

ОТЗЫВ

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

На оппонирование представлены:

- диссертация на 314 с.;
- автореферат на 44 с.

Актуальность работы. В настоящее время выработаны приоритеты промышленного производства, среди которых можно отметить следующие: создание и дальнейшее развитие энергоэффективных технологий, выполнение технологических мероприятий, направленных на повышение надежности и безопасности энергетического оборудования и процессов, разработка экологически чистых видов энергетики и т.д. При этом появляется необходимость в теоретическом осмыслении и системном исследовании большого круга проблем, возникающих при решении этих вопросов. Значительную роль в этом играет математическое моделирование процессов в энергетике, адаптация математических моделей для решения конкретных практических задач с учетом эмпирических сведений о протекающих процессах, численная реализация моделей, а также проведение в широком диапазоне режимных параметров и граничных условий вычислительных экспериментов. Таким образом, математические модели протекающих в энергетическом оборудовании гидро- и термодинамических процессов, а также их практическая реализация в виде различных программных комплексов, играет немаловажную роль в решении задачи создания надежной базы для развития энергетической отрасли. Существенным моментом в развитии современных программных продуктов в данной сфере является повышение точности расчетов путем уточнения определенного набора коэффициентов математических моделей на основе новых данных, полученных в рамках ограниченных условий проведения эксперимента.

Современное состояние исследований различных гидродинамических и тепломассообменных процессов в условиях интенсивных фазовых превращений характеризуется тенденцией к нахождению адекватных математических моделей наблюдаемых при этом явлений. При этом детальное описание изучаемых процессов с учетом внутрифазных и межфазных взаимодействий в таких гетерогенных средах является чрезвычайно сложным, и для получения обозримых результатов и их понимания зачастую прибегают к рациональным схематизациям, приводящим к обозримым и численно реализуемым математическим

моделям. Имеется немалое количество работ, посвященных изучению неравновесных процессов тепло- и массообмена в энергетических установках, но, несмотря на это, данную проблему нельзя считать всесторонне изученной и достаточно решенной. Это связано со значительными трудностями исследования и моделирования в общем случае неустановившихся, нестационарных и неравновесных многофазных систем, со взаимосвязью гидродинамики и структуры в таких системах с фазовыми переходами и режимами теплообмена, с несовершенством используемых эмпирических сведений и многофакторностью условий реализации натуральных экспериментов, а также с необходимостью выбора оптимальных численных реализаций математических моделей изучаемых процессов.

В этой связи диссертационная работа А.А. Левина, направленная на моделирование и изучение динамики процессов тепломассопереноса в энергетических установках при высокоинтенсивных фазовых превращениях, имеет, несомненно, научное и практическое значение. Такое исследование может существенно дополнить и расширить имеющиеся представления об изучаемых гидро- и термодинамических явлениях. Разработка ряда новых, а также модификация существующих математических моделей тепломассообменных процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений, создание методики построения численных алгоритмов и программного обеспечения, получение широкого набора детальных расчетных данных и их анализ для надежного предсказания развития изучаемых процессов и/или оптимизации энергетических установок определяют актуальность представленной работы.

Соответствие диссертации паспорту специальности. В диссертации А.А. Левина развит математический аппарат для описания, прогноза и управления неравновесными процессами тепло- и массообмена с интенсивными фазовыми переходами применительно к практическим задачам энергетики, созданы новые численные методы для решения задач потокораспределения в трактах энергоустановок, обработки результатов экспериментального исследования различных процессов (парообразования в результате теплового воздействия на объем недогретой жидкости, термохимическая конверсия твердого топлива, течение пароводяной смеси через пористую среду), осуществлена численная реализация математических моделей гидро- и термодинамических процессов в энергетических установках в условиях интенсивных фазовых превращений и на основе предложенных численных алгоритмов разработаны программные комплексы, позволявшие соискателю провести комплексные исследования заявленных в диссертации проблем. Из вышесказанного следует соответствие диссертационной работы паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. 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.

Новизна результатов исследования. В диссертации А.А. Левина реализован системный подход к построению математических моделей гидро- и термодинамических процессов в условиях неопределенности конечной формы таких моделей на стадии обобщения эмпирических сведений. Диссертационная работа вносит существенный 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 со значительными изменениями свойств потоков. В основном можно согласиться с формулировками автора о новизне работы, которая заключается в следующем: 1) предложена модификация математической модели пузырькового кипения, основанная на обоснованном способе усреднения геометрических характеристик пузырей пара при кипении на теплоотдающих поверхностях; 2) расчетным путем показано, что объем пара, который образуется при пузырьковом кипении, немонотонным образом зависит от скорости течения жидкости на нагреваемой поверхности; представлено объяснение данного факта; 3) предложен аналитический подход к расчету интенсивностью теплообмена между твердой поверхностью и недогретой до температуры кипения жидкостью при растущем тепловом потоке; рассмотрены возможности и ограничения на описание нестационарных режимов теплообмена при использовании данного подхода; 4) разработан метод модификации математических моделей изучаемых процессов, заключающейся в подстройке на основе обработки результатов экспериментов коэффициентов моделей, что позволяет учесть особенности источников эмпирических сведений и обеспечить минимизацию как средней, так и максимальной погрешности замыкающих соотношений для математических моделей; 5) усовершенствованы, исследованы и численно реализованы математические модели термической конверсии частиц твердого топлива в перспективных установках по газификации; 6) развиты методы теории гидравлических цепей для расчета потокораспределения в трактах энергетических установок; представлен анализ результатов применения данных методов для интерактивного моделирования гидрогазодинамических и тепловых процессов в оборудовании тепловых электрических станций; разработана модификация метода узловых давлений, позволяющая учесть влияние фазового перехода среды на замыкающие соотношения; показана работоспособность реализованного подхода в условиях сильных возмущений параметров соответствующей гидравлической цепи; 7) разработана численная модель процесса

нестационарного вскипания и образования кумулятивной струи в результате поглощения недогретой жидкостью импульсного лазерного излучения; расчетным путем выявлена степень влияния ключевых характеристик торца оптоволокна на определяющие характеристики кумулятивной струи, являющиеся важными для практических реализаций; 8) с целью численного моделирования и изучения динамики процессов гидродинамики и теплообмена в энергетических системах разработаны численные алгоритмы и программные средства с учетом впервые полученных эмпирических сведений о протекании нестационарных процессов в присутствии тепловых потоков высокой интенсивности.

Обоснованность и достоверность результатов работы. Исследование изучаемых в диссертации явлений осуществлено с привлечением современных вычислительных средств и экспериментальных установок для изучения критических и переходных процессов теплопереноса при высокоинтенсивных фазовых превращениях. Обоснованность и достоверность работы следует из корректной постановки задач, применения при разработке математических моделей фундаментальных уравнений механики сплошных сред, термодинамики и теории неравновесных процессов. Полученные результаты согласуются с экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

Научная и практическая ценность диссертации обусловлена, прежде всего, важностью практических приложений, послуживших мотивацией для моделирования и изучения динамики процессов теплопереноса в энергетических установках при высокоинтенсивных фазовых превращениях. Проведенные исследования охватывают достаточно широкий спектр задач данной проблемы и позволяют решать актуальные прикладные задачи. Полученные на основе разработанных автором подходы методы обобщения данных могут быть интересны для разработчиков математических моделей энергетического оборудования, позволяя существенно расширить диапазон применимости существующих эмпирических подходов для нестационарных режимов с фазовыми переходами. Проведенные исследования в области разработки технологии трансформации низкосортного твердого топлива могут быть применены для разработки устройств для пиролиза и газификации. Результаты диссертационной работы с успехом могут быть использованы в учебном процессе, в частности, при изложении таких дисциплин, как «Теория теплообмена», «Математическое моделирование неравновесных процессов», «Численные методы решения задач энергетики» и др.

В качестве **замечаний** хотелось бы высказать следующее:

1. Приведенная соискателем математическая модель пузырькового кипения в условиях нестационарного роста температуры теплоотдающей поверхности является ключевой для разделов диссертации, посвященных нестационарному кипению. В модели рассматривается однофазный теплообмен, а кипение учитывается через введение источников тепла в жидкости и нагревателе. Мощность источников тепла определяется через

выражения для потоков тепла, замыкаемых эмпирическими соотношениями. Недостатком модели является, на мой взгляд, недостаточная обоснованность и в некоторых случаях предельная упрощенность ряда использованных приближений и оценок. Так при введении источников тепла сохраняется вид уравнения теплообмена в жидкости (2.4) в области влияния пузырьков, что при определенных условиях может привести к требующей учета погрешности вычислений. Точность модели, как представляется, сильно зависит от соотношения величины перегрева поверхности и величины недогретости жидкости. Было бы целесообразно в диссертационной работе представить связанную с принятыми допущениями погрешность модели в «фазовом» пространстве перегрев поверхности-недогрев жидкости.

2. Значительная часть диссертации посвящена изучению влияния течения жидкости на теплообмен при нестационарном кипении. Соискатель достаточно полно исследовал традиционный аспект данной проблемы: влияние течения на кипение и теплообмен через конвективную составляющую тепловых потоков. В то же время анализ влияния непосредственно гидродинамической «моды» на процессы нуклеации, роста и взаимовлияния паровых пузырьков практически отсутствует (исключение составляет п. 2.7, посвященный автоколебательному кипению). С учетом шероховатости поверхности нагревателя, высокой скорости движения границы растущих паровых пузырьков, пульсаций давления при их выбросах в поток такой анализ представляется актуальным. Также было бы целесообразно обсудить вопрос о сохранении граничного условия прилипания жидкости к поверхности нагревателя при развитом кипении.

3. Есть определенные, на мой взгляд, пробелы в проведенном автором диссертации математическом моделировании коллапса инициированного лазерным излучением парового пузырька у торца оптоволоконка. При всем его несомненном практическом значении, последующее изучение на основе данной модели позволит лишь выявить значимые факторы формирования кумулятивной струйки, но не сможет установить надежные количественные соотношения между параметрами процесса. Причины состоят в сложности корректного теоретического описания ряда процессов: наблюдаемого в эксперименте развития неустойчивости границы пузырька, динамического смачивания в условиях конденсации пара, деформаций оптоволоконка, влияния примесей и т.п.

Но при обсуждении данного замечания стоит отметить, что использование таких более простых моделей на данном этапе исследования даже предпочтительнее, так как позволяет выявить качественные закономерности, которые могут быть верифицированы в эксперименте.

4. В работе при обобщении эмпирических сведений решалась задача минимизации максимальных отклонений (погрешностей) между расчетными и замеренными значениями параметров. При этом вместо обычно применяемой минимизации суммы квадратов относительных погрешностей минимизирована сумма модулей относительных погрешностей замеряемых параметров. Здесь диссертанту необходимо было привести дополнительные

основания в обоснованности применения такого подхода, поскольку аналитическое решение задачи минимизации суммы модулей отклонений обычно является более сложным, чем в случае минимизации суммы квадратов отклонений.

5. Диссертация не свободна от опечаток, стилистических и смысловых погрешностей (например, «...тепловой поток теплопроводности ...», «...массовых расходов газа, поступающих...», «...на полпути через пиролизер...» и т.п.). В некоторых случаях отсутствуют необходимые пояснения при введении некоторых понятий и соотношений, неточности при написании уравнений. Например, соотношения (2.4) и (2.5) записаны одинаково (без индексации), хотя и относятся к разным материалам. В этой же системе уравнений не приведены граничные условия для температуры. Рисунки 1.1, 1.2, 2.3 и 2.7 размещены в диссертации до их первого упоминания в тексте. Для экспериментальных данных на графиках не указан доверительный интервал значений измеряемых величин, что может привести к искажению анализа полученных данных в тех случаях, когда изменение измеряемой величины мало и может быть сравнимо с ошибкой эксперимента.

Сделанные замечания не влияют **на общую оценку работы**, которая заключается в следующем.

Результаты диссертационного исследования имеют значимую научную и практическую новизну и показывают высокий научный уровень соискателя. Текст автореферата диссертационной работы в полной мере отражает содержание всего объема результатов исследований. Список публикаций, приведенный в автореферате, указывает на проработку всего круга поставленных задач. Материалы диссертационной работы докладывались на международных и российских научных конференциях; по теме диссертации опубликовано 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.

Приведены теоретические положения, вычислительные алгоритмы и программные средства моделирования, экспериментальные и расчетные данные, практические рекомендации, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение в проблематике моделирования и изучения гидродинамических и тепломассообменных процессов при высокоинтенсивных фазовых переходах.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Левина А.А. является завершенной научно-квалификационной работой в области разработки математических моделей нестационарных процессов, протекающих в энергетических установках, обладает научной новизной, содержит оригинальные результаты, имеет теоретическое и практическое

значение, а тема работы является актуальной. Решена важная научная проблема создания методики моделирования тепломассообменных процессов, протекающих при наличии интенсивных фазовых превращений при разработке и исследовании перспективного теплоэнергетического оборудования, таким образом, внося значительный вклад в развитие теплоэнергетики России. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. 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 ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Я, Мусакаев Наиль Габсалямович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Левина Анатолия Алексеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
директор ТюмФ ИТПМ СО РАН,
доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы), профессор _____

Мусакаев Наиль Габсалямович

23.04.2024г.

Тюменский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ТюмФ ИТПМ СО РАН)

Адрес организации: 625026, г. Тюмень, ул. Таймырская, д. 74

Телефон организации: (3452) 68-27-45

E-mail организации: tbitamsbras@yandex.ru

Веб-сайт организации: timms.tmnsc.ru

Телефон (контактный): (3452) 68-22-18

E-mail (контактный): musakaev68@yandex.ru

Подпись д.ф.-м.н., профессора Мусакаева Н.Г. удостоверяю
Ученый секретарь ТюмФ ИТПМ СО РАН,
к.ф.-м.н.

Бородин С.Л.

