

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Бородкина Станислава Владимировича на тему «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 данной диссертационной работы обуславливается как фундаментальными вопросами математического моделирования сложных газо- и гидродинамических задач с учетом существенных нелинейных зависимостей параметров термодинамического состояния от температуры и давления, а также фазовых переходов, так и практическими запросами высокоточного расчета режимов работы криогенных установок.

Последнее определяет основную научную новизну результатов работы в области технических наук, заключающуюся в разработке последовательного подхода к математическому моделированию процессов переноса в потоках, взаимодействующих через свободную границу, и разработке соответствующих численных алгоритмов, как для решения комплекса этих задач, так и для идентификации параметров на основе работы с реалистичными техническими агрегатами. Разработанные алгоритмы реализованы в виде нового комплекса программ, апробация которых в работе ряда предприятий подтверждает практическую значимость выполненной работы, и теоретическую значимость разработанных положений, на которых она основана.

Результаты работы опубликованы (количество публикаций, так и издания, полностью соответствуют требованиям ВАК) и прошли апробацию на ряде научно-практических конференций.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

**В первой главе** представлен достаточно детальный обзор методов численного моделирования газо- и гидродинамических задач с учетом термодинамической и теплофизической составляющих. Особо следует подчеркнуть внимание, уделяемое реализации различных решеточных схем и проблеме подавления осциллирующих неустойчивостей. Вторую часть обзора составляет анализ известных реализаций конечно-элементного



моделирования тепловых и гидродинамических процессов в системах теплообмена, включая важный вопрос влияния турбулентности на вязкую диссипацию. В результате этого анализа сделан вывод о необходимости дальнейшей разработки задач с учетом фазовых переходов в геометрически-упрощенной постановке, имеющей целью более детальное прояснение особенностей протекания процесса и отработки соответствующих методов математического моделирования и соответствующих численных алгоритмов.

Во **второй главе** ставится основная задача данной работы – моделирование процессов в теплообменнике, включающем трубку с хладагентом, находящемся в сверхкритическом состоянии и емкость теплоносителем, находящемся в воздушной окружающей среде. Схема теплообменника, включая вспомогательное оборудование, представлена графически и подробно откомментирована, что дает ясно представление о рассматриваемых потоках, для которых сформулирована математическая модель в виде дифференциальных уравнений в дивергентной форме, адекватной исследуемой проблеме. Рассмотрена специфика построения и использования модельных уравнений и граничных условий для различных практически-реализуемых теплофизических режимов, а также произведены анализ критериев подобия и возможность бигиперболической аппроксимации термодинамических функций при расчетах. Главу завершают обзор общей структуры построенной модели переноса с обменом на свободной границе и ее апробация в околоскритической области.

**Третья глава** посвящена разработке и апробации численных алгоритмов для решения уравнений построенной модели. Следует положительно отметить, что для решения вычислительной задачи использовалось стандартное надежное программное средство конечно-элементного численного моделирования, и основная специфика состояла в оптимизации геометрии расчетной сетки, автомодельного распределения скорости турбулентного потока и прочих условий, повышающих эффективность использования встроенных алгоритмов. Тестовый вычислительный эксперимент по расчету теплоотдачи проводился в одномерном потоке СКФ-кислорода и анализ его результатов свидетельствует о корректности полученных решений. Помимо этого, рассмотрены алгоритмы решения нестационарных задач, включая убедительный анализ вычислительных процедур, имеющих целью сглаживание особенностей решения задачи Стефана для учета фазового



перехода. Особо следует отметить разработку и подробное обсуждение методики идентификации параметров модели и ее верификации с использованием данных, доступных для измерения в реальной теплофизической установке.

Заключительная **четвертая** глава посвящена разработке и функционированию комплекса программ для математического моделирования процессов тепломассопереноса в сверхкритических теплообменниках на основе методов, описанных в предыдущих главах. Подробно описана структура программного комплекса, пользовательский интерфейс и методика работы с программой. Практическое применение иллюстрировано расчетами, связанными с работой газификационной установки СГУ-7КМ-У.

В заключении представлены основные выводы по работе; библиография свидетельствует о знакомстве автора с современным состоянием исследований в данной области, а приложения подтверждают практическое использование результатов работы.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Вместе с тем, к изложению материала в работе имеется ряд замечаний:

1. С физической точки зрения, в обсуждении термодинамики имеется ряд нестрогих утверждений, в частности не проводится различие между однофазным состоянием жидкости при высоких давлениях и температурах ниже критической, и сверхкритическим флуидом в строгом смысле.

2. К разделу 2.4, посвященному бигипероболической аппроксимации термодинамических величин, были бы желательны более развернутые комментарии: 1) каков источник аппроксимируемых данных; 2) если же использована упомянутая в первой главе база данных NIST Chemistry WebBook, SRD 69, то в чем состоит необходимость разработки использованной аппроксимации, так как данный источник приводит ссылки на высокоточные аналитические уравнения состояния и их коэффициенты, использованные для генерации приводимых данных.

3. В разделах 3.4–3.5 следовало бы большее внимание уделить представлению данных с учетом погрешности как измерений, так и расчетных величин (с учетом интервала неопределенности параметров), в частности, стоило бы сопровождать точки «усами» интервала погрешности, использовать линии регрессии с указанием доверительного интервала и т.п.



Однако данные замечания не являются критическими и не ставят под сомнение высокий уровень и техническую значимость данной работы.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа содержит всю формально необходимую совокупность оригинальных научных результатов, обобщений и выводов согласно пп. 9–14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 26.09.2022), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бородкин Станислав Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

#### Официальный оппонент

доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент, профессор кафедры физики и нанотехнологий, заведующий отделом теоретической физики Научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния

Курского государственного университета

Постников Евгений Борисович

Федеральное государственного бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»).

Почтовый адрес: ул. Радищева, 33, Курск, 305000

Телефон: +7 (4712) 51-04-69; электронная почта: postnicov@gmail.com

Согласен на обработку персональных данных

Подпись Постникова  
заверяю специалист по кадровой раб  
Митрашенкова  
02 12 2022