

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель управляющего
директора – директор ОКБ Сухого

Стрелец М.Ю.

12 20 22

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию Бородкина Станислава Владимировича
«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В
СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ НА ОСНОВЕ
СЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности: 1.2.2. Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы исследования. Процессы тепломассопереноса лежат в основе технологических процессов в различных отраслях промышленности, таких как авиация, ракетно-космическая техника, энергетика, металлургия, нефтехимия и др. Это обусловило большое число разработанных на сегодня моделей переноса и алгоритмов их численной реализации применительно к специфике различных технических приложений.

Несмотря на это, одной из наименее исследованных является задача моделирования процесса тепломассопереноса в потоках сред в сверхкритическом состоянии. В псевдокритической области среда претерпевает превращение, которое можно интерпретировать как фазовый переход без образования границы раздела фаз, что приводит к существенному изменению свойств среды по сечению потока и требует формулировки адекватной математической модели переноса с учётом этих изменений.

Исследуемый интервал температур в криогенной технике характеризуется тем, что практически во всех случаях происходит кристаллизация атмосферной влаги на внешней поверхности теплообменных аппаратов, что приводит к необходимости включать в рассмотрение также и задачу Стефана для моделирования обмена между потоками.

Решение перечисленных задач требует дальнейшего развития средств математического моделирования и анализа процессов тепломассопереноса с обменом в нескольких потоках, учитывающих особенности теплопередачи в сверхкритических флюидах, обеспечивающих высокое качество расчета и повышение эффективности функционирования теплообменных устройств в соответствии с требуемыми теплоэнергетическими характеристиками. С учетом вышесказанного, тема диссертации Бородкина С.В., посвященной

разработке и исследованию задач математического моделирования процессов переноса в сверхкритических теплообменниках, является актуальной.

Достоверность и научная новизна. Обоснованность научных положений и выводов диссертации базируется на корректном использовании системного подхода, математического моделирования, теоретических положений гидрогазодинамики и тепломассопереноса.

Достоверность научных положений диссертации, выводов и рекомендаций, адекватность предложенных методов, моделей и алгоритмов подтверждены положительными результатами вычислительного эксперимента по решению тестовых задач, подтверждающими теоретические положения и выводы, а также созданием работоспособных инструментальных средств математического и программного обеспечения и комплекса проблемно-ориентированных программ.

Основные результаты диссертации являются новыми и заключаются в следующем:

1. Получены формальные средства математического моделирования процесса переноса в двух потоках, обменивающихся через свободную границу, отличающиеся использованием комбинации конечно-элементного моделирования, бигиперболической аппроксимации табличных данных и задачи тепломассопереноса в сверхкритическом потоке и позволяющие описывать процесс в различных схемах потоков и режимах переноса.

2. Разработаны алгоритмы численного решения комплекса задач тепломассопереноса с обменом на свободной границе, отличающиеся реализацией методов сквозного счета повышенной точности и метода сглаживания для свободной границы.

3. Разработан алгоритм параметрической идентификации модели сверхкритического теплообменника, отличающийся использованием модифицированного метода стрельбы по экспериментам с предельными значениями управляющих параметров с последующей верификацией по промежуточным экспериментам на основе данных натурных экспериментов.

4. Синтезированы алгоритмы определения рабочей области управляющих параметров для заданного диапазона выходных характеристик, отличающиеся использованием многомерной параболической аппроксимации функции отклика дифференциальной системы и позволяющие осуществлять расчет рабочей области для стационарного и нестационарного режима функционирования.

5. Разработан программный комплекс моделирования процессов тепломассопереноса в сверхкритическом теплообменнике, отличающийся реализацией механизмов организации полного цикла расчетов, включающего моделирование процесса тепло-массопереноса в различных режимах и схемах

переноса, параметрическую идентификацию модели, расчет входных и управляющих параметров установки.

Ценность диссертации для науки и практики. Значение диссертации Бородкина С.В. для науки и практики заключается в разработке средств, позволяющих осуществлять формирование математических моделей и алгоритмов их численной реализации для процессов, сопровождающихся переносом в нескольких потоках с обменом и фазовым переходом на границе обмена.

Разработанный соискателем пакет прикладных программ позволяет производить расчет, параметрическую идентификацию и моделирование теплообменных устройств закрытого типа, использующих сверхкритические потоки в стационарном нестационарном режимах.

Результаты диссертации могут быть использованы в качестве инструментария в научно-исследовательских организациях, проектирующих промышленные установки с процессами переноса с обменом через свободную границу, а так же в образовательном процессе инженерных факультетов вузов, включающем в себя вопросы моделирования процессов тепломассопереноса.

Оценка содержания диссертации. Диссертация Бородкина С.В. состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 124 наименований. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста. Основной текст занимает 137 страниц, содержит 83 рисунков и 17 таблиц.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель, задачи и методы исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ существующих моделей для задач переноса и Стефана и алгоритмов их решения, подходов к моделированию потоков СКФ в сверхкритических теплообменниках. Рассмотрены методы численного решения задачи со свободной границей применительно к ее сопряжению с задачей переноса и сделан вывод о том, что наиболее удобным является метод сглаживания особенности, который необходимо адаптировать к использованию совместно системой уравнений переноса в двух потоках.

Проведен анализ теоретических и экспериментальных исследований теплоотдачи в СКФ по идентификации критериального уравнения теплообмена, необходимого для замыкания уравнения переноса. Установлено, что в каждом индивидуальном случае необходима формулировка своего критериального уравнения, согласованного с экспериментальными результатами. Для решения этой задачи предложено использование конечно-элементного моделирования теплообмена в СКФ-потоке, как этапа построения математической модели процесса переноса.

На основе литературных источников проанализированы результаты применения различных моделей турбулентности для конечно-элементного расчета СКФ-потока в условиях теплообмена применительно к расчету СКФ-

потока на большой длине. Предлагается для использования EWT k - ϵ модель.

Во второй главе рассматривается постановка задачи математического моделирования на примере тепломассопереноса в СКФ-теплообменнике, для которого на основе уравнений RANS в приближении квазистационарности давления сформулирована совокупность уравнений, включающая:

- одномерную систему уравнений переноса с поглощением в СКФ-потоке;
- уравнение переноса с поглощением в теплоносителе;
- уравнение сопряжения для задачи Стефана.

Для аппроксимации табличных данных по термодинамическим и кинетическим параметрам сред разработан метод бигиперболической аппроксимации.

В третьей главе представлены алгоритмы численной реализации предложенной математической модели. Проведено детальное численное исследование устойчивости и сходимости алгоритмов методом Рунге-Ромберга и показано, что использование метода сглаживания особенности позволило сохранить высокий порядок точности локальных алгоритмов в глобальном алгоритме решения модели в целом. Следует отметить быструю сходимость разработанных итерационных методов решения нелинейных уравнений модели, обеспечивающих за 3–5 итераций достижение точности 10^{-3} и выше.

Четвертая глава посвящена описанию разработанного на основе изложенных алгоритмов комплекса программ для моделирования процесса тепломассопереноса с обменом на свободной границе и расчета сверхкритических теплообменников. Положительным моментом является целостный характер предложенного программного средства, позволяющего моделировать не только процесс переноса и обмена, но и работу устройства в целом в различных вариантах его исполнения.

В заключении представлены основные результаты и выводы по работе. Результаты широко освещены в научной печати.

В качестве **замечаний** по работе можно отметить следующее:

1. На с. 65 текста диссертации по результатам расчета коэффициентов основных теплофизических параметров приведена осредненная ошибка для всего участка, однако желательно было показать её в области перехода и показать максимальное значение.
2. В диссертации не показаны соотношения используемой k - ϵ модели потока, способ описания пристеночной области и соответствующие коэффициенты модели турбулентности.
3. Из описания натурального эксперимента в разделе 3.4 не ясно, как учитывалась тепловая инерционность термометра, так как в промышленных термометрах сопротивления она может достигать нескольких минут в зависимости от материалов, конструкции, свойств среды и т.д.

Однако отмеченные недостатки не снижают научной ценности диссертации.

Закключение. В целом диссертация является завершенным исследованием, имеет научную новизну и практическую ценность, апробирована и соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук. Диссертация соответствует пунктам 2, 3, 4 паспорта специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты исследования представлялись автором на международных научно-технических конференциях, по результатам проведенных исследований Бородин С.В. опубликовано 11 научных работ, из которых 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертации по специальности 1.2.2.

Полученные теоретические и практические результаты соответствуют цели и задачам работы. Диссертация отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Бородин Станислав Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

кандидат технических наук

(05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации)

ведущий конструктор научно-исследовательского центра

суперкомпьютерных технологий

ОКБ Сухого ПАО «ОАК»


Солдатов Евгений Сергеевич

Подпись Солдатов Е.С. заверяю


ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация»

Почтовый адрес: Россия, 115054, Москва, улица Б. Пионерская, д. 1

Телефон: +7 (977) 262-45-81; электронная почта: volshebnoekoltso@mail.ru

Согласен на обработку персональных данных