

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шаклеина Артема Андреевича «Численное исследование сопряженного тепломассопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала», выполненную по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Полимеры получили широкое распространение в индустрии строительных материалов. Такая тенденция отмечается по всему миру и вполне оправдана по основным технико-экономическим индикаторам. Однако одним из основных недостатков строительных материалов на основе полимерной матрицы является довольно высокая токсичность (даже при умеренных температурах далеко не всегда обеспечиваются удовлетворительные условия труда). В чрезвычайных ситуациях (в частности, при возгораниях) продукты пиролиза полимерных материалов являются одной из самых важных проблем, препятствующих эвакуации людей (способствуют отравлению и удушью). Чем быстрее распространяется пожар, тем сложнее обстановка в таких условиях. К сожалению, в качестве примера можно привести десятки таких возгораний ежегодно в России (на основе данных, представленных в периодической литературе – журналах «Пожарная безопасность», «Пожаровзрывобезопасность», «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация», «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций» и др.). В частности, в 2013–2016 гг. одни из наиболее масштабных возгораний и пожаров были зарегистрированы в крупных супермаркетах и складских помещениях в Казани, Новгороде, Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Екатеринбурге и других городах. Практически во всех случаях были зарегистрированы колоссальные материальные последствия (ущербы), травмы сотрудников и летальные исходы. Одной из основных причин таких масштабных последствий, по мнению сотрудников МЧС России (данные открыты и представлены на сайте ведомственных региональных подразделений), является сложность достоверного контроля и прогнозирования распространения фронта горения по строительным конструкциям с учетом конвективных потоков

в помещениях, лестничных маршах, этажных перекрытиях и т.д. В таких условиях целесообразно корректировать процедуры эвакуации людей. Отсутствие научно-обоснованного прогностического математического аппарата для решения таких задач затрудняет работу МЧС России.

Задачи контроля и прогнозирования распространения фронта горения по поверхности полимерного материала также важны в топливных энергетических и специальных технологиях (на основе данных, представленных в периодической литературе – журналах «Физика горения и взрыва», «Химическая физика», «Химическая физика и мезоскопия», «Combustion and flame», «Acta Astronautica», «Fuel», «Applied Thermal Engineering» и др.). Известно, что полимерные добавки широко используются в качестве компонентов энергетических топлив. Важны достоверные данные о скорости прогрева, термического разложения и движении фронта горения. Пока таких данных очень мало. Соответственно, данное направление в современной теории горения развивается не так активно.

По этим причинам выбранная автором диссертации **тема исследований достаточно актуальна и перспективна** для дальнейшей проработки. На этапе подготовки кандидатской диссертации сделан **важнейший шаг по созданию прогностического математического аппарата.**

Проводя анализ **актуальности** диссертационного исследования А.А. Шаклеина можно отметить, что рецензируемая диссертация соответствует приоритетным направлениям развития науки в Российской Федерации (Указ Президента России от 07.07.2011 № 899): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», «Безопасность и противодействие терроризму», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по перспективам развития: «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Актуальность тематики исследований также иллюстрирует поддержка Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №16-38-00543 и №16-08-00110).

Диссертация А.А. Шаклеина состоит из введения, четырех глав и заключения. Следует отметить хорошую структурированность рукописи диссертации и уместное использование автором разделов и подразделов практически в каждой главе.

Во введении автор достаточно убедительно формулирует проблему, на решение которой направлена диссертация, и обосновывает целесообразность проведения теоретических исследований на основе собственного математического аппарата.

В первой главе рецензируемой диссертации проведен анализ современных достижений в области моделирования процессов тепломассопереноса, горения, гидромеханики, протекающих при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала. Выделены эмпирические, полуэмпирические и теоретические модели. Отмечены основные недостатки и преимущества соответствующих моделей, по результатам обоснованного анализа выбраны наиболее оптимальные группы последних (в частности, горения материала, тепломассопереноса, гидромеханики, фазовых превращения и др.). Можно сделать вывод о том, что автор собрал в своем математическом блоке (алгоритме) наиболее оптимальные варианты решения всех задач и подзадач.

Во второй главе диссертации рассмотрены использованные автором численные методы (конечных объемов, прогонки и др.) решения дифференциальных уравнений. На первый взгляд, данная глава состоит из хорошо известных моделей, и можно было бы ограничиться лишь упоминанием их названий (с соответствующими ссылками). Но автор представил подробные связи всех использованных моделей и численных методов. При такой интерпретации глава выглядит достаточно интересно и лаконично.

В третьей главе представлены результаты решения тестовых задач с применением группы варьируемых моделей и приближений. На основании анализа результатов, представленных в данной главе, можно сделать обоснованное заключение об адекватности разработанного автором

комбинированного математического аппарата для решения основных диссертационных задач.

В четвертой главе диссертации представлены результаты решения сопряженной задачи тепломассопереноса при распространении диффузионного пламени по поверхности горючего материала. Приведены графические зависимости, соотношения, выражения, заключения и выводы, иллюстрирующие влияние определяющих факторов и условий (в частности, теплового потока, скорости распространения пламени, угла наклона горючего материала, радиационного теплопереноса, типа и свойств полимерного материала и др.). В этой же главе представлены результаты сравнения теоретических данных рецензируемой диссертации с известными (полученными уважаемыми на международном уровне исследователями) экспериментальными результатами.

Практическая направленность диссертации А.А. Шаклеина достаточно очевидна и заключается в создании автором прогностического математического аппарата для контроля условий и характеристик процесса тепломассопереноса при нестационарном распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала. Основными сферами применения результатов исследований могут стать пожаровзрывобезопасность зданий и сооружений, а также энергетические и специальные топливных технологии.

Научная новизна рецензируемой диссертации заключается в следующем:

- 1) разработан математический аппарат для контроля условий и характеристик процесса тепломассопереноса при нестационарном распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала, отличающийся от известных учетом полного комплекса процессов тепломассопереноса (в том числе излучения), нестационарного турбулентного течения химически реагирующего газа, турбулентного диффузионного горения, термического разложения твердого горючего материала и других процессов;

- 2) впервые создана сопряженная модель тепломассообмена в гетерогенной системе «газ – твердое тело» для расчета характеристик автомоделного распространения пламени по поверхности горючего материала;
- 3) убедительно обоснована необходимость применения комбинированной вихреразрешающей модели для описания турбулентного режима течения газовой среды в области диффузионного горения в совокупности с необходимостью подробного разрешения пристенных локальных характеристик;
- 4) установлены фундаментальные закономерности тепломассопереноса при турбулентном режиме распространения пламени и условия, при которых турбулентный перенос является определяющим фактором.

Следует отметить **обоснованность научных положений** диссертационных исследований, которая заключается в убедительных заключениях и выводах, а также не противоречащих физике сформулированных гипотезах.

Достоверность полученных автором диссертации результатов основана на проверке консервативности использованных разностных схем, удовлетворительных результатах решения тестовых задач, хорошем согласовании полученных результатов математического моделирования с экспериментальными данными.

Проводя оценку **научной и практической значимости** основных результатов, положений и выводов, представленных в диссертации А.А. Шаклеина, необходимо отметить, что автором создан универсальный алгоритм решения сопряженных задач тепломассообмена при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала.

Анализ содержания рукописи и автореферата диссертации дает основание для формулирования нескольких **замечаний**:

1. На рисунках в автореферате и диссертации автор использует обозначения и текст на русском, английском и латинском (транслитерацией) языках. Такой подход рассчитан не только на знание иностранного языка читателями, но и умение работать с транслитерацией. Усложняется восприятие материала, что может привести к неправильному пониманию представленной графической информации и соответствующей интерпретации, а также выводам.

2. В некоторых сформулированных научных положениях и заключениях не хватает конкретики. Слишком общими выглядят заключения и соответствующие положения (сформулированы на качественном уровне). У автора есть конкретные количественные результаты в диссертации, и он мог бы на них сосредоточить внимание. Напрашиваются соотношения между основными влияющими параметрами (например, связь с углом наклона горючего материала, скоростью распространения фронта горения, тепловыми потоками, свойствами материала и др.).

3. Несмотря на то, что диссертация защищается по физико-математическим наукам, целесообразно было бы сделать несколько акцентированных выводов и заключений (хотя бы в рукописи диссертации) о том, как и в каких направлениях можно использовать результаты исследований. Какие могут возникнуть сложности применения разработанного математического аппарата (каковы ограничения, если они есть).

4. В тексте рукописи диссертации применяется нетрадиционный подход к названию моделей других авторов (например, «канадская», «австралийская», «продвинутая» и др.). Целесообразно классифицировать модели по какому-то одному общепринятому критерию или учитываемому фактору.

5. Автор не представил результатов акцентированного анализа, заключающегося в разделении влияния группы основных (значимых) факторов (и менее значимых). Например, известно, что кинетика термического разложения полимерного материала играет определяющую роль. Нет упоминаний о том, какие интервалы эмпирических значений можно применять в расчетах и как могут измениться результаты моделирования.

6. В общем алгоритме расчета (п. 2.6) не акцентировано внимание на параметрах сетки, при которых представленный алгоритм устойчиво работает. Сгущается сетка или нет? Читателю сложно провести соответствующий анализ по сходимости и запасу устойчивости.

7. Из каких литературных источников взяты исходные параметры для расчета (например, табл. 4.1)? Автору целесообразно было бы привести соответствующие ссылки на справочные данные или периодическую

литературу. В четвертой главе проводится сравнение результатов моделирования с данными экспериментов других авторов и не акцентируется внимание (при анализе отличий) на теплофизических свойствах (может в них дело, может в кинетике, которая не отражена в табл. 4.1).

8. По полученным результатам диссертационных исследований затруднительно провести комплексный сравнительный анализ всех определяющих характеристик исследованных процессов (температура во фронте горения, соответствующее температурное поле, тепловые потоки, скорость распространения последнего, геометрические размеры и структура факела, скорости термического разложения и окисления, и др.). В заключительных параграфах четвертой главы целесообразно было бы такое обобщение выполнить для усиления выводов и заключений диссертационной работы.

Сделанные замечания не снижают высокой, в целом, оценки диссертации А.А. Шаклеина.

Тема диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (по части формуле специальности: «численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте»; области исследований: «экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом»).

Содержание автореферата, в целом, соответствует содержанию рукописи диссертации.

Результаты диссертационного исследования А.А. Шаклеина поэтапно и ежегодно докладывались (хорошо апробированы) на научных конференциях различного уровня (в университетах и исследовательских центрах Москвы, Казани, Томска, Санкт-Петербурга, Ижевска, Перми и др.) и публиковались в журналах, рекомендованных ВАК Минобразования РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций («Химическая физика и мезоскопия», «Вестник Удмуртского государственного университета»).

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации А.А. Шаклеина можно сделать вывод о том, что **диссертационная работа**

соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлениями Правительства РФ № 725 от 30.07.2014 г. и № 335 от 21.04.2016 г., так как является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для теории тепломассопереноса и гидромеханики в системах с интенсивным химическим реагированием и фазовыми превращениями.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что **А.А. Шаклеин** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.**

Доктор физико-математических наук
(01.04.14, физико-математические науки),
доцент по кафедре,
заведующий кафедрой Автоматизации
теплоэнергетических процессов
Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Стрижак Павел Александрович
(3822) 606-102
pavelpsa@tpu.ru

Подпись П.А. Стрижака заверяю
Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета
Ананьева Ольга Афанасьевна



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30
т. 8(3822), 701-777, доп. 1910.
23.11.2016