

На правах рукописи



**Левин Анатолий Алексеевич**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ В УСЛОВИЯХ  
ИНТЕНСИВНЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

**Официальные оппоненты:** **Кузнецов Гений Владимирович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет», Научно-  
образовательный центр И.Н. Бутакова, профессор

**Мусакаев Наиль Габсалямович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Тюменский филиал Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
теоретической и прикладной механики им. С.А.  
Христиановича Сибирского отделения Российской  
академии наук, директор

**Решетников Александр Васильевич**  
доктор физико-математических наук, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики Уральского отделения  
Российской академии наук, лаборатория фазовых  
переходов и неравновесных процессов, ведущий  
научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский  
государственный университет», г. Томск

Защита состоится «25» июня 2024 г. в 9 час. 00 мин. на заседании диссертационного  
совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского  
отделения Российской академии наук, по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова,  
130.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033,  
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН:  
<https://isem.irk.ru/disser2/case/DIS-2024-2>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные  
печатью организации, просим направлять по адресу диссертационного совета: 664033,  
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.118.01,  
доктор технических наук, доцент



**Солодуша**  
**Светлана Витальевна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие энергетики ставит одной из основных задач обеспечение безаварийной, устойчивой работы соответствующего оборудования, в том числе теплонапряженных устройств и агрегатов с изменяющимся фазовым состоянием рабочих жидкостей. Несмотря на повышающиеся возможности осуществления прямого наблюдения за процессами как на существующих агрегатах, так и на специализированных стендах в рамках натурального физического эксперимента, ведущую роль для решения указанной задачи выполняют математические модели и их практические реализации в виде программных комплексов различного назначения. Нельзя не отметить наличие пределов использования аппарата численного моделирования, так как настоящее состояние исследований в области турбулентности и двухфазного теплообмена не позволяет полагаться на теоретические описания в области высоких значений чисел Рейнольдса и Рэлея. Поэтому при разработке новых технических решений или при выполнении оценок для обеспечения высокого уровня надежности работы существующего оборудования принято опираться как на математическое моделирование, так и на элементы физического эксперимента. Последний выступает не только инструментом для качественного понимания особенностей протекающих процессов, но и в виде фундамента для многих моделей, так как служит источником эмпирических данных.

Основной тренд в построении современных программных средств в описываемой области направлен на улучшение точности результатов расчета, достигаемое уточнением некоторого набора коэффициентов математических моделей на основе новых экспериментальных сведений, получаемых в ограниченном диапазоне режимных условий. При этом количество теоретических моделей, описывающих переходные состояния при кипении или химических реакциях в процессах пиролиза, увеличивается с каждым годом. Возникшее в результате этих тенденций неравенство между численными реализациями математических моделей и их неотъемлемой основой – эмпирическими сведениями о сложных процессах, становится причиной возросшего внимания к качеству разрабатываемого программного обеспечения. До начала XXI века мощность вычислительных средств и, как следствие, размеры и сложность программных реализаций ограничивали возможности применения подробных математических моделей динамических процессов, связанных с фазовыми переходами, принуждая исследователей и инженеров-разработчиков использовать усеченные представления, в том числе и аналитические решения с априорно принимаемыми допущениями, зачастую довольно существенными. В настоящее время разработка аппарата численных методов, их реализация и сочетание с актуальными задачами теплофизики уже успешно решается в рамках разработки коммерческих программных сред, на основе которых возможна реализация широкого

спектра практических задач. Задачи поиска компромисса между несовершенством используемых эмпирических сведений, неполнотой теоретических описаний исследуемых процессов, а также выбором оптимальных численных реализаций остаются по-прежнему методически не решенными. Таким образом, важнейшие направления исследований динамики энергетического оборудования неразрывно связаны с созданием, модернизацией и многосторонним применением математических моделей процессов, связанных с фазовым превращением рабочих тел. Актуальность темы диссертационного исследования заключается в назревшей необходимости развития подходов к математическому моделированию таких процессов, включая использование эмпирических сведений – результатов физического эксперимента, и обобщение данных, полученных из множества источников, а также реализации численных алгоритмов в виде программных средств.

**Степень изученности и разработанности проблемы.** В обширном спектре исследований, посвященных как экспериментальному изучению процесса кипения, представленному в недавних работах Kim H. (2018), Goel P. (2018), Zhang Y. (2019) и др., так и аспектам его моделирования: Colombo M. (2015), Giustini G. (2018), Sato Y. (2017), Urbano A. (2018), лишь малая часть работ посвящена постановке задачи с нестационарным теплообменом: Bergez W. (2017), Ягов В.В. (2015), Павленко А.Н. (2020). Анализ вышеприведенных исследований позволяет прийти к очевидному выводу – на сегодняшний день отсутствует возможность единого методического подхода к построению математических моделей для описания процессов с интенсивным межфазным взаимодействием, особенно в условиях с наличием существенных тепловых потоков. Не последнюю роль в этой задаче играет существенный недостаток эмпирических сведений, вызванный обилием граничных условий, при которых осуществляется физический эксперимент. Несмотря на обилие выполненных исследований, представленных в работах Mikic B.B. (1970), Griffith P. (1957), Gunther F.C. (1951), Толубинского В.И. (1980), Prodanovic V. (2002), интерес к указанной тематике не иссякает. Из вышедших за последние годы, можно упомянуть как отдельные публикации, так и серии работ Song C.-H. (2011–2018), Situ R. (2008) и др. авторов. При этом, как показано в работе Chu I.-C. (2011), условия проведения экспериментов различаются в такой степени, что обобщенные по безразмерным параметрам тепловые потоки, скорости движения жидкости, давления и температуры часто образуют непересекающиеся области. Таким образом, существует проблема охвата поля исследований как теоретическим аппаратом, так и первичными, полученными путем физического эксперимента, данными.

Для описания движения сред, участвующих в тепломассообменных процессах, используются разнообразные подходы, наиболее теоретически обоснованные из которых опираются на решение уравнения Навье-Стокса. Известные трудности, вызванные невозможностью получить аналитическое

решение в общем виде, разрешаются самым разнообразным способом. Прямое решение законов сохранения на достаточно мелкой расчетной сетке для описания мелкомасштабных вихрей на текущий момент развития вычислительных средств доступно для относительно невысоких значений  $Re$ . При этом наибольший практический интерес обычно представляют задачи с развитым турбулентным течением. Проблема невозможности воспроизведения истинной картины течения жидкости при наложении разнообразных техник усреднения: RANS – Колмогоров А.Н. (1942), Chou P. (1945), Wilcox D.C. (1993) и др.; LES – Smagorinsky J. (1970), Sagaut P. (2001) и др., по всей видимости, теоретически непреодолима. Вводимые авторами многих подходов дополнительные замыкающие соотношения приводят к уменьшению степени достоверности разработанных моделей без предварительной настройки для каждой отдельной реализации. Отдельного упоминания здесь заслуживает проблема описания движения сред, для которых необходимо учитывать взаимодействие между фазами. К вышеупомянутой проблеме перегруженности математических моделей эмпирическими формулами добавляются новые замыкающие соотношения, описывающие свойства двухфазного потока в виде дополнительных моделей.

Существенно в большей степени достоверно описывает течение сред в крупных элементах энергетических установок теория гидравлических цепей, разработанная в стенах ИСЭМ СО РАН (работы Меренкова А.П., Новицкого Н.Н. и др.) и получившая распространение в ряде других работ, например, Шашков О.К. (2004), группа Tischendorf С. с 2007 и по настоящий момент. Представление задачи потокораспределения в алгебраической форме, разумеется, не позволяет получить детальную трехмерную картину поля скорости, однако во многих инженерных приложениях такая детализация и не требуется. Поиск замыкающих соотношений в такой укрупненной постановке сводится к легко разрешаемой с вычислительной точки зрения задаче, позволяя получать достоверные результаты. Развитию методов теории гидравлических цепей применительно к задачам, требующим описания движения реагирующих сред либо с интенсивными фазовыми переходами, уделено внимание и в работах автора диссертации.

Описание процессов трансформации вещества, протекающих в перспективных энергетических установках, является задачей еще большего порядка сложности, так как к проблеме определения полей температур и скорости среды добавляется необходимость описания химических реакций. На сегодняшний день практически полезными оказываются лишь самые упрощенные теоретические описания этих, зачастую каскадных, взаимодействий, характеризующихся существенно различными постоянными времени. К таким подходам относится представление в виде уравнения Аррениуса, связывающие скорость химической реакции и температуры вещества на основе идеи необходимости преодоления энергетического барьера. Широкий перечень исследований, среди которых можно упомянуть результаты

Font R. (1990), Gorton W.C. (1984), Wagenaar B.M. (1994), основан на измерениях процесса разложения частиц древесины с целью поиска предсказательных зависимостей в виде факторов частоты и энергии активации. Помимо фактора температуры, на результаты исследований оказывали существенное влияние тип древесины, размер и форма частиц, что привело к различию в коэффициентах уравнения Аррениуса, исчисляемому порядками. Отдельные успешные результаты численного моделирования технологии, основывающейся на применении низкосортного твердого топлива в энергетических целях, получены в работах Marathe P. (2019) и Di Blasi C. (2008). Однако в упомянутых работах рассматриваются малоперспективные конструкции с одноступенчатой схемой переработки топлива.

Таким образом, при решении многих задач описания тепломассообменных процессов в энергетических установках имеются трудности как теоретического характера, что вызывает необходимость применять полуэмпирические модели с настраиваемыми коэффициентами, так и проблема обобщения эмпирических сведений, из-за невозможности охвата всех возможных сочетаний граничных условий. При возникновении необходимости обеспечения инженерных разработок до сих пор распространен подход прототипирования разрабатываемого объекта, что свидетельствует о необходимости комплексных работ – теоретических, экспериментальных, а также изучении аспектов разработки и применения аппарата математического моделирования.

**Цель диссертации** — разработка и развитие методов математического моделирования, построения численных алгоритмов и программного обеспечения, для описания процессов интенсивных фазовых переходов в нестационарных условиях, в том числе химической трансформации вещества с существенной нелинейностью температурных полей.

**Основные задачи исследования.** Для достижения цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- Развитие методов математического моделирования процессов с интенсивными фазовыми переходами применительно к ряду практических задач в двумерной динамической или трехмерной стационарной постановке.
- Разработка методики обработки данных по кипению применительно к построению замыкающих соотношений модели кипения в частности и к моделированию динамического состояния оборудования в целом.
- Разработка, реализация и анализ результатов численного моделирования процессов нестационарного нагрева, образования, роста и деградации паровой фазы в окрестности оптоволоконного проводника лазерного излучения, выделяемого в недогретую жидкость, сопровождающихся образованием кумулятивной струи.

**Объектом исследования** являются имитационные модели процессов интенсивных фазовых трансформаций вещества в энергетических установках, в том числе в форме численного и аналитического представления.

**Предметами исследования** являются математические методы, вычислительные алгоритмы и программные средства моделирования тепло-массообменных процессов, связанных с изменением фазового состояния вещества или химической трансформацией.

**Методология и методы исследования**, используемые в работе, базируются на современных развитых методах численного интегрирования дифференциальных уравнений динамики, теории гидравлических цепей, статистических методов анализа данных, а также на подходах к разработке современного программного обеспечения с целью создания имитационных моделей или инструментов для научного исследования в виде комплексов программ.

**Научная новизна работы** заключается в создании, модификации и исследовании подходов и моделей описания процессов с резко изменяющимися характеристиками вещества, в том числе химической трансформацией. Значительная часть решаемых задач базировалась на впервые полученных сведениях о протекании нестационарных процессов в присутствии высоких тепловых потоков. Уникальность полученных результатов в целом определяется следующим:

1. Разработан универсальный подход к формированию математических моделей пузырькового кипения, основанный на обоснованном способе усреднения геометрических характеристик пузырей пара при кипении на теплоотдающих технических поверхностях. Показано, что использование расчетных описаний для предсказания характеристик пузырей зависит от цели их использования в математических моделях переходных процессов. Учет этого целеполагания позволил расширить диапазон применимости получаемых замыкающих соотношений для использования при построении динамических моделей.
2. Разработаны математические модели нестационарного состояния пристенного слоя жидкости в условиях резко растущей температуры твердой поверхности. Выполнена апробация и верификация этих моделей для спектра граничных условий: начальной температуры жидкости, скорости роста температуры, скорости движения жидкости.
3. Предложен оригинальный подход к обработке результатов экспериментов с подстройкой коэффициентов математических моделей, учитывающих индивидуальные особенности источников эмпирических сведений, и обеспечивающий минимизацию как средней, так и максимальной погрешности замыкающих соотношений, как части математических моделей.
4. Разработаны, исследованы и реализованы математические модели термической конверсии частиц твердого топлива в перспективных установках по газификации.
5. Разработаны численные модели для описания условий выделения энергии в локализованных объемах жидкости с последующим фазовым пе-

реходом, на основании которых доказано существование единого механизма формирования направленных кумулятивных струй при лазерном нагреве.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод учета компонент теплового потока в математических моделях, учитывающий мелкомасштабные механизмы пузырькового кипения в задачах с нестационарным теплообменом без ограничения на температуру жидкости на основе интерпретации экспериментальных сведений.
2. Результаты численного исследования задач моделирования нестационарного теплообмена в условиях кипения недогретой жидкости в каналах энергетических установок.
3. Методика и программная реализация комплексного расчета технологии термохимической конверсии низкосортного твердого топлива, включающая теплообмен, газодинамику и кинетику химических реакций в виде одностадийного приближения.
4. Методический подход к построению математических моделей теплофизического профиля, обладающих высокой степенью зависимости от эмпирических сведений.
5. Численные алгоритмы и методы расчета потокораспределения в газоздушных и пароводяных трактах энергетических установок, применительно к задачам имитационного моделирования динамических процессов в масштабе реального времени.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационное исследование соответствует следующим направлениям паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

3. *Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.* Положение диссертационной работы №5.
4. *Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели.* Положения диссертационной работы №№ 1, 3 и 5.
6. *Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей.* Положения диссертационной работы №№ 3 и 5.
8. *Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.* Положение диссертационной работы № 2.
9. *Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий.* Положение диссертационной работы № 2.

Диссертационное исследование содержит результаты из трех областей специальности:



1. *Математическое моделирование.* Разработаны новые математические методы и подходы к интерпретации результатов натурального эксперимента используемых при построении математических моделей процессов с интенсивными фазовыми переходами.
2. *Численные методы.* Разработаны новые численные методы для решения задач потокораспределения в трактах энергоустановок, обработки исходных данных натурального эксперимента.
3. *Комплексы программ.* Полученные результаты в области разработки математических моделей реализованы в виде комплексов имитационного моделирования либо комплексов программ для проведения вычислительных экспериментов.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, их соответствию исследуемым процессам, соответствию теоретическим представлениям в предметной области, а также верификацией на экспериментальных результатах, полученных различными исследовательскими группами.

**Теоретическая значимость** работы состоит в том, что она вносит вклад в развитие методологии построения и реализации математических моделей для широкого круга быстропротекающих процессов, в частности кипения жидкостей, химической трансформации веществ и движения сред в системах с сильными изменениями свойств потоков. Обосновывается общность и неразрывный характер сочетания задач разработки математических моделей, выбора методов обобщения эмпирических данных, а также численной реализации.

**Практическая ценность работы** состоит в разработке методов построения математического обеспечения имитационных моделей процессов, протекающих в оборудовании теплоэнергетического профиля, сопровождающихся значимыми фазовыми трансформациями. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ ИСЭМ СО РАН по программам СО РАН Ш.17.1. «Методы и модели исследования и оптимизации инновационных энергетических процессов и установок», Ш.17.1. «Системный анализ инновационных энергетических технологий», раздел Ш.17.1.3. «Исследование переходных процессов в энергоустановках при фазовых превращениях в теплоносителе методами физического эксперимента и математического моделирования», а также по грантам Российского фонда фундаментальных исследований и Российского научного фонда.

**Апробация работы.** Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты неоднократно обсуждались на научных конференциях и семинарах. В их число входят следующие:

- международные конференции:

International Conference on Computational Science ICCS 2021, Amsterdam, The Netherlands, 3-5 June, 2020; XI, XII и XIII International Conferences on Computational Heat and Mass Transfer, 2018 г. (Краков, Польша), 2019 г. (Рим, Италия), 2020 г. (Париж, Франция); 5<sup>th</sup> International Workshop on Heat-Mass Transfer advances for energy conservation and pollution control (IWHT), 2019, Новосибирск; 14<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2019, Виклоу, Ирландия; 16th International heat transfer conference (ИНТС), Пекин, Китай, 2018; The Third Mongolia-Russia-Vietnam Workshop on Numerical Solution of Integral and Differential Equations (NSIDE 2018), 2018, Ханой, Вьетнам; First Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS), Чеджу, Южная Корея, 2017 г.;

• всероссийские конференции:

«Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 2020 г., 2017 г.; «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта/Севастополь/Сочи, 2016–2022 гг.; Сибирский теплофизический семинар, Новосибирск, 2010–2022 гг.; Российская национальная конференция по теплообмену, Москва, 2010 г., 2014 г., 2018 г., 2022 г.; Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических установках», 2009 г. (г. Жуковский), 2011 г. (г. Звенигород), 2013 г. (г. Орехово-Зуево).

**Основные результаты работы получены при поддержке грантов РФФИ, РНФ и других организаций:**

Гранты РФФИ: №№ 09-08-00201; 15-01-01425; 18-29-10019; 19-58-80016;

Грант РНФ: №№ 16-19-10227; 19-19-00122; 22-19-00092; 23-29-00628;

Интеграционный проект СО РАН, №2 (2012-2014 гг.);

Грант Президента РФ по поддержке молодых ученых – кандидатов наук.

**Реализация результатов работы.** Материалы и результаты диссертационного исследования использовались при выполнении поисковых и научно-исследовательских работ в рамках темы системного анализа инновационных энергетических технологий, а также при выполнении совместных работ с внешними организациями, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

**Публикации по теме диссертации.** Основное содержание диссертации с достаточной полнотой изложено в 35 научных статьях, из них 20 — в рецензируемых журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научной специальности 1.2.2. (технические науки), среди которых 20 – из категорий К1 и К2. Из перечня работ Левина А.А. 18 опубликовано в журналах, индексируемых в международных базах данных, а 15 – в трудах конференций, индексируемых в международных базах данных. Получено 5 авторских свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Основной текст содержит 291 страницу, в том числе 108 Рисунков, 11 таблиц. Список литературы насчитывает 220 наименований. В приложениях приведены опытные данные, полученные в результате применения разработанных алгоритмов (Приложение А), иллюстративные материалы (Приложение Б), сведения об апробации и применении результатов исследования (Приложение В и Г).

**Личный вклад автора.** Текст диссертационной работы не содержит заимствований без ссылок на первоисточники, а также результатов исследований, выполненных в соавторстве, без соответствующего упоминания авторов. Все научно-методические результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно, либо под его научным руководством и/или при непосредственном участии. В частности, постановки задач выполнены автором самостоятельно, обработка экспериментальных данных – совместно с к.ф.-м.н. Хан П.В., Сафаровым А.С., к.т.н. Козловым А.Н., к.т.н. Алексеюком В.Э.; работы по математическому моделированию – совместно с академиком РАН Гузевым М.А., д.т.н. Таировым Э.А., д.ф.-м.н. Чистяковым В.Ф., д.ф.-м.н. Черновым А.А., д.ф.-м.н. Актершевым С.П., к.т.н. Козловым А.Н., д.б.н. Чудновским В.М.; вычислительные работы – совместно с к.ф.-м.н. Хан П.В., Сафаровым А.С.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и предмет исследования. Представлены выносимые на защиту положения, изложено краткое содержание разделов диссертации и приведены сведения об основных публикациях.

**В первой главе** работы дан обзор научной литературы за последние десятилетия, отражающий известные исследования и результаты других ученых, работающих в области создания предсказательных моделей в области кипения. Основная цель **параграфа 1.1** – описание предметной области математического моделирования физических систем в условиях протекания фазовых превращений на основе законов сохранения. Решение задачи математического описания с последующим построением предсказательных моделей процессов, сопровождающихся интенсивным фазовым превращением вещества, является уже довольно длительное время предметом приложения усилий множества исследователей. Практическую привлекательность реализации этих процессов с одной стороны, а с другой стороны критическую важность достижения контроля за такими процессами в виду возможности развития аварийных сценариев можно иллюстрировать разнообразными примерами. В рамках настоящей диссертационной работы рассматривались задачи моделирования тепломассопереноса с интенсивными фазовыми превращениями для таких физических систем, как:

- 1) металлический нагреватель, передающий тепловую энергию в жидкость в широком спектре граничных условий;
- 2) перспективная технология по переработке низкосортного твердого топлива на основе термохимической трансформации вещества;
- 3) лазерные технологии для создания направленного воздействия потоком разогретой струи жидкости;
- 4) тракты тепловых электрических станций, с необходимостью решения в масштабе реального времени задачи имитационного моделирования работы оборудования.

Для каждой из этих задач был выбран оптимальный вид математических моделей, с учетом целесообразности определения положения межфазной границы и разрешения массообменных процессов в ее пределах для практического применения. Так, гомогенное представление процесса было выбрано для первой и второй задачи; гетерогенное описание использовалось в третьей задаче, а решение четвертой задачи после применения декомпозиции общей математической модели обеспечивалось алгебраическими зависимостями.

**В параграфе 1.2** раскрывается проблема использования замыкающих соотношений к вышеуказанным моделям. Несмотря на наличие различной степени теоретической обусловленности, ни одно из замыкающих соотношений не может быть выражено в виде точного аналитического решения. Неполнота такого теоретического понимания взаимосвязи между вспомогательными параметрами и основными характеристиками математической модели (температуры, скорости и т.д.) приводит к необходимости использования аппроксимаций некоторых эмпирических сведений. Экспериментальное определение размеров пузырей и других характеристик пузырькового кипения в недогретой жидкости было осуществлено еще в работах Mikic, Griffith, Gunther (1951), Толубинского В.И. (1980) и др. К настоящему моменту, несмотря на существенный объем уже имеющихся экспериментальных исследований, интерес к получению новых данных не исчезает, что отражено в работах Chu (2017), Situ (2008), Prodanovic, Павленко А.Н. и др. Одной из причин этого является необходимость улучшения высокопроизводительных коммерческих вычислительных пакетов, применяемых для решения инженерных и научных задач гидродинамики и теплообмена. Как можно видеть в работе Chu (2011), режимные условия полученных в различных работах данных различаются в такой степени, что обобщенные по безразмерным параметрам тепловые потоки, скорости движения жидкости, давления и температуры часто образуют непересекающиеся области. Используемые при этом обобщения уточняются на все большем объеме экспериментальных данных, однако остаются недостаточными в силу большого количества возможных комбинаций режимных параметров.

Нестационарность полей температуры и скорости существенно влияет на протекание процессов, сопровождаемых межфазными переходами. При

этом, характеристики этих процессов могут зависеть от уровня нестационарности, как показано на примере плотности центров нуклеации, могут чувствовать слабо или вообще не чувствовать изменения во времени основных характеристик тепломассообменных процессов, а могут и вовсе не подчиняться даже виду зависимостей, полученных при обобщении опытных данных, извлекаемых из результатов экспериментального исследования в условиях статических тепловых потоков или температур. Последний случай ярко демонстрируется предсказательными моделями максимального/отрывного диаметра пузыря, которые, как показали исследования автора, не способны успешно пройти валидацию на результатах опытов с нестационарным тепловыделением в вертикальном течении недогретой до температуры кипения воды.

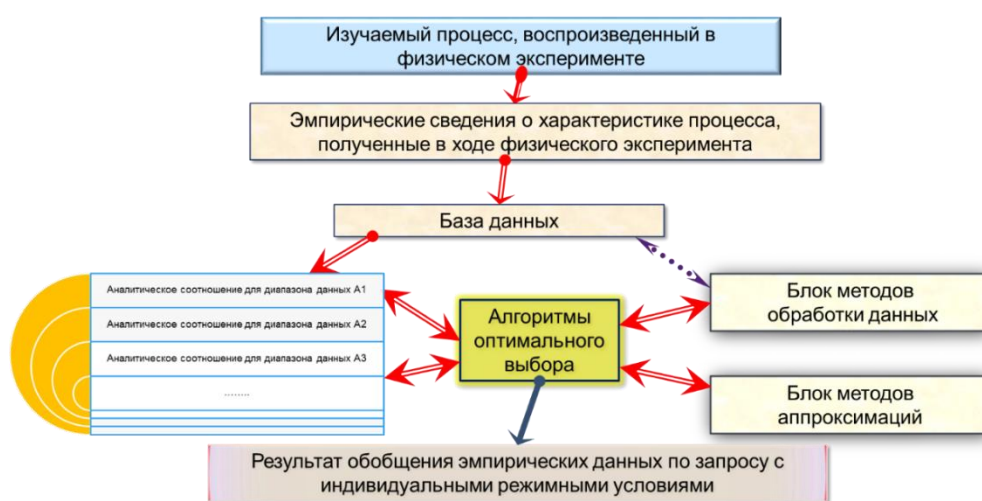


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма поиска замыкающих соотношений при извлечении эмпирических сведений из результатов физических экспериментов

Анализ проведенных в рамках диссертации исследований, посвященных моделированию процессов термохимической конверсии твердого топлива, показал необходимость интеграции экспериментальных исследований с разработкой математических моделей. В текущем состоянии методологии научных исследований у разработчика математических моделей практически отсутствует возможность доступа к первичным, необработанным результатам экспериментальных работ. Особенности реализаций нестационарных и/или теплонапряженных процессов, сопряженных с фазовыми трансформациями вещества, порождают необходимость создания нового подхода к подготовке обобщающих зависимостей для замыкающих соотношений, являющихся ключевыми характеристиками. Такой подход требует реализаций результатов физических экспериментов в виде комплекса библиотек, включающих в себя методы обработки данных, их обобщений и возможности гибкого доступа к исходным эмпирическим результатам (Рисунок 1).

Особому случаю взаимодействия фаз, а именно – тепломассообмену в системах с химической трансформацией веществ, посвящен **параграф 1.3**. Численное моделирование таких процессов представляет собой задачу повышенной сложности, так как сочетает в себе подзадачи определения полей скорости и температуры с подзадачей реализации моделей химических реакций. Трансформация вещества в условиях существования тепловых потоков большой плотности в еще большей степени усложняет рассматриваемую проблему. В диссертации рассмотрены основные подходы к решению таких задач и нерешенные проблемы, существующие в настоящий момент.

**В параграфе 1.4** диссертации описываются подходы к усреднению характеристик процессов, применяемые в разнообразных практических реализациях обобщений. Проведен анализ использования эмпирических сведений при построении математических моделей процессов с интенсивными фазовыми превращениями. Показана неизбежная необходимость создания нового подхода к передаче исходных данных, получаемых в ходе физического эксперимента, объединение их с метаданными, методами обобщения и возможностью интерактивного взаимодействия с полученной системой при построении математических моделей. Рассмотрены вопросы применения методов машинной обработки данных, отмечено широкое распространение таких подходов для обобщения эмпирических сведений, что, тем не менее, не решает принципиальную проблему необходимости логически увязывать методы обработки таких сведений с задачами разрабатываемых математических моделей. **В параграфе 1.5** рассмотрены известные на сегодняшний день результаты использования методов искусственного интеллекта для задач моделирования межфазных взаимодействий.

**Во второй главе** диссертации представлены разработанные автором модели кипения недогретой жидкости и результаты численного моделирования. Вступительный **параграф 2.1** посвящен описанию особенностей пузырькового кипения недогретой жидкости в условиях нестационарного тепловыделения. В настоящий момент успешно разрабатываются численные коды, основанные на предположениях о постоянстве теплового потока или температуры греющей поверхности. При этом, в виду невозможности охвата всех возможных условий кипения, разработанные коды опираются на полуэмпирические модели при определении характеристик пузырькового кипения. На основе представленного обзора текущего состояния в области моделирования пристенного пузырькового кипения сделан вывод о необходимости количественного учета взаимодействия центров парообразования на основе расчета математической модели теплового баланса отдельного пузырька.

В параграфе 2.2 описывается разработанная в рамках диссертации численная модель пузырькового кипения в условиях нестационарного роста температуры теплоотдающей поверхности. При рассмотрении задачи нестационарного пузырькового кипения представляет особый интерес использование технических поверхностей, обладающих умеренной шероховатостью. В работах автора диссертации были использованы первичные сведения о динамике максимальных диаметров пузырьков в условиях нестационарного теплового потока. Для расчета температурных профилей и тепловых потоков была использована гомогенная модель течения жидкости вокруг теплоотдающей цилиндрической трубки (Рисунок 2). Результаты сопоставления экспериментальных данных с предсказаниями по Song, Prodanovic продемонстрировали несостоятельность применения аналитических подходов.

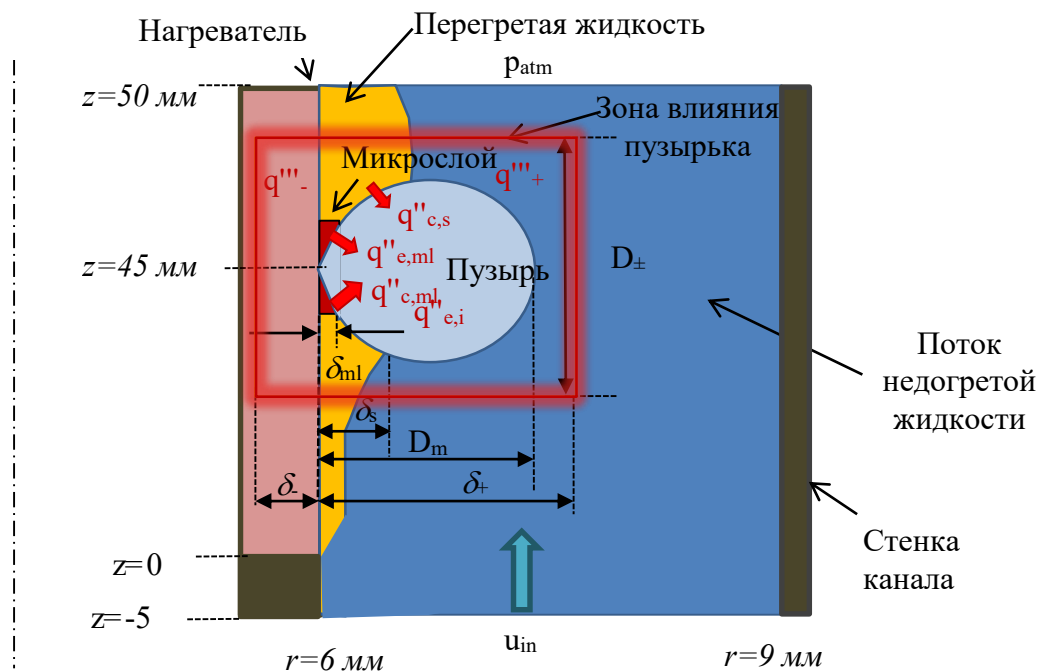


Рисунок 2 – Модель пузырька для численного анализа:  $q''_{e,i}$  – тепловой поток первоначального испарения,  $q''_{e,ml}$  – тепловой поток испарения микрослоя,  $q''_{c,ml}$  – тепловой поток теплопроводности микрослоя,  $q''_{c,s}$  – тепловой поток теплопроводности перегретого слоя,  $q'''_{-}$  – отрицательный источник тепла в металле,  $q'''_{+}$  – положительный источник тепла в воде

Система дифференциальных уравнений, описывающая сопряженную задачу теплообмена в условиях принудительного движения жидкости, дополняется замыкающими соотношениями для теплообмена с пузырьками на поверхности. Тепловой поток пузырька состоит из тепловых потоков начального испарения пузырька  $q_{ei}$ , испарения микрослоя  $q_{eml}$ , теплопроводности микрослоя  $q_{cml}$ , теплопроводности перегретого слоя  $q_{cs}$ :

$$q_b = q_{ei} + q_{eml} + q_{cml} + q_{cs}. \quad (1)$$

Эти компоненты теплового баланса определяются следующим образом:

$$q_{ei} = h_{lg} \rho_g \frac{\pi D_m^3}{6} f N_a, \quad (2)$$

$$q_{eml} = h_{lg} \rho_l \delta_{ml} \frac{\pi D_{ml}^2}{6} f N_a, \quad (3)$$

$$q_{cml} = \frac{N_a \pi k_l (T_w - T_s) D_{ml}^2}{4 \delta_{ml}}, \quad (4)$$

$$q_{cs} = N_a \int_{r_w + \delta_{ml}}^{r_w + \delta_s} k_l (T_w - T_s) \pi \left( \frac{D_m}{r - r_w} - 2 \right) dr, \quad (5)$$

где  $D_{ml}$  – диаметр микрослоя;  $h_{lg}$  – скрытая теплота;  $T_w$  – температура поверхности;  $T_s$  – температура насыщения;  $D_m$  – максимальный диаметр пузыря;  $k_l$  – теплопроводность;  $N_a$  – плотность зарождения;  $f$  – частота нуклеации;  $\rho$  – плотность;  $\delta_s$  – толщина слоя перегретой жидкости;  $\delta_{ml}$  – толщина микрослоя;  $l$  – жидкость;  $g$  – пар.

В параграфе 2.3 детально рассмотрены результаты численного моделирования нестационарного пограничного слоя жидкости при пузырьковом кипении. Плотность центров нуклеации для нестационарного случая была удовлетворительно предсказана следующей корреляцией:

$$N_a = 10^6 \cdot [\exp(0,14(T_w - T_{ONB}) - 1)]. \quad (6)$$

Область влияния  $F_b$ , в пределах которой уравнение (1) отвечает за учет теплового баланса в пристеночном слое жидкости, определяется как часть тепловой поверхности, полностью покрытая пузырьками диаметром  $D_m$ :

$$F_b = \frac{\pi}{4} N_a D_m^2. \quad (7)$$

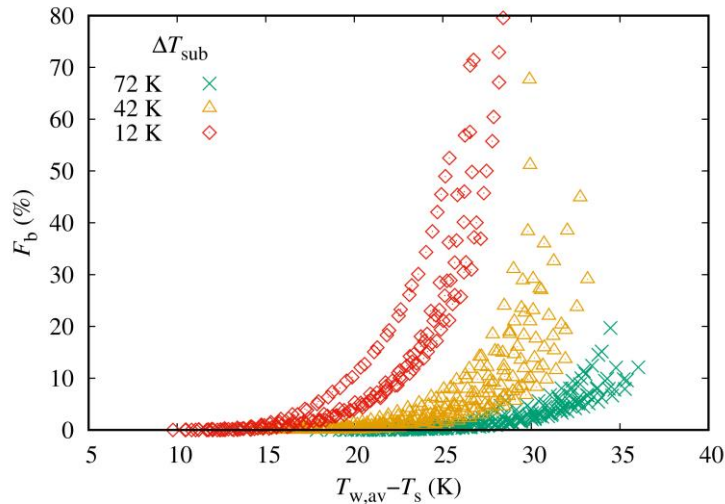


Рисунок 3 – Зависимость площади поверхности нагревателя, покрытой паровой фазой для различных уровней перегрева стенки выше температуры насыщения и начального недогрева жидкости

На Рисунке 3 представлено влияние температуры жидкости и поверхности нагревателя на площадь поверхности с пузырьковым кипением. Увеличение  $\Delta T_{sub}$  с 12 К до 72 К приводит к снижению  $F_b$  с 80% до 20%. Экспоненциальный характер зависимости площади воздействия от температуры стенки отражается формулой (6). Значительное уменьшение доли покрытой



паром поверхности нагревателя должно уменьшить роль составляющих теплового баланса (2)–(5) при понижении начальной температуры жидкости  $T_0$ . В диссертации рассмотрено влияние величины теплового потока на отдельные компоненты теплового баланса при различных уровнях недогрева жидкости до температуры насыщения.

**В параграфе 2.4** осуществлена проверка возможности применения аналитического подхода к расчету теплообмена между твердой поверхностью и недогретой жидкостью при растущем тепловом потоке. Аналитически полученные значения теплового потока сопоставлялись с результатами численных расчетов, детально учитывающих влияние паровой фазы на теплоперенос при наличии высоких температурных градиентов. Показано, что даже в грубом приближении при задании характеристической длины произвольной постоянной прослеживается приемлемая корреляция между аналитическими и численными результатами. Однако значение характеристической длины в этом случае является ничем иным, как настраиваемой характеристикой с сомнительным физическим содержанием.

Модель пристенного нестационарного пузырькового кипения была применена для объяснения причин немонотонного влияния скорости потока на характеристики кипения (**параграф 2.5**). Общий объем использованных данных экспериментальных исследований имеет следующую статистику: количество индивидуальных экспериментов составило 55; количество выбранных видеок кадров, показывающих кипение жидкости, составило 800, общее количество обнаруженных пузырьков – около 50000. Результаты определения начального момента паровой фазы хорошо согласуются с существующими моделями. Это позволяет сделать вывод об успешности проведенных численных расчетов, так как они послужили основой для определения температуры поверхности нагревателя. Контурные перегрева жидкости, показанные на Рисунке 4, позволяют более детально оценить влияние скорости потока на кипящую воду. С увеличением скорости происходит перемешивание жидких областей с разной температурой, что иногда приводит к преобладанию принудительной конвекции над силами плавучести. Начальным условием возникновения таких неоднородностей является образование пузырьков пара на поверхности металла. Интенсивный теплоперенос жидкости в окрестности центра зародышеобразования усиливает образование новых пузырьков и вызывает увеличение их максимального размера. Эффективность этой интенсификации, по-видимому, ограничивается уносом нагретых объемов жидкости за пределы окрестности пузыря. Таким образом, численные расчеты показали, что объем пара, образующийся при развитии пузырькового кипения, немонотонно зависит от скорости жидкости и этот факт связан с теплопередачей, происходящей между центрами парообразования. Первичные центры зародышеобразования являются «донорами» тепла ближайшим центрам, потенциально готовым к образованию пузырьков. С увеличением скорости жидкости этот эффект нивелируется за счет

подавления первичных центров зародышеобразования, где эффективная передача тепла от металла к жидкости уменьшается. Связь между скоростью роста пузырьков и явлением усиления теплопередачи была обнаружена для скорости потока около 0,4 м/с. Сопоставление с результатами экспериментальных исследований показало наличие 10% относительной погрешности в корреляции между скоростью роста пузырька и критической скоростью потока.

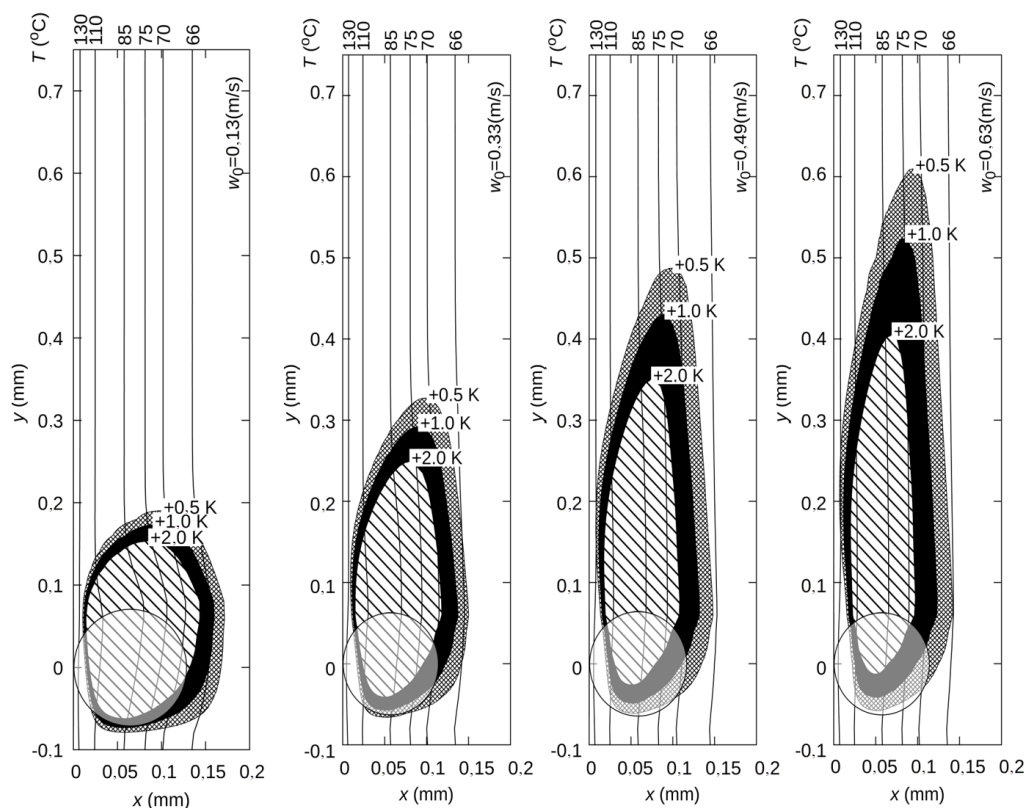


Рисунок 4 – Результаты численного моделирования кипения воды на поверхности нагревателя через 116 мс после начала тепловыделения при недогреве до температуры насыщения 120 К и различной начальной скорости: а)  $w_0 = 0$  м/с; б)  $w_0 = 0,35$  м/с; в)  $w_0 = 1,73$  м/с

Одним из главных преимуществ использования лазерных технологий является высокая интенсивность теплового воздействия на локализованные участки (порядка  $10 \text{ МВт/м}^2$  при мощности источника 1 Вт). Это обеспечивает высокую управляемость и энергоэффективность технологий на основе лазерного излучения, индуцирующего нагрев. Подробный анализ результатов экспериментального исследования закипания существенно недогретой жидкости показал, что быстрый нагрев жидкости приводит к образованию парогазового пузырька на торце волокна, который в процессе своего развития может порождать затопленную горячую двухфазную струю. В параграфе 2.6 описаны результаты математического моделирования импульс-

ного лазерного нагрева недогретой жидкости. В математической модели нестационарного нагрева жидкости источником лазерного излучения были сделаны следующие допущения: жидкость статична; нет внешних возмущений; энергия излучения рассеивается только через конец волокна; поглощение энергии на границе «твердое тело – жидкость» считается незначительным; коэффициент поглощения не зависит от температуры жидкости.

В расчетную модель включена цилиндрическая область радиусом 10 мм и длиной 10 мм вокруг оптического волокна диаметром 0,2 мм. Построенная расчетная сетка насчитывала 621839 элементов. Результаты расчета послужили основанием для детального анализа влияния различных факторов на параметры исследуемого процесса, таких, как максимальный размер пузыря, его скорость роста и продолжительность жизни, а также скорость образующейся затопленной струи и максимальное расстояние, на котором осуществляется эффективный перенос горячей жидкости. На Рисунке 5 представлена динамика температурного поля в окрестности среза волоконно-оптического кабеля в результате лазерного излучения мощностью 1,3 Вт. Выделенная изотерма 100 °С позволяет оценить размер области недогретой жидкости. Для определения момента возникновения парового зародыша воспользуемся теорией гомогенного зародышеобразования. Частота зародышеобразования в гомогенном процессе выражается как

$$J_{hom} = N_{hom} B_{hom} \exp\left(-\frac{W_{hom}^*}{k_b T}\right). \quad (8)$$

Анализ модели показал, что при разных скоростях нагрева время индукции, очевидно, будет разным (чем выше скорость нагрева, тем меньше время индукции). Это наглядно иллюстрирует Рисунок 6, на котором показаны экспериментальная и теоретическая зависимости времени индукции от мощности излучения. В изложенной математической постановке удалось создать модель, позволяющую объяснить результаты экспериментального исследования по зарождению и развитию паровых структур в результате поглощения лазерного излучения объемом недогретой жидкости. Исследовано влияние мощности излучения и начальной температуры жидкости на рассматриваемый процесс. Показано, что особенности кинетики нуклеации играют определяющую роль; это практически нивелирует эффект мощности излучения на размер образующегося пузыря, и, как следствие, скорости струи и глубины ее проникновения в неподвижные объемы жидкости.

**Параграф 2.7** посвящен моделированию интенсивного охлаждения металлической поверхности в условиях циклической пульсации давления в жидкости. В основе математической модели специфического режима сверхинтенсивного теплообмена лежит идея контакта уносимых с колеблющейся межфазной поверхности капель с перегретым выше температуры насыщения металлом.

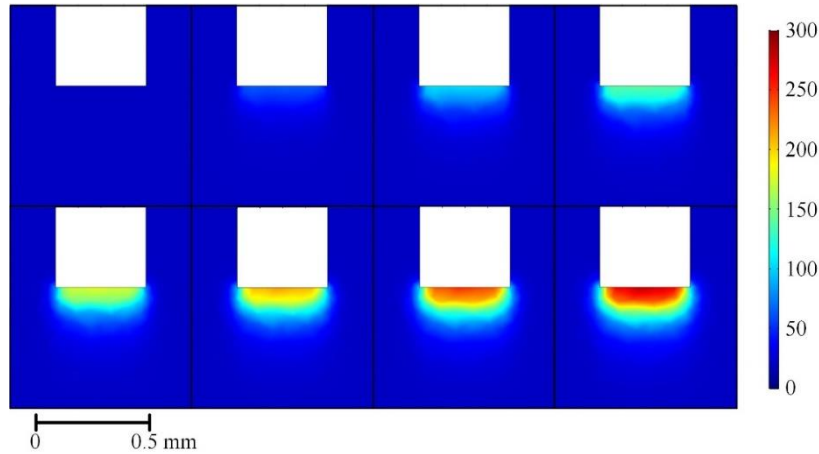


Рисунок 5 – Температурное поле при поглощении лазерного излучения недогретой водой; интервал между кадрами – 2 мс

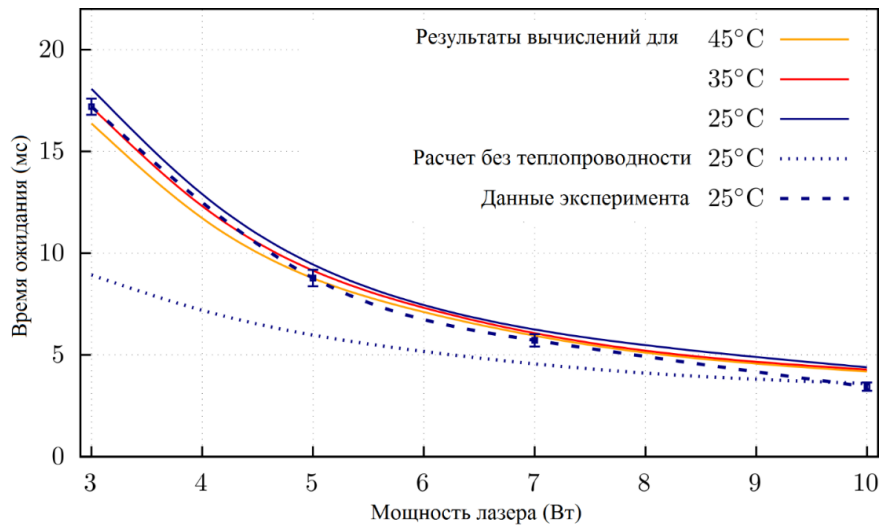


Рисунок 6 – Сопоставление результатов расчета с экспериментально определенными значениями времени ожидания появления паровой фазы

Обоснованием этой идеи являются экспериментальные наблюдения, т.к. область локализации участков межфазной поверхности колеблющихся с высокой частотой соотносится с местом возникновения пучности стоячих автоколебательных волн давления. Неустойчивость границы раздела пар – жидкость является ключевым фактором, обеспечивающим интенсивную подпитку парового слоя. В фазе сжатия гребни волн межфазной поверхности могут соприкасаться с горячей стенкой. Кроме того, с гребней волн могут срываться капли, летящие на стенку (например, вследствие развития неустойчивости Рэлея – Тэйлора при большой величине ускорения межфазной поверхности). Таким образом, даже кратковременный локальный контакт холодной жидкости с горячей стенкой вполне способен обеспечить автоколебательный режим пульсаций паровой оболочки. Подкачка энергии колебаний осуществляется, очевидно, за счет тепловой энергии стенки нагрева-

теля, поэтому по мере охлаждения стенки интенсивность циклического парообразования снижается, и амплитуда пульсаций постепенно уменьшается до их полного исчезновения. Разработана упрощенная математическая модель, описывающая вскипание сильно недогретой жидкости в канале в условиях импульсного тепловыделения в стенке нагревателя, и последующее ее охлаждение потоком жидкости. Модель описывает появление паровой фазы в виде тонкого парового слоя на стенке нагревателя, и последующие его пульсации, зафиксированные в экспериментах. В разработанной модели проточный канал рассматривается как колебательная система с сосредоточенными параметрами, в которой сжимаемый паровой слой играет роль пружины, а инерционная масса обусловлена пробками жидкости, расположенными выше и ниже нагревателя. Математическая модель описывает развитие автоколебаний, хорошо предсказывает амплитуду и частоту установившихся колебаний давления в канале. Высокая амплитуда продолжительных нелинейных колебаний поддерживается на фоне баланса процессов конденсации и испарения в течение одного периода колебаний.

**В третьей главе** излагаются результаты исследований автора целью которых являлось совершенствование технологии термохимической конверсии твердого топлива в перспективной многоступенчатой установке малой мощности. Были разработаны математические модели трех ступеней установки, представляющие собой шнековый реактор, смешивающий эжектор и бункер. **В параграфе 3.1** приводятся обоснования применения технологии и описание существующей в ИСЭМ СО РАН установки для проведения экспериментальных исследований и верификации разрабатываемых CFD-моделей термохимической конверсии биомассы. Разработанная модель для первой ступени изложена в **параграфе 3.2**. Для тестирования построенной расчетной модели эжектора были осуществлены параметрические исследования с различными значениями расхода газов на выходе из первой ступени. Результаты верификации модели, проведенные на основе данных экспериментов, осуществленных в ИСЭМ СО РАН, подтвердили невозможность апостериорного описания кинетики химических реакций и необходимость индивидуальной настройки математического обеспечения на основе эмпирических сведений. Проведенные параметрические расчеты подтвердили надежность и устойчивость решения с практически полным повторением сходимости численных реализаций и, как следствие, одинаковыми временными затратами на каждый вариант расчета.

**Параграфы 3.3 и 3.4** посвящены математическим моделям эжектора и бункера, которые являются второй и третьей ступенями установки. Результаты численного моделирования эжектора, обеспечивающего смешивание и сгорание пиролизного газа, а также результаты численного моделирования третьей ступени установки, представляющей собой реактор с неподвижным слоем твердого топлива, демонстрируют надежность разработанной математической модели установки. В результате реализации математической

модели процессов тепломассопереноса и аэродинамики средствами пакета Comsol Multiphysics были получены расчетные поля температур, скоростей, плотностей сред, линий тока и прочие производные данные. CFD-моделирование является одним из ключевых инструментов для исследования процессов газификации. Различие в возможных значениях производительности разрабатываемой установки оказывают существенное влияние не только на процессы в первой ступени – пиролизере, но и на объем выделяющихся газов, и на количество образующегося кокса. Таким образом, успешное решение задачи поиска оптимальной конфигурации оборудования включает в себя детальное трехмерное моделирование всех частей многоступенчатой установки. Модель пиролизера содержит описание пористого тела, обогреваемого через стальную стенку. Основными входящими уравнениями являются варианты закона Навье-Стокса и теплообмена участвующих сред. В центре геометрической модели пиролизера размещен шнек (стальной), являющийся мощным теплопроводником. Моделирование теплообмена внутри шнека предполагается в гомогенном представлении содержимого пиролизера с учетом физических свойств (пористости, проницаемости и пр.) среды. Расчетное поле температур включало в себя области греющих газов, разделяющей стальной стенки, выделяющихся продуктов пиролиза, пористой среды и стального шнека. Для удобства задания граничных условий выбрано представление в лагранжевой системе координат, где за точку отсчета выбрана пористая среда засыпанной древесной массы:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left( (u \cdot \nabla) \frac{u}{\varepsilon} \right) = \nabla \cdot \left[ -pI + \frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2\mu}{3\varepsilon} (\nabla \cdot u) I \right] - \left( \frac{\mu}{k} + \beta_F |u| + \frac{Q_{br}}{\varepsilon^2} \right) u + F. \quad (9)$$

Уравнение (9) отличается учетом пористости твердого топлива  $\varepsilon$ . Изменение массы  $Q_{br}$  соответствуют массам газа, образующимся при разложении твердого топлива. Тогда уравнение неразрывности имеет следующий вид:

$$\nabla \cdot (\rho u) = Q_{br}. \quad (10)$$

Теплообмен в пиролизере вычислен с использованием эффективного коэффициента теплопередачи:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = \sum_{i=1..3} (Q_i), \quad (11)$$

где  $Q_1$  представляет собой поток тепла, возникающий при испарении влаги,  $Q_2$  – радиационный перенос,  $Q_3$  – потери тепла в окружающий воздух с внешней поверхности установки. Для учета теплообмена излучением уравнение энергии дополнялось следующей зависимостью:

$$q_r = c_0 (T_2^4 - T_1^4). \quad (12)$$

Особое внимание уделяется разработке различных замыкающих соотношений, в частности, уравнениям кинетики химических реакций. Как и в большинстве других исследований, среди которых можно упомянуть Di Blasi С. (2008), Khodaei Н. (2015), Thurner F. (1981), Gorton W.C., (1984), Nunn T.R.

(1985), Font R. (1990), Samolada M.C. (1991), Wagenaar B.M. (1994), Reina J. (1998), применяют соотношения следующего вида:

$$k_v = A_v \exp\left(-\frac{E_v}{RT_s}\right), \quad (13)$$

$$r_{dry} = k_v \rho Y_{H_2O}. \quad (14)$$

В каждом подобном исследовании имеется ограниченный перечень условий, определяющих взаимосвязь между скоростями реакции и параметрами состояния, например, температурой. В диссертационной работе представлены результаты с использованием кинетических зависимостей для определения выхода летучих и образования смолы согласно схеме, представленной на Рисунке 7.

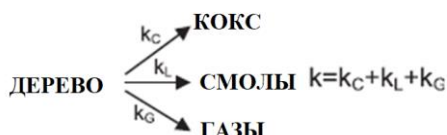


Рисунок 7 – Механизм пиролиза древесины на первой стадии

Таблица 1. Сопоставление кинетических коэффициентов

	Газы	Кокс	Смолы
Обобщение опытов, $A_v$	$0,63 \cdot 10^{11}$	$3,45 \cdot 10^{11}$	$7,25 \cdot 10^{11}$
Обобщение опытов, $E_v$	177	125	149
$A_v$ , Di Blasi C. (2008).	$1,43 \cdot 10^4$	$7,4 \cdot 10^5$	$4,12 \cdot 10^6$
$E_v$ , Di Blasi C. (2008).	88,6	106,5	112,7

В Таблице 1 сопоставляются значения коэффициентов  $A_v$  and  $E_v$ , определенные экспериментально в рамках диссертационной работы, со значениями других эмпирических исследований. Нетрудно заметить существенные различия в результатах определения коэффициентов термогравиметрическим способом, как от эмпирически полученных оценок в опытах на многоступенчатой установке, так и от данных других авторов. Причина этих различий заключается в существенной термической неоднородности граничных условий, в которых протекают сложные каскадные химические реакции. Частицы топлива, находясь на различном удалении от горячих металлических поверхностей, обладают различной температурой. Неизбежным следствием этого является необходимость детальных численных исследований и определения характеристик разрабатываемой многоступенчатой схемы для каждого отдельного случая комбинаций режимных характеристик: скорость движения топлива, температура греющих газов и др. Очевидно, что проблема поиска универсальных подходов к описанию кинетики химических реакций для

вариабельных граничных условий остается нерешенной в настоящий момент. В результате параметрических расчетов для выбранного диапазона скорости твердого топлива были получены распределения полей скорости, температуры и концентрации образовавшихся веществ. На Рисунке 8 показан пример пространственного распределения концентрации кокса (%). Пространственная неоднородность преобразования может быть объяснена существенной зависимостью температурных полей от геометрии шнека, который имеет высокую теплопроводность. Влияние скорости топлива на преобразование твердого топлива показано на Рисунке 9. Очевидно, что большая часть объема древесины превращается в кокс на полпути через пиролизер.

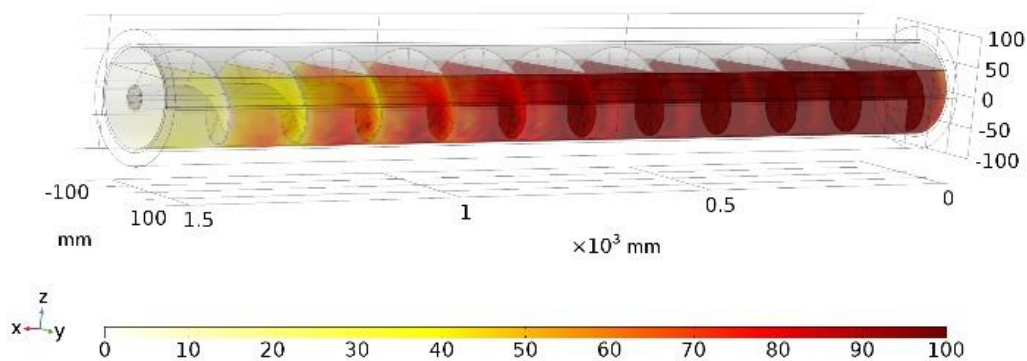


Рисунок 8 – Распределение степени конверсии древесной массы (%)

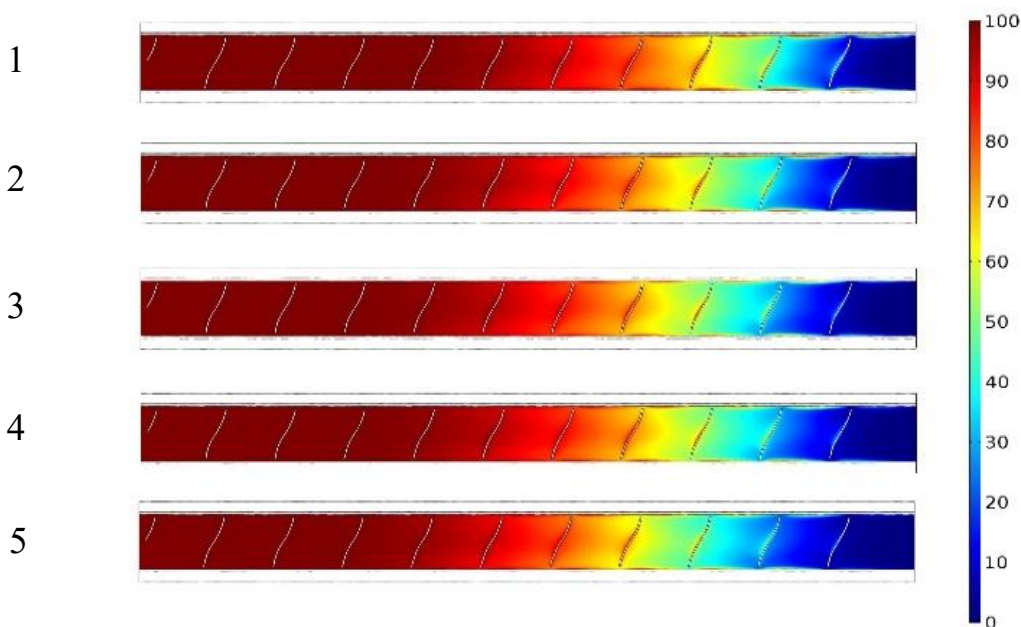


Рисунок 9 – Степень конверсии древесины в кокс для различной скорости движения топлива, мм/час: 1 – 106; 2 – 140; 3 – 176; 4 – 212; 5 – 248

Температурный профиль почти одинаков для всех исследованных скоростей потока твердого топлива через шнековый реактор. В результате соотношение между окончательным преобразованием топлива в выходной



секции между окончательным преобразованием топлива в выходной секции реактора и скоростью среды должно иметь следующий вид:

$$X = X_0/u, \quad (15)$$

где  $X_0$  находится из условий эксперимента. Уравнение (15) должно выполняться при  $u=0\div 0,01$  м/с. В качестве граничных условий использованы рассчитанные по модели 2-й ступени поля температур и распределение скорости в выходном сечении эжектора. В постановочном плане математическая модель бункера не представляет собой существенного нового объекта и ее решение базируется на использовании уже представленных выше уравнений. Количество теплоты, выделяющееся в нижнем пространстве реактора, определяется кинетикой реакций окисления топлива и догорающих газов, поступающих из 2-й ступени установки. В результате реализации математической модели процессов тепломассопереноса и аэродинамики средствами пакета Comsol Multiphysics были получены расчетные поля температур, скоростей, плотностей сред, линий тока и прочие производные данные (Рисунок 10).

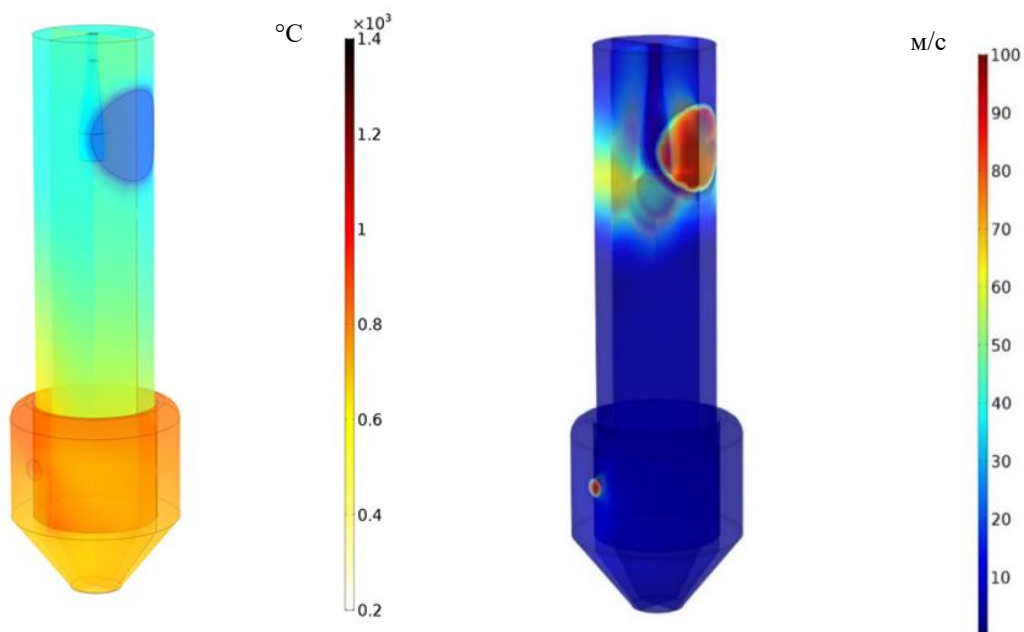


Рисунок 10 – Пример выполненных расчетов по определению полей температур и скорости. Скорость греющих газов во входном сечении  $u=0,1$  м/с; температура греющих газов  $T_0=600^\circ\text{C}$

Как было показано в предыдущей части исследования, трудно ожидать существенных изменений в граничных условиях, кроме добавления линейной зависимости скорости газов от производительности установки. Таким образом, общая задача поиска оптимальной конструкции многоступенчатой установки с учетом ограничений на производительность, цену газа и т.д., вполне может быть решена однократным расчетом 2-й и 3-й ступени. Полученные в результате этих вычислений линейные взаимосвязи между производительностью

установки и температурными, а также скоростными характеристиками газов могут быть использованы в задаче оптимизации размеров 1-й ступени.

**Четвертая глава** посвящена вопросам поиска оптимального выбора методов обработки эмпирических сведений, а именно – обобщению массива эмпирических данных, обладающих стохастическим характером. В параграфе 4.1 содержатся результаты применения разработанных методических подходов к определению максимального диаметра парового пузыря при вскипании недогретого потока жидкости. В параграфе 4.2 рассмотрена проблема определения плотности центров парообразования на теплоотдающей поверхности и температуры начала фазового перехода при условии интенсивного тепловыделения в недогретую до температуры насыщения жидкость. Доказана неоднозначность выбора метода усреднения характеристик пузырькового кипения на теплоотдающих технических поверхностях. Показано, что выбор обобщающих эмпирические сведения расчетных зависимостей для предсказания характеристик пузырей зависит от цели их имплементирования в математические модели переходных процессов. В качестве примера принципиальной важности выбора метода обобщения статистически неоднородных результатов измерения были рассмотрены такие параметры, как геометрические размеры паровых структур – пузырей (Рисунки 11 и 12), а также такие характеристики, как времена ожидания и роста, частоты нуклеации. Порождаемая погрешность, возникающая при некорректном обращении с эмпирическими данными может достигать существенных значений, намного превосходя погрешность непосредственных измерений. Проблема недостаточности эмпирических сведений даже для случаев со стационарным пузырьковым кипением отмечается в широко цитируемой монографии Толубинского В.И. (1980). Оценивая характеристики пузырькового кипения, рекомендуется в рамках отдельного наблюдения добиваться измерений в количестве не менее 300 единиц. В то же время, поскольку неотъемлемым качеством пузырькового кипения является стохастический характер таких параметров, как геометрические размеры паровых структур – пузырей, их темпоральные характеристик и т.д., то таким же свойством обладают и зависящие от этих величин производные параметры – величины локальных тепловых потоков, толщины теплового слоя жидкости и т.д. Для практических задач наибольшее значение имеют некоторые средние характеристики, в результате чего исследователями создаются разнообразие эмпирические оценки интегральных теплообменных характеристик и свойств процесса кипения. Выбор характерного размера пузыря, соответствующего условиям отдельного исследуемого случая, в еще большей степени требует наличия убедительно обширной базы исходных данных. При некоторых значениях числа опытных данных разброс неопределенности в отдельных измерениях приведет к более чем 50% неопределенности средней величины.

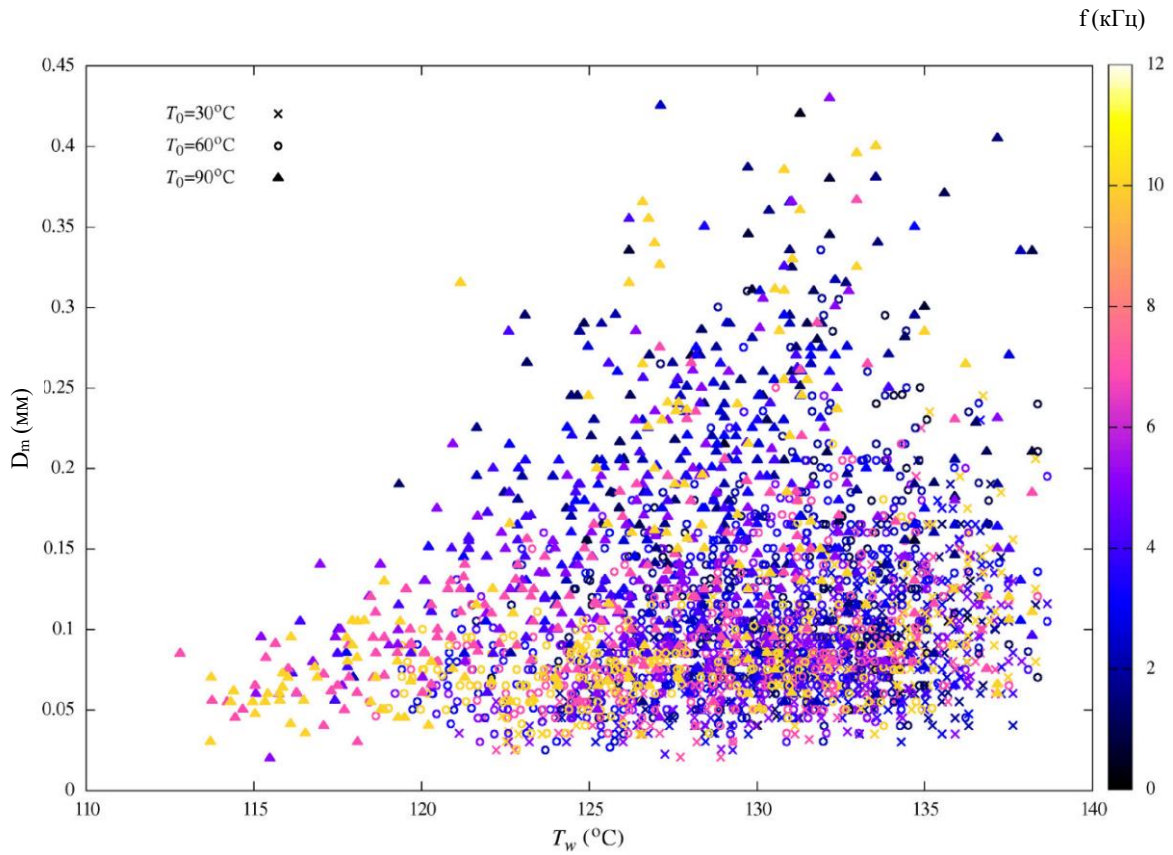


Рисунок 11 – Измеренные в опытах максимальные диаметры пузырей в зависимости от температуры теплоотдающей стенки (ИСЭМ СО РАН)

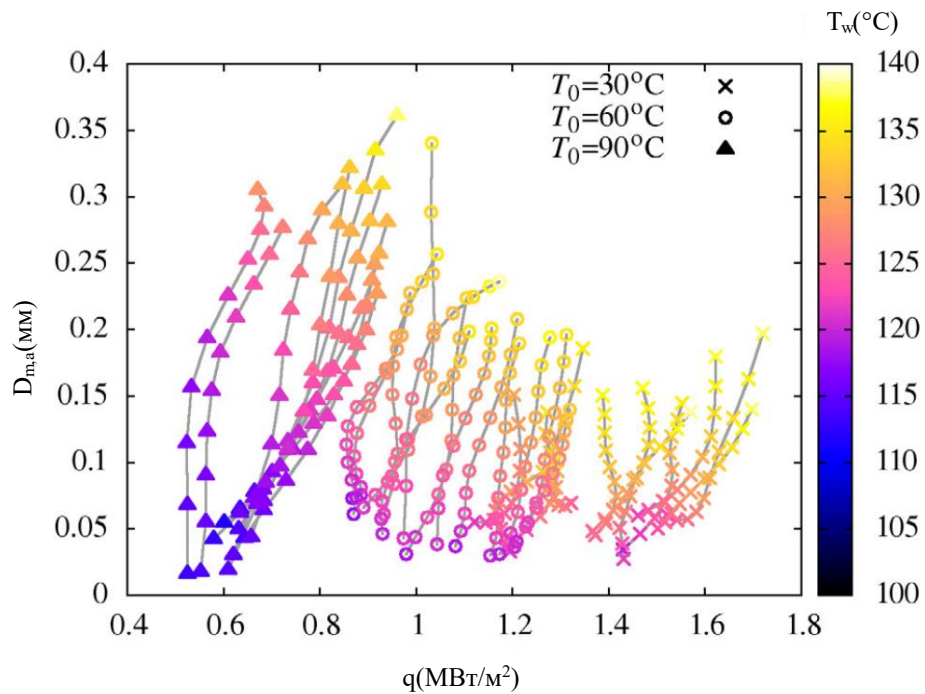


Рисунок 12 – Средневзвешенные по объему максимальные диаметры пузырей в зависимости от теплового потока

С точки зрения применимости изучения процесса кипения указанные эмпирические сведения становятся практически бесполезны. В качестве примера можно сопоставить данные ИСЭМ СО РАН, полученные при резко возрастающем тепловом потоке, с применяющимися для валидации моделей кипения данными наиболее цитируемых авторов (Рисунки 13 и 14). Легко заметить, что использование нестационарного теплового потока позволило существенно расширить диапазон граничных условий. Различия в размерах пузырьков в сравнении с результатами Prodanovic объясняются различной толщиной перегретого слоя  $\delta_s$ . В диссертации рассматриваются подходы к обобщению экспериментальных сведений по кипению потока недогретой жидкости на основе определения  $\delta_s$  и представления в безразмерном виде, используя число Фурье  $Fo = \delta_s / \sqrt{a\tau}$ .

В параграфе 4.3 изложен оригинальный подход к обработке результатов экспериментов с подстройкой коэффициентов математических моделей, учитывающих индивидуальные особенности источников эмпирических сведений. Данный подход обеспечивает минимизацию как средней, так и максимальной погрешности полученных замыкающих соотношений, как части математической модели. Применение этого подхода может значительно улучшить качество создаваемых математических моделей и их программных реализаций в тех случаях, когда обрабатываются данные обладающие вариативностью лишь в силу затруднительности осуществления точных измерений.

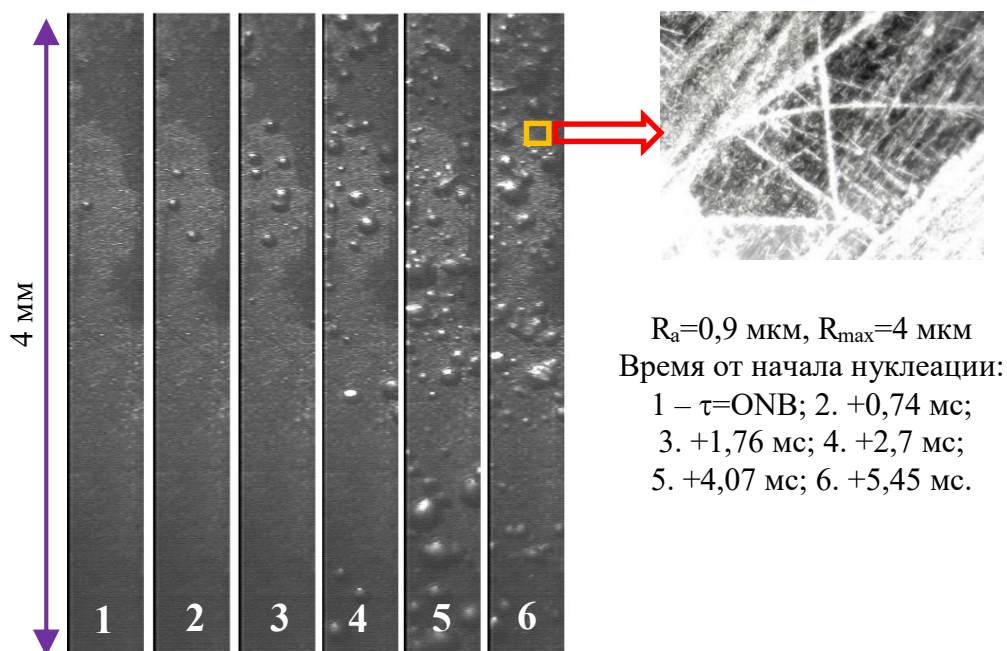


Рисунок 13 – Пример развития пузырькового кипения при импульсном тепловыделении на технической поверхности (ИСЭМ СО РАН)

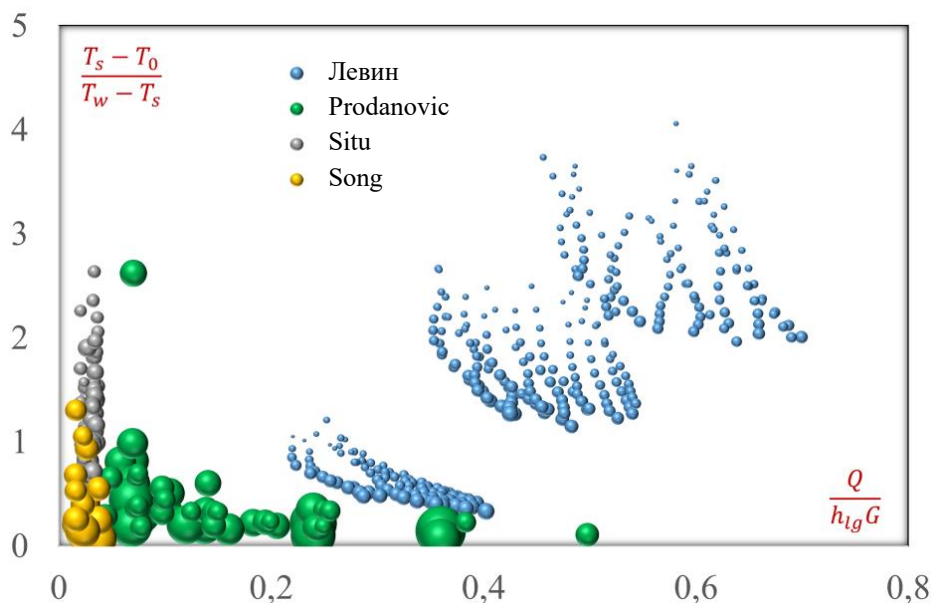


Рисунок 14 – Сравнение экспериментальных условий для данных различных авторов. Диаметр пузырька пропорционален размеру маркера

Для этого был развит метод, ранее применявшийся для решения задач оценивания состояния и идентификации математических моделей тепло-энергетических установок. Обработка результатов теплофизических экспериментов осуществлялась в два этапа: 1) минимизировалась максимальная относительная погрешность эмпирических сведений с целью выявления наименее достоверных измерений, а также вычисления значения максимальной относительной погрешности; 2) решалась задача минимизации суммы модулей относительных погрешностей замеров, что позволяло существенно увеличить значение критерия максимального правдоподобия полученных аппроксимаций. Изложенный метод обработки эмпирических сведений позволяет выполнять как оценку исходных данных по критерию максимального правдоподобия, так и анализировать успешность реализаций различных математических моделей для описания физического явления.

**Пятая глава** содержит описание решения задачи определения характеристик движущихся сред в задачах теплофизического характера. Основной акцент в излагаемом материале уделяется проблеме моделирования движения двухфазного потока – задаче расчета потокораспределения, определению замыкающих соотношений – свойств двухфазного потока, а также рассмотрена задача определения динамики двухфазной системы в окрестности твердого тела в условиях сильной неравновесности. Таким образом, рассмотрение задачи движения сред охватывается как в стационарной масштабной постановке в рамках системы энергетических установок, так и в пространственно-локализованной для изучения перспективных технологий.

**Параграф 5.1** посвящен расчету потокораспределения в трактах энергетических установок с существенно нелинейным характером изменения

теплофизических свойств потока. Технологическая схема энергоблока содержит сотни узлов и ветвей (Рисунок 15), что приводит к необходимости решения систем уравнений большой размерности относительно расходов и давлений, на что и направлены методы теории гидравлических цепей (ГЦ). Математическое описание динамики теплоэнергетического оборудования обладает существенным отличием от рассмотренных ранее в диссертации задач, а именно – возможностью эффективной декомпозиции общей задачи по масштабу времени происходящих процессов. Таким образом, описание потокораспределения осуществляется путем численной реализации для аналога системы, соответствующей в теории ГЦ методу узловых давлений:

$$AX = Q, \quad A^T P + H = \bar{S}(P, X) \bar{X} X. \quad (16)$$

Пошаговый расчет потокораспределения в динамических моделях энергоблока в целом предусматривает разбиение замыкающих соотношений на четыре подмножества, на которых законы падения давлений на ветвях заданы соотношениями:

$$f_v(p_{i(v)}, p_{j(v)}) = p_{i(v)} - p_{j(v)} = s_v |x_v| s_v, \quad (17)$$

$$f_v(p_{i(v)}, p_{j(v)}) = p_{i(v)}^2 - p_{j(v)}^2 = s_v |x_v| s_v, \quad (18)$$

$$f_v(p_{i(v)}, p_{j(v)}) = [c_0 p_{i(v)}^2 + c_1 p_{i(v)} p_{j(v)} + p_{j(v)}^2] = s_v |x_v| x_v, \quad (19)$$

$$f_v(p_{i(v)}, p_{j(v)}) = p_{i(v)} - p_{j(v)} = s_v(p_{i(v)}, p_{j(v)}, x_v, \dots) |x_v| x_v, \quad (20)$$

где  $c_0 = 0,09$ ;  $c_1 = 1,09$ ;  $c_2 = -1$ ;  $c_0 + c_1 + c_2 = 0$ ;  $i, j$  – номера конечных узлов;  $v$  – номер ветви. Здесь уравнение (17) дает описание течения воды в трубах, уравнения (18), (19) определяют прохождение пара через отсеки турбины и регулирующие клапаны. Уравнение (20) описывает течение парожидкостной смеси в поверхностных теплообменниках или в трубах. Элементы матрицы  $\bar{S}(P, X)$  в общем случае недифференцируемы, поэтому мы не можем применять метод Ньютона в классической форме, а используем итерационный метод следующего вида:

$$\begin{pmatrix} X_{j+1} \\ P_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_j \\ P_j \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \bar{S}(X_j, P_j) \bar{X}_j & A^T \\ A & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \bar{S}(X_j, P_j) \bar{X}_j X_j + A^T P_j - H \\ AX_j - Q \end{pmatrix}, j = 0, 1, 2, \dots \quad (21)$$

Процесс продолжается, пока выполняется условие:

$$\max_{v, \eta} (|x_{v, j+1} - x_{v, j}|, |p_{\eta, j+1} - p_{\eta, j}|) \geq \varepsilon, v = 1 \dots n; \eta = 1 \dots m - 1,$$

где  $\varepsilon$  – заданное малое число. При предположении, что элементы  $\bar{S}(X, P)$  дважды дифференцируемы и начальное приближение  $(X_0, P_0)$  достаточно близко к решению задачи, метод сходится. Этот метод использовался для расчета пароводяного тракта энергоблока и результаты расчетов показали устойчивую сходимость метода узловых давлений, укладываясь при этом в масштаб реального времени, позволяя высвободить вычислительные ресурсы для расчета динамики теплообменников, описываемых системами

обыкновенных дифференциальных уравнений. Для учета влияния неоднородности пылевоздушного потока определялось влияние концентрации пыли на перепад давлений в пылеприготовительном тракте в виде замыкающего соотношения для расчета потокораспределения в ГЦ в рамках метода, изложенного выше. Таким образом, методы теории ГЦ были расширены на дисперсные потоки в трактах энергетических установок.

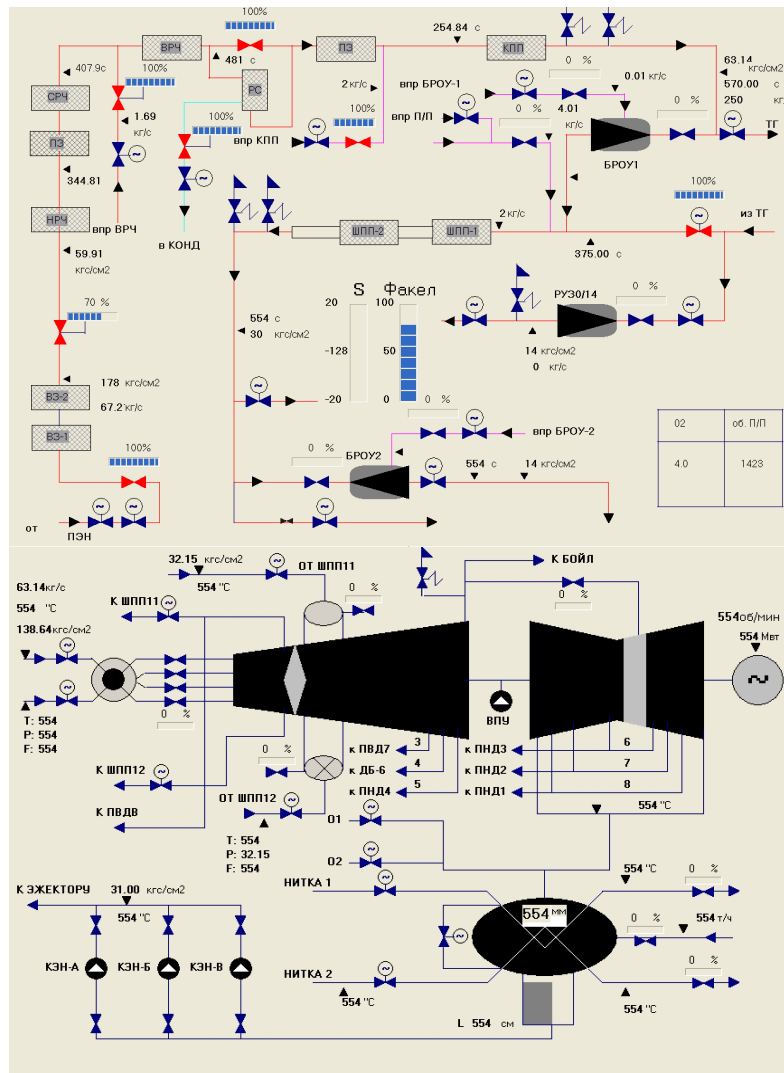


Рисунок 15 – Мнемосхемы пароводяного тракта в котельной установке и турбине

Другой важной задачей при реализации расчета потокораспределения в объеме энергоблока тепловой электрической станции является компактное объединение объектов расчета взаимосвязанных в рамках энергоблока агрегатов (котел, турбина, система регенерации). В рамках диссертационной работы выполнен синтез математических моделей трактов установок, а именно ГЦ котельного агрегата и турбинной установки путем последова-

тельного приближения решений в общих узлах. Такой прием является привлекательным, так как количество таких общих узлов обычно невелико в сопоставлении с размерностью ГЦ. В этом случае использован следующий алгоритм расчета потокораспределения:

1. Задаём начальное приближение  $P_0 = (p_1, p_2, p_3)$ .

2. Решаем системы для ГЦ котла и турбины:

$$F(p_1, p_2, p_3) = \begin{cases} f_1(p_1, p_2, p_3) = x_{1,к}(p_1, p_2, p_3) - x_{1,т}(p_1, p_2, p_3) = 0, \\ f_2(p_1, p_2, p_3) = x_{2,к}(p_1, p_2, p_3) - x_{2,т}(p_1, p_2, p_3) = 0, \\ f_3(p_1, p_2, p_3) = x_{3,к}(p_1, p_2, p_3) - x_{3,т}(p_1, p_2, p_3) = 0. \end{cases} \quad (22)$$

$$A_2 X_2 = Q_2, \quad A_2^T P_2 + H_2 = \bar{S}_2(P_2, X_2) \bar{X}_2 X_2,$$

$$A_1 X_1 = Q_1, \quad A_1^T P_1 + H_1 = \bar{S}_1(P_1, X_1) \bar{X}_1 X_1.$$

3. Задаём приращение и вычисляем из системы (16) невязки

$$\begin{aligned} F(p_1 + \Delta p, p_2, p_3), \\ F(p_1, p_2 + \Delta p, p_3), \\ F(p_1, p_2, p_3 + \Delta p). \end{aligned} \quad (23)$$

4. Вычисляем матрицу Якоби.

5. Решаем систему  $M\xi = F(p_1, p_2, p_3)$ .

6. По вычисленным поправкам  $\xi$  уточняем значение вектора  $P$  и возвращаемся на шаг 2.

7. Вычисления осуществляем до  $F(p_1, p_2, p_3) < \varepsilon$ .

На Рисунке 16 приведены агрегированные схемы пароводяного тракта котельной установки и турбины, для которых выполнены численные эксперименты на основе вышеописанного подхода с целью определения потокораспределения в динамической модели энергоблока. Подход позволяет успешно объединять создаваемые (или созданные ранее) фрагменты общей гидравлической цепи с незначительным количеством итераций ( $n < 10$ ). С целью определения границ применения подхода, рассматривались гипотетические случаи с числом соединений между фрагментами ГЦ до 16 и глубоким изменением начальных параметров.

**Параграф 5.2** содержит описание методик по определению гидравлических свойств потоков при построении численных реализаций математических моделей динамики оборудования энергетических установок. Анализ методов обобщения гидродинамических свойств двухфазных течений в каналах и элементах энергетических установок показал, что описание таких течений до сих пор носит характер выбора наиболее подходящих эмпирических зависимостей. Этот выбор обусловлен такими факторами, как диаметр канала, ориентация в пространстве и другими геометрическими характеристиками, массовая скорость, наличие теплообмена, реализация фазовых переходов внутри течения, давление, относительная энтальпия. Таким образом, сложившаяся методология выбора замыкающих соотношений сводится к выбору некоторого объема исходных эмпирических сведений, которые



проецируются на моделируемую в новых задачах ситуацию. В силу высокого уровня погрешностей, результаты обобщения в виде универсальных зависимостей на сегодняшний момент являются малопривлекательными. Перспективным инструментом для определения замыкающих соотношений в силу отсутствия обобщенных теоретических моделей и, как следствие, высокого уровня зависимости от эмпирических данных являются подходы с кусочно-заданными аппроксимациями.

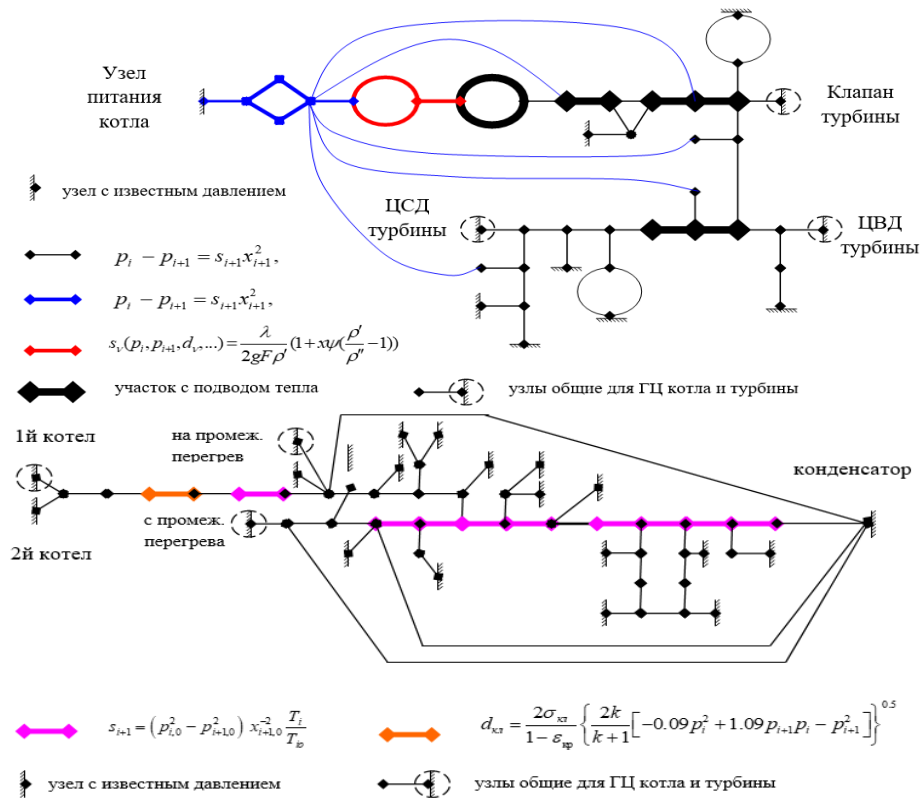


Рисунок 16 – Агрегированная схема ПВТ котельной и турбинной установок

**В параграфе 5.3**, в рамках решения задачи движения среды в резко нестационарных состояниях при наличии высокой плотности тепловых потоков, изложены результаты численного моделирования процесса нестационарного вскипания и образования кумулятивной струи в результате поглощения недогретой жидкостью импульсного лазерного излучения. Рассмотрен подход, опирающийся на эмпирические наблюдения, позволивший с высокой степенью достоверности численно описать и объяснить сложный механизм возникновения масс жидкости со скоростью вплоть до 100 м/с в результате выделения энергии малой мощности в локальном объеме. Полученная математическая модель позволяет определить степень влияния ключевых характеристик торца оптоволокна на определяющие характеристики кумулятивной струи, являющиеся важными для практических реализаций. Для решения задачи движения сред в двухфазной системе (вода – пар) использована модель «Level-set», описывающая движение фаз и положение

границы раздела между этими фазами. В качестве замыкающих соотношений использовались экспериментальные данные о формировании кумулятивной струи, возникшей в результате роста и последующего схлопывания парового пузыря на торце волокна.

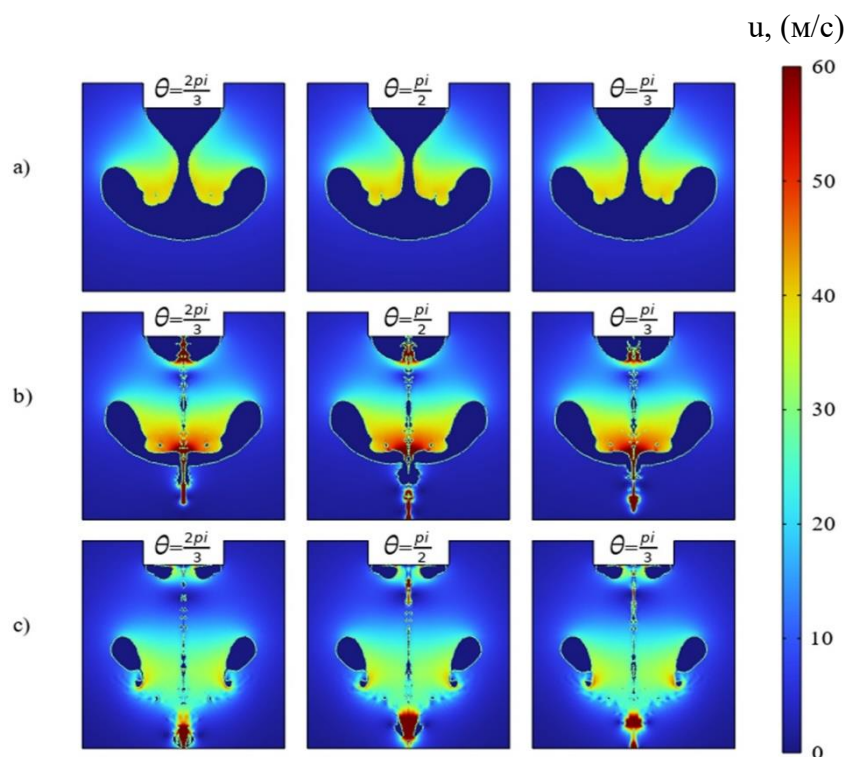


Рисунок 17 – Поле скоростей при схлопывании пузырька на конце оптического волокна с различным краевым углом  $\theta$  для трех заданных моментов времени: а) 391 мкс; б) 395 мкс; в) 402 мкс

В диссертации приводятся результаты численного моделирования с экспериментальным исследованием формирования кумулятивной струи, возникающей в результате схлопывания лазерно-индуцированного парового пузыря в недогретой жидкости. Параметрическое исследование включало в себя анализ таких характеристик, как смачиваемость поверхности оптоволокна, форма торца оптоволокна, вязкость жидкости, мощность излучения лазера, начальная температура жидкости (Рисунок 17). Результаты экспериментов с мощностью излучения в диапазоне мощностей от 3 до 10 Вт были воспроизведены численной моделью и проанализированы во второй главе диссертации. Снижение скорости кумулятивной струи при увеличении мощности в 3 раза составило не более 30 %. Как показали полученные результаты численного моделирования, определяющим влиянием обладают именно свойства поверхности оптического волокна, поскольку вариативность скорости кумулятивной струи в зависимости от смачиваемости и геометрии торца составляла не менее 50 %.

В шестой главе содержатся сведения о составе и принципах построения программ и комплексов программ, созданных автором для моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений. Приведены описания программных средств, разработанных для реализации математических моделей многоступенчатой установки газификации низкосортного топлива, описанных в 3-й главе диссертации. Описана реализация математических моделей в виде программных комплексов, необходимых для теоретического исследования нестационарного вскипания недогретой жидкости в окрестности торца оптоволокну на основе анализа результатов теоретического моделирования и физического эксперимента. Приводятся сведения о разработанных автором диссертации программных средствах, необходимых для численного исследования процесса нестационарного кипения потока недогретой до температуры насыщения жидкости в каналах при условии выделения тепловой энергии в металлическом проводнике. Описан комплекс программ, составляющих математическое обеспечение для тренажера оператора энергоблока тепловой электрической станции.

**Параграф 6.1** посвящен реализации математической модели пиролизера шнекового типа в многофункциональной среде для построения численных моделей Comsol Multiphysics. Выбор пакета Comsol Multiphysics обусловлен его широким применением во множестве прикладных и научных задач исследователями по всему миру, в результате чего на сегодняшний момент этот программный продукт обеспечивает надежные вычисления средствами метода конечных элементов в большом диапазоне используемых физических моделей. В рамках применения этого пакета возможны решения задач стационарной постановки, динамических задач, а также осуществление параметрических исследований. На Рисунке 18 приведен пример пользовательского интерфейса, используемый для уточнения граничных условий модели, исследование результатов вычислений и выбора наиболее подходящих вариантов вывода результатов расчета в графическом виде. Расчет осуществляется для определения характеристик стационарного режима работы пиролизера. Оптимальное распределение и размеры ячеек вычислялись средствами пакета Comsol на основе соответствующих алгоритмов, гарантирующих хорошую сходимость для используемых дифференциальных уравнений. Для численной реализации решения применяется решатель MUMPS, использующий метод LU-разложения. После запуска программы пользователь имеет возможность корректировки ряда граничных условий, таких как начальная температура греющих газов, начальная температура твердого топлива, скорость перемещения топлива вдоль оси пиролизера (в том числе через аналитическую зависимость от круговой скорости вращения шнека) и др. Результаты взаимодействия пользователя с

программой в виде построенной геометрии и основных элементов объекта представлены графически в средней части диалогового окна.



Рисунок 18 – Диалоговое окно для численного моделирования процессов в первой ступени установки по газификации низкосортного твердого топлива

В диссертации описывается математическая модель эжектора, включая основные принятые допущения и описание турбулентного течения в виде RANS  $k$ - $\epsilon$  постановки. Как и в случае с программной реализацией математической модели первой ступени, вторая ступень реализована средствами программной среды Comsol Multiphysics, а геометрия моделируемого объекта рассмотрена в трехмерной постановке. Для численной реализации решения применяется PARDISO решатель, что является обычным выбором в случае решения моделей турбулентности. На Рисунке 19 приведен пример пользовательского интерфейса, используемый для уточнения граничных условий модели, исследование результатов вычислений и выбора наиболее подходящих вариантов вывода результатов расчета в графическом виде. Расчет осуществляется для определения характеристик установившегося режима работы эжектора.

**Параграф 6.2** посвящен реализации математических моделей процессов, протекающих в недогретой жидкости в окрестности торца оптоволоконна при поглощении лазерного излучения средствами среды мультифизического моделирования Comsol Multiphysics. Общая постановка исследовательской задачи потребовала разработки двух независимых программных реализаций, так как подзадачи – определение условий возникновения паровой фазы и динамика паровых структур с возникновением кумулятивной струи жидкости, отличаются как по времени реализации процессов, так и по существу рассматриваемых физических явлений. Для численной реализации решения применяется решатель PARDISO. После запуска программы пользователь имеет возможность корректировки ряда граничных условий,

таких как начальная температура жидкости, угол смачивания жидкостью поверхности оптоволокна, мощность излучения лазера и др. Результаты взаимодействия пользователя с программой в виде построенной геометрии представлены графически в правом окне интерфейса (Рисунок 20). Для выполнения аналитических исследований в правом верхнем углу диалогового окна имеется графическая интерпретация результатов расчета, например, динамика вероятности нуклеации или значения температуры в указанной точке рабочего пространства и др.

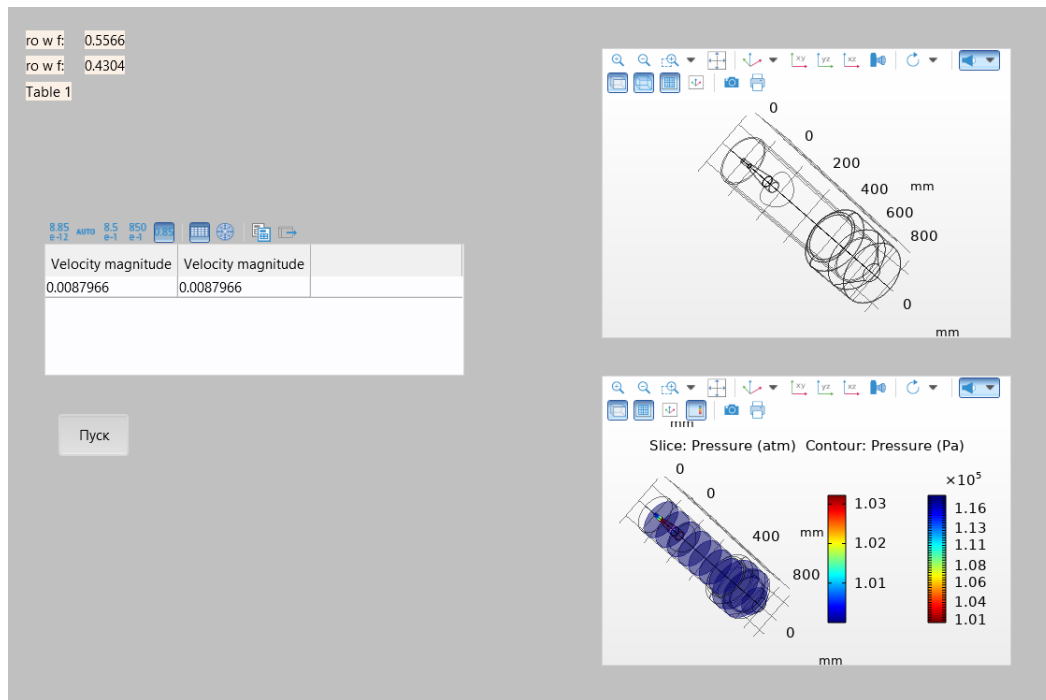


Рисунок 19 – Диалоговое окно для численного моделирования работы бункера установки по газификации низкосортного твердого топлива

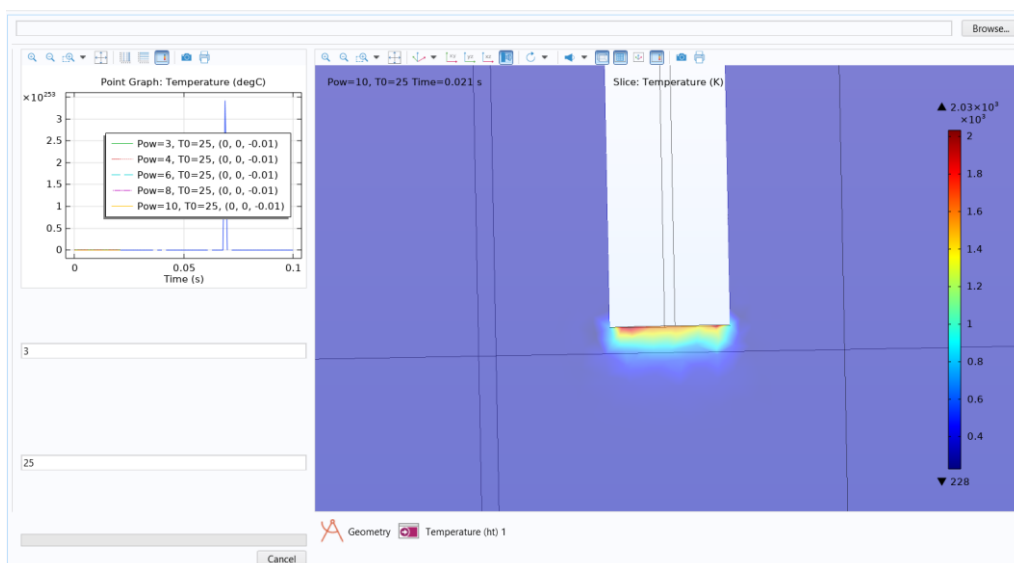


Рисунок 20 – Диалоговое окно программы для численного определения поля температур и времени ожидания появления парового пузыря в условиях поглощения жидкостью лазерного излучения

Для проведения численных экспериментов с моделями пристенного слоя жидкости в кольцевом канале реализована нестационарная постановка математической модели, что отражено в **параграфе 6.3**. После запуска программы пользователь имеет возможность корректировки ряда граничных условий, таких, как начальная температура жидкости, характер выделения электрической энергии, свойства участвующих тел и др. путем загрузки файла данных в необходимом формате. На Рисунке 21 приведен интерфейс программы, позволяющий реализовать взаимодействие пользователя с графическим отображением результатов расчета. Таким образом, в вышеописанном комплексе программ реализованы численные методы и математические модели теплообменных процессов, протекающих при нестационарном вскипании потока недогретой до температуры насыщения жидкости в результате импульсного тепловыделения в металлическом нагревателе.

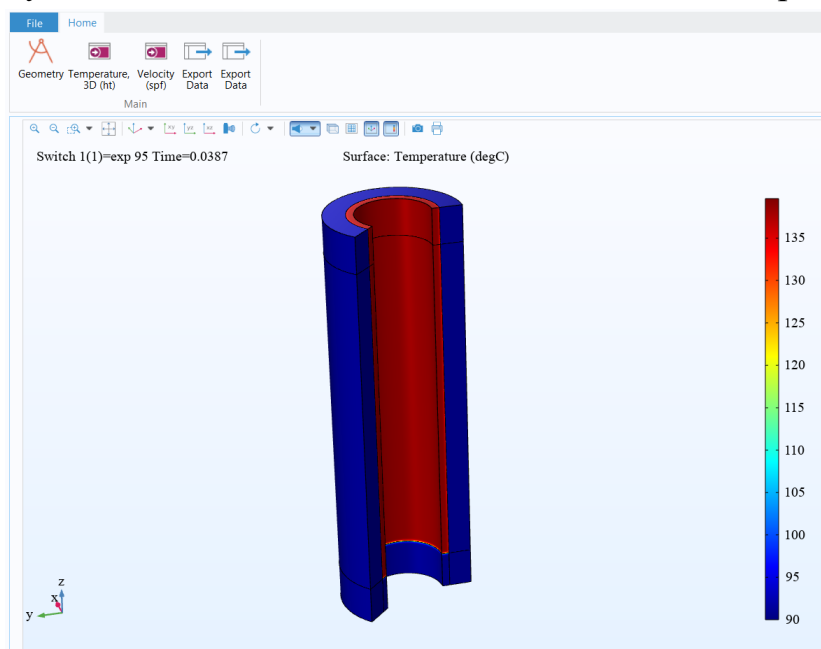


Рисунок 21 – Диалоговое окно программы для численного определения полей скорости и температуры с заданным характером выделения электрической энергии

**Параграф 6.4** посвящен описанию реализации математического обеспечения тренажеров персонала тепловых электрических станций. Применение обучающих тренажеров с целью повышения эффективной работы, снижения уровня аварийности и поддержания квалификации персонала после перерывов в выполнении служебных обязанностей стало уже устоявшейся практикой. Уровень реализации процессов, протекающих в элементах теплоэнергетического оборудования, вплоть до сегодняшнего дня существенно отстает от аналогичных разработок, выполняемых в атомной промышленности. Для моделирования работы оборудования энергоблока Иркутской ТЭЦ–10 реализованы результаты исследований, отраженных в пятой главе диссертации. В состав моделируемого энергоблока входят два прямооточных

котла ПК–24, паровая турбина К–150–130 и вспомогательное оборудование. Реализация численных алгоритмов и графического интерфейса осуществлена средствами среды Delphi. В составе математического обеспечения тренажера входят методы численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, методы решения задачи потокораспределения, описанные в параграфе диссертации 5.1, включающие методы двойной итерации, полунявные схемы Рунге-Кутта 4-го порядка и др. Алгоритм выполнения расчета динамической постановки задачи в трактах энергоустановки можно укрупненно разбить на два основных этапа – подготовительный и циклический. Входящие в состав общей математической модели тренажера отдельные комплексы схематично приведены на Рисунке 22.

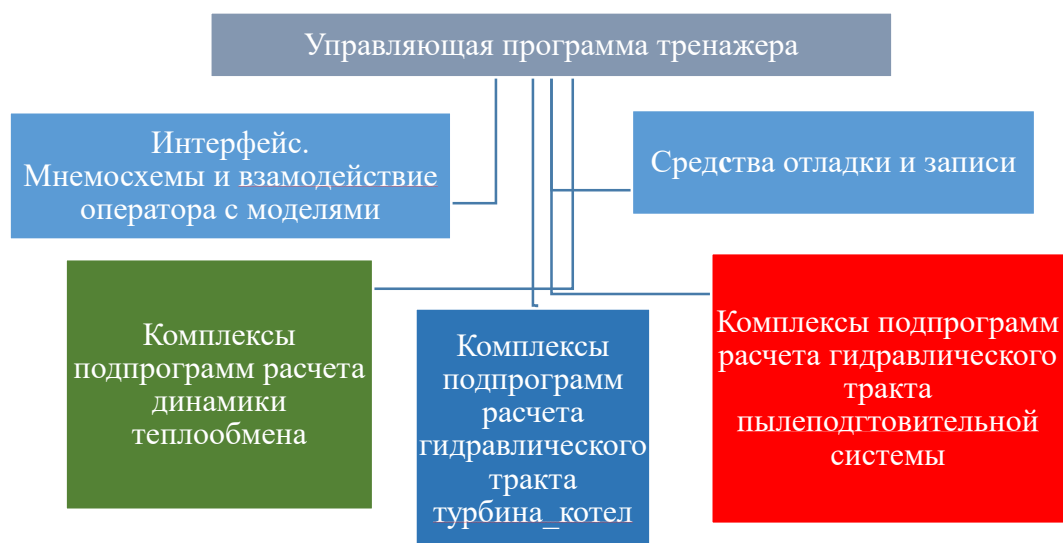


Рисунок 22 – Архитектура тренажера энергоблока

Они включают в себя модели пароводяного тракта, газоздушного тракта, пылеприготовительной системы, турбинной установки, вместе с дополнительными модулями, обеспечивающими отладку, запись, вывод интерфейса и взаимодействие оператора с моделями. Оператор тренажера имеет возможность осуществлять управление имитационной всережимной динамической моделью энергоблока тепловой электрической станции для отработки своих действий в режиме реального времени. Управляющие воздействия могут быть заданы на устройствах управления командами оператора, либо с помощью заранее созданной пользователем управляющей последовательности событий, а также в результате реакции системы автоматического регулирования.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, обладая теоретической и практической значимостью, являются новыми, что

отражено в создании ряда новых, а также модификации существующих математических моделей процессов с резко изменяющимися характеристиками вещества, в том числе химической трансформацией вещества. Главным результатом диссертационной работы является усовершенствование системного подхода к построению математических моделей тепломассообменных процессов в условиях неопределенности конечной формы таких моделей на стадии обобщения эмпирических сведений. Часть исходных данных была получена при непосредственном участии или лично автором диссертации. Для обобщения эмпирических данных предложен системно новый подход, заключающийся в интеграции с разрабатываемыми математическими моделями этих данных в единой совокупности с метаданными, а также методами их обработки и обобщения.

Для достижения этих результатов были:

1. Разработаны математические модели нестационарного состояния пристенного слоя жидкости в условиях резко растущей температуры твердой поверхности. Выполнена апробация и верификация этих моделей для широкого спектра граничных условий, что позволяет рекомендовать подход к разработке таких моделей для широкого круга практических задач, описывающих переходные состояния оборудования, в том числе аварийные случаи. На основе разработанного автором аналитического способа определения теплового потока в нестационарном процессе пузырькового кипения показано, что даже успешное описание тепломассообменных процессов в рассматриваемых условиях в виде аналитической зависимости требует введения дополнительных замыкающих соотношений.

2. Доказана неоднозначность выбора метода усреднения характеристик пузырькового кипения на теплоотдающих технических поверхностях. Показано, что выбор обобщающих эмпирических сведений расчетных зависимостей для предсказания характеристик пузырей зависит от цели их использования в математических моделях переходных процессов.

3. Разработаны, исследованы и реализованы математические модели термической конверсии частиц твердого топлива в перспективных установках по газификации. Верификация на основе эмпирических данных, полученных в ИСЭМ СО РАН, позволила успешно масштабировать результаты численного моделирования при изменении геометрических размеров установки.

4. Разработаны численные модели для описания условий выделения энергии лазерного излучения в локализованных объемах жидкости с последующим фазовым переходом, на основании которых доказано существование единого механизма формирования направленных кумулятивных струй при лазерном нагреве.

5. Развита теория гидравлических цепей для задач имитационного моделирования гидрогазодинамических и тепловых процессов, протекающих в оборудовании тепловых электрических станций. Показано, что



все многообразие замыкающих соотношений для законов движения сред в сложных газоздушных и пароводяных трактов успешно описывается в обобщенном алгоритме расчета потокораспределения цепей с регулируемыми параметрами.

6. Разработаны программные комплексы в виде реализаций вышеописанных численных алгоритмов, математических моделей и методов обработки данных натурального эксперимента для задач моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений.

7. Разработан оригинальный подход к обработке результатов экспериментов с подстройкой коэффициентов математических моделей, учитывающих индивидуальные особенности источников эмпирических сведений, и обеспечивающий минимизацию как средней, так и максимальной погрешности полученных замыкающих соотношений, как части математической модели.

#### **Список работ из перечня рекомендованных ВАК по специальности 1.2.2.**

1. Левин, А.А. Методика обработки результатов теплофизических экспериментов, основанная на решении двух видов задач нелинейного математического программирования / Клер А.М., Алексеюк В.Э., Левин А.А., Хан П.В. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 32-49.

2. Левин, А.А. О декомпозиции разностных схем при численном решении дифференциально-алгебраических уравнений / Чистяков В.Ф., Таиров Э.А., Чистякова Е.В., Левин А.А. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2012. – № 5 (264). – С. 88-100.

*Статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных:*

3. Levin, A.A. Laser-induced boiling of subcooled liquid: influence of the radiation power on the vapor bubble nucleation and growth: laser-induced boiling of subcooled liquid / Chernov A.A., Pilnik A.A., Levin A.A., Safarov A.S., Adamova T.P., Elistratov D.S. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – V. 184. – p. 122298.

4. Levin, A.A. Choosing average values when determining characteristics of the unsteady boiling of liquid / Levin A.A./ Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2021. – V. 14. – № 3. – p. 99-105.

5. Levin, A.A. Investigation of transient processes at liquid boiling under non-stationary heat generation conditions / Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Tsoi A.N., Tairov E.A., Levin A.A. // Journal of Engineering Thermophysics. – 2011. – V. 20. – № 4. – p. 380-406.

6. Levin, A.A. Using the theory of hydraulic circuits in simulating thermal power installations / Tairov E.A., Levin A.A., Chistyakov V.F. // *Thermal Engineering*. – 2011. – V. 58. – № 13. – p. 1094-1098.
7. Levin, A.A. On application of the structure of the nonlinear equations system, describing hydraulic circuits of power plants / Levin A.A., Chistyakov V.F., Tairov E.A. // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. – 2016. – V. 9. – № 4. – p. 53-62.
8. Levin, A.A. Dynamics of transient processes at liquid boiling-up in the conditions of free convection and forced flow in a channel under nonstationary heat release / Pavlenko A.N., Tairov E.A., Zhukov V.E., Levin A.A., Moiseev M.I. // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2014. – V. 23. – № 3. – p. 173-193.
9. Levin, A.A. Self-excited pressure pulsations in ethanol under heater subcooling / Levin A.A., Tairov E.A., Spiryaev V.A. // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2017. – V. 24. – № 1. – p. 61-71.
10. Levin, A.A. Linearization of differential algebraic equations with integral terms and their application to the thermal energy modelling / Chistyakova E.V., Chistyakov V.F., Levin A.A. // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. – 2018. – V. 11. – № 4. – p. 94-109.
11. Levin, A.A. Experimental observation of the maximum bubble diameter in non-stationary temperature field of subcooled boiling water flow / Levin A.A., Khan P.V. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 124. – p. 876-883.
12. Levin, A.A. Self-oscillatory regime of boiling of a highly subcooled liquid in a flow-passage annular duct / Aktershev S.P., Mesentsev I.V., Mesentseva N.N., Levin A.A. // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2018. – № 6. – p. 875-887.
13. Levin, A.A. Characteristics of nucleate boiling under conditions of pulsed heat release at the heater surface / Levin A., Khan P. // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 149. – p. 1215-1222.
14. Levin, A.A. The Effect of Secondary Boiling on the Dynamics of a Jet Formed during Vapor-Bubble Collapse Induced by Laser Heating of a Liquid / Chernov, A.A., Guzev, M.A., Pil'nik, A.A., Levin, A.A., Chudnovskii, V.M. // *Doklady Physics*. – 2021. – V. 66(11). – p. 325–328.
15. Levin, A. Intensification of Non-Stationary Nucleate Boiling at Increasing Flow Velocity / Levin, A., Khan, P. // *Heat Transfer Engineering*. – 2021. – V. 43(3-5). – p. 388–396.
16. Levin, A.A. The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating / Chudnovskii V.M., Levin A.A., Chernov A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 150. – p. 119286.

17. Levin, A.A. Application of underdetermined differential algebraic equations to solving one problem for heat mass transfer / Chistyakov V.F., Chistyakova E.V., Levin A.A. // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2020. – V. 12141. – p. 84-93.
  18. Levin, A.A. Modeling of non-stationary temperature field in the neighborhood of the optical fiber end under laser pulse heating / Levin A.A., Safarov A.S., Chudnovskii V.M., Chernov A.A. // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2020. – V. 8. – № 1. – p. 25-32.
  19. Левин, А.А. Исследование роста и последующего коллапса парового пузырька, образованного в результате воздействия на недогретую жидкость лазерного излучения / Левин А.А., Чернов А.А., Адамова Т.П. // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2023. – № 2. – С. 365–373.
  20. Левин, А.А. Исследование частотно-избирательных свойств преобразования Гильберта-Хуанга и его модификаций на примере изучения автоколебательных пульсаций давления / Левин А.А., Спиряев В.А. // *Вычислительные технологии*. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 58-72.
- Труды конференций, индексируемых в международных базах данных:*
1. Levin, A.A. The pulsating nature of bubble boiling of subcooled water flow during cooling of a metal heater / Levin A.A. // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – 321. – p. 01013.
  2. Levin, A.A. Influence of the thermal parameters on the bubble heat balance at transient boiling of subcooled water / Levin A.A., Khan P.V. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – p. 012010.
  3. Levin, A.A. Unsteady model of wall-adjacent boiling subcooled liquid flow / Levin A.A., Chudnovsky V.M. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – p. 012048.
  4. Anatoliy, Levin Effect of the flow velocity on bubble boiling characteristics / Anatoliy, Levin, Polina, K. // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – V. 128. – p. 06002.
  5. Levin, A. Experimental determination of the induction period for the onset of intensive boiling of a subcooled water flow under conditions of unsteady heat release / Safarov, A., Levin, A. // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – V. 114. – p. 07004.
  6. Levin, A.A. Simulating self-oscillations in a boiling flow of subcooled liquid in the channel / Aktershev S.P., Mezentsev I.V., Mezentseva N.N., Levin A.A. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – p. 012065.
  7. Levin, A.A. Verification of the stage scheme of low-grade solid fuel gasification / Levin A.A., Kozlov A.N. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – p. 012071.
  8. Levin, A. Verification of the heat transfer model for screw reactor / Levin A., Kozlov A., Svishchev D., Penzik M. // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – V. 240. – p. 05017.

9. Levin, A.A. Experimental study of the non-stationary heat flux effect on the onset of nucleate boiling and maximum bubble diameters in the subcooled boiling flow / Levin A.A., Khan P.V. // International Heat Transfer Conference. – 2018. – p. 1143-1152.
10. Levin, A.A. On modeling of the initial stage of nonstationary nucleate boiling for the high heat fluxes / Levin A., Khan P. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V.240. – p. 01018.
11. Levin, A. Bubble departure diameter at transient heat release / Levin A., Khan P. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 115. – p. 08014.
12. Levin, A.A. CFD-modeling of the multistage gasifier capacity of 30 kw / Levin A.A., Kozlov A.N., Svishchev D.A., Donskoy I.G. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 891. – p. 012229.
13. Levin, A.A. Modelling of porous biomass pyrolysis in screw reactor / Levin A.A., Kozlov A.N. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 899. – p. 092008.
14. Levin, A.A. A model of pyrolysis in a staged scheme of low-grade solid fuel gasification / Levin A.A., Shamansky V.A., Kozlov A.N. // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 754. – p. 34-38.
15. Levin, A.A. Dynamics of the wall thermal boundary layer at the initial stage of the nucleate boiling / Levin A.A., Safarov A.S., Khan P.V. // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 754. – p. 1-4.

Отпечатано в «ДубльПринт»

664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112

Заказ № 1539, тираж 150 экз.