

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. Автор ставит целью работы разработку 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.

Актуальность работы. Надежное функционирование теплоэнергетического оборудования, равно как и устойчивость развития энергетической отрасли в настоящее время обеспечивается благодаря использованию математических моделей процессов, протекающих в этом оборудовании. Количество разнообразных подходов к численному представлению переходных состояний при фазовых переходах либо термохимической конверсии вещества растет с каждым годом. Ввиду сложности развития теоретического описания в большинстве случаев разработчики программных реализаций опираются на эмпирические сведения, получаемые из различных, не всегда успешно обобщаемых источников данных. Таким образом, возникает необходимость развития методических основ создания математических моделей нестационарных процессов тепломассообмена и построения их численных реализаций с использованием результатов натурных экспериментов и физического моделирования. Поэтому главные направления исследований в области динамики энергетического оборудования связаны с разработкой, усовершенствованием и применением математических моделей процессов, связанных с фазовыми переходами и термохимическими превращениями рабочих тел. Поставленная цель и полученные в работе результаты не вызывают сомнений в актуальности темы исследований автора диссертационной работы.

Структура и содержание работы. Работа содержит 314 с., состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 220 наименований и трех приложений. Текст диссертации сопровождается иллюстративным материалом в виде 108 рисунков и 11 таблиц.

В первой главе диссертации рассматривается текущее состояние исследований в области математического моделирования технических систем с учётом интенсивных фазовых превращений. Здесь же представлены описания задач, которые были рассмотрены на примере моделирования тепломассопереноса при вскипании недогретой жидкости на металлической поверхности, лазерно-индуцированного кипения, динамики пароводяных и газоздушных трактов тепловых электрических станций, а также описания термохимической трансформации низкосортного твердого топлива. Также была описана методология использования замыкающих соотношений при построении таких математических моделей. Как было показано в диссертационной работе, особой проблемой при описании физических систем является необходимость расширения существующих теоретических описаний на нестационарные режимы. Для задач описания характеристик пузырькового кипения и конверсии твердого топлива автором показана необходимость интеграции эмпирических сведений и их обобщений с разработкой математических моделей тепломассообменных процессов в энергетических установках.

Во второй главе описаны подходы автора к построению математических моделей процессов с интенсивным теплообменом. В их число вошли взаимодействия недогретой жидкости с тепловыделяющими каналами, лазерно-индуцированное вскипание жидкости на поверхности оптического волокна, автоколебательные пульсации давления в щелевом канале, вызывающие особые сверхинтенсивные режимы теплообмена. Полученные численные реализации позволили не только успешно воспроизвести результаты физических экспериментов, но и вскрыть механизмы ряда наблюдаемых нелинейных эффектов.

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованиям автора в области моделирования процессов конверсии твердого топлива. Представлены разработанные математические модели протекающих в разных ступенях установки процессов, основанные на сочетании результатов натуральных испытаний с уравнениями сохранения и кинетики химических реакций. В результате реализации математической модели процессов тепломассопереноса и аэродинамики были рассчитаны поля температур, скоростей, плотностей сред, построены линии тока. Результаты верификации модели по данным экспериментов, проведенных в ИСЭМ СО РАН, подтвердили невозможность апостериорного описания кинетики химических реакций и необходимость индивидуальной настройки математического обеспечения на основе эмпирических сведений. Проведенные численные исследования подтвердили сходимость и устойчивость полученных численных решений.

В четвертой главе излагаются результаты анализа и оптимального выбора методов обработки данных экспериментального исследования при разработке и реализации моделей в виде программных комплексов. На примере характеристик пузырькового кипения (размер паровых пузырьков, плотности центров парообразования и условий начала нуклеации) демонстрируется взаимосвязь между методами обобщения эмпирических сведений и качеством построенных математических моделей. Изложен метод обработки эмпирических сведений, позволяющий выполнять оценку исходных данных по критерию максимальной достоверности и анализировать эффективность реализаций различных математических моделей для описания физического явления.

Пятая глава диссертации посвящена задачам, связанным с модельным описанием движения двухфазных сред и замыкающих соотношений для таких моделей в различных постановках. В качестве физических систем рассмотрены: пароводяные и газоздушные тракты энергоблоков тепловых электрических станций, отдельные протяженные участки, обтекание двухфазным потоком поверхности с образованием затопленной струи жидкости. Построены математические модели в виде систем алгебраических уравнений в рамках теории гидравлических цепей и систем дифференциальных уравнений. Особое внимание уделено определению гидравлических свойств потоков, а также апробации математических моделей на результатах физического эксперимента. Результаты проведенных параметрических исследований позволили определить степень влияния ключевых параметров на определяющие характеристики кумулятивной струи, являющиеся важными для практических реализаций.

В шестой главе приведено описание реализованных автором комплексов программ, использованных для осуществления численных исследований. Характерной особенностью решаемых задач являлось наличие интенсивных фазовых превращений в условиях высоких значений удельных тепловых потоков. Все рассмотренные и описанные в главах 2–5 диссертации задачи были реализованы в программных комплексах. Результаты вычислений, выполненных на реализованных математических моделях, легли в основу подавляющего большинства публикаций автора диссертации. Разработанные программные средства защищены свидетельствами о государственной регистрации.

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, докладывались на конференциях различного уровня. По теме диссертации опубликована 35 научных статей, 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. Получено 5 авторских свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность полученных результатов обеспечивается валидацией математических моделей с использованием полученных в ИСЭМ СО РАН и опубликованных в научно-технической литературе экспериментальных данных, а также сравнением результатов решения ряда менее сложных задач с теоретическими результатами других авторов.

Новизна результатов исследования

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 быстро растущей температуры поверхности нагрева. Выполнена апробация и верификация этих моделей для группы граничных условий (задание начальной температуры жидкости, скорости роста температуры, скорости движения жидкости).
3. Предложен оригинальный подход к обработке результатов экспериментов с уточнением 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 и реализованы математические модели термической конверсии частиц твердого топлива в перспективных установках по газификации. Также разработаны математические модели для описания процессов 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 ценность работы заключается в том, что она вносит весомый 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 жидкостей и газов. Обосновывается общность и неразрывный характер сочетания задач разработки математических моделей, выбора методов обобщения эмпирических данных, а также численной реализации моделей.

Практическая ценность работы состоит в развитии методов построения математического обеспечения имитационных моделей процессов, протекающих в оборудовании теплоэнергетического профиля, сопровождающихся значимыми фазовыми трансформациями. Полученные на основе разработанных автором подходов методы обобщения данных и модели могут быть полезны для разработчиков 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 для разработки устройств для пиролиза и газификации таких топлив.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа 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 натурального 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 и комплексов программ для проведения вычислительных экспериментов.

Замечания по работе

1. При формулировке цели работы автором диссертации допущена смысловая погрешность. Химические трансформации веществ не являются фазовыми превращениями, поэтому при определении цели диссертации вместо слов «...в том числе химической трансформации» следовало писать «а также химических трансформаций...».
2. Подпись к рис. 2.6 (стр. 68) сформулирована некорректно. Сопоставлять тепловой поток (даже вычисленный) и диаметр пузыря невозможно, т.к. эти две характеристики имеют разный физический смысл и, соответственно, размерность.
3. Нетипичным для диссертаций является приведение в рукописи рисунков, на которые в тексте нет ссылок, например, после ссылки на рисунок 2.9 появляется ссылка только на рисунок 2.14 (стр.71-81). Формально присутствие большой группы рисунков в рукописи не обосновано.

4. Приведенная на рис.2.13 (стр.80), на который нет ссылки в тексте, «зависимость числа Ra от теплового потока» фактически иллюстрирует отсутствие такой однозначной зависимости при значении $Q = 1 \text{ МВт/м}^2$ число Релея принимает значения (и около 4000 и более 40000).

5. В 3-ей главе диссертационной работы рассматриваются результаты обобщений для математической модели пиролиза в рамках одноступенчатого приближения. Несмотря на достаточно широкое распространение такого подхода, было логично провести анализ результатов использования многостадийных моделей в других исследованиях для определения значимости замыкающих соотношений, опирающихся на эмпирические сведения.

6. Заключение автора по результатам проведенных им вычислительных экспериментов в разделе 5.1, посвященном расчету потокораспределения в трактах энергетических установок, основано на конкретном перечне оборудования. Насколько широко можно распространить предложенный подход на другое оборудование?

Заключение по работе

Вышеуказанные замечания не снижают научной ценности представленной работы. Диссертация Левина А.А. является завершенной научно-квалификационной работой в области разработки математических моделей теплоэнергетического оборудования и методов решения соответствующих задач. Результаты исследований обладают научной новизной, имеют теоретическое и практическое значение. В рамках работы предложены новые подходы к построению моделей тепломассообменных процессов, сопровождающихся интенсивными фазовыми превращениями, таким образом внося значительный вклад в развитие теплоэнергетики страны. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. 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, профессор
специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
Профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
ФГАОУ ВО ТПУ



Кузнецов Гений Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Адрес организации: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30
Телефон организации 8 (3822) 60-63-33
E-mail организации tpu@tpu.ru
Веб-сайт организации https://tpu.ru/
Телефон (контактный) +7 (913) 103-25-71
E-mail (контактный) kuznetsovgv@tpu.ru

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

И.о. ученого секретаря Национального
исследовательского Томского
политехнического университета



Новикова В.Д.

06.05.2024

