFD методов в начале 1990-х годов привело к появлению кавитационных моделей, включающих уравнения Навье-Стокса. Выделяют два основных подхода при моделировании многофазных потоков: с взаимопроникающими средами и без взаимопроникновения.

В подходе, который рассматривает не взаимопроникающие среды, четко определяется поверхность раздела в системе «пар – жидкость». Этот подход был разработан для моделирования устойчивых кавитационных течений, в которых известны начальная форма каверны и модель области замыкания (следа). Уравнения движения решаются только для жидкой фазы, а паровая фаза учитывается граничными условиями на поверхности раздела. Массовый поток

через поверхность раздела фаз не учитывается. Начальную форму каверны и ее область замыкания Hirschi R., Dupont P. и Avellan F. [283] определяли с помощью уравнения Рэлея-Плессета, тогда как Deshpande M., Feng J. [284] и Chen Y., Heister S. D. [285] применяли критерий статического давления пара. Для учета термодинамических эффектов Deshpande M., Feng J. [284] использовали уравнение энергии. Однако модели, предполагающие чёткую поверхность раздела фаз, не нашли широкого применения.

1.4 Вычислительные проблемы систем с распределенными параметрами в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках

Задачи моделирования тепломассообменных процессов и верификация результатов численного исследования СК-аппаратов и суперкавитационного способа получения топливных смесей проводилось на примере технологического процесса в трубчатых печах. Анализ работ, посвященных тематике данного исследования, частично опубликован автором в [286–299]. В этих публикациях отмечается, что в связи с высокой энергоемкостью и стоимостью эксплуатации трубчатых печей, им должно уделяться особое внимание, как с технологической стороны, так и с точки зрения материального оформления. При модернизации нагревательных печей необходимо учитывать конкретные технологические особенности процесса, а также состояние нагреваемого продукта в змеевике печи.

В настоящее время нет единой обобщенной модели, позволяющей рассматривать технологические процессы тепломассообмена в широком диапазоне изменения начальных и граничных условий с учетом различных возмущающих воздействий и оценивать статические и динамические характеристики всего технологического процесса. Создание такой модели часто тормозится из-за отсутствия данных по нестационарным режимам при различных возмущениях. Широко известная простейшая теория расчета стационарных процессов теплообмена и массообмена в химико-

технологических объектах и системах, которая излагается в различных изданиях, служит основой методики проектирования процессов и систем управления [298]. Однако эта теория не учитывает динамики процессов, фактически протекающих в нестационарных условиях.

Постоянно возрастающие требования к точности соблюдения норм технологического режима, возникающие в задачах автоматического управления, требуют еще на стадиях проектирования выяснить, хотя бы приближенно, динамические свойства управляемых объектов. Однако теоретические основы решения их до сих пор мало разработаны [298, 299]. В работе [298] обращается внимание на то обстоятельство, что рассматриваемые процессы имеют значительную распределенность в пространстве. Пренебрежение важным свойством распределенности процессов приводит к принципиальным ошибкам в решении задач автоматического управления. В связи с этим для математического описания таких процессов применяются дифференциальные уравнения в частных производных и соответствующие краевые задачи, некоторые численные методы, пользуясь которыми можно рассчитывать статические и динамические характеристики управляемых объектов [292, 295, 297, 298, 304]. Ясно, что таким образом наиболее полно учитываются характерные особенности распределенных процессов.

В докладе по управлению химическими процессами Комитета прикладных работ ИФАК [300] указывается на необходимость тесного сотрудничества со специалистами по ЭВМ и математической статистике, а также разработки теории автоматического управления с учетом последних достижений в области применения компьютеров. Определены задачи, которые должны быть решены в ближайшее время: разработка алгоритмов управления для использования в новейших ЭВМ, нового оборудования, которое может реализовать усовершенствованные алгоритмы управления; более точных математических моделей для создания лучших контроллеров; синтез и анализ систем регулирования при неопределенности; разработка теоретических основ

выбора критериев управления, исключающих влияние субъективности оператора; углубление исследований грубости систем управления; взаимодействие между проектированием и эксплуатацией автоматизированных систем управления (АСУ) технологическим процессом; учет динамики при проектировании; изменение технологии для решения задач управления; проектирование систем диагностики; использование экспертных систем АСУ; управление периодическими процессами; человек в центре управления; разработка структур и конфигураций ЭВМ, соответствующих построению АСУ.

В [301–303] приведен обзор и подробный анализ результатов исследований кинетики многокомпонентного тепломассопереноса, полученных в последние 15–20 лет в работах отечественных и зарубежных авторов. Основное внимание удалено ряду проблем теоретического описания многокомпонентной диффузии и многокомпонентного тепломассопереноса, вопросам моделирования различных многокомпонентных процессов разделения с использованием точных и упрощенных математических моделей.

В [304] на основе анализа результатов по физическому и математическому моделированию тепломассоотдачи сделан вывод о том, что существующие подходы моделирования характеризуются отсутствием количественной основы, связывающей фундаментальные и специальные знания. Чтобы исключить многочисленные экспериментальные исследования, необходимо использовать при моделировании фундаментальные знания в форме законов сохранения и равновесия.

В настоящее время мощные быстродействующие компьютеры позволили существенно усовершенствовать процесс моделирования химикотехнологических установок. Существующие ранее ограничения, позволяющие производить только статическое моделирование, в настоящее время устранены. Инженер-проектировщик может теперь работать с динамическими объектами для совершенствования систем безопасности и создания систем регулирования в нестационарных режимах. Современные

моделируемые комплексы также могут быть использованы для обучения операторов. В [310] описаны способы, посредством которых можно сочетать программы динамического моделирования со статическими системами. Гибридные модели могут быть использованы в качестве тренажера оператора и непосредственно для оптимизации управления, там же проанализированы отличия между статическим и динамическим моделированием по отношению к термодинамическим моделям конкретных установок. Динамические модели весьма эффективны для трубчатых печей, ректификационных колонн, теплообменников и др. Однако их диапазон и масштаб пока не могут быть сопоставлены с промышленными пакетами программ статического моделирования. При работе с динамическими моделями компьютерное моделирование является одним из главных инструментов проектирования технологических процессов [291, 298].

Имеется довольно много работ по исследованию динамики объектов с распределенными параметрами [305–319]. Среди них монографии [305, 318, 319] целиком, посвященные этой проблеме; работы Кафарова В.В. и др. [310–315]. В монографии [316] академика В.В. Кафарова и В.Н. Ветохина собран обширный материал, описывающий принципы и опыт по расчету процессов и аппаратов химической технологии с широким использованием методов системного анализа, моделирования и оптимизации. Применение системных методов для решения практических задач показало, что они обеспечивают требуемую точность решений и значительно сокращают время счета по сравнению с классическими методами. В последнее время появилось много работ по исследованию переходных режимов химико-технологических аппаратов с привлечением современного математического аппарата дифференциальных уравнений в частных производных, что дало толчок развитию численных методов исследования краевых задач [305, 314, 317–334]. На различных конференциях и форумах по технологии предпринимаются попытки разработать единую методологию научных исследований, одним из главных направлений которых является охрана окружающей среды. В последнее время во всех странах с развитыми

экономиками защита окружающей среды стала основным приоритетом в технологической деятельности. Из-за усиливающихся тенденций узкой специализации науки введено понятие транс-дисциплинарного сотрудничества ученых для повышения эффективности научных разработок в будущем.

Охрана окружающей среды является дополнительным стимулом к разработке процессов разделения различных материалов, учитывающих загрязнение воздуха, воды и почвы. В последние годы значительное внимание уделяется повышению их качества. Проведенный анализ литературных источников позволяет говорить о том, что в настоящее время нет единой обобщенной модели, позволяющей рассматривать технологические процессы тепломассообмена в широком диапазоне изменения начальных и граничных условий с учетом различных возмущающих воздействий и оценивать статические и динамические характеристики всего технологического процесса. Создание такой модели часто тормозится из-за отсутствия данных по нестационарным режимам при различных возмущениях.

Преимущество использования математических методов в нефтехимии и нефтепереработке состоит в комплексном подходе при решении указанных задач, начиная с постановки задачи, создания математической модели и адекватной исходной информации, заканчивая выбором аналитических либо численных методов получения решения. Такой подход в конечном итоге приводит к оптимизации технологических процессов, минимизации затрат на производство продуктов и сокращению сроков их выпуска. Кроме того, он даёт возможность исследовать закономерности поведения объектов и более детально изучить технологические процессы нефтехимии и нефтепереработки.

2 РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СУПЕРКАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Элементы математического моделирования стали использоваться с момента возникновения точных наук. Не случайно некоторые методы вычислений носят имена таких корифеев науки, как Ньютон и Эйлер, а слово «алгоритм» происходит от имени средневекового арабского ученого аль-Хорезми. Простейшие вычислительные эксперименты применялись еще в древности при решении строительных и гидротехнических задач. Позднее в связи с успехами математики, механики, астрономии и появлением новых вычислительных средств (таблицы логарифмов, первые вычислительные устройства) сфера применения вычислительных экспериментов заметно расширяется. В первой половине XX-го века математическое моделирование распространяется на класс задач теоретической физики, для которых характерны нелинейность и нестационарность, что потребовало создания новых математических методов их решения. Содержание этого раздела ранее опубликовано в работах [4–6, 19, 101, 119–123, 125, 126, 148, 168, 232, 239, 239–244, 257, 271–275, 277, 287–299].

Как показал анализ работ по исследованию кавитационных течений, наиболее часто встречается подход, основанный на взаимопроникающих средах. В этом случае кавитационный поток рассматривается как гомогенная смесь. Здесь не предполагается поверхность раздела между двумя несмешивающимися жидкостями, поэтому объемная доля фазы может изменяться от нуля до единицы, в зависимости от занимаемого пространства в двухфазном потоке. Для смеси применяются уравнения сохранения импульса и неразрывности, а также замыкающее уравнение, необходимое для нахождения объемной доли. Модели кавитации данного подхода классифицируются по типу уравнений, которые используются для определения содержания доли фазы в потоке, а именно – алгебраические и дифференциальные.

Алгебраические модели предполагают мгновенное влияние локального давления на плотность гомогенной смеси. Поэтому они также известны как баротропные модели или модели, основанные на уравнении состояния. Упрощая уравнение энергии, можно получить следующее баротропное уравнение:

$$c_m^2 \frac{d\rho_m}{dt} = \frac{dP}{dt},$$

где c_m – скорость звука смеси, м/с; $\rho_m = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l$ – плотность смеси, ρ_v и ρ_l – плотности пара и жидкости соответственно, кг/м³; α – объемная доля пара; P – давление, Па.

Delannoy Y и Kueny J. [320] принимали скорость звука согласно экспериментальным данным. Coutier-Delgosha O. [321] учитывал скорость звука смеси с помощью полиномиального уравнения. Schmidt D.R и др. [322] использовали переменную скорость звука, основываясь на классической гомогенной модели равновесия Wallis G.B. [338]:

$$\frac{1}{c_m^2} = \frac{\partial \rho_m}{\partial P} = \rho_m \left(\frac{\alpha}{\rho_v c_v^2} + \frac{1-\alpha}{\rho_l c_l^2} \right).$$

В результате интегрирования уравнения (2.2) можно получить зависимость между давлением и плотностью, которая дает начало алгебраическим моделям кавитации [323–326]:

$$P(\rho_m) = P_h + \frac{\rho_v - \rho_l}{\rho_v \rho_l} \frac{1}{(\rho_l c_l)^{-2} + (\rho_v c_v)^{-2}} \log \left[\left(\frac{\rho_m c_m}{\rho_l c_l} \right)^2 \right].$$

Однако в баротропной модели плотность зависит только от давления, вследствие чего не учитываются некоторые особенности кавитационных течений. Это может быть легко замечено при записи уравнения переноса завихренности:

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{\omega} = \vec{\omega} \cdot \nabla \vec{u} + \frac{1}{\rho_m^2} \nabla \rho_m \times \nabla P + \text{viscous terms},$$

где \vec{u} – абсолютная скорость, м/с; $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u}$ – завихрённость, 1/с. Второй член с правой стороны равенства при $\rho_m = \rho_m(P)$ обращается в ноль. В результате исчезает значительный источник турбулентности, который является существенным в области закрытия каверны [327].

Для более полного описания природы гидродинамической кавитации были разработаны дифференциальные модели. К ним относятся модели, основанные на уравнении переноса, а также модели, включающие уравнение Рэлея-Плессета. Наиболее часто применяется уравнение переноса объемной доли паровой фазы, имеющее следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha) + \nabla \cdot (\rho_v \alpha \vec{u}) = S_\alpha,$$

где S_α – источниковый член, который зависит от свойств жидкости и процесса фазового перехода (испарение или конденсация).

Основная трудность данного метода заключается в определении S_α . Alajbegovic A. и др. [328], а также Yuan W. и др. [329] предложили кавитационную модель, базирующуюся на уравнении Рэлея. Merkle C.L. [330], Kunz R. [331], Ahuja V. [332], Singhal N. [333] применяли полуаналитические уравнения для массового переноса. В качестве примера приведем выражение для определения S_α , полученное Singhal N. [333]. В данном случае источниковый член складывается из двух составляющих:

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{P_h - P}{\rho_v} \right)^{1/2} (1 - \alpha), \quad \text{при } P \leq P_h;$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{P - P_h}{\rho_l} \right)^{1/2} \alpha, \quad \text{при } P \geq P_v;$$

где V_{ch} – характеристическая скорость, м/с; P_n – давление насыщения, Па; σ – поверхностное натяжение воды, Н/м; $C_e = 0,02$ и $C_c = 0,01$ – эмпирические константы.

Senocak I. и Shyy W. [327] получили полностью аналитическую кавитационную модель переноса, основанную на уравнениях сохранения массы и импульса для поверхности раздела пар – жидкость.

Модели, предложенные Alajbegovic A. и др. [328], а также Yuan W. и др. [329], описывают предельный случай роста сферического пузырька при изменении давления окружающей жидкости. Однако данные модели плохо адаптированы для учета коллапса пузырька и пренебрегают многими эффектами, которые определяют поведение пузырьков. Влияние инерции, вязкости, поверхностного натяжения жидкости и сжимаемости парогазовой составляющей смеси на структуру кавитационного потока моделируется более универсальным уравнением Рэлея-Плессета [333]:

$$\rho \left(R \cdot \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right) = P_v + P_g - P_l - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} - 2 \frac{\sigma}{R},$$

где R – радиус кавитационного пузырька, м; P_v, P_g, P_l – давление пара, газа и жидкости в кавитационной области соответственно; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

В течение долгого времени уравнение Рэлея-Плессета (1.8) решалось в одномерном виде. Однако в связи с повышением мощности ЭВМ появились работы, отражающие расчетный анализ двух и трехмерных нестационарных кавитационных потоков [334–338]. В настоящее время стало возможным исследование кавитации при помощи «тяжелых», в вычислительном смысле, моделей Giannadakis E., Gavaises M., Roth H., Arcoumanis C. [336] и Chahine G.L. [337], которые включают уравнение для динамики группы пузырей радиуса R и плотности их числа n , полученное Kubota A. и др. [335]:

$$R \cdot \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{P_v - P}{\rho} + \frac{P_{g,0}}{\rho} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{\rho R} - \frac{4\mu}{\rho} \frac{\dot{R}}{R} - 2\pi \cdot \Delta r^2 \cdot (nR^2 \ddot{R} + \dot{n}R^2 \dot{R} + 2nR\dot{R}^2),$$

где $P_{g,0}$ и R_0 – первоначальные давление газа и радиус пузырька, γ показатель политропы. Последний член в этом уравнении моделирует динамику пузырьков на подсеточном масштабе Δr . Эта особенность становится полезной, используя грубые сетки, где давление распределяется между несколькими пузырями в вычислительной ячейке.

Сравнение математических моделей кавитационных потоков показывает, что наиболее эффективным является подход, основанный на взаимопроникающих средах. В таблице 2.1 приведены свойства трех широко применяемых типов кавитационных моделей данного подхода.

Таблица 2.1 – Свойства математических моделей кавитации

Факторы	Алгебраические модели	Дифференциальные модели	
		Модели, основанные на уравнении переноса	Модели, основанные на уравнении Рэлея-Плессета
Фазовый переход	Равновесие фаз	Неравновесное состояние фаз; постоянная скорость фазового перехода	Неравновесное состояние фаз; переменная скорость фазового перехода
Зависимость плотности от давления	Баротропная модель	Бароклинная модель	Бароклинная модель
Эффекты кавитационных ядер	Не учитываются	Могут быть учтены	Могут быть учтены
Турбулентность	Пренебрегается или учитывается для смеси	Учитывается для смеси	Учитывается для смеси или жидкости

Алгебраические модели предполагают явное влияние давления на объемную долю паровой фазы, тем самым представляя природу потока

баротропной. Модели, которые используют дифференциальные уравнения, описывают бароклинную природу кавитационного потока, более соответствующую реальности. Модели кавитации, основанные на уравнении переноса, являются устойчивыми и популярными в CFD относительно, моделей, основанных на уравнении Рэлея-Плессета. Однако последние более пригодны для моделирования нестационарных кавитационных течений, хотя и требуют больших вычислительных ресурсов.

Значимым элементом вычислительных технологий являются системы с распределенными параметрами, которыми могут быть различные СК-механизмы и их системы и которые функционируют в условиях управления, в том числе оптимального. Распределенность параметров процесса требует особых подходов при синтезе систем контроля и управления. В частности, для таких систем естественным образом необходимо применять распределенный контроль и распределенное управление.

2.1 Обтекание различных типов лопастных механизмов двухфазным сжимаемым потоком

Предлагаемый подход и используемые теоретические и экспериментальные методы отличают новизна в силу их комплексности и учета синергетического эффекта при разработке обеспечения решения фундаментальных и прикладных задач, а также область приложения – кавитационные технологии, где результаты исследования получены впервые.

Современный уровень развития вычислительной техники и имеющиеся у автора разработки в области моделирования трехмерных турбулентных (в том числе кавитационных) потоков позволяет осуществлять детальный расчет течения в СК-реакторах, определяя интегральные и локальные характеристики, характер кавитационного течения и динамику паровых каверн. Данные методы основаны на решении трехмерных стационарных и нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых с помощью тех или иных моделей турбулентности, в

частности, двухзонной модели k - ω SST Ментера и варианта метода моделирования отсепарованных вихрей (DES). Расчет кавитации основывается на решении уравнения переноса доли пара и моделировании массообмена на основе уравнения Рэлея-Плессета. Реализация численной модели пространственного кавитационного течения основана как на собственном, так и на коммерческом программных пакетах вычислительной гидродинамики. Для решения конкретных задач разработана научно обоснованная численная модель СК-насосов и других СК-механизмов на базе изложенного подхода к математическому моделированию. Нередко задача носит методический характер относительно адекватной постановки краевых задач для обтекания реальных крыловидных профилей суперкавитирующих механизмов вблизи границы отрыва.

2.1.1 Эффективные методы суммирования последовательностей

Большинство задач теории потенциала [339] может быть сведено в общем случае к решению интегральных или интегро-дифференциальных уравнений, а также систем таких уравнений [340–342].

В операторной форме запишем:

$$AU = f, \quad (2.1)$$

где A – интегральный или интегро-дифференциальный оператор; U – вектор искомых решений; f – вектор правых частей.

При использовании метода возмущений решение уравнения (2.1) ищется в виде функциональной последовательности $\{U_n\}$. Оператор A , также может быть подвергнут возмущениям. Таким образом, исходная задача сводится к решению уравнения:

$$A_n U_n = f_n, \quad (2.2)$$

где A_n и f_n выражаются через значения, получаемые в предыдущих приближениях.

Поскольку сходимость рядов и последовательностей понятия равнозначные, т.е. сходимость ряда $\sum_1^N U_n$ к сумме S , по определению, есть сходимость последовательности частичных сумм $\{S_n\}$ $\left(S_n = \sum_1^n U_k\right)$ к пределу S и наоборот, достаточно рассмотреть вопрос о преобразовании последовательностей [340].

В общем виде проблема ускорения сходимости последовательности заключается в том, чтобы по исходной $\{S_n\} (n=1, 2, \dots; S_n \rightarrow S)$ построить новую последовательность:

$$\sigma_{k,n} = A_k(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (k=1, 2, \dots), \quad (2.3)$$

которая удовлетворяет условиям:

- 1) новая последовательность сходится к тому же пределу, что и $\{S_n\}$;
- 2) $\sigma_{k,n}$ имеет лучшую, в некотором смысле, сходимость к S , чем $\{S_n\}$.

При этом критерий сравнения должен быть указан.

Если A_k – линейный оператор, то (2.3) определяют линейные методы ускорения.

Рассмотрим общий метод ускорения сходимости [344]. Пусть X – метрическое пространство с метрикой d , $\{S_n\} \in X$ сходится: $\lim_{n \rightarrow \infty} d(S_n, S) = 0$, ее предел $S \in X$. Пусть $A: \{S_n\} \rightarrow \{\bar{S}_n\}$ преобразование, $\bar{S}_n \in X$. Требуем, чтобы A обладало такими свойствами:

1. A – полностью регулярное, т.е. если $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S \in X$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{S}_n = S \in X$.

2. A – метод ускорения сходимости, если A – регулярное и

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(\bar{S}_n, S) / d(S_n, S) = 0.$$

3. а) A – линейный метод, если $A(\alpha\{S_n\} + \beta\{t_n\}) = \alpha A\{S_n\} + \beta\{t_n\}$.

б) A – нелинейный метод, если A удовлетворяет квазилинейным условиям:

$$A(\alpha\{S_n\}) = \alpha \cdot A\{S_n\}, A(\alpha + \{S_n\}) = \alpha + A\{S_n\}.$$

4. A – численно устойчивый алгоритм, у которого накопление погрешностей вычисления незначительно.

Преобразование (2.3) выбирается так, чтобы оно ускоряло сходимость любой последовательности $\{S_n\} \in X$. Рассмотрим множество последовательностей $\{S_n\}$. Если ввести зависимость S от параметра t , то получим

$$S(t) = \bar{S} + \sum_{k=1}^v a_k e^{a_k t}, \quad (2.4)$$

где a_k – произвольное комплексное число. Так как нелинейные преобразования могут быть применимы как к сходящимся, так и расходящимся последовательностям, то указанная аналогия между типом переходного процесса и типом процесса суммирования становится очевидной.

Заменив в (2.4) e^{a_k} на $q_k (|q_k| < 1)$, получим

$$S(t) = \bar{S} + \sum_{k=1}^v a_k q_k^t (q_k \in (0,1)). \quad (2.5)$$

В зависимости от значений v и коэффициентов a_k и q_k величина $S(t)$ может осциллировать или нет; быть устойчивой или нет, т.е. в общем случае обладает свойствами, указанными выше. Такая интерпретация дает основание

представлять некоторые последовательности $\{S_n\}$ как «математические переходные процессы», т.е. как функции от n вида:

$$S(n) = \bar{S} + \sum_{k=1}^{\nu} a_k q_k^n (q_k \in (0,1)). \quad (2.6)$$

Анализ подобного процесса должен выявить как порядок ν , так и «спектр» параметров a и q . Если последовательность $\{S_n\}$ удовлетворяет (2.6) и если $|q_k| < 1$, то $\bar{S} = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$. Если $\{S_n\}$ является переходным процессом, а также один или более $|q_k| \geq 1$, то $\{S_n\}$ не может сходиться, однако можно сказать, что $\{S_n\}$ расходится от \bar{S} . Поэтому параметр \bar{S} называется антипределом последовательности $\{S_n\}$ [341].

Вычисление \bar{S} можно рассматривать как *метод суммирования* $\{S_n\}$ или способ выделения главной части данной последовательности. Имеется немного последовательностей, которые, возникая в приложениях, фактически являются математическими переходными процессами некоторого конечного порядка ν . Остальные имеют бесконечный порядок, т.е. $\nu \rightarrow \infty$ в (2.6). Все прочие имеют также непрерывный спектр [341]:

$$S(n) = \bar{S} + \int_q^{q_1} a(q) q^n dq. \quad (2.6^a)$$

Функция $S(n)$ в (2.6) зависит от $2\nu+1$ параметров $\bar{S}, a_k, q_k, (k=1, 2, \dots, \nu)$. Первый из них имеет, как отмечено выше, важное значение. Исключая параметры a_k, q_k [343], получим при $\nu = k$ преобразование Шенкса-Шмидта:

$$\sigma_{k,n} = \bar{S} = D_{k,n}(S_n) / D_{k,n}^*, \quad (2.7)$$

где $D_{kn}(S_n) = \begin{vmatrix} S_{n-k}, S_{n-k+1}, \dots, S_n \\ \Delta S_{n-k}, \Delta S_{n-k+1}, \dots, \Delta S_n \\ \dots \\ \Delta S_{n-1}, \Delta S_n, \dots, \Delta S_{n+k-1} \end{vmatrix}$, $\Delta S_n = S_{n+1} - S_n$, а D_{kn}^* получается из D_{kn} заменой

первой строки на единице. Частный случай этого преобразования – приближения Эйткена:

при $k = 1$

$$\sigma_{1,n} = \frac{S_{n-1}S_{n+1} - S_n^2}{S_{n-1} - 2S_n + S_{n+1}}, \quad (2.8)$$

при $k = 2$

$$\sigma_{2,n} = \frac{S_{n-2} \begin{vmatrix} \Delta S_{n-1}, \Delta S_n \\ \Delta S_n, \Delta S_{n+1} \end{vmatrix} - S_{n-1} \begin{vmatrix} \Delta S_{n-2}, \Delta S_n \\ \Delta S_n, \Delta S_{n+1} \end{vmatrix} + S_n \begin{vmatrix} \Delta S_{n-2}, \Delta S_{n-1} \\ \Delta S_{n-1}, \Delta S_n \end{vmatrix}}{\Delta^2 S_{n-2} \Delta^2 S_n - (\Delta^2 S_{n-1})^2}.$$

Условие применимости преобразования: $D_{kn}^* \neq 0$. Целесообразно для вычислительной устойчивости использовать аппарат ветвящихся цепных дробей (ВЦД) [346], что позволяет получить эффективный алгоритм для машинной реализации:

а) в случае преобразования Эйткена получаем алгоритм в виде ветвящейся цепной дроби с двумя ветвями разветвления

$$\sigma_{1,n} = S_n + \frac{1}{1/\Delta S_n - 1/\Delta S_{n-1}}. \quad (2.8^a)$$

Формула (2.8^a) пригодна и для аналитического вычисления, ибо легко получить прямую оценку приближения $|\sigma_{1,n} - S_n| = O(\Delta S_n)$. Кроме того, используя (2.5) и (2.7), можно получить численную оценку приближения $|\sigma_{k,n} - S| = \alpha |S_{n+k} - S|$, где $0 < \alpha \leq 1$.

Для случая преобразования Шенкса-Шмидта (2.7) ($k = 1, 2, \dots$) нужно проверять эффективное условие ускорения сходимости

$$(-1)^k \Delta^k S_n > 0, \quad (2.9)$$

где $\Delta^k = \sum_{j=0}^k (-1)^j C_k^j$ – оператор центральной разности k -го порядка; C_k^j – биномиальные коэффициенты. При $k = 1$ из (2.9) получаем $S_{n+1} - S_n < 0$, т.е. $S_{n+1} < S_n$. В случае расходимости $\{S_n\}$ в правой части (2.9) знак меняется. Частичные суммы при этом выбираются верхними;

б) рекуррентные алгоритмы (ВЦД) вычисления преобразования Шенкса-Шмидта. Числовая реализация преобразования (2.7) возможна при помощи ε -алгоритма, устойчивого к ошибкам округления и накопления:

$$\varepsilon_{k+1}(S_n) = \varepsilon_{k-1}(S_{n+1}) + 1 / [\varepsilon_k(S_{n+1}) - \varepsilon_k(S_n)], \quad (2.10)$$

где $k=0, 1, 2 \dots$; $n = 2^k$; $\varepsilon_{-1}(S_n) = 0$; $\varepsilon_0(S_n) = S_n$; $\varepsilon_{2k}(S_n) = \sigma_{k,n}$; $\varepsilon_{2k+1}(S_n) = 1/\sigma_{k,n}(\Delta S_n)$.

Этот метод дает сходимость высшего порядка $\lim_{n \rightarrow \infty} |\varepsilon_{2k} - S| / |S_n - S| = 0$. Если знаменатель в (2.10) обращается в ноль, то это указывает на то, что точность уже достигнута на предыдущем этапе и она не может быть повышена данным методом.

Следует отметить, что ε -алгоритм тесно связан с интерполяционной формулой Тиле для S_n как рациональной функции от n [341]:

$$\varepsilon_r(S_n) = \frac{1}{2} \{ \rho_r(n) + S_{n+1} \}$$

где $\rho_r = S_{n+1} + 2 / [1 / \Delta S_{n+r} - 1 / \Delta S_{n+r-1}]$.

При $k = 1$, последовательно расписывая рекуррентную формулу (2.10), получим

$$\sigma_{1,n} = \varepsilon_2(S_n) = \varepsilon_0(S_{n+1}) + 1 / [\varepsilon_1(S_{n+1}) - \varepsilon_1(S_n)] = S_{n+1} + 1 / [1 / \Delta S_{n+1} - 1 / \Delta S_n] \text{ и т.д.}$$

Видно, что ε -алгоритм представляет собой ветвящуюся цепную дробь с двумя ветвями разветвления.

При $k = 2$ получим:

$$\begin{aligned}\sigma_{2,n} &= \varepsilon_4(S_n) = \varepsilon_3(S_{n+1}) + 1 / [\varepsilon_4(S_{n+1}) - \varepsilon_4(S_n)]; \\ \varepsilon_3(S_{n+1}) &= \varepsilon_2(S_{n+1}) + 1 / [\varepsilon_3(S_{n+1}) - \varepsilon_3(S_n)]; \\ \varepsilon_2(S_{n+1}) &= \sigma_{1,n+1}.\end{aligned}$$

в) линейную сходимость последовательности $\{S_n\}$ существенно ускоряет и Θ -алгоритм Брезинского [339]. Пусть имеется $\{S_n\} : \lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S$, построим новую последовательность $\{\Theta_k^{(n)}\}$, которая сходится к S быстрее $\{S_n\}$. Новая последовательность вычисляется с помощью рекуррентного алгоритма вида

$\Theta_{-1}^{(n)} = 0, \Theta_0^{(n)} = S_n$ – начальные условия;

$$\Theta_{2k+1}^{(n)} = \Theta_{2k-1}^{(n)} + 1 / \Delta \Theta_{2k}^{(n)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad n = 2^k;$$

$$\Theta_{2k+2}^{(n)} = \Theta_{2k}^{(n+1)} \cdot \Delta \Theta_{2k+1}^{(n+1)} / \Delta^2 \Theta_{2k+1}^{(n)},$$

для которого $\lim_{n \rightarrow \infty} |\Theta_{2k+2}^{(n)} - S| / |S_n - S| = 0$ и он ускоряет даже алгоритм Винна;

г) Нелинейный рекуррентный алгоритм Левина. Если

$R_n = S_n - S = A_r \sum_{i=0}^{k-1} \gamma_i / r^i$ явно зависит от n , где $r = n, n + 1, n + k$, γ_i –

произвольные действительные числа, а A_r – функция от S_r , то более эффективное ускорение дают преобразование Левина [343], имеющие вид:

$$T_{k,n} = \Delta^k B_n / \Delta^k C_n, \quad (2.12)$$

где $C_n = n^{k-1} / A_n, B_n = n^{k-1} S_n / A_n, \Delta^k = \sum_{j=0}^k (-1)^j C_k^j$ – разностный оператор.

В зависимости от вида (2.12) $A_n = \Delta S_n, A_n = n \Delta S_n, A_n = \Delta S_n \Delta S_{n+1} / \Delta^2 S_n$ носят название соответственно t, w, v преобразований.

При $k = 1$ t -преобразование совпадает с преобразованием Эйткена.

Численная реализация этого алгоритма осуществляется по формулам:

$$T_{k,n} = M_k^{(n)} / N_k^{(n)}; k=0,1,2,\dots; n=2^k, \quad (2.12^*)$$

$$M_k^{(n)} = (M_{k-1}^{(n)} - M_{k-1}^{(n+1)}) / \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+k+1} \right), M_{-1}^{(n)} = S_n / A_n;$$

где $N_k^{(n)} = (N_{k-1}^{(n)} - N_{k-1}^{(n+1)}) / \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+k+1} \right), N_{-1}^{(n)} = 1 / A_n.$

Данный алгоритм достаточно прост, обладает вычислительной способностью, ускоряет сходимость $\lim_{n \rightarrow \infty} |T_{k,n} - S| / |S_n - S| = 0$.

2.1.2 Задача обтекания профиля вблизи границы раздела

В случае малых возмущений для идеальной жидкости решение задачи сводится к решению интегрального уравнения [340]

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^{+1} \gamma(s) \left\{ \frac{1}{\xi-s} - G_1 \right\} ds = -F_{cp}(\xi) - \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^{+1} \chi(s) G_2 ds, \quad (2.13)$$

где χ и F_{cp} – функции форм профиля, а ядра D_1 и G_2 имеют

$$\text{вид } G_1 = (\xi - s) / \Delta; G_2 = \varepsilon / \Delta; \Delta(\xi - s)^2 + \varepsilon^2; \quad \varepsilon = 4\bar{h}(0).$$

Форма профиля задается $F = F_h \pm F_c$, где F_h – уравнение средней линии; F_c – распределение толщины.

В первом приближении по краевому приближению непротекания получим:

а) если $F_c = \sum_0^M \frac{b_n}{n+1} \xi^{n+1} w(\xi)$, то $F_{cp}^{(1)}(\xi) = -a + \sum_0^N a_n \xi^n$

б) если $F_c = \sum_0^M \frac{b_n}{n+1} \xi^{n+1} w(\xi)$, то $\chi^{(1)}(\xi) = 2w(\xi) \sum_0^M b_n \xi^n + 2w'(\xi) \sum_0^M \frac{b_n}{n+1} \xi^{n+1}$ где

$w=1$ – при острой передней кромке и $w=\sqrt{1-\xi^2}$ – для закругленной кромки, тогда

$$\chi^{(1)}(\xi) = 2w(\xi) \sum_0^M b_n \xi^n + 2w'(\xi) \sum_0^M \frac{b_n}{n+1} \xi^{n+1}.$$

Уравнение (2.13) представляет интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода, содержащее сингулярность в ядре:

$$\int_a^b k(\xi, s, \varepsilon) \gamma(s) ds = f(\xi). \quad (2.13^*)$$

Известно [319], что решение γ уравнения (2.13^{*}) неустойчиво относительно малых ошибок в данных $f(\xi)$, чувствительно к ошибкам в ядре $k(\xi, s)$ и практически не зависит от способа решения.

Сама задача (2.13) существенно не корректна и для ее решения необходимы способы регуляризации [345]. Причина некорректности при $\bar{h} \rightarrow 0$ заключается в вырождении интегрального уравнения (2.13) в дифференциальное уравнение, линейное относительно старшей производной. Несложные выкладки [339] дают следующее представление интегрального уравнения (2.13) краевой задачи обтекания:

$$\frac{\varepsilon^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \gamma^{(n)}(\xi) W_\alpha^n(\xi, \varepsilon) + \frac{1}{2\pi} \gamma(\xi) W_1 \langle \xi, s \rangle = \Phi(\xi), \quad (2.14)$$

где $\Phi(\xi) = -F_{cp}(\xi) - \frac{1}{2\pi} \chi(\xi) W_0(\xi, \varepsilon) - \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \chi_{(\xi)}^{(n)} W_\delta^n(\xi, \varepsilon)$,

$$W_\alpha^n(\xi, \varepsilon) = \int_{-1+\xi}^{1+\xi} \frac{U^{n-1} dU}{U^2 + \varepsilon^2},$$

$$W_1(\xi, \varepsilon) = \int_{-1}^{+1} \left\{ \frac{1}{\xi - s} - G_1 \right\} ds = \ln \frac{1+\xi}{1-\xi} \sqrt{\frac{(1-\xi)^2 + \varepsilon^2}{(1+\xi)^2 + \varepsilon^2}};$$

$$W_0(\xi, \varepsilon) = \int_{-1}^{+1} G_2 ds = \operatorname{arctg} \frac{1-\xi}{\varepsilon} + \operatorname{arctg} \frac{1+\xi}{\varepsilon};$$

$$W_\delta^n(\xi, \varepsilon) = \int_{-1}^{+1} (\xi - s)^n G_2 ds, \quad \varepsilon = 4\bar{h}(0).$$

Из уравнения (2.14) следует, что при $\bar{h} \rightarrow 0$ задача (2.13) вырождается в задачу типа пограничного слоя, что проливает свет на природу некорректности. Физические условия налагают ограничения на величину N . Можно решить задачу комбинированным способом, решая внешнюю (2.13) и внутреннюю (2.14) задачи [339], а затем провести согласование полученных решений.

Существует и другой метод. Строится возмущенное внешнее решение; а затем это решение, которое непригодно при $\bar{h} \rightarrow 0$, преобразуется так, что можно выявить природу сингулярности, а получаемое решение становится всюду равномерно пригодным, хорошим приближением к истинному решению. Улучшить количественно решение можно путем построения высших приближений, а затем, применяя нелинейные методы, добиться ускорения сходимости функциональной последовательности [339, 340]. Если последовательность расходится, что зависит от класса функции $f(\xi)$ в (2.13*), то нелинейные преобразования и алгоритмы, рассмотренные выше, позволяют выделить главную часть последовательности.

Представим решение интегрального уравнения (2.13) в виде $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$. Первое слагаемое обусловлено влиянием на циркуляцию формы средние линии, а второе – наличием динамической кривизны в случае обтекания телесного профиля вблизи границы раздела.

a) *Метод функционального параметра.* Представим решение γ_1 в виде ряда по параметру, $\tau = \sqrt{1+4\bar{h}^2} - 2\bar{h}$, получаемого путем отображения $\bar{h} \in [0, \infty]$ в отрезок $\tau \in [1, 0]$:

$$\gamma_1^{(n)} = \sum_{m=0}^N \gamma_{1(2m)}^{(n)} \tau^{2m}. \quad (2.15)$$

Для ядра существует разложение по параметру τ :

$$G_1 = \sum_{m=1}^N k_{1m} \tau^{2m}, \quad (2.16)$$

где k_{1m} определены в [340].

Ряд (2.16) сходится, причем абсолютно во всем практическом диапазоне изменения параметра r . Вопрос о сходимости ряда (2.15) остается открытым ввиду невозможности построения общего члена. Для конкретных форм профиля удается оценить область сходимости.

Подставляя (2.15) и (2.16) в (2.13), получаем последовательность сингулярных интегральных уравнений с ядром типа Коши:

$$\int_{-1}^{+1} \gamma_{1(2m)}^{(n)}(s) \frac{ds}{\xi - s} = \Phi_m^{(n)}(\xi), \quad m=0, 1, 2, \dots, N; \quad n=1, 2, \dots \quad (2.17)$$

Преобразуя это уравнение в классе функций a_∞^0 , получим

$$\gamma_{1(2m)}^{(n)}(\xi) = -\frac{1}{\pi^2} \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\xi}} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\xi}} \frac{\Phi_m^{(n)}(s)}{\xi - s} ds. \quad (2.18)$$

Функция $\Phi_m^{(n)}(m=1, 2, \dots, N)$ определяется по граничным через решения $\gamma_{1(2m)}^{(n)}(m=1, 2, \dots, N-1)$. Запишем последовательность решений при $N=13$ и $n=1$ для пластины, когда $F_{cp}^{(1)} = -\alpha$:

Подставив (2.19) в (2.18), получим

$$\gamma_{10}^{(1)}(\xi) = 2\alpha \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\xi}}, \quad \gamma_{l(2m)}^{(1)} = \gamma_{10}^{(1)} W_{2m}. \quad (2.20)$$

где $\gamma_{1(2m)}^{(n)}$ ($m = 1, 2, \dots, N-1$),

$$W_2 = \frac{3}{2} + \xi;$$

$$W_4 = \frac{9}{8} - \frac{1}{2}\xi - \frac{5}{2}\xi^2 - \xi^3;$$

$$W_6 = \frac{15}{16} - \frac{9}{8}\xi - \frac{5}{4}\xi^2 + 3\xi^3 + \frac{7}{2}\xi^4 + \xi^5;$$

$$W_8 = \frac{105}{128} - \frac{1}{16}\xi + \frac{53}{16}\xi^2 + \frac{43}{8}\xi^3 - \frac{21}{8}\xi^4 - \frac{15}{2}\xi^5 - \frac{9}{2}\xi^6 - \xi^7;$$

$$W_{10} = \frac{255}{256} + \frac{217}{128}\xi + \frac{145}{32}\xi^2 - \frac{19}{4}\xi^3 - \frac{165}{8}\xi^4 - \frac{33}{4}\xi^5 + \frac{27}{2}\xi^6 + 14\xi^7 + \frac{11}{2}\xi^8 + \xi^9;$$

$$W_{12} = \frac{1227}{1024} + \frac{471}{256} \xi - \frac{617}{256} \xi^2 - \frac{2553}{128} \xi^3 - \frac{889}{64} \xi^4 + \frac{305}{8} \xi^5 + \frac{415}{8} \xi^6 - \frac{3}{4} \xi^7 - \frac{275}{8} \xi^8 - \\ - \frac{45}{2} \xi^9 - \frac{13}{2} \gamma^{10} - \xi^{11};$$

$$W_{14} = \frac{2613}{2048} - \frac{263}{1024}\xi - \frac{5825}{512}\xi^2 - \frac{1631}{128}\xi^3 + \frac{11943}{256}\xi^4 + \frac{10773}{128}\xi^5 - \frac{837}{32}\xi^6 - \frac{553}{4}\xi^7 - \frac{1295}{16}\xi^8 + \frac{305}{8}\xi^9 + \frac{273}{4}\xi^{10} + 33\xi^{11} + \frac{15}{2}\xi^{12} + \xi^{13};$$

$$W_{16} = \frac{36297}{32768} - \frac{5617}{2048} \xi - \frac{20883}{2048} \xi^2 + \frac{27063}{1024} \xi^3 + \frac{99597}{1024} \xi^4 - \frac{6939}{256} \xi^5 - \frac{73617}{256} \xi^6 - \\ - \frac{20669}{128} \xi^7 + + \frac{32835}{128} \xi^8 + \frac{5325}{16} \xi^9 + \frac{1035}{16} \xi^{10} - \frac{101}{8} \xi^{11} - \frac{945}{8} \xi^{12} - \frac{91}{2} \xi^{13} - \frac{17}{2} \xi^{14} - \xi^{15};$$

$$\begin{aligned}
W_{18} = & \frac{4500439}{65536} + \frac{2374493}{32768} \xi + \frac{81825}{1024} \xi^2 + \frac{295437}{2048} \xi^3 + \frac{13037}{128} \xi^4 - \frac{100183}{512} \xi^5 - \frac{25677}{128} \xi^6 + \\
& + \frac{165239}{256} \xi^7 + \frac{33753}{32} \xi^8 + \frac{2049}{8} \xi^9 - \frac{20049}{32} \xi^{10} - 594 \xi^{11} + 77 \xi^{12} + 294 \xi^{13} + 187 \xi^{14} + \\
& + 60 \xi^{15} + \frac{19}{2} \xi^{16} + \xi^{17};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{20} = & -\frac{12616275}{262144} - \frac{5179823}{65536} \xi - \frac{8336061}{65536} \xi^2 - \frac{5550025}{32768} \xi^3 - \frac{3159457}{8192} \xi^4 - \frac{745381}{1024} \xi^5 + \\
& + \frac{149741}{1024} \xi^{13} - \frac{1885}{4} \xi^{14} - \frac{1151}{2} \xi^{15} - \frac{2223}{8} \xi^{16} - \frac{153}{2} \xi^{17} - \frac{21}{2} \xi^{18} - \xi^{19};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{22} = & \frac{13226620353}{131072} + \frac{31727501503}{262144} \xi + \frac{15878162445}{131072} \xi^2 + \frac{28124698211}{16384} \xi^3 + \\
& + \frac{11260016255}{65536} \xi^4 + \frac{6721286846}{32768} \xi^5 + \frac{420259071}{2048} \xi^6 + \frac{2705060269}{2048} \xi^7 + \frac{2688570425}{2048} \xi^8 + \\
& + \frac{80850475}{265} \xi^9 + \frac{41139813}{128} \xi^{10} + \frac{6691095}{256} \xi^{11} + \frac{5094639}{256} \xi^{12} - \frac{299933}{64} \xi^{13} - \frac{66759}{16} \xi^{14} - \\
& - \frac{1085}{2} \xi^{15} + \frac{20835}{16} \xi^{16} + \frac{8091}{8} \xi^{17} + \frac{1575}{4} \xi^{18} + 95 \xi^{19} + \frac{23}{2} \xi^{20} + \xi^{21};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{24} = & \frac{17129979402909}{4194304} + \frac{1241572992573}{262144} \xi + \frac{1889838437643}{524288} \xi^2 + \frac{1355616985531}{262144} \xi^3 + \\
& + \frac{1311925791219}{262144} \xi^4 + \frac{396503371015}{65536} \xi^5 + \frac{388978944203}{65536} \xi^6 + \frac{106117200107}{32768} \xi^7 + \\
& + \frac{58073081641}{16384} \xi^8 + \frac{116789059}{512} \xi^9 + \frac{337015355}{512} \xi^{10} - \frac{94300235}{512} \xi^{11} - \frac{28915279}{512} \xi^{12} - \\
& - \frac{4595813}{64} \xi^{13} - \frac{612715}{16} \xi^{14} - \frac{1086565}{16} \xi^{15} - \frac{9434469}{128} \xi^{16} - \frac{13413}{16} \xi^{17} - \frac{45135}{16} \xi^{18} - \\
& - \frac{13185}{8} \xi^{19} - \frac{4301}{8} \xi^{20} - \frac{231}{2} \xi^{21} - \frac{25}{2} \xi^{22} - \xi^{23};
\end{aligned}$$

Если ограничиться линеаризованной постановкой, то, используя (2.15) и (2.20), можно определить суммарные аэродинамические характеристики: коэффициент подъемной силы и момента тангажа по формулам

$$C_Y^{(n)} = \int_{-1}^{+1} \gamma^{(n)} ds; \quad C_M^{(n)} = \int_{-1}^{+1} \gamma^{(n)}(s) s ds. \quad (2.21)$$

В первом приближении по краевым условиям при $n = 1$ получим функции влияния параметра отстояния $\bar{h}(0)$ на $C_Y^{(1)}$ и $C_M^{(1)}$ в виде рядов по функциональному параметру τ :

$$\begin{aligned}\psi_Y^{(1)} = \frac{C_\gamma^{(1)}}{C_{\gamma^\infty}^{(1)}} &= 1 + \varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon^2 + \frac{3}{4}\varepsilon^3 + \frac{23}{32}\varepsilon^4 + \frac{11}{16}\varepsilon^5 + \frac{39}{64}\varepsilon^6 + \frac{163}{256}\varepsilon^7 + \frac{5491}{8192}\varepsilon^8 + \\ &+ \frac{2244877}{32768}\varepsilon^9 - \frac{5379225}{65536}\varepsilon^{10} + \frac{528804484515}{524288}\varepsilon^{11} + \frac{7641989002175}{2097152}\varepsilon^{12} + \\ &+ \frac{37205275391907}{16777216}\varepsilon^{13} + \dots;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_M^{(1)} = \frac{C_M^{(1)}}{C_{M^\infty}^{(1)}} &= 1 + \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon^2 + \frac{7}{16}\varepsilon^3 + \frac{15}{32}\varepsilon^4 + \frac{15}{32}\varepsilon^5 + \frac{29}{64}\varepsilon^6 + \frac{899}{2048}\varepsilon^7 + \\ &+ \frac{3587}{8192}\varepsilon^8 + \frac{192315}{16384}\varepsilon^9 - \frac{1604301}{6536}\varepsilon^{10} + \frac{128261286621}{524288}\varepsilon^{11} + \\ &+ \frac{2091064690271}{2097152}\varepsilon^{12} + \frac{4259769570263}{8388608}\varepsilon^{13} + \dots,\end{aligned}\tag{2.22}$$

где $\varepsilon = \tau^2$, $C_{\gamma^\infty}^{(1)} = 2\pi\alpha$, $C_{M^\infty}^{(1)} = -\pi\alpha$.

При формальном применении рассмотренного метода решение, представленное рядом (2.15)–(2.20), неустойчиво [345]. Считается, что достаточно нескольких членов ряда для грубого представления решения, ибо когда берется большое число членов ряда, то неустойчивость возрастает и фактически этот ряд, с большим количеством членов, не имеет ничего общего с действительным решением уравнения (2.13). Если же рассматривать эту неустойчивость как переходный процесс, то можно утверждать, что увеличение членов приближений доставляет дополнительную информацию о поведении действительного решения.

Пусть $\psi(\varepsilon)$ – аналитическая функция, тогда выражение (2.22) можно рассматривать как разложение в ряд Тейлора. Асимптотическое поведение коэффициентов этого разложения $\psi = \sum a_n \varepsilon^n$ регулируется типом особенности функции. Естественная постановка задачи об определении параметров особенности по ограниченной последовательности коэффициентов ряда [348]. Радиус сходимости рядов Тейлора определен особенностью функции (), близлежащей к точке, в окрестности которой представлено разложение. Может оказаться, что на поведение коэффициентов ряда оказывают влияние и более удаленные особенности. В этом случае нужно найти спектр особенностей. Рассмотренные выше алгоритмы позволяют решить задачу синтеза ().

б) Численное решение уравнения (2.13). Решение интегрального уравнения (2.13) может быть осуществлено путем сведения к системе алгебраических уравнений (метод дискретных особенностей, метод коллокации и др.). Указанные методы обладают сильной неустойчивостью [345], возникающей при использовании обычных квадратурных формул. Попытки улучшить ситуацию путем увеличения числа узлов при этом лишь ухудшают решение. Поскольку в основе решения сингулярного уравнения (2.13) лежат методы регуляризации, то выбор регуляризатора существенно повышает устойчивость вычислительной схемы. Особенность обтекания кромок профиля задает структуру решения $\gamma(\xi) = \sqrt{(1-\xi)/(1+\xi)} \cdot \nu(\xi)$, где $\nu(\xi)$ – регулярная функция, не обращающаяся в нуль при $\xi = \pm 1$. После подстановки данного решения в (2.13) и несложных преобразований получим

$$+ \frac{\varepsilon^2}{2\pi} \int_{-1}^{+1} \frac{\sqrt{1-s}}{\sqrt{1+s}} \frac{\nu(s)\psi(\xi, s)ds}{\xi-s} = \Phi(\xi),$$

где $(\) = /$, а $(\)$ – правая часть уравнения (2.13).

Выбирая узлы, контрольные точки и квадратурные коэффициенты по формулам:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \cos \theta_i ; \quad s_j = \cos \theta_j ; \quad \theta_i = \pi(2i-1)/(2N+1), \quad (i=1, 2, \dots, N) ; \quad \theta_j = 2\pi j/(2N+1); \\ A_j &= 2\pi \sqrt{1-s_j^2}/(2N+1) , \quad (j=1, 2, \dots, N) , \end{aligned}$$

получим систему алгебраических уравнений

$$\sum_{j=1}^N A_{i,j} Y_j = b_i, \quad (i, j = 1, 2, \dots, N - \text{количество узлов}), \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \text{где } A_{ij} &= \psi(\xi_i, s_i, \varepsilon)/(\xi_i - s_j) ; \quad Y_j = (1-s_j)\nu(s_j)/(2N+1) ; \\ b_i &= -F_{cp}(\xi_i)/\varepsilon^2 - \sum_{j=1}^N \chi(s_i) \sqrt{1-s_j^2} \psi(\xi_i, s_j, \varepsilon)/\varepsilon(2N+1) ; \quad \psi = 1/\Delta ; \quad \Delta = (\xi_i - s_j)^2 + \varepsilon^2 . \end{aligned}$$

АДХ профиля определяются по формулам (2.21). Переходя к квадратурным формулам, получим

$$C_Y \cong 2\pi \sum_{j=1}^N Y_j \quad \text{и} \quad C_M \cong 2\pi \sum_{j=1}^N Y_j S_j . \quad (2.21^a)$$

Использование алгоритма (ВЦД) для вычисления интегралов и нахождения решения систем алгебраических уравнений эффективно, т.к. нелинейные квадратурные и кубатурные формулы

$$S = T \left(\sum_{k=1}^n \bar{P}_k S(\bar{x}_k) \right) + R \quad (2.24)$$

веса, x_k – узлы, R – остаток) и метод (ВЦД) Недашковского-Скоробогатько [346] служат регуляризаторами в этом процессе.

Достоинство этого метода [344, 346] заключается в слабой чувствительности к ухудшению обусловленности матрицы коэффициентов. В основе его заложена само регуляризация за счет взаимного сокращения погрешности вычисления. Эффективно применение метода (ВЦД) для ускорения сходимости или отыскания антипредела последовательностей. С этой целью составляется система алгебраических уравнений с матрицами теплицевского типа. Так, для нахождения преобразования Шенкса-Шмидта имеем

$$\begin{bmatrix} 1; \Delta S_n \dots \Delta S_{n+k-1} \\ 1; \Delta S_{n+1} \dots \Delta S_{n+k} \\ \dots \\ 1; \Delta S_{n+k} \dots \Delta S_{n+2k-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_n \\ S_{n+1} \\ \dots \\ S_{n+k} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

После решения (2.25) преобразование находится по формуле

$$\sigma_{k,n} = 1/(z_1 + z_2 + \dots + z_{k+1}). \quad (2.26)$$

Для нахождения преобразования $T_{k,n}$ решается система

$$\begin{bmatrix} 1; A_n; A_n/n; \dots; A_n/n^{k-1} \\ 1; A_{n+1}; A_{n+1}/n+1; \dots; A_{n+1}/(n+1)^{k-1} \\ \dots \\ 1; A_{n+k}; A_{n+k}/n+k; \dots; A_{n+k}/(n+k)^{k-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \dots \\ \gamma_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_n \\ S_{n+1} \\ \dots \\ S_{n+k} \end{bmatrix}, \quad (2.27)$$

где $A_n = \Delta S_n$, $A_n = n\Delta S_n$, $A_n = \Delta S_n \Delta S_{n+1} / \Delta^2 S_n$ для t -, w - и v - преобразований Левина, соответственно. Практически можно находить только первые компоненты решений , а остальные k компоненты нужны для анализа спектра преобразования.

2.1.3 Преобразование расходящихся последовательностей и рядов

Если решение уравнения (2.13) найдено в виде ряда, то последовательность $(m = 0, 1, 2, \dots)$, как правило, расходится. В этом случае нелинейные преобразования используются для суммирования таких рядов и последовательностей.

Так как для справедливо представление (2.4), то по аналогии с рядами Фурье [349] применяют суммирование по Файеру:

$$\sigma_n = \frac{1}{n} \sum_1^n S_k \quad (2.28)$$

для ряда

$$\sigma_n = \sum_{i=0}^n \frac{n-i+1}{n} a_i \varepsilon^i . \quad (2.28^a)$$

Иногда известно положение особенности [341], наличие которой приводит к расходимости ряда, на оси или в области изменения параметра . Вводя какую-либо другую функцию сравнения, можно превратить расходящийся ряд в абсолютно или условно сходящийся ряд. Применение преобразования Эйлера [366] $= / (+ -)$ к рядам в (2.22) дает новые ряды

$$\bar{\Psi} = \sum_{k=0}^N (-1)^k \Delta^k \epsilon_0 \bar{\varepsilon}^k \cdot (1 - \bar{\varepsilon}),$$

где $\Delta a_0 = a_1 - a_0$; $\Delta^2 a_0 = a_2 - 2a_1 + a_0$; ...; $\Delta^k a_0 = \sum_{j=0}^k \epsilon_{k-j} (-1)^j c_k^j$; — оператор конечных разностей порядка k ; c_k^j — биномиальные коэффициенты. Повторяя указанную процедуру $\tilde{\epsilon} = \bar{\epsilon}/(1+\bar{\epsilon})$, можно добиться равномерного приближения решения $\psi = \sum_{k=0}^N (-1)^k a_k \epsilon^k$ на концах заданного интервала h . Исходный ряд при этом представляется в виде. Сгруппировав члены при одинаковых степенях ϵ , отбрасывая члены порядка $(-\epsilon)$, окончательно получим следующие выражения для аппроксимаций функций влияния отстояния h на подъемную силу и момент тангажа пластиинки при малых углах атаки:

$$\begin{aligned}
& \text{---} = +\text{---} + \text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - + \\
& \quad \text{-----} - +\text{-----} = +\text{-----} - +\text{-----} - \\
& \quad \text{-----} - \\
& \text{---} = +\text{---} + \text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - +\text{---} - + \tag{2.29} \\
& \quad \text{-----} - +\text{-----} - +\text{-----} - +\text{-----} - \\
& \quad \text{-----} -
\end{aligned}$$

Хотя данные ряды при больших h медленно сходятся, но область равномерной пригодности их шире. Поэтому применение нелинейных методов ускорения сходимости обеспечивает наилучшее приближение даже с помощью преобразования Эйткена с точностью до 2–3 значащих цифр для $\bar{h} \in [0.02, 0.1]$.

При больших h точность возрастает.

Приведем аналитическое выражение для последовательности $\sigma_{1,n}$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) , полученной из ряда $\psi = \sum_{m=0}^N a_m \varepsilon^m$.

$$\sigma_{1-n} = \sum_m^n b_m \varepsilon^m / (a_n - a_{n+1} \varepsilon), \quad (2.86)$$

где $b_0 \equiv q_0 q$; $b_1 \equiv q_1 q = q_0 q_{-1}$; ...; $b_n \equiv q_n q = q_{n-1} q_{-1}$.

Если в (2.8^б) $a_n - a_{n+1}\varepsilon \equiv 0$, то следует исследовать числитель дроби на нули. Пусть среди нулей полинома встречается $\varepsilon_{\text{кр}} = a_n/a_{n+1}$, подобный дефект является устранимым. Когда является полюсом, то нужно положить $\sigma_{1,n} = \sigma_{1,n-1}$. Появление полюса преобразования иногда указывает на границы сходимости ряда. Для ряда из (2.22) это $-(\)$, что согласуется с данными, полученными другими методами [339].

Для того чтобы какое-то преобразование обеспечило наилучшее приближение во всей области изменения параметра информации для данного количества приближений окажется недостаточно. В этом случае следует приближаться к истинному решению с помощью разных преобразований для каждого значения h . Преобразования Шенкса–Шмидта, Левина были построены на основе рациональной аппроксимации степенного ряда $\sum a_k x^k$. Они дополняют друг друга, поскольку погрешность их представления связана с разложением функции в ряд Лорана

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_k z^{-k}. \quad (2.30)$$

Первое слагаемое в (2.30) определяет погрешность по Шенксу, а второе – погрешность по Левину. В общем случае нужно иметь эти преобразования и рекуррентные способы их вычисления, чтобы автоматически проверять, если преобразование Шенкса не сходится или сходится медленно при $n_i \rightarrow \infty$, т.е. $(\sigma_{k,n_i} - \sigma_{k,n_{i+1}}) > \varepsilon$, то применять тогда преобразование Левина.

Если применить к рядам (2.22) и (2.29) сначала суммирование по Файеру (2.28^а), а затем для каждого h суммирование по алгоритмам Шенкса–Шмидта и Левина, то получим совпадение результатов с численным решением. Наилучшие аналитические приближения, полученные с помощью преобразования $\sigma_{k,n}$ ряда (2.29), дают рациональные дроби $\sigma_{1,3}; \sigma_{1,6}; \sigma_{2,7}; \sigma_{3,5}; \sigma_{3,8}$.

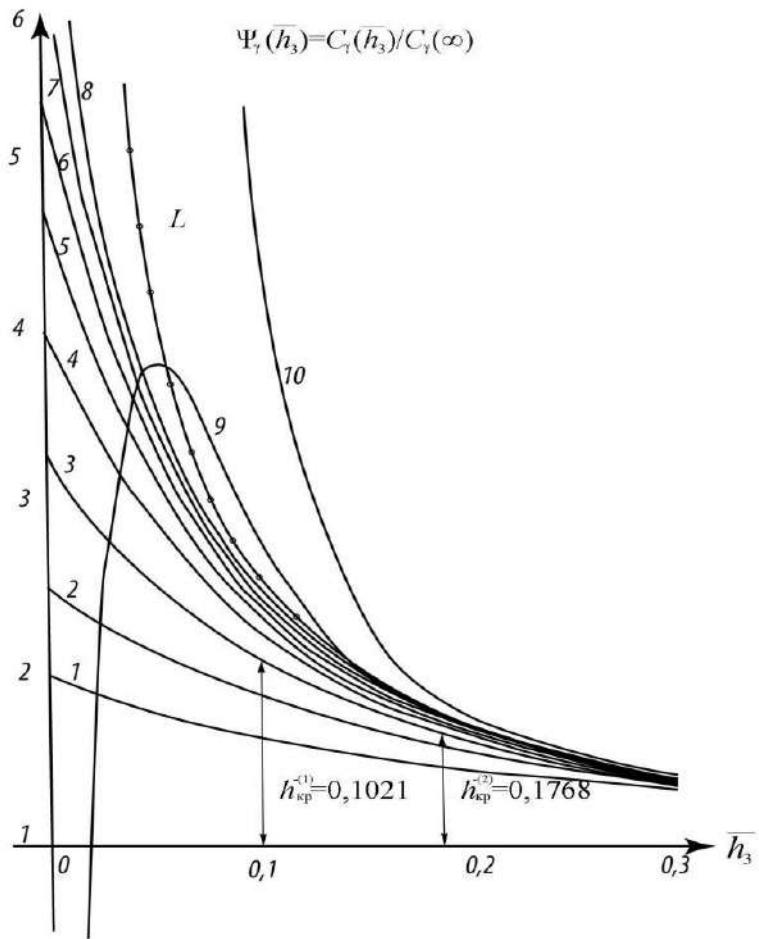


Рисунок 2.1 – Функция влияния отстояния \bar{h} на подъемную силу: L – функция влияния, полученная из (2.29) с помощью преобразования Левина для каждого \bar{h} ; о – результаты численного моделирования уравнения (2.13), полученные методом коллокации с использованием ВЦД-аппарата

На рисунке 2.1 приведены результаты расчета функции влияния по формуле (2.22), а также результаты применения к ряду (2.29) суммирования по Файеру с последующим суммированием по алгоритму Шенкса-Шмидта-Левина. Расчеты по указанному алгоритму очень хорошо совпадают с результатом численного решения интегрального уравнения (2.13) методом коллокации с использованием аппарата ВЦД по указанному алгоритму. На промежутке $\bar{h} \in (\bar{h}_{kp}^{(1)}, \bar{h}_{kp}^{(2)})$ четырехчленное разложение из (2.22) равномерно пригодно, но количественно результат далек от точного. Оптимальная асимптотика содержит девять членов, но при этом довольно быстро отклоняется от точного

решения; однако такое приближение как для $h < 0,01$ уже дает относительную погрешность менее 1 %. Приведенные здесь алгоритмы реализованы в виде программ решения систем алгебраических и интегральных уравнений.

2.2 Метод решения задач обтекания решетки суперкавитирующих профилей гидродинамических реакторов

Современные гидродинамические проблемы порождаются стремлением повысить скорость и улучшить другие характеристики транспортных аппаратов, форсировать технологические процессы и создать новые, более напряженные гидравлические сооружения и др. Введение адекватных моделей явлений, т.е. моделей «второго поколения», позволяет составить правильное физическое представление, осмыслить эксперименты и с их помощью выработать теоретические методы удовлетворительных расчетов самых различных эффектов. Здесь использование таких моделей показано на примере суперкавитационных течений [348].

Рассмотрим метод особенностей, используемый в гидродинамике. Данный метод считается универсальным, так как может применяться к решению задач обтекания, как плоских, так и трехмерных тел (например, крыльев конечного размаха). Суть метода состоит в линеаризации течения [349], что позволяет складывать скорость набегающего потока V_1 и возмущенную скорость $v = v_x + i v_y$, тогда скорость течения в точке равна $V = V_1 + v$. Причем считается, что $v/V_1 \ll 1$. Согласно линеаризованной теории, профили и каверны считаются тонкими, углы атаки малыми. Более строго, когда углы наклона касательных к профилю и границам каверны по направлению набегающего потока малы. Поэтому возмущения (скорости, давления), вносимые профилями в плоскопараллельный поток, можно считать малыми. На этом основании проводится линеаризация области течения. Профиль и границы каверны заменяются отрезками прямых. На рисунке 2.2 показаны физическая плоскость

течения (рисунок 2.2, а) и линеаризованная плоскость течения (рисунок 2.2, б) [349].

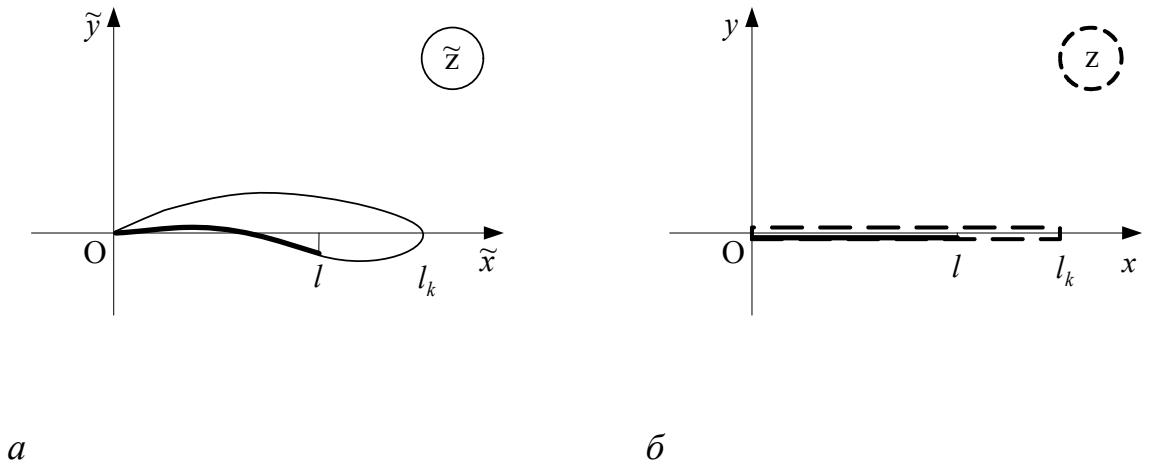


Рисунок 2.2 – Линеаризация течения: *а* – физическая плоскость течения; *б* – линеаризованная плоскость течения

Границные условия также линеаризуются [349]. На нагнетательной стороне профиля:

$$\frac{v_y}{V_1} = \frac{dy_f}{dx}, \quad 0 < x < l_k, \quad y = 0^-, \quad (2.31)$$

где v_y – мнимая часть возмущенной скорости; V_1 – скорость набегающего потока; $y_f = f(x)$ – уравнение формы профиля; l_k – длина каверны.

На границе каверны линеаризованное уравнение Бернулли записывается как

$$\frac{v_x}{V_1} = \frac{\sigma}{2}, \quad 0 < x < l_k, \quad y = 0^+, \quad l < x < l_k, \quad y = 0^-, \quad (2.32)$$

где v_x – действительная часть возмущенной скорости; V_1 – скорость набегающего потока; σ – число кавитации; l_k – длина каверны.

На бесконечности вверх по потоку:

$$v_x = v_y = 0. \quad (2.33)$$

где v_x – действительная часть возмущенной скорости; v_y – мнимая часть возмущенной скорости. Условие замкнутости каверны выражается в виде:

$$\oint_z v_y dx = 0, \quad (2.34)$$

где z – замкнутый контур, состоящий из линии границ каверны и профиля; v_y – мнимая часть возмущенной скорости.

Возмущенная скорость v вызывается потенциалами вихрей и источников, непрерывно распределенных вдоль смоченной части профиля – средней линии системы «профиль-каверна». Потенциал возмущенных скоростей определяется по интенсивности вихрей $\gamma(z)$ и источников $q(z)$ через сингулярные интегралы типа потенциала простого и двойного слоя. Затем, удовлетворяя краевым условиям, получают систему сингулярных интегральных уравнений. Поэтому метод особенностей иногда называется методом интегральных уравнений.

В общем случае (нелинейном) полученная система интегральных уравнений аналитически неразрешима. В основном это вызвано неопределенностью границ каверны, что влечет неопределенность контуров интегрирования в выражениях для возмущенных скоростей. В линейном случае задача упрощается, так как границы каверны и смоченной части профиля в линеаризованной плоскости совпадают с берегами прямолинейного разреза вдоль оси Ox . В этом случае возмущенные скорости определяются через интеграл [349] вдоль разреза $(0, l_k)$:

$$\vec{v} = \frac{d\omega}{dz} = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{l_k} \frac{\gamma + iq}{x - s} ds.$$

Подставляя действительные и мнимые части этого выражения в граничные условия (2.31)–(2.34) получим систему сингулярных интегральных уравнений.

Условие (2.33) выполняется автоматически. Условие замкнутости каверны (2.34) записываются в виде

$$\int_0^{l_k} q(s) ds = 0.$$

Система интегральных уравнений при обтекании решетки тонких суперкавитирующих профилей имеет вид [349]:

$$\int_0^1 \gamma(s) k_1(x-s) ds + \frac{q(x)}{2} + \int_0^{l_k} q(s) k_2(x-s) ds = -\frac{df(x)}{dx}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (2.35)$$

$$\frac{\gamma(x)}{2} - \int_0^1 \gamma(s) k_2(x-s) ds + \int_0^{l_k} q(s) k_1(x-s) ds = \frac{\sigma}{2}, \quad (2.36)$$

$$\int_0^{l_k} q(s) ds = 0, \quad (2.37)$$

Здесь $k_1(x-s) = \frac{1}{4t} \frac{\cos \gamma \operatorname{sh} a + \sin \gamma \operatorname{sh} b}{\operatorname{sh}^2 \frac{a}{2} + \sin^2 \frac{b}{2}}$, $k_2(x-s) = \frac{1}{4t} \frac{\sin \gamma \operatorname{sh} a + \cos \gamma \operatorname{sh} b}{\operatorname{sh}^2 \frac{a}{2} + \sin^2 \frac{b}{2}}$,

$$a = \frac{2\pi}{t}(x-s)\cos \gamma, \quad b = \frac{2\pi}{t}(x-s)\sin \gamma.$$

Длина профилей в линеаризованной плоскости принята равной единице; форма задается уравнением $y_f = f(x)$. Данная система содержит неизвестные искомые функции $\gamma(x)$, $q(x)$ и неизвестное число кавитации σ . Кроме параметров решетки и профилей задается длина каверны l_k , что необходимо для разрешимости системы. Поэтому в смысле постановки задачи метод интегральных уравнений имеет некоторый недостаток: чтобы получить данное число кавитации, обычно известное по параметрам набегающего потока, необходимо варьировать длиной каверны l_k , т. е. решать систему (2.35)–(2.37), которая имеет только численное решение, несколько раз. В этом случае применяют способ дискретных особенностей С.М. Белоцерковского, или модифицированный способ И.И. Ефремова. Непрерывное распределение особенностей заменяется дискретным, при этом система (2.35)–(2.37) переходит

в систему линейных алгебраических уравнений. Число расчетных точек, определяющих размерность новой системы, а также расположение дискретных особенностей выбираются в зависимости принадлежности искомых функций $\gamma(x)$, $q(x)$ к нужным классам и из требований быстрой сходимости и точности численного алгоритма.

Взаиморасположение расчетных точек и особенностей обычно делается по методу «3/4» и для улучшения сходимости предварительно производится замена переменных: $z = \sqrt{x}$, $\tau = \sqrt{s}$. Коэффициенты гидродинамических сил и момента определяются через интенсивность вихрей представлены как

$$C_x = -2 \int_0^1 \gamma(x) \frac{df}{dt} dx, \quad C_y = 2 \int_0^1 \gamma(x) dx, \quad C_m = 2 \int_0^1 \gamma(x) x dx.$$

Методом дискретных особенностей «3/4» решены различные задачи обтекания решеток тонких суперкавитирующих профилей. Однако локальные характеристики вблизи кромок профиля рассчитываются не слишком точно [342]. В связи с этим для вычисления одномерных сингулярных интегралов предпочтительнее квадратура А.А. Корнейчука [350], приведенная к удобному для применения виду для случая некоторых весовых функций в работе [342] и позволяющая получить более точный расчет локальных характеристик профиля, по сравнению с квадратурой «3/4», особенно вблизи кромок. При этом интегральные характеристики профилей вычисляются точно, если уравнения их формы задаются произвольными полиномами степени не выше некоторого определенного числа [342]. Блок-схема алгоритма решения задачи приведена на рисунке 2.3.

В случае обтекания изолированной плоской пластины система (2.35)–(2.37) имеет аналитическое решение. Не приводя подробных выкладок решения, запишем окончательные соотношения [1, 351], позволяющие для заданного значения числа маха M_0 определить гидродинамические характеристики суперкавитирующей пластинки:

$$C_y = \frac{\pi\alpha}{2} \cdot \frac{4 + \bar{\chi}^2}{\bar{\chi}^2} \cdot \frac{\sqrt{4 + \bar{\chi}^2} - 2}{\beta}, \quad (2.38)$$

$$\bar{\chi} = \frac{\chi}{\alpha} \beta = \frac{2}{\sqrt{l_k - 1}},$$

где C_y – коэффициент подъемной силы; α – угол атаки; $\beta = \sqrt{1 - M_0^2}$ – коэффициент сжатия потока; M_0 – число Маха; $\bar{\chi}$ – число кавитации сжимаемой жидкости; χ – число кавитации несжимаемой жидкости; l_k – длина каверны. При $\chi/\alpha \ll 1$ получим аппроксимацию вида:

$$\frac{C_y}{\alpha} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{4} \left(\frac{\chi}{\alpha} \right)^2 \beta \right).$$

Сопоставление расчетов по формуле (2.38) с известными решениями дано на рисунке 2.4. Из этих данных видно, что линейная теория (метод особенностей) дает достаточно хорошее приближение при малых числах кавитации и углах атаки. Однако в отличие от нелинейных теорий линеаризованная теория позволяет стоять решения также и для пространственных задач, представляющих наибольший интерес для технических приложений, в частности для суперкавитирующих лопастных механизмов, а также для нестационарных режимов работы.

Сравнение показывает, что при значениях числа кавитации, не превышающих 0,2, все расчетные схемы дают достаточно близкие результаты. При больших значениях числа кавитации χ вид расчетной схемы, а также величина суммарной циркуляции вокруг системы контур-каверна начинают играть существенную роль при определении подъемной силы C_y пластины. Наибольшее различие расчетных гидродинамических характеристик пластины наблюдается при режимах обтекания, когда расчетная длина каверны близка к длине пластины.

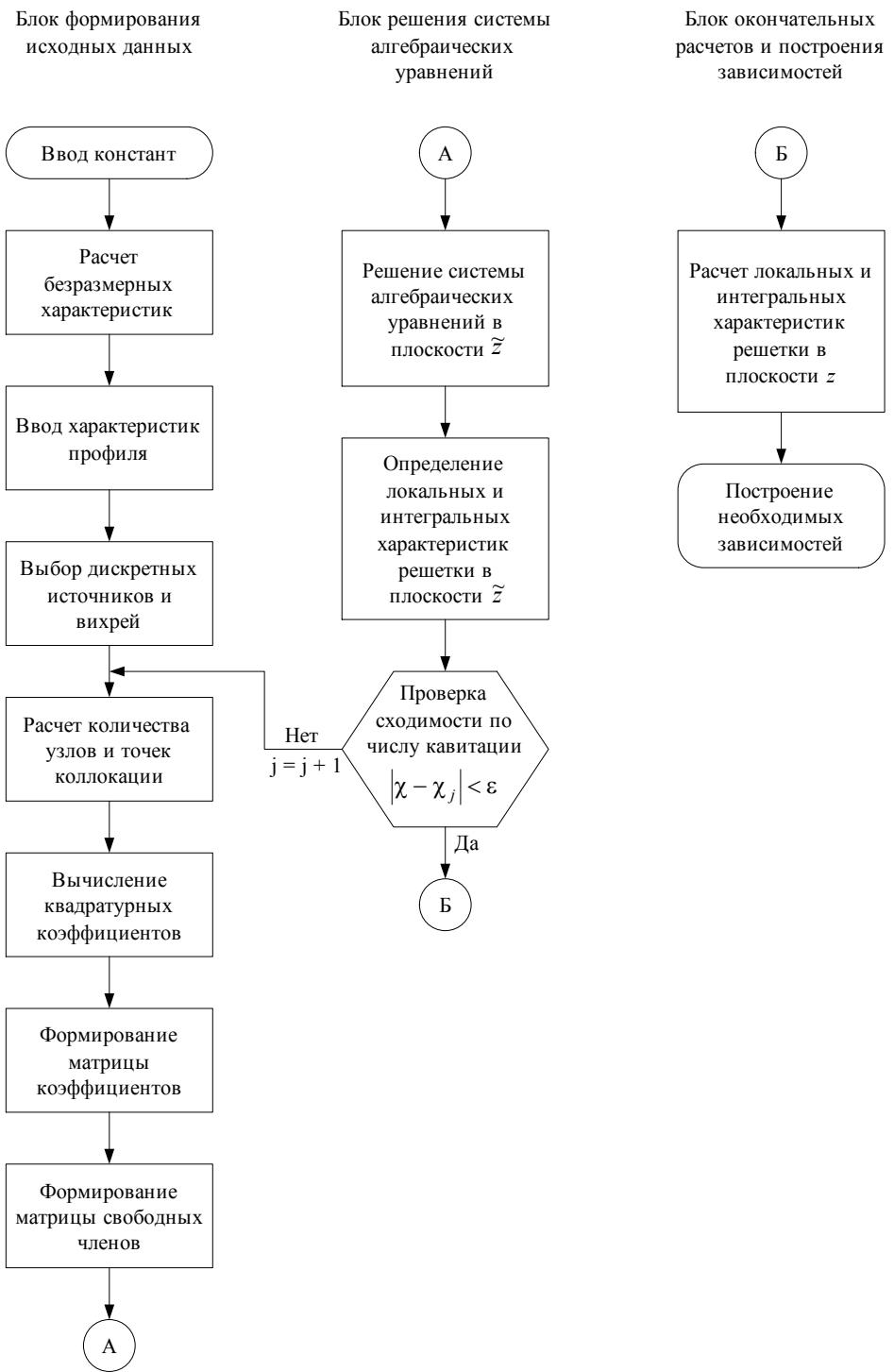


Рисунок 2.3 – Блок-схема решения задачи обтекания суперкавитационной решетки профилей

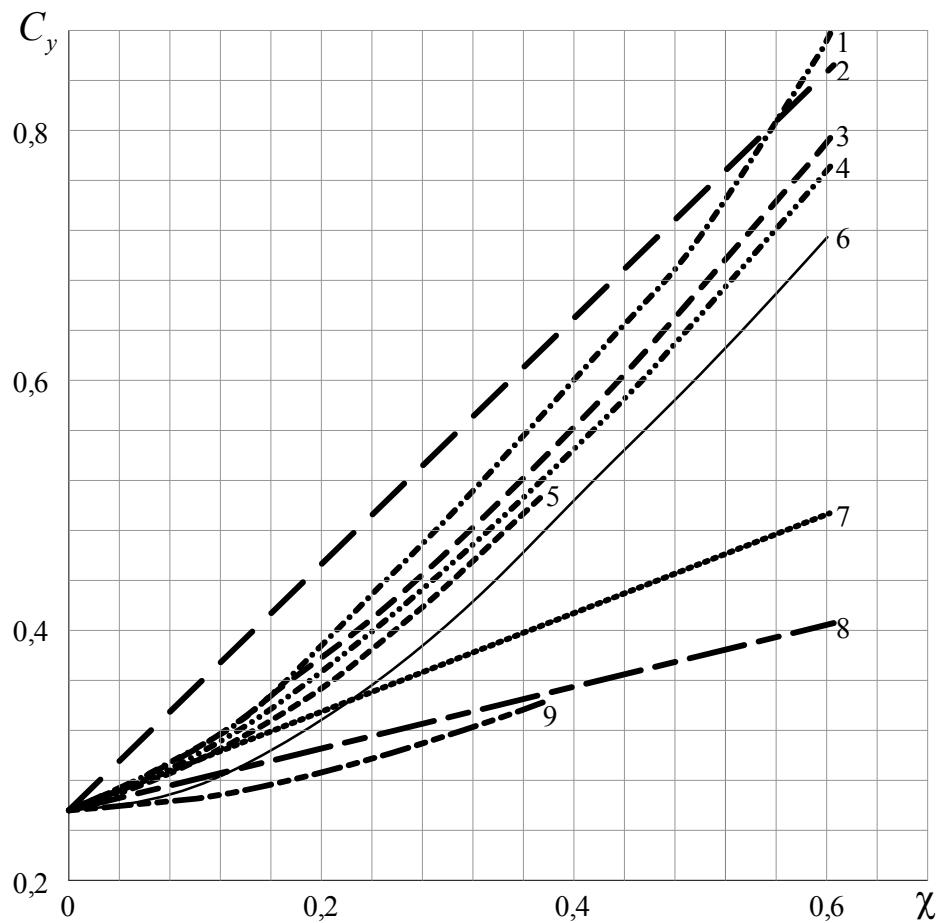


Рисунок 2.4 – Сравнение гидродинамических характеристик кавитирующей пластины, рассчитанных с использованием различных схем при угле атаки $M_0 = 0$, $\alpha = 0,16^\circ$: 1 – результаты расчета по схеме Тулина [352]; 2 – по формуле А. Бетца-Л.И. Седова [342], $C_y = \pi\alpha/2 + \chi$; 3 – результаты работы А.Г. Терентьева, В.А. Лазарева [352]; 4 – результаты расчета по схеме Рошко [376]; 5 – результаты расчета по схеме Рябушинского [352]; 6 – результаты расчета по формуле (2.38); 7 – аппроксимация результатов расчета по схеме Рябушинского [342], $C_y = \pi\alpha/2 + 0,4\chi$; 8 – результаты расчета по формуле Л.А. Эпштейна-Рейхардта [342], $C_y = \pi\alpha(1+\chi)/2$; 9 – результаты расчета системы (2.35)–(2.37) В.М. Романом [353] по теории несущей поверхности для изолированного профиля

Это обусловлено периодическим изменением условий обтекания задней кромки вследствие нестационарности процесса, т.к. имеет место непрерывного изменения кавитационной полости от ее зарождения в точке возникновения кавитации до некоторых максимальных размеров, после чего под действием явлений, происходящих в хвостовой части, происходит постепенное разрушение каверны, приводящее при определенных условиях к ее полному исчезновению на некоторый короткий промежуток времени.

В теоретических работах при исследовании данных режимов кавитации последние рассматриваются как стационарные с постоянными границами. Естественно, что результаты этих исследований дают весьма приближенное представление о явлении. Значительный разброс гидродинамических характеристик в таком режиме наблюдается и при экспериментальных исследованиях кавитационных течений. Это объясняется тем, что реальный режим обтекания крыла существенным образом отличается от тех стационарных схем обтекания, которые заложены в основу расчетов.

2.3 Расчет крыльчатки кавитационного смесителя для получения топливных эмульсий и суспензий с целью повышения энергоэффективности

Явление кавитации в жидкостях, и вызываемые кавитацией эффекты, известны уже давно. Жидкость, твердые поверхности и тела, находящиеся в жидкости, в той области, где развилась кавитация, подвергаются кавитационному воздействию, которое проявляется через дробление капель жидкости на более мелкие, разрушение твердых границ потока и диспергацию твердых тел. На завершающейся стадии схлопывания кавитационно активных микропузьрьков излучается ударная волна, в локальном объеме вблизи и внутри микрополости возникают поля высоких давлений (до 10 000 МПа) и температур (от 1000 до 15000 °C). При определенных условиях, на стенке микрополости образуется высокоскоростная струйка жидкости, которая ударяет

в противоположную стенку со скоростью от 100 до 520 м/с. Это объясняет шум и кавитационное воздействие, и дает предпосылки к использованию кавитации для получения концентрированных эмульсий и супензий.

Действительно, испытания машин, в которых возникает кавитация, для получения концентрированных эмульсий и супензий по сравнению с традиционными, показали большую эффективность, при меньших затратах энергии [354]. Изменяющееся давление в жидкости получают при колебании или движении твердого тела в жидкости, либо обтекании жидкостью твердого тела, или при быстром истечении жидкости в другую жидкость. При колебании твердого тела в жидкости возникает вибрационная кавитация, в остальных случаях – гидродинамическая. Общей особенностью является то, что во всех случаях образуются не единичные кавитационные микропузырьки, а скопления – ансамбли, состоящие из множества микропузырьков. Проведенные исследования дают достаточно оснований утверждать, что поведение единичного микропузырька и их ансамбля одинаково. Кроме того, кавитационное воздействие единичного микропузырька проявляется в кавитационном воздействии групп микропузырьков. Однако скопление микропузырьков характеризуется намного более сильным и обширным кавитационным воздействием, что объясняется связанным взаимодействием и воздействием ансамбля микропузырьков.

Рассмотрим несколько смесителей, предназначенных для кавитационной обработки твердых веществ и жидкостей, которые могут быть использованы при производстве топливных супензий и эмульсий. Типичный кавитационный смеситель содержит корпус с патрубками для подвода компонентов и отвода смеси, расположенный в нем приводной вал, установленный на последнем кавитатор, выполненный в виде крыльчатки, лопасти которой размещены с нулевым шагом в плоскости, перпендикулярной оси вращения.

Более совершенный кавитационный смеситель [355], кроме того, имеет турбулизирующие элементы на внутренних поверхностях рабочей камеры,

которые наклонены в противоположную сторону направления вращения крыльчатки.

Недостаток данных кавитационных смесителей заключается в том, что входная кромка каждой лопасти крыльчатки параллельна плоскости, в которой лежит ось вращения приводного вала, но смещена от неё. В этом случае направление вектора скорости набегающего потока на входной кромке лопасти все больше отличается от нормального направления с ростом ширины лопасти, и с уменьшением рассматриваемого радиуса от конца к корню лопасти. Это приводит к увеличению центробежной силы, что затрудняет смешивание компонентов, значительно различающихся по плотности; увеличению пути, проходимого потоком по лопасти, что повышает опасность возникновения кавитационных явлений на поверхности лопасти и, следовательно, её кавитационного разрушения. Следующим недостатком данных кавитационных смесителей является то, что толщина выходных кромок лопастей крыльчатки линейно увеличивается от конца к корню лопасти, а по [355] постоянна по длине лопасти. Это приводит к тому, что при определенной скорости вращения приводного вала, интенсивность кавитационного воздействия достаточна, чтобы происходило разрушение крыльчатки. В противном случае, если скорость вращения приводного вала ниже определенного значения, исключающего разрушение крыльчатки, кавитационные явления охватывают меньшую часть объема рабочей камеры, снижается эффективность кавитационного воздействия. Таким образом, конструктивный учет недостатков крыльчатки представляет основное направление совершенствования кавитационных смесителей.

Здесь рассматривается машина с подвижным кавитатором – кавитационный смеситель [356], показанный на рисунке 2.5. Кавитация возникает при вращении твердого тела с острыми кромками – лопастной крыльчатки. За лопастями создается область, заполненная скоплениями микрополостей, в которой происходит кавитационное воздействие на

смешиваемые компоненты. Одновременно с этим смесь интенсивно перемешивается.

Кавитационный смеситель включает в себя корпус с цилиндрической рабочей камерой 1, в которой расположен приводной вал 2, на котором закреплен кавитатор в виде крыльчатки 3. На корпусе размещены патрубки 4 для подвода компонентов и патрубок 5 для отвода смеси. На внутренней цилиндрической стенке рабочей камеры 1 установлены турбулизирующие элементы П-образной формы 6. На торцевых стенках рабочей камеры 1 размещены турбулизирующие элементы в виде отрезков лент 7.

Кавитационный смеситель работает следующим образом. В патрубки 4 подвода компонентов поступают смешиваемые вещества. При вращении крыльчатки 3, расположенной на валу 2, за ее лопастями образуются каверны, заполненные кавитационными микропузырьками, при «схлопывании» которых генерируются интенсивные быстроизменяющиеся поля высоких давлений и температур, воздействующие на компоненты, которые образуют устойчивую смесь. Отсутствие кавитационного воздействия на крыльчатку достигается использованием коэффициента $K = 0,7\text{--}0,85$ при расчете толщины выходных кромок лопастей. Данный коэффициент получен на основе обобщения экспериментальных данных [357] и предусматривает резкое снижение интенсивности кавитации перед входными кромками лопастей. В указанном источнике отмечается, что интенсивность кавитации максимальна в конце каверны, хотя зона кавитационного воздействия, в целом, гораздо шире и простирается вверх и вниз по потоку от зоны максимального воздействия. Также отмечается, что при прочих равных условиях, интенсивность кавитации в конце каверны возрастает при увеличении длины каверны. При неизбежном стремлении к вращению смесь затормаживается турбулизирующими элементами 6 и 7. Конфигурация турбулизирующих элементов 6 способствует также процессу интенсивного турбулентного микроперемешивания в вихревых следах, а соответствующее размещение турбулизирующих элементов 7 – циркуляции потока в меридиональной плоскости. Все это в совокупности

приводит к эффективному кавитационному воздействию на компоненты по всему объему и играет существенную роль в образовании устойчивой их смеси.

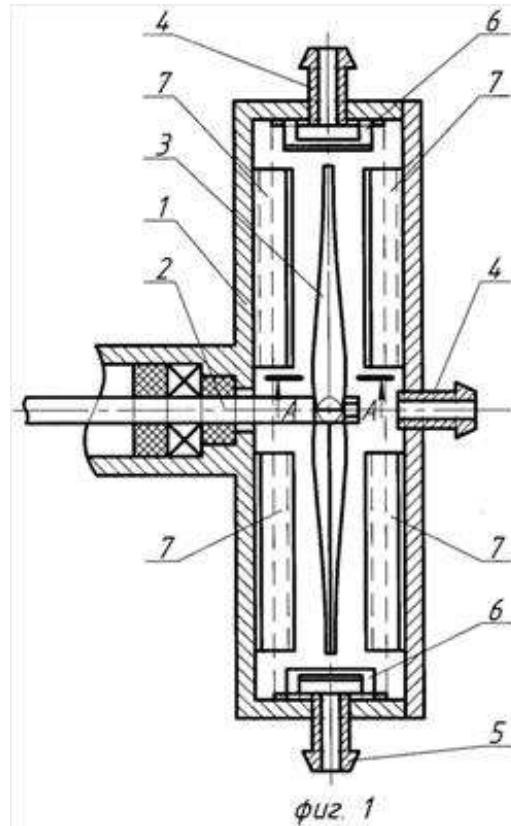


Рисунок 2.5 – Кавитационный смеситель [379]

В основу расчета крыльчатки положена задача обеспечить стабильное, интенсивное кавитационное воздействие на смешиаемые компоненты, сократить время обработки смеси, при этом, не допуская кавитационное разрушение крыльчатки, и таким образом повысить эффективность работы и срок службы кавитационного смесителя.

Поставленная задача решается тем, что в кавитационном смесителе с кавитатором, выполненным в виде крыльчатки (рисунки 2.6 и 2.7), лопасти которой имеют клиновидный профиль сечения, и размещены с нулевым шагом в плоскости, перпендикулярной оси вращения крыльчатки, входные кромки лопастей и ось вращения крыльчатки лежат в одной плоскости, а выходные кромки лопастей имеют переменную толщину $2h$, которая определяется путем последовательных итераций на радиусах от конца к корню лопасти до выполнения условия:

$$\ell_k = K \cdot p, \quad (2.39)$$

где $\ell_k = (2.6h/\chi)\sqrt{C_x/k}$ – длина каверны [356], м; h – половина толщины выходной кромки лопасти, м; $\chi = 2(p_0 - p_k)/\rho v^2$ – число кавитации; p_0 – давление в рабочей камере, Па; p_k – давление в каверне, принимают равным давлению насыщенных паров жидкого компонента при температуре смеси, Па; ρ – плотность смеси, кг/м³; v – линейная скорость лопасти, м/с; $C_x = 0.175 + 0.3\chi$ – коэффициент кавитационного сопротивления [356]; $k = (1+50\chi)/(1+56.2\chi)$ – эмпирический коэффициент [356]; $K = 0.7–0.85$ – коэффициент для учета зоны кавитационного воздействия; $p = \pi r \eta / 180$ – длина дуги на радиусе от выходной кромки лопасти до входной кромки следующей лопасти, м; $\eta = 360/n - \beta$ – центральный угол дуги p , град; n – количество лопастей крыльчатки; β – центральный угол дуги на радиусе от входной кромки до выходной кромки одной лопасти, град.

Рассмотрим расчет крыльчатки кавитационного смесителя для следующих исходных данных:

$r = 0.02$ – расстояние от оси вращения до корня лопастей, м;

$R = 0.20$ – расстояние от оси вращения до конца лопастей, м;

$\alpha = 90^\circ$ – угол входной кромки клиновидного профиля сечения лопасти, град;

$N = 10000$ – частота вращения крыльчатки, об/мин;

$n = 2$ – количество лопастей крыльчатки, шт.

Форму лопастей крыльчатки рассчитывают согласно выражению (2.39). За h принимают половину толщины выходной кромки лопасти (рисунок 2.7). Рассмотрим случаи, когда размер h на радиусах от конца к корню лопасти:

- рассчитан согласно формуле (2.39) путем последовательных итераций на радиусах от конца к корню лопасти (h_1);

- линейно увеличивается [356], причем размер конца и корня лопасти принимают из результата, который получен с помощью последовательных итераций (h_2);
- постоянен [355] и равен размеру конца лопасти, который получен с помощью последовательных итераций (h_3).

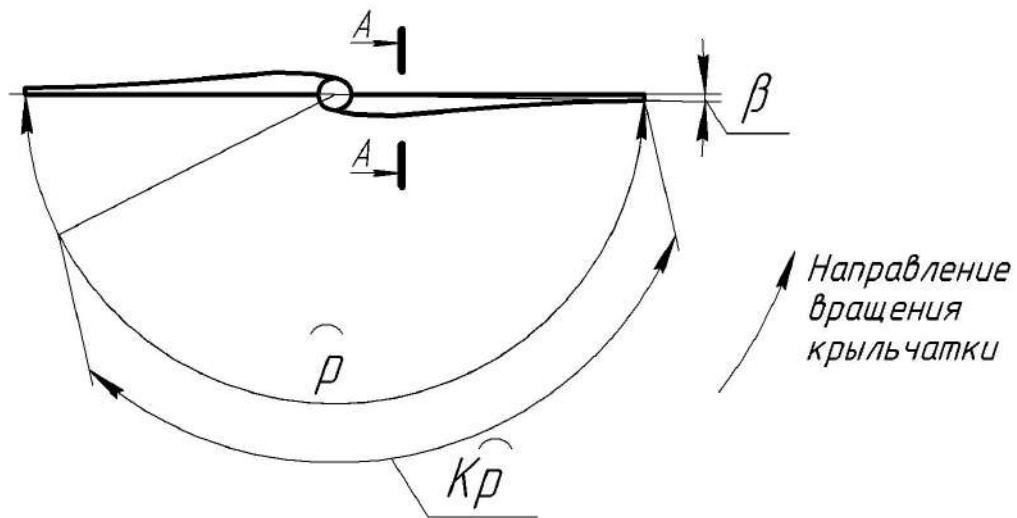


Рисунок 2.6 – Крыльчатка кавитационного смесителя

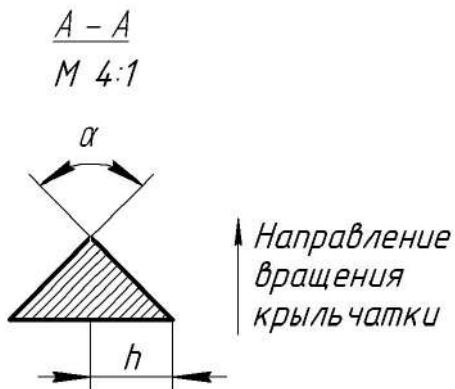


Рисунок 2.7 – Разрез А–А на рисунке 2.6

Для каждого случая рассчитаем длину каверны, и сравним её с длинной дуги r на радиусах от выходной кромки лопасти до входной кромки следующей лопасти. Найденные значения длины каверн на радиусах от конца к корню лопасти, и размер h представлены на рисунках 2.8 и 2.9 соответственно.

Из графиков, представленных на рисунке 2.8, видно, что длина каверны, соответствующая размеру h_2 превышает длину дуги p между выходной кромкой лопасти до входной кромки следующей лопасти на радиусах от 0,05 до 0,18 м. Это значит, что зона максимального кавитационного воздействия находится на лопастях.

Следовательно, лопасти могут достаточно быстро разрушиться, резко снижается срок их службы. Кроме того, частицы материала, из которого изготовлены лопасти, попадают в приготавливаемую смесь. Также, в этом случае, лопасти постоянно находятся в нестационарной хвостовой части каверны, создаваемой предыдущей лопастью, а это приводит к вибрации лопастей, которая передается по приводному валу и снижает срок службы вспомогательных узлов кавитационного смесителя.

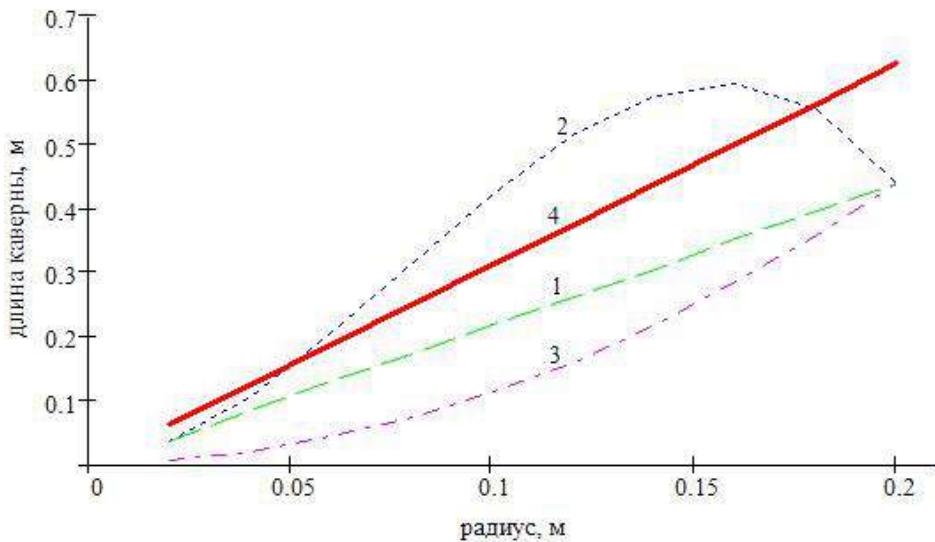


Рисунок 2.8 – Изменение длины каверны в зависимости от радиуса крыльчатки:
1 – длина каверны, соответствующая размеру h_1 ; 2 – h_2 ; 3 – h_3 ; 4 – длина дуги p
от выходной кромки лопасти до входной кромки следующей лопасти

Длина каверны, соответствующая размеру h_1 на радиусах от 0,02 до 0,20 м, равна длине дуги p на радиусе от выходной кромки лопасти до входной кромки следующей лопасти, умноженной на коэффициент K , принятый равным 0,7. Этот коэффициент учитывает расположение зоны кавитационного воздействия

(т.е. расстояние по потоку от места максимального кавитационного воздействия до конца каверны). Поэтому, лопасти крыльчатки находятся вне зоны кавитационного воздействия, и смесь подвергается кавитационной обработке при безопасной длине каверны, которой соответствует наибольшая интенсивность кавитационного воздействия и максимальный объем обрабатываемой смеси.

Длина каверны, соответствующая размеру h_3 на радиусах от 0.2 до 0.20 м, меньше длины каверны, соответствующей размеру h_1 . Уменьшение длины каверны влечет за собой снижение объема обрабатываемой смеси, и интенсивности кавитационного воздействия. В данном случае, опасность кавитационного разрушения лопастей минимальна, но резко увеличивается время обработки компонентов до получения смеси с требуемыми параметрами.

Крыльчатка с формой лопастей, выполненных согласно выражению (2.39), при прочих равных условиях, за счет получения каверн с максимальной и безопасной длиной служит дольше. При этом увеличивается интенсивность кавитационного воздействия, обеспечивается стабильная интенсивная кавитационная обработка компонентов и сокращается время получения устойчивой смеси. Следует отметить, что расчет крыльчатки с иной формой профиля поперченного сечения лопастей, отличной от клиновидной, основывается на применении соответствующей зависимости ℓ_k от характерного размера. Таким образом, условие (2.39) применимо к расчету крыльчаток с лопастями, которые имеют любую форму профиля поперченного сечения.

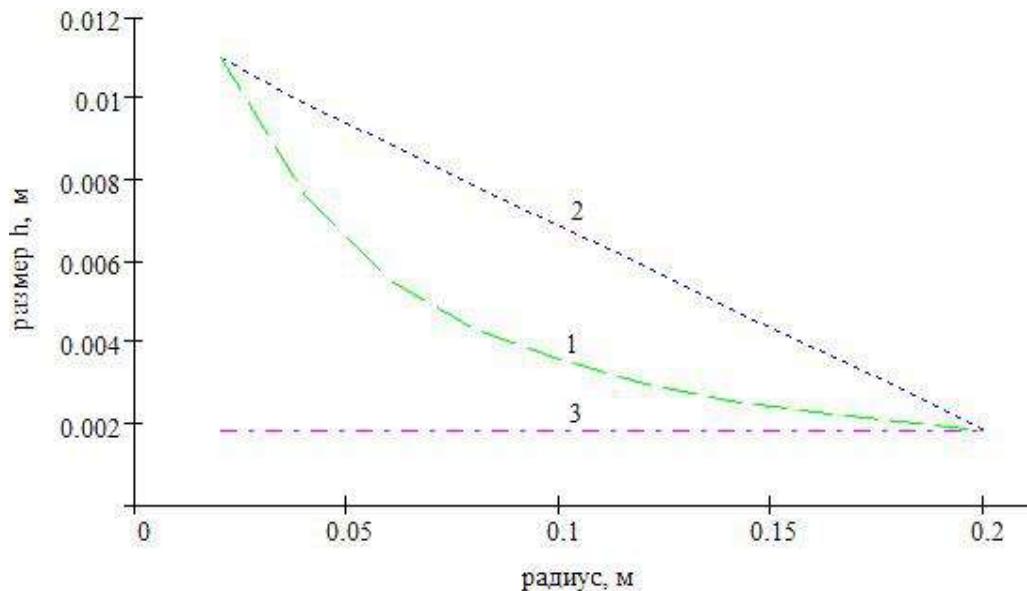


Рисунок 2.9 – Изменение толщины выходной кромки лопастей крыльчатки:

1 – размер h_1 ; 2 – h_2 ; 3 – h_3

2.4 Об одной модели кавитационной эрозии материалов

Современные гидродинамические проблемы порождаются стремлением повысить скорость и улучшить другие характеристики транспортных аппаратов, форсировать технологические процессы и создать новые, более напряженные гидравлические сооружения и др. Однако вопросы изменения физических свойств воды (реологических, структурных, электромагнитных и др.) и их влияния (на макроуровне) на ход и результат технологических процессов на современном этапе изучены недостаточно.

В работе [357] отмечается, что интенсивность кавитации максимальна в конце каверны, хотя зона кавитационного воздействия в целом гораздо шире и простирается вверх и вниз по потоку от зоны максимального воздействия. Также отмечается наличие второго максимума разрушения, следующего за концом каверны. При прочих равных условиях интенсивность кавитации в конце каверны возрастает с увеличением длины каверны.

Интенсификация кавитационного воздействия в результате схлопывания ансамблей пузырьков под действием акустического поля рассматривается в

работе [358, 359], технологическая реализация данного явления апробирована авторами [357], достижения гидродинамической кавитационной технологии подробно излагаются в книге [1]. В общем случае кавитационные пузырьки растут из газообразных или твердых ядер радиусом от нескольких микрометров до максимального радиуса, достигающего 1 мм. При атмосферном давлении время схлопывания таких каверн в воде составляет от 10^{-8} до 10^{-4} с [360], что достаточно хорошо согласуется с полученными результатами [237, 361].

2.5. Трехмерное моделирование эффектов кавитации

Конструкционное усовершенствование процессов и оборудования, направленное на изменение формы ансамблей кавитационных микропузырьков, позволит минимизировать кавитационное воздействие на арматуру и элементы гидравлического оборудования. Анализ литературы показал, что в настоящее время приобретает большое значение углубленное теоретическое исследование динамики скоплений кавитационных микропузырьков. В настоящее время более важно моделировать зависимости интенсивности эрозии от параметров кавитационного течения, а не основных механизмов, которые вызывают эту эрозию. Один из главных вопросов кинетики кавитационной эрозии заключается в выявлении воздействия, которое играет главную роль в процессе разрушения.

К.М. Прис (1982) [358] отметила большое различие между размерами эрозионных полостей, оставленных пузырьковой кавитацией на твердых поверхностях, и размерами микропузырьков, которые значительно меньше. Такое наблюдение невозможно объяснить с точки зрения достаточно распространенного мнения о том, что главный механизм эрозии – это микроструйки жидкости, которые формируются в отдельных кавитационных микропузырьках и ударяют о твердую поверхность [362].

Поэтому, основной задачей исследования является формирование знания о последствиях воздействия и взаимодействия между сферическими ударными волнами, которые излучаются кавитационными микропузырьками в виде

скоплений различных форм. В особенности, в данной работе исследуется возможность минимизации кавитационного воздействия путем изменения внутренней проточной части оборудования таким образом, чтобы не допустить образования ансамблей микропузырьками с формой, при которой возможно кавитационное разрушение.

Качественный подход к исследованию позволяет применить элементарную модель для объяснения происходящих процессов, которая, тем не менее, дает ценную информацию при трехмерной постановке задачи. Это допустимо из-за недостатка экспериментальных данных – фундамента более сложной модели, позволяющей обеспечить точное количественное исследование.

Модель и ограничения. Существующие модели кавитационных течений внутри проточных частей гидромашин, гидролиний и т. п. в основном одномерные и разработаны только для конкретных типов машин, а поэтому имеют ограниченное применение. Прикладная важность решаемых задач обеспечения надежности и долговечности рассматриваемого оборудования требует рассмотрения трехмерной модели, позволяющей моделировать комплексные течения для разнообразных типов гидравлического оборудования. Недостаток знаний о механизмах и последствиях кавитационного воздействия является препятствием для создания трехмерной модели кавитационного течения.

Существующие численные модели для прогнозирования кавитационного эффекта по данным конструктивным и энергетическим характеристикам (и наоборот) основываются на экспериментальной информации. Однако это увеличивает стоимость проектирования оборудования. Следовательно, численное моделирование конструктивных и энергетических свойств оборудования на основании теоретических знаний, и в соответствии с требуемым кавитационным эффектом (и наоборот), позволяет избежать этих затрат.

В общем случае моделируется воздействие трехмерного ансамбля кавитационных микропузырьков на капли жидкости, твердые поверхности и тела, или пузырьки газа, находящиеся в другой жидкости; учитываются воздействие и взаимодействие между средами и полями. В случае элементарной постановки задачи, реальное скопление кавитационных микропузырьков заменяется изотропными точечными источниками сферических гармонических колебаний давления, а многокомпонентная жидкость – гомогенной жидкостью. Для оценки амплитуды колебаний давления используется точное решение линейного дифференциального волнового уравнения:

$$P = \frac{p_0}{r} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (2.41)$$

где p_0 – амплитуда волны (постоянная величина); t – время; r – расстояние по направлению распространения волны между источником излучения и контрольной точкой; j – мнимая единица; ω – круговая частота; k – волновой вектор.

Уравнение (2.41) применимо для продольных волн давления, таких как акустические волны. Разность фаз колебаний между микропузырьками зависит от скорости движения возмущения давления, которое вызывает схлопывание и гармоническое колебание пузырьков. В итоге, поле давления, формируемое колебанием кавитационных микропузырьков, определяется формой их скопления, которая связана с распределением давления, вызывающего кавитацию. Следовательно, форма ансамбля зависит от формы границы, на которой давление изменяется от начального значения до давления насыщенных паров [237]. Снижение давления возникает при обтекании твердых поверхностей в жидкости или под действием акустических колебаний. В данной работе, форма ансамбля кавитационных микропузырьков выбрана в соответствии с наблюдениями, полученными С.Е. Brennen и др. [363] для гидродинамической кавитации, и R. Mettin [359] для акустической кавитации. В данных работах изложены результаты исследования динамики и акустики

различных форм скоплений кавитационных микропузырьков. Анализ высокоскоростной фотосъемки гидродинамической кавитации выявил, что скопления могут быть выпуклыми, плоскими или имеющими форму столбика. Позднее детальное исследование показало, что поверхность ансамбля неоднородна и структуры подобной формы, но меньшего масштаба, видны на поверхности этих скоплений. В этой связи здесь рассмотрены именно эти, меньшие скопления кавитационных микропузырьков. Чем меньше пузырьков в ансамбле, тем меньше время и выше точность вычисления. Таким образом, уменьшением размера ансамбля исключается один из возможных источников погрешностей.

Полагаем, что скопление состоит из 20 кавитационных микропузырьков, которые случайно расположены по закону равномерного распределения. Скопление помещено в жидкости внутри области определенной формы с объемом 1 мм^3 . Амплитуда волн p_0 равна безразмерной единице для каждого источника. Расстояние r вычисляется как квадратный корень из суммы квадратов разностей координат источников и контрольных точек. Процесс стационарный, поэтому слагаемое ωt в уравнении (2.41) равно нулю, и исследуется только моментальное поле давления, которое образовано излучением кавитационных микропузырьков. Значение волнового вектора k вычисляется как $2\pi/\lambda$, где λ – длина волны. Ограниченностю вычислительной сетки накладывает ограничения на величину длины волны. Она должна быть больше, чем размер вычислительной ячейки и меньше, чем размер сетки между её крайними точками вдоль координатных осей. Следовательно, для успешного моделирования, необходимо расположение ансамбля кавитационных микропузырьков вдали от расчетной сетки, для выполнения ограничений, накладываемых r и λ . Поскольку граничные и начальные условия, а также параметры течения установлены, рассмотрим алгоритм решения трехмерной задачи и вывода результатов расчета.

Стационарное решение. Суть модели заключается в связи колебаний давления и формы скопления кавитационных микропузьрков через линейное дифференциальное волновое уравнение, которое описывает существенную зависимость локального давления от формы ансамбля, и кроме того, интерференцию ударных волн. При моделировании не допускается объединение или дробление пузырьков, а жидкость полагается несжимаемой. Кроме того, относительное движение между компонентами в расчет не принимается. Известно, что такие допущения не вносят существенной погрешности при рассмотрении линеаризованной динамики скопления микропузьрков.

Процесс вычисления пошагово выглядит следующим образом:

во-первых, выбирается число кавитационных микропузьрков, т. е. источников сферических волн давления, которые образуют скопление. Это число значительно влияет на время расчета – чем их больше, тем больше время;

во-вторых, вводится форма трехмерного скопления в виде граничного условия первого рода. Мы предполагаем, что следует рассмотреть ансамбли, форма которых изменяется от выпуклой к плоской;

в-третьих, пространство вне ансамбля разделяется на кубическую вычислительную сетку, которая состоит из меньших кубиков, образующих ячейки сетки. На вершинах кубиков расположены контрольные точки, координаты которых используются при вычислении. Как упоминалось ранее, скопление кавитационных микропузьрков расположено так, что расстояние между его границей больше или равно величине размера вычислительной ячейки;

на четвертом шаге рассчитывается расстояние между всеми источниками и контрольными точками как квадратный корень из суммы квадратов разностей их координат;

затем давление, создаваемое каждым источником, вычисляется в каждой контрольной точке;

в следующем шаге получаем суммарное давление в каждой контрольной точке по принципу суперпозиции;

результатирующее поле давления выводится слоями вычислительной сетки в трехмерных прямоугольных координатах, где абсцисса и ордината формируют слой, а аппликата есть величина давления.

Исходные данные. Распределение давления в выбранном направлении, является суммарным значением, которое получено вычислением диаграммы направленности излучения ударных волн для каждой контрольной точки с использованием принципа суперпозиции. Тем не менее, это дает возможность представить качественную картину. Интенсивность ударных волн, излученных ансамблем, может быть вычислена в любой точке пространства или поверхности. Проведением серий вычислений кавитационных импульсов давления исследовался эффект усиления и фокусировки ударных волн.

При расчете использовались следующие параметры. Число источников равно 20, волновой вектор k равен 330, и амплитуда волн p_0 равна безразмерной единице для каждого источника. Расчетная сетка принята в виде куба со сторонами 20 мм и центром в начале координат. Куб состоит из меньших кубиков со сторонами 1 мм. Скопление расположено рядом с сеткой координаты центра $0, 0, 13 + z/2$ (мм) внутри области с объемом 1 мм^3 . Размеры x, y, z области размещения ансамбля микропузьрьков приняты следующими: a) 1, 1, 1 мм; b) 2, 2, 0.25 мм; c) 4, 4, 0.0625 мм. Выполнение алгоритма вычисления для каждого варианта дает решение в виде суперпозиции ударных волн давления для конкретного расположения источников в скоплении и его формы.

Расчетная сетка и точная форма скопления показаны на рисунке 2.10 для случая b. Результаты вычисления поля давления для ансамбля, имеющего промежуточную (между выпуклой и плоской) форму, показаны на рисунке 2.11 для условий b. Показан только один слой расчетной сетки, на котором сформировался максимальный импульс давления. Этот слой, как и ожидалось,

является ближайшим к скоплению. Пример b выбран потому, что максимальное давление оказалось наибольшим (3057) в сравнении с условиями a (2176) и c (2593).

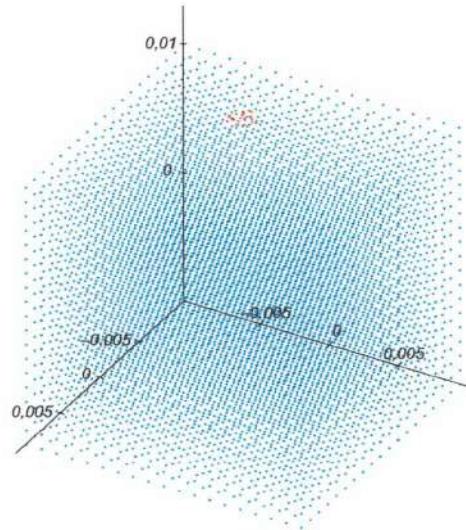


Рисунок 2.10 – Расчетная сетка и точная форма скопления кавитационных микропузырьков для случая b [364, 365]

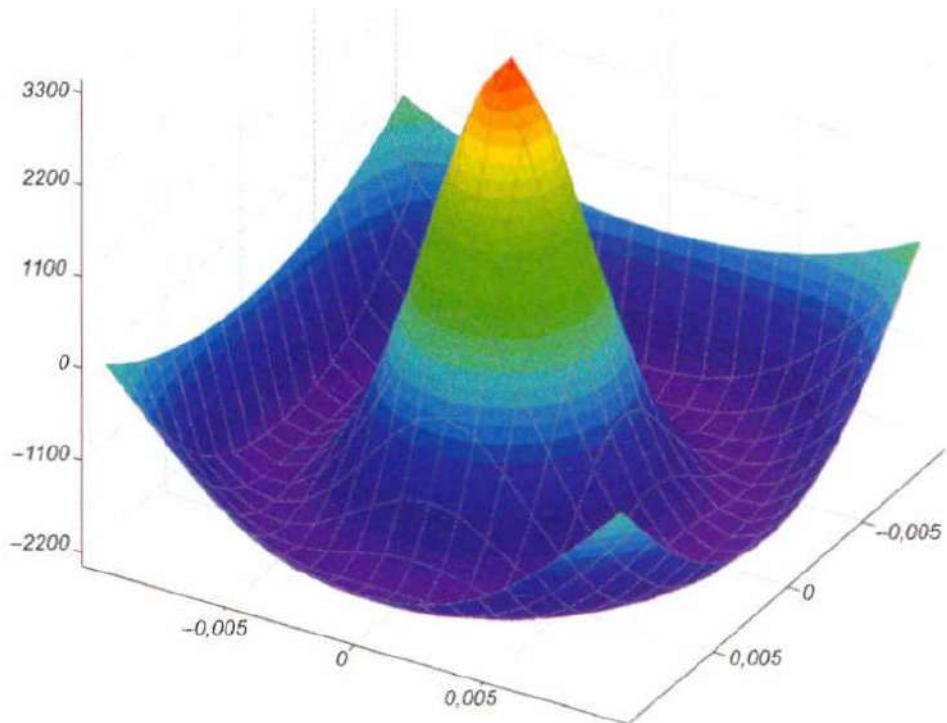


Рисунок 2.11 – Слой вычислительной сетки с максимальным импульсом давления для условия b [364, 365]

Имея информацию о форме скопления кавитационных микропузьрьков и результирующем давлении ударной волны, возможно рациональное совершенствование проточных частей оборудования и гидросистем с целью исключения кавитационной эрозии. Примеры показали, что результаты трехмерного моделирования скоплений микропузьрьков могут быть сравнимы с экспериментальными данными, например, из источника [366]. Однако не следует забывать о качественном характере данного исследования, результаты которого все же позволяют определить места, потенциально опасные с точки зрения возникновения кавитационной эрозии.

Представленная модель включает одно- и двухмерные формулировки, наряду с трехмерным подходом, используемые для моделирования кавитационных течений с помощью одного и того же алгоритма. Выбор подхода определяется формой ансамбля кавитационных микропузьрьков. Численные исследования показывают, что изменение формы ансамбля от плоской к выпуклой приводит к повышению генерируемого импульса давления. При изменении формы скопления кавитационных микропузьрьков от выпуклой к плоской происходит фокусировка сферических волн давления, излученных ансамблем, в узкой области за пределами скопления. Выявленный эффект, по-видимому, значительно повышает кавитационное воздействие. Следовательно, изменение формы скопления кавитационных микропузьрьков существенно влияет на интенсивность разрушения под действием кавитации.

Тот факт, что реальное скопление нестационарно во времени подкрепляет это предположение [366]. Тогда, механизм кавитационного воздействия представляется следующим образом – за каждый цикл образования и срыва кавитации форма ансамбля может изменяться от плоской к выпуклой, а схлопывание кавитационных микропузьрьков происходит тогда, когда скопление выпуклое в конце цикла. Вначале схлопываются структуры в виде выпуклостей меньшего масштаба, расположенные на поверхности ансамбля и определяющие ее неравномерность. Эти структуры и излучают ударные волны

давления в окружающее пространство. В ходе этого процесса формируются новые, более сильные источники излучения внутри малых структур в результате фокусировки ударных волн. Тогда эти новые источники могут рассматриваться как точечные сферические колебания давления, которые излучают дальше и последовательно увеличивают локальное давление в новых фокусах. Наконец, результирующий импульс давления достигает твердую поверхность и вызывает эрозию, подобную той, которая описана в [358]. Имея представление о происходящем процессе, можно предложить следующие пути минимизации кавитационного воздействия на арматуру и элементы гидравлического оборудования.

Для минимизации эффектов фокусировки ударных волн, их последовательного усиления, и, таким образом, кавитационной эрозии, два размера ансамбля микропузьрьков должны быть одинакового порядка, а третий размер намного больше, или меньше, при постоянно высокой длине скопления. В ходе анализа следует вывод, который заключается в том, что подобные формы скоплений кавитационных микропузьрьков наблюдаются в случае, так называемой, суперкавитации [6], когда длина каверны намного больше других ее размеров. Удивительно, что, помимо прочего, суперкавитационный режим течения действительно используется с целью снижения кавитационных разрушений. Следовательно, конструкционное усовершенствование машин, направленное на изменение формы скоплений микропузьрьков, позволит минимизировать кавитационное воздействие на арматуру и элементы гидравлического оборудования.

В данной работе исследованы сильные положительные импульсы давления, которые возникают в результате ступенчатой фокусировки ударных волн в потоке с развитой пузырьковой кавитацией. Показано, что импульсы имеют амплитуду в несколько тысяч раз большую, чем величина начального импульса источника излучения. Вычислением дальнего поля давления

проведено качественное исследование влияния определенной формы скопления на интенсивность ударных волн давления.

Несомненно, что форма большинства скоплений намного сложнее предполагаемой. Тем не менее, в процессе схлопывания всех частей реальных скоплений, ударные волны сфокусируются в некоторых точках, которые будут являться источниками более сильных ударных волн. Однако до сих пор нет четкого понимания, какие трехмерные формы могут принимать распространяющиеся импульсы в очень неоднородных пузырьковых средах, которые возникают в реальных течениях. Численные исследования дают основания полагать, что формы пузырьковых скоплений возле поверхности этих структур могут значительно влиять на дальнейшее распространение ударных волн давления. Еще многое предстоит понять относительно этих структур и последствий их появления.

Несмотря на то, что кавитация является нежелательным явлением, тем не менее, использование воздействия кавитации наиболее перспективно для механической обработки и смешивания твердых и жидких веществ. Работа кавитационной техники базируется на эффектах кавитации и является основой высоко энергоэффективной кавитационной технологии [1]. В сравнении с традиционной технологией, кавитационная технология характеризуется конструктивной простотой, высокой энергетической и экономической эффективностью, а также низкой металлоемкостью.

2.6. Параметрическое описание кавитации [367]

Анализ размерностей, физическое исследование кавитации позволили выявить независимые безразмерные термодинамические параметры, необходимые для описания указанных явлений. В наиболее распространенном случае к введенным ранее механическим параметрам следует добавить только два термодинамических параметра.

В ходе изучения динамики образования и роста газовых пузырьков при кавитации или кипении обнаружено, что термодинамические эффекты способны играть при этом важную или даже преобладающую роль. Stepanoff A.J., Stai H.A., Salemann V., Spraker W.A. и другие исследователи [368–370] объединили эти эффекты, представив их единым безразмерным параметром, обычно обозначаемым буквой « B ». Однако есть вероятность возможности одновременного влияния на рассматриваемые процессы двух параметров, которые, по аналогии, можно обозначить как B' и B'' .

Настоящее исследование имеет целью показать, что в обычных случаях двух параметров достаточно для описания поведения сферической полости малых размеров в процессе ее роста при кипении или кавитации. Эти параметры должны быть добавлены к рассмотренным ранее параметрам, перечень которых определяется характером изучаемой проблемы. Они имеют отношение как к изучению зарождения кавитации, так и к проблеме эрозии, предположительно возникающей при разрыве полости малых размеров [1, 370]. Речь здесь не идет о массопередачи за счет диффузии.

К достаточно длинному перечню параметров, рассматриваемых при изучении динамики изменения объема сферического пузырька, следует добавить следующие термодинамические параметры [371]:

- скрытая теплота испарения (или конденсации) L ;
- угол наклона кривой насыщения $p' = dp_v/dT$;
- плотность пара ρ_v ;
- удельная теплоемкость жидкости C_l
- удельные теплоемкости пара при постоянном объеме C_{vv} и постоянном давлении C_{vp} ;
- теплопроводность жидкости λ_l ;
- теплопроводность пара λ_v ;
- термодинамическая температура или разность температур.

Исключены случаи, связанные с наличием естественной конвекции и диффузии. Эта совокупность, включающая девять термодинамических параметров, сложна, но в ряде практически наиболее важных случаев некоторыми из них можно пренебречь. Это, прежде всего, в тех случаях, когда температура не слишком близка к критическому значению, энергообмен между двумя фазами зависит в основном от теплоты испарения L , а вклад теплоемкости пара пренебрежимо мал. С другой стороны, Плессет М.С. показал [375], что в большинстве случаев температура газовой фазы постоянна, так что теплопередача здесь пренебрежимо мала и теплопроводность пара λ_v не оказывает влияния на рассматриваемое явление (случай изотермического течения).

Следовательно, в подобных случаях параметры C_{vv} , C_{vp} и λ_v можно исключить не потому, что в исследуемой области условий они остаются постоянными (это исказило бы последующий анализ), а в связи с тем, что представляемые ими физические явления не играют значительной роли.

Представленный ниже анализ не является чистым анализом размерностей, который не дал бы возможности в достаточной степени сократить число независимых параметров. Он включает также физический анализ явления, особенно в том виде, как оно представлено в публикациях J. Bonnin [373, 375–378]. Как и анализ размерностей, данный анализ является дифференциальным, т.е. позволяет не определять полностью систему переменных и безразмерных параметров (достаточно уточнить, что речь идет о сложной динамической системе с распределенными параметрами [3, 379]).

С учетом исключений, указанных выше, начальная динамическая система может быть охарактеризована при помощи следующих шести физических величин: L , C , k , T , ρ_v , ρ_v' . Наряду с такими исключениями дополнительно введен только один независимый параметр – температура (действительно, теплота эквивалентна механической энергии).

Прежде чем применить к данной системе дифференциальную форму π -теоремы Ваши-Бакингема-Рябушинского [380, 381], которая в общем случае позволяет установить общую структуру зависимости, вытекающую только лишь из требования инвариантности физической зависимости при изменении масштабов единиц, даже если конкретный вид зависимости между исходными величинами неизвестен, можно высказать следующие соображения, каждое из которых позволяет исключить один из независимых параметров:

1) наклон кривой насыщения ρ_v' не является независимой величиной, так как он связан с L , T , ρ_v , ρ_l (ρ_l – плотность жидкости, всегда присутствующей в «полной» динамической системе) уравнением Клайперона-Клаузиса:

$$L = T\rho_v'(1/\rho_v - 1/\rho_l).$$

2) как показал физический анализ явления [367, 373–378] величина L выступает не сама по себе, а в виде произведения на плотность пара ρ_v .

3) тот же физический анализ показал, что отношение плотностей двух фаз $\varepsilon = \rho_v/\rho_l$ всегда находится в составе произведения. Даже если сохранить величину ε в качестве безразмерного параметра анализа, ее влияние на явление будет заранее известно из других источников.

С учетом этих соображений применение π -теоремы приводит к определению двух новых безразмерных параметров, не зависимых один от другого и учитывающих все термодинамические переменные. Речь идет о введенных ранее параметрах B' и B'' .

Как показано выше, теоретически можно рассматривать группу из двух (или из трех, включая ε) независимых безразмерных параметров, учитывающих все термодинамические переменные. Разумеется, эти термодинамические параметры должны дополнять динамические переменные. Одни группы могут оказаться более полезными, чем другие, при анализе экспериментальных результатов.

Может оказаться целесообразным объединение в одну группу характеристик, относящихся только к жидкости. Это было сделано посредством введения понятий характеристического времени τ и характеристического давления p_c после введения понятия двухфазного сопротивления ψ :

$$\psi = L\varepsilon\rho_v',$$

$$\tau = K/\psi = K/L\varepsilon\rho_v',$$

$$p_c = \psi/C = L\varepsilon\rho_v'/C.$$

Поскольку изучаемое давление может, например, быть следствием изменения давления Δp на протяжении периода времени t , параметры B' и B'' логично представить следующим образом:

$$B' = t/\tau,$$

$$B'' = \Delta p/p_c.$$

Ранее показано [367], что изменения τ и p_c весьма значительны и могут быть представлены, например, изменениями ψ . Кроме того, было признано целесообразным сохранить эти существенные изменения в одном параметре, например, в τ или ψ и учесть остальные термодинамические величины при помощи другого параметра, изменения которого ограничены. Физический анализ [1, 357, 380] указывает также на влияние температуропроводности жидкости

$$a_l = k_l/\rho_l C_l,$$

которая имеет размерность кинематической вязкости. Таким образом, в явлениях инициирования кавитации или кавитационной эрозии можно сохранить параметр B' и другой безразмерный параметр, построенный с использованием величины « a ».

Если динамический анализ проблемы указывает на необходимость рассмотрения вязкости v , этот новый параметр, очевидно, принимает следующий вид:

$$v/a = \text{Pr},$$

т.е. представляет собой число Прандтля для жидкости. Этот результат не вызывает удивления. Действительно, поскольку поток зависит от вязкостных сил, кавитация и кипение жидкости под действием тепловых явлений могут быть представлены только для жидкости, число Прандтля у которой, близко к некоторому определенному значению. В частности, жидкий металл можно уподобить только другому жидкому металлу.

В некоторых случаях влияние вязкости является косвенным и, как показало предыдущее исследование, пренебрежимо малым. Если речь идет о потоке, можно сформировать с использованием величины « a » параметр, аналогичный числу Рейнольдса:

$$\text{Re} = xV/a.$$

Этот параметр необходимо принимать во внимание наряду с действующими термодинамическими факторами. С другой стороны, при изучении эрозии в вибрационной системе с периодом t и амплитудой x полезно дополнить параметр t/τ новым параметром

$$x^2/at.$$

Из этого следует, что даже в тех случаях, когда не приходится прибегать к числу Прандтля, трудно заменить одну жидкость другой жидкостью с существенно отличной температуропроводностью (не всегда допустимы значительные изменения значений x и t под влиянием динамических элементов, которые здесь не уточнены и рассмотрены в работе А. Тирувенгадама [373]).

Некоторые исследователи, например, B.B. Mikic, W.M. Rosenow, P. Griffith [380], использовали число Якоби, которое может быть представлено в форме:

$$\text{Ja} = C_l \Delta T / L \epsilon,$$

особенно полезной при изучении динамики кипения. Действительно, комплекс $L\varepsilon/C_l$ можно рассматривать как характеристическую температуру жидкости. Следовательно, число Якоби эквивалентно предложенному параметру B'' . Однако при исследовании кавитации целесообразнее использовать отношение давлений.

Если температура достаточно близка к критическому значению, вследствие чего начинает проявляться влияние теплоемкости пара, необходимо ввести два новых безразмерных параметра (отношения теплоемкостей): C_{vp}/C_l и, очевидно,

$\gamma = C_{vp}/C_w$. С другой стороны, при наличии влияния динамики теплообмена в паровой фазе (внутри пузырька) приходится рассматривать еще один безразмерный параметр, а именно отношение теплопроводностей двух фаз – k_v/k_l .

В ходе настоящей работы удалось показать, что различные термодинамические величины, способные влиять на динамику кипения и кавитации, можно в наиболее распространенных случаях свести к двум независимым безразмерным параметрам, по меньшей мере, один из которых включает отношение плотностей двух фаз ε . Эти параметры необходимо добавить к механическим параметрам, относящимся к рассматриваемой задаче.

Безусловно, выбор этих параметров является относительно произвольным. Такой выбор может и должен быть сделан с учетом характера изучаемой задачи. В частности, для изучения кавитации больше подходит параметр, включающий разность давлений, а для изучения кипения – параметр, включающий разность температур. В некоторых случаях, рассмотренных в ходе настоящего исследования, в частности, при близости температуры к критическому значению, приходится дополнительно вводить другие параметры. Однако представляется вполне вероятным, что детальный анализ подобных случаев приведет к другим упрощениям. Наконец, следует отметить, что возможное

вмешательство естественной конвекции потребует, очевидно, введения соответствующего параметра, например, числа Грасгофа [367].

2.7 Влияние вязкости в кавитационных течениях

Ассоциируя кавитационные микропузырьки и микровихри, образовавшиеся в результате их коллапса с частицами жидкости, можно сформулировать следующую феноменологическую модель кавитирующей жидкости: кавитационный микропузырек в своей динамике движется в пространстве, структурированном микротурбулентными вихрями, образованными в результате интерференции волн разрежения-сжатия, возникающих в результате пульсации кавитационных пузырьков. Отсюда получаем новое реологическое уравнение [382–384]:

$$\rho_i \frac{\partial \vec{W}_i}{\partial t} = \rho_i \vec{F}_i + 2\vec{W}_k \left(M_{kj} \dot{S}_{ij} - \Pi_i I_{ki} \right) \quad (2.42)$$

где M_{kj} – тензорная вязкость, характеризующая внутренний момент импульса элемента жидкости, появляющийся вследствие его деформации при движении.

Тогда в уравнении Навье – Стокса дополнительная вязкость как фактор регуляризации проявляется в любом сдвиговом течении (например, введение дополнительной вязкости необходимо для удержания детерминированности процесса, особенно в области больших скоростей). Решение для случая динамики сферического пузырька с учетом новой постановки задачи привело к более точному совпадению с результатами эксперимента.

2.8 Математическая модель тепломассообменных и гидродинамических процессов в суперкавитирующих испарителях

В условиях дефицита пресной воды актуальна задача совершенствования существующих и разработки новых методов водоподготовки. Один из перспективных способов обессоливания воды – применение суперкавитационных испарителей, исследованиям которых посвящен ряд работ

[385–388]. Процесс испарения в аппаратах суперкавитирующего типа осуществляется за счет создания развитого кавитационного течения при обтекании недогретой жидкостью кавитатора с последующим отбором пара из образовавшихся каверн [1]. Высокая интенсивность теплообмена по сравнению с другими способами генерирования пара объясняется особенностями процесса испарения с поверхности каверны. Так как каверна образуется за счет гидродинамических факторов (увеличения местных скоростей течения при обтекании кавитатора), то давление в каверне существенно ниже давления омывающей ее жидкости, поэтому при суперкавитационном испарении возникает ряд дополнительных эффектов, усиливающих испарение с поверхности каверны: разность температур, обусловленная гидродинамическим перепадом давления; разность парциальных давлений водяного пара в жидкости и в каверне, и др. С повышением температуры давление насыщения водяного пара и наклон касательной к линии насыщения [389] резко возрастают (рисунок 2.12), что приводит к существенному влиянию тепломассообменных процессов на размеры кавитационных полостей. Термодинамические величины (термодинамическая теплота парообразования (L), давление (p), температура (T), удельный объем сухого насыщенного водяного пара (v'') и кипящей воды (v') связаны уравнением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{\partial p}{\partial T} = \frac{L}{T(v'' - v')}. \quad (2.43)$$

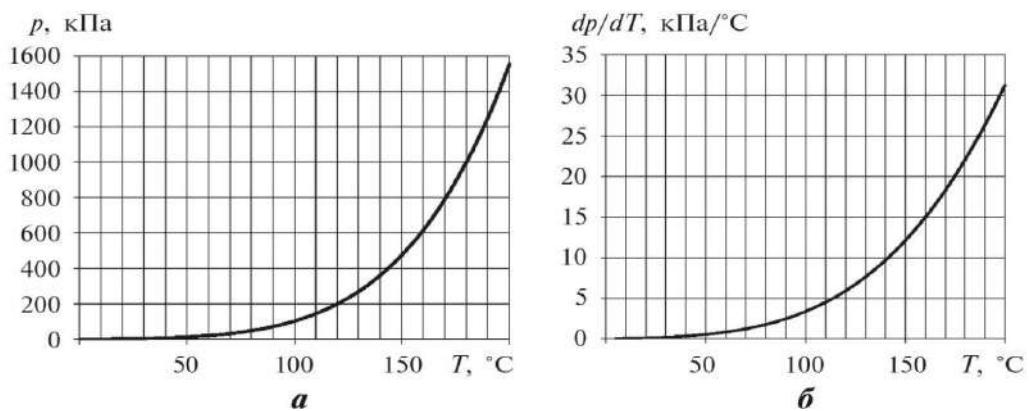


Рисунок 2.12 – Зависимость давления насыщения водяного пара p от температуры T : a – кривая насыщения водяного пара; δ – скорость изменения давления насыщения от температуры [18]

Для изотермических случаев интенсивность кавитации при течении жидкостей определяется числом кавитации $\sigma_{\infty} = (p_{\infty} - p_v(T_{\infty})) / 0,5 \rho_l U_{\infty}^2$, где $p_v(T_{\infty})$ – постоянное давление насыщения при заданной температуре жидкости. Для неизотермических случаев число кавитации $\sigma_{\infty} = (p_{\infty} - p_v(T)) / 0,5 \rho_l U_{\infty}^2$ включает давление насыщения, выраженное в виде функции от локальной температуры $p_v(T)$. Принимая функцию $p_v(T)$ в рассматриваемом интервале температур ΔT непрерывной и ограничиваясь двумя первыми членами ряда Тейлора, получим уравнение:

$$\sigma = \sigma_{\infty} - \frac{\partial p}{\partial T} \frac{\Delta T}{0,5 \rho_l U_{\infty}^2}; \Delta T = T - T_{\infty} < 0. \quad (2.44)$$

Уравнение (2.44) определяет зависимость числа кавитации от температуры. Как видно из этого уравнения, местное понижение температуры приведет к повышению числа кавитации и, следовательно, понизит интенсивность кавитации [389].

Для моделирования рабочих процессов суперкавитационного испарителя использовали модель двухфазного гомогенного потока, которая основывается на предположении локального кинематического и термодинамического равновесия между фазами и отсутствия поверхности раздела между паром и водой. Также пренебрегаем выделением тепла за счет вязкостного трения, при этом температурное поле определяется только испарением и конденсацией. Кавитационное течение жидкости в этом случае описывается уравнениями неразрывности, сохранения момента импульса, уравнением сохранения энергии и уравнением переноса жидкой фазы, представленными в стационарном виде [389, 390–393]:

$$\partial(\rho_m u_j) / \partial x_j = 0; \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right]; \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho_m u_j (h + f_v L) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_m}{Pr_m} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right]; \quad (2.47)$$

$$\partial(\alpha_l u_j)/\partial x_j = m^+ + m^-, \quad (2.48)$$

где ρ_m – плотность смеси; h – удельная энталпия жидкости; u – локальная скорость смеси; μ_m , μ_T – коэффициенты динамической и турбулентной вязкости смеси соответственно; Pr_m , Pr_T – ламинарное и турбулентное числа Прандтля соответственно; δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta_{ij} = 0(i \neq j)$, $\delta_{ii} = 1(i = j)$; α_l – объемная доля жидкости; m^+ , m^- – скорость испарения и конденсации.

Теплофизические параметры смеси φ_m и массовая доля пара f_v определяются выражениями:

$$\varphi_m = \alpha_l \varphi_l + (1 - \alpha_l) \varphi_v; \quad (2.49)$$

$$f_v = \frac{\rho_v (1 - \alpha_l)}{\rho_m}, \quad (2.50)$$

где индекс l обозначает жидкость, v – пар, а m – смесь.

Источниковый m^+ и стоковый m^- члены в уравнении (2.48) зависят от многих факторов, и их формулировка в настоящее время не унифицирована для различных конструктивных и режимных параметров, встречающихся в различных прикладных задачах. Обзор методов определения этих членов приведен в [392]. Пренебрегая производной второго порядка и поверхностным натяжением в уравнении Рэлея-Плессета, можно получить следующие выражения для скорости испарения и конденсации [394, 395]:

$$m^+ = -F_v \frac{3\alpha_{nuc}\alpha_l \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \max \left(\frac{p_v - p(T)}{\rho_l}, 0 \right)}; \quad (2.51)$$

$$m^- = F_c \frac{3(1 - \alpha_l) \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \min \left(\frac{p_v - p(T)}{\rho_l}, 0 \right)}, \quad (2.52)$$

где F_v и F_c – эмпирические постоянные, которые в этих уравнениях учитывают тот факт, что процесс конденсации протекает медленнее испарения [396], α_{nuc} – объемная доля неконденсированного газа в воде, R_B – радиус зародышей кавитации. Сферические пузырьки неконденсирующегося газа в воде являются зародышами для образующихся паровых полостей. Для расчетов принимались следующие значения: $\alpha_{nuc} = 5 \cdot 10^{-5}$, $R_B = 10^6$ м, $F_v = 50$, $F_c = 0,01$.

Для учета турбулентности использовалась $k - \varepsilon$ модель. Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k и диссипации энергии ε :

$$\frac{\partial(\rho_m u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho_m \varepsilon; \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.54)$$

где G – скорость генерации турбулентности, которая определяется согласно уравнению:

$$G = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (2.55)$$

где τ_{ij} – тензор напряжений Рейнольдса:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho_m u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2\rho_m k \delta_{ij}}{3}. \quad (2.56)$$

Коэффициент турбулентной вязкости μ_T определяется по формуле

$$\mu_T = \frac{\rho_m C_\mu k^2}{\varepsilon}. \quad (2.57)$$

Эмпирические константы $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$, $C_\mu = 0,09$.

Объемная доля фазы может изменяться от нуля до единицы, в зависимости от занимаемого пространства в двухфазном потоке. Фазы должны полностью заполнять весь объем, поэтому

$$\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1. \quad (2.58)$$

Геометрия и граничные условия. На рисунке 2.13 представлена схема рабочего участка суперкавитационного испарителя. В рабочем участке длинной $L = 470$ мм и диаметром $D = 70$ мм установлен кавитатор с диаметром основания $d = 16,8$ мм на расстоянии $l = 50$ мм от входа в рабочий участок. В качестве кавитатора использовался конус с углом раствора 53° . Исследования проводились в условиях существенного влияния стеснения потока на форму и размеры каверны существенно. Трубка, расположенная вдоль оси рабочего участка, служит для крепления кавитатора и отбора пара из каверны.

Численное решение задачи проводилось с использованием метода контрольного объема при помощи программы ANSYS CFX. Расчетная сетка состояла из гексаэдрических элементов и имела специальное сгущение в месте предполагаемого образования каверны.

Задача рассматривалась в стационарной осесимметричной постановке. Для замыкания системы уравнений принимали следующие граничные условия: на входе в рабочий участок – скорость 6 м/с, линейный масштаб 0,005 и интенсивность турбулентности 0,03, объемные доли пара и воды 0,0 и 1,0 соответственно; на выходе – давление 147 кПа. На стенках скорость равна нулю. Расчеты проводили для воды температурой 110°C , что соответствует максимальной температуре воды на входе в первую ступень испарения большинства современных испарительных установок. В основании кавитатора осуществлялся отбор пара в количестве 0,0414 кг/ч. Теплофизические параметры воды и пара принимались согласно [389].

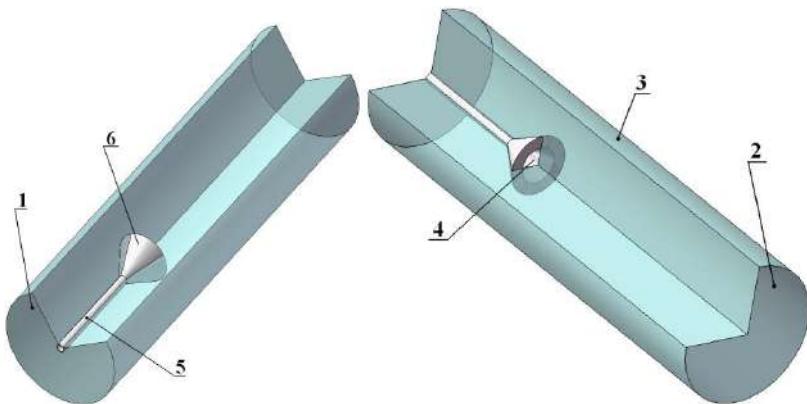
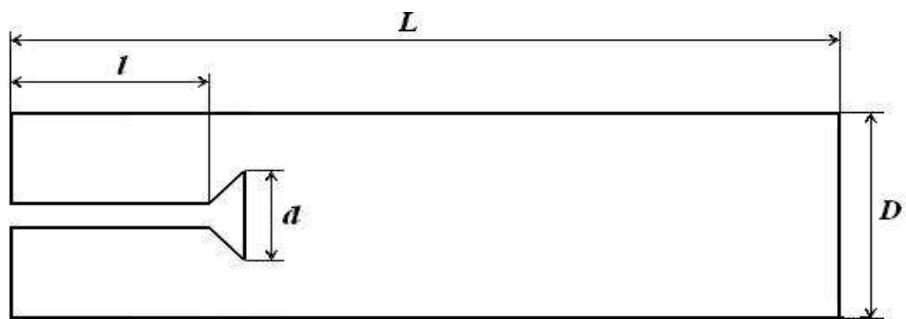


Рисунок 2.13 – Расчётная область ступени испарения суперкавитационного испарителя:
1, 2 – вход и выход рабочего участка; 3 – внутренняя стенка корпуса рабочего участка;
4 – отверстие для отбора пара из каверны; 5 – пароотводящая трубка; 6 – кавитатор

Результаты численного исследования. Получены поля скоростей, давлений, температуры и доли пара в смеси (рисунок 2.14), а также распределение кинетической энергии и скорость диссипации. Область фазового перехода объемной доли пара в потоке смеси имеет довольно тонкую границу (см. рисунок 2.14, a), что объясняется высокими градиентами давления в этой области (см. рисунок 2.14, b). Расчетная длина каверны для заданных условий составила 12 мм. Температура в каверне уменьшилась относительно температуры на входе в рабочий участок приблизительно на 38 °C, а в области «хвоста» каверны выросла на 24 °C (см. рисунок 2.14, δ).

Повышение температуры в области замыкания каверны связано с увеличением давления и завихрениями в этой зоне. В областях замыкания каверны в малых объемах фиксируется значительное тепловыделение, вызванное конденсацией пара, что становится причиной локального роста

температуры. Согласно вычислениям, установленный отбор пара из каверны не влечет её разрушения.

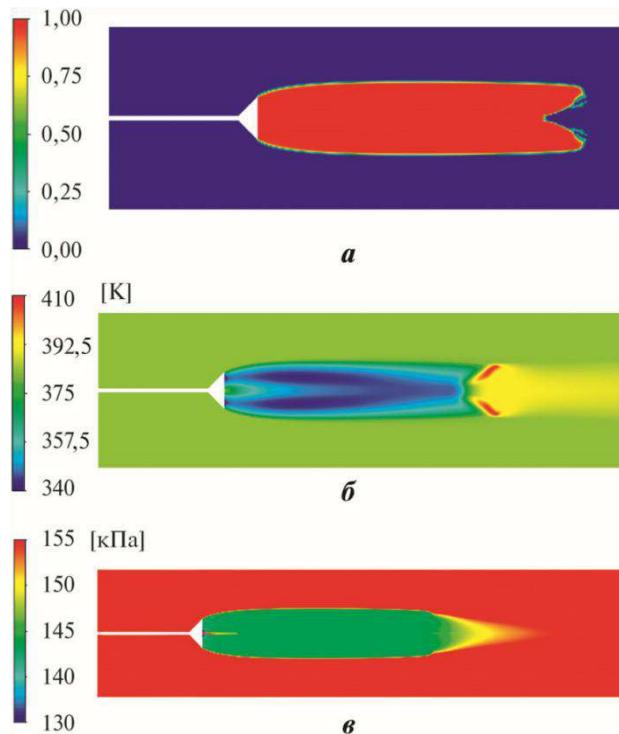


Рисунок 2.14 – Результаты расчета: *а* – доля пара; *б* – температурное поле; *в* – поле давлений

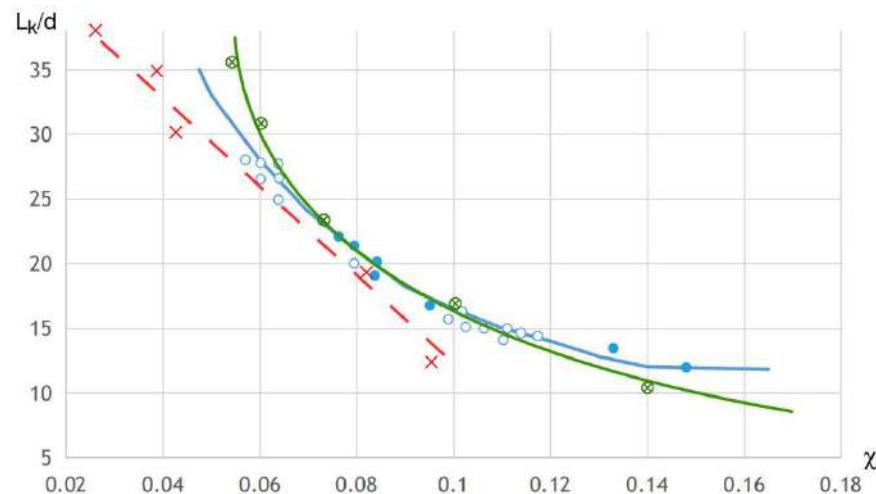


Рисунок 2.15 – Зависимость относительной длины каверны за конусом от числа кавитации: ● – $d/D_0 = 0,24$; ○ – $d/D_0 = 0,36$; ✕ – расчеты Л.Г. Гузевского [501]; ✗ – результаты автора

Аппроксимация функций, представленных на рисунке 2.15, позволила получить аналитическое выражение:

$$L/d \approx 1,682/\chi.$$

Это выражение используется для определения размеров каверны. Результаты исследования показали, что с увеличением скорости набегающего потока и, соответственно, снижением числа кавитации, проявляется влияние этих факторов на размеры каверны в сторону их увеличения. При этом возрастает площадь испарения внутри каверны, что приводит к увеличению паросъема. Отличие числового коэффициента в полученном выражении от значения, полученного И.Т. Егоровым [352], объясняется тем, что в нашем случае учитывается эффект влияния числа кавитации χ при возрастании скорости потока.

2.9 Численное решение прямой задачи течения двухфазной жидкости

При решении технологических задач, связанных с гидромеханическим диспергированием, кавитационной обработкой жидких сред и др., встает вопрос о расчете течения газожидкостной смеси в проточной части кавитационного аппарата (смесителя, реактора, аэратора). Идеология и математические модели вариантов течений частично рассмотрены в [4].

Будем полагать геометрию проточной части кавитационного реактора (аэратора) заданной. Известны также все начальные значения искомых характеристик и параметров смеси. Таким образом, требуется найти течение смеси в канале заданной формы. В математической физике подобную задачу принято называть *прямой*, в технике ее называют *задачей проверочного расчета*, в данном случае кавитационного реактора или аэратора. Удобно перейти к безразмерной форме исходных уравнений, приняв за характерные величины, следующие: 1 – длина, V_0 – скорость, p_0 – давление, R_0 – радиус пузырька, ρ_0 – плотность. Тогда $t_0 = \sqrt{\frac{\rho_0}{p_0}} R_0$, $Re = \frac{\rho_0 V_0}{\mu}$ – число Рейнольдса, $Eu = \frac{p_0}{\rho_0 V_0^2}$ – число

$$Eu = \frac{p_0}{\rho_0 V_0^2} - \text{число}$$

$$\text{Эйлера, } \chi = \frac{p_0 - P_d}{\rho_0 V_0^2 / 2} \quad - \quad \text{число} \quad \text{кавитации}$$

$$(\chi = 2Eu - \frac{2P_d}{\rho_0 V_0^2} \cong 2Eu).$$

Полная система уравнений для стационарного течения изотермической газожидкостной смеси запишется в следующей безразмерной форме (лишние индексы здесь опущены):

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (2.59)$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -Eu\vec{\nabla}P_1 + \frac{1}{Re} \Delta \vec{\nabla} + \frac{1}{3Re} \vec{\nabla}(\operatorname{div} \vec{V}), \quad (2.60)$$

$$\rho = \rho_1 + \alpha_0 R^3 (\rho_2 - \rho_1), \quad (2.61)$$

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR^2}{dt} \right) = \frac{P_1^{rp} - P_1}{\rho_1}, \quad (2.62)$$

$$\frac{\rho_2}{P_2} = \frac{\rho_{20} p_0}{\rho_0 P_{20}} \text{ и } \frac{P_2}{p_0} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^3, \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned} P_1^{rp} &= P_2 - \frac{2\sigma}{R_0 P_0} - \frac{4l}{R_0 \rho_1 \sqrt{Eu} Re} \frac{dR}{dt} = \\ &= \frac{P_{ro}}{P_0} \frac{1}{R^3} - \frac{2\sigma}{R_0 P_0} \cdot \frac{1}{R} + \frac{P_{no}}{P_0} - \frac{4l}{R_0 \rho_1 \sqrt{Eu} Re} \frac{dR}{dt}, \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\frac{1}{R_0} \sqrt{Eu} \frac{dr}{dt} = V_r, \quad r|_{t=0} = r_i, \quad (2.65)$$

$$\frac{1}{R_0} \sqrt{Eu} \frac{dz}{dt} = V_z, \quad z|_{t=0} = 0. \quad (2.78)$$

Последние два уравнения суть уравнения линий тока (траекторий при установившемся течении) в цилиндрической системе координат для осесимметричного случая течения смеси. Границные условия – следующие: задается скорость на входе; на твердых стенках условие прилипания $\vec{V} = 0$; давление считается известным на входе и выходе.

Задаем начальное приближение для распределения радиусов пузырьков во всей области течения. Из уравнения связи P_i с S_i для ньютоновских жидкостей в

обычном виде $\Pi_i = -\left(P_i + \frac{2}{3}\mu_i \operatorname{div} \vec{W}_i\right)\varepsilon + 2\mu_i \dot{S}_i$ находим P_2 ; ρ_2 определим из (2.63);

после этого из (2.61) получаем значение плотности ρ рассматриваемой области. При постановке задачи скорость на выходе нам неизвестна. Но на данном этапе мы считаем скорость течения на выходе известной.

Воспользуемся методикой решения системы (2.59), (2.60), описанной ниже. Вначале определяем компоненты скорости V_r и V_z . Из уравнения (2.60) находим давление P_1 в узлах. Далее предусматривается блок интерполяции, позволяющей находить значение функции, заданной в узлах, в любой точке области. Для нахождения линий тока решаем систему (2.65), (2.66). Для каждой линии тока определяем время нахождения частицы в проточной части.

Далее интерполируем значения P_1 и P_2 на найденных линиях тока, после чего решаем уравнение (2.62) на каждой из линий тока в известных промежутках времени и получаем новое распределение радиусов пузырьков. Сравниваем их отклонения от заданных на предыдущем цикле. При неудовлетворительной точности повторяем вышеописанный процесс до получения удовлетворительной точности сходимости каждой неизвестной функции системы (2.59)–(2.66) (рисунок 2.16).

Приведем уравнение динамики Навье–Стокса к дивергентной форме. Система уравнений Навье–Стокса (стационарный случай) записывается в следующем виде:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (2.67)$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\vec{\nabla} P + \mu \Delta \vec{V} + \nabla \left(\frac{1}{3} \mu \operatorname{div} \vec{V} \right). \quad (2.68)$$

Введем следующие функции:

$$\vec{\omega} = \operatorname{rot}(\rho \vec{V}), \quad \tilde{P} = P + \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \vec{V}. \quad (2.69)$$

Учитывая (2.67), получаем

$$\text{rot} \vec{\omega} = \vec{\nabla} \text{div} (\rho \vec{V}) - \Delta \rho \vec{V} = -\Delta (\rho \vec{V}). \quad (2.70)$$

Пусть далее течение осесимметричное. Введем обозначения:

$$A = \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} - \frac{1}{r^2} V_z;$$

$$B = \frac{\partial^2 V_z}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial z};$$

$$\vec{C} = \{A, B\}$$

тогда с учетом (2.69) система (2.68) преобразуется к виду

$$\frac{\rho}{\mu} \left(\rho (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \vec{\nabla} \tilde{\rho} - \mu \vec{C} \right) = \rho \nabla^2 \vec{V}. \quad (2.71)$$

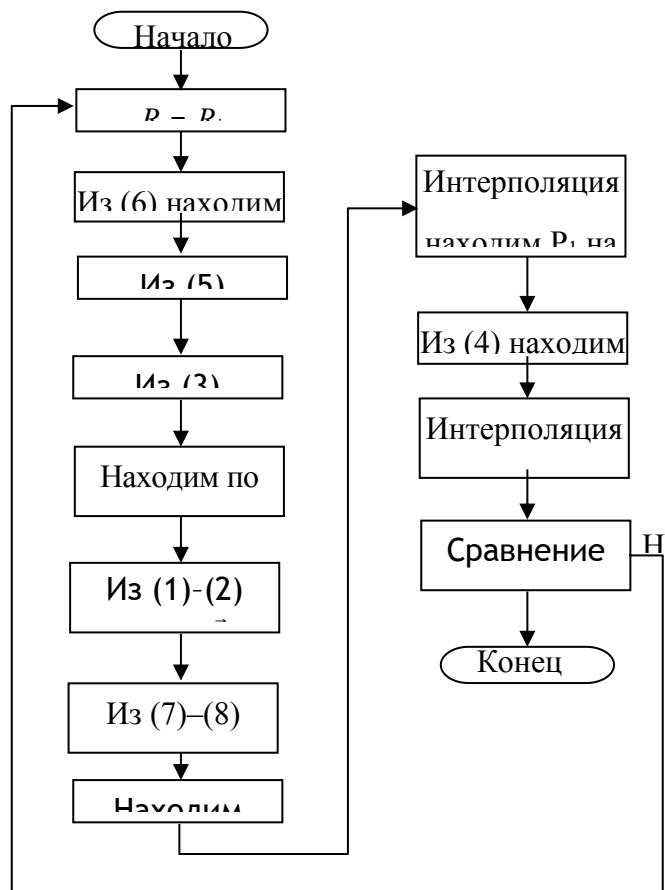


Рисунок 2.16 – Блок-схема алгоритма для стационарного течения изотермической газожидкостной смеси

К обеим частям (2.71) прибавляем вектор

$$\vec{f} = \{f_1, f_2\} = \vec{V}\Delta\rho + 2\left(\frac{\partial\rho}{\partial r}\frac{\partial\vec{V}}{\partial r} + \frac{\partial\rho}{\partial z}\frac{\partial\vec{V}}{\partial z}\right)$$

и получаем

$$\vec{f} + \frac{\rho}{\mu}(\rho(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} + \vec{\nabla}\tilde{P} - \mu C) = -\text{rot}\vec{\omega},$$

или, в проекциях,

(2.72)

$$f_2 + \frac{\rho}{\mu}\left(\rho V_z \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z}\right) + \frac{\partial \rho}{\partial z} - \mu B = -\frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{1}{r}\omega. \quad (2.73)$$

Дифференцируя уравнение (2.72) по z , а (2.73) – по r и вычитая (2.73) из (2.72), исключаем \tilde{P} и, принимая во внимание (2.70), окончательно получаем новую систему, которая эквивалентна системе (2.77), (2.78):

$$\mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r} \omega \right) \right) = \left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{\mu}{\rho} f_1 + \rho \left(V_z \frac{\partial V_z}{\partial r} + \right. \right. \quad (2.74)$$

$$\left. \left. + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) - \mu A \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu}{\rho} f_2 + \rho \left(V_z \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) - \mu B \right),$$

$$\text{rot}\vec{\omega} = -\Delta(\rho\vec{V}). \quad (2.75)$$

Запишем полученную систему в безразмерных координатах:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r} \omega \right) \right) \right) &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{Re} \left(\frac{f_1}{\rho} - A \right) + \right. \\ &\quad \left. + \rho \left(V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{Re} \left(\frac{f_2}{\rho} - B \right) + \rho \left(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\frac{\partial^2 (\rho V_z)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 (\rho V_z)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial r} - \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, \quad (2.77)$$

$$\frac{\partial^2 (\rho V_z)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 (\rho V_z)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r} \omega = 0. \quad (2.78)$$

Правую часть уравнения (2.76) обозначим через $L(U, V)$. При вычислении $L(U, V)$, A и B можно не учитывать, так как непосредственно проверяется равенство

$$\frac{\partial B}{\partial r} = \frac{\partial A}{\partial z}.$$

Далее введем следующие обозначения:

$$r = x, \quad z = y, \quad V_2 = U, \quad V_z = V.$$

Систему (2.76)–(2.78) решаем методом установления. При этом производим расщепление уравнений по каждой из переменных, после чего применяем метод прогонки. Границу области течения обозначим через S . Таким образом, имеем

$$\rho \frac{V^{\frac{n+1}{2}} - V^n}{\tau} = \frac{\partial^2(\rho V^n)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial(\rho V^n)}{\partial x} + \frac{\partial^2(\rho V^{\frac{n+1}{2}})}{\partial y^2} + \frac{1}{x} \omega^n + \frac{\partial \omega^n}{\partial x}, \quad (2.79)$$

$$V^{\frac{n+1}{2}} \Big|_S = V_0.$$

$$\omega^{\frac{n+1}{2}} \Big|_S = \left. \frac{\partial(\rho U^n)}{\partial y} \right|_S - \left. \frac{\partial(\rho V^{\frac{n+1}{2}})}{\partial x} \right|_S. \quad (2.80)$$

$$\frac{\omega^{\frac{n+1}{2}} - \omega^n}{\tau} = \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \omega^n}{\partial x} + \frac{1}{\rho x} \omega^n \right) + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \omega^{\frac{n+1}{2}}}{\partial y} \right) + L \left(U^n, V^{\frac{n+1}{2}} \right). \quad (2.81)$$

$$\rho \frac{U^{\frac{n+1}{2}} - U^n}{\tau} = \frac{\partial^2(\rho U^n)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial(\rho U^n)}{\partial x} + \frac{\partial^2(\rho U^{\frac{n+1}{2}})}{\partial y^2} - \frac{\partial \omega^{\frac{n+1}{2}}}{\partial y}. \quad (2.82)$$

$$U^{\frac{n+1}{2}} \Big|_S = U. \quad (2.83)$$

$$\rho \frac{U^{n+1} - U^{\frac{n+1}{2}}}{\tau} = \frac{\partial^2(\rho U^{n+1})}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial(\rho U^{n+1})}{\partial x} + \frac{\partial^2(\rho U^{\frac{n+1}{2}})}{\partial y^2} - \frac{\partial \omega^{\frac{n+1}{2}}}{\partial y}. \quad (2.84)$$

$$U^{n+1} \Big|_S = U. \quad (2.85)$$

$$\omega^{n+1} \Big|_S = \left. \frac{\partial(\rho U^{n+1})}{\partial y} \right|_S - \left. \frac{\partial(\rho V^{\frac{n+1}{2}})}{\partial x} \right|_S. \quad (2.86)$$

$$\begin{aligned} \frac{\omega^{n+1} - \omega^{\frac{n+1}{2}}}{\tau} &= \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \omega^{n+1}}{\partial x} + \frac{1}{\rho x} \omega^{n+1} \right) + \\ &+ \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \omega^{\frac{n+1}{2}}}{\partial y} \right) + L \left(U^{n+1}, V^{\frac{n+1}{2}} \right). \end{aligned} \quad (2.87)$$

$$\rho \frac{V^{n+1} - V^{\frac{n+1}{2}}}{\tau} = \frac{\partial^2 (\rho V^{n+1})}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial (\rho V^{n+1})}{\partial x} + \frac{\partial^2 (\rho V^{\frac{n+1}{2}})}{\partial y^2} + \frac{1}{x} \omega^{n+1} + \frac{\partial \omega^{n+1}}{\partial x}. \quad (2.88)$$

$$V^{n+1} \Big|_S = V. \quad (2.89)$$

Запишем уравнения (2.78), (2.81), (2.82), (2.84), (2.87) и (2.88) в форме, удобной для решения методом прогонки. Для (2.78), (2.81), (2.82) имеем

$$\begin{aligned} -\frac{\rho_{ij-1}}{\ell^2} V_{ij-1}^{\frac{n+1}{2}} + \frac{\rho_{ij}}{\ell^2} \left(1 + \frac{\ell^2}{\tau} \right) V_{ij}^{\frac{n+1}{2}} - \frac{\rho_{ij+1}}{\ell^2} V_{ij+1}^{\frac{n+1}{2}} &= R(V_{ij}^n) + \frac{1}{x_i} \omega_{ij}^n + \frac{\partial}{\partial x} \omega_{ij}^n; \\ -\frac{\rho_{ij-1}}{\ell^2} U_{ij-1}^{\frac{n+1}{2}} + \frac{\rho_{ij}}{\ell^2} \left(1 + \frac{\ell^2}{\tau} \right) U_{ij}^{\frac{n+1}{2}} - \frac{\rho_{ij+1}}{\ell^2} U_{ij+1}^{\frac{n+1}{2}} &= R(U_{ij}^n) + \frac{\partial}{\partial y} \omega_{ij}^{\frac{n+1}{2}}; \\ D_{ij} \omega_{ij-1}^{\frac{n+1}{2}} + E_{ij} \omega_{ij}^{\frac{n+1}{2}} + F_{ij} \omega_{ij+1}^{\frac{n+1}{2}} &= Q(\omega_{ij}^n) + L_{ij} \left(U^n, V^{\frac{n+1}{2}} \right), \end{aligned}$$

где $R(U_{ij}) = \alpha_{ij} U_{i-1j} + \beta_{ij} U_{ij} + \gamma_{ij} U_{i+1j}$,

$$\alpha_{ij} = \rho_{i-1j} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{2x_i} \right),$$

$$\beta_{ij} = \rho_{ij} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{h^2} \right),$$

$$\gamma_{ij} = \rho_{i+1j} \left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{2x_i} \right),$$

$$D_{ij} = -\frac{1}{Re \cdot \ell^2 \rho_{ij-\frac{1}{2}}}; \quad E_{ij} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{Re \cdot \ell^2} \left(\frac{1}{\rho_{ij-\frac{1}{2}}} + \frac{1}{\rho_{ij+\frac{1}{2}}} \right);$$

$$F_{ij} = -\frac{1}{Re \cdot \ell^2 \rho_{ij+\frac{1}{2}}};$$

$$Q(\omega_{ij}) = Q_{ij} \omega_{i-1j} + b_{ij} \omega_{ij} + c_{ij} \omega_{i+1j};$$

$$a_{ij} = \frac{1}{Re} \left(\frac{1}{\ell^2 \rho_{i-\frac{1}{2}j}} - \frac{1}{2\ell \cdot \rho_{i-1} x_{i-1}} \right),$$

$$b_{ij} = \frac{1}{\tau} - \frac{1}{Re \cdot \ell^2} \left(\frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2}j}} + \frac{1}{\rho_{i-\frac{1}{2}j}} \right),$$

$$c_{ij} = \frac{1}{Re} \left(\frac{1}{\ell^2 \rho_{i+\frac{1}{2}j}} - \frac{1}{2\ell \cdot \rho_{i+1} x_{i+1}} \right),$$

$$\begin{aligned} L_{ij}(U, V) &= \frac{1}{Re} - \frac{1}{\rho_{ij}} \left(\frac{\partial f_2(V_{ij})}{\partial x} - \frac{\partial f_1(U_{ij})}{\partial y} \right) + \frac{1}{Re} \frac{1}{\rho_{ij}^2} \left(f_1(U_{ij}) \frac{\partial}{\partial y} \rho_{ij} - f_2(V_{ij}) \frac{\partial}{\partial x} \rho_{ij} \right) + \\ &+ \rho_{ij} \left(U_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x^2} V_{ij} + V_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} V_{ij} - U_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} U_{ij} - V_{ij} \frac{\partial^2}{\partial y^2} U_{ij} + \frac{\partial}{\partial x} U_{ij} \frac{\partial}{\partial x} V_{ij} + \frac{\partial}{\partial x} V_{ij} \frac{\partial}{\partial y} V_{ij} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial}{\partial x} U_{ij} \frac{\partial}{\partial y} U_{ij} - \frac{\partial}{\partial y} U_{ij} \frac{\partial}{\partial y} V_{ij} \right) + + \frac{\partial}{\partial x} \rho_{ij} \left(U_{ij} \frac{\partial}{\partial x} V_{ij} + V_{ij} \frac{\partial}{\partial y} V_{ij} \right) - \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial y} \rho_{ij} \left(U_{ij} \frac{\partial}{\partial x} U_{ij} + V_{ij} \frac{\partial}{\partial y} U_{ij} \right); \\ f_1(U_{ij}) &= U_{ij} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \rho_{ij} + \frac{1}{x_i} \frac{\partial}{\partial x} \rho_{ij} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \rho_{ij} \right) + 2 \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho_{ij} \frac{\partial}{\partial x} U_{ij} + \frac{\partial}{\partial y} \rho_{ij} \frac{\partial}{\partial y} U_{ij} \right); \\ f_2(V_{ij}) &= V_{ij} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \rho_{ij} + \frac{1}{x_i} \frac{\partial}{\partial x} \rho_{ij} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \rho_{ij} \right) + 2 \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho_{ij} \frac{\partial}{\partial x} V_{ij} + \frac{\partial}{\partial y} \rho_{ij} \frac{\partial}{\partial y} V_{ij} \right); \\ \frac{\partial f_1(U_{ij})}{\partial y} &= 2 \left(\frac{\partial^2 U_{ij}}{\partial x \partial y} \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial x} + \frac{\partial^2 U_{ij}}{\partial y^2} \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial y} + \frac{\partial U_{ij}}{\partial x} \frac{\partial^2 \rho_{ij}}{\partial x \partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial U_{ij}}{\partial y} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{x_i} \frac{\partial}{\partial x} + 3 \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \rho_{ij} + U_{ij} \left(\frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y} + \frac{1}{x_i} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^3}{\partial y^3} \right) \rho_{ij}; \\ \frac{\partial f_2(V_{ij})}{\partial y} &= 2 \left(\frac{\partial^2 V_{ij}}{\partial x^2} \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial x} + \frac{\partial^2 V_{ij}}{\partial x \partial y} \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial y} + \frac{\partial V_{ij}}{\partial y} \frac{\partial^2 \rho_{ij}}{\partial x \partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial V_{ij}}{\partial x} \left(3 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{x_i} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \rho_{ij} + V_{ij} \left(\frac{\partial^3}{\partial x^3} + \frac{1}{x_i^2} \frac{\partial^2}{\partial x} + \frac{1}{x} \frac{\partial^2}{\partial x} + \frac{\partial^3}{\partial y^2 \partial x} \right) \rho_{ij} = j. \end{aligned}$$

Формулы для аппроксимации производных (центральные):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U_{ij}}{\partial x} &= \frac{U_{i+1j} - U_{i-1j}}{2\ell}, \quad \frac{\partial U_{ij}}{\partial y} = \frac{U_{ij+1} - U_{ij-1}}{2\ell}, \quad \frac{\partial^2 U_{ij}}{\partial x^2} = \\
&= \frac{U_{i-1j} - 2U_{ij} + U_{i+1j}}{\zeta^2}, \quad \frac{\partial^2 U_{ij}}{\partial y^2} = \frac{U_{ij-1} - 2U_{ij} + U_{ij+1}}{\ell^2}; \\
\frac{\partial^2 U_{ij}}{\partial x \partial y} &= \frac{U_{i+1j+1} - U_{i-1j+1} + U_{i+1j-1} + U_{i-1j-1}}{4h\ell}, \quad \frac{\partial^3 U_{ij}}{\partial x^3} = \frac{U_{i+2j} - 2U_{i+1j} + 2U_{i-1j} - U_{i-2j}}{2\zeta^3}, \\
\frac{\partial^3 U_{ij}}{\partial x^2 \partial y} &= \frac{U_{i+1j+1} - U_{i-1j+1} + 2U_{ij-1} - 2U_{ij+1} + U_{i-1j+1} - U_{i-1j-1}}{2\ell^2 \zeta^2}, \\
\frac{\partial^3 U_{ij}}{\partial y^3} &= \frac{U_{ij+2} - 2U_{ij+1} + 2U_{ij-1} - U_{ij-2}}{2\ell^3}.
\end{aligned}$$

Для (2.84), (2.87), (2.88) имеем

$$\begin{aligned}
-\rho_{i-1j} \left(\frac{1}{\zeta^2} - \frac{1}{2\zeta x_i} \right) U_{i-1j}^{n+1} + \frac{\rho_{ij}}{\zeta^2} \left(2 + \frac{\zeta^2}{\tau} \right) U_{ij}^{n+1} - \rho_{i+1j} \left(\frac{1}{\zeta^2} + \frac{1}{2\zeta x_i} \right) U_{ij}^{n+1} = \\
= P \left(U_{ij}^{\frac{n+1}{2}} \right) - \frac{\partial \omega^{\frac{n+1}{2}}}{\partial y},
\end{aligned}$$

где $P(U_{ij}) = P_{ij}U_{ij-1} + q_{ij}U_{ij} + r_{ij}U_{ij+1}$;

$$P_{ij} = \frac{\rho_{ij-1}}{\ell^2}; \quad q_{ij} = -\frac{\rho_{ij}}{\ell^2} \left(2 + \frac{\ell^2}{\tau} \right); \quad r_{ij} = \frac{\rho_{ij+1}}{\ell^2};$$

$$G_{ij}\omega_{i-1j}^{\frac{n+1}{2}} + H_{ij}\omega_{ij}^{\frac{n+1}{2}} + T_{ij}\omega_{i+1j}^{\frac{n+1}{2}} = S \left(\omega_{i-1j}^{\frac{n+1}{2}} \right) + L_{ij} \left(U^{n+1}, V^{\frac{n+1}{2}} \right);$$

$$S(\omega_{ij}) = K_{ij}U_{ij-1} + \ell_{ij}U_{ij} + \omega_{ij}U_{ij+1};$$

$$K_{ij} = \frac{1}{\operatorname{Re} \ell^2 \rho_{ij-\frac{1}{2}}}; \quad \ell_{ij} = \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\operatorname{Re} \ell^2} \left(\frac{1}{\rho_{ij-\frac{1}{2}}} + \frac{1}{\rho_{ij+\frac{1}{2}}} \right); \quad m_{ij} = \frac{1}{\operatorname{Re} \ell^2 \rho_{ij+\frac{1}{2}}};$$

$$G_{ij} = \frac{1}{\operatorname{Re}} \left(-\frac{1}{\zeta^2 \rho_{i+\frac{1}{2}j}} + \frac{1}{2\zeta \rho_{i-1} x_{i+1}} \right); \quad H_{ij} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\operatorname{Re} \zeta^2} \left(\frac{1}{\rho_{i-2j}} + \frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2}j}} \right);$$

$$T_{ij} = \frac{1}{\operatorname{Re}} \left(-\frac{1}{\zeta^2 \rho_{i+\frac{1}{2}j}} - \frac{1}{2\zeta \rho_{i+1} x_{i+1}} \right)$$

или

$$C_{ij} = -a_{ij}; \quad H_{ij} = -b_{ij} + \frac{2}{\tau}; \quad T_{ij} = -C_{ij};$$

$$K_{ij} = -D_{ij}; \quad \ell_{ij} = -E_{ij} + \frac{2}{\tau}; \quad m_{ij} = -F_{ij}.$$

$$\begin{aligned} & \rho_{i-1j} \left(-\frac{1}{\zeta^2} + \frac{1}{2\zeta x_i} \right) V_{i-1j}^{n+1} + \rho_{ij} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{2}{h^2} \right) V_{ij}^{n+1} + \rho_{i+1j} \left(-\frac{1}{\zeta^2} - \frac{1}{2\zeta x_i} \right) V_{i+1j}^{n+1} = \\ & = \frac{\rho_{ij-1}}{\ell^2} V_{ij-1}^{n+\frac{1}{2}} - 2 \frac{\rho_{ij}}{\ell^2} V_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\rho_{ij+1}}{\ell^2} V_{ij+1}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\omega_{ij}^{n+1}}{x_i} + \frac{\partial}{\partial x} \omega^{n+1}. \end{aligned}$$

На рисунках 2.17 и 2.18 показаны общая схема счета и пример сетки для решения системы (2.87), (2.88), где T_x и T_y – текущие координаты x и y .

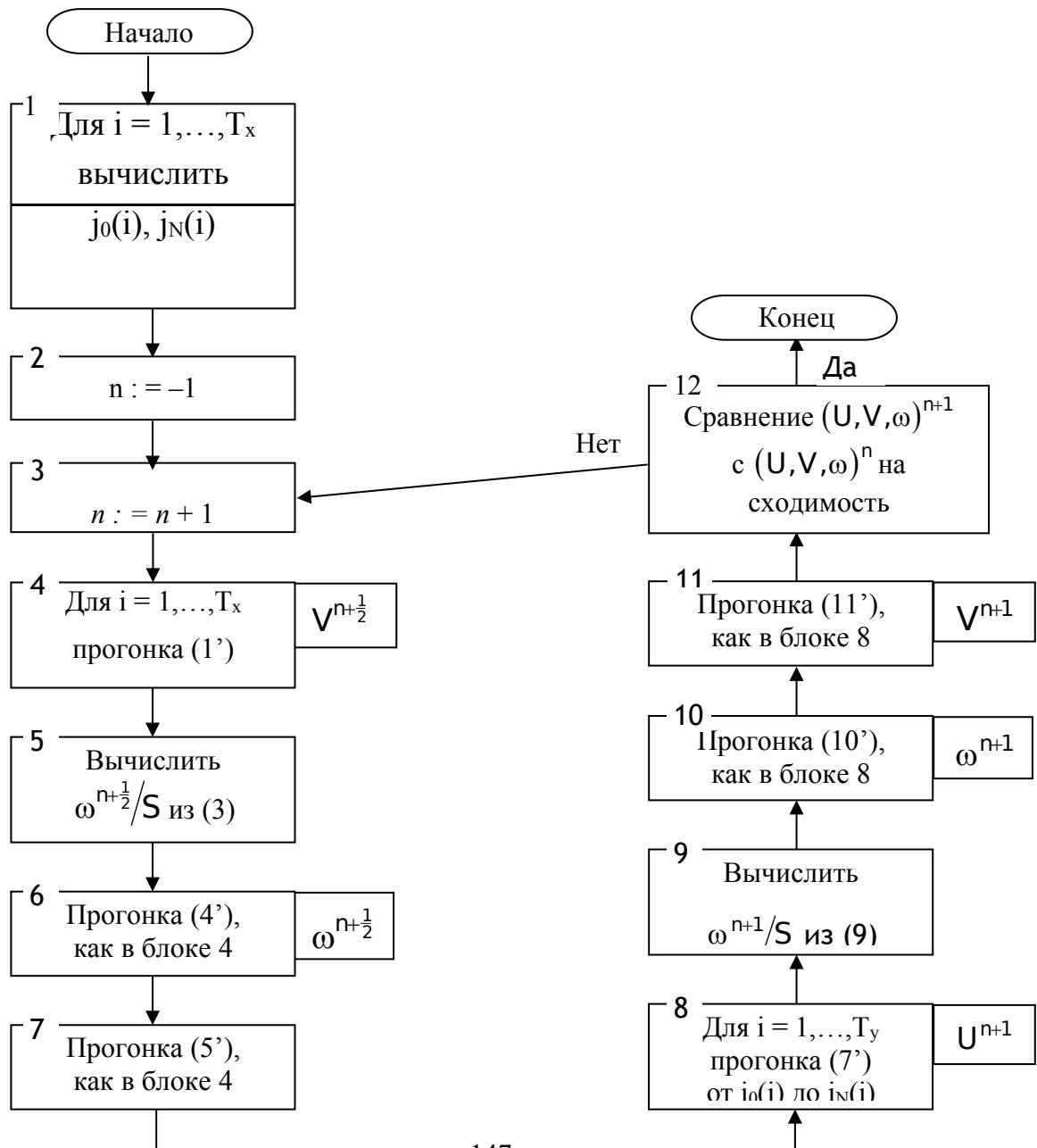


Рисунок 2.17 – Общая блок-схема счета

Необходимо отметить, что в нерегулярных узлах (соседних с граничными) производные $\frac{\partial^3}{\partial x^3}$ и $\frac{\partial^3}{\partial y^3}$ следует заменить производными $\frac{\partial^3}{\partial x_+^3}$, $\frac{\partial^3}{\partial y_+^3}$ в начале счета (в точках i_0+1, j_0+1 соответственно) и производными $\frac{\partial^3}{\partial x_-^3}$, $\frac{\partial^3}{\partial y_-^3}$ в конце счета (в точках i_N-1, j_N-1 соответственно):

$$\begin{aligned}\frac{\partial^3}{\partial x_+^3} U_{i_0+1,j} &= \frac{U_{i_0+3,j} - 3U_{i_0+2,j} + 3U_{i_0+1,j} - U_{i_0,j}}{\zeta^3}, \\ \frac{\partial^3}{\partial y_+^3} U_{i,j_0+1} &= \frac{U_{i,j_0+3} - 3U_{i,j_0+2} + 3U_{i,j_0+1} - U_{i,j_0}}{\ell^3}, \\ \frac{\partial^3}{\partial x_-^3} U_{i_N-1,j} &= \frac{U_{i_N,j} - 3U_{i_N-1,j} + 3U_{i_N-2,j} - U_{i_N-3,j}}{\zeta^3}, \\ \frac{\partial^3}{\partial y_-^3} U_{i,j_N-1} &= \frac{U_{i,j_N-3} - 3U_{i,j_N-1} + 3U_{i,j_N-2} - U_{i,j_N-3}}{\ell^3}.\end{aligned}$$

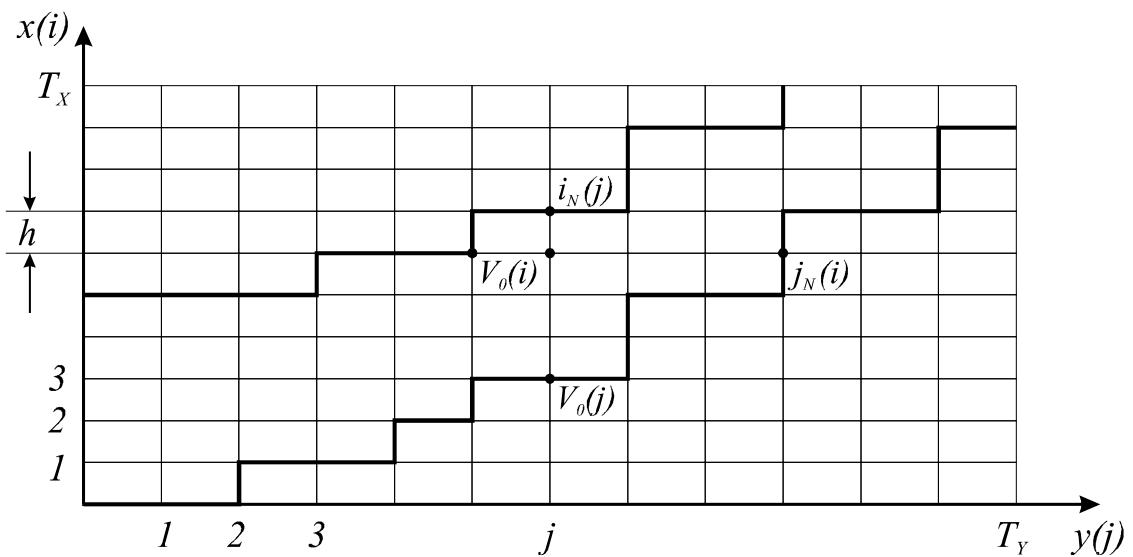


Рисунок 2.18 – Пример сетки для решения системы (2.87), (2.88)

3. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Тенденции научно-технического развития предполагают разработку новых перспективных аппаратов и устройств, движущихся в воде и других жидкостях с большими скоростями. Это требование должно сопровождаться углублённым изучением сложнейших теплофизических и гидродинамических явлений, как правило, в двухфазных потоках. Актуальными остаются задачи создания экспериментальной технологии проведения модельных и натурных исследований и развития, таким образом, идей, заложенных в работах [1–6, 80–84, 397–402].

3.1. Экспериментальные стенды

Для проведения экспериментальных исследований были использованы возможности кафедры теплотехники и гидрогазодинамики ПИ СФУ, достаточно описанные в [218]. На рисунках 3.1–3.4, 3.9 представлены модельные установки СФУ. На рисунках 3.5–3.9 представлены модельные установки, построенные совместно с Институтом высоких технологий Хэйлундзянской академии наук (Харбин).

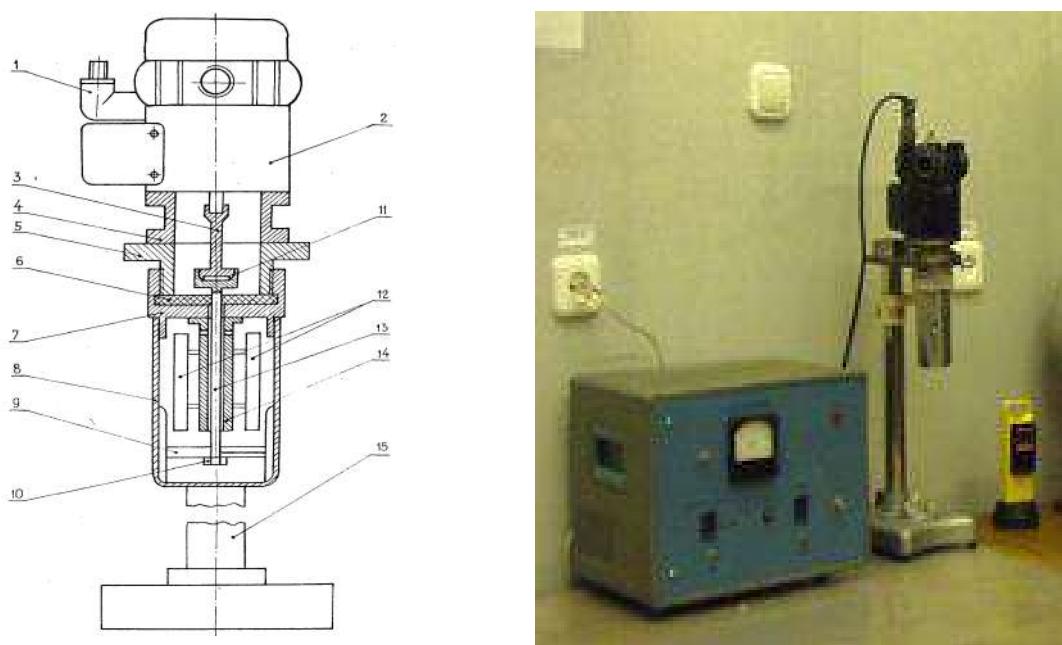


Рисунок 3.1 – Схема суперкавитационного миксера (эмульгатора): 1 – электрический разъем, 2 – электродвигатель, 3 – промежуточный валик, 4 – опорное кольцо, 5 – стол,

6 – уплотнение, 7 – втулка, 8 – стакан, 9 – кавитатор, 10 – гайка, 11 – муфта,
12 – гидротормоз, 13 – вал кавитатора, 14 – втулка, 15 – штатив [29]

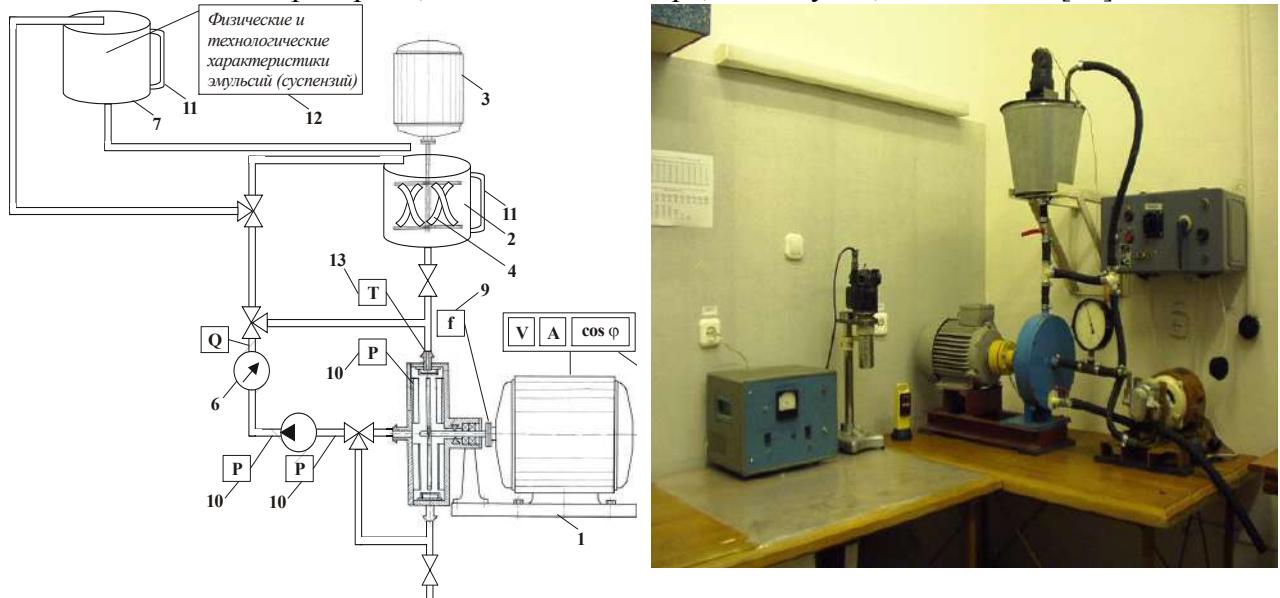


Рисунок 3.2 – Схема стенда для кавитационной обработки эмульсий (сусpenзий):
1 – кавитационный смеситель [403]; 2 – емкость с исходным продуктом;
3 – электродвигатель; 4 – механический гомогенизатор; 5 – насос;
6 – расходомер; 7 – контрольная емкость; 8 – блок измерения электрических параметров привода
кавитационного эмульгатора; 9 – блок измерения частоты вращения; 10 – блок измерения
давления; 11 – уровнемер; 12 – измерительно-лабораторный комплекс для определения
характеристик эмульсий (сусpenзий); 13 – блок измерения температуры

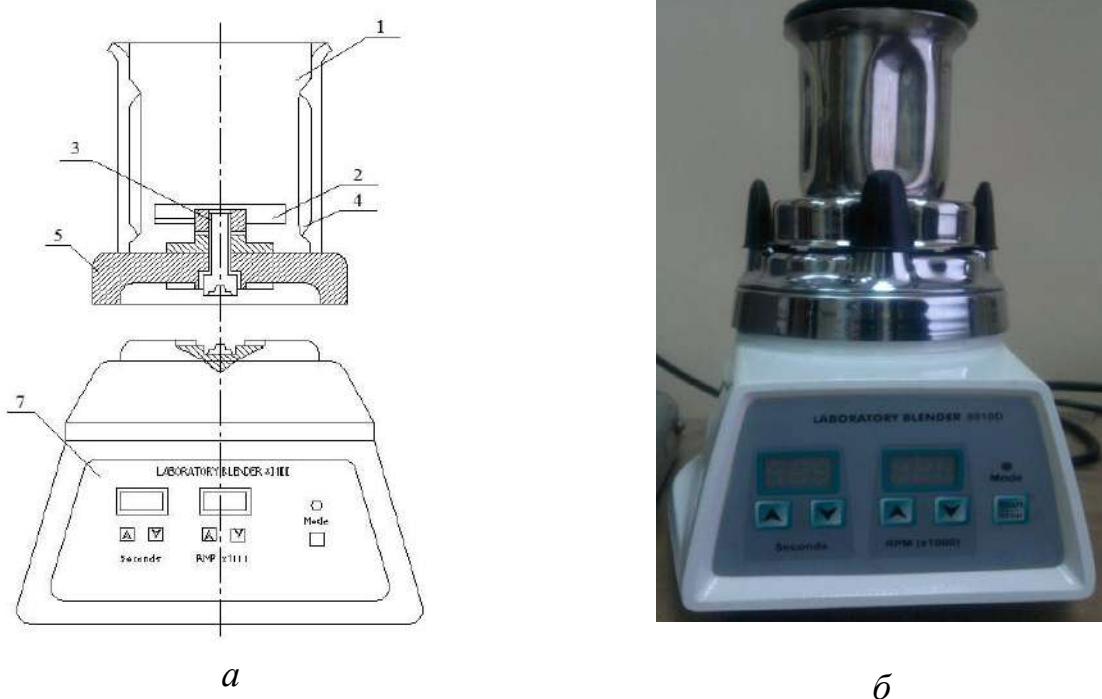


Рисунок 3.3 – Схема лабораторного кавитационного миксера: 1 – гидротормоз;
2 – кавитатор; 3 – вал кавитатора; 4 – дополнительный гидротормоз стенок
реактора; 5 – станина реактора; 6 – вал электродвигателя; 7 – блок управления;
б – внешний вид

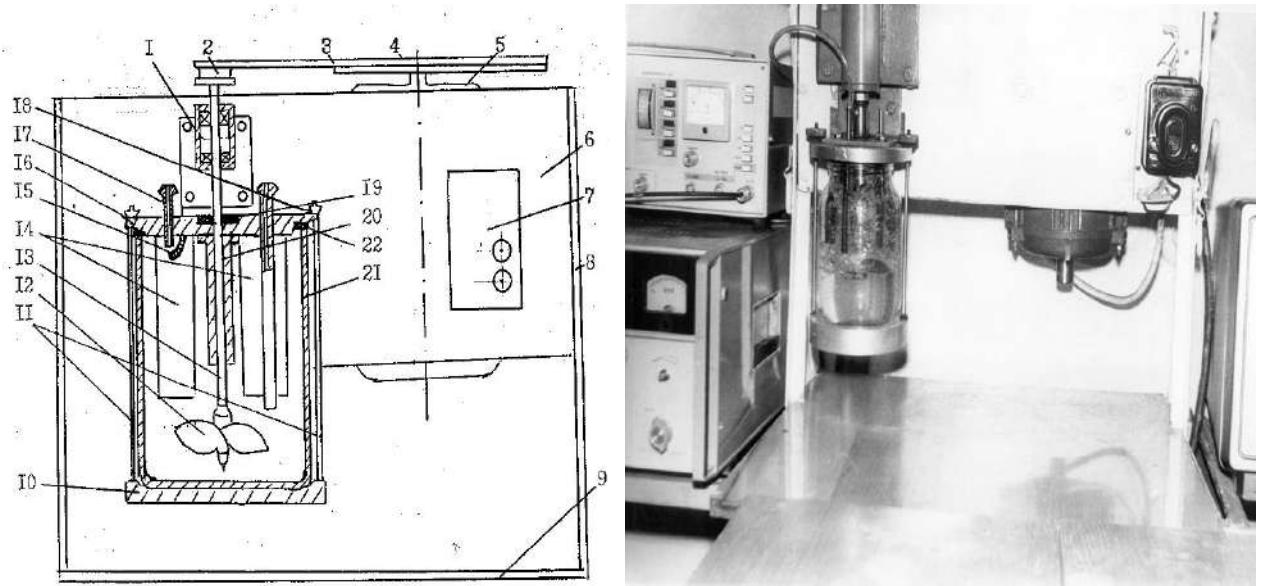


Рисунок 3.4 – Лабораторный суперкавитационный стенд: 1 – корпус подшипников; 2 – шкив ведомый; 3 – ремень; 4 – шкив ведущий; 5 – электродвигатель; 6 – панель; 7 – автоматический выключатель; 8 – стойка; 9 – стол; 10 – поддон; 11 – стяжные болты; 12 – СК-крыльчатка; 13 – вал; 14 – гидротормоз; 15 – отражатель; 16 – крыша; 17 – штуцер; 18 – нагнетательная трубка; 19 – сальник; 20 – втулка; 21 – рабочая камера; 22 – уплотнение

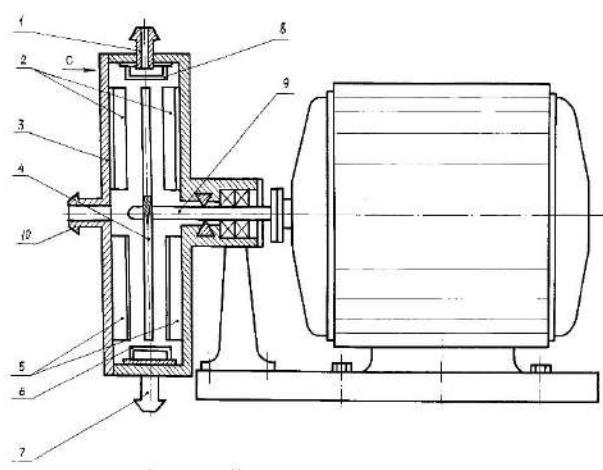
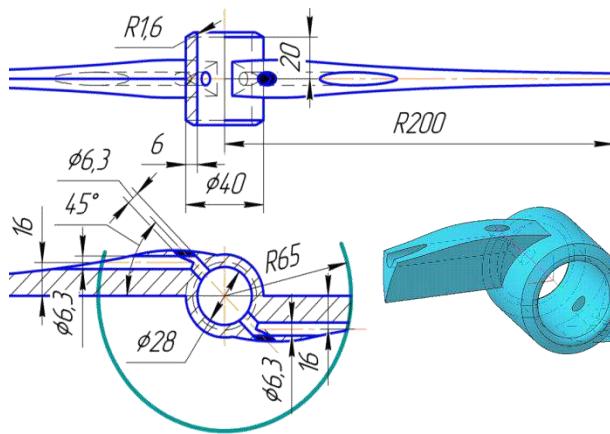


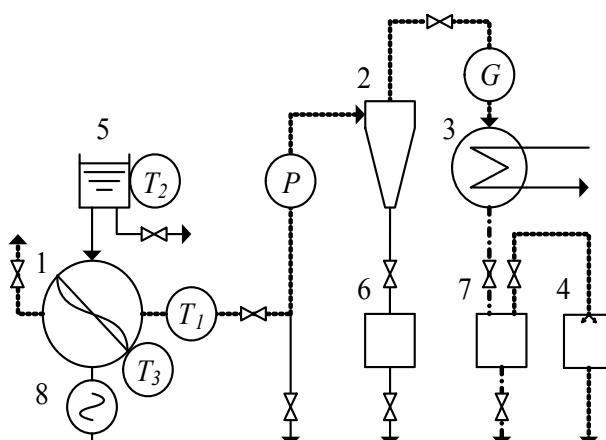
Рисунок 3.5 – Суперкавитационный стенд [404] – Схема установки для гидродинамических исследований: 1, 7 – патрубок для подвода жидкости; 2, 5 – лопатки; 3 – корпус; – кавитатор в виде крыльчатки; 6, 8 – полукольцо с петлеобразными выступами; 9 – вал кавитатора; 10 – выходной патрубок (Китай)



а

б

Рисунок 3.6 – Тетрагональный вид вращательного кавитатора [404] диаметром 130 мм – *а*. Прозрачная 3D модель показывает форму каналов для отбора пара; *б* – внешний вид модели



а

б

Рисунок 3.7 – Схема стенда вращательного суперкавитирующего испарителя (ВСКИ) – *а*: сплошная линия – соленая вода; пунктирная линия – водяной пар; точечная линия – опресненная вода; 1 – ВСКИ; 2 – сепаратор; 3 – конденсатор; 4 – вакуумный насос; 5 – открытый бак для воды; 6, 7 – вспомогательные баки для воды; 8 – электродвигатель; *G* – расходомер; *T* – температурный датчик; *P* – манометр; *б* – общий вид испытательного стенда ВСКИ (фотография, Китай) [404]



а

б

Рисунок 3.8 – Внешний вид суперкавитационного стенда по схеме [404] – *а*; *б* – установка для получения топливных смесей – НПП «Экотехника», Новокузнецк

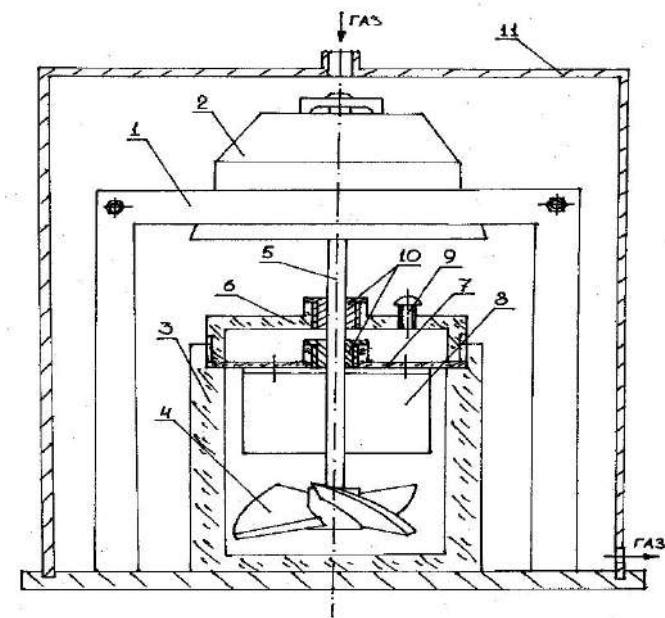


Рисунок 3.9 – Схема экспериментальной установки с винтовым кавитатором

3.2 Методология и методы исследований

Численный анализ проводился с применением методов решения дифференциальных уравнений с обыкновенными производными (метод Рунге – Кутта – Мерсона и др.) и программного комплекса COMSOL Multiphysics; для систем уравнений с частными производными – FEMLAB, а также пакеты прикладных программ ANSYS CFX. Для выработки рекомендаций по оздоровлению экологической обстановки в мегаполисах применено прогнозирование загрязнения городской атмосферы на базе рекуррентных нейронных сетей LSTM с использованием программного комплекса Google TensorFlow. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных и промышленных условиях в России и Китае. Известные результаты работ различных исследователей в этой области знаний дополнены экспериментами автора.

Оценка точности полученных результатов проводилась с использованием методов общей теории ошибок, теории вероятностей и математической статистики с установлением доверительного предела при вероятности 95 % [397—400], что является гарантией достоверности полученных данных и позволяет указать доверительные интервалы при практическом использовании результатов исследования.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как справедливо отмечено в презентации J. Koschikowski [405] «Землю называют «голубой планетой». Причина в том, что около 71 % земной поверхности покрыто водой. Человек состоит примерно на 60 % из воды, некоторые животные – на 70 %, а некоторые растения – даже на 95 %. Как может возникнуть нехватка воды, если 71 % земной поверхности состоит из воды? Проблема в том, что более 97 % мировых водных ресурсов представляют собой «соленую воду», что означает, что содержание соли в воде слишком велико для питья, а также для орошения. Около 70 % из оставшихся 3 % пресной воды хранится во льдах полярных шапок. Другая часть хранится в труднодоступных глубинных источниках подземных вод. Наконец, только около 0,3 % мировых водных ресурсов поступает из рек, озер или доступных ресурсов подземных вод. Экспоненциальный рост населения мира наблюдается в основном в засушливых регионах мира (Африка, Индия), что приводит к резкому увеличению спроса на продовольствие, вызывая дополнительную интенсивную нагрузку на и без того скучные водные ресурсы. Во многих из этих регионов уровень грунтовых вод падает на несколько метров каждый год, что приводит к полному дефициту или интрузии солей, что делает воду непригодной для использования. Быстрый рост индустриализации, особенно в некоторых частях Азии, приводит к высокому загрязнению рек и водоносных горизонтов из-за неустойчивого использования имеющихся ресурсов. Согласно прогнозам на 2025 год, большая часть Африки и Центральной Азии сильно пострадает от нехватки воды. Ожидается, что из 7,2 млрд человек, живущих к 2025 году в мире, 3 млрд человек (40 %) сильно пострадают от нехватки воды. Но и сегодня нехватка чистой питьевой воды уже является существенной проблемой в ряде регионов мира и причиной конфликтов и войн. Одним из вариантов создания новых ресурсов пресной воды является использование морской воды путем опреснения, которую можно рассматривать как неиссякаемый источник. В частности, в регионе Персидского залива некоторые

страны не имеют природных ресурсов пресной воды, но покрывают 100 % своих потребностей за счет опреснения морской воды. Также страны южной Европы, такие как Испания, должны поставлять часть своей воды, перерабатывая воду из моря. Сегодня ежедневно во всем мире путем опреснения производится около 50 млн м³ пресной воды, и количество новых установленных мощностей быстро растет.

Частично предварительные результаты были опубликованы в работах [6, 19, 101, 119–123, 125, 126, 143, 144, 146, 148, 162, 163, 165, 216, 231, 232, 238–244, 257, 271–275, 277, 286–298, 348, 361, 365, 367, 379, 388, 404, 406–410, 415–429, 432, 495, 496] и обобщены в монографиях и учебных пособиях [4, 5, 238, 299, 364, 411–414, 430, 431, 481].

4.1. Физико-химическое воздействие гидродинамической кавитации на водные системы

Модернизация производственных процессов в плане энергоэффективности, экологической и производственной безопасности является одной из стратегических задач развития страны. Создание новых технологических комплексов и оборудования связано с изучением различных физических и химических процессов, которые, как правило, протекают в различных жидких средах. Вода в большинстве процессов выступает как дисперсионная среда или дисперсная фаза. Физико-механические процессы в многофазных жидкостях остаются до сих пор малоизученными, что приводит к ошибкам при проектировании технологий или дополнительным дорогостоящим экспериментальным исследованиям.

В связи с этим, исследования и разработки в области суперкавитации для гидроэнергетики, материаловедения, машиностроительного комплекса являются весьма востребованными.

Несмотря на широкое распространение в промышленности процессов разделения, смешения и технологической обработки многокомпонентных (многофазных) смесей на базе эффектов кавитации, системы оптимального управления такими процессами все еще детально не исследованы. В то же время имеется большой научный задел по моделированию стационарных и нестационарных режимов объектов с распределенными параметрами и встает задача переноса этих результатов в моделирование технологических режимов и систем управления процессами с использованием кавитации в технологических установках.

Известны отдельные результаты моделирования потоков применительно к оборудованию, в котором имеют место суперкавитационные течения и конкретные примеры расчетов СК-аппаратов различных конструкций. Даны конкретные практические рекомендации относительно их использования и технологического применения, предложены возможные технологические схемы для отдельных отраслей производства.

В этой связи данные исследования направлены на решение проблем питьевого и оборотного водоснабжения. Междисциплинарность поставленных задач заключается в решении на стыке теплофизических и экологических направлений развития науки и техники. Планирование потребления воды в промышленности и для населения стало важной проблемой во всем мире в конце 20-го века. Статистика Всемирной организации здравоохранения указывает на то, что около двух миллиардов людей страдают от дефицита пресной воды в мире. В течение прошлого века, рост глобального потребления воды более чем в два раза превысил рост населения. Согласно данным гидрологов, использование воды и распределение в несельскохозяйственных отраслях было 897 км^3 в 2000 году с прогнозируемым объемом 2216 км^3 в 2050 году во всем мире. Увеличение количества использования воды без соответствующей обработки стоков приведет к серьезным экологическим и экономическим последствиям. Более 97 % вод доступны для использования

человеком в соленых океанах и подземных источниках. По экспертным оценкам опреснение (обессоливание) это наиболее перспективное решение для мировых поставок пресной воды.

В результате проведенных опытов получены следующие результаты:

1. Проведено экспериментальное изучение реакции воды на гидродинамическое кавитационное воздействие при числах кавитации $\chi = 0,05$; $0,01$ и числах оборотов ротора $n = 10000$ и 2880 об/мин в зависимости от времени воздействия. Выявлены изменения физико-химических свойств воды (электропроводности, водородного показателя pH, окислительно-восстановительного потенциала, кислородосодержания и др.), установлена рациональная продолжительность кавитационной обработки воды. При этом наблюдается увеличение T , pH и электропроводности, уменьшение ОВП и КРК.
2. Временной диапазон с наиболее интенсивным изменением pH и ОВП составляет $30\text{--}90$ с. Скорость изменения величины pH и ОВП в интервале $30\text{--}90$ с в три и два раза выше, соответственно, чем в интервале $90\text{--}300$ с. Эти результаты достаточно хорошо коррелируют с результатами исследования влияния ультразвука (44 кГц) на воду.
3. Обнаружено, что максимальное значение pH достигается при кавитационном воздействии в течение 180 с. Минимальное значение ОВП принимает при 300 с кавитационной обработки, но остается в области положительных значений.
4. Показано, что за время релаксации активированная вода после обработки в течение 200 мин при используемых режимах гидродинамической кавитационной обработки по всем измеряемым параметрам (T , КРК, pH, ОВП, S) не возвращается в исходное состояние.

Полученные результаты могут быть использованы для управления физико-химическими свойствами воды с помощью изменения режимов кавитации. А это в свою очередь может способствовать более эффективному

использованию активированной воды в различных отраслях промышленности.

4.2 Кондиционирование промышленных стоков

При непрерывном увеличении водопотребления и загрязнения водоемов промышленными и бытовыми отходами острее ставится проблема интенсификации очистки вод и сохранения гидросферы. Это связано с тем, что возрастание объемов сточных вод влечет за собой необходимость увеличения площадей, занимаемых очистными сооружениями, что не всегда возможно в условиях урбанизированных территорий. Поэтому перед предприятиями и городскими службами стоит задача использования инновационного оборудования, с использованием современных материалов, технологий и оборудования.

Исследования гидротермодинамической кавитации позволяют получать наиболее адекватные результаты по воспроизведимости условий эксперимента, а также дают возможность проведения измерений физических параметров в кавитационной области. Заметим, что физико-химические эффекты идентичны независимо от способа возбуждения кавитации, что, безусловно, важно при решении вопроса о выборе кавитационных реакторов для определенных технологических решений.

Для полученных математических моделей кавитации была разработана математическая модель, связывающая параметры кавитационных эффектов с преобразованием примесей сточной воды и как следствие ее очистки. Для исследуемых режимов кавитации при газосодержании $\delta < 0,003$ получена регрессионная модель, связывающая длину каверн L_k , скорость вращения кавитационной крыльчатки W , давление P_∞ , время кавитационного воздействия t и снижение концентрации примесей $\mathcal{E} \%$. Чтобы увеличить, при неизменной длине каверн, все три параметра W , P_∞ , $\mathcal{E} \%$, необходимо увеличить и загромождение потока – отношение площади сечения кавитатора к площади сечения потока F_k/F_{py} . Анализ экспериментальных данных представлен в таблице 4.1, а регрессионная модель на рисунке 4.1. Численное решение

математической модели представлена на рисунке 4.2. Поле оптимальности ограничено числом вращения ротора кавитатора ($n_{\min} = 3000$ – 5000 об/мин) и временем кавитационного воздействия на сток $t_{\text{обр}} = 60$ с.

Таким образом, в результате выполненных работ была построена комплексная математическая модель, связывающая процессы схлопывания кавитационных полостей сопровождающиеся выбросом энергии, позволяющей преобразовать молекулы воды и модифицировать примеси стока. Это позволит разработать комплекс рекомендаций по формированию технологического регламента применения кавитационных установок при кондиционировании промышленных сточных вод.

Таблица 4.1 – Эффективность очистки сточной воды (модельный сток) при различных режимах кавитации

Показатель	Исходная концентрация мг/дм ³	Концентрация примесей после кавитационной обработки								
		3000 об/мин			7000 об/мин			10000 об/мин		
		30 с	60с	90с	30с	60с	90с	30с	60с	90с
pH	8,7	8,2	8,2	7,9	7,8	7,2	8,1	8,8	8,8	8,8
Cu	3,94	3,55	2,95	2,55	2,68	1,73	2,45	2,75	2,75	2,75
Zn	1,25	0,87	0,87	0,87	0,8	0,8	0,9	0,83	0,83	0,83
Pb	0,22	0,14	0,14	0,14	0,127	0,068	0,149	0,19	0,19	0,19
Fe	3,7	2,66	2,40	2,06	1,92	0,4	0, 6	2,66	2,66	2,66
Ni	2,52	1,58	1,58	1,58	1,53	0,63	1,43	1,86	1,86	1,86
Mn	0,03	0,02	0,02	0,02	0,015	0,003	0,005	0,02	0,02	0,02
Cr ⁶⁺	0,012	0,01	0,01	0,01	0,004	0,004	0,004	0,01	0,01	0,01

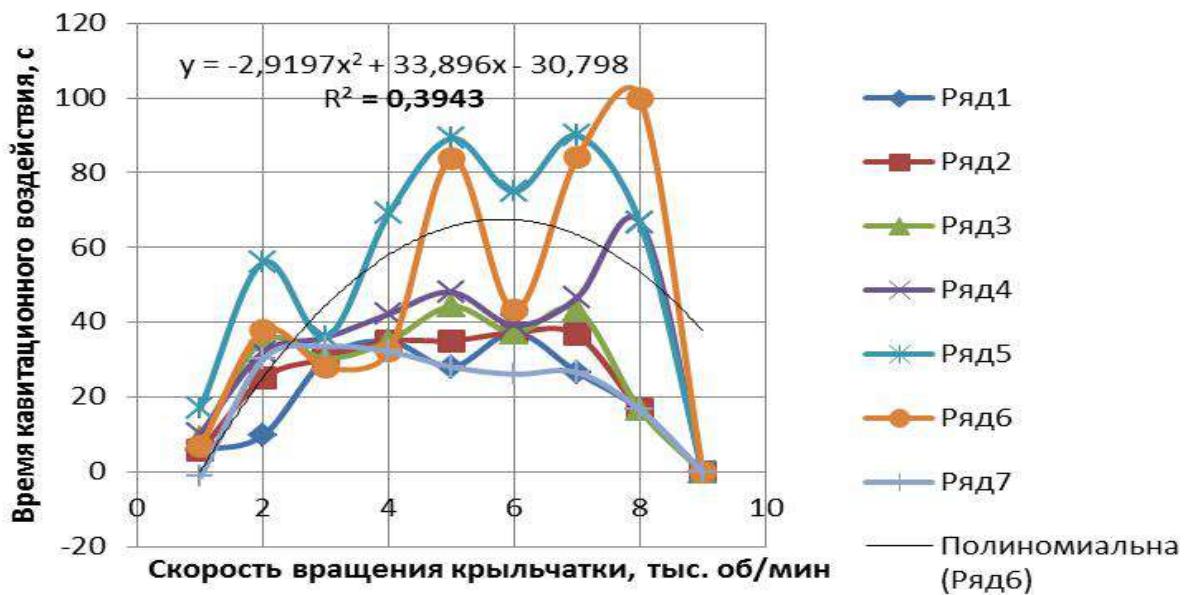


Рисунок 4.1 – Корреляционная зависимость эффективов очистки промышленного стока от режимов кавитации

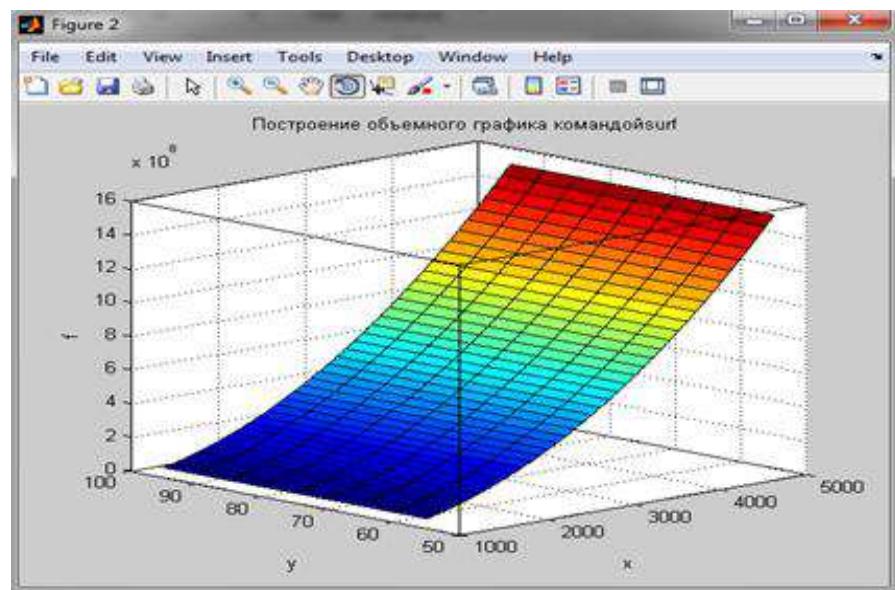


Рисунок 4.2 – Поле оптимальности ограничено числом вращения ротора кавитатора – минимально возможное 3000–5000 оборотов в минуту и временем кавитационного воздействия на сток – 60 с

На рисунке 4.3 представлены результаты стерилизации кишечной палочки в стоках. На базе математического моделирования осуществлен подбор режима кавитационной обработки стока. Численное решение математической модели представлено на рисунках 4.5, 4.6 [2, 3, 425].

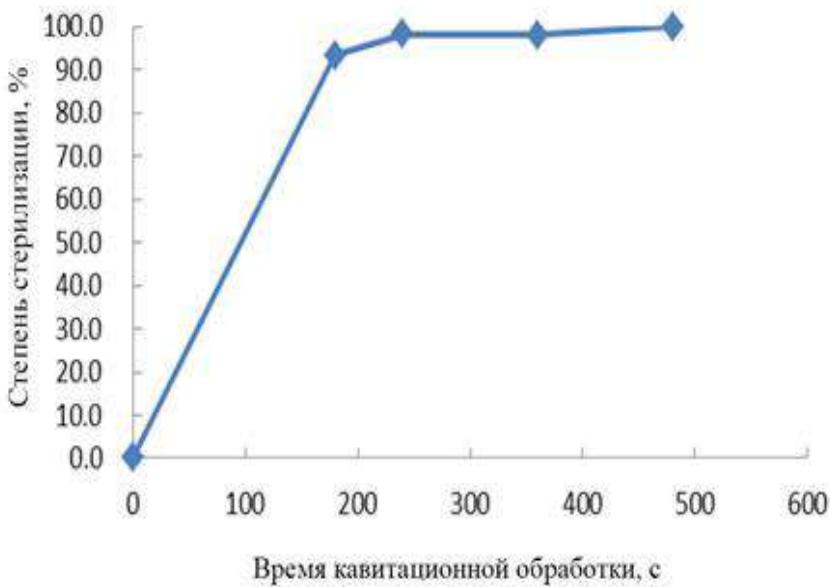


Рисунок 4.3 – Зависимость эффективности стерилизации кишечной палочки от времени кавитационной обработки

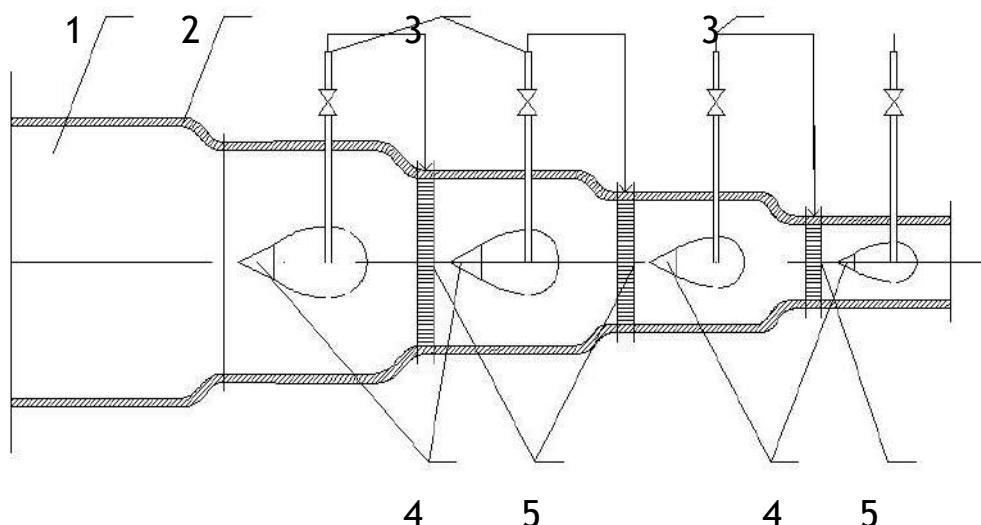
Здесь также предложен метод получения пресной воды питьевого качества на основе работы суперкавитационных испарителей. Предлагаемая схема многокорпусной установки суперкавитирующего типа показана на рисунке 4.4а.

На рисунке 4.4 представлены также современные компоновки технологических схем очистки сточных вод с использованием кавитационной технологии. Эффективность суперкавитационных испарителей главным образом определяется величиной поверхности испарения, которая в свою очередь зависит от многих факторов. Одновременное существование граничной динамики, фазового перехода и сильного изменения плотности значительно

затрудняет решение задачи при исследовании рабочих процессов СК-испарителей. В течение последнего десятилетия значительно возросла роль использования CFD (вычислительной гидродинамики) методов при проектировании технических устройств, благодаря возможности применения коммерческих кодов, основанных на современных устойчивых моделях.

Для оценки поверхности кавитационного испарения использована модель двухфазного гомогенного потока. Эта модель не предполагает поверхность раздела между двумя несмешивающимися жидкостями, поэтому объемная доля фазы может изменяться от нуля до единицы, в зависимости от занимаемого пространства в двухфазном потоке. В этом подходе используются уравнения сохранения импульса и неразрывности для смеси. Для оценивания переноса массы между фазами решается уравнение переноса пара в стационарном виде [425].

Решение задачи проведено для суперкавитационного испарителя, представляющего собой одну ступень опреснительной установки. Для апробации математической модели проведены расчеты при температуре воды 20 °C. Сопоставление результатов расчета, представленных на рисунках 4.5 и 4.6, с экспериментальными данными, подтверждает возможность использования данной математической модели для описания рабочих процессов в суперкавитационных испарителях.



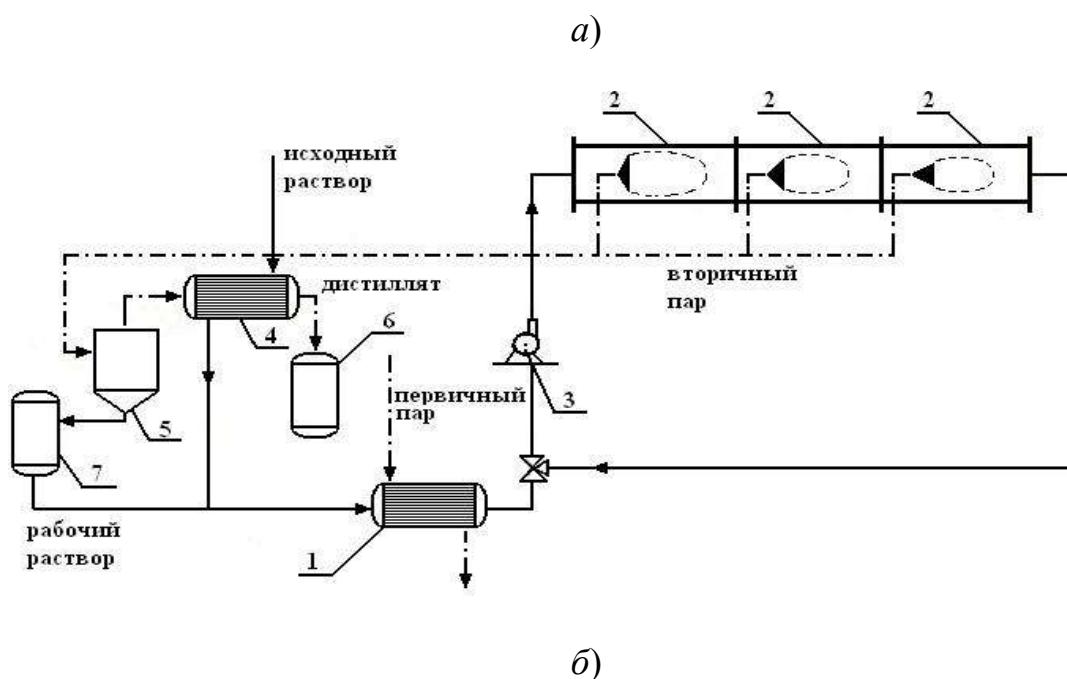


Рисунок 4.4 – Схема устройства для опреснения воды: 1 – корпус; 2 – конфузор; 3 – пароотводящая трубка; 4 – кавитатор; 5 – теплообменник – *а*); *б*) – схема многоступенчатой испарительной установки суперкавитирующего типа с циркуляционным контуром: 1 – теплообменник; 2 – ступени кавитационного испарения; 3 – циркуляционный насос; 4 – конденсатор; 5 – сепаратор; 6 – сборник дистиллята; 7 – сборник рабочей жидкости

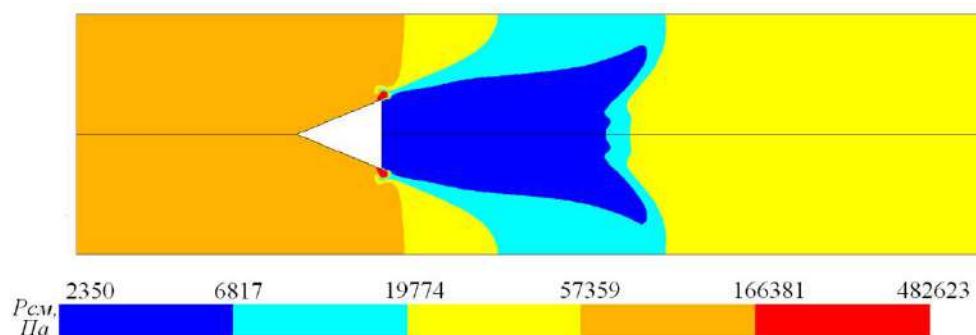


Рисунок 4.5 – Распределение давления в смеси

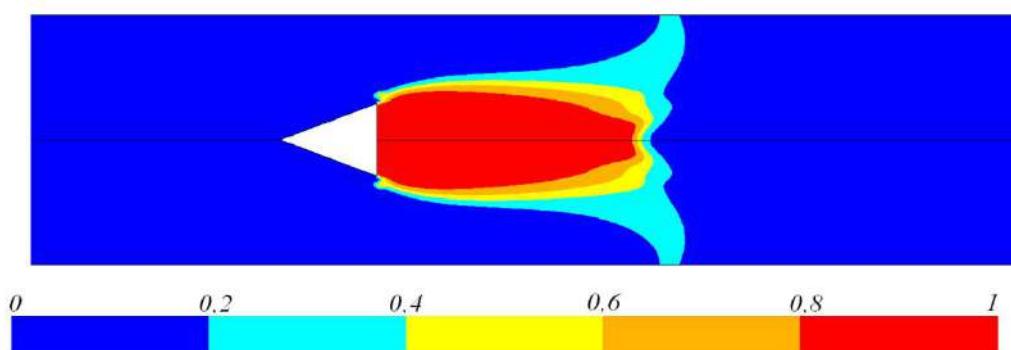


Рисунок 4.6 – Доля пара в смеси

Сводный анализ экспериментальных данных по теплоотдаче в процессе испарения жидкости в каверне. Коэффициент теплоотдачи при испарении жидкости с поверхности каверны, как и при кипении, определяется величиной плотности теплового потока [1]. В условиях кипения в трубах повышение плотности теплового потока вызывает увеличение скорости парожидкостной смеси. Это приводит к подавлению кипения в приграничном слое и способствует переходу к конвективному теплообмену, когда величина теплоотдачи перестает зависеть от теплового потока. Данный фактор приводит к уменьшению значения степени n в зависимости, описывающей коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 \sim q^n$, где q обозначает удельный тепловой поток. Это наблюдается в процессе кипения жидкости внутри труб, при котором значение n снижается до диапазона 0,8–0,6–0,5 [110].

В суперкавитационных (СК) испарителях увеличение скорости потока влияет только на рост геометрических параметров каверн и не снижает интенсивности теплоотдачи с их поверхности. Поэтому коэффициент степени при испарении жидкости в каверну остается практически максимальным, достигая $n \approx 1,0\text{--}1,05$. Таким образом, для СК-испарителей можно с достаточной точностью записать:

$$\alpha_2 = A_1 \cdot q^{1,05}.$$

Анализ экспериментальных данных показывает, что процесс испарения жидкости в каверне имеет общую физическую сущность с классическими процессами испарения и кипения, рисунок 4.7. Для обобщения результатов введена система критериев:

$$Nu = f(Pe_n, Re),$$

где критерий Пекле имеет вид:

$$Pe_n = qd / r\rho a$$

и связывает тепловые характеристики процесса, а критерий Рейнольдса учитывает его гидродинамические параметры:

$$Re = \frac{\nu_0 \sqrt{1+\chi} \cdot d}{\nu}$$

Критерий Нуссельта представлен в стандартной форме:

$$Nu = \frac{ad}{\lambda}.$$

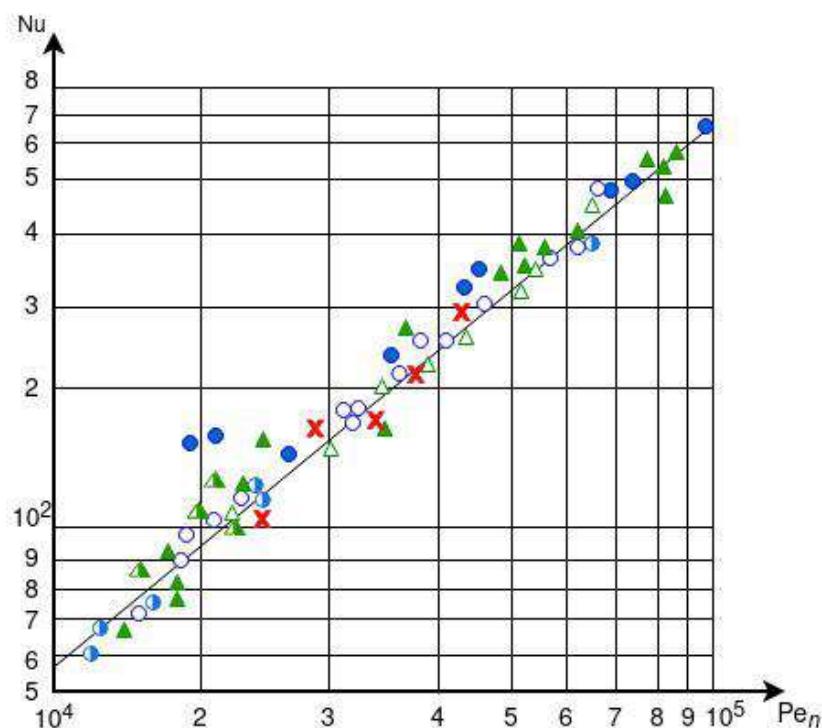


Рисунок 4.7 – Теплоотдача при суперкавитационном обтекании конусов: ●, ○ – $d/D_0 = 0,24$; ▲, ▲ △ – $d/D_0 = 0,36$, $\chi \approx 1,0-3,0$; $Re \approx 2 \cdot 10^5$; — — — $Nu \approx 0,11 \cdot Re_n^{1,05} \cdot Re^{-0,25}$;

✗ – данные автора при $\chi \approx 0,02-0,04$

График зависимости $Nu = f(Re_n, Re)$ для исследуемого диапазона параметров почти полностью повторяет характер зависимости $\alpha = f(q)$ [1, рис. 4.35], за исключением минимального расслоения по степени стеснения потока. Применение диаметра кавитатора в расчетах как характерного геометрического размера сводит это расслоение к минимуму. Анализ

экспериментальных данных приводит к следующему критериальному уравнению:

$$Nu \approx 0,11 \cdot Pe_n^{1,05} \cdot Re^{-0,25} \approx 0,1 Pe / Re^{0,25}.$$

Полученные зависимости и экспериментальные данные можно напрямую использовать для проектирования и расчета СК-испарителей и дегазаторов. Данные результаты позволяют определять относительную длину каверны в диапазоне стеснений потока $0,24 < d / D_0 < 0,36$, чисел Фруда $9,5 < Fr < 15,0$ и температуры на входе в испарительную камеру $110\text{--}120^\circ\text{C}$.

4.3 Проблема ингерентности и ликвидности перспективных энергогенерирующих систем

Как и вся экономика страны, топливно-энергетический комплекс (ТЭК) переживает в настоящее время тяжелейший период. Высокая доля энергоёмких технологий (энергоёмкость национального продукта в России в 2–3 раза выше, чем в странах Западной Европы) [434], непомерно расточительный характер энергопотребления (более трети всех потребляемых ресурсов расходуется нерационально), стремительный рост тарифов на тепловую и электрическую энергию, авторитетные экспертные оценки удручающего технического состояния основных производственных фондов и реальных перспектив развития ТЭК являются одними из серьёзнейших препятствий дальнейшего реформирования экономики.

Невозобновляемые источники энергии – уголь, нефть и природный газ в обозримом будущем останутся доминирующими в производстве энергии. Приведенные затраты на единицу энергии, полученной из угля, нефти или газа, существенно ниже, чем при использовании атомной энергии, гидроэнергии, энергии ветра и т.п.

Анализ структуры потребления энергии (таблица 4.2) и запасов энергоресурсов (таблица 4.3) позволяет сделать следующие заключения [435]:

1. Существует диспропорция между запасами и потреблением отдельных видов энергоресурсов. Срок исчерпания запасов угля более 1000 лет. Сроки исчерпания запасов нефти и природного газа на порядок меньше;
2. В ближайшей перспективе (до 2010 года) в структуре мирового энергопотребления уголь сохранит лидирующие положение, доля природного газа как более эффективного источника энергии будет возрастать, роль гидроэнергетики сохранится, а доля нефти как ценного органического сырья и атомной энергетики, как потенциально опасного источника энергии будет снижаться;
3. На среднесрочную перспективу (до 2030 года) сохранится доминирующие положение двух источников энергии: природного газа и угля;
4. В долгосрочной перспективе (после середины XXI века) ожидается рост доли угля, снижение доли природного газа в энергетическом балансе и промышленное использование угля в качестве источника органического сырья для производства СЖТ (синтетическое жидкое топливо) и продуктов органического синтеза.

Анализ структуры производства электроэнергии в России (таблица 4.4) [435] показывает, что в энергетическом балансе преобладает использование природного газа. Доля угля в производстве электроэнергии в России была: в 2000 году – 19,7%; в 2001 году – 18,3%; ожидается в 2002 году – 17,3%. Диспропорция в соотношении потребления угля и природного газа в мире и в России объясняется тем, что в результате государственного регулирования цена на природный газ в России – 16–17 долл./тыс. м³, в то время как на экспорт газ поставляется по 30–40 долл./тыс. м³. В результате соотношение цен на энергоносители в России не соответствует мировому и составляет на единицу энергии, полученной из разных энергоресурсов.

Сибирь является по существу главной топливно-энергетической базой страны, здесь производится 77 % всех энергоресурсов страны, в том числе 27 %

электроэнергии, добывается 91 % газа, 69 % нефти, 61 % угля [436]. Несмотря на уникальные возможности по добыче и производству энергоресурсов, ТЭК Сибири переживает в настоящее время глубокий кризис. Все это является следствием перенапряжения производственного потенциала при постоянном остром недостатке инвестиций на его развитие, серьезных диспропорций между подготовкой запасов, добычей и переработкой энергоресурсов, производством и транспортом энергии, развитием производства и инфраструктуры.

Таблица 4.2 – Динамика потребления электроэнергии в мире

Виды энергоресурсов	Потребление электроэнергии по годам				
	1990	1995	2000	2005	2010
Общее энергопотребление ТВт (1012 КВт.ч)	11900	13220	15350	17600	20000
Годовой прирост энергопотребления, %	2,1	3,0	2,7	2,5	2,3
Уголь, %	38,7	38,0	36,5	35,6	35,3
Нефть, %	11,4	10,4	9,4	8,9	8,0
Природный газ, %	14,3	15,0	19,9	22,3	24,9
Гидроэнергия и возобновляемые источники энергии, %	18,6	19,0	18,4	18,6	18,5
Атомная энергия, %	17,0	17,6	15,8	14,6	13,3

Таблица 4.3 – Потребление и запасы энергоресурсов в мире (в ЕДж = 10¹⁸ Дж)*

Энергоресурсы	Потребление по годам		Разведанные запасы	Установленные ресурсы	Вся ресурсная база	Прогнозные ресурсы
	1880-2000	2001				
Нефть						

– традиционная	5125	144	6113	6071	12184	–
– нетрадиционная	302	9,5	7662	14068	21730	75000
Природный газ						
– традиционный	2511	84	5903	11681	17584	–
– нетрадиционный	43	4,8	8093	10802	18841	16000
Уголь	6192	108	41994	100358	142352	121000
Мегангидрат	–	–	–	–	–	780000
ВСЕГО	14731	350,3	69711	42980	212691	992000

*По данным WCD (World Commission on Dams) на ноябрь 2001 года: цена энергии (уголь : газ : нефть) в России – (1 : 0,6 : 2,1); цена энергии (уголь : газ : нефть) в мире – (1 : 1,1 : 1,2).

Есть и другая особенность – энергоёмкость и электроемкость промышленного производства Сибири превосходит среднероссийский показатель на 13–14 %, при этом уровень цен на энергоресурсы не соответствует уровню эффективности использования топлива и энергии.

Таблица 4.4 – Использование энергоресурсов для производства электроэнергии в 2001 году

Виды энергоресурсов	В России, %	В мире, %	В США, %
Уголь	18,3	36,5	52,0
Нефть (мазут)	2,9	9,4	3,0
Природный газ	43,1	19,9	16,0
Атомная энергия	15,4	15,8	20,0
Гидроэнергия и возобновляемые источники энергии	19,7	18,4	9,0

Тяжелый характер кризиса, охвативший все отрасли ТЭК, требует разработки специальных мер по его преодолению. Эти цели преследует Концепция энергетической политики, разработанная по инициативе Министерства топлива и энергетики Российской Федерации и Российской Академии наук творческим коллективом, объединившим около 150 ведущих специалистов [437]. В числе этих мер энергосбережению отводится особое место, его потенциал исчисляется в 500 тыс. тонн условного топлива, по своему значению оно может быть приравнено к техническому перевооружению, росту эффективности общественного производства и в определенной степени является альтернативой необходимости наращивания объемов производства энергетических ресурсов [434].

Как показывает опыт и результаты работы так называемых «демонстрационных зон» в России, мероприятия, связанные с энергосбережением, способны компенсировать в среднем до 40 % необходимых инвестиций в энергетику только за счет без затратных и малозатратных проектов и программ [434, 435].

Мировая практика показывает, что каждый доллар, вложенный в экономию энергетики, приносит в конечном итоге четыре доллара в виде дополнительной прибыли предприятия. Не случайно в развитых странах энергосбережение справедливо относится к наиболее рентабельным видам бизнеса.

На сегодняшний день удельные энергозатраты на единицу отечественной продукции более чем втрое выше, чем аналогичный среднемировой показатель. А еще пять-шесть лет назад превышение составляло всего 60 %. Причина такого положения в том, что объемы производства упали очень резко, тогда как энергопотребление снизилось относительно ненамного. Крайне завышенное энергопотребление – один из наиболее характерных примеров. Если удельные затраты энергии выросли за годы перехода к рыночным отношениям в среднем в три раза, то доля таких расходов в себестоимости продукции увеличилась в

пять-шесть раз [435]. Вследствие этого в наибольшей степени страдают производственные структуры, испытывающие двойной рыночный прессинг – от необходимости крупных платежей за энергию и от жесткой конкуренции на соответствующем сегменте рынка.

Решать эти проблемы возможно двумя путями. Первый – снижение себестоимости производства электричества и тепла и, соответственно, снижение тарифов. Второй – создание эффективной системы энергосбережения [438].

Следует отметить, что темпы роста цен на энергию в России значительно ниже, чем общий уровень инфляции. Если реальный повышающий коэффициент, достигнутый за последние шесть-семь лет, составил на рынке продовольствия 12 тыс. раз, а для пассажирского автотранспорта – даже до 30 тыс. раз, то стоимость электрической и тепловой энергии (как для предприятий, так и для населения) увеличилась, без учета федеральных и местных дотаций, всего в 1500–3000 раз [436]. Несмотря на то, что доля себестоимости, приходящаяся на энергозатраты, возросла в пять-шесть раз, её конечный показатель составляет 10–15 %, что вполне соответствует мировому уровню. И, если снизить указанную долю с помощью энергосберегающих технологий хотя бы в 1,5–2 раза, (что вполне реально), то значительная часть неконкурентоспособных товаров вновь займет прочные позиции на рынке, (речь идет только о тех изделиях, которые были вытеснены импортными аналогами по ценовым, а не качественным причинам).

Таким образом, задачи, решаемые настоящим исследованием, находятся в рамках общей проблемы энергоресурсосбережения, или энергоэффективности производств (откуда возникает, в свою очередь, проблема ингерентности и ликвидности перспективных энергогенерирующих систем), которые являются предельным актуально в целом, в силу известных факторов:

кризисного состояния российской экономики и топливно-энергетического комплекса, в частности;

неоправданно высокого уровня удельных затрат энергии и других материальных ресурсов на единицу внутреннего валового продукта;

объективной потребности в полной реконструкции российской экономики на базе концептуально обоснованной энергоресурсосберегающей политики.

Практически существуют два альтернативных пути ресурсной и, что также важно, экологической эффективности жизнедеятельности:

реконструкция существующих технологических процессов на принципах построения малоотходных производств и безотходных комплексов;

интенсификация производства полезного продукта при одновременном снижении потребления энергетических и материальных ресурсов в результате использования новых научноемких технологий.

Поиск масштабных резервов экономии энергетических и материальных ресурсов в производственных системах и комплексах на базе концепции интенсивного ресурсосбережения, как правило, не затрагивает скрытых возможностей при использовании критических технологий, носящих межотраслевой характер, создающих существенные предпосылки для развития многих технологических областей или направлений и дающих в совокупности главный вклад в решение ключевых проблем реализации приоритетных направлений развития науки и технологии.

Использование органического топлива также является основным источником энергии различных теплотехнологических процессов. Возможным путем улучшения качества сжигания топлива может быть использование его в виде эмульсии (сuspension) с добавлением воды, т.е. получение практически нового вида топлива. Эффективность процессов сжигания жидкого топлива в топочных устройствах и камерах сгорания теплотехнологических установок зависит от качества смеси. Важным условием повышения эффективности производств является также экономия топливно-энергетических ресурсов с учетом снижения вредных выбросов в окружающую среду.

Поэтому задачи совершенствования теплофизических процессов при сжигании топлива, применения топливоподготовки с использованием двухфазных топливно-водяных эмульсий (сuspензий), улучшения технологических режимов работы топочных устройств с учетом выбросов вредных веществ, имеют большое научное и практическое значение.

Существующие технологии связаны с тремя основными процессами: катализом с интенсивным перемешиванием; диспергированием (механическим, химическими биологическим); воздействием повышенных давлений и температур. От трети до половины всех энергетических затрат в различных технологиях идет на механическое диспергирование. Весьма сильную диспергиацию дает химический способ – растворение. Наиболее распространенным растворителем является вода или водные растворы щелочей и кислот. Перспективно применение активированной воды.

Для получения водотопливных эмульсий и в ходе топливоподготовки при сжигании обводненных топочных мазутов, водомазутных эмульсий (ВМЭ), водоугольных супензий (ВУС) используют различные методы: встряхивание, механическое диспергирование и перемешивание, обработку в роторно-импульсных аппаратах и др. Известны положительные результаты получения устойчивых водомасляных эмульсий и эмульсий «вода – дизельное топливо» с помощью кавитации в различных по конструкции аппаратах [1]. Возможность технологии, основанной на эффектах гидродинамической кавитации, открывает перспективы в использовании топливно-водяных смесей. Кавитационные микропузырьки, возникающие в жидкости (ВМЭ, обводненные мазуты, вода и т.д.), являются элементарными реакторами, действующими на молекулярном уровне. Эффекты кавитации приводят к mechanотермолизу структуры воды с появлением свободных водородных связей, диспергации и гомогенизации с образованием устойчивых водотопливных эмульсий, супензий и смесей. Это дает основание для разработки методов их приложения в различных отраслях производства.

Как уже отмечалось, на период, включающий начало XXI века, прогнозируется повышение роли угля в энергетике, что обусловлено его крупными запасами. Однако экологические ограничения требуют разработки и внедрения новых угольных технологий, которые вместе с экономической эффективностью обеспечивают существенный экологический эффект с максимально высокой полнотой использования добытого топлива. Особенно осты эти проблемы для угольных регионов России, таких как Кузбасс, Красноярский край, испытывающих недостаток в экологически чистых природных энергоносителях. Кроме того, вокруг многих угледобывающих предприятий в гидр отвалах и отстойниках скапливается большое количество добываемого угля, представленного в виде тонкодисперсных угольных шламов, перевод которых в транспортабельное и технологически приемлемое топливо позволит не только улучшить экологическую обстановку в регионе, но и получить существенный экономический эффект.

Получаемое топливо должно отвечать жестким требованиям современного рынка: стабильные значения основных технологических характеристик, задаваемых потребителем, рентабельность производства и минимально возможное опасное экологическое воздействие на окружающую среду при его получении и использовании в энергогенерирующих системах и тепло-технологических процессах.

Перевод энергогенерирующих систем на новые виды топлив, технологию водоподготовки и сжигания требуют учета многих факторов, которые в конечном итоге влияют на ликвидность и ингерентность предлагаемых технологий. Эти факторы и их взаимовлияние представлены на рисунке 4.8.

По экспертным оценкам на основе анализа литературных источников [439–442] можно сделать вывод о том, что определяющее значение в эффективности использования того или иного вида энергоисточника имеют рациональные процессы топливоподготовки и сжигания, а также эффективные технологии очистки технологических выбросов в окружающую среду.

Поскольку данная проблема достаточно объемна (см. рисунок 4.8), имеет смысл её поэтапное решение и в данной работе ограничиться рассмотрением объекта, состоящего из трех звеньев: системы топливоподготовки, топочного устройства и системы очистки технологических выбросов, рисунок 4.9. На этом же рисунке выделены наиболее характерные параметры, определяющие эффективность процесса в целом.

На базе выбранного объекта, рисунок 4.9 необходимо провести сравнительный анализ работы тепловых электрических станций, котельных, топочных устройств малого объема, работающих на разных видах топлива (уголь, мазут, газ, водотопливная эмульсия (сuspensia)). За параметры сравнительного анализа принимаются: коэффициент полезного действия (КПД), стоимость единицы электрической и тепловой энергии, количественные показатели вредных выбросов (ПДВ и ПДК по основным типам загрязняющих веществ), а также возможные затраты на реконструкцию энергетической установки при переводе на другой вид топлива.

К важным задачам работы следует отнести минимизацию количества параметров, влияющих на конкурентную способность и инвестиционную привлекательность разработанных рекомендаций и предложений, внедрение энергосберегающих и эко безопасных технологий.

Невозможность решения рассматриваемых проблем традиционными методами технической и экономической оптимизации в программно-целевом или ином исполнении объясняется в значительной мере тремя факторами:

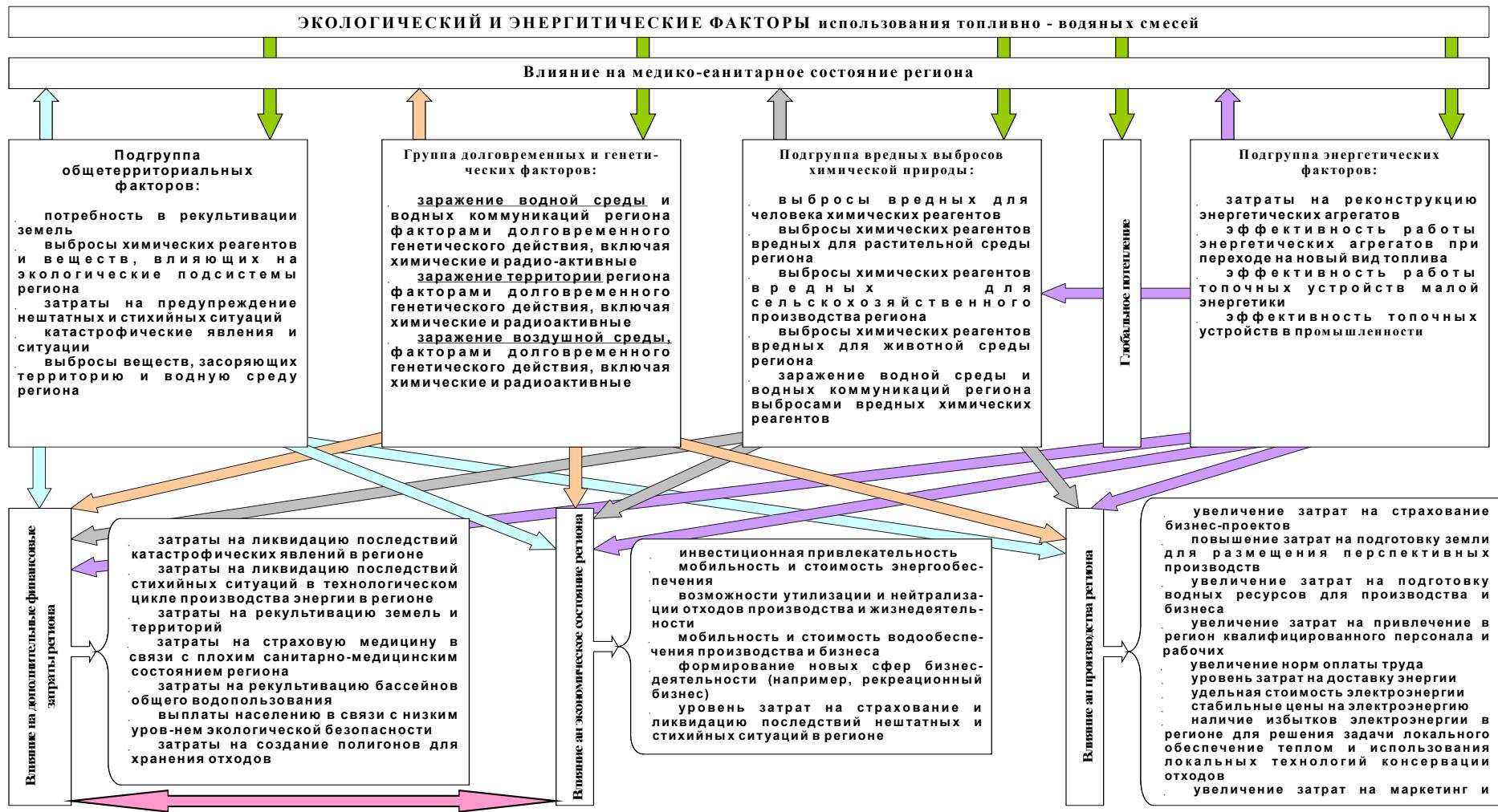


Рисунок 4.8 – Структура экологического и энергетических факторов внешней цены для сравнительного анализа и ранжирования эффективности использования топливноводянных смесей в различных технологиях энергообеспечения в регионе



Рисунок 4.9 – Блок-схема системы сжигания топлива в теплотехнологических установках

- 1) игнорированием принципа системности проблемы или непоследовательностью в его применении [439];
- 2) неадекватностью применяемых критериев и целевых функций при разрешении сложных многокритериальных оптимизационных задач энергоэффективности и экобезопасности;

3) приданием чисто экономическим критериям статуса объективных.

Эту мысль подтверждает анализ публикаций за последние два года, касающийся эффективности политики энергосбережения и защиты окружающей среды, успешности в реализации проектов и оправданности инвестиций, который позволяет сделать выводы:

- как российские, так и независимые европейские эксперты затрудняются в возможностях объективной оценки указанных эффектов и используют различные подходы;
- при успешности ряда проектов в целом реальный экономический эффект федеральной и региональных программ энергоэффективности оказывается значительно ниже предполагавшегося;
- оптимизация энергопроизводства представляет проблему со многими неопределенностями, в том числе неопределенностью оценки экологического ущерба, рыночных механизмов, ситуаций неплатежей.

Академик В. И. Вернадский писал еще в 1928 году: «Мы не имеем общей единицы для количественного сравнения всех естественных производительных сил, или, вернее, мы не умеем все их свести к этой единице, не можем одной единицей, например, выразить добычу металлов и горючего. А между тем необходимо и возможно свести к единой единице все; только при этом условии можно подойти к полному количественному анализу той потенциальной энергии страны, которая может дать удобное для жизни представление о пределах заключающегося в данной стране народного богатства. Только при этом условии можно подойти к энергетической картине, окружающей человека природы, с точки зрения потребностей его жизни».

Этой потребности отвечает, в определенной мере понятие эксергии (Exergie), введенное в 1956 году З. Рантом, как свойство термодинамической системы или потока энергии, определяемое количеством работы, которая может

быть получена внешним приемником энергии при обратимом взаимодействие с окружающей средой до установления полного равновесия [440].

Наряду с фундаментальными принципами термодинамики к анализу технических систем в последние годы привлекается термодинамическая теория эволюции сложных открытых природно-технических геосистем. На рисунке 4.10 демонстрируется идея приложения эксергетического анализа к расчету эксергетической платы хозяйствования внешней цены:

$$\Delta E = E_{\text{вых}} - (-E_{\text{вх}}).$$

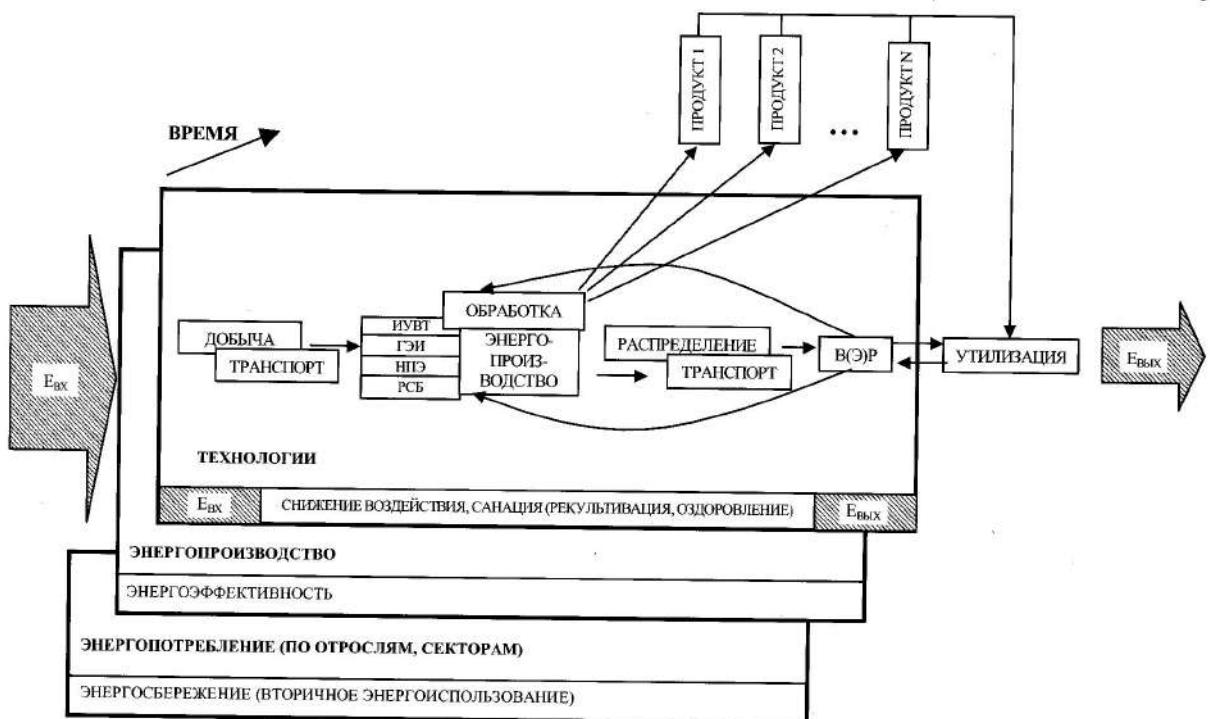


Рисунок 4.10 – К эксергетическому анализу потенциала ресурсосбережения: ИУВТ – источники на углеводородном топливе; ГЭИ – гидроэнергетические источники; НПЭ – нетрадиционные преобразователи энергии; РСБ – ресурсосбережение

Оценку влияния различных объектов на окружающую среду возможно провести с использованием методики оценки предотвращенного экономического ущерба при проведении природоохранных мероприятий,

учитывающей различные технологические и конструктивные особенности очистных систем [441].

4.4 Разработка теоретических основ и методологии вовлечения в топливно-энергетический комплекс непроектных топлив

Сжигание твердого ископаемого топлива сопровождается выбросами в атмосферу значительного количества углекислого газа (создающего парниковый эффект), экологически опасных оксидов серы, азота, мелкодисперсных твердых частиц и других вредных веществ. Действующие на территории КК крупные сельскохозяйственные, деревообрабатывающие предприятия, а также предприятия пищевой промышленности оставляют после себя органические отходы производства, при этом большая часть отходов не утилизируются, что негативно влияет на состояние окружающей среды.

Еще одним загрязнителем окружающей среды являются иловые осадки сточных вод, которыми переполнены специализированные полигоны, куда по илопроводам органическая биомасса попадает, пройдя специальную механическую и химическую очистку на очистных сооружениях городов. Большой объем биоотходов составляют отходы звероферм, кролиководческих хозяйств и т.п. Важность проекта заключается в научном обосновании экологически чистого и ресурсосберегающего использования углей разной степени метаморфизма путем совместного сжигания их с углеродно-нейтральным топливом (биотопливом) с целью снижения температурного порога воспламенения твердотопливных смесей. Значимость проекта обусловлена решением проблемы утилизации твердых органических биоотходов путем научного обоснования эффективности их вовлечения в топливно-энергетический комплекс в виде добавочного топлива с учетом экологических характеристик и показателей шлакования компонентов золы твердотопливных смесей. Решение данных проблем представляется возможным путем проведения расчетных исследований процессов воспламенения и горения топливных смесей (пылевидных частиц), с учетом преобразования

органической массы топлива и разработанных нестационарных подходов к моделированию горения угля

Актуальность работы обусловлена высоким расходом ископаемого топлива при генерации тепловой и электрической энергии на теплоэнергетических предприятиях Красноярского края (КК), а также содержанием большого количества вредных веществ в продуктах его сжигания. Для решения этой актуальной научной проблемы существует несколько решений, например, газификация крупных промышленных объектов КК природным газом. Перевод теплоэнергетических предприятий на природный газ не является в долгосрочном плане эффективным мероприятием в первую очередь по причине ограниченности запасов газа и огромных капиталовложений по переоборудованию действующих теплоэнергетических предприятий. Его использование в качестве основного топлива при выработке тепловой и электрической энергии не всегда эффективно. В связи с этим основным и, возможно, единственным топливом для генерации тепловой и электрической энергии в будущем станет уголь, тем более на территории КК расположены огромные запасы твердого натурального топлива.

Одним из перспективных решений данной научной проблемы является вовлечение в топливно-энергетический комплекс КК углеродно-нейтрального топлива (твердые органические отходы сельскохозяйственных, деревообрабатывающих предприятий, а также предприятий пищевой промышленности, твердые коммунальные отходы, сухие остатки стоков и т.п.), что является актуальной задачей не только на региональном, но и на международном уровне. Совместное сжигание угля и углеродно-нейтрального топлива может не только снизить добычу и потребление твердого ископаемого топлива, но и снизить содержание вредных веществ в продуктах их горения. Еще одним достоинством вовлечения углеродно-нейтрального топлива в топливно-энергетический баланс КК является минимизация капитальных затрат на реконструкцию эксплуатируемого теплоэнергетического оборудования, а

также доступность и вариативность больших запасов биотоплива на территории КК.

Данная работа направлена на решение актуальной на международном уровне фундаментальной научной проблемы энергоэффективности и энергосбережения, связанной с устойчивым горением твердотопливных смесей на основе энергетических углей разной степени метаморфизма месторождений, расположенных на территории КК и близлежащих субъектов РФ, таких, как Республика Тыва и Республика Хакасия, с добавлением биомассы с учетом выхода антропогенных выбросов с дымовыми газами, влияния склонности к шлакованию топочных экранов котлов и экологических характеристик золы.

Научная проблема состоит в развитии основных положений теории сжигания твердотопливных смесей при разных механизмах нагрева, базирующейся на современных представлениях теорий химической кинетики, теплофизики, тепломассопереноса. Суть проблемы состоит в том, что до настоящего времени, несмотря на широкий интерес международного научного сообщества к процессам горения твердотопливных смесей при интенсивном нагреве, не установлена однозначная связь между характеристиками отдельных компонентов топлив, их компонентным составом, условиями подвода теплоты к топливу, также не установлена связь принципа аддитивности и синергетического эффекта при взаимном влиянии компонентов топлива друг на друга в течение периода индукции, образование газообразных веществ в продуктах их сгорания, влияние компонентов золы на шлакование и экологические характеристики, что препятствует разработке универсального подхода и прогностического аппарата, применимых при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Развитие нового фундаментального направления в области инженерных наук позволит решить группу актуальных задач: подтвердить гипотезу о горении твердотопливных смесей на основе ископаемых топлив с добавлением биомассы; сформулировать рекомендации к компонентному составу топливных

смесей, условиям теплоподвода к топливным частицам с прогнозируемыми основными характеристиками процессов горения; определить энергоэффективные массовые доли биотоплива в твердотопливных смесях с учетом энергетических и экологических показателей; рассчитать индексы горения, выгорания и воспламенения твердотопливных смесей.

В последнее время в различных областях науки и техники достаточно широкое применение получили смесевые твердые топлива, которые по сравнению с ископаемым топливом характеризуются не только расширенными диапазонами варьирования хорошо прогнозируемых эксплуатационных, технических и других характеристик, но и протеканием при нагревании интенсивных физико-химических процессов. На практике такие процессы широко распространены в теплоэнергетике, металлургии, и других отраслях.

До настоящего времени результаты большинства исследований международного уровня преимущественно имели качественный характер и представляли собой анализ влияния группы факторов (путем обычного варьирования значений) на условия сжигания твердых и смесевых топлив. Не существует эффективного метода установления связи между характеристиками отдельных компонентов, компонентным составом топливных смесей, условиями подвода теплоты к углеродным частицам, влияния поверхностей частиц на интенсификацию воспламенения при разных температурных условиях, возникновения принципа аддитивности и синергетического эффекта, склонность компонентов золы к шлакованию, определение экологических характеристик золы при горении твердотопливных смесей. Разработка соответствующей гипотезы будет являться основой для создания универсального прогностического аппарата, применимого при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области интенсификации широкого разнообразия физико-химических процессов за счет сжигания твердотопливных смесей.

Новизна решения заявленной проблемы заключается в разработке нового подхода в рамках теплофизики и химической кинетики к описанию взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих при зажигании твердотопливных смесей, отличающегося от известных учетом инертного прогрева топлива, формирования горючей газовой смеси (в том числе в инертной среде), экзотермического реагирования при медленном и высокотемпературном нагреве, температурами зажигания и выгорания, минеральным составом золы, выходом вредных газов, влиянием принципа аддитивности и синергетического эффекта при взаимном влиянии компонентов топлива друг на друга, анализом склонности золы твердотопливных смесей к шлакованию, влиянием золы твердотопливных смесей на окружающую среду. Целый ряд работ является основанием вовлечение биомассы в топливно-энергетический комплекс [444–464].

Известно, что наиболее энергоэффективной является твердотопливная смесь на основе углей, в которой содержится от 20 % до 30 % биомассы [465]. Увеличение доли древесной биомассы влияет так же на увеличение концентрации серы, кальция и алюминия в золе древесноугольной смеси [466]. На характеристики воспламенения так же влияет влажность и форма частиц биомассы. Установлено, что частица биотоплива в виде шара воспламеняется быстрее, чем частицы кубической и цилиндрической формы [467]. Проведенные исследования при совместном сжигании каменного угля (длиннопламенного) и опилок кедра показали, что минимальная времененная задержка зажигания твердотопливной смеси была зафиксирована с долей угля в ней 70–75 % [468]. При исследовании влажных частиц кедра, лиственницы, сосны и осины установлено, что чем выше влажность древесных частиц, тем усиливается влияние на время задержки при их зажигании [469].

Если рассматривать остатки сточных вод (ОСВ) как энергетическое топливо, то в отличии от биомассы и угля ОСВ имеет ряд недостатков таких как низкая теплота сгорания, высокая зольность, из-за содержания большого

количества солей, тяжелых металлов и органических загрязнителей, это приводит к выделению вредных веществ в продуктах его сгорания. Высокая зольность ОСВ приводит к шлакованию топочных устройств. При совместном сжигании биомассы и ОСВ остается малоизученный вопрос о синергетическом эффекте при взаимодействии компонентов ОСВ и биомассы из-за различными техническими и элементным их составами [470]. Установлено, что ОСВ влияет на снижение шлакование топочных экранов при совместном сжигании ОСВ и бурого угля. Так же добавление ОСВ к углю снижает температуру зажигания твердотопливной смеси. Наиболее подходящая массовая пропорция твердотопливной смеси составила 20% ОСВ и 80% бурого угля [471–473]. При исследовании совместного сжигания ОСВ и каменного угля было обнаружено снижение времени и температуры зажигания, температуры, соответствующую максимальной скорости потери массы, и время горения угля. Оптимальная массовая доля ОСВ в твердотопливных смесях была $\leq 10\%$, чтобы избежать неблагоприятного воздействия на потерю веса при сжигании угля, а также, что скорость нагрева влияет на эффективность теплопередачи и время сгорания, тем самым влияя на характеристики горения [474–479].

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что снижение температурного порога воспламенения и антропогенных выбросов с дымовыми газами при сжигании твердотопливных смесей на основе углей разной степени метаморфизма из месторождений, находящихся на территории Красноярского края и близлежащих субъектов РФ (Республика Тыва и Республика Хакасия) с добавлением биомассы никто не исследовал.

4.5 Использование биомассы в смесевом водоугольном топливе (БиоВУТ) на базе отходов животноводства

В последние десятилетия мировая зависимость от ископаемого топлива стала критической из-за нескольких факторов: непрерывного роста населения, урбанизации, истощения запасов нефти, непрерывного роста цен на нефтепродукты, глобального потепления. Отрасли промышленности, зависящие от невозобновляемого топлива (уголь, природный газ, уголь), вызвали резкое

увеличение выбросов парниковых газов, что привело к высокому уровню загрязнения окружающей среды [480, 481]. Возобновляемые источники являются самыми быстрорастущими источниками мировой энергии, потребление увеличивается на 3 % в год. Известно, что состав и количество отходящих газов напрямую зависит от вида сжигаемого топлива. Сжигание природного газа ведёт к эмиссии в атмосферу NO_x и CO_2 . Использование органического топлива (в первую очередь мазута) является причиной выбросов NO_x , SO_2 , золы, соединений ванадия, солей натрия и др. Твердое топливо, помимо вышеупомянутых компонентов, способствует накоплению золовых частиц, сажи, несгоревших частиц, золошлаковых отходов [482].

Кризисное состояние энергетического и промышленного секторов стимулировало рост использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая и геотермальная энергия, биомасса и сельскохозяйственные отходы. Эти источники доступны везде и хорошо известны как альтернативные источники, эта чистая и неисчерпаемая энергия может уменьшить загрязнение окружающей среды; тем не менее, ее полный потенциал еще не реализован из-за проблем, связанных с обращением, транспортировкой, хранением и сжиганием сырья [481, 483]. Вероятно, энергетические системы в будущем будут базироваться на интеграции как традиционных, так и нетрадиционных источников тепловой и электрической энергии, систем ее транспортировки, накопления и распределения. Экологические требования современности создают предпосылки для разработки новых экологически эффективных альтернативных видов топлива, а также математических и вычислительных систем для моделирования процессов горения композиционных смесей с учетом разности состава конечных продуктов [484].

Особенности резко континентального климата большей части территории РФ обуславливают значительную составляющую систем теплоснабжения в суммарном потреблении топливно-энергетических ресурсов (около 400 млн.

т/год, 45 % от общего расхода). Вследствие этого достижение реальных показателей энергоэффективности в целом по стране невозможно без повышения эффективности одной из наиболее энергозатратных отраслей народного хозяйства – теплоснабжения [481]. В сфере теплоснабжения присутствует сегмент, который, зачастую, недооценивается – автономные источники тепла (АИТ) мощностью до 1 МВт, к ним можно отнести котлы в домах частного сектора и на объектах малого и среднего бизнеса. В 2022 году Правительство РФ выделило 12,9 млрд. рублей на перевод частных домов в Омске, Красноярске, Новокузнецке и Читы с угля на альтернативное топливо [485], это дает предпосылки для развития предлагаемой технологии.

Одним из направлений повышения эффективности в энергетике является комплексное использование сырья, создание замкнутых газо- и водооборотных систем; разработка принципиально новых и совершенствование действующих процессов производства; переработка и использование энергетических отходов (теплота, зола, шлак, продукты очистки дымовых газов и т.п.). В настоящее время, несмотря на успешный опыт эксплуатации ветроустановок и солнечных батарей, в Европе, США и Канаде, нет ясности в стратегии развития энергетики на ближайшие годы. В связи с чем, в настоящее время слабо разработаны теоретические основы процессов производства, зажигания и горения смесевых композиционных топлив, это в основном связано с тем, что древесина является сложным (с химической точки зрения) композиционным материалом, состоящим из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, пентозанов и других полисахаридов и кислот [486–490].

4.6 Математическое моделирование сжигания БиоВУТ

Разработка наиболее эколого- и энергоэффективных составов биотопливных композиций по результатам экспериментальных исследований процессов зажигания и горения существенно затруднена вследствие большого объема возможных вариаций соотношений основных компонент топлива, условий теплообмена и характерных размеров топливных частиц.

Исследователями доказано, что смешивание двух видов сырья биомассы может улучшить характеристики долговечности производимых пеллет [490].

Состав образующихся в результате термического разложения пеллет твердых (кокс) [491], жидких (биомасло и смола) [492] и газообразных (летучие) продуктов [493] зависит от вида древесины и скорости нагрева топлива. Известно [494], что при пиролизе древесины образуется несколько промежуточных продуктов термического разложения различных, как по химическому составу, так и по фазовому состоянию (твердые, жидкие и газообразные). В процессе горения биотоплива последовательность пиролиза описывается как термическое разложение в одну стадию, но с образованием трех компонентов: уголь, смола и газ (рисунок 4.11). Использование этой модели одностадийного пиролиза может быть, как адекватной, так и недостаточно обоснованной при прогнозировании процессов зажигания частиц древесной биомассы [490].



Рисунок 4.11 – Схема пиролиза древесины с образованием трех продуктов реакции

В исходный момент времени частица древесного топлива вводится в высокотемпературную среду и греется за счет конвекции и излучения. В итоге усиленного нагрева инициируется процесс улетучивания воды. Фронт улетучивания движется от поверхностных слоев в глубинные. В итоге складывается пористый древесный каркас с высочайшим тепловым сопротивлением. Водяные пары, возникающие при испарении, фильтруются через слой сухого горючего, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса.

Прогрев частички древесной породы приводит к тепловому разложению и выходу летучих, которые вместе с парами воды и продуктами термохимического взаимодействия углерода и водяных паров фильтруются к плоскости частички горючего [484]. В итоге формируется парогазовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температур и концентраций горючего.

Далее представлена математическая модель для крупных частиц биомассы, в которых существует значительный температурный градиент. Модель учитывает конвекцию и диффузию водяного пара, капиллярную конвекцию воды за счет градиента давления и диффузию связанной воды в порах частиц топлива. Частица рассматривается как одномерная, но модель может быть расширена до двух- или трехмерного варианта. Сделаны следующие допущения: частица биомассы состоит из множества компонентов, в том числе твердых, газообразных и жидких, все компоненты находятся в тепловом равновесии; геометрия частицы сведена к одномерной модели; газы внутри пористой структуры частицы подчиняются закону идеального газа; гомогенными газовыми реакциями внутри частицы пренебрегают.

В момент времени t и в пространственной координате r частицы биомассы плотность биомассы $\rho_{bm} = \rho(r, t)$ изменяется во времени в процессе термохимического превращения следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_{bm}}{\partial t} = \dot{\omega}_{bm} = -R_m - R_v - R_c,$$

где $\dot{\omega}_{bm} = -R_m - R_v - R_c$ производная Ньютона, описывает скорость потери массы частицы за счет сушки (R_m), выделения летучих (R_v) и коксования (R_c).

В единице частицы топлива объем влаги обозначается $\rho_m = \rho(r, t)$ и изменяется в процессе горения. Если пренебречь конвекцией и диффузией влаги в частице, то изменение $\rho_m = \rho(r, t)$ во времени можно описать:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -R_m,$$

Изменение массы кокса в частице описывается уравнением ниже, где исходный член $\dot{\omega}_c$ учитывает образование угля за счет пиролиза и расход кокса за счет окисления и газификации:

$$\frac{\partial \rho_c(r,t)}{\partial t} = \dot{\omega}_c = R_C - R_{CO_2} - R_{CCO_2} - R_{CH_2O},$$

Скорость гетерогенных реакций угля можно представить в следующем виде:

$$R_{ci} = \frac{M_c}{\Omega M_j} S_{char} A_i T \exp(-\frac{E_i}{RT}) \rho_j,$$

где i – номер реакции (между R_{CO_2} , R_{CCO_2} и R_{CH_2O}), $j = O_2, CO_2, H_2O$, Ω – стехиометрический коэффициент, S_{char} – удельная внутренняя поверхность (m^2/m^3); M – молекулярный вес.

Уравнение сохранения для газообразных веществ:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon p_g Y_i) + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(G(r) \varepsilon p_g u_g Y_i \right) = \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(G(r) \varepsilon p_g D_{\phi\phi} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + \dot{\omega}_i,$$

$$i = O_2, N_2, CO, C O_2, H_2 O, CH_4, H_2 \text{ и смола},$$

где ε – пористость; p_g – плотность газа в частице; u_g – скорость газа в порах частиц; Y_i – массовая доля частиц газовой фазы i .

Эффективный коэффициент диффузии газа в порах частиц рассчитывается следующим образом:

$$D_{\phi\phi} = \frac{D_{ab^\varepsilon}}{\tau} = D_{ab^{\varepsilon^2}}.$$

где τ – кривизна, которую можно описать как $\tau = 1/\varepsilon$. Скорость образования газообразных частиц i , $\dot{\omega}_i$, определяется из подмоделей для сушки, пиролиза и горения/газификация кокса.

Массовая доля газовой фазы равна

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon p_g) + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(G(r) \varepsilon p_g u_g \right) = \dot{\omega}_g = \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i,$$

где N – число частиц в газе.

Уравнение сохранения энергии основано на предположении о локальном тепловом равновесии для газа, жидкости и твердого тела:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\left(\rho_m C_{p_m} + \rho_{bm} C_{p_{bm}} + \rho_c C_{p_c} + \varepsilon p_g \sum_{i=1}^N Y_i C_{p_i} \right) T \right) + \\ & + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(G(r) \varepsilon p_g u_g \sum_{i=1}^N Y_i C_{p_i} T \right) = \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(G(r) k_{\text{эфф}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{\omega}_{\text{тепл}}, \end{aligned}$$

где T – температура компонентов частиц при (r, t) ; $\dot{\omega}_{\text{тепл}}$ – включает эндотермическую теплоту испарения, теплоту пиролиза и теплоту газификации кокса, а также экзотермическую теплоту окисления кокса и изменение явной энталпии; C_p – теплоемкость.

Коэффициент эффективной теплопроводности $k_{\text{эфф}}$ представляет собой сумму коэффициентов теплопередачи радиацией $k_{\text{рад}}$ и конвекцией $k_{\text{конв}}$. Коэффициент кондуктивной теплопередачи является взвешенной по массе суммой влаги (k_m), угля (k_c), биомассы (k_{bm}) и теплопроводности газа (k_g).

Эффективный коэффициент проводимости внутри частицы равен

$$k_{\text{эфф}} = k_{\text{конв}} + k_{\text{рад}},$$

$$k_{\text{конв}} = \varepsilon k_g + (1 - \varepsilon) \left[(p_m k_m + p_{bm} k_{bm} + p_c k_c) / (p_m + p_{bm} + p_c) \right],$$

$$k_{\text{рад}} = \frac{\varepsilon \sigma T^3 d_{\text{пар}}}{\in},$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; ϵ – коэффициент излучения; $d_{\text{нор}}$ – диаметр свободного объема внутри частицы.

Компонентный состав биотоплива. Биомасса имеет различные преимущества – доступность, низкая стоимость, нейтральная характеристика CO₂ и широкое распространение [481, 494]. Хотя топливо из биомассы используется повсеместно, в странах с низким уровнем дохода оно сжигается напрямую, что представляет непосредственную опасность для здоровья и оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Использование биомассы в ее естественном состоянии имеет ряд недостатков: низкая плотность, меньшая теплота сгорания на единицу объема, высокая влажность по сравнению с исходным материалом и высокая зольность, особенно в биомассе, содержащей большое количество коры; кроме того, использование требует дополнительных мер из-за высокого потенциала загрязнения [495]. К недостаткам процесса относится сложность увеличения производственных мощностей из-за нехватки сырья. Возможным решением является добавление в сырье альтернативных высококалорийных отходов (например, кроличьих ферм).

В кроличьем навозе в доступной водорастворимой форме содержатся активные соединения: фосфор (до 1,8 %); кальций (до 2,4 %); натрий (до 2,2 %); калий (порядка 1,1 %) и другие, среди которых в зависимости от местности и рациона кормления встречаются цинк, медь, марганец, железо, а также редкоземельные элементы. Сбор образцов для представленного в работе эксперимента проводился на кролиководческой ферме в городе Назарово (географические координаты: 56°00' ю.ш. и 90°23' в.д.) в следующих условиях: среднегодовая температура на ферме 13–24 °C, месячная относительная влажность 63–79 %, включая «зону комфорта» с температурой 19 °C и уровнем влажности от 60 до 65 %.

В хозяйстве содержалось 150 кроликов. Подготовка сырья осуществлялась в период с июля 2021 г. по декабрь 2021 г. Навоз помещали в большие полиэтиленовые пакеты, далее для получения сырья требуемых характеристик (использовался ГОСТ Р 54192-2010 Биотопливо твердое). Определение содержания влаги высушиванием [495]. Сущность метода заключается в высушивании образца при температуре (105 ± 2) °С в воздушной атмосфере до постоянной массы, рисунок 4.12.



Рисунок 4.12 – Высушивание навоза согласно ГОСТ Р 54192-2010

Теплотворная способность является стандартной мерой содержания энергии в топливе, определяется как количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы топлива и охлаждении продуктов сгорания до 298 К. Когда скрытая теплота конденсации воды включается в теплотворную способность, ее называют калорийностью. Однако в печах любая влага, содержащаяся в топливе, образующаяся в процессе горения, уносится в виде водяного пара, поэтому эта теплота не учитывается. Результат известен как чистая теплотворная способность или низшая теплота сгорания. Топлива, содержащие углерод с более высокой степенью окисления, будут иметь более низкую теплотворную способность, поскольку для их полного окисления требуется меньше кислорода. Однако, когда топливо содержит такие

соединения, как углеводороды, которые имеют более низкую степень окисления, это имеет тенденцию повышать теплотворную способность биомассы. Таким образом, становится очевидным, что элементный состав сырья может играть жизненно важную роль в теплотворной способности биомассы.

Представленные результаты являются основой для дальнейших разработок в области компьютерного моделирования процессов сжигания топлива с включением отходов животноводства, оптимизации параметров топочного устройства с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду и усовершенствования экономических показателей процесса изготовления сырья.

4.7 Повышение энергоэффективности и экологической безопасности работы малогабаритных печей за счет добавления в водотопливную смесь органических компонентов

Успешное внедрение в промышленность топлив на основе водоугольной суспензии (ВУС) предусматривает предварительную работу по поиску оптимальных условий получения ВУС, отработке состава композиций и подбору соответствующих добавок, для того чтобы получаемые топлива имели необходимые для технологического использования физико-химические свойства. Стандартная технологическая схема производства водоугольного топлива предусматривает использования угля и технической воды, так же не исключены примеси в виде присадок и отходов нефтепроизводства. К причинам использования технологии ВУТ можно отнести необходимость сокращения выбросов на предприятиях в населенных пунктах и прибрежной зоне и снижение себестоимости тепло- и электроэнергии за счет низкой стоимости ВУТ. Эффективность сжигания водоугольного топлива в топках котлов подтверждена на примерах опытного сжигания в России и в различных странах. В Китае, Японии, Швеции, США и других странах имеются действующие установки для приготовления водоугольного топлива. Пекинский угольный институт совместно с компанией China coal technology and Engineering Group Clean Energy Co., Ltd, и профильными компаниями разработаны уже несколько

поколений технологии приготовления ВУТ. Внедрение технологии водоугольного топлива дает возможность вовлечь в энергоснабжение страны десятки миллионов тонн угольного шлама, который может служить одной из составляющих водоугольных суспензий [421].

В России угольные электростанции вырабатывают около 17 % электричества от общего количества. Данный показатель повышается до 45 % в Сибири, в связи с близким расположением к основным местам добычи угля. Доля угольной генерации в производстве тепла в Сибири составляет 95 %. [422] Использование ВУС как жидкое энергетическое топливо в России наиболее целесообразно, в частности для решения проблемы складирования отходов теплоэнергетических станций, а также с целью снижения нагрузки на атмосферный воздух.

Несмотря на то, что водоугольное топливо существует уже более 50-ти лет, поиск оптимального состава топлива продолжается. Использование пластификаторов (поверхностно-активных веществ) в процессе получения ВУТ повышает энергетические свойства низкокачественных углей с низкой теплотой сгорания, что доказывается в исследованиях [423, 424]. При замене угля на водоугольное топливо возможно снижение выбросов в атмосферу, в частности твердых частиц в 2,5 раза, оксидов азота – в 2 раза, а оксидов серы – в 2,5 раза. Это объясняется тем, что полнота сгорания такого топлива порядка 95%. В процессе сжигания ВУТ остается порошок в виде конгломератов белого или серого цвета, состоящих в основном из несгораемых минеральных частиц, следовательно, упрощается решение сложной задачи по улавливанию летучей золы. По результатам многочисленных исследований (например, [61, 425]) установлено, что при совместном сжигании биомассы с углем существенно повышается энергетическая эффективность ВУТ и наблюдается снижение выбросов SO_x и NO_x . Композиционное топливо на основе природных ресурсов или органическими отходами с использованием водоугольных суспензий имеет главные преимущества: технологичность, экологичность, энергоэффективность

и безопасность. В статье [426] исследовали возможность утилизации отработанного машинного масла в составе водоугольной суспензии. Было установлено, что низшая теплота сгорания такого топлива увеличивается.

Применение композиционного ВУТ является реальной возможностью замены не только твердого топлива и малоэффективных методов его сжигания, но и дефицитных жидкых и газообразных видов топлива [427–434]. В данной работе приводятся результаты проведенных исследований по разработке технологии получения ВУТ на основе бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна и последующего применения его в качестве композиционного топлива в котлах малой мощности.

Целью исследования являлось усовершенствование технологии подготовки топлива, путем применения эффектов гидродинамической кавитации и добавления в водоугольную смесь органических отходов животноводства.

В процессе получения ВУС использовалась угольная пыль бурых углей Ирша-Бородинского разреза, таблица 4.5, и вода. Известно, что для приготовления ВУТ может быть использована вода любого качества, включая шахтные и промышленные, для этой цели была использована обычная вода без комплексных добавок. Процентное содержание воды менялось от 50 % до 60 %. Обработка смеси осуществлялась со скоростью 10000 об/мин.

Стоит отметить, что в золе преобладает CaO в концентрациях 25–61 %, концентрации токсичных и радиоактивных малых элементов незначительны. Содержание SiO₂ – 52 %, Fe₂O₃ – 6 %, Al₂O₃ – 6 %, CaO – 25 %, MgO – 5 %, K₂O – 1 %, Na₂O – 1 %, SO₃ – 5 %.

В разработанной технологической схеме получения ВУТ смешивание угольного пыли с водой происходит в суперкавитационном миксере роторного типа под действием эффектов гидродинамической кавитации, основной функцией которого является гомогенизация и повышение устойчивости

водоугольной суспензии. Технология проведения эксперимента описана в разделе 3.

К исследованию было принято три образца: образец 1 – ВУС (угольная пыль – 30 гр., вода – 30 гр.), образец 2 – твердый уголь, Образец 3 – ВУС (угольная пыль 45 гр., вода – 55 гр.).

Таблица 4.5 – Характеристики углей Ирша-Бородинского разреза.

Группа	2Б
Зольность	6–12 %
Средняя влажность	35 %
Плотность	1,5 т/м ³
Теплотворная способность	2800–3800 ккал/кг
Содержание общей серы	0,3–1,0 %
Массовая доля минеральных примесей (породы)	не более 2 %

В напылительной установке с турбомолекулярной откачкой Q150T Plus производства Quorum Technologies Ltd для вакуумного напыления была нанесена углеродная пленка. Посредством турбомолекулярного насоса выполнено вакуумирование системы и с помощью подачи высокого тока удалены остатки органики с образца. Установка предназначена для пробоподготовки для электронной микроскопии, а именно для напыления образцов окисляющимися металлами и углеродом. Также она обладает возможностью термического испарения металлов, рисунок 4.13.

После подготовки образец был помещен в камеру аналитического сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega Compact, где был

выполнен элементный анализ образца. Производительный аналитический сканирующий электронный микроскоп начального уровня (СЭМ) позволяет получать СЭМ-изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени в одном окне программного обеспечения TESCAN EssenceTM, что значительно упрощает получение данных как о морфологии поверхности образца, так и о его локальном элементном составе, рисунок 4.14.

Одним из наиболее ценных компонентов золы уноса являются микросфера (или ценосфера) – легкая фракция золы уноса, представляющая собой мелкодисперсный сыпучий порошок, состоящий из полых тонкостенных частиц сферической формы, алюмосиликатного состава, диаметром в несколько десятков или сотен микрон.



Рисунок 4.13 – Шашка с образцами до (1) и после (2) нанесения углеродной пленки

Для повышения экологичности и снижения стоимости топлива были проведены эксперименты, в результате которых была получена оптимальная модель топливной смеси с включением органических компонентов. Приготовление смеси проводилось в суперкавитационном миксере, в полученную ранее ВУС добавлялись органические отходы кроличьих ферм в соотношении к угольной пыли 0,5:1. Суспензия доводилась до гомогенного (однородного) состояния в процессе перемешивания в течении 20-ти мин.

Полученное с применением эффектов гидродинамической кавитации ВУТ характеризуется высокой устойчивостью и может оставаться стабильной достаточно долгое время.

Известно, что органические отходы кроличьих ферм являются достаточно калорийным отходом, поэтому наличие этого компонента в составе ВУТ повысит энергетическую эффективность топлива и, как следствие решит проблему накопления отходов. Рентгеновский анализ проб с поверхности микросфер показал, что основные элементы оболочек микросфер – это Al, Si, Fe, K, Na, Mg, Ca и O, см. таблицу 4.6 и рисунки 4.15–4.17.

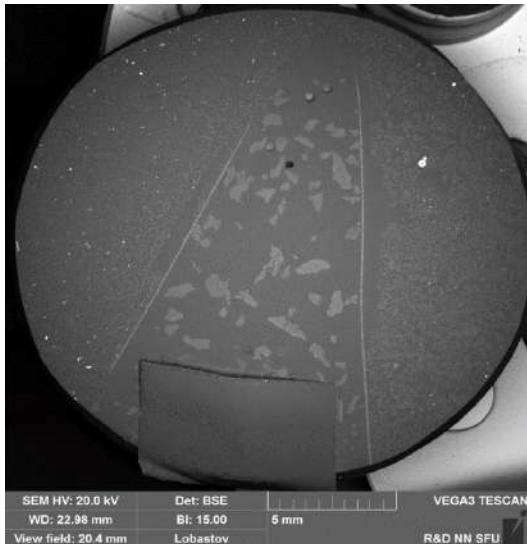


Рисунок 4.14 – Общий вид образцов под сканирующим микроскопом

На основе полученных экспериментальных данных предложена схема установки подготовки ВУТ к сжиганию с возможностью утилизации отходов животноводческих предприятий за счёт использования двухступенчатого процесса суперкавитации для смеси топлива с органикой при подготовке массы к сжиганию [56, 57, 59, 435], рисунок 4.18. При этом улучшаются параметры горения топливной смеси, в частности, снижаются потери теплоты за счёт недожога и, как следствие, уменьшение габаритов топки.

Таблица 4.6 – Результаты исследования элементного анализа

Химический элемент	Содержание, % (образец 1)	Содержание, % (образец 2)	Содержание, % (образец 3)
O	43.3	45.7	39.4
Fe	24.41	9.8	35.6
Si	17.5	18.3	3.2
Ca	7.1	13.8	6.68
Al	4.6	3	3.25
K	0.8	2.29	0
Mg	0.75	2.7	0.26
S	0.5	0.9	0.16
Sr	0.3	0.04	0.5
Cl	0.2	0.02	0.01
Na	0.14	0.16	0.02
Ti	0.1	0	0.15
P	0.05	2.3	0.008
Mn	0	0	0.15

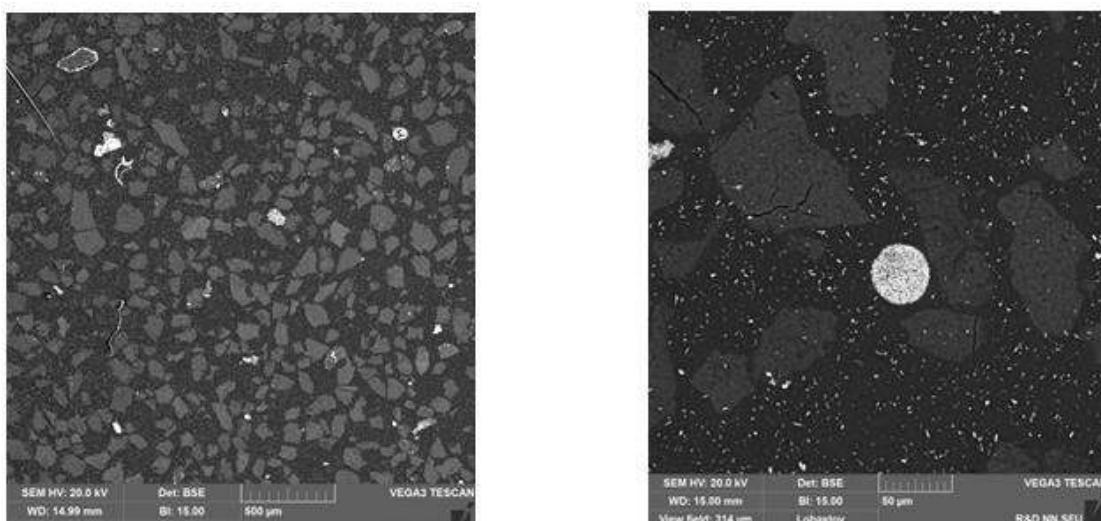


Рисунок 4.15 – Фотографии образца 1

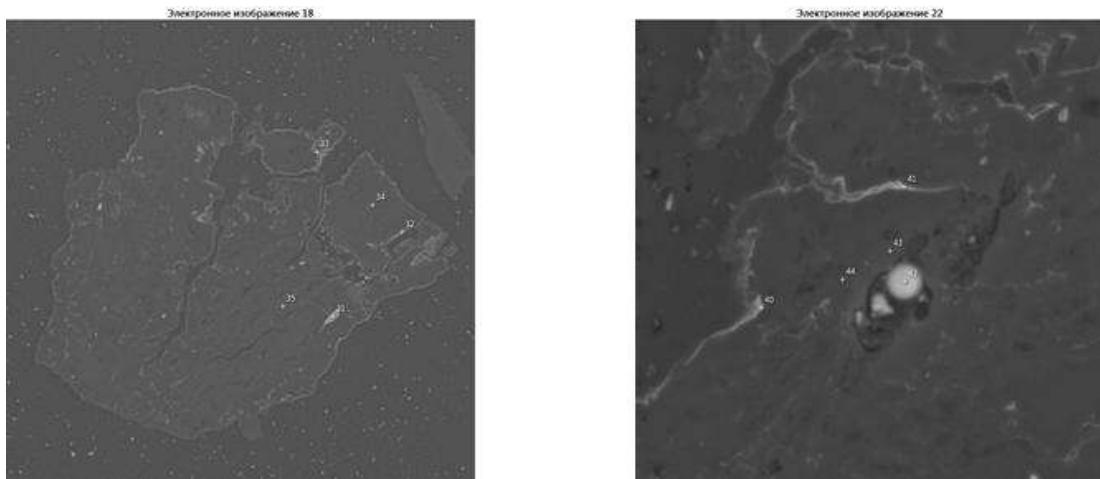


Рисунок 4.16 – Фотографии образца 2

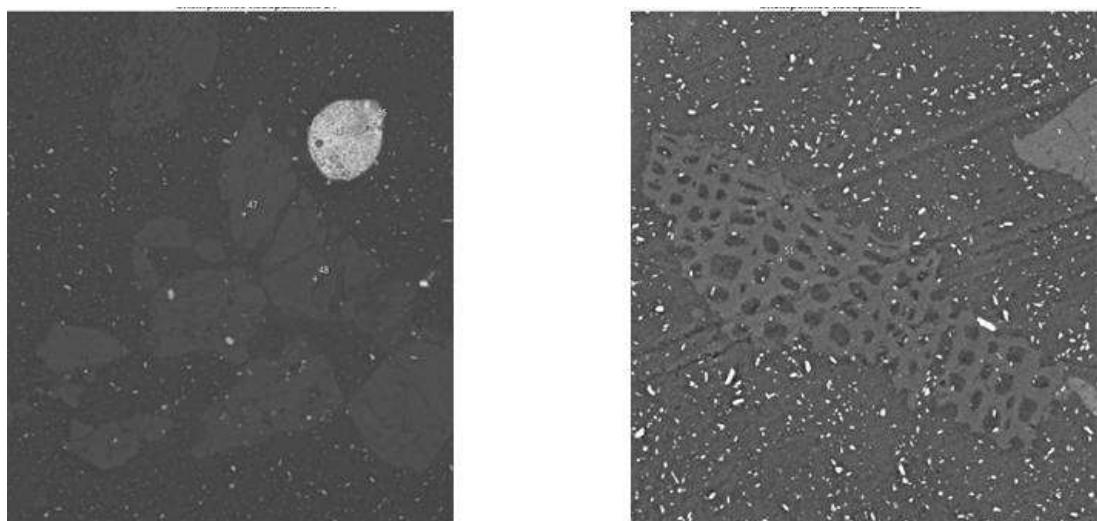


Рисунок 4.17 – Фотографии образца 3

Технический результат установки для подготовки водотопливной смеси с включением органических компонентов достигается с помощью использования последовательной схемы устройств:

- 1) суперкавитационного реактора, как элемента первой ступени подготовки топлива, в который подаются воды и уголь, причём в устройстве уголь измельчается;
- 2) смесителя, в который добавляются отходы животноводства;
- 3) суперкавитационного гомогенизатора, как элемента второй ступени подготовки топлива, для повышения однородности состава топливной смеси с целью улучшения параметров горения;

4) насоса для транспортировки подготовленной топливной смеси с помощью потока воды;

5) теплогенератора, топка которого оснащена форсунками для распыливания топлива.

Положительным эффектом при использовании двухступенчатой кавитации является нагревание топливной смеси в процессе обработки топлива к сжиганию, что делает не обязательным предварительное нагревание топлива перед подачей на форсунки топки. Выполнение функции установки осуществляется в два этапа.

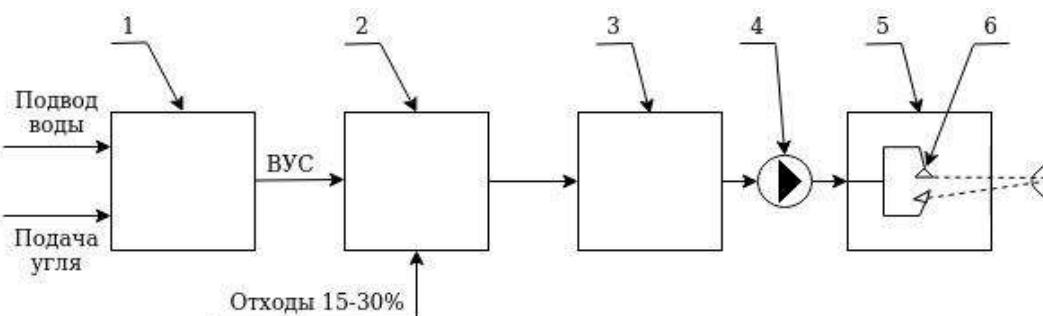


Рисунок 4.18 – Принципиальная схема установки для подготовки к сжиганию водотопливной смеси с органическими компонентами 1 – суперкавитационный реактор; 2 – смеситель; 3 – суперкавитационный гомогенизатор; 4 – насос; 5 – теплоиспользующий аппарат – котёл, 6 – форсунки

Первый этап подготовки топлива. Поток воды и предварительно измельчённого до диаметра 10–30 мм угля направляются в суперкавитационный реактор, где за счёт вращения лопастей происходит измельчение угля и образование водоугольной суспензии и поступление в смеситель, в который добавляются отходы животноводства в объеме 15–30 % от объема ранее полученной смеси. После смесителя топливо проходит второй этап обработки.

Второй этап подготовки топлива. Поток топливной смеси проходит дополнительную обработку в суперкавитационном гомогенизаторе, в котором за счёт лопаток ротора повышается однородность состава до состояния гомогенизированной смеси, из-за разницы давления образуются микровзрывы, в

результате чего повышается температура смеси. В итоге не требуется предварительно подогревать топливную смесь перед сжиганием, что упрощает конструкцию теплогенератора и способствует достижению оптимальных параметров горения.

Из суперкавитационного гомогенизатора топливная смесь насосом с помощью потока воды подаётся в топку теплогенератора. В топке поток распыляется с помощью форсунок, расположенных в горизонтальной плоскости под углом $10\text{--}45^\circ$ относительно друг друга, так как такое расположение повышает турбулизацию и удлиняет траекторию движения частиц топлива.

4.8 Описание теплотехнологического процесса в трубчатой печи

Трубчатая печь является аппаратом, предназначенным для передачи нагреваемому продукту тепла, выделяющегося при сжигании топлива, непосредственно в этом же аппарате [299, 496]. Трубчатая печь имеет камеры радиации и конвекции [496–498]. В камере радиации (топочная камера), где сжигается топливо, размещена радиантная поверхность (экран), поглощающая тепло в основном за счет радиации. В камере конвекции расположены трубы, воспринимающие тепло главным образом путем конвекции при соприкосновении дымовых газов с поверхностью нагрева. Сырье проходит последовательно через конвекционные трубы и поглощает тепло. Обычно радиантная поверхность воспринимает большую часть тепла, выделяемого при сгорании топлива. Тепло эффективно передается излучением при охлаждении дымовых газов до $1000\text{--}1200$ К. Конвекционная поверхность использует тепло дымовых газов и обеспечивает их охлаждение до температуры, при которой величина коэффициента полезного действия аппарата будет экономически оправданной.

Рассмотрим устройство передачи тепла – печь. В составе печи имеются две камеры с настильным пламенем. Особенностью этой печи является наклонное расположение форсунок, обеспечивающих соприкосновение факела с поверхностью стены, размещенной в середине камер, например в печах типа

ГН [497]. В топочную камеру печи при помощи форсунки вводится распыленное топливо, а также необходимый для горения нагретый или холодный воздух. Соприкосновение факела с поверхностью стены обуславливает повышение ее температуры – излучение происходит не только от факела, но и от самой стены. Тепло, выделенное при сгорании топлива, расходуется на повышение температуры дымовых газов и частиц горящего топлива, последние раскаляются и образуют светящийся факел. Температура, размер и конфигурация факела зависит от многих факторов и, в частности, от температуры и количества воздуха, подаваемого для горения топлива, способа подвода воздуха и др. При повышении температуры воздуха увеличивается температура факела, повышается скорость горения топлива и сокращаются размеры факела. Размеры факела сокращаются и при увеличении (до известного предела) количества воздуха, поступающего в топку, так как избыток воздуха ускоряет процесс горения топлива. Воздух, необходимый для горения, часто подводят к устью форсунки, т. е. к началу факела. В некоторых форсунках топливо распыляется воздухом, который в этом случае вводится в топку совместно с топливом. Во внутренней полости стен печей ряда конструкций размещается канал для подачи вторичного воздуха, позволяющего подводить необходимый для горения воздух по длине факела, что повышает температуру излучающей стенки и способствует более равномерной передаче тепла радиацией. В такой печи тепло излучением передается от факела, излучающей стенки и трехатомных газов. Часть лучей через пространство между трубами попадает на поверхность кладки, вдоль которой расположены трубы; лучи разогревают кладку, и она излучает тепло; при этом часть энергии поглощается той частью поверхности труб, которая обращена к стенке кладки. Средняя излучающая стена с настильным пламенем, а также прочие стены кладки, у которых расположены трубы, или свободные от труб поверхности принято называть вторичными излучателями. Радиантные трубы получают тепло не только излучением, но также и тепло, образующееся от соприкосновения дымовых газов с поверхностью труб, имеющих более низкую температуру.

Имеет место процесс взаимоизлучения, по которому через поверхность радиантных труб сырью передается необходимое количество тепла.

В результате теплопередачи, осуществляющейся в топочной камере, дымовые газы охлаждаются и поступают в камеру конвекции, где происходит их прямое соприкосновение с более холодной поверхностью конвекционных труб (вынужденная конвекция). На эффективность передачи тепла конвекцией влияет скорость движения дымовых газов; способ размещения труб в камере конвекции (наиболее эффективный порядок – это шахматный); диаметр трубы (чем тоньше труба, тем лучшие показатели обтекания); оребрение поверхности конвекционных труб.

Передача тепла конвекцией зависит и от температурного напора, т. е. от разности температур между дымовыми газами и нагретым сырьем. Эта разность температур убывает в направлении движения дымовых газов, так как температура дымовых газов снижается на большую величину, чем при этом повышается температура сырья (если температура сырья повышается на 1 °C, то дымовые газы охлаждаются на 5–7 °C). Наибольший температурный напор наблюдается на входе дымовых газов в камеру конвекции, а наименьший – на выходе. В направлении движения дымовых газов убывает и количество тепла, поглощаемого трубами.

Основные показатели работы трубчатых печей: полезная тепловая нагрузка (количество тепла, воспринимаемое сырьем в печи), плотность теплового потока (количество тепла, переданного через 1 м² поверхности нагрева в единицу времени), тепловая напряженность топочного производства, коэффициент полезного действия топочной печи [299, 496, 497].

Расчет теоретического количества воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива при нормальных физических условиях производится по следующему уравнению, кг:

$$L_0 + 0,115C = 0,345H + 0,043, \quad (4.1)$$

где L_0 – теоретический расход воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива, кг; С – содержание углерода в топливе, %; Н – содержание водорода в топливе, %.

Теоретическое количество воздуха, м³, необходимое для сгорания 1 кг топлива при нормальных физических условиях,

$$V_0 = 0,089C + 0,2674H + 0,033. \quad (4.2)$$

Фактический расход воздуха вычисляют по формуле

$$\alpha = L_0 \alpha, \quad (4.3)$$

где α – коэффициент избытка воздуха.

Количество дымовых газов, образующееся при сгорании 1 кг топлива определяют с учетом формулы (4.3) по выражению:

$$C = 1 + \alpha L_0 + W_\Phi, \quad (4.4)$$

где W_Φ – расход форсуночного пара, кг/кг.

Объем дымовых газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива при теоретическом и фактическом расходах воздуха и при нормальных физических условиях

$$V_T = V_0 - 0,056 \left(H - \frac{O}{8} \right) + \frac{9H + W + 100W_\Phi}{80,5}, \quad (4.5)$$

где О – содержание кислорода в топливе, %; W – содержание влаги в топливе.

Объем дымовых газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива при фактическом расходе воздуха при нормальных физических условиях, м³/ кг, вычисляется по формуле

$$V = V_T + (\alpha - 1)V_0, \quad (4.6)$$

Количество газов, образующихся при сгорании 1 кг топлив,

$$\begin{aligned}
m_{CO_2} &= 0,0367C, \\
m_{H_2O} &= 0,09H + 0,01W + W_\Phi, \\
m_{N_2} &= L_0 \alpha \cdot 0,768, \\
m_{O_2} &= L_0 (\alpha - 1) 0,232, \\
m_{SO_2} &= 0,02S,
\end{aligned} \tag{4.7}$$

где m_{CO_2} , m_{H_2O} , m_{N_2} , m_{O_2} , m_{SO_2} – количество соответствующих газов, образовавшихся при сгорании 1 кг топлива, кг/кг.

Объем дымовых газов при любой температуре t

$$V_t = V \frac{t + 273}{273}. \tag{4.8}$$

Плотность дымовых газов при нормальных физических условиях, кг/м³

$$\rho_0 = \frac{G}{V}, \tag{4.9}$$

где G – количество дымовых газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива, кг/кг.

Плотность дымовых газов при температуре t

$$\rho_t = \rho_0 \frac{273}{273 + t}. \tag{4.10}$$

Коэффициент избытка воздуха принимают равным: для газомазутных форсунок с паровым распылом 1,3–1,4; при воздушном распыле 1,2–1,3. При сжигании газообразного топлива в специальных панельных горелках полное и беспламенное горение обеспечивается при низком коэффициенте избытка воздуха, составляющем 1,02–1,10.

Вследствие неплотности печной кладки выше зоны горения имеет место подсос воздуха, поэтому в дымовых газах, покидающих печь, коэффициент избытка воздуха α выше приведенных значений на 0,05–0,10.

Процесс горения топлива может быть рассчитан и в мольных единицах (к моль/кг). Для этой цели используются следующие уравнения:

$$M_{\text{CO}_2+\text{SO}_2} = \frac{\text{C}}{100 \cdot 12} + \frac{\text{S}}{100 \cdot 32}, \quad (4.11)$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{H}}{100 \cdot 2} + \frac{\text{W}}{100 \cdot 18} + \frac{W_\Phi}{18}, \quad (4.12)$$

$$M_{\text{N}_2+\text{O}_2} = \frac{V_0(\alpha_0 - 0,21)}{22,4}, \quad (4.13)$$

где $M_{\text{CO}_2+\text{SO}_2}$, M_{HO_2} , $M_{\text{N}_2+\text{O}_2}$ – соответственно число кмоль CO_2+SO_2 , H_2O , N_2+O_2 , образующихся при сгорании 1 кг топлива с фактическим количеством воздуха.

В случае газообразного топлива для расчета процесса горения могут быть использованы все приведенные выше уравнения. Элементарный состав газообразного топлива может быть вычислен из следующих уравнений:

$$\text{C} = 12 \sum \frac{n_{c_i} x_i}{M_i} = \frac{12}{M_m} \sum n_{c_i} x'_i, \quad (4.14)$$

$$\text{H} = \sum \frac{n_{H_i} x_i}{M_i} = \frac{1}{M_m} \sum n_{H_i} x'_i, \quad (4.15)$$

$$\text{S} = 32 \sum \frac{n_{S_i} x_i}{M_i} = \frac{32}{M_m} \sum n_{S_i} x'_i, \quad (4.16)$$

$$\text{O} = 16 \sum \frac{n_{O_i} x_i}{M_i} = \frac{16}{M_m} \sum n_{O_i} x'_i, \quad (4.17)$$

$$\text{N} = 14 \sum \frac{n_{N_i} x_i}{M_i} = \frac{14}{M_m} \sum n_{N_i} x'_i, \quad (4.18)$$

где n_{c_i} , n_{H_i} , n_{S_i} , n_{O_i} , n_{N_i} – соответственно число атомов углерода, водорода, серы, кислорода и азота в молекулах отдельных компонентов, входящих в

состав газообразного топлива; x'_i – содержание соответствующих компонентов (метан, этан и др.) в газообразном топливе, % (масс.), % (объемн.) или % (моль); M_i – молекулярная масса компонентов топлива, кмоль/кг; M_m – молекулярная масса газа, кмоль/кг.

При расчете трубчатых печей часто бывает необходимо определить энталпию продуктов сгорания, образующихся при сжигании одного килограмма топлива; расчет выполняют по формуле

$$H_t = (m_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{SO}_2} C_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} C_{\text{O}_2})t, \quad (4.19)$$

где C_{CO_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$, C_{SO_2} , C_{N_2} , C_{O_2} – средние массовые теплоемкости при постоянном давлении этих же газов в пределах температур, считая от 0 °C (273 K) до t , кДж/(кг·K).

Если расчет производится в мольных единицах, то энталпия продуктов сгорания вычисляется по формуле

$$H_t = (M_{\text{CO}_2+\text{SO}_2} C_{\text{CO}_2+\text{SO}_2} + M_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{N}_2+\text{O}_2} C_{\text{N}_2+\text{O}_2})t, \quad (4.20)$$

где $C_{\text{CO}_2+\text{SO}_2}$, $C_{\text{H}_2\text{O}}$, $C_{\text{N}_2+\text{O}_2}$ – средние мольные теплоемкости этих газов, кДж/(кмоль·K).

Тепловой баланс трубчатой печи можно составить, приняв в качестве начальной температуры любое значение, например 0 °C. Тепловой баланс составляется применительно к некоторому отрезку времени, например к 1 часу или ко времени, в течение которого сжигается 1 кг топлива.

Ниже приведены приходные статьи теплового баланса трубчатой печи при сжигании 1 кг топлива, кДж/кг.

1. Основным теплом, вносимым в печь, является тепло, выделяемое при сгорании топлива (теплотворная способность топлива) Q_p^H .

2. Второй приходной статьей является явное тепло топлива, равное произведению теплоемкости топлива C_T на его температуру t_T , $C_T t_T$.

3. Следующей статьей является тепло, вносимое в топку с воздухом, $\alpha L_0 C_B t_B$, где C_B и t_B – соответственно теплоемкость и температура воздуха.

4. Последней приходной статьей теплового баланса будет тепло форсуночного пара $W_\Phi C_{B,P} t_{B,P}$, где $C_{B,P}$ и $t_{B,P}$ – теплоемкость и температура водяного пара.

Суммируя все статьи теплового баланса, получаем:

$$Q_{\text{прих}} = Q_P^H + C_T t_T + \alpha L_0 C_B t_B + W_\Phi C_{B,P} t_{B,P}. \quad (4.21)$$

Явное тепло топлива, воздуха и водяного пара обычно невелико и им часто пренебрегают, за исключением тех случаев, когда воздух, поступающий на горение, подогрет и вносит в печь сравнительно большое количество тепла. Если воздухоподогреватель отсутствует, то

$$Q_{\text{прих}} \approx Q_P^H.$$

Расходные статьи теплового баланса следующие, кДж/кг:

1. Тепло $q_{\text{пол}}$, полезно воспринятое в печи сырьем, а при наличии паронагревателя и водяным паром.

2. Тепло q_{yx} , теряемое с уходящими из печи дымовыми газами.

3. Тепло $q_{\text{пот}}$, теряемое в окружающую среду.

4. Тепло q_n , теряемое вследствие механического и химического недожога топлива. В случае жидкого и газообразного топлива эти потери обычно незначительны и при расчете их можно не учитывать.

Суммируя все расходные статьи теплового баланса, имеем

$$Q_{\text{пax}} = q_{\text{пол}} + q_{\text{yx}} + q_{\text{пот}}. \quad (4.22)$$

Расход тепла равен приходу:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{пax}} \approx Q_P^H$$

или

$$Q_{\text{прих}} = q_{\text{пол}} + q_{\text{yx}} + q_{\text{пот}},$$

откуда

$$q_{\text{пол}} = Q_{\text{прих}} - q_{\text{yx}} - q_{\text{пот}}. \quad (4.23)$$

Разделив правую и левую части этого уравнения на теплотворную способность топлива Q_P^H и учитя, что $Q_{\text{прих}} \approx Q_P^H$, получим

$$\frac{q_{\text{пол}}}{Q_P^H} = 1 - \frac{q_{\text{yx}}}{Q_P^H} - \frac{q_{\text{пот}}}{Q_P^H}. \quad (4.24)$$

В общем случае тепло, получаемое печью, идет на нагрев сырья, частичное или полное его испарение и компенсацию эндотермического эффекта реакции, если в трубах печи происходит химическое превращение.

Количество тепла, воспринимаемое в печи сырьем,

$$Q_C = G_C \left[eH_{t_2} + (1-e)h_{t_2} + \beta q_P - h_{t_1} \right], \quad (4.25)$$

где G_C – количество сырья, проходящего через печь; t_1 и t_2 – температуры сырья на входе и выходе из печи, °C; e – массовая доля отгона на выходе сырья из печи; β – количество продуктов реакции волях от исходного сырья; q_P – тепловой эффект реакции на 1 кг продуктов реакции, кДж/кг; h_{t_1} , h_{t_2} и H_{t_2} – соответственно энталпия сырья на входе в печь и неиспарившейся жидкости и паров на выходе из печи, кДж/кг.

Зная количество тепла Q_C , получаемого печью, и коэффициент полезного действия $\eta_{\text{тепп.}}$, определяют расход топлива:

$$B = \frac{Q_C}{Q_P^H \eta_{\text{тепп.}}}, \quad (4.26)$$

где Q_P^H – рабочая теплотворная способность топлива.

Анализ известных аналитических методов расчета, а также сопоставление данных расчета с показателями работы ряда действующих трубчатых печей свидетельствует о том, что аналитический метод расчета, разработанный профессором Н.И. Белоконем, дает близкие к эмпирическим результаты [496]. Рассматриваемый метод основан на совместном решении уравнений теплового баланса и теплопередачи в топке печи. В процессе горения в камере радиации горящее топливо образует факел, который представляет собой поток раскаленных газов с взвешенными в них частицами горящего углерода. Излучаемое факелом тепло поглощается радиантными трубами, кладкой и частично теряется через стенки печи. Нагревшаяся кладка сама становится источником излучения. Часть излучаемой кладкой энергии поглощается слоем продуктов, а остальная часть достигает экранных труб. При увеличении концентрации этих компонентов в продуктах сгорания их излучательная способность возрастает. Температура продуктов сгорания в топке изменяется по сложному закону как в направлении их движения, так и в направлении от факела к лучевоспринимающим поверхностям [497, 498]. Принципы моделирования и общие подходы к решению задач повышения эффективности тепловых процессов в трубчатых печах изложены в [291, 499]. Тепловой баланс топки

$$BQ_P^H \eta_T = BG C_{\text{пр}} (T_{\Pi} - T_0) + Q_p, \quad (4.27)$$

где $C_{\text{пр}}$ – средняя теплоемкость продуктов сгорания в пределах температур T_0 и T_{Π} , кДж/(кг·К); T_{Π} – температура газов, покидающих топку, К; T_0 –

приведенная температура исходной системы, К; Q_p – количество тепла, переданное радиантным трубам.

Величина T_0 определяется по следующему выражению:

$$T_0 = \frac{\alpha L_0 C_B t_B + W_\Phi H_\Phi + C_T t_T}{G C_{pr}} + 273, \quad (4.28)$$

где H_Φ – энталпия водяного пара, равная произведению теплоемкости на температуру, кДж/кг.

Под приведенной температурой системы подразумевается температура, которую имела бы смесь топлива, воздуха и водяного пара после смещивания этих потоков в топке печи до выделения теплоты сгорания топлива. Следовательно, в результате сгорания топлива температура системы возрастает от этой начальной величины T_0 .

Уравнение теплового баланса топки построено на базе предположения о том, что тепло, полезно выделенное в печи при сгорании топлива, передается радиантным трубам Q_p , а остальная его часть $B G C_{pr} (T_{\max} - T_0)$ уносится с дымовыми газами в камеру конвекции. При отсутствии теплопередачи в топке, когда значение $Q_p = 0$, уравнение теплового баланса имеет вид

$$B Q_p^H \eta_T = B G C_{pr} (T_{\max} - T_0), \quad (4.29)$$

где T_{\max} – максимальная расчетная температура горения, т.е. температура, которую имели бы дымовые газы при отсутствии передачи тепла радиантным трубам. При этом полезное тепло, выделенное при сгорании топлива, расходуется только на нагрев дымовых газов от T_0 до T_{\max} .

Из уравнения (4.29)

$$T_{\max} = T_0 + \frac{Q_p^H \eta_{\text{тепл.}}}{G C_{pm}}. \quad (4.30)$$

При расчете радиантной секции печи необходимо вычислить количество переданного в радиантной секции тепла Q_p , величину поверхности радиантных труб H_p и температуру продуктов сгорания на перевале T_{Π} , т. е. температуру газов, покидающих камеру радиации. После определения этих величин проверяют среднюю тепло напряжённость радиантных труб:

$$q_p = \frac{Q_p}{H_p}, \quad (4.31)$$

которая не должна превышать рекомендуемых величин для соответствующих технологических процессов. Все упомянутые величины взаимосвязаны и должны быть согласованы одна с другой.

При расчете радиантной поверхности определяют коэффициент прямой отдачи μ , который представляет собой отношение общего количества тепла, переданного радиантным трубам, к количеству тепла, полезно выделенному в топке при сгорании топлива:

$$\mu = \frac{Q_p}{BQ_p^H \eta_{\text{тепл}}}, \quad (4.32)$$

где для трубчатых печей $\mu = 0,4\text{--}0,6$.

При увеличении μ возрастает количество тепла, воспринимаемое радиантными трубами. Это связано с уменьшением температуры сгорания топлива на перевале T_{Π} и увеличением площади поверхности радиантных труб. Данное явление, в свою очередь, связано с тем, что при понижении температуры продуктов сгорания, покидающих камеру радиации, согласно закону Стефана – Больцмана, теплообмен излучением становится менее эффективным. Передача тепла радиантным трубам связана с понижением температуры уходящих газов от T_{\max} до температуры на выходе из камеры радиации T_{Π} , т. е.

$$Q_p = BG C_{pr} (T_{max} - T_\Pi). \quad (4.33)$$

Полезное тепло, выделенное при сгорании топлива, в соответствии с уравнением (4.27) при $Q_p = 0$ определяется по уравнению (4.29). Тогда из формул (4.29) и (4.33) получаем следующее выражение:

$$\mu = \frac{Q_p}{B Q_P^H \eta_{temp.}} = \frac{T_{max} - T_\Pi}{T_{max} - T_0} = 1 - \frac{\frac{T_\Pi}{T_{max}}}{\frac{T_0}{T_{max}}} \approx 1 - \frac{T_\Pi}{T_0}. \quad (4.34)$$

Таким образом, задавшись температурой T_Π , определяют μ и затем Q_p – количество тепла, воспринимаемое радиантными трубами. Зная Q_p , рассчитывают поверхность радиантных труб H_p , используя совместное решение уравнений теплового баланса и теплопередачи в топочной камере.

Основную часть тепла радиантные трубы воспринимают радиацией, а свободной конвекцией – только небольшую ее часть. Тогда

$$Q_p = Q_{p,L} + Q_{p,K}, \quad (4.35)$$

где $Q_{p,L}$ – количество тепла, переданное излучением; $Q_{p,K}$ – количество тепла, переданное конвекцией при соприкосновении горячих продуктов сгорания с трубами экрана.

Количество тепла, переданное трубам радиацией, определяется законом Стефана – Больцмана, в котором за температуру излучающей поверхности принята температура уходящих газов T_Π , а тепло воспринимается эквивалентной абсолютно черной поверхностью, т. е.

$$Q_{p,L} = C_s H_s \left[\left(\frac{T_\Pi}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 \right], \quad (4.36)$$

где C_s – постоянная излучения абсолютно черного тела, равная $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; H_s – эквивалентная абсолютно черная поверхность, м^2 ; Θ – средняя температура наружной поверхности радиантных труб, К.

Тепло, воспринимаемое радиантными трубами свободной конвекцией, определяется по формуле

$$Q_{\text{Р.К}} = \alpha_k H_p (T_{\Pi} - \Theta), \quad (4.37)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией от дымовых газов к радиантным трубам.

Подставив в уравнение (4.27) значения $Q_{\text{Р.Л}}$ и $Q_{\text{Р.К}}$ из уравнений (4.36) и (4.37), получим уравнение теплового баланса топки в виде

$$BQ_P^H \eta_{\text{тепл.}} = BGC_{\text{пр}} (T_{\Pi} - T_0) + C_s H_s \left[\left(\frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 \right] + \alpha_k H_p (T_{\Pi} - \Theta). \quad (2.38)$$

Для закрытой неэкранированной топки в условиях полного отсутствия теплопередачи, когда все тепло расходуется на повышение температуры дымовых газов, уравнение теплового баланса имеет вид (4.29); сопоставив его с (4.38), получим

$$BGC_{\text{пр}} (T_{\max} - T_0) = BGC_{\text{пр}} (T_{\Pi} - T_0) + C_s H_s \left[\left(\frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 \right] + \alpha_k H_p (T_{\Pi} - \Theta). \quad (2.39)$$

После ряда преобразований уравнения (4.39) получаем

$$\frac{10^{-8} C_s H_s}{BGC_{\text{пр}} + \alpha_k H_p} T_{\Pi}^4 + T_{\Pi} = T_{\max} - \Delta\Theta, \quad (4.40)$$

где $\Delta\Theta$ – температурная поправка теплопередачи в топке, характеризующая либо повышение, либо понижение предельной теплопередачи конвекцией обратного излучения экрана,

$$\Delta\Theta = \frac{\alpha_K H_P (T_{\max} - \Theta) - C_S H_S \Theta^4 10^{-8}}{BGC_{pr} + \alpha_K H_P}. \quad (4.41)$$

В [496] введены понятия характеристики излучения

$$\beta_S = \frac{T_\Pi}{T_{\max} - \Delta\Theta} \quad (4.42)$$

и аргумента излучения

$$x = \frac{10C_S H_S}{BGC_{pr} + \alpha_K H_P} \left(\frac{T_{\max} - \Delta\Theta}{1000} \right)^3. \quad (4.43)$$

Преобразовав уравнения (4.41)–(4.43), получим уравнение теплового баланса в виде

$$x\beta_S^4 + \beta_S = 1. \quad (4.44)$$

Зависимость характеристики излучения β_S от аргумента излучения x представлена на рисунке 4.19 и может быть определена аналитически следующей зависимостью:

$$\beta_S = \frac{1}{0,25\sqrt{0,1875 + \sqrt{0,141 + x}}}. \quad (4.45)$$

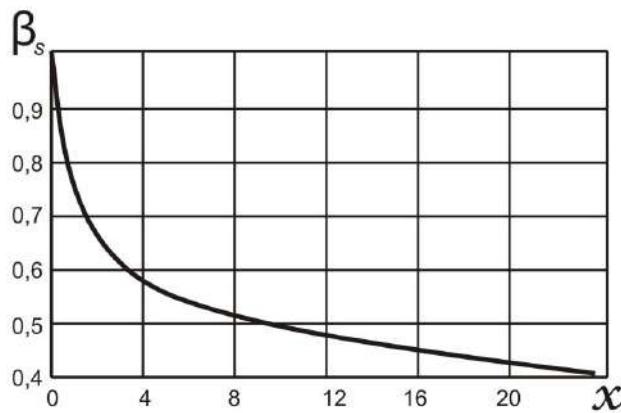


Рисунок 4.19 – Зависимость характеристики β_S от аргумента излучения x

Зная β_s , можно определить температуру продуктов сгорания на перевале по формуле (4.42):

$$T_{\Pi} = \beta_s (T_{\max} - \Delta\Theta). \quad (4.46)$$

Зная T_{Π} , вычисляют μ . Для расчета величины, эквивалентной абсолютно черной поверхности, используют графики С.В. Адельсона (рисунок 4.20). Эти графики позволяют найти вспомогательную величину

$$q_s = \frac{BQ_{\text{прих}}}{H_s}, \quad (4.47)$$

где q_s – тепло напряжённость; $Q_{\text{прих}}$ – приходные статьи теплового баланса, определяемые из уравнения (4.47).

Для промежуточных значений температур Θ величину q_s находят интерполяцией. Среднюю температуру наружной поверхности радиантных труб определяют следующим образом: после расчета количества тепла, переданного радиантным трубам Q_p , находят количество тепла, которое воспринимают конвекционные трубы:

$$Q_K = Q_{\text{пол}} - Q_p - Q_{\text{в.п.}}, \quad (4.48)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – тепло, воспринятое сырьем и водяным паром.

По найденной величине Q_K определяют энтальпию сырья i_K при входе в радиантную секцию:

$$i_K = i_t + \frac{Q_K}{G_C}, \quad (4.49)$$

где i_t – энтальпия сырья на входе в печь.

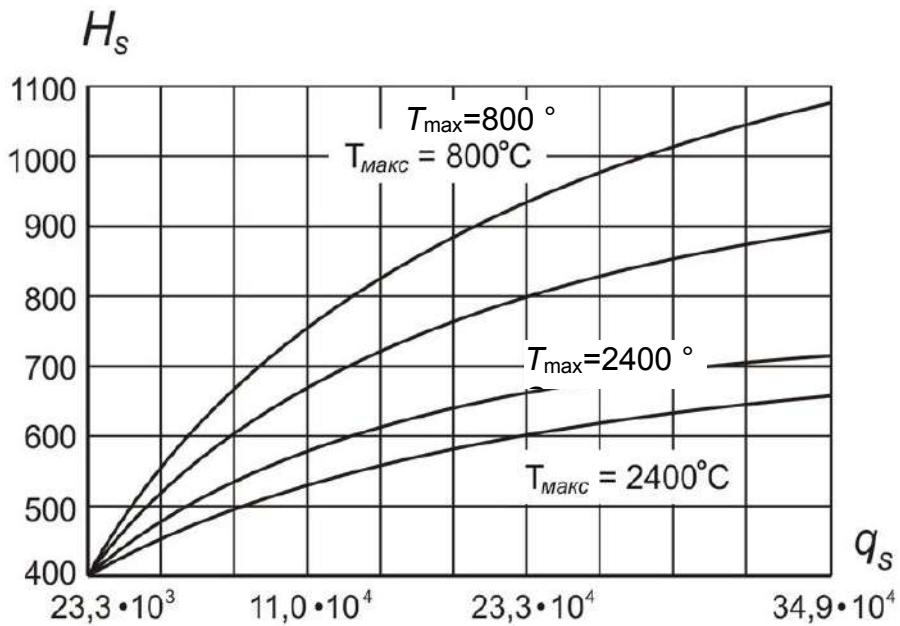


Рисунок 4.20 – Графики для определения q_s и H_s

По величине i_K определяют температуру T_K на входе в радиантную секцию. После этого находят среднюю температуру наружной поверхности радиантных труб следующим образом:

$$\Theta = \frac{(T_2 + T_K)}{2} + \Delta T + 273, \quad (4.50)$$

где T_2 – конечная температура сырья в печи; ΔT – разность температур наружной поверхности радиантных труб и сырья, нагреветого в трубах от 20 до 60 $^\circ\text{C}$.

Затем, пользуясь рекомендациями из [299], определяют величину, эквивалентную луце воспринимающей поверхности H_L , которой передается то же количество тепла, что и радиантным трубам:

$$\frac{H_s}{H_L} = \frac{2,12}{\Psi(2,15\alpha+1)} \cdot \frac{2,15\alpha-1 + \frac{2,12\Psi}{\rho_{FH}}}{2,15\alpha-1 + \frac{2,12}{\rho_{FH}}}, \quad (4.51)$$

здесь Ψ – коэффициент, характеризующий степень экранирования кладки; ρ_{FH} – угловой коэффициент взаимного излучения поверхности экрана и кладки, характеризующий долю взаимно направленных пучков лучей,

$$\Psi = \frac{H_{\text{Л}}}{F + H_{\text{Л}}} = \frac{\frac{H_{\text{Л}}}{F}}{1 + \frac{F}{H_{\text{Л}}}} = \frac{1}{1 + \frac{F}{H_{\text{Л}}}}, \quad (4.52)$$

где F – неэкранированная поверхность кладки топки.

Величину ρ_{FH} можно определять в зависимости от соотношения эквивалентной плоскости поверхности $H_{\text{Л}}$ и неэкранированной поверхности кладки F ($0,3 \leq \Psi \leq 0,8$):

$$\begin{aligned} \text{при } \Psi < \frac{1}{3} \quad \rho_{FH} &= \frac{H_{\text{Л}}}{F} = \frac{\Psi}{1 - \Psi}, \\ \text{при } \Psi \geq \frac{1}{3} \quad \rho_{FH} &= \frac{H_{\text{Л}}}{F + H_{\text{Л}}} = \frac{H_{\text{Л}}}{\Sigma F} = \Psi. \end{aligned} \quad (4.53)$$

Трубы устанавливают с шагом

$$S = md, \quad (4.54)$$

где d – наружный диаметр труб, м; m – относительный шаг труб.

Исходя из этих данных, величина плоской поверхности кладки должна быть больше, чем $H_{\text{Л}}$.

Отношение $H_{\text{Л}}$ к H называют фактором формы f :

$$f = \frac{H_{\text{Л}}}{H} \leq 1. \quad (4.55)$$

Здесь f соответствует тому числу, которое в тех же условиях поглотила бы за экранированная поверхность кладки, и зависит от относительного шага труб $m = \frac{S}{d}$ и числа рядов труб экрана.

Зная H , находят поверхность радиантных труб H_{Pi} :

$$H_{Pi} = n\pi ld, \quad (4.56)$$

где l, n – соответственно длина и количество труб.

Плоская заэкранированная поверхность кладки вычисляется по следующей формуле:

$$H_I = [(n-1)S + d]l = [(n-1)m + 1]ld. \quad (4.57)$$

Отсюда

$$\frac{H_{Pi}}{H_I} = \frac{n\pi}{(n-1)m+1}. \quad (4.58)$$

Определяя из выражения (4.58) поверхность радиантных труб H_{Pi} , рассчитывают их тепло напряжённость по формуле (4.31), которая не должна превышать рекомендуемых величин для соответствующего процесса. Малая величина теплонапряженности указывает на то, что поверхность радиантных труб используется неэффективно и ее необходимо уменьшить.

Увеличение температуры сгорания на перевале приводит к повышению теплонапряженности радиантных труб, уменьшению величины их поверхности. Коэффициент теплопередачи свободной конвекцией определяют по уравнению

$$\alpha_K = 2,1\sqrt[4]{T_{\Pi} - \Theta}. \quad (4.59)$$

Для теплового расчета камеры конвекции существуют следующие характеристики, соответствующие соотношению (4.49): 60–70 % – общего тепла

передается конвекцией; 20–30 % – радиацией от горячих продуктов сгорания; 10 % – излучением нагретых стенок камеры.

Поверхность конвекционных труб определяют по формуле

$$H_K = \frac{Q_K}{K\Delta t_{cp}}, \quad (4.60)$$

где Q_K – количество тепла, воспринимаемое конвекционными трубами; Δt_{cp} – средняя разность температур (температуры напор) дымовых газов и нагреваемого сырья; K – коэффициент теплопередачи от дымовых газов к сырью.

При расчете конвекционной поверхности известными величинами являются температура дымовых газов, покидающих топку и поступающих в камеру конвекции, и температура поступающего в печь сырья. Наиболее трудоемкой частью расчета является определение коэффициента теплопередачи K . Он зависит от следующих основных величин: скорости движения дымовых газов, средней температуры наружной поверхности труб и наружного диаметра труб, числа рядов труб в направлении движения дымовых газов и шага размещения труб по ширине и глубине пучка. Коэффициент теплоотдачи конвекцией увеличивается при сокращении расстояния между осями труб, так как это обеспечивает более высокие скорости движения газов в камере конвекции. Для чистой поверхности

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}}, \quad (4.61)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от газов к стенке трубы; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемому потоку; δ – толщина стенки трубы; λ – коэффициент теплопроводности материала труб.

По величине коэффициент теплоотдачи α_1 обычно значительно меньше α_2 при небольшой толщине стенки и высокой теплопроводности металла $\lambda \approx 45$ Вт/(м·К), сопротивление потоку тепла через стенку трубы $\frac{\delta}{\lambda}$ также незначительно, поэтому для расчетов величинами $\frac{1}{\alpha_2}$ и $\frac{\delta}{\lambda}$ можно пренебречь.

В этом случае коэффициент теплоотдачи K практически равен коэффициенту теплоотдачи от дымовых газов α_1 , т. е.

$$K \approx \alpha_1. \quad (4.62)$$

Конвекционная поверхность воспринимает тепло за счет прямого соприкосновения с дымовыми газами, излучения от трехатомных несветящихся газов и излучения кладки. Коэффициент теплоотдачи со стороны дымовых газов α_1 следует рассматривать как сумму трех величин: коэффициентов теплоотдачи конвекции α_K ; излучения трехатомных газов CO₂, SO₂, H₂O α_p , зависящего от концентрации и температуры этих газов, температуры стенки труб, толщины газового слоя и излучения от стенок кладки. Последняя величина при расчете учитывается введением множителя, равного 1,1. Таким образом, коэффициент теплоотдачи от дымовых газов вычисляется по следующей формуле:

$$K = \alpha_1 = 1,1(\alpha_K + \alpha_p). \quad (4.63)$$

Для технических расчетов коэффициент теплоотдачи α_p можно определить по эмпирической зависимости Нельсона:

$$\alpha_p = 0,0256t_{cp} - 2,33. \quad (4.64)$$

Средняя температура дымовых газов t_{cp} вычисляется как средне логарифмическая величина:

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_{\Pi} - t_{yx}}{2,3 \lg \frac{t_{\Pi}}{t_{yx}}}, \quad (4.65)$$

где t_{yx} – температура дымовых газов, уходящих из камеры конвекции; t_{Π} – температура дымовых газов на перевале.

Для расчета коэффициента теплоотдачи конвекцией, измеряемого в Вт/(м²·К), при шахматном расположении труб используется следующее соотношение:

$$\alpha_k = 0,35 \frac{uE^{0,6}}{d^{0,4}}, \quad (4.66)$$

где E – коэффициент, зависящий от физических свойств топочных газов и определяемый из графика, приведенного на рисунке 4.21; u – массовая скорость движения газов, кг/(м²·с).

Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов, вычисляемый по формуле (4.63), $\alpha_1 = 25 - 30$ Вт/(м²·К).

В общем случае в конвекционной камере осуществляется противоток между сырьем и продуктами сгорания. Температуру сырья на выходе из камеры конвекции определяют, исходя из уравнения (4.23). Обычно предполагают, что сырье уходит из камеры конвекции в жидком состоянии, так как в этой части змеевика более высокое давление и относительно невысокая температура сырья (рисунок 4.22).

При испарении сырья часть тепла затрачивается на перевод его в парообразное состояние, и температура t_K оказывается ниже. Для этого проводят гидравлический расчет змеевика печи, когда давление на выходе из конвекционных труб будет известно, и рассчитывают энтальпию сырья на выходе из конвекционных труб по формуле (4.49).

Среднюю разность температур $\Delta t_{\text{cp},z}$ определяют по уравнению

$$\Delta t_{\text{cp},z} = \frac{(t' - t_{z2}) - (t'' - t_{z1})}{\ln \left[\frac{(t' - t_{z2})}{(t'' - t_{z1})} \right]}, \quad (4.67)$$

где t' , t'' – температура газов на входе в секцию пар нагревателя и на выходе из нее.

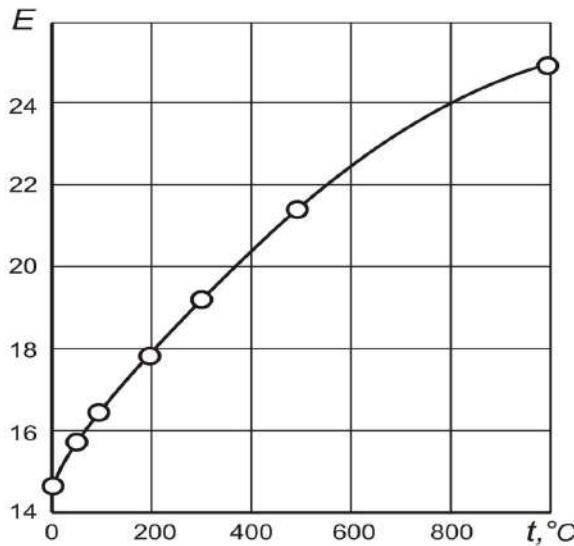


Рисунок 4.21 – Зависимость коэффициента, определяющего физические свойства топочных газов от температуры

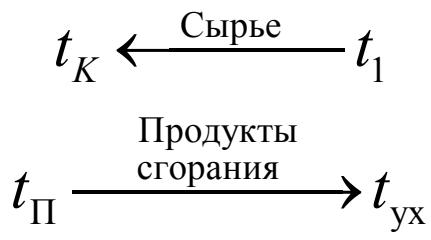


Рисунок 4.22 – Схема потоков «сырье – продукты сгорания» (к определению средней разности температур)

Нормальная работа трубчатой печи определяется скоростью движения потока сырья в трубах змеевика. При более высокой скорости потока увеличивается коэффициент теплоотдачи от стенок труб к нагреваемому сырью, уменьшается температура стенок и снижается возможность образования кокса и отложения твердых частиц. Вместе с тем применение высоких скоростей потока приводит к росту гидравлического сопротивления змеевика.

Математическая модель процесса горения. Имеются некоторые расхождения в математических методах анализа, используемых разными авторами, но для стационарного сферического горения используется единый подход. В целях упрощения анализ проводится при следующих предположениях [291, 299, 499]:

1. Жидкая капля имеет сферическую форму;
2. Влиянием конвекции пренебрегают, пламя рассматривают как сферическую поверхность, концентрическую с каплей;
3. Пламя считают разновидностью диффузионного пламени, которое образуется в результате реакции между парами горючего и воздухом, которые реагируют в стехиометрическом соотношении;
4. Рассматривают стационарное состояние при постоянном диаметре капли, хотя реально диаметр жидкой капли уменьшается по мере горения, однако это изменение происходит медленно по сравнению с изменением скорости диффузии и прочими факторами;
5. Температура капли одинакова по всему объему;
6. Давление в течение всего процесса горения считается постоянным;
7. Влияние излучения рассматривают отдельно.

Уравнение нестационарного горения. При исследовании процесса горения капель жидкого топлива в воздухе в основном представляет интерес распределение концентраций компонентов в камере печи при статических и динамических режимах работы. Исходя из одномерности движения потоков, математическая модель нестационарного горения может быть представлена следующими уравнениями:

1. Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (4.68)$$

где ρ – массовая плотность смеси; \vec{u} – скорость движения смеси.

Для покомпонентной модели процесса горения уравнение (4.68) можно записать в виде

$$\frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x u)}{\partial l} = -\frac{\rho x}{\tau}, \quad (4.69)$$

здесь l – линейный размер; x – концентрация горючего вещества в смеси ($0 \leq x \leq 1$); τ – время сгорания.

2. Уравнение движения в виде

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial l} \right) + \frac{\partial P}{\partial l} = 0. \quad (4.70)$$

4. Уравнение сохранения энергии

$$\rho T \left(\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial l} \right) = \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T) + K_1 (T_c - T), \quad (4.71)$$

где q – теплота сгорания топлива; $Q(T)$ – потери на излучение; S – энтропия, причем $S = C_v \ln \frac{P}{\rho^\gamma}$ ($\gamma = 1,0 - 1,4$, так как для жидкостей различие между C_v и C_p незначительно); T_c – температура сырья (нефтепродукта в радиантных трубопроводах печи); K_1 – коэффициент теплопередачи для рабочего потока.

4. Уравнение теплообмена между нагреваемым сырьем и нагревательным газом в виде

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = K_2 (T - T_c), \quad (4.72)$$

где K_2 – коэффициент теплопередачи для стенки печи.

Уравнения (4.68)–(4.72) представляют собой математическую модель теплового процесса печи, которая может быть реализована относительно

скорости движения смеси и концентрации горючего вещества в смеси по длине камеры сгорания и использована для получения других параметров печи, которые зависят от x и u .

Для получения x и u как функции длины в камере сгорания формулируется смешанная краевая задача. Для этого к уравнениям (4.68)–(4.72) добавляют начальные условия:

$$x(l, 0) = \varphi_1(l), \quad u(l, 0) = \varphi_2(l), \quad T(l, 0) = \varphi_3(l), \quad T_C(l, 0) = \varphi_4(l) \quad (4.73)$$

и граничные условия:

$$x(0, t) = \varphi_1(t), \quad u(0, t) = \varphi_2(t), \quad T(0, t) = \varphi_3(t), \quad T_C(0, t) = \varphi_4(t). \quad (4.74)$$

Стационарная модель процесса горения следует из (4.68)–(4.71). В этом случае уравнения могут быть значительно упрощены. При этом $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, первое слагаемое в левых частях уравнений (4.68)–(4.71) обращается в ноль и $\frac{\partial}{\partial l} \rightarrow \frac{d}{dl}$, так как остается лишь одна независимая переменная. Уравнение (4.68) может быть проинтегрировано, что приводит к простой форме уравнения неразрывности:

$$\begin{aligned} \rho u &= M - \text{const}, \\ \frac{d}{dl}(\rho u x) &= -\frac{\rho x}{\tau}. \end{aligned} \quad (4.75)$$

Уравнение сохранения количества движения может быть преобразовано в интегральную форму для случая плоского установившегося одномерного течения:

$$\rho u \frac{du}{dl} + \frac{d\rho}{dl} = 0,$$

которое имеет интеграл

$$\rho u^2 + P = \text{const} = \Pi.$$

Тогда уравнение сохранения энергии представим в виде

$$C_v \rho T u \frac{d \ln \frac{\rho}{\rho^\gamma}}{dl} = \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T).$$

Перепишем систему, полученную с учетом первого уравнения этой системы:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dl} &= -\frac{x}{u\tau}, \\ Mu + P &= \Pi - \text{const}, \\ M \frac{d}{dl} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma u P}{(\gamma - 1)M} \right) &= \frac{Mx}{u\tau} q - Q(T). \end{aligned} \tag{4.76}$$

Третье уравнение системы (4.76) сократим на M и получим выражение

$$\begin{aligned} \frac{d}{dl} \left(\frac{x}{u\tau} \right) &= -\frac{x}{u\tau}, \\ \frac{d}{dl} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma u P}{(\gamma - 1)M} \right) &= \frac{x}{u\tau} q - \frac{Q(T)}{M}. \end{aligned} \tag{4.77}$$

Система (4.77), состоящая из обыкновенных дифференциальных уравнений, теперь может быть разрешена относительно скорости движения смеси и концентрации горючего вещества в смеси по длине камеры сгорания. Это решение может быть использовано для получения других параметров печи, которые зависят от x и u .

Метод решения стационарной модели. Для определения x и u как функций длины в камере сгорания можно сформулировать задачу Коши, задавая значения x и u на входе в камеру сгорания.

Начальные условия:

$$\begin{aligned}
&0 \leq l \leq L, \\
&x(0) = a_1, \\
&u(0) = a_2, \\
&\frac{dx}{dl} = -\frac{x}{ul}, \\
&\frac{du}{dl} = \frac{Mqx(\gamma - 1) - u\tau Q(T)(\gamma - 1)}{u\tau(uM(\gamma - 1) + \gamma P)}.
\end{aligned}$$

Для системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dy_i}{dx} = f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_n), \quad x_0 \leq x \leq X \quad (4.78)$$

применим программу пошагового интегрирования, выполненного методом Кутта – Меерсона:

$$\begin{aligned}
R_1 &= hf(x_0, y_0), \quad y_0 = y(x_0), \\
R_2 &= hf(x_0 + \frac{1}{3}h, y_0 + \frac{1}{3}R_1), \\
R_3 &= hf(x_0 + \frac{1}{3}h, y_0 + \frac{1}{6}R_1 + \frac{1}{6}R_2), \\
R_4 &= hf(x_0 + \frac{1}{2}h, y_0 + \frac{1}{8}R_1 + \frac{3}{8}R_2), \\
R_5 &= hf(x_0 + h, y_0 + \frac{1}{2}R_1 - \frac{3}{2}R_3 + 2R_4), \\
y^1(x_0 + h) &= y_0 + \frac{1}{2}R_1 - \frac{3}{2}R_3 + 2R_4, \\
y^2(x_0 + h) &= y_0 + \frac{1}{6}R_1 + \frac{2}{3}R_4 + \frac{1}{6}R_5.
\end{aligned} \quad (4.79)$$

Величина $R = 0,2(y^1 - y^2)$ служит для оценки погрешности метода и автоматического выбора интегрирования. Если ε – предписанная точность вычислений, то шаг интегрирования выбирают следующим образом. Берут некоторый начальный шаг и производят вычисления по формулам (4.79). Находят величину R , при $R > \varepsilon$ шаг интегрирования в два раза уменьшается,

при $R \leq \frac{\varepsilon}{64}$ шаг увеличивается вдвое. Если же $\frac{\varepsilon}{64} < R < \varepsilon$, то шаг выбран

правильно. После этого в качестве начальной точки x_0 берут точку $x_0 + h$ и весь цикл повторяют. В качестве приближенного решения выступает величина y^2 ; y^1 носит вспомогательный характер. Описанный выше метод оценки погрешности и выбор шага интегрирования называют методом вложенных фигур. Программа состоит из главной программы и двух подпрограмм.

Главная программа обращается к подпрограмме EKUT, которая выполняет интегрирование вместе с подпрограммой EF, для записи величины $\frac{dy_i}{dx}$. Главная программа считает текущее значение $x(l)$, определяет требуемую точность (ACC), число вводимых дифференциальных уравнений (NEQS), шаг, с которым выполняется интегрирование (INSTER), и соответствующую величину y в точке $x(y)$. В подпрограмме EKUT дифференциальные уравнения раскрываются до пятого порядка, получаемая точность оценивается с помощью вычисления разницы между четвертым и пятым членами. При каждом повторении эта разница сравнивается с требуемой точностью: если последняя не достигнута, то длина шага уменьшается и интервал покрывается за большее число шагов. Подпрограмма EKUT обычно начинается с логической переменной START, равной TRUE, y полагается равным INSTER/NSREQD. В этом случае интегрирование, выполняемое с заданной точностью, будет повторено снова для получения меньшей погрешности. При выходе из EKUT величина START всегда имеет значение FALSE. Требуемые величины возвращаются в массив SOLN.

Блок-схема вычислений приведена на рисунке 4.22. По составленной программе были проведены расчеты горения капель различного диаметра для решения задачи Коши с начальными условиями, м/с:

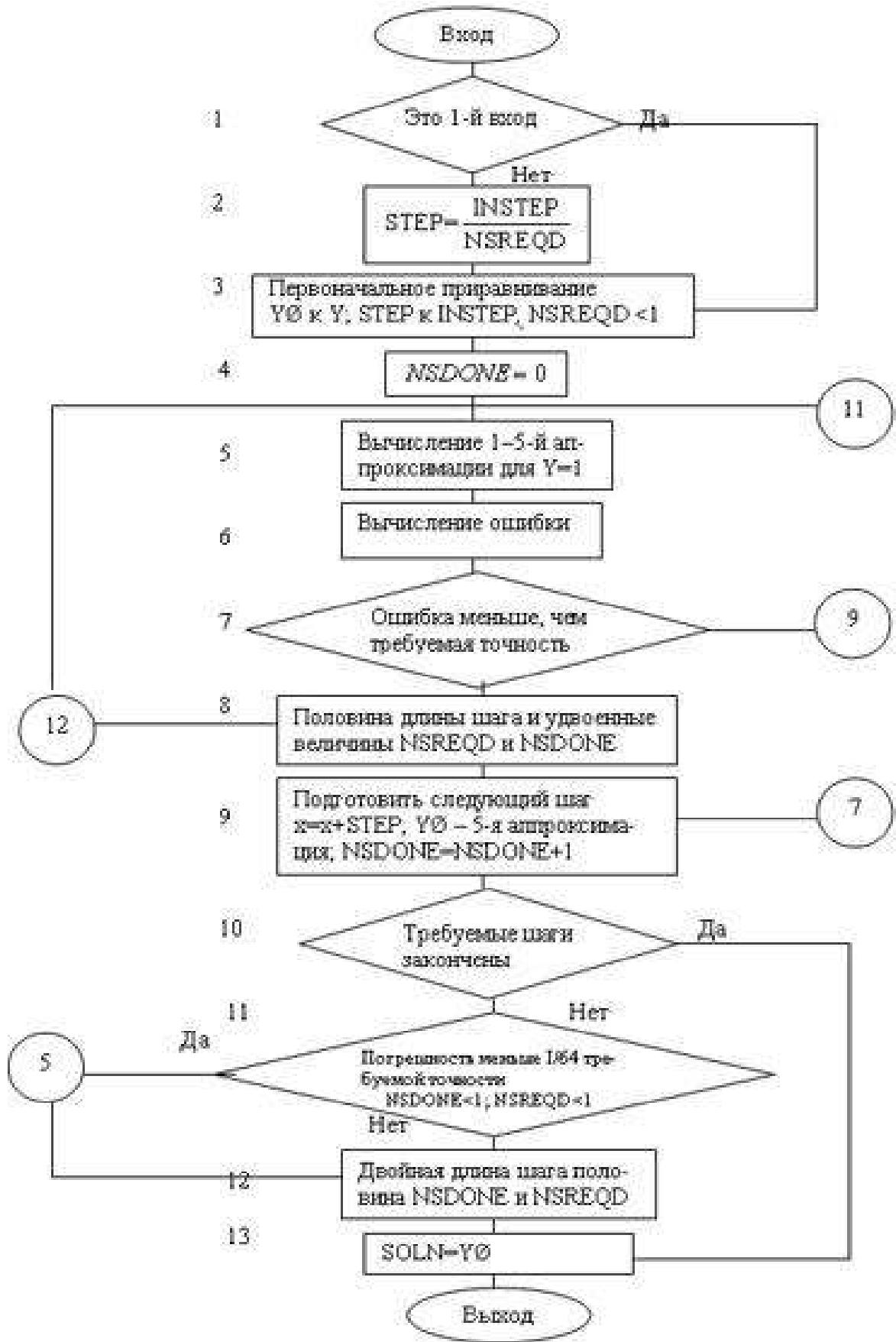


Рисунок 4.22 – Блок-схема численного решения задачи Коши методом Кутта – Меерсона

$$x(O) = 0,346,$$

$$u(O) = 1,0.$$

Капли диаметром 0,01 мм имеют время сгорания $\tau = 0,00011$ с и потери на излучение $Q = 0,00001498$ Дж/с ; диаметром 0,1 мм – $\tau = 0,011$ с и $Q = 0,001498$ Дж/с ; диаметром 1 мм – $\tau = 0,07$ с и соответственно потери на излучение $Q = 0,1498$ Дж/с ; диаметром 2 мм – время сгорания $\tau = 2,3$ с и $Q = 0,27818$ Дж/с . В задаче использовались и постоянные величины: давление – $P = 101000$ Па , теплота сгорания – $q = 26000000$ Дж/кг (с учетом диссоциации продуктов сгорания), массовый расход – $M = 144$ кг , $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,1$. На рисунках 4.24 и 4.25 представлены результаты расчетов.

Результаты проведенных расчетов показывают, что скорость горения и концентрация горючего вещества по длине печи, как и потери тепла на излучение, существенно зависят от размеров капель топлива. Наилучшие параметры горения имеют капли диаметром 1 мм, причем по скорости горения для этих капель наблюдается локальный максимум.

Расчет потерь на излучение при горении капель топлива различного диаметра. Для теплового расчета трубчатых печей с чисто факельным сжиганием топлива широко применяется метод А.В. Белоконя, дающий наилучшую сходимость с экспериментальными данными. За последнее время с целью интенсификации в трубчатых печах теплоотдачи излучением созданы новые типы печей с вторичными излучателями в виде стен из беспламенных панельных горелок и излучающих стен с настильным пламенем.

В этих печах теплоотдача экранным поверхностям от вторичных излучателей весьма значительна и соизмерима с теплоотдачей излучением от факела и газовой среды.

Для рассматриваемой модели необходимо учитывать потери на излучение. Величина $Q(T)$ определяется следующим образом (обратным излучением с поверхности капли из-за низкой температуры поверхности пренебрегают):

$$Q(T) = 4 \cdot \varepsilon_{\text{пп}} \cdot \sigma \cdot T_2^4 \cdot \pi \cdot r_k^2, \quad (4.80)$$

где $\varepsilon_{\text{пп}}$ – приведенная степень черноты; σ – коэффициент излучения (постоянная Стефана – Больцмана); $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$; T_2 – изменение температуры в зоне горения; $r_k = \frac{\delta}{2}$ – радиус капли; δ – диаметр капли.

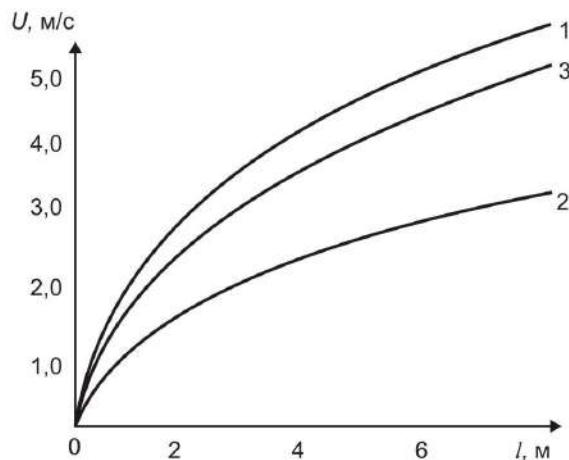


Рисунок 4.24 – Изменение скорости горения смеси по длине печи: 1 – диаметр капли 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – меньше 1 мм

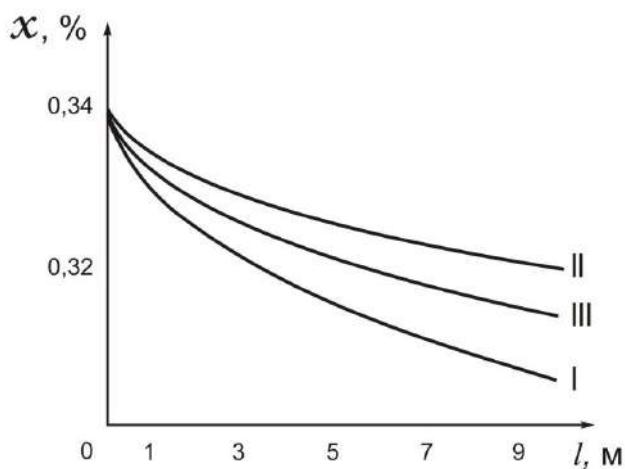


Рисунок 4.25 – Изменение концентрации горючего вещества по длине печи: 1 – горение капель диаметром 1мм, 2 – 2 мм, 3 – горение капель диаметром менее 1 мм

При $Q(T) \neq 0$ считается, что величина радиуса зоны горения r_2 не изменяется. Причем для чисел Нуссельта $Nu > 2$ ($Nu = \frac{\alpha\delta}{\lambda}$) можно записать

$$r_2 = \frac{r_k Nu}{Nu - 2}, \quad (4.81)$$

где $\alpha = \text{const}$; λ – теплопроводность парогазовой смеси.

С учетом излучения это условие должно выполниться строже, так как в результате увеличения тепловыделения в зоне горения в окружающую среду будет отводиться больше тепла излучением и теплопроводностью. Здесь не будем учитывать изменение температуры T_2 в зоне горения из-за влияния излучения. Такой подход допустим, когда эта температура фактически определяется условиями разложения продуктов сгорания.

Лучистый теплообмен для рассматриваемого случая можно определить по формуле

$$\varepsilon_{\text{пп}} = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - I \right) \left(\frac{r_k}{r_2} \right)^2 + \frac{1}{\varepsilon_k} \right]^{-1}, \quad (4.82)$$

где ε_2 – степень черноты зоны горения; ε_k – степень черноты поверхности капли.

Для капель диаметром 0,01; 0,01; 1 и 2 мм были проведены расчеты, результаты которых сведены в таблице 4.7. Количество тепла, необходимого для горения (испарения капли), подводится к капле посредством теплопередачи.

$T_2 = 2500$ К (с учетом диссоциации CO₂ и H₂O); $\lambda = 8,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\varepsilon_k = 0,95$ (для углеводородных топлив); $\varepsilon_2 = 0,001$ (оценочно для зоны горения паров углеводородных топлив при рассматриваемых условиях).

Таблица 4.7 – Результаты расчетов для капель с разными диаметрами

$\delta, \text{м}$	$r_k, \text{м}$	$r_k^2, \text{м}^2$	Nu	$\varepsilon_{\text{тр}}$	$Q(T), \text{Дж/с}$
$0,01 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	2,0	0,95	$14,98 \cdot 10^{-6}$
$0,1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	2,0	0,95	$14,98 \cdot 10^{-4}$
10^{-3}		$2,5 \cdot 10^{-7}$	2,9	0,01	$13,8 \cdot 10^{-2}$
$2 \cdot 10^{-3}$		10^{-6}			$27,82 \cdot 10^{-2}$

Расчет режима работы печи без потерь на излучение. Рассмотрим модель без учета потерь на излучение, т. е. $Q(T) = 0$, и оценим влияние концентрации смеси x на скорость ее горения:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dl} &= -\frac{x}{u\tau}, \\ \frac{du}{dl} \left(\frac{u}{2} + \frac{\gamma P}{(\gamma-1)M} \right) &= \frac{x}{u\tau} q. \end{aligned} \quad (4.83)$$

Подставив первое уравнение из (2.83) во второе, получим

$$\frac{u}{2} \frac{du}{dl} + \frac{\gamma P}{(\gamma-1)M} \frac{du}{dl} = -q \frac{dx}{dl}. \quad (4.84)$$

Проинтегрировав это дифференциальное уравнение, найдем

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int u du + \frac{\gamma P}{(\gamma-1)M} \int du &= -q dx, \\ \frac{u^2}{4} + \frac{\gamma u P}{(\gamma-1)M} &= -qx. \end{aligned} \quad (4.85)$$

Упростив выражения (4.85), получим

$$u^2 (\gamma-1) M + 4\gamma P u + 4qxM(\gamma-1) = 0. \quad (4.86)$$

Дискриминант полученного квадратного уравнения

$$D = (4\gamma P)^2 - 4(\gamma - 1)M \cdot 4qxM(\gamma - 1) = \gamma^2 P^2 - M^2 (\gamma - 1)^2 qx, \quad (4.87)$$

если $D < 0$, то решений уравнения нет (два мнимых корня);

если $D = 0$, то существует одно решение (два совпадающих корня);

если $D > 0$, имеем два решения (два действительных корня).

Таким образом,

$$u_{1,2} = \frac{-4\gamma P \pm \sqrt{D}}{2M(\gamma - 1)}. \quad (4.88)$$

На рисунке 4.26 показано влияние концентрации капель жидкого горючего на скорость распространения пламени на начальной стадии процесса. Видим, что по мере увеличения x – концентрации капель – скорость распространения пламени уменьшается при $x < 9\%$ и несколько возрастает при более высоких x . При очень малых и очень больших концентрациях горючего влияние размеров капель, по существу, отсутствует. При увеличении количества сконденсированного горючего полная концентрация, при которой достигается максимальная скорость распространения пламени, сдвигается в стороны больших значений концентрации горючего, а значение максимальной скорости распространения пламени уменьшается. Влияние концентрации жидких капель на скорость горения идентично влиянию концентрации жидких капель на скорость распространения пламени, причем этот эффект выражен тем сильнее, чем выше скорость распространения пламени. Это, в свою очередь, показывает, что в случае высокой скорости распространения пламени жидкие капли размером 1 мкм не успевают полностью испариться перед фронтом пламени.

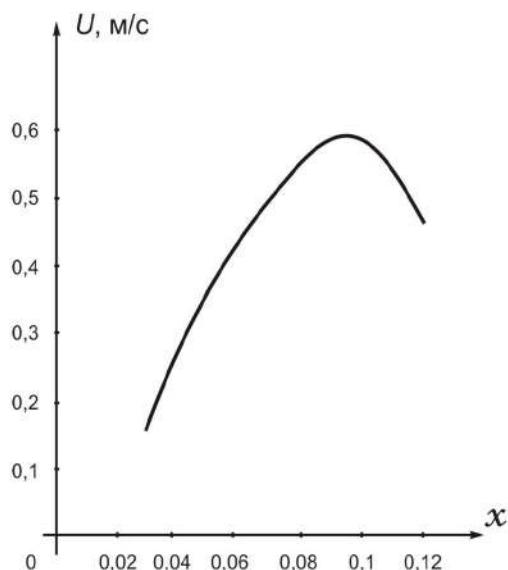


Рисунок 4.26 – Влияние концентрации капель жидкого горючего на скорость распространения пламени на начальной стадии процесса

4.9 Задача оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах с целью повышения энергоэффективности

Компьютерное моделирование есть процесс конструирования модели реального технологического объекта (ТО) и постановки вычислительных экспериментов на этой модели с целью либо понять (исследовать) поведение этой системы, либо оценить различные стратегии (алгоритмы), обеспечивающие функционирование данной системы. Таким образом, процесс компьютерного моделирования включает и конструирование модели, и ее применение для решения поставленной задачи: анализа, исследования, оптимизации или синтеза (проектирования) технологических процессов и оборудования. Все эти задачи чрезвычайно сложны и включают в себя почти бесконечное число элементов, переменных, параметров, ограничений и т.д. (рисунок 4.27). Пытаясь построить точную модель, можно попытаться включить все эти элементы (явления) и потратить много времени, собирая мельчайшие факты, касающиеся любой ситуации, и устанавливая связи между ними. Сходство модели с объектом, который она отображает, называется степенью изоморфизма. Для того чтобы быть изоморфной, модель должна удовлетворять двум условиям: во-первых, должно существовать однозначное соответствие между элементами модели и

элементами представляемого объекта; во-вторых, должны быть сохранены точные соотношения или взаимодействия между элементами.

Степень изоморфизма модели относительна, и большинство моделей скорей гомоморфные, чем изоморфны. Под гомоморфизмом понимается сходство по форме при различии основных структур, причем имеет место лишь поверхностное подобие между различными группами элементов модели и объекта. Гомоморфные модели являются результатом процессов упрощения и абстракции.

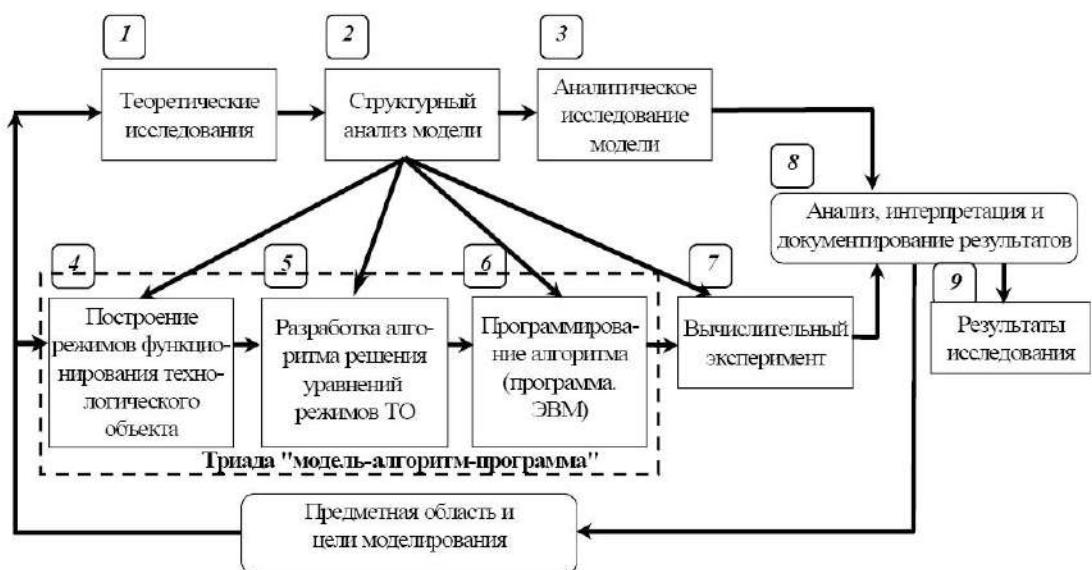


Рисунок 4.27 – Схема организации процесса компьютерного моделирования [299]

При моделировании процесса горения в топке трубчатой печи была использована программа COMSOL Multiphysics, предназначенная для решения широкого круга задач, формулируемых системами уравнений с частными производными, в частности задач математической физики, методом конечных элементов. Особенностью программы, которая ставит ее выше других программ подобного рода, является возможность решения трехмерных задач, она использует проверенный метод конечных элементов для эффективного анализа физических явлений, дающий возможность предсказывать поведение исследуемой системы без создания дорогостоящих прототипов. Программа

может виртуально моделировать любое физическое явление, описываемое уравнениями с частными производными, включая явления переноса тепла и вещества, течение жидкости или газа, электромагнетизм и теорию упругости. Более того, программа может исследовать все перечисленные явления одновременно, во взаимосвязи. Например, анализ горения топлива может включать не только химические реакции и электрические токи, но также гидродинамику и перенос тепла. Несомненным преимуществом COMSOL Multiphysics по сравнению со схожими программными продуктами является возможность изменения встроенного программного кода в соответствие с требованиями конкретного рассматриваемого объекта моделирования.

Вопросы разработки математических моделей нестационарных режимов работы технологических печей, теплового расчет трубчатой печи, математическая моделирования процесса горения капель топлива (стационарная модель процесса горения с учетом потерь на излучение) рассмотрены в работе [299]. На основе математической модели процесса горения капель топлива [498], рассмотрим следующую тепломассообменную задачу оптимального управления процессами в трубчатой печи с распределенными параметрами, в которых управляющими воздействиями являются: x – концентрация горючего вещества в смеси, u – скорость движения смеси, T – температура факела, T_c – температура сырья при входе в печь. Управляемый процесс описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных, записанных в нормальной форме:

1. Уравнение энергии

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{xq}{C_v T \tau \rho} - \frac{Q(T)}{C_v \rho^2 T} - \frac{P}{\rho^2} \frac{\partial u}{\partial l} - \frac{u}{\rho^2} \frac{\partial P}{\partial l} \equiv X_1, \quad (4.89)$$

где P – давление; x – концентрация горючего вещества в смеси ($0 \leq x \leq 1$); C_v – теплоемкость при постоянном объеме ($d(1/\rho) = 0$); T – температура факела; τ –

время сгорания; ρ – массовая плотность смеси; u – скорость движения смеси; l – линейный размер.

2. Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l} \equiv X_2. \quad (4.90)$$

3. Уравнение покомпонентного баланса

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{x}{\rho} \left[u \frac{\partial \rho}{\partial l} + \rho \frac{\partial u}{\partial l} \right] - \frac{u}{\rho} \frac{\partial P}{\partial l} - u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau} \equiv X_3. \quad (4.91)$$

4. Уравнение движения

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial l} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial l} \equiv X_4 \quad (4.92)$$

5. Уравнение теплообмена для сырья

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial T_c}{\partial l} w_l + K(T - T_c) \equiv X_5, \quad (4.93)$$

где T_c – температура сырья; w_l – скорость движения сырья; K – коэффициент теплопередачи для рабочего потока.

6. Уравнение состояния

$$R - P \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = 0. \quad (4.94)$$

где R – газовая постоянная.

Введем следующие обозначения:

$$\frac{\partial P}{\partial l} = \zeta^{(1)}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial l} = \zeta^{(2)}, \quad \frac{\partial x}{\partial l} = \zeta^{(3)}, \quad \frac{\partial u}{\partial l} = \zeta^{(4)}, \quad \frac{\partial T_c}{\partial l} = \zeta^{(5)},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = P'_t, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho'_t, \quad \frac{\partial x}{\partial t} = x'_t, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = u'_t, \quad \frac{\partial T_c}{\partial t} = (T_c)'_t.$$

Для получения P , ρ , x , u и T_c как функций длины и времени в камере сгорания сформулируем краевую задачу. К уравнениям (4.89)–(4.94) добавим начальные

$$P(l, 0) = P_0(l), \quad \rho(l, 0) = \rho_0(l), \quad x(l, 0) = x_0(l), \quad u(l, 0) = u_0(l),$$

$$T_c(l, 0) = T_{c_0}(l)$$

и граничные условия, которые имеют вид

$$\frac{\partial x(0, t)}{\partial t} = b_1 u_1(t), \quad \frac{\partial u(0, t)}{\partial t} = b_2 u_2(t), \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial t} = b_3 u_3(t), \quad \frac{\partial T_c(0, t)}{\partial t} = b_4 u_4(t).$$

$$P(0, t) = P_1(t).$$

Введем ограничения на управления в виде неравенств и дополнительные управлений $z_i, i = 1, 2, 3, 4$. Преобразуем неравенства (4.95) в равенства (4.96):

$$\begin{aligned} u_{1\min} &\leq u_1(t) \leq u_{1\max}, \\ u_{2\min} &\leq u_2(t) \leq u_{2\max}, \\ u_{3\min} &\leq u_3(t) \leq u_{3\max}, \\ u_{4\min} &\leq u_4(t) \leq u_{4\max}, \end{aligned} \tag{4.95}$$

$$\begin{aligned} (u_{1\max} - u_1(t))(u_1(t) - u_{1\min}) - z_1^2 &= 0, \\ (u_{2\max} - u_2(t))(u_2(t) - u_{2\min}) - z_2^2 &= 0, \\ (u_{3\max} - u_3(t))(u_3(t) - u_{3\min}) - z_3^2 &= 0, \\ (u_{4\max} - u_4(t))(u_4(t) - u_{4\min}) - z_4^2 &= 0. \end{aligned} \tag{4.96}$$

Найдем такие управлений u_1, u_2, u_3, u_4 , которые удовлетворяют системе уравнений (4.89)–(4.94) и минимизируют следующий функционал качества:

$$\int_0^T [T_{\text{зад}} - T_c(1, t)]^2 dt, \tag{4.97}$$

где $T_{\text{зад}}$ – заданная температура сырья

Для получения необходимых условий оптимальности составим вспомогательный функционал:

$$\begin{aligned}
I = I_1 + I_2 &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \left(T_c - T_{\text{зад}} \right)^2 + \xi^{(1)} \left(P'_t - X_1 \right) + \xi^{(2)} \left(\rho'_t - X_2 \right) + \xi^{(3)} \left(x'_t - X_3 \right) + \xi^{(4)} \left(u'_t - X_4 \right) + \right. \\
&\quad + \xi^{(5)} \left(\left(T_c \right)' - X_5 \right) + \xi^{(6)} \left(R - P \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \right) \left\} + \eta^{(1)} \left(P'_t - \zeta^{(1)} \right) + \right. \\
&\quad + \eta^{(2)} \left(\rho'_t - \zeta^{(2)} \right) + \eta^{(3)} \left(x'_t - \zeta^{(3)} \right) + \\
&\quad + \eta^{(4)} \left(u'_t - \zeta^{(4)} \right) + \eta^{(5)} \left(\left(T_c \right)' - \zeta^{(5)} \right) + \eta^{(6)} \left(R'_t - \zeta^{(6)} \right) \right\} dldt + \\
&\quad + \int_0^T \left\{ \lambda_1 \left(x'_t(0, t) - b_1 u_1(t) \right) + \lambda_2 \left(u'_t(0, t) - b_2 u_2(t) \right) \right. \\
&\quad + \lambda_3 \left(T'_t(0, t) - b_3 u_3(t) \right) + \lambda_4 \left(\left(T_c \right)'(0, t) - b_4 u_4(t) \right) + \\
&\quad \left. \gamma_1 \left[(u_{1\max} - u_1(t)) (u_1(t) - u_{1\min}) - z^2 \right] + \gamma_2 \left[(u_{2\max} - u_2(t)) (u_2(t) - u_{2\min}) - y^2 \right] \right. \\
&\quad \left. + \gamma_3 \left[(u_{3\max} - u_3(t)) (u_3(t) - u_{3\min}) - v^2 \right] + \gamma_4 \left[(u_{4\max} - u_4(t)) (u_4(t) - u_{4\min}) - w^2 \right] \right\} dt.
\end{aligned}$$

С учетом особенностей математической модели для вывода необходимых условий оптимальности применим метод вариационного исчисления. Проделаем ряд тождественных преобразований при выводе необходимых условий оптимальности. Например, для того чтобы освободиться от производных вариаций, произведем интегрирование по частям по следующей формуле:

$$\int_0^T u dv = uv \Big|_0^T - \int_0^T v du. \quad (4.98)$$

Таким образом, имеем:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial P'_t} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \xi^{(1)} \delta P'_t \right\} dt dl = \int_0^L \left\{ \int_0^T \xi^{(1)} (l, t) \delta P'_t (l, t) dt \right\} dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(1)} (l, t) \delta P (l, t) \Big|_0^T \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(1)} (l, t)}{\partial t} \delta P (l, t) dt dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(1)} (l, T) \delta P (l, T) - \xi^{(1)} (l, 0) \delta P (l, 0) \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(1)} (l, t)}{\partial t} \delta P (l, t) dt dl;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial \rho_t'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \xi^{(2)} \delta \rho_t' \right\} dt dl = \int_0^L \left\{ \int_0^T \xi^{(2)}(l, t) \delta \rho_t'(l, t) dt \right\} dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(2)}(l, t) \delta \rho(l, t) \Big|_0^T \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(2)}(l, t)}{\partial t} \delta \rho(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(2)}(l, T) \delta \rho(l, T) - \xi^{(2)}(l, 0) \delta \rho(l, 0) \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(2)}(l, t)}{\partial t} \delta \rho(l, t) dt dl; \\
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial x_t'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \xi^{(3)} \delta x_t' \right\} dt dl = \int_0^L \left\{ \int_0^T \xi^{(3)}(l, t) \delta x_t'(l, t) dt \right\} dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(3)}(l, t) \delta x(l, t) \Big|_0^T \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(3)}(l, t)}{\partial t} \delta x(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(3)}(l, T) \delta x(l, T) - \xi^{(3)}(l, 0) \delta x(l, 0) \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(3)}(l, t)}{\partial t} \delta x(l, t) dt dl; \\
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial u_t'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \xi^{(4)} \delta u_t' \right\} dt dl = \int_0^L \left\{ \int_0^T \xi^{(4)}(l, t) \delta u_t'(l, t) dt \right\} dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(4)}(l, t) \delta u(l, t) \Big|_0^T \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(4)}(l, t)}{\partial t} \delta u(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(4)}(l, T) \delta u(l, T) - \xi^{(4)}(l, 0) \delta u(l, 0) \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(4)}(l, t)}{\partial t} \delta u(l, t) dt dl; \\
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial (T_c)_t'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \xi^{(5)} \delta (T_c)_t' \right\} dt dl = \int_0^T \left\{ \int_0^L \xi^{(5)}(l, t) \delta (T_c)_t'(l, t) dl \right\} dt = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(5)}(l, t) \delta T_c(l, t) \Big|_0^T \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(5)}(l, t)}{\partial l} \delta T_c(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^L \left\{ \xi^{(5)}(l, T) \delta T_c(l, T) - \xi^{(5)}(l, 0) \delta T_c(l, 0) \right\} dl - \int_0^L \int_0^T \frac{\partial \xi^{(5)}(l, t)}{\partial l} \delta T_c(l, t) dt dl;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial P_l'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \eta^{(1)} \delta P_l' \right\} dl dt = \int_0^T \left\{ \int_0^L \eta^{(1)}(l, t) \delta P_l'(l, t) dl \right\} dt = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(1)}(l, t) \delta P(l, t) \Big|_0^L \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(1)}(l, t)}{\partial l} \delta P(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(1)}(L, t) \delta P(L, t) - \eta^{(1)}(0, t) \delta P(0, t) \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(1)}(l, t)}{\partial l} \delta P(l, t) dt dl; \\
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial \rho_l'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \eta^{(2)} \delta \rho_l' \right\} dl dt = \int_0^T \left\{ \int_0^L \eta^{(2)}(l, t) \delta \rho_l'(l, t) dl \right\} dt = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(2)}(l, t) \delta \rho(l, t) \Big|_0^L \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(2)}(l, t)}{\partial l} \delta \rho(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(2)}(L, t) \delta \rho(L, t) - \eta^{(2)}(0, t) \delta \rho(0, t) \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(2)}(l, t)}{\partial l} \delta \rho(l, t) dt dl; \\
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial x_l'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \eta^{(3)} \delta x_l' \right\} dl dt = \int_0^T \left\{ \int_0^L \eta^{(3)}(l, t) \delta x_l'(l, t) dl \right\} dt = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(3)}(l, t) \delta x(l, t) \Big|_0^L \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(3)}(l, t)}{\partial l} \delta x(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(3)}(L, t) \delta x(L, t) - \eta^{(3)}(0, t) \delta x(0, t) \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(3)}(l, t)}{\partial l} \delta x(l, t) dt dl; \\
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial u_l'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \eta^{(4)} \delta u_l' \right\} dl dt = \int_0^L \left\{ \int_0^T \eta^{(4)}(l, t) \delta u_l'(l, t) dt \right\} dl = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(4)}(l, t) \delta u(l, t) \Big|_0^L \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(4)}(l, t)}{\partial t} \delta u(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(4)}(L, t) \delta u(L, t) - \eta^{(4)}(0, t) \delta u(0, t) \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(4)}(l, t)}{\partial t} \delta u(l, t) dt dl; \\
\frac{\partial \tilde{L}}{\partial (T_c)_l'} &= \int_0^T \int_0^L \left\{ \eta^{(5)} \delta (T_c)_l' \right\} dl dt = \int_0^L \left\{ \int_0^T \eta^{(5)}(l, t) \delta (T_c)_l'(l, t) dt \right\} dl = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(5)}(l, t) \delta T_c(l, t) \Big|_0^L \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(5)}(l, t)}{\partial t} \delta T_c(l, t) dt dl = \\
&= \int_0^T \left\{ \eta^{(5)}(L, t) \delta T_c(L, t) - \eta^{(5)}(0, t) \delta T_c(0, t) \right\} dt - \int_0^T \int_0^L \frac{\partial \eta^{(5)}(l, t)}{\partial t} \delta T_c(l, t) dt dl;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^T \left(\frac{\partial \tilde{l}}{\partial x_t'(0,t)} = \lambda_1(t) \delta x_t'(0,t) \right) dt = \int_0^T (\lambda_1(0,t) \delta x_t'(0,t)) dt = \\
&= \lambda_1(0,t) \delta x(0,t) \Big|_0^T - \int_0^T \frac{d\lambda_1(t)}{dt} \delta x(0,t) dt = \\
&= \lambda_1(0,T) \delta x(0,T) - \lambda_1(0,0) \delta x(0,0) - \int_0^T \frac{d\lambda_1(t)}{dt} \delta x(0,t) dt;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^T \left(\frac{\partial \tilde{l}}{\partial u_t'(0,t)} = \lambda_2(t) \delta u_t'(0,t) \right) dt = \int_0^T (\lambda_2(0,t) \delta u_t'(0,t)) dt = \\
&= \lambda_2(0,t) \delta u(0,t) \Big|_0^T - \int_0^T \frac{d\lambda_2(t)}{dt} \delta u(0,t) dt = \\
&= \lambda_2(0,T) \delta u(0,T) - \lambda_2(0,0) \delta u(0,0) - \int_0^T \frac{d\lambda_2(t)}{dt} \delta u(0,t) dt;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^T \left(\frac{\partial \tilde{l}}{\partial T_t'(0,t)} = \lambda_3(t) \delta T_t'(0,t) \right) dt = \int_0^T (\lambda_3(0,t) \delta T_t'(0,t)) dt = \\
&= \lambda_3(0,t) \delta T(0,t) \Big|_0^T - \int_0^T \frac{d\lambda_3(t)}{dt} \delta T(0,t) dt = \\
&= \lambda_3(0,T) \delta T(0,T) - \lambda_3(0,0) \delta T(0,0) - \int_0^T \frac{d\lambda_3(t)}{dt} \delta T(0,t) dt;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^T \left(\frac{\partial \tilde{l}}{\partial (T_c)'_t(0,t)} = \lambda_4(t) \delta (T_c)'_t(0,t) \right) dt = \int_0^T (\lambda_4(0,t) \delta (T_c)'_t(0,t)) dt = \\
&= \lambda_4(0,t) \delta T_c(0,t) \Big|_0^T - \int_0^T \frac{d\lambda_4(t)}{dt} \delta T_c(0,t) dt = \\
&= \lambda_4(0,T) \delta T_c(0,T) - \lambda_4(0,0) \delta T_c(0,0) - \int_0^T \frac{d\lambda_4(t)}{dt} \delta T_c(0,t) dt.
\end{aligned}$$

Вариацию функционала по границе области δI_2 получим в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\delta I_2 = & \int_0^T \left\{ \frac{d\lambda_1(t)}{dt} \delta x(t,0) + \frac{d\lambda_2(t)}{dt} \delta u(t,0) + \frac{d\lambda_3(t)}{dt} \delta T(t,0) + \frac{d\lambda_4(t)}{dt} \delta T_c(t,0) + \right. \\
& + \eta^{(1)}(L,t) \delta P(L,t) + \eta^{(2)}(L,t) \delta \rho(L,t) + \eta^{(3)}(L,t) \delta x(L,t) + \\
& + \eta^{(4)}(L,t) \delta u(L,t) + \eta^{(5)}(L,t) \delta T_c(L,t) + \\
& + \gamma_1(u_{1\max} - 2u_1 + u_{1\min}) \delta u_1 + \gamma_2(u_{2\max} - 2u_2 + u_{2\min}) \delta u_2 + \\
& + \gamma_3(u_{3\max} - 2u_3 + u_{3\min}) \delta u_3 + \gamma_4(u_{4\max} - 2u_4 + u_{4\min}) \delta u_4 - \\
& \left. - 2\gamma_1 z_1 \delta z_1 - 2\gamma_2 z_2 \delta z_2 - 2\gamma_3 z_3 \delta z_3 - 2\gamma_4 z_4 \delta z_4 \right\} dt + \\
& + \int_0^L \left\{ \xi^{(1)}(l,T) \delta P(l,T) + \xi^{(2)}(l,T) \delta \rho(l,T) + \xi^{(3)}(l,T) \delta x(l,T) + \xi^{(4)}(l,T) \delta u(l,T) + \right. \\
& \left. + \xi^{(5)}(l,T) \delta T_c(l,T) \right\} dl; \\
\delta I_1 = & \int_0^L \int_0^T \left\{ \left(\xi^{(1)} \left(\frac{1}{\rho^2} \zeta^{(4)} \right) + \xi^{(6)} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{\partial \xi^{(1)}}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(1)}}{\partial l} \right) \delta P(l,t) + \right. \\
& + \left(\xi^{(1)} \left(\frac{xq}{C_v T \tau \rho^2} - 2 \frac{Q(T)}{C_v \rho^3 T} - 2 \frac{P}{\rho^3} \zeta^{(4)} - 2 \frac{u}{\rho^3} \zeta^{(1)} \right) + \xi^{(2)} \left(\zeta^{(4)} \right) + \xi^{(3)} \left(\frac{xu}{\rho^2} \zeta^{(2)} - \frac{u}{\rho^2} \zeta^{(1)} \right) + \right. \\
& + \xi^{(4)} \left(-\frac{1}{\rho^2} \zeta^{(1)} \right) + \frac{\partial \xi^{(2)}}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(2)}}{\partial l} \left. \right) \delta \rho(l,t) + \\
& + \left(\xi^{(1)} \left(-\frac{q}{C_v T \tau \rho} \right) + \xi^{(3)} \left(-\frac{u}{\rho} \zeta^{(2)} - \zeta^{(4)} + \frac{1}{\tau} \right) + \frac{\partial \xi^{(3)}}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(3)}}{\partial l} \right) \delta x(l,t) + \\
& + \left(\xi^{(1)} \left(\frac{1}{\rho^2} \zeta^{(1)} \right) + \xi^{(2)} \zeta^{(2)} + \xi^{(3)} \left(-\frac{x}{\rho} \zeta^{(2)} + \frac{1}{\rho} \zeta^{(1)} + \zeta^{(3)} \right) + \xi^{(4)} \zeta^{(4)} + \frac{\partial \xi^{(4)}}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(4)}}{\partial l} \right) \delta u(l,t) + \\
& + \left(2(T_c - T_{\text{зад}}) + \xi^{(5)} \left(w_1 \frac{\partial}{\partial l} + K \right) + \frac{\partial \xi^{(5)}}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(5)}}{\partial l} \right) \delta T_c(l,t) + \\
& \left. + \eta^{(1)} \delta \zeta^{(1)} + \eta^{(2)} \delta \zeta^{(2)} + \eta^{(3)} \delta \zeta^{(3)} + \eta^{(4)} \delta \zeta^{(4)} + \eta^{(5)} \delta \zeta^{(5)} \right\} dt dl;
\end{aligned}$$

Используя аргументацию теории вариационного исчисления, из объемного интеграла получаем сопряженную систему дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \xi^{(1)}(l,t)}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(1)}(l,t)}{\partial l} &= -\xi^{(1)} \frac{1}{\rho^2} \zeta^{(4)} - \xi^{(6)} \frac{\partial v}{\partial T}; \\
\frac{\partial \xi^{(2)}(l,t)}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(2)}(l,t)}{\partial l} &= -\xi^{(1)} \frac{xq}{C_v T \tau \rho^2} + 2\xi^{(1)} \frac{Q(T)}{C_v \rho^3 T} + 2\xi^{(1)} \zeta^{(4)} \frac{P}{\rho^3} + 2\xi^{(1)} \zeta^{(1)} \frac{u}{\rho^3} - \\
&\quad -\xi^{(2)} \zeta^{(4)} - \xi^{(3)} \zeta^{(2)} \frac{xu}{\rho^2} + \xi^{(3)} \zeta^{(1)} \frac{u}{\rho^2} + \xi^{(4)} \zeta^{(1)} \frac{1}{\rho^2}; \\
\frac{\partial \xi^{(3)}(l,t)}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(3)}(l,t)}{\partial l} &= \xi^{(1)} \frac{q}{C_v T \tau \rho} + \xi^{(3)} \zeta^{(2)} \frac{u}{\rho} + \xi^{(3)} \zeta^{(4)} - \xi^{(3)} \frac{1}{\tau}; \\
\frac{\partial \xi^{(4)}(l,t)}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(4)}(l,t)}{\partial l} &= -\xi^{(1)} \zeta^{(1)} \frac{1}{\rho^2} - \xi^{(2)} \zeta^{(2)} + \xi^{(3)} \zeta^{(2)} \frac{x}{\rho} - \xi^{(3)} \zeta^{(1)} \frac{1}{\rho} - \xi^{(3)} \zeta^{(3)} - \xi^{(4)} \zeta^{(4)}; \\
2(T_c - T_{\text{зад}}) + \frac{\partial \xi^{(5)}(l,t)}{\partial t} + \frac{\partial \eta^{(5)}(l,t)}{\partial l} &= -\xi^{(5)} w_1 \frac{\partial}{\partial l} - \xi^{(5)} K; \\
\eta^{(1)} \delta \zeta^{(1)}(l,t) + \eta^{(2)} \delta \zeta^{(2)}(l,t) + \eta^{(3)} \delta \zeta^{(3)}(l,t) + \eta^{(4)} \delta \zeta^{(4)}(l,t) + \eta^{(5)} \delta \zeta^{(5)}(l,t) &= 0; \\
\xi^{(1)}(l,T) &= 0, \quad \xi^{(2)}(l,T) = 0, \\
\xi^{(3)}(l,T) &= 0, \quad \xi^{(4)}(l,T) = 0, \quad \xi^{(5)}(l,T) = 0.
\end{aligned}$$

Из одномерного интеграла имеем:

$$\begin{aligned}
\gamma_1(u_{1\max} - 2u_1 + u_{1\min}) \delta u_1(t) &= 0, \\
\gamma_2(u_{2\max} - 2u_2 + u_{2\min}) \delta u_2(t) &= 0, \\
\gamma_3(u_{3\max} - 2u_3 + u_{3\min}) \delta u_3(t) &= 0, \\
\gamma_4(u_{4\max} - 2u_4 + u_{4\min}) \delta u_4(t) &= 0, \\
-2\gamma_1 z_1 \delta z_1(t) &= 0, \\
-2\gamma_2 z_2 \delta z_2(t) &= 0, \\
-2\gamma_3 z_3 \delta z_3(t) &= 0, \\
-2\gamma_4 z_4 \delta z_4(t) &= 0
\end{aligned} \tag{4.99}$$

или

$$\begin{aligned}
\gamma_1 z_1 &= 0, \\
\gamma_2 z_2 &= 0, \\
\gamma_3 z_3 &= 0, \\
\gamma_4 z_4 &= 0.
\end{aligned} \tag{4.100}$$

Из последних уравнений следует, что если $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = 0$, то оптимальные управлении принимают граничные значения $u_{i\max}$ и $u_{i\min}$.

4.9.1 Численный анализ режимов работы технологических печей

Численное исследование проводилось в реальном объеме трубчатой печи на базе системы (4.89). Здесь управляющими воздействиями являются $x(0,t)$, $u(0,t)$, $\rho(0,t)$, $T(0,t)$ и $T_c(L,t)$. Моделирование проводилось с использованием программы COMSOL Multiphysics, предназначеннной для решения широкого круга задач, формулируемых системами уравнений с частными производными. Результаты расчетов приведены на рисунках 4.28–4.32. Значения управляющий воздействий были изменены в пределах $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ от их первоначальных значений и изображены на выходе из печи графиками 4.28–4.32.

Полученные результаты дают возможность сделать следующие заключения:

1 увеличение плотности потока на выходе из печи происходит в силу снижения скорости потока газа и продуктов сгорания. Из рисунка 4.31 видно, что происходит полное выгорание топлива. При детальном рассмотрении процесса с помощью двумерных зависимостей наблюдается оптимум в области температур вблизи 450°C . Увеличение плотности потока выше оптимального приводит к увеличению недожога, снижению КПД процесса и увеличению количества вредных выбросов в окружающую среду. Снижение плотности характеризует недогрев сырья и, соответственно, неоптимальный режим работы технологической установки в целом;

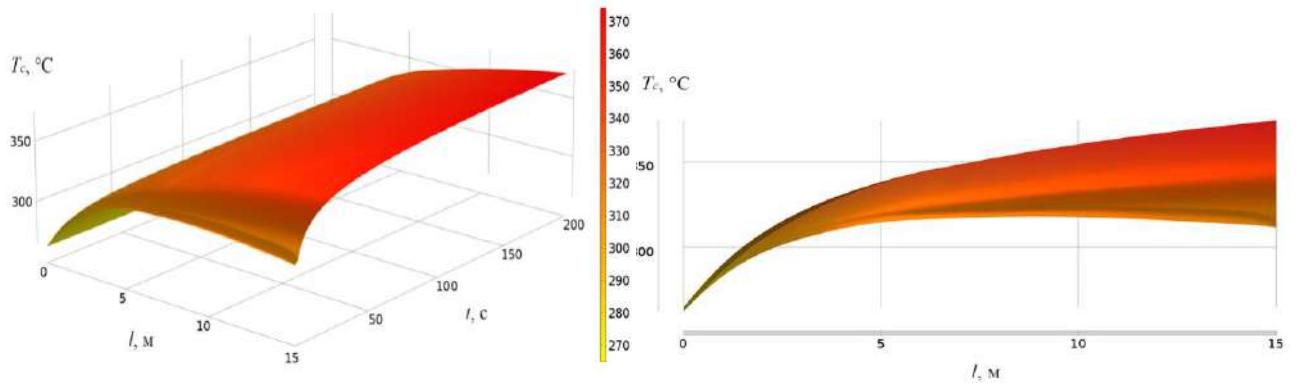


Рисунок 4.28 – Изменение температуры сырья

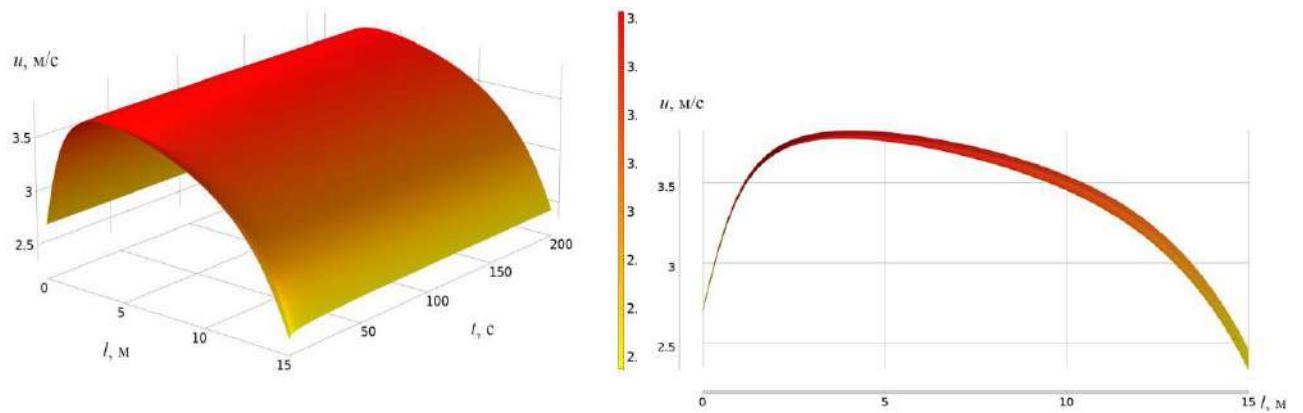


Рисунок 4.29 – Изменение скорости движения потока

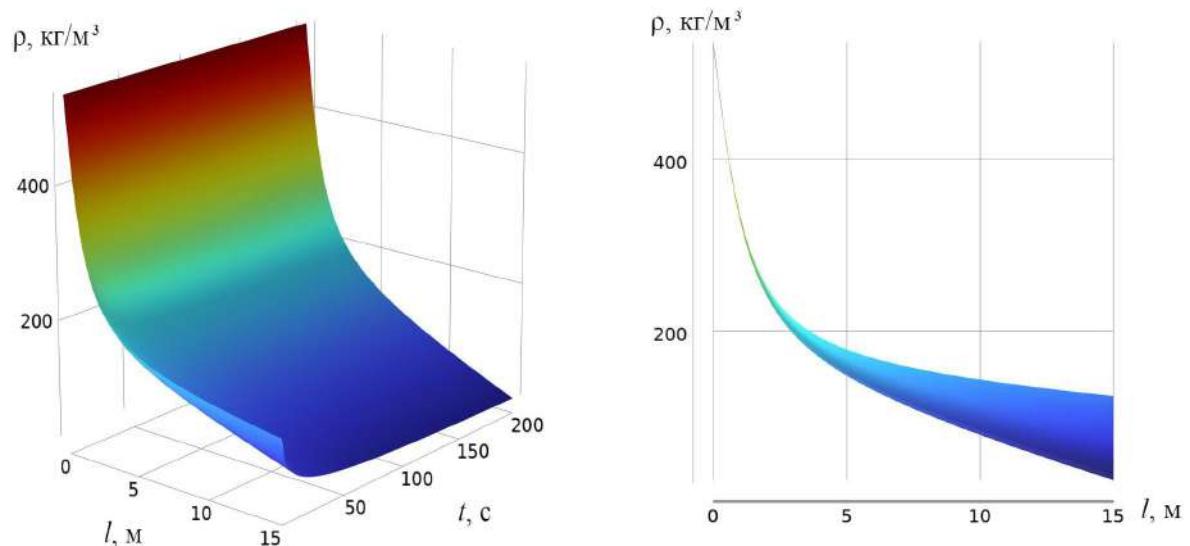


Рисунок 4.30 – Распределение плотности потока по длине печи

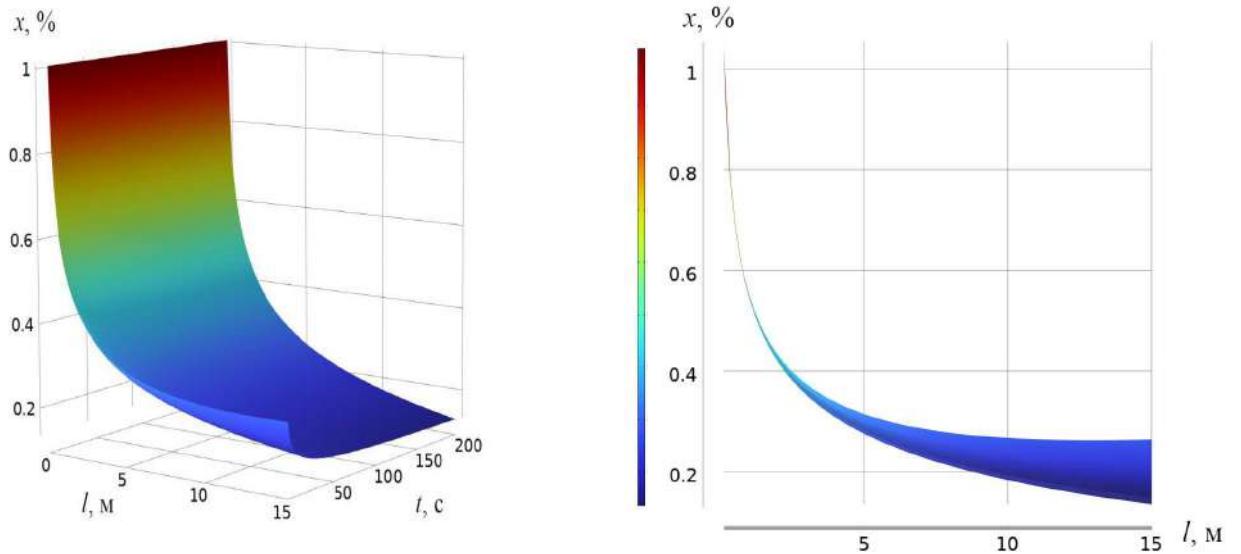


Рисунок 4.31 – Изменение концентрации горючего вещества

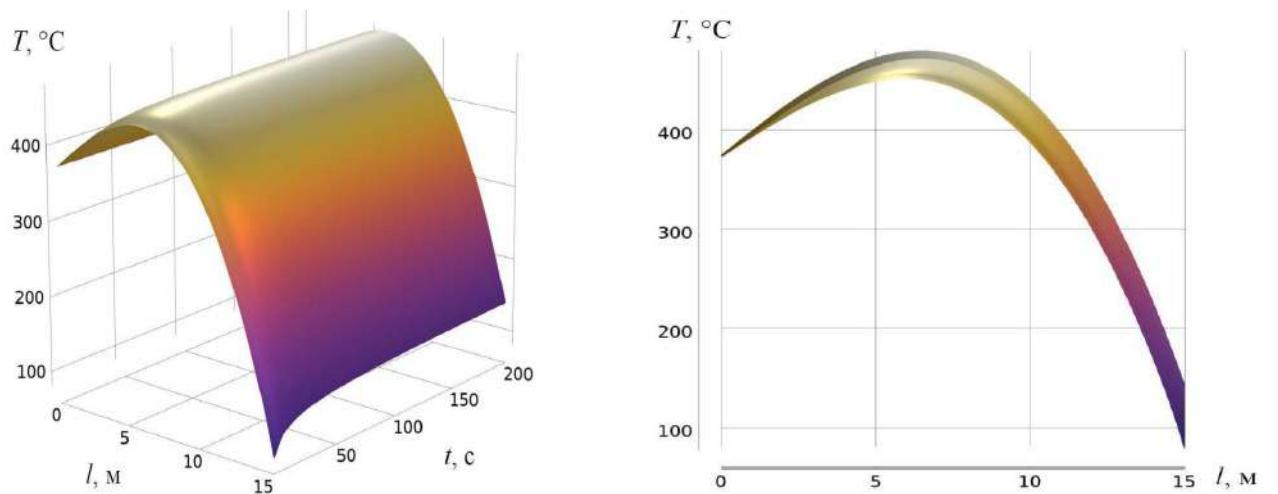


Рисунок 4.32 – Изменение температуры потока

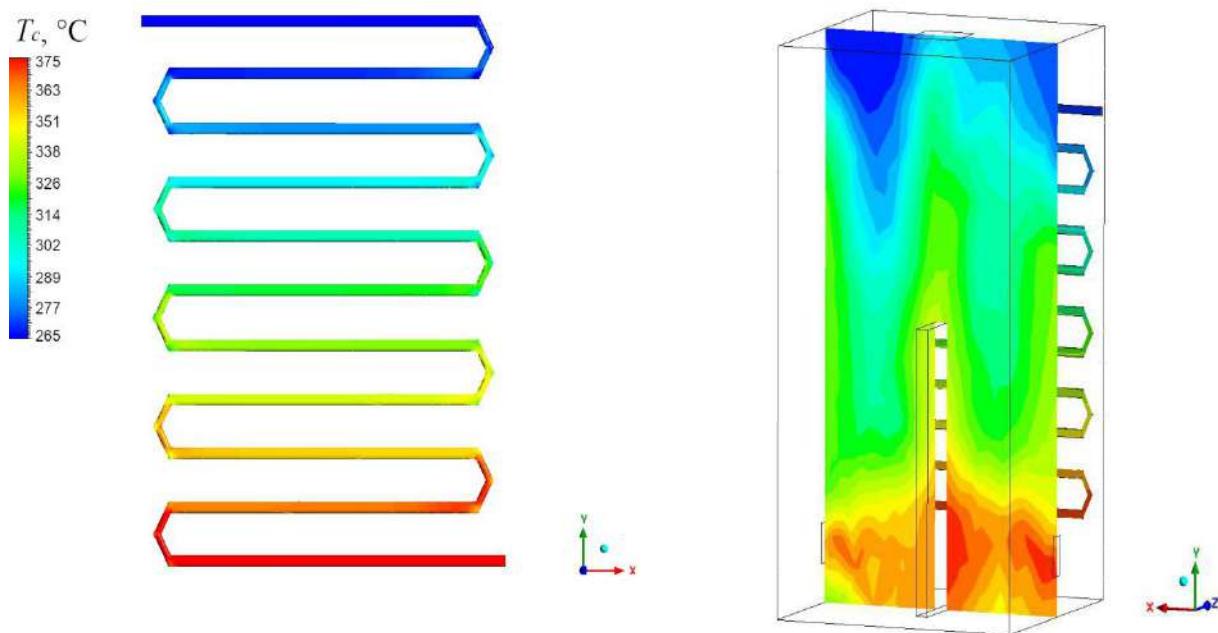


Рисунок 4.33 – Моделирование процесса теплообмена реального объема трубчатой печи

Верификация результатов расчета с использованием программы COMSOL Multiphysics проводилась на базе пакета программ ANSYS CFX, рисунок 4.33. Сопоставление полученных результатов со значениями управляющих параметров реального производства АНПЗ показало хорошее соответствие (неопределенность составляет 1–5 %).

Выводы:

выявлен эффект перераспределения теплообмена между потоком горячих газов и сырьем по длине печи, что может оказать влияние на качество получаемого продукта, следовательно, изменяя температуру потока по длине печи или задавая режим работы, можно получать продукт заданного наперед качества;

управляя скоростью движения потока, имеется возможность регулировать плотность, и как следствие, величину недожога и соответственно количество выбросов в окружающую среду на выходе из печи.

Сопоставление полученных результатов со значениями управляющих параметров реального производства АНПЗ показало хорошее соответствие (отличие составляет 1–5 %).

Результаты расчетов, представленные на рисунках 4.28–4.32, указывают на существенную неравномерность рассматриваемых параметров управления, знание распределения которых позволит разрабатывать режимы работы установок уже на стадии проектирования или создавать максимально приближенные к реальным данным программы автоматического управления промышленными комплексами.

5 КОНЦЕПЦИЯ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УЩЕРБА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВРЕДНЫМИ ВЫБРОСАМИ

В приоритеты научно-технического прогресса постепенно включается не столько увеличение производства, потребительский эгоцентризм, сколько спасение природы, сохранение естественной среды обитания людей. Возможностей для самовосстановления и самоочищения природных систем все меньше. Для глубокого граждански осознанного понимания этого потребовалось активизировать весь потенциал культуры в самом широком смысле, раскрыть общекультурную значимость природы.

Под влиянием повелительной необходимости жить с природой в гармонии и согласии человечество вынуждено отбросить вековой императив покорения природы. Осознание безнравственности этого императива только теперь входит в структуру нового ноосферного мышления. Экологическая культура призвана противостоять технократическим стереотипам, чтобы современная ситуация была исправлена, и биосфера будущего не осталась безлюдной.

Устойчивое развитие должно удовлетворять социальным и экологическим требованиям, исходить из последовательной реализации взаимосвязанных основополагающих идей:

- экологизации хозяйственной деятельности;
- сохранению и восстановлению биосферы и ее локальных систем;
- формированию ноосферы («сферы разума» по большому счету) на основе реализации двух предыдущих концептуальных схем (идей).

Исходя из этого возможно сформулировать научные направления, в рамках перечня критических технологий, на который следует сосредоточиться в первую очередь, и, в области которых, накоплен определенный опыт – это:

- 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;
- разработка 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; исследования в области создания новых видов эмульгированных (сuspensionных) топливных смесей.

5.1 Комплексная методика определения эффективности и техносферной безопасности теплотехнологий, способствующая защите окружающей среды

Создание комплексной методики определения эффективности и техносферной безопасности теплотехнологий базируется на известных методике определения предотвращенного экологического ущерба окружающей среде, отнесенной к единице массы уловленного загрязнителя

$$Y_{\text{пр}} = \gamma \sigma f \left[\frac{\sum_{i=1}^N A_i C_{0i} (1 - \eta_{i0})}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_{i0}} - \frac{\sum_{i=1}^N A_i C_{0i} (1 - \eta_{il})}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_{il}} \right]$$

(в производственной практике следует стремиться к увеличению значения $Y_{\text{пр}}$ ($Y_{\text{пр}} \rightarrow \max$)) и критерия экологической эффективности [14]:

$$\theta \bar{\tau} = \theta \frac{\tau}{\tau_0} \rightarrow \max \geq 1.$$

Однако они отражают существующее положение в отрасли или позволяют проводить сравнение эффективности сходного оборудования. Тогда как если к этим дум оценочным параметрам добавить прогнозные характеристики, учитывающие гораздо больше внешних факторов – можем существенно расширить возможности по своевременному принятию мер по защите атмосферы от вредных выбросов и контролю опасных загрязнителей. С практической точки зрения в перспективе данная комплексная методика будет крайне востребована.

5.1.1 Прогнозирование загрязнения городской атмосферы с использованием нейронных сетей (LSTM)

По загрязненности воздуха в России выделяются около 100 городов с хорошо развитой промышленностью и транспортом. По данным Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды г. Красноярск входит в число 40 городов, в которых уровень загрязнения воздуха считается очень высоким по индексу загрязнения атмосферы (ИЗА), означающему суммарную концентрацию пяти наиболее распространенных вредных веществ, обнаруженных в данном городе.

Многие промышленные предприятия г. Красноярска являются крупнейшими в России и относятся к группе энергоемких с большими объемами выбросов, сбросов и образующихся отходов. Большинство промышленных предприятий города, построенных 60–70 лет назад, не имеет санитарно-защитных зон, а технологии не отвечают современным требованиям природоохранного законодательства. Проблема требует принятия кардинальных решений по эколого- и энергоэффективности, в частности: перепрофилированию производства, выносу опасных объектов за пределы жилых районов, переводу ТЭЦ на природный газ, энергосбережению, разработке и использованию высоких экологически чистых технологий и др.

Дешифрирование спутниковых телевизионных изображений и выборочное геохимическое опробование снега и почв показало, что хроническое загрязнение пылевыми выбросами составляет порядка 10–11 тыс. кв. км (рисунок 5.1).

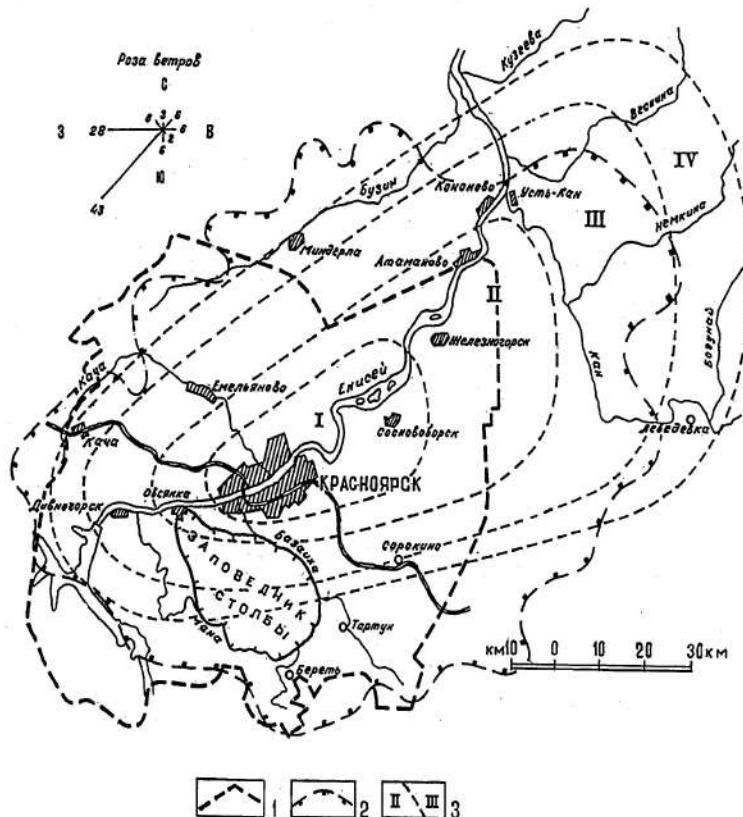


Рисунок 5.1 – Нормированный по экологической опасности зональный ореол аэрогенного геохимического загрязнения Красноярской агломерации: границы: 1 – зеленой зоны г. Красноярска; 2 – зоны загрязнения снежного покрова; 3 – зоны уровней загрязнения территории CI–IV): I – очень высокого чрезвычайно опасного (с модулем средней пылевой нагрузки Po более 800 кг/кв. км в сутки и суммарными показателями загрязнения элементами-токсикантами Zn, W, Cci, Mo, Cu, Sn, Co, Pb, Ni, Hg – снега – Zee более 256, почв – Zen более 128); II – высокого опасного ($Po = 625$ кг/кв. км в сутки, $Zcc = 128–256$, $Zcn = 32–128$); III – среднего умеренно опасного ($Po = 350$ кг/кв. км в сутки, $Zcc = 64–128$, $Zcn = 16–32$); IV – низкого неопасного ($Po = 250$ кг/кв.км, $Zcc = 1–64$, $Zcn = 8–16$)

Императив современности – безопасная окружающая среда. Загрязнение воздуха промышленного города – крупнейшая экологическая проблема современности. С этой проблемой связан поиск эффективных технологий мониторинга источников вредных выбросов и защиты атмосферы во всем мире [14]. Загрязнение воздуха может быть определено как присутствие в воздухе поллютантов, или загрязняющих веществ, которые влияют на здоровье, благополучие человека и вызывают вредные воздействия на окружающую среду. По данным Google Search, запрос «загрязнение воздуха» – один из лидирующих в поисковике за 2020 год, рисунок 5.2. Общая обеспокоенность состоянием загрязнения воздуха в целом в мире и в России в частности значительно возрастает из-за серьезной опасности для здоровья населения. Всемирная организация здравоохранения регистрирует, ежегодно 2,4 миллиона человек умирающих от причин, напрямую связанных с загрязнением воздуха, причем 1,5 миллиона из этих смертей связаны с загрязнением воздуха внутри помещений.

Экспоненциальное увеличение темпов промышленного роста и урбанизация приводят к устойчивой деградации параметров качества окружающей среды, для ряда городских территорий загрязнение воздушной среды достигает критических размеров [119, 120, 122]. Помимо летальной опасности для человека, загрязнение воздуха оказывает лидирующее влияние на глобальную окружающую среду и мировую экономику. Исследователи-экологи предлагают различные методы мониторинга окружающей атмосферы, регистрации отдельных веществ на примере районов городов или опасных производств с описанием приборов и методик измерений [14].

Федеральный проект «Чистый воздух» к 2024 году призван сократить объем выбросов в 12 крупных российских промышленных центрах как минимум на 20 %. В результате восемь из них должны исключить из списка городов с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха [422, 430].

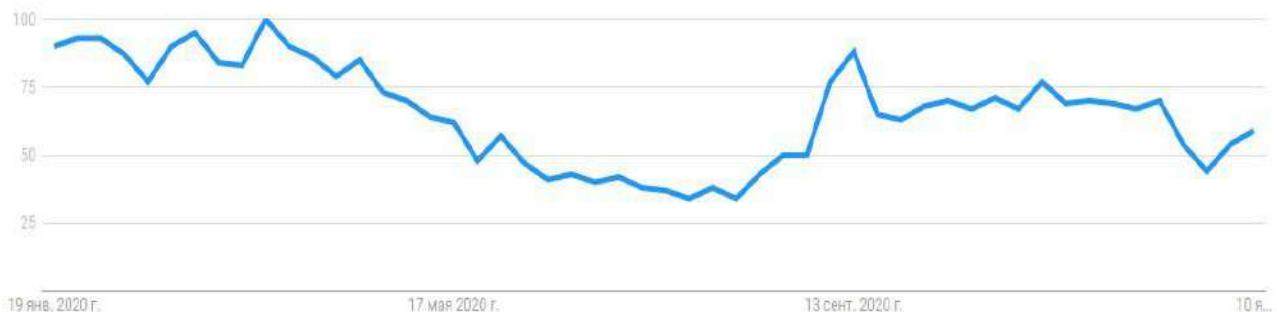


Рисунок 5.2 – Динамика популярности запроса «загрязнение воздуха» по данным Google за 2020 год (100 баллов – означает наивысший уровень популярности запроса)

Системы мониторинга атмосферного воздуха, отслеживающие изменения поллютантов в реальном времени с высоким пространственно-временным разрешением необходимы в связи с ограниченной доступностью данных и не масштабируемости традиционных систем мониторинга загрязнения воздуха. Однако существуют потенциальные проблемы этих недавно предложенных систем, а именно отсутствие возможности сбора трехмерных данных и гибкость сенсорной сети. В России в каждом крупном городе существует система мониторинга качества воздушного бассейна. В Красноярске эти функции выполняет Краевая система наблюдений за состоянием окружающей среды на территории Красноярского края (далее – КСН), рисунок 5.3 [500].

Подсистема мониторинга атмосферного воздуха КСН включает в себя 12 автоматизированных постов наблюдений (АПН), мероприятие реализуется в рамках национального проекта «Экология».

Недостатками традиционных инструментов мониторинга являются габаристность, высокие стоимости запуска и эксплуатации. Для того чтобы станции мониторинга были эффективными, место размещения должно быть географически обоснованным, ситуация с загрязнением воздуха в промышленных городах сильно зависит от локальной деятельности человека (например, строительная деятельность) и зависит от топологии и аэродинамики размещения.

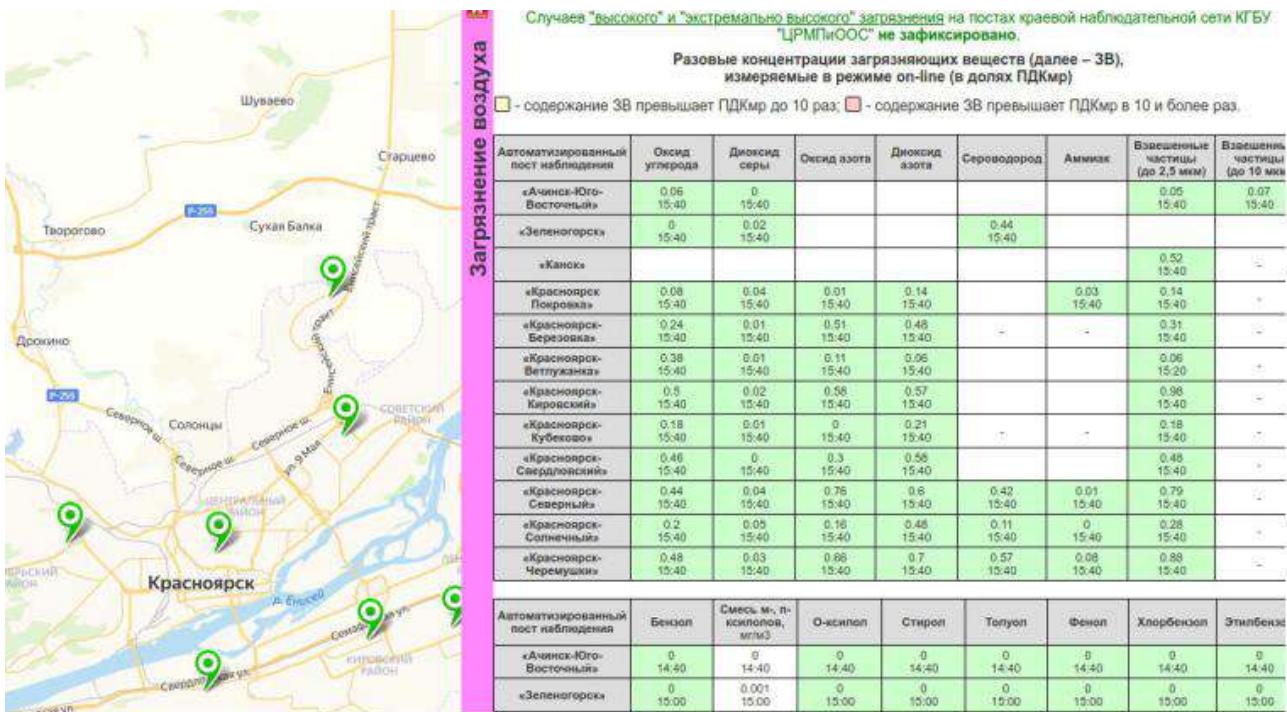


Рисунок 5.3 – Интерфейс сайта Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края www.krasecology.ru

В качестве простого и эффективного инструмента для прогнозирования качества воздуха и водных объектов могут служить искусственные нейронные сети и различные математические модели для численного изучения состояния атмосферы в городе. Однако все предлагаемые методики прогноза в настоящее время по тем, или иным причинам не удовлетворяют в полной мере условиям надежности, полноты необходимых параметров, учета всех гидрометеорологических данных и т.п. Прогноз состава воздуха – сложная задача для исследователей, так как на результат влияет множество факторов. При этом скорость и характер распределения вредных веществ в пространстве для каждой группы источников индивидуальны. Традиционные методы измерения загрязнения воздуха имеют определённые пространственные ограничения.

Целью данного исследования стала разработка метода прогнозирования количественного состава вредных веществ в воздухе с помощью нейронных

сетей для построения эффективных мер по снижению нагрузки на окружающую среду крупных городов. Задача исследования – построение обучающей модели глубокого обучения LSTM (Long short-term memory) на основе рекуррентной нейронной сети с учетом минимизации ошибок и высокой точности прогноза. Верификация и валидация метода проводилась на примере г. Красноярска. Актуальность проводимого исследования обусловлена прочно закрепившимся за Красноярском определением – лидирующий город с высокой степенью загрязнения воздуха.

5.1.2 Метод прогнозирования количественного состава вредных веществ в атмосфере мегаполиса

Модели глубокого обучения LSTM имеют преимущества при поиске лучшей модели [152, 500] – это сокращение времени обучения и снижение итераций переобучения. Из спектра моделей глубокого обучения выбрана LSTM как наиболее подходящая модель прогнозирования с возможностью сохранения памяти в течение длительного периода времени. Данные сети способны научиться создавать сложные структуры, многомерные последовательности, такие как прогноз погоды, вероятность возникновения стихийных бедствий и т.д.

Для составления модели в качестве входных наборов данных импортированы значения по основным поллютантам (диоксид азота, оксид азота, диоксид серы и оксид углерода), которые стали результатом периодических измерений качества воздуха КСН в 2017–2019 годах. Данные станций мониторинга качества воздуха и значения собраны в таблице. Среди 10 параметров – концентрации: CO, SO₂, NO, NO₂; время измерения, месяц и час, температура, влажность, скорость и направление ветра, см. таблицу 5.1.

Все модели обучения содержали десять входных переменных. В «сырой» набор значений входили данные за 3 года наблюдений – он был разделен на обучающие (60 %), проверочные (20 %) и тестовые наборы данных (20 %). Данные прогноза качества воздуха LSTM представлены на рисунках 5.4 и 5.5.

Результаты сходимости модели для значений концентраций NO₂ показаны на рисунке 5.4. В ходе обучения модели LSTM все данные в тестовом наборе предварительно обрабатываются с той же процедурой, что и обучающий набор, и представляются с использованием исходной модели. Затем, на этапе тестирования, выполняются те же процессы LSTM, за исключением обновления весов исходных данных.

Таблица 5.1 – Исходные данные для построения модели LSTM

Переменные	Единицы измерения
CO, SO ₂ , NO, NO ₂	мг/м ³
Температура	°C
Влажность	%
Скорость ветра	м/с
Направление ветра	град
Месяц	1–12
День	1–31
Час	0–23

На рисунках 5.6 и 5.7 приведены данные прогноза LSTM, когда наблюдается схожая предсказанная последовательность. При увеличении масштаба пиков, поведение модели аналогично, прогнозируемые значения имитируют фактические значения. Еще одно наблюдение о сгенерированной последовательности состоит в том, что, когда она увеличивается, она будет продолжать увеличиваться до некоторой точки, затем начнет уменьшаться, и такое поведение повторяется до тех пор, пока последовательность не сойдется. Согласно рисункам 5.6, 5.7, результаты прогнозов очень близки к реальным

значениям, а коэффициент потерь, окончательно выведенный функцией потерь после 1000 итераций, близок к нулю.

В этом исследовании модель LSTM с глубоким обучением использовалась для построения прогноза качества воздуха, являющаяся одним из наиболее подходящих методов прогнозирования данных временных рядов на основе глубокого обучения.

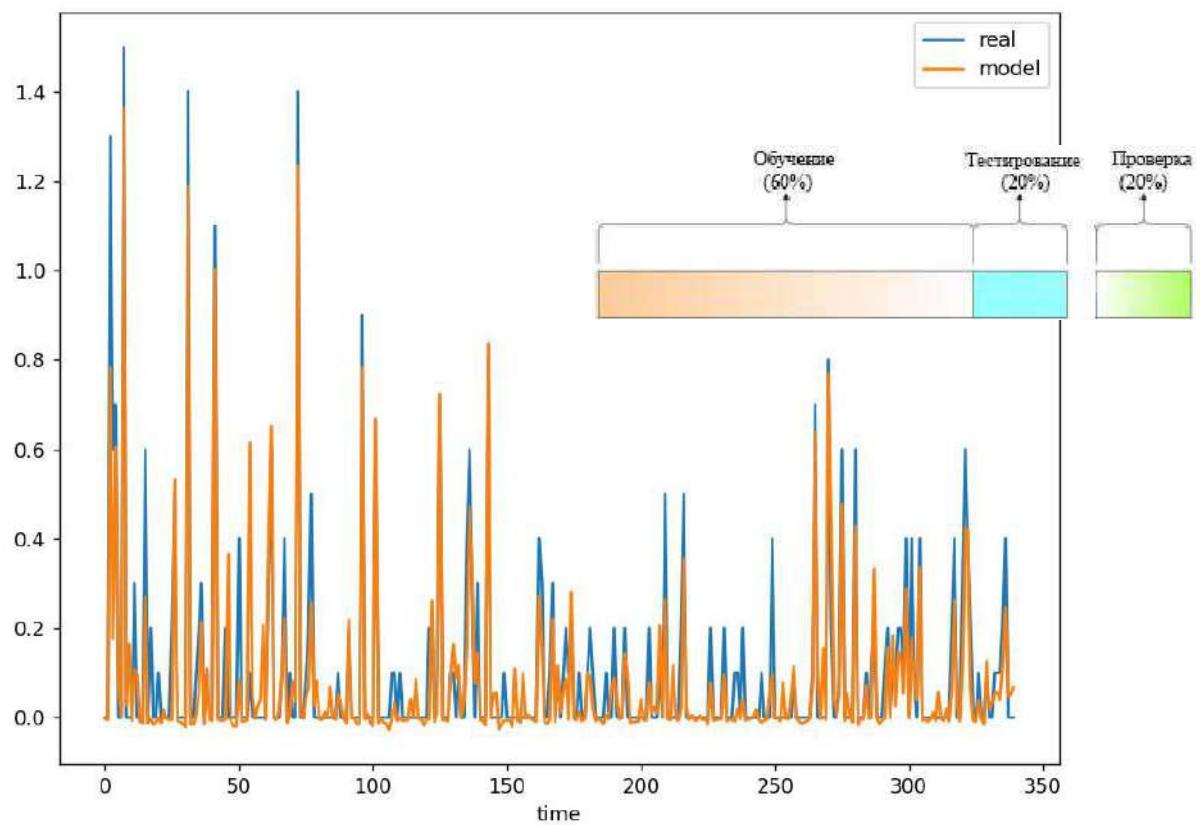


Рисунок 5.4 – Сходимость модели глубокого обучения LSTM для NO₂

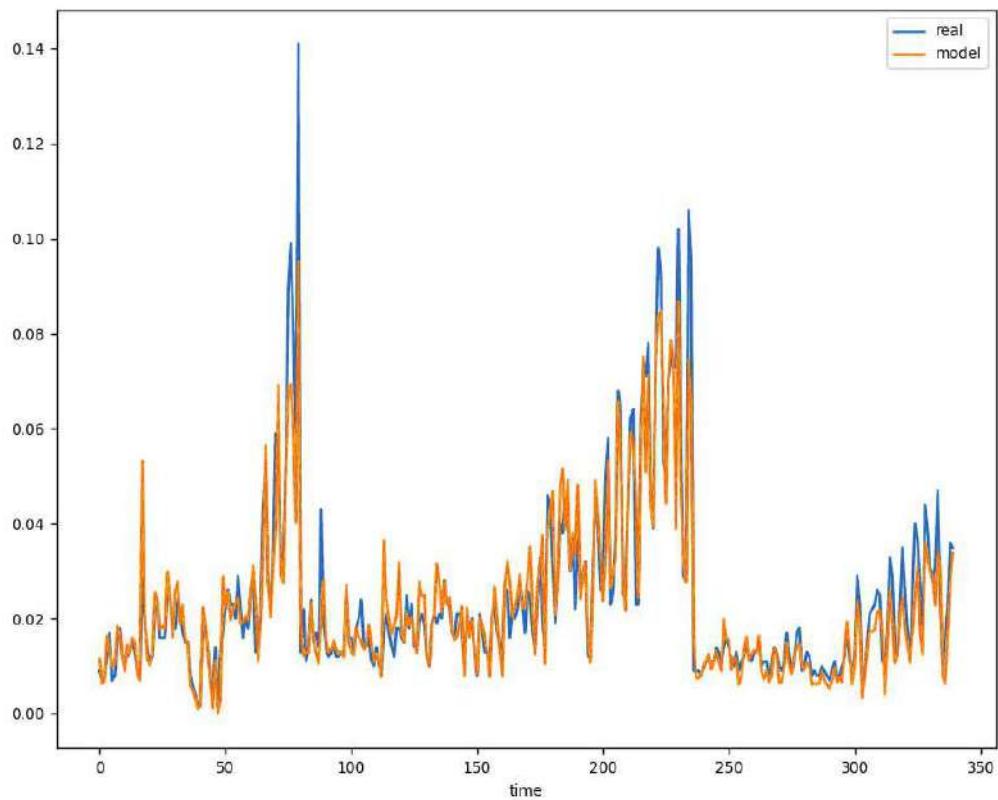


Рисунок 5.5 – Обучение модели LSTM

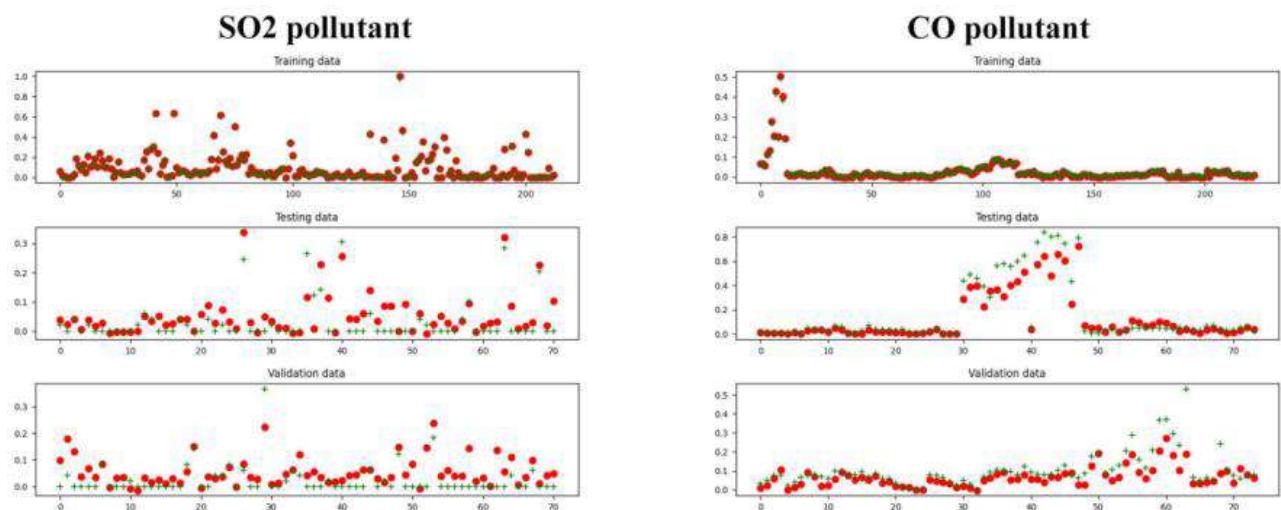


Рисунок 5.6 – Данные прогноза LSTM для SO₂ и CO

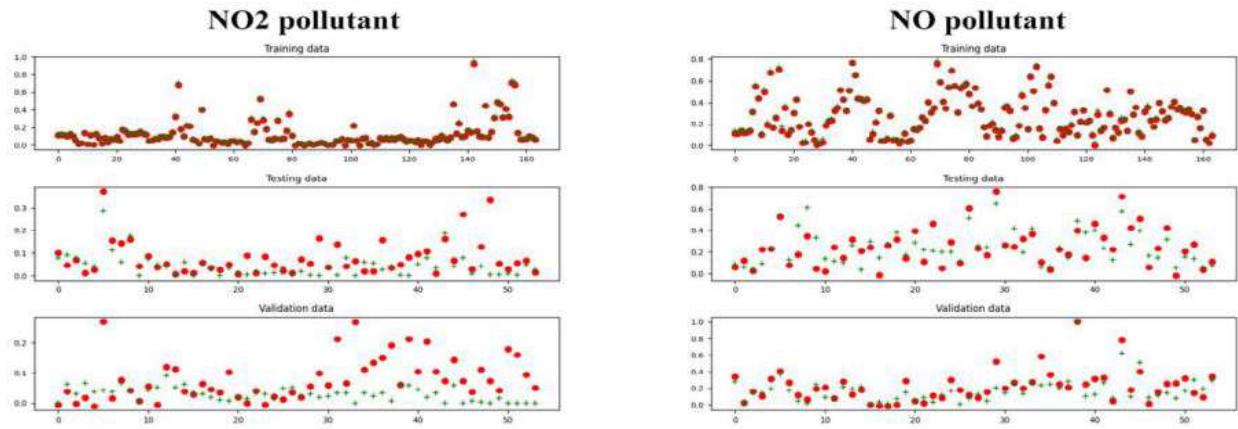


Рисунок 5.7 – Данные прогноза LSTM для NO_2 и NO

Имеющиеся в настоящий момент достижения в разработке моделей глубокого обучения привели к быстрому их применению в академических и промышленных условиях. Успешный опыт имеется в разработках корейских, китайских и тайваньских специалистов. Несмотря на рост уровней загрязнителей воздуха во многих урбанизированных городах, количество измерительных станций остается недостаточным для получения точных уровней поллютантов по всей стране, в связи с чем, дальнейшая разработка и усовершенствование нейронных сетей глубокого обучения LSTM представляется важной и перспективной задачей.

Выводы:

1. Модель LSTM может использоваться для реализации хорошо предсказанных данных о концентрации поллютантов с относительно высокими колебаниями. Модель применима к городам с большой разницей в качестве воздуха, особенно к крупным городам с быстрым промышленным развитием. В качестве точного метода прогнозирования качества городского воздуха модель LSTM может помочь снизить вред от загрязнения для человеческого организма за счет своевременных мер по прогнозированию и контролю опасных загрязнителей.

2. Предлагаемая модель является эффективной мерой как для жителей мегаполиса, чтобы принять необходимые меры предосторожности, так и для

государственных организаций для принятия своевременных мер по охране здоровья граждан и уменьшения экономического риска, вызванного высоким уровнем загрязнителей.

3. В дальнейшем планируется усовершенствовать модель и разработать алгоритм прогнозирования для выявления концентрации загрязняющих веществ в местах, где отсутствуют датчики КСМ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

По результатам проведенных исследований развиты теоретические, методологические и практические основы совершенствования кавитационных технологий в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках предприятий промышленной теплоэнергетики для достижения существенного энерго- и ресурсосберегающего эффекта с учетом техносферной безопасности:

1. Уточнена феноменологическая модель суперкавитирующих потоков, отличающаяся от известных, введением понятия микровихрей как квазичастиц жидкости, позволяющая учесть изменения в определении кавитационного сопротивления уже на стадии проектирования СК-аппаратов с целью повышения их энергоэффективности на базе нового реологического уравнения и тем самым достичь увеличения точности определения конструктивных параметров технологического оборудования примерно на 10 %; установлен механизм воздействия ансамбля кавитационных микропузырьков на обрабатываемые жидкости, заключающийся в синергетическом воздействии на дисперсионную среду (как правило это вода) и на дисперсную фазу (жидкую или твердую) вследствие интенсивного микроперемешивания или диспергирования в процессе взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях.

2. Предложен и научно обоснован метод проектирования технологических СК-установок на базе численного алгоритма решения задач о суперкавитационных

течениях в проточной части данного оборудования с учетом методов интенсивного энергосбережения, способствующих защите окружающей среды.

3. Установлены термодинамические параметры влияющие на процесс кавитации в наиболее распространенных случаях технологического применения; на базе усовершенствованной математической модели тепломассообменных и гидродинамических процессов в СК-испарителях возможно классифицировать режимы обработки водных систем с целью повышения точности их проектирования в тепловых технических системах и процессах.

4. Впервые предложена и обоснована кавитационная технология получения и сжигания БиоВУТ с использованием трехступенчатого процесса суперкавитации для смеси угля с добавлением отходов животноводческих ферм с целью улучшения параметров горения и снижения потерь теплоты. Верификация и валидация технологии проведена на примере процессов тепло- и массообмена в технологических печах. В условиях нехватки сырья в лесодефицитных районах добавление местных доступных компонентов при производстве биотоплива дает ряд неоспоримых преимуществ, способствующих защите окружающей среды: полную утилизацию навоза, отсутствие вредных экологических воздействий на всех стадиях утилизации токсичных отходов жизнедеятельности животных и углеродсодержащих отходов и образований, снижение себестоимости производства.

5. Создана комплексная методика определения эффективности и техносферной безопасности теплотехнологий, состоящая из метода расчета предотвращенного ущерба окружающей среде, критерия оценки экоэффективности и метода прогнозирования качества атмосферы с помощью рекуррентных нейронных сетей LSTM, отличающегося повышенной точностью и комплексно учитывающий сразу несколько видов метеоданных. В качестве точного метода прогнозирования качества городского воздуха модель LSTM может способствовать предотвращению ущерба от загрязнения для населения городов за счет принятия своевременных мер по защите атмосферы от вредных

выбросов и контролю опасных загрязнителей. Она применима к мегаполисам с большой разницей в качестве воздуха, особенно к крупным городам с быстрым промышленным развитием.

Перспективы кавитационных технологий в промышленной теплоэнергетике представляются в развитии следующих направлений:

- технологии кондиционирования и обеззараживания технологической и сточных вод в энергетике, водоснабжении и канализации;
- теоретические и экспериментальные исследования многофазных суперкавитационных течений;
- способы получения многофазных гетерогенных композиций для использования в биотехнологии, экологии, стройиндустрии, медицине, микробиологии, сельском хозяйстве и др.;
- исследования в области создания новых композиционных и смазочных материалов, разработки по созданию новых видов эмульсированных (сuspensionных) топливных смесей и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф. *Кавитационная технология*; ред. акад. Г.В. Логвинович. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
2. Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И. *Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем*. Новосибирск: Наука, 2012. 424 с.
3. Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И., Ли Ф.-Ч. *Тепломассообмен и суперкавитация*. Новосибирск: Наука, 2015. 436 с.
4. Кулагин В.А., Кулагина Л.В. *Основы кавитационной обработки многокомпонентных сред*. М.: Русайнс, 2017. 230 с. ISBN 978-5-4365-1858-9.
5. Kulagin V.A., Kulagina L.V., Li F.-C. *Fundamentals of Cavitation Treatment for Multi-component Environments*, M.: Ru-science, 2017. 182 p. ISBN 978-5-4365-1862-6.
6. Кулагина Л.В., Кулагин В.А. Повышение энергоэффективности различных технологий на базе гидродинамических эффектов кавитации *Энергоэффективность: Достижения и перспективы: Материалы V Всеросс. НПК*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 239–247.
7. Попков В.А. *Развитие технологий обращения с отработавшим ядерным топливом*. Дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск: СФУ, 2016. 143 с.
8. Козин О.А. *Методы и средства повышения экологической безопасности обращения с отходами ядерно-энергетического цикла*. Дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск: СФУ, 2011. 114 с.
9. Кулак А.П. *Гидродинамические исследования развитой кавитации в ограниченных потоках*. Дис. ... канд. техн. наук. Л., ВНИИГ, 1979. 230 с.
10. Криволуцкий А.С. *Повышение эффективности работы тепловых сетей за счет кавитационной обработки воды*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2007. 206 с.

11. Баранова М.П. *Технология получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма*. Дисс. ... д-ра. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2014. 255 с.
12. Радзюк А.Ю. *Методы и средства подготовки водоугольной суспензии для теплотехнологических*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: КГТУ, 2005. 128 с.
13. Баранова М.П. *Совершенствование технологии получения водоугольных суспензий*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: КГТУ, 2006. 112 с.
14. Кулагина Т.А. *Эффективность подготовительных процессов сжигания водо-топливных смесей в топках малого объема*. Дисс. ... докт. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2009. 340 с.
15. Евстигнеев В.В. *Совершенствование технологии кондиционирования сточных вод энергетических систем и комплексов*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2012. 123 с.
16. Дубровская О.Г. *Технология гидротермодинамической обработки природных и сточных вод с использованием эффектов кавитации*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2007. 134 с.
17. Стебелева О.П. *Кавитационный синтез наноструктурированного углеродного материала*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2011. 134 с.
18. Пьяных Т.А. *Повышение эффективности суперкавитационных испарителей*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2013. 126 с.
19. Kulagin V.A., Ivchenko O.A., Kulagina L.V. Current trends of membrane technology development, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017. 10(1) 24–35. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-1-24-35.
20. D.S. Likhachev, F.C. Li, Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives, *Desalin. Water Treat.* 51 (13–15) (2013) 2836–2849.
21. Кулагин В.А., Турутин Б.Ф., Матюшенко А.И., Кулагина Т.А. Физика атмосферы и гидрофизика. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 498 с.

22. Агранат Б.А. Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский, Г.И. Эскин. М.: Высшая школа, 1987. 352 с.
23. Маргулис М. А. Звукомеханические реакции и сонолюминесценция. М.: Химия, 1986. 288 с.
24. Маргулис М.А. *Основы звукомеханики (Химические реакции в акустических полях)*. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
25. Зубрилов С.П. Роль кислорода при ультразвуковой обработке водных дисперсий. *Коллоидный журнал*. 1972. Т. 36. Вып. 2. 349–350.
26. Зубрилов С. П. Ультразвуковая обработка воды и водных систем. Л.: Транспорт, 1973. 98 с.
27. Кулагин В.А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси и твердые границы потоков. *Вестник КГТУ*. Красноярск: КГТУ, 1997. Вып.8. 26–43.
28. Esikov S.A., Ivchenko V.M., Kulagin V.A. Cavitation biomechanics and technology. *Pr. Fifth National Congress on Theoretical and Applied Mechanics* Varna: BIHS, 1985. V. 1. P. 20.1–20.8.
29. Кулагин В.А. Суперкавитационный миксер // Гидродинамика больших скоростей: Межвузовский сборник. Красноярск: КрПИ, 1992. 134–140.
- 30 Crum L.A. Tensile strength of water. *Nature*, 1979, 278: 148–149.
- 31 Wang X.F. *Theory and application of cavitation bubble and supercavitation bubble flow*. Beijing: National Defense Industry Press, 2009 (in Chinese).
- 32 Mørch K.A. Reflections on cavitation nuclei in water. *Physics of Fluids*, 2007, 19: 072104.
- 33 Mørch K.A. Cavitation nuclei: experiments and theory. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21(2): 176–189.

34 Marschall H.B., Mørch K.A., Keller A.P., Kjeldsen M., Cavitation inception by almost spherical solid particles in water. *Physics of Fluids*, 2003, 15(2): 545–553.

35 Giacomello A., Chinappi M., Meloni S., Casciola C.M. Geometry as a Catalyst: How vapor cavities nucleate from defects. *Langmuir*, 2013, 29: 14873–14884.

36 Rood E.P., Review – Mechanisms of cavitation inception. *Journal of Fluids Engineering*, 1991, 113: 163–175.

37 Jenkinson I.R. Bulk phase viscoelastic properties of seawater. *Oceanologica Acta*, 1993, 16(4): 317–334.

38 Gindroz B., Billet M.L., Influence of the Nuclei on the Cavitation Inception for Different Types of Cavitation on Ship Propellers. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120: 171–178.

39 Liu Z., Brennen C.E. Cavitation nuclei population and event rates. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120: 728–737.

40 Russell P.S., Barbaca L., Venning J.A., Pearce B.W., Brandner P.A., Measurement of nuclei seeding in hydrodynamic test facilities. *Experiments in Fluids*, 2020, 61:79.

41 Khoo M.T., Venning J.A., Pearce B.W., Takahashi K., Mori T., Brandner P.A. Natural nuclei population dynamics in cavitation tunnels. *Experiments in Fluids*, 2020, 61:34.

42 Li B., Gu Y., Chen M., Cavitation inception of water with solid nanoparticels: A molecular dynamics study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 51: 120–128.

43 Gao Z., Wu W., Wang B. The effects of nanoscale nuclei on cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 911: A20.

44 Alamé K., Mahesh K., Effect of gas content on cavitation nuclei. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, 982: A4.

- 45 Ceccio S., Gowing S., Shen Y.T., The effects of salt water on bubble cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119: 155–163.
- 46 Kamiirisa H. *The effects of water quality characteristics on cavitation noise*. CAV2001: session A2.004, 2001.
- 47 Zheng Z.Y., Li F-C., Wang L., Li X.B., Zhang H.N., Cai W.H., Zheng X., Experimental study on rheological and thermophysical properties of seawater with surfactant additive—part I: rheological properties. *Rheologica Acta*, 2018, 57: 619–633.
- 48 Zheng Z.Y., Li F.C., Wang L., Li X.B., Zhang H.N., Cai W.H., Zheng X., Experimental study on rheological and thermophysical properties of seawater with surfactant additive—Part II: Surface tension and thermal conductivity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 1367–1379.
- 49 Wang G. , Ostoja-Starzewski M . Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NAVA0015 hydro-foil. *Applied mathematical modelling*, 2007, 31(3): 417–447.
- 50 Kinzel MP, Lindau JW, Peltier LJ, et al . Detached-eddy simulations for cavitating flows, *Proceedings of the 18th AIAA Computation Fluid Dynamics Conference*, 2007: 4098.
- 51 Wu JY , Wang GY , Shy Y. Time-dependent turbulent cavitating flow computations with interfacial trans-port and filter-based models . *International Journal for numerical methods in fluids*, 2005, 49 (7): 739–761.
- 52 Kim S, Brewton S.A. multiphase approach to turbulent cavitating flows, *Proceedings of the 27th Symposium on Naval Hydrodynamics*. Seoul, Korea, 2008.

53 Coutie R, Delgosha O, Fortes Patella R, Reboud J. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125 (1): 38–45.

54 Zhou LJ, Wang ZW. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG k- ϵ model. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130 (1): 1–7.

55 Wang G , Zhang B , Huang B , et al . Unsteady dynamics of cloudy cavitating flows around a hydrofoil, *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation*. Ann Arbor, Michigan, USA, 2009.

56 Li X , Wang G , Yu Z , et al. Multiphase fluid dynamics and transport processes of low capillary number cavitating flows. *Acta Mechanica Sinica*, 2008, 25(2):161–172.

57 Huang B, Wu Q, Wang GY. Progress and prospects of investigation into unsteady cavitating flows. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(1):1–14 (in Chinese).

58 Tomar G, Fuster D, Zaleski S, et al. Multiscale simulations of primary atomization. *Computers & Fluids*, 2010, 39(10): 1864–1874.

59 Hsiao CT, Ma J, Chahine GL. Multiscale two-phase flow modeling of sheet and cloud cavitation. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 90: 102–117.

60 Li LM, Wang ZD, Li XJ, et al. Very Large eddy simulation of cavitation from inception to sheet/cloud regimes by a multiscale model. *China Ocean Engineering*, 2021, 35(3): 361–371.

61 Li LM, Wang ZD, Li XJ, et al. Multiscale modeling of tip-leakage cavitating flows by a combined volume of fluid and discrete bubble model. *Physics of Fluids*, 2021, 33: 062104.

62 Ebrahim G, Ström H, Bensow RE. Numerical simulation and analysis of multi-scale cavitating flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 922(A22): 1–4.

- 63 Wang ZY, Cheng HY, Ji B. Euler–Lagrange study of cavitating turbulent flow around a hydrofoil. *Physics of Fluids*, 2021, 33: 112108.
- 64 Tian BC, Li LM, Meng Y, Huang B., Multiscale modeling of different cavitating flow patterns around NACA66 hydrofoil, *Phys. Fluids* 2022: 34, 103322.
- 65 Machinski A.S. *Hydrodynamics and Thermal Transfer Characteristics of Supercavitating Evaporators for Water Desalination*. Doctor Dissertation. Moscow: Russian State Library, 1984 (in Russian).
- 66 Rudenko B. How to Make Up Water Resources. *Journal of Science and Life*, 2007, 12. <http://www.nkj.ru/archive/articles/12366/> (in Russian).
- 67 Langenecker B, Zeilinger C E. *Method and apparatus for desalination of seawater*. U.S. Patent 7770830, 2010.
- 68 Langenecker B, Zeilinger C E. *Method for desalination of seawater*. U.S. Patent 8021557, 2011.
- 69 Crum L A, Skinner M, Zeilinger S. A method for desalination and water remediation by hydrodynamic cavitation. *Proceedings of Meetings on Acoustics. Acoustical Society of America*, Montreal, Canada, 2013.
- 70 Zhang L, Dong H, Wang X. Temperature response in the process of ultrasonic seawater desalination. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE, Wuhan, China, 2011.
- 71 Hong LX, Gao MY, Zhang JY, Lv KW, Feng ML. Research and design of ultrasonic device for seawater desalination. *Physics and Engineering*, 2014, 24(2): 56-59 (in Chinese).
- 72 Likhachev D S, Li F C. Large-Scale Water Desalination Methods: A Review and New Perspectives. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(13–15): 2836–2849.

73 Likhachev D S, Li F C. Modeling of Rotational Supercavitating Evaporator and the Geometrical Characteristics of Supercavity within. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2014, 57(3): 541-554.

74 Likhachev D S, Li F C, Kulagin VA. Experimental Study on the Performance of a Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(11): 2115–2130.

75 Zheng Z Y, Li F C, Li Q, Kulagin V.A. Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedge-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(6): 1072–1083.

76 Zheng Z Y, Li Q, Wang L, Yao L M, Cai W H, Li H, Li F C. Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(3): 468–485.

77 Zheng Z Y, Li Q, Wang L, Yao L M, Cai W H, Kulagin VA, Li H, Li F C. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination. *Desalination*, 2019, 455: 1-18.

78 Zheng ZY, Wang L, Cai WH, Zheng X, Li Q, Kunugi T, Li H, Li F C. Spatiotemporal evolution of rotational natural cavitation in rotational supercavitating evaporator for desalination. *Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME*, 2020, 142(5): 051205.

79 Zheng ZY, Wang L, Wei TZ, Cai WH, Li H, Yao LM, Li FC. Experimental investigation of temperature effect on hydrodynamic characteristics of natural cavitation in rotational supercavitating evaporator for desalination. *Renewable Energy*, 2021, 174: 278–292.

80 Kulagin VA, Radzyuk AU, Istyagina EB and Pianykh TA. Experimental stand for the study of cavitation flow regimes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 450: 032023.

81 Radzyuk AY, Kulagin VA, Istyagina EB, Pianykh TA and Kolosov MV. Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537: 042080.

82 Radzyuk AY, Kulagin VA, Istyagina EB, Pyanykh TA and Kolosov MV. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES), 2019, 315: 032027.

83 Radzyuk AY, Kulagin VA, Istyagina EB, Pyanykh TA and Grishina II. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench. Journal of Physics: Conf. Ser., 2019, 1399: 022050.

84 Radzyuka AY, Istyagina EB, Kulagin VA, Li FC, Pjanykh TA, Grishaev DA, Cai WH. Determining Properties of a Flow-Through Sumpcavitation Desalination Plant. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2023, 16: 6–21.

85 Wang, Y.-J., Jin, R.-Y., Kong, W.-D., Wang, T.-S. Study on the degradation of phenol wastewater by the combination of Venturi pipe with orifice plate, (2017) *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry*, 37(4), 160–163. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.04.039.

86 Sotiriadis, K. , Guzii, S. , Kumpová, I. , Mácová, P. , Viani, A. The effect of firing temperature on the composition and microstructure of a geocement-based binder of sodium water-glass, (2017) *Solid State Phenomena*, 267 SSP, 58–62. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.58.

87 Wu, Z.-L., Wang, W.-M., Li, W.-X., Zhao, Y., Tang, C.-D., Cravotto, G. Practical application of technology combining ozonation with hydrodynamic cavitation to algae removal from water, (2016) *Journal of Ecology and Rural Environment*, 32(3), № 1673-4831 (2016) 03-0500-07, 500–506. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.03.025.

88 Alias E.A., Hagos F.Y., Ishak M.I. , Dzaharudin, F., Abdullah A.A., Asyraff A. Performance and Emission Characteristics of Microbubble-Enhanced Fuels in a

Diesel Engine (2021) *Energy and Fuels*, 35(3), 2630–2638. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03204.

89 Zhang X., Zhang Y., Tian Y., Zhang X., Zhang Z., Liu R. Analysis on Application Effectiveness of Ballast Water Treatment Based on Advanced Oxidation Processes, (2019) *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 45(8), 2681–2688. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180619007.

90 Karamah E.F., Primasto A.R., Najeges R.R., Bismo S. Treatment of Tofu industry's wastewater using combination of ozonation and hydrodynamic cavitations method with venturi injector, (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1198(6), 062007, DOI: 10.1088/1742-6596/1198/6/062007.

91 Dubrovskaya O.G., Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Problems of biofouling in circulating systems of closed cycles of water use and ways to solve them, *Safety of life*, 2012, No. 3, 26–30 (in Russian).

92 Dubrovskaya O.G., Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Waste water conditioning of energy systems and complexes, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 4(6) (2011), 629–641 (in Russian).

93 Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Sapozhnikova E.S. Modern layouts of technological schemes for wastewater treatment using cavitation technology, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* (2015), 8(2), 217–223 (in Russian).

94 Dubrovskaya O.G., Andrunyak I.V., Priymak L.V. *Resource-saving technologies for neutralization and utilization of waste from enterprises of the heat and power complex of the Krasnoyarsk Territory*, Krasnoyarsk: Sib. Feder. un-t, 2014, 164 p. (in Russian).

95 Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Cavitation in wastewater treatment technologies, *In the world of scientific discoveries*, 2010, No. 5-1, 87–90 (in Russian).

96 Kurilina T.A., Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Matyushenko A.I., Bobrik A.G. The prospects of utilizing the modified sorption material to intensify purification of waste water from electroplating production, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 12(2) (2019) 182–191. DOI: 10.17516/1999-494X-0127 (in Russian).

97 Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A. Non-reagent cleaning of industrial wastewater, containing heavy metals based on technology of hydrothermodynamic cavitation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 12(4) (2019) 460–467. DOI: 10.100-10417516/1999-494X-0153 (in Russian).

98 Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Limin Yao. The alternative method of conditioning industrial wastewater containing heavy metals based on the hydrothermodynamic cavitation technology, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2020, 13(8), 991–1001. DOI: 10.17516/1999-494X-0280.

99 Kulagin V.A., Dubrovskaya O.G., Gudkov D.N., Matyushenko A.I. The Technology of Obtaining Modified Sorbents Based on Silicate Production Waste, 2019 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 288 (2019) 012013; doi:10.1088/1755-1315/288/1/012013.

100 Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Kurilina T.A. Intensification of biological wastewater treatment processes of the food complex companies on the basis of hydrothermodynamic cavitation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2018, 11(5), 584-590. DOI: 10.17516/1999-494X-0057.

101 Дубровская О.Г., Дубровская С.Д., Кулагина Л.В., Матюшенко А.И. Кавитационная технология очистки нефтесодержащих стоков. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 9(147) С. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.54>.

102 Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Yao Limin Development of wastewater treatment technology of the galvanic productions, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)* 2021.

103 Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Yao Limin The alternative method of conditioning industrial wastewater containing heavy metals based on the hydrothermodynamic cavitation technology, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 941 (2020) 012009; doi:10.1088/1757-899X/941/1/012009.

104 Шеленкова В.В., Кулагина Т.А., Стебелева О.П., Сапожникова Е.С. Определение времени релаксации физико-химических характеристик воды

после кавитационной обработки. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2021. 14(5). 550–563. DOI: 10.17516/1999-494X-0332.

105 Кулагин В.А., Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Феноменологическая модель гидродинамического кавитационного воздействия на водные системы. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2019. 12(7). 818–829. DOI: 10.17516/1999-494X-0182.

106 Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Моделирование процессов в суперкавитационном испарителе с учетом термодинамических эффектов. *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* 2014. № 1. 18–20.

107 Likhachev D.S., Li F.C., Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives, *Desalin. Water Treat.* 51 (13–15) (2013) 2836–2849.

108 Likhachev D.S., Li F.C., Kulagin V.A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination, *Science China Technological Sciences.* 2014. T. 57. № 11. 2115–2130. DOI: 10.1007/s11431-014-5631-0.

109 Kulagin V.A., Sapognikova E.S., Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Zhi-Ying Zheng, Qian Li, Feng-Chen Li, Features of influence of cavitation effects on the physicochemical properties of water and wastewater, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2014, 7(5). 605–614.

110 Machinski A.S. *Hydrodynamics and Thermal Transfer Characteristics of Supercavitating Evaporators for Water Desalination*, Russian State Library, Moscow, 1984, 1–285 (PhD Thesis in Russian).

111 Zhi-ying Zheng, Qian Li, Lu Wang, Li-ming Yao, Wei-hua Cai, Hui Li & Feng-chen Li Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape, (2020) *Journal of Hydrodynamics*, 32, 468–485.

112 Zhi-Ying Zheng, Lu Wang, Wei-Hua Cai, Xin Zheng, Qian Li, Tomoaki Kunugi, Hui Li, Feng-Chen Li, Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination, (2020) *Journal of Fluids Engineering Copyright VC*, 142/051205-1.

113 Li Q., Cheng J.P., Zheng Z.Y., Li F.C. , Kulagin V.A. Numerical simulation research on the optimization for blade shape of rotational supercavitating evaporator, (2015) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 72 (Forum 6), 062055. DOI: 10.1088/1757-899X/72/6/062055.

114 Zheng, Z.Y., Cheng J.P., Li F.C., Zhang M., Li Q., Kulagin, V.A. Numerical simulation of the temperature effects on the performance of rotational supercavitating evaporator, (2015) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 72 (Forum 6), 062054, DOI: 10.1088/1757-899X/72/6/062054.

115 Zheng Z.-Y., Wang L., Cai W.-H., Zheng X., Li Q., Kunugi T., Li H., Li F.-C. Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination, (2020) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 142 (5), № 051205 . DOI: 10.1115/1.4045612.

116 Zheng Z.-Y., Li Q., Wang L., Yao L.-M., Cai W. H., Kulagin V.A., Li H., Li F.-Ch. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination. *Desalination*. 2019. Vol. 455. 1–18. DOI.org/10.1016/j.desal.2018.12.012.

117 Setyawan M., Mulyono P., Sutijan, Budiman A. Comparison of Nannochloropsis sp. cells disruption between hydrodynamic cavitation and conventional extraction (2018) *MATEC Web of Conferences*, 154, № 01023. DOI: 10.1051/matecconf/201815401023.

118 Olesya P. Stebeleva and Andrey V. Minakov Application of Cavitation in Oil Processing: An Overview of Mechanisms and Results of Treatment. *ACS Omega* 2021, 6, 31411–31420 <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05858>.

119 Кулагина Л.В. Повышение энергоэффективности и экологической безопасности при сжигании водомазутной эмульсии в теплотехнологических установках, Экология и безопасность жизнедеятельности: Матер. VI Междунар. НПК. Пенза: ТГУ, 2006. 125–128.

120 Кулагина Л.В. Методы оценки ущерба от загрязнения атмосферы вредными выбросами нефтеперерабатывающих производств, Социальные

проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всерос. НПК. Красноярск: Краевое НТО, 2005. Вып. XI. 82–96.

121 Кулагина Л.В. Анализ теплофизических и гидродинамических процессов при сжигании различных видов топлив в энергетическом котле КВ-ТМ-180-150-25, *Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всерос. НПК.* Красноярск: Краевое НТО, 2004. Вып. X. 29–45.

122 Кулагина Л.В. Проблема ингерентности и ликвидности перспективных энергогенерирующих систем, *Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всерос. НПК.* Красноярск: Краевое НТО, 2003. Вып. IX. 45–56.

123 Olesya P. Stebeleva, Ludmila V. Kashkina, Andrey V. Minakov, and Olga A. Vshivkova Impact of Hydrodynamic Cavitation on the Properties of Coal-Water Fuel: An Experimental Study, *ACS Omega* 2022, 7, 37369–37378, doi.org/10.1021/acsomega.2c03979.

124 Емельянова Т.Ю., Кашина Л.В., Кулагин В.А. и др. Влияние добавок глобулярного углерода на реологические свойства водоугольных суспензий. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 8. 5–11.

125 Dzhundubaev A.K., Sultanaliyev M.S., Murko V.I., Kulagina L.V., Baranova M.P. Flow regimes of fuel water-coal suspensions in the channels of spraying devices. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2018, 11(2), 242–249. DOI: 10.17516/1999-494X-0027.

126 Результаты обработки водоугольной суспензии экстремальными механохимическим и электрофизическим методами / М.Ю. Журков, С.Ю. Дацкевич, В.И. Мурко, В.И. Карпенок, А.А. Бухаркин, А.С. Юдин, Л.В. Кулагина. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2024, 17(6), 714–724. EDN: OHIZJZ.

127 Zasyupkin I., Murko V., Fedyayev V., Baranova M. Systems of ignition and combustion stabilization for water-coal fuel. *J. Thermal Science.* 2012. Vol. 16, No. 4, 1329–1338.

128Murko V., Fedyaev V., Karpenok V., Dzuyba D., Baranova M. Application of swirl combustion technique on reduction of toxic substance in coal water mixture combustion products. *J. Clean coal technology*. 2012. № 5, 73–75.

129Мурко В.И., Джундубаев А.К., Султаналиев М.С., Кулагин В.А., Баранова М.П. Разработка технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технология*, 2022, 15(6). 648–657. DOI: 10.17516/1999-494X-0422.

130Мурко В.И., Хямляйнен В.А., Волков М.А., Баранова М.П. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2019, 6, 165–172.

131M. Alaa Musalam and Abdel Fattah A. Qaraman. The thermal behavior of the coal-water fuel (CWF). *International Journal of Energy and Environmental Research*, 2016, Vol. 4, No. 3. 27–36.

132Baranova M.P., Qian Li, Zhi-Ying Zheng, Feng-Chen Li, Kulagin V.A., Likhachev D. Utilization slurry coal-water Fuel, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2014, 7(4), 474–480.

133Murko V, Karpenok V, Fedyaev V and Chernykh D Results of tests of a fuel additive on a coal-fired boiler, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017, 10 (8), 474–480.

134Murko V.I., Khyamyalyainen V.A. and Baranova M.P. The Creation of a Low-Capacity Boiler Plant on Coal-Enrichment Waste, 2019, *International Science and Technology Conference «EastConf»*, Vladivostok, Russia, 2019, 1–4. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725397.

135Murko V., Baranova M., Grishina I The intensification of the solid fuel grate-firing process. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1261, 2019, 012024.

136Karpenok V.I., Murko V.I., Mastikhina V.P., Loboda Yu.A. Thermodynamic and chemical analysis of water-coal fuel ignition and combustion in adiabatic combustion chamber, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2021, 14(4), 385–398.

137Zroychikov, N.A., Kormilitsyn, V.I., Borozdin, V.S., Pay, A.V. A Review of Technologies for Treatment of Fuel Oil during Storage and Preparation for Burning in

Boiler Units' Furnaces (2020) *Thermal Engineering*, 67(2), 106–114. DOI: 10.1134/S0040601520020068.

138 Mal'tsey, L.I., Belogurova T.P. & Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels, (2017) *Thermal Engineering*, 64, 585–590. [Doi.org/10.1134/S0040601517080067](https://doi.org/10.1134/S0040601517080067).

139 Li, K., Chen, H., Lei, J., Zhang, D., Chen, J., Liu, X., Han, H. Study on desulfurization of petroleum coke from vacuum residue delayed coker, (2019) *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 50(7), 52–57.

140 Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Petrakovskaya E.A., Nikitin S.L., Valiullin T.R. The impact of cavitation-activated water on combustion dynamics and environmental characteristics of coal-water slurry fuel, (2019) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537(6), № 062056, DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062056.

141 Мурко В.И., Карпенок В.И., Баранова М.П. Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2022, 15(3). 338–345. DOI: 10.17516/1999-494X-0400.

142 News research & development: Biofuel production: Bubbles break down biomass, (2016) *TCE The Chemical Engineer*, (898), p. 21.

143 Liudmila Kulagina, Irina Kirillova Increasing the energy efficiency and environmental safety of the operation of small-volume furnaces by adding a water-fuel mixture and organic components. *E3S Web of Conferences* 295, 02002 (2021), (WFSDI 2021); doi.org/10.1051/e3sconf/202129502002.

144 Кулагина Л.В., Штым К.А., Кириллова И.В. Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы, Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. 2(26). 104–114; DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.010.

145 Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кулагин В.А., Жижаев А.М., Ткач С.П. Сухие остатки стоков – перспективное энергетическое топливо, *Журн. Сиб.*

федер. ун-та. *Техника и технологии*, 2022, 15(4). 422–434. DOI: 10.17516/1999-494X-0404.

146 Кулагина Л.В., Кулагина Т.А., Кириллова И.В. Усовершенствование состава водотопливной смеси путем добавления органических компонентов. *Борисовские чтения: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Электрон. дан. (73 Mb)*. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – Электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: РС не ниже класса Pentium I; 128 Mb Ram; Windows 98/XP/7; Adobe Reader v 8.0 и выше. – Загл. с экрана. ISBN 978-5-7638-4565-5: С. 138–141.

147 Stracher G.B., Anupma P., Sokol E.V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. *Elsevier Science*, 2010, 63–81.

148 Кулагина Т.А., Кулагина Л.В. *Теоретические основы защиты окружающей среды*. Красноярск: СФУ, 2017. 362 с.

149 Bhattacharya S.C., Leon M.A., Rahman M.M. A study on improved biomass briquetting. *Energy for sustainable development*, 2002, 6(2), 106–110.

150 Wang R.Q., Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P Energy saving technologies and mass – thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 2020, v. 274, DOI: 10.10.16/j.clepro. 2020.122997.

151 Сыродой С.В. *Тепломассоперенос при воспламенении частиц перспективных композиционных топлив на основе угля*. Дисс. ... докт. техн. наук, Томск: ТПУ, 2009. 403 с.

152 Абрамченко В.В. *Частные дома в четырех городах переведут с угля на альтернативное топливо*. – URL: https://t.me/s/government_rus/2035.

153 Corella J, Sanz A. Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state. *Fuel Process Technol*, 2005, 86(9), 1021–1053.

154 Radmanesh R, Chaouki J, Guy C. Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling, *AIChE J* 2006, 52(12), 4258–4272.

155 Van den Enden PJ, Lora ES. Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB. *Biomass Bioenergy*. 2004, 26(3), 281–287.

156 Yaman S, Sahan M, Haykiri-Acma H, Sesen K, Kucukbayrak S: Fuel briquettes from biomass-lignite blends. *Fuel processing technology*, 2001, 72, 43–50.

157 Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I.A. Simulation of flooded and unflued jets for improving technology of high-pressure purification of oil and gas field equipment. (2020) *Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry*, 2020 (12), 124–127. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-12-124-127.

158 Zemenkov Y.D., Zemenkova M.Y., Vengerov A.A., Brand A.E. Application of Technology of Hydrodynamic Cavitation Processing High-Viscosity Oils for the Purpose of Improving the Rheological Characteristics of Oils. (2016) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 154 (1), № 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012026.

159 Montes D., Cortés F.B., Franco C.A. Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO₂ nanoparticles (2018) *DYNA (Colombia)*, 85 (207), 153–160. DOI: 10.15446/dyna.v85n207.71804.

160 Artamonov V.Y., Ganiev S.R., Kuznetsov Y.S., Pustovgar A.P., Sultanov D.R., Shmyrkov O.V. Laboratory and Field Testing of Wave Machines and Devices for Preparation of Fine-Particle Suspensions. (2018) *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 47(1), 104–111. DOI: 10.3103/S1052618818010028.

161 Zhou J.Z., Li H., Chow R.S., Liu Q., Xu Z., Masliyah J. Role of mineral flotation technology in improving bitumen extraction from mined Athabasca oil sands—II. Flotation hydrodynamics of water-based oil sand extraction. (2020) *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(1), 330–352. DOI: 10.1002/cjce.23598.

162 Kashkina L.V., Kulagin V.A., Stebeleva O.P., Kulagina L.V. Recycling carbonaceous materials by cavitation nanotechnology techniques, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2011. 4(5) 358–372 (in Russian).

163 Кулагин В.А., Кашкина Л.В., Кулагина Л.В., Стебелева О.П. Получение углеродосодержащих наноструктур методами кавитационной технологии. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2010. № 12. 34–38 [Kulagin V.A., Kashkina L.V., Stebeleva O.P., Kulagina L.V. Preparation of carbon-containing nanostructures by cavitation technology, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2011, Vol. 46, Issue 11, 767–773. Doi: 10.1007/s 10556-011-9415-0].

164 Стебелева, О.П., Кашкина Л.В., Кулагин В.А. Получение углеродных наномодификаторов для смазочных материалов с использованием кавитационной технологии. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2011. Т. 13. № 1(2). 401–403.

165 Kulagin, V.A., Stebeleva O.P., Kulagina L.V., Kashkina L.V. Production of Carbonaceous Nanostructures using the Methods of Cavitation Technologies. *Chemical and Petroleum engineering*. 2010. Vol. 47. № 1- 2. 222–234.

166 Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Kulagin V.A., Emelyanova T.Y. Nanomodifiers based on cavitationally activate wood carbon-black. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods Technologies* (Bulgaria), 2013. Vol. 7, Part 2. ISSN 1313- 2539, www.scientific-publications.ne.

167 Kashkina L.V., Kulagin V.A., Stebcleva O.P., Likhachev D.S., Petrakovskaya E.A. Senergy Nanostruring Carbon Materials Based on Cavitation. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2011. 4(3). 310–325.

168 Кулагин В.А. Кашкина Л.В., Стебелева О.П., Кулагина Л.В. Утилизация золы на базе физико-химических превращений при кавитационном воздействии. *Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)*. 2009. Том 14. № 6. 238–242.

169 Kashkina L.V., Kulagin V.A., Stebeleva O.P., Likhachev D.S. Cavitation use for obtaining carbon nanomaterials. *ECOLOGY plus*. 2010. 4(19). 718. (Ukraine).

170 Kucherik A.O., Ryabchikov Y.V., Kutrovskaya S.V., Al-Kattan A., Arakelyan S.M., Itina T.E., Kabashin A.V. Cavitation-Free Continuous-Wave Laser Ablation from a Solid Target to Synthesize Low-Size-Dispersed Gold Nanoparticles. (2017) *ChemPhysChem*, 18(9), 1185–1191. DOI: 10.1002/cphc.201601419.

171 Shih C.-Y., Chen C., Rehbock C., Tymoczko A., Wiedwald U., Kamp M., Schuermann U., Kienle L., Barcikowski S., Zhigilei L.V. Limited Elemental Mixing in Nanoparticles Generated by Ultrashort Pulse Laser Ablation of AgCu Bilayer Thin Films in a Liquid Environment: Atomistic Modeling and Experiments. (2021) *Journal of Physical Chemistry C*. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c09970.

172 Stebeleva, O.P., Kashkina, L.V., Petrakovskaya, E.A., Rubleva, T.V., Nikitin, S.L., Vshivkova, O.A. Nonequilibrium carbon black suspensions used in synthesis of polymer composite material (2020) *Journal of Physics: Conference Series*, 1515(2), № 022003. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/2/022003.

173 Slizneva, T.E., Akulova, M.V., Razgovorov, P.B. Influence of mechanomagnetic activation of solutions CaCl₂ and Na₂S₂O₃ on phase structure of cement stone (2019) *ChemChemTech*, 62 (12), 101–107. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114.

174 Krivenko, P.V., Guzii, S.G., Hela, R. The influence of cavitation treatment on nano structuring of alkali aluminosilicate binder for intumescent coatings (2017) *Materials Science Forum*, 908 MSF, 63–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.908.63.

175 Кулагина Т.А., Попков В.А. Влияние кавитационно активированной воды на характеристики цементного компаунда. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2015, 8(3), 362–368.

176 Кулагина Т.А., Попков В.А. Подготовка радиоактивных отходов к длительному хранению (захоронению) с помощью цементных компаундов. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2015, 8(7), 917–927, DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-7-917-927.

177 Kulagin V., Kulagina T., Nikiforova E., Prikhodov D., Shimanskiy A., Li F.-Ch. Inclusion of liquid radioactive waste into a cement compound with an additive of multilayer carbon nanotubes. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 227 (2019) 052030, 1–12; DOI: 10.1088/1755-1315/227/5/052030.

178Luo, C., Liu, H., Cheng, L., Wang, C., Jiao, W., Zhang, D. Unsteady flow process in mixed waterjet propulsion pumps with nozzle based on computational fluid dynamics, (2019) *Processes*, 7(12), 910, . DOI: 10.3390/PR7120910.

179Gheră, C., Mitelea, I., Bordeașu, I., Crăciunescu, C. Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel, (2016) *METAL 2016. 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 706–711.

180Banyai, D., Sfarlea, I., Opruta, D. Experimental Research on Variable Hydraulic Resistors of Servo-hydraulic Valves, (2016) *Energy Procedia*, 85, 44–51. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.273.

181Lee S., Jang D.-Y., Wang X.Y., Kim P., Sun W., Seok J. Lubrication characteristics of a textured porous sliding bearing, (2015) *Advances in Mechanical Engineering*, 7(3), 1–13. DOI: 10.1177/1687814015573618.

182Miyanaga N. , Tomioka, J. Linear and nonlinear stability analysis of hydrodynamic journal bearings using mass-conservative cavitation model, (2019) *Jurnal Tribologi*, 22, 61–73.

183Ding, A., Xiao, Y. Numerical investigation for characteristics and oil-air distributions of oil film in a tilting-pad journal bearing, (2018) *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 7B-2018, DOI: 10.1115/GT2018-75888.

184Rivera, N.R., Kassim, B., Grigorov, P., Wang, H., Armenante, M., Bu, X., Lekhal, A., Variankaval, N. Investigation of a Flow Step Clogging Incident: A Precautionary Note on the Use of THF in Commercial-Scale Continuous Process, (2019) *Organic Process Research and Development*, 23(11), 2556–2561. DOI: 10.1021/acs.oprd.9b00366.

185Vermes A.G., Lettieri C. Source term based modeling of rotating cavitation in turbopumps, (2019) *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141(6), 061002, DOI: 10.1115/1.4042302.

186Родионов В.П. *Струйная суперкавитационная эрозия*. Краснодар: КубГТУ, 2003. 264 с.

187Шеленкова В.В., Кормич А.И., Козин О.А., Кулагина Т.А. Дезактивация оборудования от радиоактивного загрязнения водой после кавитационной обработки, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2018. 11(6). 732–743; DOI: 10.17516/1999-494X-0088.

188Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Способы дезактивации поверхностей с радиоактивным загрязнением, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2017. 10(3). 352–363; DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-352-363.

189Гафарова В.В. (Шеленкова В.В.), Кулагина Т.А. Безопасные методы утилизации радиоактивных отходов, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2016. 9(4). 585–597; DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-4-585-597.

190Шеленкова В.В., Кулагина Т.А. Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением, *Радиоактивные отходы.* 2021. 1(14). 28–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-28-38.

191Кулагина Т.А., Кулагин В.А., Москвичев В.В., Попков В.А. Применение кавитационной технологии в процессах обращения с отработавшим ядерным топливом, *Экология и промышленность России.* 2016. Т. 20. № 10. 4–10. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-10-4-10.

192Kulagin V.A., Kulagina T.A., Popkov V.A. Environmental Effects of Cavitation Technology for Radioactive Waste Management, *Chemical and Petroleum Engineering,* 2018, Vol. 53, Issue 11–12, 738–744: doi.org/10.1007/s10556-018-0414-2.

193Кулагина Т.А., Попков В.А. Метод обращения с отходами ядерного топлива в атомной энергетике, *Журнал СФУ. Техника и технологии,* 2015, 8(2), 194–204.

194Шеленкова В.В. *Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением*, Дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: ОАО «НПО ЦКТИ», 2021. 116 с.

195Кулагина Т.А., Кулагин В.А., Матюшенко А.И. *Техносферная безопасность в ядерной энергетике.* Красноярск: Изд-во «Гротеск», СФУ, 2014. 286 с.

- 196 Кулагина Т.А., Козин О.А., Попков В.А. Обращение с радиоактивными отходами. Красноярск: Изд-во «Гротеск», СФУ, 2018. 183 с.
- 197 Кулагина Т.А., Кулагин В.А. Растворение алюмосиликатных осадков в хранилищах жидких РАО, *Радиоактивные отходы*. 2020. № 2(11). 75–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-75-84.
- 198 Kulagin V., Kulagina T., Nikiforova E., Prikhodov D., Shimanskiy A., Li F.-Ch. Inclusion of liquid radioactive waste into a cement compound with an additive of multilayer carbon nanotubes. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 227 (2019) 052030, 1–12; DOI: 10.1088/1755-1315/227/5/052030.
- 199 Шеленкова В.В., Кулагина Т.А. Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением. *Радиоактивные отходы*. 2021. № 1(14). 28–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-28-38.
- 200 Кулагина Т.А., Попков В.А. Влияние кавитационно активированной воды на характеристики цементного компаунда, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2015, 8(3), 362–368.
- 201 Кулагина Т.А., Попков В.А. Метод обращения с отходами ядерного топлива в атомной энергетике, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2015, 8(2), 194–204.
- 202 Кулагин В.А. *Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации*: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск: КГТУ, 2004. 47 с.
- 203 Ивченко В.М., Есиков С.А. Биологические эффекты гидродинамической кавитации. *Гидродинамика больших скоростей*; КрПИ. Красноярск, 1989. Вып. 1. 23–35.
- 204 Кулагин В.А., Радзюк А.Ю. Кавитационная подготовка высококонцентрированных малорастворимых полидисперсных субстратов для биотехнологических процессов на базе водоугольных суспензий. *Проблемы использования канского-ачинских углей на электростанциях: Сб. докладов Всерос. НПК*, Красноярск: РАО «ЕС России», 21–23 ноября 2000. 417–423.

205 Немчин А.Ф. и др. *Гидродинамические методы интенсификации процессов очистки диффузионного сока* М.: ЦНИИТЭИпищепром. 1984. Пищ. пром. Сер. 23. Сахарн. пром.: Обзор. информ. Вып. 8. 28 с.

206 Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M., Grzymała, W., Głab, T., Bajda, T. Cavitated charcoal—An innovative method for affecting the biochemical properties of soil. (2021) *Materials*, 14(9), № 2466, DOI: 10.3390/ma14092466.

207 Zheplinska, M., Mushtruk, M., Salavor, O. Cavitation Impact on Electrical Conductivity in the Beet Processing Industry. (2021) *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 755–762. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_73.

208 Mishchenko, V., Semenov, A., Yatsenko, V., Stepanova, T. Liquid organic waste purification on the example of beet-sugar production using cavitation hydrodynamic generators. (2021) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1259 AISC, 209–224. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_18.

209 Ciriminna R., Forest B., Meneguzzo F., Pagliaro M., Hamann M.T. Technical and economic feasibility of a stable yellow natural colorant production from waste lemon peel. (2020) *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(19), № 6812. DOI: 10.3390/app10196812.

210 Ricaurte, L., Perea-Flores, M.D.J., Martinez, A., Quintanilla-Carvajal, M.X. Production of high-oleic palm oil nanoemulsions by high-shear homogenization (microfluidization). (2016) *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 75–85. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.04.004.

211 Zhilin Wu, Daniele F. Ferreira, Daniele Crudo, Valentina Bosco, Livio Stevanato, Annalisa Costale and Giancarlo Cravotto, Plant and Biomass Extraction and Valorisation under Hydrodynamic Cavitation. (2019), *Processes*, 7(12), 965. Doi.org/10.3390/pr7120965.

212 Кулагин В.А., Москвичев В.В., Махутов Н.А., Маркович Д.М., Шокин Ю.И. Проблемы физического и математического моделирования в области гидродинамики больших скоростей на экспериментальной базе Красноярской ГЭС, *Вестник Российской академии наук*. 2016. Т. 86. № 11. 978–990. DOI: 10.7868/S0869587316110062.

213 Кулагин В.А., Вильченко А.П., Кулагина Т.А. Моделирование двухфазных суперкавитационных потоков; ред. В.И. Быков. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. 187 с.

214 Кулагин В.А., Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Феноменологическая модель гидродинамического кавитационного воздействия на водные системы. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2019. 12(7). 818–829. DOI: 10.17516/1999-494X-0182.

215 Zheng Z.-Y., Wang L., Cai W.-H., Zheng X., Li Q., Kunugi T., Li H., Li F.-C. Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination, (2020) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 142 (5), № 051205 . DOI: 10.1115/1.4045612.

216 Кулагина Л.В. Моделирование пузырьковых кавитационных потоков, *Труды КГТУ*, 2006. № 1. 140–145.

217. Kulagin V.A, P'yanykh T.A., Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects, *Chemical and Petroleum Engineering*. 50(1–2) (2014) 24–29.

218 Витер Б.К., Кулагин В.А. *Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 243 с.

219 Kulagin V.A., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Markovich D.M., Shokin Yu.I. Physical and Mathematical Modeling in the Field of High-Velocity Hydrodynamics in the Experimental Base of the Krasnoyarsk Hydroelectric Plant [J], *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, Vol. 86, No. 6, pp. 454–465. DOI: 10.1134/S1019331616060034.

220 Zheng Z.-Y., Li Q., Li F.-Ch., Kulagin V.A. Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedgeshaped cavitators for rotational supercavitating evaporator, *Sci. China Tech. Sci.* 2015. Vol. 58. 1–12. DOI: 10.1007/s11431-015-5827-y.

221 Likhachev D.S., Li F.-Ch., Kulagin V.A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for

desalination, *Sci. China Tech. Sci.* 2014. Vol. 57. 2115–2130. DOI: 10.1007/s11431-014-5631-0.

222Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования, *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2012. 5(1). 57–62.

223Vladimir A. Kulagin Numerical study supercavitation of the pump, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015. 8(5). 317–23; DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-669–674. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-669-674.

224Dmitriy S. Likhachev, Vladimir A. Kulagin, Feng-Chen Li Modeling supercavitation flow in supercavitating pumps, *Submitted to International Conference on Pumps and Fans (ICPF 2015)*, October 18–21, 2015, Hangzhou, China.

225Qian Li, Zheng Z Y, Feng-Chen Li, Vladimir A. Kulagin Numerical study on the thermophysical characteristics of rotational supercavitating evaporator, *Submitted to International Conference on Pumps and Fans (ICPF 2015)*, October 18–21, 2015, Hangzhou, China.

226Zheng ZY, Qian Li, Feng-Chen Li, Vladimir A. Kulagin Numerical study on the performance of rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape, *Submitted to International Conference on Pumps and Fans (ICPF 2015)*, October 18–21, 2015, Hangzhou, China.

227Zheng Z.Y., Li F.C., Li Q., Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedge-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator, *SCIENCE CHINA Technol. Sci.* 58 (6) (2015) 1072–1083.

228Likhachev D.S. *Study on the Hydrodynamic Characteristics of Rotational Supercavitating Evaporator*, Harbin Institute of Technology, Harbin, 2013 (PhD thesis).

229Zheng Zhiying, Li Qian, Li Feng-Chen, Kulagin V A, Numerical study on parameter selection for steam extraction of rotational supercavitating evaporator, *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33(2): 247–252. Doi: 10.7523/j.issn.2095-6134.2016.02.016 (in Chinese).

230Vladimir A. Kulagin Numerical study supercavitation of the pump, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2015 8(5). 317–323; DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-669-674.

231Yu-Ke Li, Zhi-Ying Zheng, Feng-Chen Li, Kulagina L.V. Numerical study on secondary flows of viscoelastic fluids in straight ducts: Origin analysis and parametric effects, *Computers and Fluids.* 152 (2017) 57–73, doi: 10.1016/j.compfluid.2017.04.016.

232 Лихачев Д.С., Кулагина Л.В., Метод решения задач обтекания решетки суперкавитирующих профилей гидродинамических реакторов, *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* 2009. № 10. 15–17 [Kulagina L.V., Lishachev D.S. Method of solving problems of flow past a cascade of supercavitating blades in hydrodynamic reactors, *Chemical and Petroleum engineering.* 2009. Vol. 45. № 9. 603–608. Doi: 10.1007/s 10556-010-9245-5].

233Радзюк А.Ю., Кулагин В.А., Истягина Е.Б., Пьяных Т.А. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения, (2019) *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies,* 12(4), 468–475. DOI: 10.17516/1999-494X-0155.

234Vladimir A Kulagin, Alexander U Radzyuk, Elena B Istyagina and Tatyana A Pyanykh Experimental stand for the study of cavitation flow regimes, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 450 (2018) 032023; doi:10.1088/1757-899X/450/3/032023.

235Radzyuk AYu, Kulagin VA, Istyagina EB, Pyanykh TA and Kolosov MV Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)* 315 (2019) 032027; doi: 10.1088/1755-1315/315/3/032027.

236Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pyanykh T.A. and Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench, *Journal of Physics: Conf. Ser.: 1399* (2019) 022050: doi:10.1088/1742-6596/1399/2/022050.

237 Alexander Yu Radzyuk, Vladimir A Kulagin, Elena B Istyagina, Tatyana A Pianykh and Mike V Kolosov Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 537 (2019) 042080; doi:10.1088/1757-899X/537/4/042080.

238 Кулагина Л.В. *Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. Гл. 5. 176–224. ISBN 5-7636-0904-2 (978-5-7636-0904-2).

239 Kulagina L.V., Shtym K.A. Flow past various types of vane mechanisms by a two-phase compressible flow, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2022, 15(4), 505–520. DOI: 10.17516/1999-494X- 0409.

240 Kulagina L.V. Parametric description of the phenomena of boiling and cavitation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2018. 11(5). 578–583. DOI: 10.17516/1999-494X-0056 (in Russian).

241 Kulagin V.A., Kulagina L.V., Li Feng-Chen. Solution of the problem of flow past a wing profile near the interface, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017, 10(4), 523–533. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-4-523-533; IF 0.588.

242 Kulagin V.A. Kulagina L.V., Kulagina T.A. Nanotechnology cavitational effects in the heat-and-power engineering and other branches of production, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2008. 1(1). 76–85.

243 Кулагина Л.В. Исследование систем с распределенными параметрами на базе математического моделирования, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2007. № 3. 25–27 [Kulagina L.V. Mathematical Modeling of Control Systems for Production Processes with Distributed Parameters, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, Vol. 43, Issue 5, 319–322. DOI: 10.1007/s10556- 007-0057-1].

244 Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуйков А.В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор), *Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов*. 2022. Т. 333. 9. 209–218; DOI 10.18799/24131830/2022/9/3623.

245 Дубровская О.Г., Кулагин В.А., Сапожникова Е.С., Ли Фэнг-Чэнь, Ли Цянь, Чжэн Чжи-Ин Математическое моделирование кавитационных процессов при кондиционировании промышленных сточных вод. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технология*. 2015. 8(3). 369–376.

246 Laouari A., Ghenaiet A. Investigation of steady and unsteady cavitating flows through a small Francis turbine. (2021) *Renewable Energy*, 172, 841–861. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.080.

247 Jin W. Cavitation generation and inhibition. I. Dominant mechanism of turbulent kinetic energy for cavitation evolution, (2021) *AIP Advances*, 11(6), 065028, DOI: 10.1063/5.0050231.

248 Kuimov D.N., Minkin M.S. Methods for modeling cavitation in pulp fiber grinding processes, (2021) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1029(1), 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012045.

249 Ashok K. Singhal, Mahesh M. Athavale, Huiying Li, Yu Jiang Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model, (2002) *J. Fluids Eng.* 124(3), 617–624. Doi.org/10.1115/1.1486223.

250 Shen T., Li X., Li L., Wang Z., Liu Y. Evaluation of vorticity forces in thermo-sensitive cavitating flow considering the local compressibility, (2021), , 120, 105008.

251 Shaofeng Zhang, Xiaojun Li, Bo Hu, Yang Liu, Zuchao Zhu, Numerical investigation of attached cavitating flow in thermo-sensitive fluid with special emphasis on thermal effect and shedding dynamics, (2019), *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 5, 3170–3184.

252 Luo J.C., Ching H., Wilson B.G., Mohraz A., Botvinick E.L., Venugopalan V. Laser cavitation rheology for measurement of elastic moduli and failure strain within hydrogels, (2020) *Scientific Reports*, 10(1), 13144. DOI: 10.1038/s41598-020-68621-y.

253 Chandra Shekhar Pant, Yann Delorme and Steven Frankel, Accuracy Assessment of RANS Predictions of Active Flow Control for Hydrofoil Cavitation (2020) *Processes*, 8(6), 677. Doi.org/10.3390/pr8060677.

254 Izadyar H., Aghababaei A.H., Forghani P., Hajighasemi A. Investigation of rib's effect in cavitation on an axisymmetric separated flow over a longitudinal blunt circular cylinder, (2020), *SN Applied Sciences*, 2, 4, 588.

255 Aishvarya Kumar, Ali Ghobadian and Jamshid M. Nouri, Assessment of Cavitation Models for Compressible Flows Inside a Nozzle, (2020), *Fluids* 5(3), 134; Doi.org/10.3390/fluids5030134.

256 Ni L.-X., Chen Z.-S., Liu Z., Feng X.-F. Hydrodynamic analysis of ultra-high pressure water derusting nozzle, (2020) *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2020, 1842–1850.

257 Лихачев, Д.С., Кулагина Л.В., Метод решения задач обтекания решетки суперкавитирующих профилей гидродинамических реакторов, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2009. № 10. 15–17 [Kulagina L.V., Lishachev D.S. Method of solving problems of flow past a cascade of supercavitating blades in hydrodynamic reactors, *Chemical and Petroleum engineering*. 2009. Vol. 45. № 9. 603–608. Doi: 10.1007/s 10556-010-9245-5].

258 Chen, Y., Gong Z., Li, J., Chen X., Lu C. Numerical investigation on the regime of cavitation shedding and collapse during the water-exit of submerged projectile, (2020) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 142 (1), 011403, DOI: 10.1115/1.4044831.

259 Kamisaka H. , Soyama, H. Enhancing the Aggressive Intensity of a Cavitating Jet by Introducing Water Flow Holes and a Long Guide Pipe, (2021) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 143 (3), 031201. DOI: 10.1115/1.4048683.

260 Hutli E. , Nedeljkovi M.S., Czifrus S. Study And Analysis of The Cavitating And Non-Cavitating Jets Part Two Parameters Controlling The Jet Action And A New Formula For Cavitation Number Calculation, (2020) *Thermal Science*, 24 (1 Part A), 407–419. DOI: 10.2298/TSCI190428334H.

261 Zhang H., Zuo Z., Mørch K.A., Liu S. Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics, (2019) *Physics of Fluids*, 31 (9), 097107. DOI: 10.1063/1.5116156.

262 Ganiev S.R., Kuznetsov Y.S., Shmyrkov O.V. Nonlinear Wave and Cavitation Processes and Their Effect on the Mechanical Properties of Viscous Solutions, (2019) *Doklady Physics*, 64(2), 49–52. DOI: 10.1134/S1028335819020010.

263 Sun, Y., Guan, Z., Hooman, K. Cavitation in Diesel Fuel Injector Nozzles and its Influence on Atomization and Spray (2019) *Chemical Engineering and Technology*, 42(1), 6–29. DOI: 10.1002/ceat.201800323.

264 Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I., Koval I.Z., Strutynska L.R., Strogan O.I., Smolarz A., Ormanbekova A., Begaliyeva K. Electromagnetic vibratory cavitator, (2019) *Przeglad Elektrotechniczny*, 95(4), 24–29. DOI: 10.15199/48.2019.04.05.

265 Wiraputra I.G.P.A.E., Edikresnha D., Munir M.M., Khairurrijal Generation of Submicron Bubbles using Venturi Tube Method, (2016) *Journal of Physics: Conference Series*, 739(1), 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/739/1/012058.

266 Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Pyanykh T.A., Baranova M.P., Grishina I.I. Verification of the results of numerical modeling of the developed cavitation in a cramped flow by experimental data, (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 12192. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012192.

267 *Протокол заседания секции гидроэлектростанций и гидротехнических сооружений НК «Научно-технический совет единой энергетической системы» от 25.03.2015 г.* http://www.nts-ees.ru/sites/default/files/25_03_15.pdf, <http://nts-ees.ru/sekcii/sekcija-gidroelektrostanciy-i-gidrotehnicheskikh-sooruzheniy>.

268 Tatiana Kulagina, Vladimir Kulagin, and Valerii Tereshkov; Development of the circumpolar territories of the Russian Federation, *E3S Web of Conferences* 295, 03007 (2021) WFSDI 2021 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129503007>.

269 Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Расчет режимных параметров суперкавитационного испарителя, *Международный научно-исследовательский журнал*. 2013. № 8(15). 56–59. Часть 2. http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8-2-15_d.pdf.

270 Ивченко В.М., Малимон Е.Д. Кинетика кавитационно-пузырьковых суспензий, *Прикладная гидромеханика и теплофизика*. Красноярск: КрПИ, 1975. 50–60.

271 Кулагина Л.В. Лихачев Д.С. Эрозионные разрушения гидравлического оборудования и их моделирование, *Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)*. 2009. Т. 14. № 6. 44–49.

272 Kulagina L.V. Computational investigation of flows in tube heat exchangers, *Cieplne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery*. Lodz: Academicke Centrum Graficzno-Marketingowe, 2008. № 133. 123–129.

273 Кулагин В.А., Кулагина Л.В., Кулагина Т.А. Использование термомеханических эффектов кавитации в различных технологических процессах, *Вестник МАНЭБ*, 2005. Том 10. № 4. 154–164.

274 Radzyuk, A.Yu., Istyagina, E.B., Kulagina, L.V., Zhuikov, A.V., Grishaev, D.A. Synthesis-analysis of the use of cavitation technologies. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2022, 15(7), 774–801. DOI: 10.17516/1999-494X-0435.

275 Кашкина Л.В., Кулагин В.А., Стебелева О.П., Кулагина Л.В. Изучение эффектов кавитационного диспергирования твердофазных материалов, *Энергетика в глобальном мире: Матер. Междунар. конгресса, НТК «Гидродинамика больших скоростей»*. Красноярск: ИПК СФУ, 2010. 415–417.

276 Rajkumar, R., Gaurav, K., Karn, A., Kumar, V., Shukla, H. (2023). Numerical Investigation of the Effect of Liquid Temperature on Supercavitation [J], In: Narendranth, S., Mukunda, P.G., Saha, U.K. (eds) *Recent Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1388-4_2.

277 Radzyuk, A. Yu., Istyagina, E. B., Kulagina, L.V., Feng-Chen Li, Pjanykh, T. A., Grishaev, D. A., Wei-Hua Cai. Determining properties of a flow-through supercavitation desalination plant. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2023, 16(1), 6–21. EDN: GSDAGT.

278 Ивченко В.М., Кулагин В.А., Есиков С.А., Лаврик Н.Л. Кинетика кавитационного воздействия на элементы гидротехнических сооружений и

гидротехнического оборудования. *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. Л.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 200. 43–48.

279Zheng Z.-Y., Wang L., Cai W.-H., Zheng X., Li Q., Kunugi T., Li H., Li F.-C. Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination, (2020) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 142 (5), № 051205 . DOI: 10.1115/1.4045612.

280Zhilin Wu, Daniele F. Ferreira, Daniele Crudo, Valentina Bosco, Livio Stevanato, Annalisa Costale and Giancarlo Cravotto, Plant and Biomass Extraction and Valorisation under Hydrodynamic Cavitation. (2019), *Processes*, 7(12), 965. Doi.org/10.3390/pr7120965.

281Thiruvengadam A. Scaling Law for Cavitation Erosionc // Неустановившиеся течения воды с большими скоростями: Труды JUTAM. М.: Наука, 1973. С. 405–427.

282Hirschi R. *Prediction par Modelisation Numerique Tridimensionnelle des Effets de la Cavitation a Poche dans les Turbomachines Hydrauliques*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1998 (N°1777).

283Hirschi R., Dupont P. and Avellan F. Centrifugal pump performance drop due to leading edge cavitation: Numerical predictions compared with model tests. *Trans. of ASME, J. Fluids Eng.* 120 (december 1997), 705–711.

284Deshpande M., Feng J., AND 1994, C. L. M. Cavity flow predictions based on the euler equations. *Trans. of ASME, J. Fluids Eng.* 116 (march 1994), 36–44.

285Chen Y. and Heister S. D. A numerical treatment for attached cavitation. *Trans. of ASME, J. Fluids Eng.* 116 (september 1994), 613–618.

286 Radzyuk A.Yu., E.B. Istyagina, Kulagina L.V., Zhuikov A.V., Grishaev D.A. Synthesis-analysis of the use of cavitation technologies, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2022, 15(7). 774–801. DOI: 10.17516/1999-494X_0435] (in Russian).

287 Демиденко, Н.Д., Кулагина, Л.В. Моделирование процессов горения капель жидкого топлива. *Информатика и системы управления: Межвуз. сб. науч. тр.* Красноярск: ГУ НИИ информатики и процессов управления. 2004. Вып. 9, 45–53.

288 Демиденко Н.Д. Кулагина Л.В., Мельник И.Н. Анализ нестационарных режимов в системах контроля и управления распределенными параметрами. *Информатика и системы управления: Межвуз. сб. науч. тр.* Красноярск: ГУ НИИ информатики и процессов управления. 2004. Вып. 9. 135–144.

289 Демиденко, Н.Д., Кулагина, Л.В. Оптимизация систем управления распределенным процессом. *Решетневские чтения: материалы VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию со дня рождения ген. конструктора ракетно-космических систем акад. М. Ф. Решетнева.* Красноярск: СибГАУ. 2004. 151–152.

290 Demidenko, N.D., Kulagina L.V. Heat-mass exchange processes modeling in technological furnaces. *Cieplne Maszyny Przeplywowe. Turbomachinery.* Lodz: Academicke Centrum Graficzno-Marketingowe. 2005. № 128. Vol. 1. 147–154.

291 Демиденко, Н.Д., Кулагина, Л.В. Оптимальное управление режимами работы технологических печей в нефтеперерабатывающей промышленности. *Фундаментальные исследования.* 2005. № 2. 43–44.

292 Демиденко, Н.Д., Кулагина, Л.В. Моделирование теплотехнологического процесса в трубчатой печи. *Материалы Всерос. НПК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения»* Красноярск: Краевое НТО. 2005. Вып. XI. 37–48.

293 Демиденко, Н.Д. Кулагина, Л.В. Математическое описание процессов в технологических печах. *Решетневские чтения: материалы IX Всерос. науч. конф. с международным участием.* Красноярск: СибГАУ. 2005. 238–239.

294 Демиденко, Н. Д. Кулагина, Л.В., Мельник И.Н. Анализ нестационарных режимов в системах контроля и управления распределенными процессами. *Вестник СибГАУ*. 2006. № 2. 89–92.

295 Демиденко, Н. Д. Кулагина, Л.В. Методы и средства оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2006. № 3. 8–9.

296 Демиденко, Н.Д. Кулагина, Л.В. Математическое моделирование процессов в технологических печах. *Вестник СибГАУ*. 2006. Вып. 7. 91–95.

297 Demidenko, N.D., Kulagina L.V. The heat-mass exchange processes modeling task solution in technological furnaces. *Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование: материалы III Междунар. летней научной школы*. Кемерово: ИНТ. 2006. 493–496.

298 Демиденко, Н.Д., Кулагина, Л.В. Исследование систем с распределенными параметрами на базе математического моделирования. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2007. № 3. 25–27.

299 Демиденко, Н.Д. Кулагина, Л.В. *Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 210 с. ISBN 978-5-7636-0411-3.

300 Демиденко Н.Д., Потапов В.И., Шокин Ю.И. *Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами*. Новосибирск: Наука, 2006. 551 с.

301 Kümmel, M., Seborg, D. A contemplative stance for chemical process control. *Automatica*. 1998. V. 23. N. 6. 801–802.

302 Кёниг, Е.Я. Исследование кинетики массо- и теплопереноса при разделении многокомпонентных смесей (ч. 1), *TOXT*, 1994. Т. 28. № 3. 223–242.

303 Кёниг, Е.Я. Исследование кинетики массо- и теплопереноса при разделении многокомпонентных смесей (ч. 2), *TOXT*, 1994. Т. 29. № 4. 348–370.

304Дьяконов, С.Г., Елизаров, В.И., Лаптев, А.Г. Математические основы и моделирование процессов разделения веществ, Казань: Изд-во ун-та, 1993. 437 с.

305Девятов, Б.Н., Демиденко Н.Д., Охорзин В.А. *Динамика распределенных процессов в технологических аппаратах, распределенный контроль и управление*. Красноярск, 1976. 312с.

306Носков, А.С. и др. Математическая модель нестационарных процессов в неподвижном слое катализатора. *Докл. АН СССР*. 1983. Т. 269, № 5. 1139–1143.

307Полянин, А.Д., Шевцова В.М., Ковачева Н.Т. Нелинейные задачи тепломассообмена при переменных коэффициентах переноса. *TOXT*, 1990. Т. 24, № 6. 723–734.

308Сметанин, Ю.В, Декомпозиционный метод математического моделирования и оптимизации химико-технологических систем, *TOXT*, 1992. Т. 26, № 4. 596–599.

309Шахтахтинский, Т.Н., Келбалиев Г.И. Аналогия и подобие нестационарных процессов конвективного тепломассопереноса. *Докл. РАН*. 1990. Т. 315, № 6. 1427–1429.

310Дорохов, П.К., Кудинов Ю.И., Кафаров В.В. Декомпозиционный метод идентификации химико-технологических процессов с распределенными параметрами. *Докл. АН СССР*. 1980. Т. 253, № 6. 1412–1414.

311Дьяконов, С.Т., Елизаров В.И., Кафаров В.В. Сопряженное физическое и математическое моделирование промышленных аппаратов, *Докл. АН СССР*. 1985. Т. 282, № 5. 1195–1199.

312Кафаров, В.В., Громов В.Ю., Матвейкин В.Г. Задачи управления объектами химической технологии при наличии нечеткости, *Докл. РАН*. 1994. Т. 337, № 5. 628–630.

313 Кафаров, В.В., Гордеев Л.С., Глебов М.Б. К вопросу моделирования и управления непрерывными технологическими процессами с помощью нейронных сетей, *TOXT*, 1995. Т. 29, № 2. 205–212.

314 Кафаров, В.В., Громов В.Ю., Матвейкин В.Г. Математическое моделирование не полностью наблюдаемых химико-технологических объектов. *Докл. РАН*. 1994. Т. 337, № 1. 68–69.

315 Кафаров, В.В. и др. Разработка алгоритма синтеза системы ректификационных колонн для разделения многокомпонентных смесей с учетом мнения экспертов, *Докл. РАН*. 1992. Т. 322, № 1 112–116.

316 Кафаров, В.В., Ветохин В.Л. *Основы автоматизированного проектирования химических производств*, М.: Наука, 1987. 624с.

317 Иванов, В.И., Кривошев В.П., Ахмадеев М.Г. Особенности расчета переходных процессов в ректификационной колонне, *Автоматизированное и метрологическое обеспечение измерений в нефтяной и газовой промышленности*. Уфа, 1984. 148–152.

318 Шокин, Ю.И. и др. *Вычислительный эксперимент в проблеме цунами* Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 168с.

319 Самарский, А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры*. М.: Физматлит, 2001. 320 с.

320 Delannoy Y. and Kueny J.L. Two phase flow approach in unsteady cavitation modelling. In *ASME Cavitation and Multiphase Flow Forum* (1990), vol. 109, 153–159.

321 Coutier-Delgosha O. *Modelisation des Ecoulement Cavitants: Etude des Comportements Instationnaires et Application Tridimensionnelle aux Turbomachines*. PhD thesis, LEGI-INPG, Grenoble, France, Nov. 2001. UMR 5519.

322 Schmidt D.P. Rutland C.J. and Corradini M.L. (1997) *A numerical study of cavitating flow through various nozzle shapes*. SAE paper 971597, 10 p.

323 Wallis G.B., 1969. *One-dimensional two-phase flow*, Mc Graw-Hill, p. 143, New-York.

324 Schmidt D.P. and Corradini M.L. (2001), The internal flow of diesel fuel injector nozzles: a review. *Int. J. Engine Research*, vol. 2, no. 1, 1–22.

325 Qin, J.-R., et al. (2001) Direct Calculations of Cavitating Flows by the Space-Time CE/SE Method. *AIAA conf. Paper*

326 Dumont N., Simonin O., and Habchi C. (2001) Numerical simulation of cavitating flows in Diesel injectors by a homogeneous equilibrium modelling approach. *4th Int. Symposium on Cavitation: CAV2001*.

327 Senocak I., and Shyy W., Evaluation of cavitation models for Navier-Stokes computations. *Proceedings of the 2002 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Paper FEDSM2002-31011, 2002.

328 Alajbegovic A., Grogger H.A., Philipp H. (1999) Calculation of transient cavitation in nozzle using the two-fluid model. *Proc. ILASS-Americas'99 Annual Conf.*, 373–377.

329 Yuan W., Sauer J. and Schnerr G.H. 2001. Modeling and computation of unsteady cavitation flows in injection nozzles *Journal of Mechanical Industry*, 2, 383–394.

330 Merkle C.L., Feng J. and Buelow P.E.O. 1998. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation. *Third international symposium on cavitation (CAV1998)*, Grenoble, France, 307–311.

331 Kunz R.F., Boger D.A., Stinebring D.A., Chyczewski T.S., Gibeling H.J., Venkateswaran S. and Govindan T.R. A preconditioned navier-stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. *Computers & Fluids* 29 (2000), 849–875. Elsevier Svcience Ltd.

332 Ahuja V., Hosangadi A., and Arunajatesan S., Simulations of Cavitating Flows Using Hybrid Unstructured Meshes. *Trans. of ASME, J. Fluids Eng.* 123 (June 2001), 331–340.

333 Singhal N.H., Athavale A.K., Li M. and Jiang Y. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. 2002. *Tr. ASME, Journal of Fluids Engineering*, vol. 124, 617–624.

334 Schmidt D.P., Rutland C.J., and Corradini M.L. (1999) A fully compressible twodimensional model of high-speed cavitating nozzle. *Atomization and Sprays*, v.9.

335 Kubota A., Kato H., and Yamaguchi H. A new modelling of cavitating flows: A numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section. *J. Fluid Mech.* 240 (March 1992), 59–96.

336 Giannadakis E., Gavaises M., Roth H. and Arcoumanis C. (2004) Cavitation Modelling in Single-Hole Injector Based on Eulerian-Lagrangian Approach.

337 Chahine G.L. (2004) Nuclei Effects on Cavitation Inception and Noise. *25th Symposium on Naval Hydrodynamics. St. Johns, Newfoundland and Labrador, Canada, 8–13 August 2004*. 14 p.

338 Hunter C., Guerrieri B. Deducing the properties of singularities of function from their Taylor series coefficients, *J of Applied Math.*, 1980, v. 392, 48–263.

339 Ван-Дайк М. *Методы возмущения в механике жидкости*. М.: Мир, 1967. 310 с.

340 Вильченко А.П. Высшие приближения в некоторых задачах околоэкранной аэродинамики, *Исследования в механике сплошных сред*. Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1983. 99–113.

341 Вильченко А.П. *Решение задачи обтекания профиля ограниченным потоком сжимаемой жидкости*. Вычислительный центр СО РАН: Труды семинара. Красноярск, 1997. 17 с.

342 Ивченко, В.М. *Гидродинамика суперкавитирующих механизмов*. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1985. 232 с.

343 Shanks D. Non-linear transformation of divergent and slowly convergent sequences, *J. Math. and Phys.*, 1955, fasc. 34. 1–42.

344 Крылов В.И. и др. *Вычислительные методы*. М.: Наука, 1977. 399 с.

345 Огирко О.В. *Применение и усовершенствование нелинейных кубатурных формул*. Львов: Институт прикладных проблем механики и математики АН УССР, 1982. 18 с. Деп. в ВИНИТИ № 324–82.

346 Верлань А.Ф., Сизиков. В.С. *Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ*. Киев: Наукова думка, 1978. 292 с.

347 Скоробогатько В.Я. *Теория ветвящихся цепных дробей и ее применение в вычислительной математике*. М.: Наука, 1983. 311 с.

348 Лихачев, Д.С., Кулагина Л.В., Метод решения задач обтекания решетки суперкавитирующих профилей гидродинамических реакторов, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2009. № 10. 15–17 [Kulagina L.V., Lishachev D.S. Method of solving problems of flow past a cascade of supercavitating blades in hydrodynamic reactors, *Chemical and Petroleum engineering*. 2009. Vol. 45. № 9. 603–608. Doi: 10.1007/s 10556-010-9245-5].

349 Самарский, А.А., Михайлов, А.П. Математическое моделирование в информационную эпоху, *Вестник РАН*. 2004. № 9. 781.

350 Мишкевич В.Г. Квадратурные формулы для одномерных сингулярных интегралов, *Гидродинамика больших скоростей*. Красноярск: КПИ, 1981. 58–72.

351 Егоров Е.Е., Поляков С.И. О численном решении кавитационных задач с использованием квадратуры для сингулярного интеграла. *Гидродинамика больших скоростей*. Красноярск: КПИ, 1985. 150–162.

352 Егоров, И.Т., Садовников, Ю.М., Исаев, И.И., Басин, М.А. *Искусственная кавитация*; ред. И.Т. Егоров. Л.: Судостроение, 1971. 284 с.

353 Роман, В.М. Расчет СК-крыла по теории несущей поверхности. *Гидродинамика больших скоростей*. Красноярск: КПИ, 1981. 49–58.

354 Ивченко В.М., Чупаха Д.Д. Обтекание решетки суперкавитирующих профилей пузырьковым потоком, *Гидродинамика больших скоростей*. Красноярск: КПИ, 1978. 29–36.

355А.с. 1755906 СССР, МКИ³ В 01 F 5/00. *Кавитационный смеситель* / Б.А. Кулагин, Т.А. Кулагина, Е.П. Грищенко (СССР). – №4760709/26; заявл. 07.08.89; опубл. 23.08.92, Бюл. № 31. – 2 с.: ил.

356Пат. 2356611 Российская федерация, МПК В 01 F 5/00. *Кавитационный смеситель* / Д.С. Лихачев, Л.В. Кулагина; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – 2008108646/15; заявл. 05.03.2008; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. – 6 с.: ил.

357Мальцев Л.И., Малых Н.В., Петров В.М., Санкин Г.Н., Тесленко В.С. Пузырьковая кавитация и ее использование в технологиях [High speed hydrodynamics and Numerical Simulation]: *Proceedings of the Third International Summer Scientific Workshop*. Кемерово: ИНТ, 2006. 155–160.

358Прис К.М. *Кавитационная эрозия* // Эрозия; ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. 269–331.

359Mettin R. Bubble structures in acoustic cavitation, *Universitat Gottingen*. Germany, 2005. P. 37.

360Балабышко А.М., Зимин, А.И., Ружицкий В.П. *Гидромеханическое диспергирование*. М.: Наука, 1998. 331 с.

361Кулагин В.А., Кулагина Л.В., Кулагина Т.А. Использование термомеханических эффектов кавитации в различных технологических процессах, *Вестник МАНЭБ*, 2005. Том 10. № 4. 154–164.

362Корнфельд М. *Упругость и прочность жидкостей*. М.-Л.: ГИТТЛ, 1951. 107 с.

363Brennen, C.E., Reisman, G.E., and Wang, Y-C. Observations of Shock Waves in Cloud Cavitation, *J. Fluid Mech.*, UK, Cambridge University Press, 1998. Vol. 355, 255–283.

364Kulagin V.A., Kulagina, L.V., Li Feng-Chen. *Fundamentals of Cavitation Treatment for Multicomponent Environments*. M.: RU-SCIENCE, 2017. 182 p. ISBN 978-5-4365-1862-6.

365Кулагин В.А., Лихачев Д.С. Трехмерное моделирование эффектов кавитации в турбомашинах. *Компрессорная техника и пневматика*. 2009. № 6. 29–33.

366 Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. *Кавитация*. М.: Мир, 1974, 688 с.

367Кулагина Л.В. Параметрическое описание явлений кипения и кавитации, Журн. Сиб. федер. ун-та. *Техника и технологии*. 2018. 11(5). 578–583. DOI: 10.17516/1999-494X-0056.

368Stepanoff A.J., Stai H.A. *Thermodynamic Aspekte of Cavitation in Centrifugal Pumps*, Trans. ASME, Series A, November, 1956, vol. 78, p. 1691.

369 Salemann V. *Cavitation and N.P.S.H. Requirements of various Liquids*, A.S.M.E. *Journal of basic Engineering*, Join, 1959, p. 167.

370Spraker W.A. *The Effect of Fluid Properties on Cavitation in Centrifugal Pumps*, A.S.M.E., Ser. E, vol. 87, Juliet, 1965.

371Reisman, G.E., Brennen C.E., 1996, Pressure Pulses Generated by Cloud Cavitation. *Fluids Engineering Division Conference. ASME*, 1996. Vol. 1. 8–9.

372 Vladimir A. Kulagin Numerical study supercavitating of the pump, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2015. 8(5). 317–23; DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-669–674. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-669-674.

373Thiruvengadam A. Scaling Law for Cavitation Erosionc // Неустановившиеся течения воды с большими скоростями: Труды JUTAM. М.: Наука, 1973. С. 405–427.

374Bonnin J. *Notion de resistance diaphasique Application a la I cavitation cl a l'ebullition*, E.d. Fi «Bulletin tic la Direction des Etudes et Recherches». Serie A. 1972, n 1, 39–76.

375 Plesset M.S. Bubble Dynamics. Cavitation in Real Fluids, Warren Michigan USA. 1962. Elsilver 1964.

376 Bonnin J. *Influence de la temperature sur le debut de cavitation dans l'eau*, Societe Hydrotechnique de France, XII journées de l'Hydraulique, Paris, join, 1972.

377 Bonnin J. Thermodynamic Effect in Cavitation. *Fluid Machinery, Group Conference «Cavitation»*, September, 1974, Heriot-Watt University - Edinburg.

378 Bonnin J. *Theoretical and Experimental Investigations on Incipient Cavitation in Different Liquids*, A.S.M.E. Winter Meeting. New York, November, 1972. Paper 72-WA/FE 31.

379 Кулагина Л.В. Исследование систем с распределенными параметрами на базе математического моделирования, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2007. № 3. 25–27 [Kulagina L.V. Mathematical Modeling of Control Systems for Production Processes with Distributed Parameters, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, Vol. 43, Issue 5, 319–322. DOI: 10.1007/s10556-007-0057-1].

380 Mikic B.B., Rosenow W.M. Griffith P. *On Bubble Growth Rate, Int. Journal Heat Mass Transfer*, 1970, vol. 13, 657–666.

381 Седов, Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. М.: Наука, 1981. 448 с.

382 Бриджмен, П. *Анализ размерностей*. Ижевск: РХД, 2001. 148 с.

383 Никулин В.А. Основные уравнения движения реальных жидкостей, *Гидродинамика течений с теплоомассообменом*. Устинов: УМИ, 1986. 4–15.

384 Poritsky H., Chapman 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. 813–821.

385 Kulagin V.A., P'yanykh T.A. Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects, *Chemical and Petroleum Engineering*. 50(1–2) (2014) 24–29.

386 Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования, *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2012. 5(1). 57–62.

387 Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Расчет режимных параметров суперкавитационного испарителя, *Международный научно-исследовательский журнал*. 2013. № 8(15). 56–59. Часть 2. http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8-2-15_d.pdf.

388 Кулагина, Л.В., Пьяных, Т.А., Штым, К.А. Моделирование суперкавитационных течений в опреснительных установках с учетом термодинамических эффектов, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2023, 16(3). 372–386. EDN: FKUSSI.

389 Ривкин С.Л., Александров А.А. *Теплофизические свойства воды и водяного пара*. М.: Энергия, 1980. 424 с.

390 Goel T., Zhao J., Thakur S., Haftka R.T., Shyy W., Zhao J. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2008. V. 58. 969–1007.

391 Utturkar Y., Wu J., Wang G., Shyy W. *Prog. Aerospace Sci.* 2005. V. 41 (7). 558–608.

392 Wu J.Y. *Filter Based Modeling of Unsteady Turbulent Cavitating Flow Computational*, Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, 2005.

393 Tseng C.-C., Shyy W. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. V. 53. 513–525.

394 Senocak I., Shyy W. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2004. V. 44. 997–1016.

395 Маркина Н.Л. Численное моделирование кавитационных течений: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Москва, 2011. 107 с.

396 Zwart P.J., Gerber A.G., Belamri T. *International Conference on Multiphase Flow*. 2004. V. 152. 45–56.

397 Зажигаев, Л.С., Кишьян А.А., Романников Ю.И. *Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента*, М.: Атомиздат, 1978. 231 с.

398 Зайдель, А.Н. *Ошибки измерений физических величин*. - Л.: Наука, 1974. 108 с.

399 Налимов, В.В. *Теория эксперимента*. М.: Наука, 1971. 208 с.

400 Шенк Х. *Теория инженерного эксперимента*. М.: Мир, 1972. 170 с.

401 Пылаев Н.И., Эдель Ю.У. *Кавитация в гидротурбинах*. Л.: Изд-во «Машиностроение», 1974.

402 Перник А.Д. *Проблемы кавитации*. Л.: Судпромгиз, 1966. 684 с.

403 А.с. 1755906 СССР, МКИ³ В 01 F 5/00. *Кавитационный смеситель* / В.А. Кулагин, Т.А. Кулагина, Е.П. Грищенко (СССР). – №4760709/26; заявл. 07.08.89; опубл. 23.08.92, Бюл. № 31. – 2 с.: ил.

404 Пат. 2356611 Российская федерация, МПК В 01 F 5/00. *Кавитационный смеситель* / Д.С. Лихачев, Л.В. Кулагина; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – 2008108646/15; заявл. 05.03.2008; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. – 6 с.: ил.

405 Koschikowski J. Water Desalination: When and where will it Make Sense? [R/OL]. Fraunhofer ISE, 2011 [2011-03-11].

http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_aaas2011_energy_water_koschikowski.pdf.

406 Kulagina L.V., Shtym K.A. Flow past various types of vane mechanisms by a two-phase compressible flow, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2022, 15(4), 505–520. DOI: 10.17516/1999-494X- 0409.

407 Kulagin V.A., Kulagina L.V., Li Feng-Chen. Solution of the problem of flow past a wing profile near the interface, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017, 10(4), 523–533. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-4-523-533; IF 0.588.

408 Kulagin V.A., Kulagina L.V., Kulagina T.A. Nanotechnology cavitation effects in the heat-and-power engineering and other branches of production, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2008. 1(1). 76–85.

409 Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуйков А.В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор), *Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов*. 2022. Т. 333. 9. 209–218; DOI 10.18799/24131830/2022/9/3623.

410 Kulagina L.V., Kulagina T.A. LSTM Forecasting: Time Series Forecasting to Predict Concentration of Air Pollutants (CO, SO₂, NO and NO₂) in Krasnoyarsk, Russia, *Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems: Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference 2021, Vol. 3; Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 228)*, 2021, 191–198; doi: 10.1007/978-3-030-77448-6_17.

411 Енютина Т.А., Кулагина Л.В. *Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности*: Учебное пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2022. 190 с.

412 Жуйков А.В., Калекин В.С., Кулагина Л.В., Матюшенко А.И. Эксергетический анализ теплотехнологических процессов: Монография. М.: РУСАЙНС, 2018. 130 с. ISBN 978-5-4365-2608-9.

413 Гутенев В.В., Кулагина Т.А., Кулагина Л.В., Русак О.Н. *Экология техносферы*. Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во «Маджента», 2008. 468 с. ISBN 978-5-98156-084-3.

414 Kulagina T.A., Kulagina L.V. Theoretical foundations of environmental protection (Tutorial) Krasnoyarsk: SibFU. p. 332 (2017)

415 Результаты обработки водоугольной суспензии экстремальными механохимическим и электрофизическим методами / М.Ю. Журков, С.Ю. Дацкевич, В.И. Мурко, В.И. Карпенок, А.А. Бухаркин, А.С. Юдин, Л.В. Кулагина. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2024, 17(6), 714–724. EDN: OHJJZ

416 Лихачев, Д.С., Кулагина Л.В. Метод решения задач обтекания решетки суперкавитирующих профилей гидродинамических реакторов, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2009. № 10. 15–17 [Kulagina L.V., Lishachev D.S. Method of solving problems of flow past a cascade of supercavitating blades in hydrodynamic reactors, *Chemical and Petroleum engineering*. 2009. Vol. 45. № 9. 603–608. Doi: 10.1007/s 10556-010-9245-5].

417 Pyanyh T.A., Li Feng-Chen, Li Qian, Kulagina L.V. etc. Conditioning natural and waste waters with the use cavitational technologies (Abstract) World Congress and Expo on Oil, Gas and Petrochemistry, pp. 26–28, (2015)

418 Енютина Т.А., Кулагина Л.В., Кириллова И.В. *Устройство для подготовки к сжиганию водотопливной смеси с органическими компонентами*, Патент на полезную модель № 205015. Заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». № 2020104971; заявл. 2021.02.25. Публ. и выдача пат. 2021.06.23.

419 Кулагина Л.В. *Моделирование тепломассообменных процессов в технологических печах*: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2010. 24 с.

420 Енютина Т.А., Кулагина Л.В., Марченкова С.Г., Гафуров М.М. Предохранительное устройство для защиты топливных трубопроводов. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2024. Вып. 2. 408–411. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-408-409.

421 Кулагина Л.В., Башун В.И., Кубик Н.Р., Лазанская Е.И. Обоснование технологии защиты поверхности металла в проточном тракте гидротурбины для уменьшения кавитационного износа. *Справочник. Инженерный журнал (с приложением)*. 2024. № 6. 37–44. DOI: 10.14489/hb.2024.06.pp.037-044.

422 Кулагина Т.А., Зайцева Е.Н., Дубровская О.Г., Кулагина Л.В. Утилизация отработанных нефтепродуктов и кондиционирование промышленных стоков на базе кавитационной технологии в условиях

циркумполярных территорий. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2024, 17(4), 414–428. EDN: OHJJZ.

423 Зайцева Е.Н., Кулагина Т.А., Кулагина Л.В. *Программный комплекс для моделирования экологии водного объекта.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615022. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». Заявка № 2024613650; заявл. 2024.26.02. Публ. и выдача пат. 2024.01.03.

424 Кулагина Л.В., Шефер Э.А. *Программный комплекс мониторинга теплового режима в производственных помещениях.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611904. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». № 2024610862; заявл. 2024.01.22 Публ. и выдача пат. 2024.01.25.

425 Кулагина, Л.В., Пьяных Т.А., Штым К.А. Ли Фэнчен Кавитационная технология опреснения морских вод. *Безопасность жизнедеятельности и климатические риски развития территории Енисейской Сибири: Матер. Междунар. науч. конф.* Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. С. 30–31.

426 Кулагина, Л.В., Пьяных Т.А., Штым К.А. Развитие теоретических и практических основ кавитационных технологий. *Безопасность жизнедеятельности и климатические риски развития территории Енисейской Сибири: Матер. Междунар. науч. конф.* Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023.

427 Ludmila V. Kulagina Development of scientific foundations of cavitation technologies. *Third Sino-Russian Scientific and Technical Forum «High-tech technologies: from science to implementation»* October 22–26, 2023. Harbin, China.

- 428 Кулагина, Л.В., Штым К.А. Перспективы развития кавитационных технологий: теория и практика. *Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: Матер. VIII Всерос. конф. с междунар. участием*; науч. ред. В.В. Москвичев. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 51–55.
- 429 Кулагина, Л.В., Пьяных Т.А., Штым К.А. Кондиционирование природных вод и стоков. *Безопасность жизнедеятельности и климатические риски развития территории Енисейской Сибири: Матер. Междунар. науч. конф.* Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. С. 130–131.
- 430 *Обращение с отходами нефтепродуктов:* Монография / Т.А. Кулагина, Е.Н. Зайцева, В.А. Кулагин, Л.В. Кулагина, О.Г. Дубровская, Э.Э. Кобилов. М.: РУСАЙНС, 2024. 242 с. ISBN 978-5-466-07508-3.
- 431 Гутенев, В.В., Кулагина, Л.В., Русак, О.Н. и др. *Экология техносферы*. М.: Изд-во «Маджента», 2008. 468 с. ISBN 978-5-98156-084-3
- 432 Кулагина, Т.А., Зайцева, Е.Н., Дубровская, О.Г., Кулагина, Л.В. Утилизация отработанных нефтепродуктов и кондиционирование промышленных стоков на базе кавитационной технологии в условиях циркумполярных территорий. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2024, 17(4), 414–428. EDN: ОНІJJZ.
- 433 Дубровская О.Г., Кулагин В.А., Сапожникова Е.С., Ли Фэнг-Чэнь, Ли Цянь, Чжэн Чжи-Ин Математическое моделирование кавитационных процессов при кондиционировании промышленных сточных вод. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2015. 8(3). 369–376.
- 434 Гительман Л.Д., Ратников Б.Е., Гетельман Л.М., Лекомцева Ю.Г. *Экономический механизм региональной энергетической политики*, Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 256 с.
- 435 Степанов С.Г. Промышленные технологии переработки угля: перспективы использования в Канско-Ачинском угольном бассейне. Красноярск: КГУ, 2002. 85 с.

436 *Концепция энергосберегающей политики в Красноярском крае*, Постановление администрации Красноярского края от 18.10.99, № 664-п.

437 *Иновационная инвестиционная программа энергосбережения России (стратегия и первоочередные меры)* Постановление Правительства РФ от 18.05.92, № 318.

438 Хабачев Л. Шарыгин В. Проблемы согласования экономических интересов производителей и потребителей энергии при осуществлении энергосбережения. *Промышленная энергетика*. 1993. № 2.

439 Моисеев Н.Н. *Математические задачи системного анализа*. М.: Наука, 1981. 487 с.

440 Журавлев В.М., Кулагин В.А. Использование эксергетического анализа для оценки и реализации потенциала ресурсосбережения. *Энергоресурсосбережение*. 2000. № 1. С. 43–45.

441 Матвеев А.А., Кулагина Т.А., Таракова Л.А., Трошкин О.А. Экономическая эффективность осуществленных природоохранных мероприятий. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1992. № 4. С. 48–50.

442 Дэвинс Д. *Энергия*. М.: Энергоатомиздат. 1985. 360 с.

443 Двойнишников В.А., Деев Л.В., Изюмов М.А. *Конструкция и расчет котлов и котельных установок*. М.: Машиностроение, 1988. 264 с.

444 Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S., Mekhilef, S. A review on biomass as a fuel for boilers (2011) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (5), pp. 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.

445 Yu, Q., Wang, Y., Van Le, Q., Yang, H., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Yang, Y., Sonne, C., Tabatabaei, M., Lam, S.S., Peng, W. An Overview on the Conversion of Forest Biomass into Bioenergy (2021) *Frontiers in Energy Research*, 9, № 684234. doi: 10.3389/fenrg.2021.684234.

446 Chansa, O., Luo, Z., Yu, C. Study of the kinetic behaviour of biomass and coal during oxyfuel co-combustion (2020) *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28 (7), pp. 1796–1804. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.02.023>.

447 Ndou, N.R., Bada, S.O., Falcon, R.M.S., Weiersbye, I.M. Co-combustion of Searsia lancea and Tamarix usneoides with high ash coal (2020) *Fuel*, 267, № 117282. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117282>.

448 Goerndt, M.E., Aguilar, F.X., Skog, K. Drivers of biomass co-firing in U.S. coal-fired power plants (2013) *Biomass and Bioenergy*, 58, pp. 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.09.012>

449 Ahn, S., Choi, G., Kim, D. The effect of wood biomass blending with pulverized coal on combustion characteristics under oxy-fuel condition (2014) *Biomass and Bioenergy*, 71, pp. 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.014>

450 Biswas, S., Sharma, D.K. A review on the co-processing of biomass with other fuels sources (2021) *International Journal of Green Energy*, 18(8), pp. 793–811. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1880914>

451 Wu, D., Wang, Y., Wang, Y., Li, S., Wei, X. Release of alkali metals during co-firing biomass and coal (2016) *Renewable Energy*, 96, pp. 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.047>

452 Янковский С.А., Кузнецов Г.В. Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве. *Химическая технология*. 2019. №1. С. 26–33. DOI: 10.1134/S0023117719010080.

453 Froese, R.E., Shonnard, D.R., Miller, C.A., Koers, K.P., Johnson, D.M. An evaluation of greenhouse gas mitigation options for coal-fired power plants in the US Great Lakes States (2010) *Biomass and Bioenergy*, 34 (3), pp. 251–262. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.10.013.

454 Sarkar, P., Sahu, S.G., Mukherjee, A., Kumar, M., Adak, A.K., Chakraborty, N., Biswas, S. Co-combustion studies for potential application of sawdust or its low temperature char as co-fuel with coal. *Applied Thermal Engineering*. 63 (2014) 616–

623. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.069>.

455 Laougé, Z.B., Merdun, H. Investigation of thermal behavior of pine sawdust and coal during co-pyrolysis and co-combustion (2021) *Energy*, 231, № 120895. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120895.

456 Guo, F., He, Y., Hassanpour, A., Gardy, J., Zhong, Z. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal (2020) *Energy*, 197, 117147. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117147.

457 Ларина О.М., Синельщиков В.А., Сычев Г.А. Термогравиметрический анализ топливных смесей из биомассы и высокозольных углесодержащих отходов. *TBT*. 2020. Т. 58. № 5. С. 782. DOI: 10.31857/S0040364420050051.

458 Марьядышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Анализ термогравиметрических данных различных видов древесины. *XTT*. 2015. № 1. С. 59–64. DOI: 10.7868/S0023117715020085

459 Lichun, C., Chang, W., Wenyu, W., Tianyu, L., Enze, L., Haowen, L., Zexin, L. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and cofired with pulverised coal. *Renewable Energy*. 161 (2020) 867–877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.148>

460 Chunxiang, C., Yuting, H., Shengxiong, Y., Songheng, Q., Feng, C. Effect of oxygen enriched atmospheres on combustion of bagasse, coal and theirs blends by thermogravimetric analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8 (2020) 104398. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104398>.

461 Oris, C., Zhongyang, L., Chunjiang, Y. Study of the kinetic behaviour of biomass and coal during oxyfuel co-combustion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 28 (2020) 1796–1804. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.02.023>

462 Chunxiang, C., Songheng, Q., Feng, C., Ziguang, L., Zheng, C. Co-combustion characteristics study of bagasse, coal and their blends by thermogravimetric analysis. *Journal of the Energy Institute*. 92 (2019) 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.008>.

463 Chuncai, Z., Guijian, L., Xudong, W., Cuicui, Q. Co-combustion of bituminous coal and biomass fuel blends: Thermochemical characterization, potential

utilization and environmental advantage. *Bioresource Technology*. 218 (2016) 418–427. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.134>.

464 Xiang, L., Meiqian, Ch., Yuanhang, W. Assessment on oxygen enriched air co-combustion performance of biomass/bituminous coal. *Renewable Energy*. 92 (2016) 428–436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.035>

465 Vamvuka, D., Tsamourgeli, V., Zaharaki, D., Komnitsas, K. Potential of poor lignite and Biomass blends in energy production. ENERGY SOURCES, PART A: RECOVERY, UTILIZATION, AND ENVIRONMENTAL EFFECTS 2016, VOL. 38, NO. 14, 2079–2085. <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2015.1014980>

466 Yankovsky, S.A., Kuznetsov, G.V., Tolokolnikov, A.A., Cherednik, I.V., Ivanov, A.A. Experimental study of the processes of reducing the formation of sulfur oxides during the co-combustion of particles of metalignitous coal and wood processing waste (2021) *Fuel*, 291, № 120233.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120233>

467 Kuznetsov, G.V., Syrodoj, S.V., Gutareva, N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium (2020) *Renewable Energy*, 145, pp. 1474–1486.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.046>

468 Kuznetsov, G.V., Syrodoj, S.V., Kostoreva, A.A., Kostoreva, Z.A., Nigay, N.A. Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process (2020) *Fuel*, 274, № 117843.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117843>

469 Косторева Ж.А., Малышев Д.Ю., Сыродой С.В. Определение условий и характеристик зажигания частиц влажной древесины для повышения ресурсоэффективности теплоэнергетики // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 2. 97–105.

470 Namkung, H., Lee, Y.-J., Park, J.-H., Song, G.-S., Choi, J.W., Choi, Y.-C., Park, S.-J., Kim, J.-G. Blending effect of sewage sludge and woody biomass into coal

on combustion and ash agglomeration behavior (2018) *Fuel*, 225, pp. 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.109>.

471 Guo, S., Yang, Q., Liang, H., Che, D., Liu, H., Sun, B. Effect of blending sewage sludge with coal on combustion and ash slagging behavior (2019) *RSC Advances*, 9 (51), pp. 29482–29492. DOI 10.1039/c9ra04243a.

472 Ozfidan, M., Haykiri-Acma, H., Yaman, S. Co-combustion of lignite with sewage sludge and refuse-derived fuel (2019) *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38 (6), № e13307. <https://doi.org/10.1002/ep.13307>

473 Niu, S., Chen, M., Li, Y., Song, J. Co-combustion characteristics of municipal sewage sludge and bituminous coal (2018) *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1821–1834. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6716-3>.

474 Gao, F., Zhou, C., Du, J., Zhang, Y., Wu, W., Liu, G., Li, D. Effect of gaseous agents on co-combustion characteristics of sewage sludge and coal (2021) *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (5), № 106227. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106227>.

475 Ahn, H., Kim, D., Lee, Y. Combustion characteristics of sewage sludge solid fuels produced by drying and hydrothermal carbonization in a fluidized bed (2020) *Renewable Energy*, 147, pp. 957–968. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.057>.

476 Chen, G.-B., Chatelier, S., Lin, H.-T., Wu, F.-H., Lin, T.-H. A study of sewage sludge co-combustion with Australian black coal and shiitake substrate (2018) *Energies*, 11(12), № 3436. DOI: 10.3390/en11123436.

477 Wang, Z., Hong, C., Xing, Y., Li, Y., Feng, L., Jia, M. Combustion behaviors and kinetics of sewage sludge blended with pulverized coal: With and without catalysts (2018) *Waste Management*, 74, pp. 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.002>

478 Li, H., Li, Y., Jin, Y. Co-combustion Analyses of Coal and Sewage Sludge with High Moisture Content (2015) *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 37 (17), pp. 1896–1903. DOI: 10.1080/15567036.2011.648306.

479 Tatiana Kulagina, Vladimir Kulagin, and Valerii Tereshkov Development of the circumpolar territories of the Russian Federation. *E3S Web of Conferences* 295, 03007 (2021) *WFSDI 2021* <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129503007>.

480 Stracher G.B., Anupma P., Sokol E.V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. *Elsevier Science*. 2010. 63–81.

481 Кулагина Т.А., Кулагина Л.В. Теоретические основы защиты окружающей среды. Красноярск: СФУ, 2017. 362 с.

482 Bhattacharya S.C., Leon M.A., Rahman MM: A study on improved biomass briquetting. *Energy for sustainable development*. 2002. 6(2). Pp.106–110.

483 Wang R.Q. Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P Energy saving technologies and mass – thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review, *Journal of Cleaner Production*. 2020. V.274.: 122997.

484 Кузнецов Г.В., Сыродой С.В. Влияние кинетической схемы пиролиза на прогностические оценки характеристик процесса воспламенения частицы древесной биомассы. *Физика горения и взрыва*. 2019. Т.55. № 2. 82–96.

485 Абрамченко В.В. Частные дома в четырех городах переведут с угля на альтернативное топливо – URL: https://t.me/s/government_rus/2035.

486 Corella J, Sanz A. Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state. *Fuel Process Technol*. 2005. 86(9): 1021-53.

487 Radmanesh R, Chaouki J, Guy C. Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling. *AICHE J* 2006. 52(12): 4258–72.

488 Van den Enden PJ, Lora ES. Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB. *Biomass Bioenergy* 2004. 26(3): 281-7.

489 Yaman S, Sahan M, Haykiri-Acma H, Sesen K, Kucukbayrak S: Fuel briquettes from biomass-lignite blends. *Fuel processing technology*. 2001. 72: 1–8.

490 Никитин В.М. *Химия древесины и целлюлозы*. М.: Лесная промышленность, 1978. 368 с.

491 Gorton W.C., Knight J.A. Oil from biomass by entrained – flow pyrolysis. *Biotechnol Bioeng Symp.* 1984. V.14. 15–20.

492 Nunn T.R. Product composition and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood / Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A. *Ind. Eng. Proc. Des. Dev.* 1985. V.24. 836–844.

493 Гришин А.М., Синицын С.П., Акимов И.В. Сравнительный анализ термокинетических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов. *ФГВ* 1991. Т.27, № 6. 17–23.

494 Патент на полезную модель № 205015, Устройство для подготовки к сжиганию водотопливной смеси с органическими компонентами: № 2020104971; заявл. 2021.02.25. Публ. и выдача пат. 2023.06.23 / Кулагина Л.В., Енютина Т.А., Кириллова И.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

495 Кулагина Л.В. Повышение экологичности сжигания смесей в топках малого объёма за счёт включения органических компонентов / Л.В. Кулагина, И.В. Кириллова // E3S Web Conf. – Volume 295. – 2021. International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021). – DOI: 10.1051/e3sconf/202129502002.

496 Сиразетдинов, Т. К. Оптимизация систем с распределенными параметрами / Т. К. Сиразетдинов. М.: Наука, 1977. 480 с.

497 Ахмедов Р. Б. Технология сжигания горючих газов и жидкых топлив / Р. Б. Ахмедов, Л. М. Цирульников. Л.: Наука, 1984. 283 с.

498 Лавров, Н. В. Процессы горения топлива и защита окружающей среды / Н. В. Лавров, Э. И. Розенфельд, Г. П. Хаустович. М.: Металлургия, 1981. 240 с.

499 Скобло, А. И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / А. И. Скобло, И. А. Трегубова, Ю. К. Молоканов. М.: Химия, 1982. 584 с.

500 Kulagina, L.V., Kulagina, T.A. LSTM Forecasting: Time Series Forecasting to Predict Concentration of Air Pollutants (CO, SO₂, NO and NO₂) in Krasnoyarsk, Russia. *Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems: Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference 2021, Vol. 3; Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 228)*, 2021, 191–198; doi: 10.1007/978-3-030-77448-6_17.

501 Гузевский Л.Г. Численный анализ кавитационных течений, Препринт № 40–79. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979. 36 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты об использовании результатов исследования

Федеральное
государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования
«Сибирский федеральный университет»

ИНСТИТУТ АРХИТЕКТУРЫ
И СТРОИТЕЛЬСТВА
(ИАС)

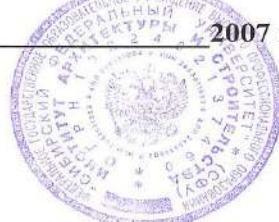
660041, г. Красноярск, пр. Свободы, 82
Телеграфный адрес: Красноярск 41,
Телефон: (8-3912) 44-69-40, 44-69-33, 52-78-06
Факс: (8-3912) 44-58-60
ОКПО 05055017
E-mail: info@kgasa.ru, www.kgasa.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор

В.Д. Наделяев

2007 г.



от _____ № _____
на № _____ от _____

АКТ о внедрении результатов диссертационной работы

Материалы диссертации Л.В. Кулагиной, касающиеся теплофизики и гидродинамики суперкавитационных течений, влияния эффектов кавитации на физические свойства воды, кавитационной обработки цементных и глинистых растворов и других строительных материалов, достаточно полно и научно обоснованно изложены в учебных пособиях:

1. Гутенев В.В., Кулагина Л.В., Русак О.Н. и др. *Экология техносфера*: учебное пособие для вузов. М.: Изд-во «Маджента», 2007. 468 с. ISBN 978-5-98156-084-3 [Рекомендовано Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Техносферная безопасность»].

2. Демиденко Н.Д., Кулагина Л.В. *Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами*: учебное пособие для вузов, Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 210 с. ISBN 978-5-7636-0411-3 [Допущено Министерством образования и науки РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Тепловые электрические станции», «Промышленная теплоэнергетика», «Энергетика теплотехнологий» направления подготовки дипломированных специалистов «Теплоэнергетика»].

Данные издания являются основной учебной литературой и широко используются в КрасГАСА в курсах лекций по дисциплинам: «Гидрофизика», «Водоснабжение промышленных предприятий» и «Водоснабжение» для студентов, обучающихся по специальностям: инженерная защита окружающей среды (в строительстве) и водоснабжение и водоотведение, направления подготовки специалистов «Строительство».

Заведующий кафедрой
«Водоснабжение и водоотведение»,
докт. техн. наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Б.Ф. Турутин

от _____ № _____
на № _____ от _____



АКТ
об использовании результатов диссертационных исследований Кулагиной
Людмилы Владимировны на тему совершенствования оборудования,
использующего суперкавитационные течения

В современных условиях эксплуатации котельных установок и различных топочных устройств при сжигании органического топлива встречается ряд проблем, которые не только влияют на надежность работы оборудования, но и приводят к перерасходу топлива, снижению технико-экономических показателей объекта, загрязнению окружающей среды и др.

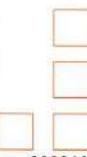
Одними из важнейших результатов, полученных в работе, являются данные о влиянии эффектов кавитации на физико-химические свойства новых видов топлив – водоугольных суспензий, водомазутной эмульсии и других водотопливных смесей, получаемых с помощью кавитационной технологии. Математические модели двухфазных суперкавитационных потоков с учетом тепломассообмена легли в основу методов расчета технологического оборудования для кавитационной обработки различных водотопливных смесей, позволяющих учесть специфику технологического процесса на стадии проектирования.

Эти результаты, а также данные о влиянии эффектов кавитации на физико-химические свойства воды, очистку стоков, оборудование для топливоподготовки и научно обоснованные технологические режимы сжигания новых видов топлив с отходами животноводства, используются на отопительных котельных Красноярского края и в Водоканале Красноярска на очистных сооружениях.

В результате внедрения предложенных мероприятий получена экономия топлива (мазута, угля) в среднем до 15 %, существенно снижены вредные выбросы в атмосферу при сжигании водотопливных смесей – в 3–4 раза уменьшается концентрация в дымовых газах окислов азота, сернистого ангидрида, окисла углерода, бенз(а)пирена и др., содержание сажи снизилось до 0,75 %.

Начальник отдела энергосбережения,
кандидат технических наук

В. К. Витер



ул. Парижской Коммуны, 41, г. Красноярск, Россия, 660049
тел. / факс: (3912) 52-87-91, 22-19-36
ОКПО 71778068, ИНН/КПП 2466114215/246601001
www.kraskom.com, e-mail: kraskom@kraskom.com

Закрытое акционерное общество
Красноярский завод минераловатных изделий
"Минвата"

660111, г. Красноярск, Промбаза
ул. Пограничников, 44/18
тел. (391-2) 56-35-44, 56-35-42
24-90-90, 28-50-10

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ЗАО КЗМИ «Минвата»

(Колокольцов Д.Г.)

2007 г.



АКТ

о практическом использовании ЗАО КЗМИ «Минвата» материалов
диссертационной работы Кулагиной Л.В.

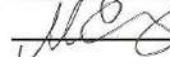
Разработка, выполненная в Красноярском техническом университете, кавитационный эмульгатор для топливоподготовки (получение водомазутной эмульсии) в соответствии с авторским свидетельством на изобретение, прошла испытание при сжигании топлива в печах полимеризации.

Эффективность внедрения:

1. Снижение расхода топлива на 6,3%.
2. Существенное снижение выбросов загрязняющих веществ (окислов азота – 15%, оксида углерода – 70%, диоксида серы – 7%, сажи – 72%).

Это дало возможность утверждать ПДВ (предельно-допустимые выбросы) на уровне окислы азота 0,45 г/с, диоксид серы – 0,56 г/с, оксид углерода – 1,56 г/с, сажа – 0,08 г/с.

Главный инженер


(Егоров М.П.)



УТВЕРЖДАЮ
Ректор КГТУ,
академик МАН ВШ,

профессор

С. А. Подлесный

30 мая 2006 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Л. В. Кулагиной, по-
священной моделированию и оптимизации процессов в технологических
печах, на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа Л. В. Кулагиной проводилась в направлении разработки методов моделирования и оптимального управления применительно к объектам с распределенными параметрами. Особое внимание уделено прикладным аспектам для процессов разделения многокомпонентных смесей и процессам тепломассообмена в промышленных установках нефтепереработки. Изложены численные методы анализа нестационарных режимов работы технологических печей и систем оптимального управления.

Результаты анализа систем с распределенными параметрами служат основой для рационального решения задач синтеза систем управления распределенными процессами в нефтехимической промышленности, достаточно полно и научно-обосновано изложены в учебном пособии:

Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами: учеб. пособие / Н. Д. Демиденко, Л. В. Кулагина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 212 с. с грифом «Допущено Министерством образования и науки РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Тепловые электрические станции», «Промышленная теплоэнергетика», «Энергетика теплотехнологии» направления подготовки дипломированных специалистов «Теплоэнергетика».

Данное пособие используется студентами четвертого курса Теплоэнергетического факультета при изучении дисциплины «Автоматизированные системы управления теплотехнологическими процессами и установками». Может быть использовано также студентами, обучающимися по специальностям «Прикладная математика» и «Системный анализ и управление».

Декан Теплоэнергетического факультета,
Красноярского государственного
технического университета,
докт. техн. наук, профессор

С. А. Михайленко

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
СФУ**

660074, Красноярск, ул. Киренского, 26

Тел.: (3912) 912-101, 44-19-02

факс: (3912) 43-06-92

E-mail: info@krgtu.ru

ОГРН 1022402137460, ОКПО 02067913

ИНН/КПП 2463011853/246331001

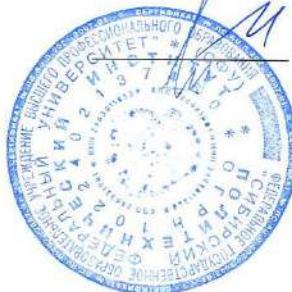
_____ № _____

На № _____ от _____

О внедрении результатов НИР

УТВЕРЖДАЮ

**Заместитель директора
по НИР профессор**



В.И. Темных

Акт

об использовании результатов докторской диссертации

Людмилы Владимировны Кулагиной «РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ»

Работа Л.В. Кулагиной посвящена актуальным проблемам ресурсосбережения и экологической безопасности в топливно-энергетическом комплексе и других отраслях производства. В диссертации получены результаты теоретического и экспериментального исследования теплофизических особенностей эффектов кавитации при обработке различных многокомпонентных сред, которые легли в основу новой, кавитационной технологии. Ее применение в промышленной теплоэнергетике, стройиндустрии, и других отраслях производства позволяет достичь существенного энергоресурсосберегающего эффекта (до 30 %).

Данные результаты, методы математического моделирования и расчета двухфазных суперкавитационных потоков и технологического оборудования, а также данные о влиянии кавитационной обработки на физические свойства воды, водных растворов, смесей, золей и гелей на протяжении многих лет используются в Политехническом институте СФУ в учебном процессе в курсах лекций, разработанных автором, лабораторных практикумах, курсовом и дипломном проектировании, проводимых Л.В. Кулагиной по дисциплинам: «Технологические выбросы промышленных предприятий», «Физика атмосферы и гидрофизика», «Теоретические основы защиты окружающей среды» и др. Материалы диссертации использованы в следующих учебных пособиях:

1. Гутенев В.В., **Кулагина Л.В.**, Русак О.Н. и др. **Экология техносфера:** учебное пособие для вузов. М.: Изд-во «Маджента», 2008. 468 с. ISBN 978-5-98156-084-3 [Рекомендовано Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Техносферная безопасность»].

2. Демиденко Н.Д., **Кулагина Л.В.** **Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами:** учебное пособие для вузов, Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 210 с. ISBN 978-5-7636-0411-3 [Допущено Министерством образования и науки РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Тепловые электрические станции», «Промышленная теплоэнергетика», «Энергетика теплотехнологий» направления подготовки дипломированных специалистов «Теплоэнергетика»].

Декан теплоэнергетического
факультета, докт. техн. наук,
профессор

 **С.А. Михайленко**



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

АЧИНСКИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИЙ ЗАВОД ВОСТОЧНОЙ НЕФТЯНОЙ КОМПАНИИ

№ 215/1 от 25.08.09 г.

АКТ

Рассмотрев предложенную работу Кулагиной Л.В. «Методы анализа динамических характеристик систем с распределенными параметрами» считаем возможным применение результатов в будущем, при создании на предприятии полномасштабной исполнительной промышленной системы управления (**MES** - системы) с целью оптимизации управления процессов ректификации и процессов горения в технологических печах.



и.о. Первого заместителя Генерального
директора - технического директора

Д.А. Мельчаков

Заместитель технического директора
по ИТ и М

В.В. Фурсов

Главный метролог

В.С. Фуфачев

тел. 8 (39158) 5-33-10
факс 8 (39151) 5-03-00, 8 (39158) 5-37-10
e-mail: sek@achnprz.ru
ИНН 2443000518, КПП 667150001, ОКПО 05747208,
ОГРН 1022401153632, ОКВЭД 23.20

662110, Красноярский край, Большевульский район, промзона №1

«ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
КРАСНОЯРСКИЙ ОПЫТНЫЙ ЗАВОД
ГОСНИТИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК»
660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 14,
тел.: 43-85-76, 43-57-42, 43-99-14, факс: 43-57-24, 43-85-76
E-mail: gosniti@g-service.ru

От “___” _____ 200 г. № _____ На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор ОНО



Акт

о внедрении научно-технического достижения

1. **Наименование научно-технического достижения** – Кулагина, Л.В. Лихачев, Д.С. *Кавитационный смеситель*, Патент на изобретение РФ № 2356611, МПК В 01 F 5/00. Заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – 2008108646/15; заявл. 05.03.2008; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. – 6 с.: ил.;
2. **Способ внедрения** – организация серийного производства
3. **Сроки внедрения** – с 2009 г. по настоящее время
4. **Источник информации** – технические проекты и рабочие чертежи, выполненные в Сибирском федеральном университете
5. **Краткое описание результатов внедрения** – освоенный в производстве кавитационный смеситель отличает малая металлоемкость, технологичность в исполнении, не высокая себестоимость, определяющая достаточно высокую ликвидность. Заказчиками продукции явились предприятия Красноярского края (ОАО «Красноярскавтодор», ОАО «Совхоз Красноярский», ОАО «Разрез Саяно-Партизанский» и др.), республики Хакасия (Копьевское ДРСУ Хакасавтодора), Омской области (НПП «ЭГДА», «Совхоз-комбинат им. 60-летия Союза СССР»).

Гл. инженер

В.Ф. Веремеев

УТВЕРЖДАЮ

Директор ОАО «Дорожно –
передвижная механизированная
колонна Красноярская»

В.Н. Суриков



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Л.В. Кулагиной
«Теоретические и методологические подходы совершенствования
кавитационных технологий в промышленной теплоэнергетике»

Разработка выполнена в Сибирском федеральном университете в плане поисковых работ. В 2024 г. разработка передана ДПМК «Красноярская» и внедрена с 20 февраля 2024 г. в составе асфальто-смесительной установки ДС-117-2Е.

Название внедренной разработки – кавитационный смеситель для топливоподготовки (получения водотопливной эмульсии).

Вид внедрения – выполнение производственных работ в качестве промышленных образцов самостоятельных технологических элементов АБЗ.

Эффективность внедрения:

- в социальной сфере улучшение условий труда;
- в политической сфере — использование отечественной разработки на высоком современном уровне науки и техники;
- в экологической сфере существенное снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду; энерго- и ресурсосбережение за счет повышения эффективности сжигания топлива и экономии энергии на его подогрев;
- в экономической сфере – экономический эффект от внедрения за 2024 год уже составил 1950 тыс. руб.; срок окупаемости внедренного комплекса мероприятий составил 3,5 месяца.

Гл. инженер
ДПМК «Красноярская»

Российская Федерация
Акционерное общество
«Красноярский институт «Водоканалпроект»

660012 г. Красноярск ул. Гладкова, 8
ИИН 2464002516 КПП 246401001
Расчетный счет № 40702810931280021146
Красноярский банк СБ РФ
Кор.счет 30101810800000000627 БИК 040407627

ген.директор: (391) 233-41-00
гл. инженер: (391) 233-40-87
тел. факс: (391) 236-15-50
e-mail: info@kvkp.ru
www.kvp.ru

06.12.24 № 400

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

В. В. Красавин

Акт

об использовании результатов диссертационного исследования

Кулагиной Людмилы Владимировны

Работа посвящена расчетно-теоретическим исследованиям на основе известных математических моделей двухфазных суперкавитационных течений. Существенной новизной отличается попытка диссертанта уточнить влияние вязкости в кавитационных течениях. Рассматривается феноменологическая модель движения кавитационного микропузырька в пространстве, структурированном микротурбулентными вихрями, то есть в условиях анизотропии переноса импульса и вещества. В результате задача сопряжения пузырька в жидкости замкнута новым реологическим уравнением. Полученное для случая динамики сферического пузырька новое решение показало более точное совпадение с результатами эксперимента и возможность его использования при проектировании очистных сооружений.

Материалов очень много, они добротны, отличаются научной новизной и представляют интерес для различных направлений науки и техники. Так, в области изменения свойств воды выявлено, что в результате гидродинамической обработки ее, существенно измененные физические характеристики сохраняются свыше 7 суток, то есть позволяют использовать в различных промышленно-технологических процессах. Экспериментально подтвержден механизм гидродинамического кавитационного термолиза воды с образованием O_3 и H_2O_2 , то есть при кавитационном разрушении материалов параллельно идут взаимосвязанные процессы кавитационной эрозии и химической коррозии. С использованием современных программных продуктов для математического моделирования процессов в экспериментальном исследовании получена модель оптимального подбора режима кавитационной обработки стока с максимально возможным эффектом очистки по множеству нормируемых показателей, таких как pH, катионы тяжелых металлов, содержание микроорганизмов, общее солесодержание и ионы Fe.

В этой связи перспективно использование нашим институтом результатов при изучении влияния криогенеза на рост микроорганизмов в условиях водозаборных сооружений ООО «КрасКом», а также метода получения пресной воды питьевого качества на основе работы суперкавитационных испарителей. Этот метод исключает существенные недостатки термического метода орошения, такие как высокая степень накипеобразования, малая энергонапряженность поверхности теплообмена, большие габариты.

Главный специалист
технологического отдела

Леонид

Сарнауская Т.А.