

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Левина Анатолия Алексеевича «Развитие методов моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

### **Цель работы и ее актуальность**

Цель диссертационной работы состоит в разработке и развитии 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.

В последние десятилетия существенно растет количество теоретических моделей и их реализаций, служащих для описания как стационарных, так и переходных режимов работы энергетического оборудования в условиях интенсивных фазовых превращений. Повышение привлекательности численного моделирования, возникшее благодаря развитию аппарата численных методов и росту вычислительных мощностей, с одной стороны, и удорожание физических экспериментов из-за необходимости увеличения детализации исследуемых процессов с другой стороны вынуждают использовать огромное количество эмпирических сведений в качестве замыкающих соотношений в математических моделях. В связи с этим, перспективным направлением для исследований является развитие системного подхода к построению математических моделей тепло-массообменных процессов с интеграцией методов обработки и обобщения экспериментальных данных процессов, связанных с фазовыми превращениями и интенсивными тепловыми потоками. Таким образом, актуальность поставленной цели и представленных в диссертационной работе результатов не вызывают сомнений.

### **Новизна результатов исследования**

- Автором диссертации разработан универсальный подход для построения математических моделей пузырькового кипения, опирающийся на методы усреднения геометрических характеристик паровых пузырьков при гетерогенном кипении. В работе показано, что проведение обобщений для описания характеристик паровых пузырьков должно определяться методологией создания математических моделей кипения. Учет особенностей применения замыкающих соотношений в математической модели позволяет расширить область применения полученных результатов для использования их при описании динамических состояний.



- Предложены математические модели динамики пристенного слоя жидкости в условиях резко растущей температуры твердой теплоотдающей поверхности. Осуществлены апробация и верификация для широкого диапазона граничных условий: начальной температуры жидкости, скорости роста температуры, скорости движения жидкости.
- Разработан подход к обработке эмпирических сведений с подстройкой коэффициентов математических моделей, учитывающих индивидуальные особенности отдельных измерений в физическом эксперименте. Предложенный подход обеспечивает минимизацию средней и максимальной погрешности замыкающих соотношений, как части математических моделей.
- Разработаны, исследованы и реализованы математические модели термохимической конверсии частиц для разработки перспективной технологии по газификации низкосортного твердого топлива.
- Представлены численные модели, примененные для описания выделения энергии в локализованных объемах жидкости с последующим фазовым переходом, на основании которых доказано существование единого механизма формирования направленных кумулятивных струй при лазерном нагреве.

### **Теоретическая и практическая ценность работы**

Результаты диссертации вносят 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 заключается в развитии методов построения математических моделей процессов, протекающих в теплоэнергетическом оборудовании, характеризующихся высокой плотностью тепловых потоков, а также наличием интенсивных фазовых превращений. Полученные на основе разработанных автором подходов методы обобщения данных могут быть интересны для разработчиков математических моделей энергетического оборудования, позволяя существенно расширить диапазон применимости существующих эмпирических подходов на нестационарные режимы с фазовыми переходами. Проведенные исследования в области разработки технологии трансформации низкосортного твердого топлива могут быть применены при проектировании и эффективной эксплуатации устройств для пиролиза и газификации.



### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности следующим направлениям паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

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

Диссертационное исследование содержит результаты из трех областей специальности:

*Математическое моделирование.* Разработаны новые математические методы и подходы к интерпретации результатов натурального эксперимента используемых при построении математических моделей процессов с интенсивными фазовыми переходами.

*Численные методы.* Разработаны новые численные методы для решения задач потокораспределения в трактах энергоустановок, обработки исходных данных натурального эксперимента.

*Комплексы программ.* Полученные результаты в области разработки математических моделей реализованы в виде комплексов имитационного моделирования, либо комплексов программ для проведения вычислительных экспериментов.



### **Оценка содержания работы, ее завершенность.**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы (220 наименований) и трех приложений.

Первая глава диссертации посвящена представлению основных тенденций в области математического моделирования процессов, происходящих в теплоэнергетическом оборудовании с учётом интенсивных фазовых превращений. В частности, описаны задачи создания математических моделей нестационарного теплообмена при пузырьковом и пленочном кипении на металлической поверхности, при передаче энергии в жидкость с помощью лазерного излучения. Уделено внимание вопросам описания технологии конверсии низкосортного твердого топлива при тепловом воздействии.

Вторая глава содержит сведения о результатах автора диссертации, посвященных проблеме разработки математических моделей тепломассообменных процессов, сопровождаемых интенсивными фазовыми переходами. Описываются взаимодействия недогретой жидкости с тепловыделяющей твердой стенкой, вскипание жидкости, инициированное лазерным излучением, а также высокоинтенсивный теплообмен в условиях автоколебательных пульсаций давления. На основе разработанной автором диссертации численной модели нестационарного теплообмена рассмотрены экспериментально зарегистрированные эффекты, например, влияние скорости движения недогретой жидкости на интенсификацию вскипания жидкости. Описан подход к построению математической модели процесса нестационарного теплообмена, осложненного наличием пульсаций давления, являющихся инициатором развития механизма высокоинтенсивного переноса теплоты от металлической поверхности в поток недогретого до температуры насыщения этанола.

Третья глава посвящена результатам исследований в области математического моделирования технологии конверсии низкосортного твердого топлива. В диссертации представлены описания разработанных математических моделей многоступенчатой установки, использующие в качестве исходных данных как данные инструментального анализа частиц топлива, так и результаты экспериментов на существующей установке. Результаты численного моделирования включают описание работы шнекового пиролизера, эжектора, обеспечивающего смешивание и сгорание пиролизного газа, а также третьей ступени установки, представляющей собой реактор с неподвижным слоем твердого топлива. Проведенные параметрические расчеты с различной производительностью и тепловыми режимами подтвердили надежность и устойчивость полученных численных реализаций.



В четвертой главе диссертации описываются методы оптимального выбора обработки эмпирических данных, полученных в результате экспериментального исследования межфазных взаимодействий и используемых при построении математических моделей. На примере задачи моделирования нестационарного кипения недогретого потока жидкости в пристенной области рассмотрены особенности определения замыкающих соотношений. Изложен подход к определению коэффициентов математических моделей на основе обработки результатов экспериментов с учетом особенностей источников эмпирических сведений, обеспечивающий минимизацию средней и максимальной погрешности замыкающих соотношений. В качестве примера корректного применения и обобщения статистически неоднородных результатов измерения были рассмотрены геометрические размеры паровых пузырей, времена ожидания и роста, частоты нуклеации. Показано, что потенциальная погрешность при некорректном обращении с эмпирическими данными может достигать существенных значений, превосходя погрешность непосредственных измерений.

Пятая глава диссертации посвящена математическим моделям движения двухфазных сред, включая замыкающие соотношения для различных практических задач. Представлены результаты применения методов теории гидравлических цепей для интерактивного моделирования процессов в оборудовании тепловых электрических станций. Рассматривается вопрос использования методов эквивалентирования и декомпозиции гидравлических цепей применительно к трактам энергетических установок. Проведенный автором анализ показал невозможность применения универсальных аналитических зависимостей для обобщения гидродинамических свойств двухфазных течений в каналах и элементах энергетических установок. Приведено описание математической модели, и представлены результаты параметрических вычислений с целью определения влияния характеристик системы на скорость кумулятивной струи при лазерно-индуцированном вскипании вблизи оптоволокон.

В шестой главе описаны реализованные автором комплексы программ, использованные в рамках диссертационной работы для осуществления численных экспериментов. Характерной особенностью решаемых задач являлось наличие интенсивных фазовых превращений при высоких значениях удельных тепловых потоков. Все рассмотренные в главах 2–5 диссертации задачи были реализованы в программных комплексах. Результаты вычислений, выполненных на разработанных математических моделях, легли в основу большинства публикаций автора диссертации.



Научные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях и представлены в докладах на международных и российских конференциях. Автором диссертации опубликовано 35 научных статей, среди них 20 в рецензируемых журналах 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.

### **Обоснованность и достоверность результатов работы**

Представленные в диссертационной работе Левина А.А. результаты исследований выполнены с привлечением современных вычислительных средств и средств обработки экспериментальных данных, полученных при изучении переходных процессов тепломассопереноса с высокоинтенсивными фазовыми превращениями. Обоснованность и достоверность работы следует из корректной постановки задач, применения при разработке математических моделей фундаментальных уравнений тепломассообмена, а также с использованием теории неравновесных процессов. Полученные результаты согласуются с известными экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

### **Замечания по работе**

1. Во второй главе диссертации рассмотрен режим автоколебательных пульсаций давления с характерным высокоинтенсивным переносом теплоты от металлического нагревателя в двухфазную парожидкостную систему. Более подробное описание результатов применения преобразований Гильберта-Хуанга, использованное для анализа нестационарного состояния в охлаждаемом канале, возможно, позволило бы расширить методологию построения соответствующих математических моделей описываемого процесса.
2. В некоторых моделях, судя по их математическому описанию, использованы теплофизические свойства веществ без учета их существенного изменения с ростом температуры. Было бы полезно оценить влияние этого допущения на полученные результаты вычислений.
3. В четвертой главе диссертации представлены результаты использования подхода к обработке результатов экспериментальных исследований характеристик двухфазного потока. Было бы логично расширить применение этого подхода и на обработку результатов оптической диагностики процесса пузырькового кипения с обобщением размеров паровых пузырьков.



Вышеприведенные замечания не снижают общей высокой оценки работы в целом.

### **Заключение**

Диссертация Левина Анатолия Алексеевича «Развитие методов моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений» является завершённой научно-квалификационной работой в области развития подходов к построению математических моделей теломассообменных процессов, протекающих в теплоэнергетическом оборудовании, и вносит значительный вклад в развитие теплоэнергетики. Тема работы актуальна, а результаты исследований обладают научной новизной, имеют теоретическое и практическое значение. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Считаю, что диссертационная работа «Развитие методов моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, критериям пунктов 9–14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (с изм. и доп.), а ее автор Левин Анатолий Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,

Ведущий научный сотрудник

ИТФ УрО РАН



Решетников Александр Васильевич

26.04.2024

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Адрес организации: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Телефон организации 8 (343) 267-88-01

E-mail организации itp@itpuran.ru

Веб-сайт организации itpuran.ru

Телефон (контактный) +7 (962) 313-86-70

E-mail (контактный) reshav@itpuran.ru

Подпись Решетникова А.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИТФ УрО РАН, к.ф.-м.н.



Андбаева В.Н.

26.04.2024