

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор
по научной работе ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный
университет (национальный

педагогический университет)»,
технических наук, доцент

 А.В. Коржов

 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе Бородкина
Станислава Владимировича «Математическое моделирование
процессов переноса в сверхкритических теплообменниках на
основе сеточных методов», **представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 –
Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ**

Актуальность темы исследования

Современные методы создания экономичных высокопроизводительных конструкций технического назначения требуют применения адекватных математических моделей сопряженных физико-технических процессов и разработки эффективных численных алгоритмов их решения. Одним из таких процессов является перенос с обменом энергией в средах, характеризующихся особыми свойствами, подобными размытому фазовому переходу первого рода без образования фазовой границы, каковыми, например, являются сверхкритические флюиды (СКФ). Математическая модель такого процесса должна представлять собой систему задач переноса со свободной границей, появление которой обусловлено фазовым переходом в области между потоками при энергетическом обмене между ними.

Моделирование одномерных процессов переноса, в том числе с использованием уравнений газовой динамики, проводилось рядом

отечественных и зарубежных авторов (С.К. Годунов, А.А. Самарский, Г.И. Марчук, К.М. Магомедов, А.С. Холодов, Н.Н. Яненко, Л.А. Чудов, Т.Р. Курант, П.Д. Лакс, Б. Вендорф, Дж.П. Борис, Ф.Х. Харлоу и другие). Задача тепломассопереноса в сверхкритических потоках рассматривалась в трудах С.С. Кутателадзе, Б.С. Петухова, В.Н. Попова, Е.А. Краснощекова, В.С. Протопопова, Н.Е. Петрова, Дж.Д. Джексона и других. Численные методы решения задач с обменом на свободной границе разрабатывались в трудах А.А. Самарского, Б.М. Будака, П.Н. Вабишевича, В.П. Маслова, Н.А. Рубцова, А. Фридмана и других. Однако совместное моделирование процессов сопряженного переноса с обменом на свободной границе с участием сверхкритических потоков практически не проводилось. Предлагавшиеся для этого модели являются упрощенными и сформулированы в стационарном варианте с аппроксимацией лишь первого порядка точности, иные алгоритмы численного решения, позволяющие повысить порядок точности, не разрабатывались. В рассматриваемой работе получены нестационарные и квазистационарные одномерные модели переноса в двух потоках различной направленности, предложены и численно исследованы алгоритмы их решения второго (для нестационарной) и четвертого (для стационарной модели) порядков точности.

С другой стороны, предлагаемая в работе одномерная математическая модель не может учесть в полной мере всех особенностей конкретной конфигурации потоков и условий обмена между ними, поэтому для практического использования такой модели требуется ее параметрическая идентификация, которая в рассматриваемом случае осложняется ограниченными экспериментальными возможностями измерения в сверхкритических потоках и плохой обусловленностью обратной задачи нелинейного переноса в нескольких потоках, что требует совершенствования математических средств идентификации подобных моделей. С этой целью в работе предлагается метод идентификации, основанный на модификации

метода стрельбы по опорным экспериментам, показавший хорошую сходимость и устойчивость в исследуемой задаче.

Таким образом, можно сделать вывод, что тема диссертационной работы С.В. Бородкина является актуальной.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы и 2 приложения.

Первая глава содержит результаты анализа существующих моделей, основанных на задачах переноса и Стефана; теоретических и экспериментальных исследований теплоотдачи в СКФ; изучена степень разработанности проблемы.

Во второй главе содержатся результаты построения и анализа системы уравнений переноса в средах с особыми свойствами с обменом на свободной границе, развития метода бигиперболической аппроксимации материальных уравнений, анализа структуры критериальных уравнений для формулировки метода сглаживания особенности при решении задачи Стефана.

В третьей главе представлены результаты построения и исследования алгоритмов численного решения задачи Стефана на основе метода сглаживания особенности, алгоритмов сквозного счета повышенной точности для решения системы задач переноса с обменом на свободной границе, алгоритма параметрической идентификации модели по опорным экспериментам и алгоритма расчета функционирования теплообменной установки на основе идентифицированной модели в стационарном и нестационарном режимах, а также алгоритм конечноэлементного моделирования критериальных соотношений в потоке СКФ.

В четвертой главе разработана архитектура программного комплекса, предназначенного для моделирования процесса тепломассопереноса с обменом на свободной границе и расчета сверхкритических теплообменников; представлены результаты моделирования входных и выходных узлов установки, определяющих входные и выходные параметры модели, а также

разработка на основе модели технических решений по повышению стабильности работы установки и ее технических характеристик.

Библиографический список включает 124 наименования.

Научная новизна

В области математического моделирования проведены модификация и анализ одномерных моделей переноса в средах с особыми свойствами, сопряженных с задачей обмена на свободной границе, для которых сформулированы условия квазистационарности задачи переноса и задачи Стефана, установлена структура критериальных уравнений, позволяющая применить метод сглаживания особенности для решения задачи Стефана в энергетическом обмене между потоками, разработан метод бигиперболической аппроксимации, учитывающий асимптотику материальных зависимостей и позволяющий существенно снизить временные затраты на решение уравнений модели.

В области численных методов предложены алгоритм конечноэлементного моделирования критериальных уравнений в потоках с особыми свойствами, алгоритмы численного решения комплекса задач переноса с обменом на свободной границе, отличающиеся реализацией методов сквозного счета повышенной точности и метода сглаживания особенности для свободной границы, алгоритм параметрической идентификации модели сверхкритического теплообменника, отличающийся использованием модифицированного метода стрельбы по экспериментам с предельными значениями управляющих параметров с последующей верификацией по промежуточным экспериментам.

В области комплексов программ разработан и зарегистрирован программный комплекс моделирования процессов тепломассопереноса в сверхкритическом теплообменнике, отличающийся реализацией механизмов организации полного цикла расчетов, включающего моделирование процесса тепломассопереноса в различных режимах и схемах переноса,

параметрическую идентификацию модели, расчет входных и управляющих параметров установки.

Степень обоснованности научных результатов и корректность выводов

Достоверность научных результатов и выводов исследования определяется корректным использованием современных математических методов, подтверждена согласованностью результатов вычислительных экспериментов с модельными примерами, верификацией модели с экспериментом на промышленной установке, а также тестированием разработанного программного комплекса на различных математических моделях. Результаты и выводы не противоречат ранее полученным результатам других авторов. Полученные результаты своевременно опубликованы, апробированы на национальных и международных конференциях.

По теме диссертации соискателем опубликовано 11 научных работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах из Перечня ведущих российских рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; один зарегистрированный программный комплекс. В совместных с научным руководителем работах научному руководителю принадлежит постановка задачи, на защиту выносятся только результаты, полученные ее автором, и не затрагивают интересы соавторов.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертации

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании возможности использования одномерных уравнений переноса с обменом на свободной границе для сред с особыми свойствами в закритической области как в стационарном, так и в нестационарном режимах. Полученные результаты комбинированного применения метода сглаживания особенности и

разностных схем повышенной точности развивают методы решения сопряженных задач переноса в теории сеточных методов. Применение абстрактных результатов для моделирования материальных уравнений сред с особыми свойствами, активно используемых в прикладных исследованиях, развивают методы математического моделирования.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что апробированные методики составления эффективных разностных схем для системы задач переноса со свободной границей и тестированные алгоритмы их решения позволяют решать аналогичные задачи и в других областях технических приложений, приводящих к задачам переноса рассмотренного в диссертации типа.

Кроме того, разработанный в диссертации программный комплекс позволяет решать большой класс задач моделирования процесса теплообмена и оптимизации конструкций устройств с теплообменом с потоками сред со специальными свойствами. По результатам работы программного комплекса были сформулированы технические рекомендации и патентные решения для совершенствования газификаторов промышленного назначения и режимов их использования.

Разработанные математические модели используются в практической деятельности заводов ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ» г. Москва и АО «УКЗ» г. Екатеринбург, что подтверждается актами внедрения результатов исследования. Результаты работы также используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» в рамках курса «Математическое моделирование процессов тепломассопереноса».

На основании полученных диссертантом результатов, целесообразно продолжить работу по распространению предложенного подхода на нестационарные внешние условия, в частности, пульсации входного давления. Также, модифицированная математическая модель может быть использована

и для описания тепломассопереноса в системах охлаждения СКФ, востребованных в фарминдустрии.

Полученные в диссертации результаты рекомендуются к использованию на промышленных предприятиях и конструкторских бюро по производству теплообменной техники специального назначения, и в теоретических и практических изысканиях в ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ» г. Москва и АО «УКЗ» г. Екатеринбург, Воронежском государственном техническом университете, Национальном исследовательском университете «МЭИ», Воронежском государственном университете, Кубанском государственном университете, Воронежском государственном университете инженерных технологий, Южно-Уральском государственном университете (НИУ), Юго-Западном государственном университете (г. Курск), Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Новосибирском государственном университете, Северо-Кавказском федеральном университете, Институте проблем управления РАН и других учреждениях.

Диссертация написана на профессиональном языке, принимаемые допущения в достаточной мере обоснованы, а логические рассуждения не противоречат правилам формальной логики.

Замечания по диссертации

Положительно характеризуя диссертацию Станислава Владимировича Бородкина, необходимо сделать ряд замечаний.

1) В работе использовано квазистационарное приближение для задачи Стефана, но неясно, как изменятся уравнения модели и алгоритмы их решения при нестационарном варианте этой задачи.

2) Рассмотренные в работе начально-граничные условия для задачи переноса исключают возможность появления слабых и сильных разрывов решения, характерных для этих задач, что сужает область практического использования результатов.

3) В работе при построении разностной схемы был использован только один тип шаблона, было бы целесообразно также исследовать возможность применения в рассматриваемой задаче и других типов разностных схем.

4) В работе присутствуют некоторые стилистические погрешности, нарушена структура работы, регламентированная ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Однако, приведенные замечания не уменьшают значимости представленных научных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Бородкина Станислава Владимировича «Математическое моделирование процессов переноса в сверхкритических теплообменниках на основе сеточных методов», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ, системного анализа, управления и обработки информации. Полученные результаты соответствуют научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Результаты диссертации являются новыми, строго обоснованными и получены автором самостоятельно. Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в соответствии с пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, поскольку является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи моделирования переноса в средах со специальными свойствами, а ее автор, Бородкин Станислав Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен кандидатом технических наук, доцентом, доцентом кафедры математического и компьютерного моделирования Клыгачем Денисом Сергеевичем. Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на расширенном заседании кафедры математического и компьютерного моделирования ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (протокол № 5 от 01.12.2022).

Председатель расширенного заседания кафедры математического и компьютерного моделирования, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Неклассические уравнения математической физики», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», доктор физико-математических наук, профессор

Свиридюк
Георгий
Анатольевич



Доцент кафедры математического и компьютерного моделирования, кандидат технических наук, доцент



Клыгач Денис
Сергеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Учредитель – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Россия, 454080 Челябинск, проспект Ленина, 76

Тел./факс: +7 (351) 267-99-00, E-mail: info@susu.ru

