

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по научной и инновационной
деятельности Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор

Ворожцов Александр Борисович

« 27 » мая 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность темы диссертационной работы.

Диссертация Левина Анатолия Алексеевича посвящена разработке комплекса математических моделей и численных методик для исследования процессов интенсивных фазовых переходов в нестационарных условиях, в том числе химической трансформации вещества с существенной нелинейностью температурных полей. Актуальность темы обусловлена необходимостью обеспечения безаварийной и устойчивой работы энергетического оборудования с изменяющимся фазовым состоянием рабочих жидкостей. При конструировании такого рода оборудования и проведении оценки его работы с целью обеспечения высокой надежности, как правило, используют методы математического моделирования, а также элементы физического эксперимента. Физический эксперимент является не только способом качественного понимания особенностей протекающих процессов, но также служит основой для многих численных моделей, поскольку предоставляет эмпирические данные.

Наиболее эффективным и менее трудозатратным методом исследования процессов интенсивных фазовых переходов в нестационарных условиях является использование подходов вычислительной математики и теплофизики, что очень

подробно изложено в рецензируемой работе. Диссертационная работа следует за основным трендом в построении современных программных средств в описываемой области, она направлена на улучшение точности результатов расчета, достигаемое уточнением некоторого набора коэффициентов математических моделей на основе новых экспериментальных сведений, получаемых в ограниченном диапазоне режимных условий.

Кроме того, математическое моделирование рассматриваемых процессов позволяет не только получить решения, имеющие отношения к одной определенной технической проблеме, но и сформулировать математические модели, использование которых возможно для широкого спектра научно-технических задач. Отмеченная широта и универсальность подхода, разработанного в диссертационной работе, также иллюстрируют необходимость развития математического моделирования в свете неуклонного роста производительности вычислительных систем.

Следует также отметить, что проведенные исследования полностью соответствуют направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в рамках перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышению эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии.

С учетом всего выше сказанного, тема диссертационной работы Левина Анатолия Алексеевича является важной и актуальной.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Общий объем диссертации – 314 страниц, в том числе 108 рисунков и 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 (Приложения В и Г).

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и предмет исследования. Представлены выносимые на защиту положения,

изложено краткое содержание разделов диссертации и приведены сведения об основных публикациях.

Первая глава диссертации представляет обзор академической литературы за последние десятилетия, включающий исследования и результаты ученых, работающих в области создания предсказательных моделей кипения. Приводится описание предметной области математического моделирования физических систем в условиях протекания фазовых превращений на основе законов сохранения. Формулируются задачи моделирования тепломассопереноса с интенсивными фазовыми превращениями для некоторых физических систем. Соискателем показана необходимость интеграции экспериментальных исследований с разработкой математических моделей. Проведен анализ работ в рамках исследования процессов тепломассообмена в системах с химической трансформацией веществ. Показано, что 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. Описаны подходы к усреднению характеристик процессов, применяемые в разнообразных практических реализациях обобщений. 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. Изучены современные результаты использования методов искусственного интеллекта для задач моделирования межфазных взаимодействий.

Во второй главе представлены разработанные автором модели кипения недогретой жидкости и результаты численного моделирования. Изучены особенности пузырькового кипения недогретой жидкости в условиях нестационарного тепловыделения. Соискателем описана разработанная в рамках диссертации численная модель пузырькового кипения в условиях нестационарного роста температуры теплоотдающей поверхности. Детально проанализированы результаты численного моделирования нестационарного пограничного слоя жидкости при пузырьковом кипении, а также исследовано влияние величины

теплового потока на отдельные компоненты теплового баланса при различных уровнях недогрева жидкости до температуры насыщения. Показана возможность применения аналитического подхода к расчету теплообмена между твердой поверхностью и недогретой жидкостью при растущем тепловом потоке. Для объяснения причин немонотонного влияния скорости потока на характеристики кипения соискателем была применена модель пристенного нестационарного пузырькового кипения. Сопоставление с результатами экспериментальных исследований показало наличие 10% относительной погрешности в корреляции между скоростью роста пузырька и критической скоростью потока. В данной главе представлены также результаты математического моделирования импульсного лазерного нагрева недогретой жидкости, а также интенсивного охлаждения металлической поверхности в условиях циклической пульсации давления в жидкости.

В третьей главе представлены результаты исследований автора, целью которых являлось совершенствование технологии термохимической конверсии твердого топлива в перспективной многоступенчатой установке малой мощности. Соискателем разработаны математические модели трех ступеней установки, представляющие собой шнековый реактор, смешивающий эжектор и бункер. Приведено обоснование применения технологии и описание существующей в ИСЭМ СО РАН (г. Иркутск) установки для проведения экспериментальных исследований и верификации разрабатываемых CFD-моделей термохимической конверсии биомассы. Соискателем продемонстрирована работоспособность созданной математической модели установки путем получения результатов численного моделирования эжектора, обеспечивающего смешивание и сгорание пиролизного газа, а также численного моделирования третьей ступени установки, представляющей собой реактор с неподвижным слоем твердого топлива. Математическое моделирование проведено в среде Comsol Multiphysics. Соискателем получены расчетные поля температур, скоростей, плотностей сред, линий тока и прочих производных данных.

Четвертая глава посвящена вопросам поиска оптимального выбора методов обработки эмпирических сведений, а именно – обобщению массива эмпирических данных, обладающих стохастическим характером. В данной главе представлены

результаты применения разработанных методических подходов к определению максимального диаметра парового пузыря при вскипании недогретого потока жидкости, а также рассмотрена проблема определения плотности центров парообразования на теплоотдающей поверхности и температуры начала фазового перехода при условии интенсивного тепловыделения в недогретую до температуры насыщения жидкость. Показано, что выбор обобщающих эмпирические сведения расчетных зависимостей для предсказания характеристик пузырей зависит от цели их имплементирования в математические модели переходных процессов. Соискателем предложен оригинальный подход к обработке результатов экспериментов с подстройкой коэффициентов математических моделей, учитывающих индивидуальные особенности источников эмпирических сведений. Данный подход обеспечивает минимизацию средней и максимальной погрешностей 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.

В пятой главе представлено описание определения характеристик движущихся сред в теплофизических задачах. Проведен расчет потокораспределения в трактах энергетических установок с существенно нелинейным характером изменения теплофизических свойств рабочей среды. В данной главе соискателем подробно описаны методики по определению гидравлических свойств потоков при построении численных реализаций математических моделей динамики оборудования энергетических установок. Изложены результаты численного моделирования процесса нестационарного вскипания и образования кумулятивной струи в результате поглощения недогретой жидкостью импульсного лазерного излучения. Разработан подход, позволивший 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. В качестве замыкающих соотношений для математической модели использовались экспериментальные данные о формировании кумулятивной

струи, возникшей в результате роста и последующего схлопывания парового пузыря на торце волокна.

Шестая глава содержит сведения о составе и принципах построения комплексов программ, созданных автором для моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений. Соискателем приведено описание программных средств, разработанных для реализации математических моделей, представлена реализация математических моделей в виде программных комплексов, необходимых для теоретического исследования процессов тепломассообмена на основе анализа результатов теоретического моделирования и физического эксперимента.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы по проведенному анализу.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректностью разработанных математических моделей, их соответствию исследуемым процессам, теоретическим представлениям в предметной области, а также верификацией на экспериментальных результатах, полученных различными исследовательскими группами.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- 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.
- 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.

– 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.

– Разработаны, исследованы и реализованы математические модели термической конверсии частиц твердого топлива в перспективных установках по газификации.

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

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в расширении возможностей обеспечения безаварийной работы теплообменного оборудования и создания новых перспективных энергетических технологий, благодаря предложенным автором диссертации подходам к 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 III.17.1. «Методы и модели исследования и оптимизации инновационных энергетических процессов и установок», III.17.1. «Системный анализ инновационных энергетических технологий», раздел III.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.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы А.А. Левина могут быть использованы в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), Объединенном институте высоких температур РАН (г. Москва),

Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, в научно-исследовательских институтах и центрах, занимающихся численным моделированием и экспериментальными исследованиями процессов интенсивных фазовых переходов для задач исследования и разработки перспективного теплообменного оборудования.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. Основное содержание диссертации с достаточной полнотой изложено в 35 научных статьях, из них 20 – в журналах, включенных в Перечень 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 сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, индексируемых в международных базах данных. Получено 5 авторских свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Замечания к диссертационной работе

1. При рассмотрении задачи о пузырьковом кипении в условиях нестационарного роста температуры теплоотдающей поверхности в разработанную математическую модель соискатель заложил постоянство теплофизических характеристик. Аналогичный подход был использован также и при решении других задач. При этом в тексте диссертации отсутствует обоснование данного подхода.

2. Очень часто в диссертационной работе соискатель при формулировке краевых задач математической физики пренебрегает математической детализацией начальных и граничных условий.

3. При моделировании турбулентного течения газов во второй ступени технологической установки по переработке низкосортного твердого топлива соискатель использовал стандартную k - ϵ модель турбулентности. Непонятна причина выбора данной модели. Проводился ли анализ моделей турбулентности для рассматриваемого класса течений?

4. На рисунке 3.9 представлены поля скорости движения газов в струйном сопле для различных массовых расходов газа, поступающих после разложения топлива из первой ступени установки. К сожалению, соискатель не указал в подписи к рисунку для каких параметров получено каждое из представленных распределений. При этом описание данного рисунка отсутствует и в тексте диссертации. На крайних справа распределениях скорости заметна асимметрия потока, причина которой непонятна.

5. При численной реализации рассматриваемых задач соискатель использовал коммерческий вычислительный комплекс COMSOL Multiphysics. При этом в работе отсутствует описание применяемых разностных схем для аппроксимации уравнений, которые были задействованы в выбранном пакете. Также следовало более подробно рассмотреть вопрос выбора расчетной сетки и временного шага при решении нестационарных задач.

6. В тексте диссертации встречаются опечатки и неточности. Некоторые рисунки, представленные в диссертации, не описаны в тексте.

Соответствие диссертационной работы указанной специальности

Диссертационная работа Левина Анатолия Алексеевича «Развитие методов моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений» по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: положение диссертационной работы №5 соответствует пункту паспорта №3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», положения диссертационной работы №№ 1, 3 и 5 соответствуют пункту паспорта №4 «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели», положения диссертационной работы №№ 3 и 5 соответствуют пункту паспорта №6 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей», положение диссертационной работы № 2 соответствует пункту паспорта №8 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением

современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», положение диссертационной работы № 2 соответствует пункту паспорта №9 «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий».

Заключение


По своим целям и задачам, содержанию и методам исследования диссертация Левина А.А. соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Учитывая актуальность темы диссертации, новизну и практическое значение полученных результатов, наличие свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, считаем, что диссертационная работа Левина Анатолия Алексеевича «Развитие методов моделирования тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений» является законченной научно-квалификационной работой, содержит решение проблемы создания методики моделирования тепломассообменных процессов, протекающих в условиях интенсивных фазовых превращений, при исследовании и разработке перспективного теплоэнергетического оборудования, таким образом внося значительный вклад в развитие энергетики страны. Диссертационная работа полностью отвечает всем требованиям и критериям (требованиям пп. 9–11, 13, 14), установленным Положением «О присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции), которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Автор диссертации Левин Анатолий Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором Бубенчиковым Алексеем Михайловичем.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию Левина Анатолия Алексеевича обсуждены на совместном расширенном заседании кафедры теоретической механики и научно-исследовательской лаборатории моделирования

процессов конвективного теплопереноса Национального исследовательского
Томского государственного университета 22 мая 2024 года, протокол № 75.

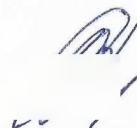
Ведущий научный сотрудник регионального
научно-образовательного математического центра,
профессор кафедры теоретической механики
Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор


Бубенчиков Алексей Михайлович

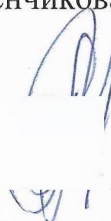
27 мая 2024 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский Томский государственный
университет»; 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; тел. (3822) 52-98-52, rector@tsu.ru,
<http://www.tsu.ru>

Я, Бубенчиков Алексей Михайлович, даю согласие на включение своих
персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Левина
Анатолия Алексеевича, и их дальнейшую обработку.


Бубенчиков Алексей Михайлович

Подпись А. М. Бубенчикова удостоверяю:


СПЕЦИАЛИСТ ПО КАДРАМ
ОТДЕЛА КАДРОВ
О. В. ФАЦЕУС
27.05.2024

