

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 23 декабря 2016 года публичной защиты диссертации Шаклеина Артема Андреевича «Численное исследование сопряженного тепломассопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

На заседании присутствовали 21 из 26 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

1.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Васенин Игорь Михайлович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Пикущак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
6.	Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7.	Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
8.	Герасимов Александр Владимирович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
9.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
10.	Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
11.	Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
12.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
13.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
14.	Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
15.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
16.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
17.	Смоляков Виктор Кузьмич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
18.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
19.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
20.	Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
21.	Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14

Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 21, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить А.А. Шаклеину учёную степень кандидата физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.13
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 23.12.2016 г., № 297

О присуждении **Шаклеину Артему Андреевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Численное исследование сопряженного теплопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала»** по специальности **01.04.14** – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 17.10.2016 г., протокол № 285, диссертационным советом Д 212.267.13 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 203-161 от 08.02.2008 г.).

Соискатель **Шаклеин Артем Андреевич**, 1988 года рождения.

В 2011 г. окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет».

В 2014 г. очно окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики Уральского отделения Российской академии наук.

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории физико-химической механики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики Уральского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Диссертация выполнена в лаборатории физико-химической механики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики Уральского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Карпов Александр Иванович**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория физико-химической механики, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, заведующий кафедрой

Шебеко Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», сектор пожарной безопасности промышленных объектов, главный научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанном **Тереховым Владимиром Викторовичем** (доктор физико-математических наук, профессор РАН, лаборатория термогазодинамики, заведующий лабораторией) и **Мулляджановым Рустамом Илхамовичем** (кандидат физико-математических наук, лаборатория физических основ энергетических технологий, научный сотрудник), указала, что экспериментальное изучение пристенных течений с горением представляет собой исключительно сложную проблему, поэтому развитие математического моделирования

реагирующих течений является важным направлением современной фундаментальной теплофизики. Для решения вопросов, связанных с распространением пламени по поверхности горючего материала необходимо совершенствовать методы математического моделирования, что обусловлено большим количеством протекающих физико-химических процессов и сложным характером их взаимодействия. Автором сформулирована новая математическая модель, учитывающая основные протекающие при распространении пламени по поверхности горючего материала процессы: вихревое течение многокомпонентного газа, газофазное горение, теплоперенос излучением, термическое разложение твердого горючего материала, выделение газообразных горючих продуктов пиролиза; разработан вычислительный алгоритм для решения задачи тепломассопереноса в гетерогенной системе «газ-твердое тело» в сопряженной постановке; обосновано применение бесшовной вихреразрешающей модели DDES F_1 для адекватного разрешения как вихревого течения в ядре потока, так и локальных характеристик течения на поверхности; в ходе проведенных исследований выявлено, что существенную роль в механизме передачи тепловой энергии от горячих газов в пламенной зоне к твердому материалу играет излучение; установлены фундаментальные закономерности тепломассопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала, размеры зоны пиролиза, появление второго максимума скорости газификации на поверхности, области, где вихревой характер течения определяет процесс распространения пламени. Разработанные в диссертационной работе математические модели и численные методы вносят существенный вклад в развитие теории теплофизики. Полученные результаты могут быть использованы как фундаментальная основа инженерной практики для снижения негативных последствий распространения пламени по полимерным материалам.

Соискатель имеет 22 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации – 22 работы, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 9, в сборниках материалов школы, съезда, семинара, международных и всероссийских (в том числе с международным участием) научных, научно-

технических и научно-практических конференций – 13. Общий объем публикаций– 10,23 п.л., авторский вклад– 4,89 п.л.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Шаклеин А. А.** Моделирование распространения турбулентного пламени по вертикальной поверхности горючего материала / А. А. Шаклеин, А. И. Карпов, М. А. Корепанов // Химическая физика и мезоскопия. – 2014. – Т. 16, № 3. – С. 331–339. – 1,04 / 0,35 п.л.

2. **Шаклеин А. А.** Моделирование распространения пламени по вертикальной поверхности горючего материала. Оценка вклада радиационного теплопереноса / А. А. Шаклеин, А. И. Карпов, М. А. Корепанов // Химическая физика и мезоскопия. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 226–234. – 1,04 / 0,35 п.л.

3. **Шаклеин А. А.** Вихреразрешающее моделирование пристенных турбулентных течений / А. А. Шаклеин, А. И. Карпов // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2012. – № 4. – С. 156–163. – 0,92 / 0,46 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На автореферат поступило 6 положительных отзывов. Отзывы представили: **1. В. Н. Емельянов**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника», «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, с замечаниями: 1) Интересно услышать мнение автора диссертации о месте разработанных им средств численного моделирования в том широком спектре моделей и технологий, который имеется в распоряжении многих исследователей, включая коммерческие пакеты и пакеты с открытым исходным кодом. 2) С вычислительной точки зрения, важными представляются форма записи (консервативная/неконсервативная) системы уравнений, особенности представления источниковых членов, вид различных

поправок и т.д. К сожалению, такие сведения в автореферате не приводятся. Хотелось бы услышать в научной дискуссии обсуждение этих моментов вычислительного моделирования. 3) Хотелось бы услышать обоснование поставленных граничных условий для характеристик турбулентности, их физическое обоснование, возможность их вариации и чувствительность решения к этим граничным условиям. 4) При численном моделировании распространения турбулентного диффузионного пламени верх по вертикальной поверхности горючего материала, результаты которого сравниваются с экспериментальными, следовало бы подробно обсудить возможные отличия процессов, описанных в математической модели от реальных условий реализации эксперимента.

2. С. А. Исаев, д-р физ.-мат. наук, проф., кафедра механики, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, г. Санкт-Петербург, *с замечаниями*: 1) Хотелось бы более четко выделить предшественников данной работы, чтобы охарактеризовать ее научную новизну. 2) Акцент в работе делается на применении вихреразрешающих методов. Хотелось бы видеть больше подробностей о выборе схем высокого порядка. 3) Хотелось бы услышать обоснование выбора довольно простой модели Смагоринского. Ведь существуют и более сложные модели, например, модель Германо. 4) В методическом эксперименте отсутствуют пересечения с известными подходами в области моделирования турбулентных течений вихреразрешающими методами, в частности, развиваемыми в школе М.Х. Стрельца. 5) Не хватает перечня определяющих параметров и диапазонов их изменения. 6) Не указаны пределы применимости развиваемого в работе подхода.

3. В. В. Кириллов, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, *с замечаниями*: Из автореферата неясны параметры объемно-разностной сетки, эффективность вычислительных процедур, затраты времени на выполнение расчетов.

4. И. А. Попов, д-р техн. наук, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань и **А. В. Щелчков**, к-т техн. наук, доцент кафедры теплотехники и энергетического машиностроения, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, *с замечаниями*: 1) Работа

пионерская? Или есть предшествующие работы по направлению исследования или используемым подходам? 2) Имеются ли ограничения по предлагаемым методам и подходам? 3) Чем вызван пик на рис.6 – это точка начала распространения фронта горения? Точки на графике соответствуют одному моменту времени? Пламя одновременно распространяется вниз и вверх или это для разных случаев (отдельно вниз, отдельно вверх)? Почему тепловые потоки сверху пламени ниже по значениям, чем в около пламенной зоне вниз от фронта пламени? Все вопросы связаны с необходимостью более детального рассмотрения физических механизмов моделируемого явления.

5. А. Ю. Снегирёв, д-р техн. наук, профессор кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, *с замечаниями:*

1) В автореферате не указано, какое программное обеспечение использовано автором в данной работе. Как следует из текста диссертации, автор использовал OpenFOAM. В тексте автореферата явно не отражено, внес ли автор какие-либо изменения в существующую версию указанного продукта, и поэтому остается неясным, каков именно вклад автора в построение математической модели и ее программную реализацию, отмеченные в разделах «Личный вклад» и «Научная новизна». Кроме того, в открытом доступе имеется специализированная версия указанного продукта FireFOAM, специально разработанная для данного класса задач. Следует объяснить, почему автор не воспользовался указанной версией, например, для сравнения с используемым продуктом.

2) В автореферате не указаны вообще или указаны недостаточно полно источники экспериментальных данных, используемых для апробации моделей. Это не позволяет в полной мере судить об адекватности рассматриваемой автором постановки задачи для условий конкретного эксперимента. При распространении по пластине высотой 0.25 м пламя в основном не является турбулентным, что ставит вопрос применимость уравнений RANS в пристеночной области и модели дробления вихрей для горения. В то же время, если происходит переключение на «кинетическую» формулу для расчета скорости реакции, то следует показать достаточность сеточного разрешения для расчета внутренней структуры зоны реакции.

3) Авторы не приводят сравнение расчетных и измеренных распределений тепловых потоков (радиационного, конвективного, полного) по

поверхности горючего материала при распространении турбулентного пламени. Между тем, именно достоверность расчета указанных потоков определяет успех поставленной авторами задачи прогноза скорости распространения пламени.

4) Представленные расчеты распространения пламени выполнены в двухмерной постановке. Это не позволяет адекватно воспроизвести структуру и динамику турбулентности и влияние бокового захвата воздуха на форму пламени, распространяющегося по вертикальной поверхности. Остается неясным и способ инициирования горения, предшествующий распространению пламени и оказывающий значительное влияние на скорость распространения. **6. К. А. Чехонин**, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории численных методов в математической физике, Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск, *с замечаниями*: Следует отметить недостаточное внимание, уделенное автором к решению вопросов, связанных с оценкой сходимости численного решения, в части обоснования выбора расчетных сеток, определения оптимальных параметров при решении систем линейных алгебраических уравнений.

В отзывах отмечается, что необходимость рассмотрения задач распространения пламени продиктована тем, что изучаемое явление представляет один из ключевых механизмов развития пожара, и определяет возможность и скорость нарастания его опасных факторов. Снижение пожарной опасности при использовании полимерных материалов является одной из актуальных научно-технических задач. Экспериментальное изучение пристенных течений с горением представляет собой исключительно сложную проблему, поэтому развитие математического моделирования реагирующих течений является важным направлением современной фундаментальной теплофизики. Для решения вопросов, связанных с распространением пламени по поверхности горючего материала необходимо совершенствовать методы математического моделирования, что обусловлено большим количеством протекающих физико-химических процессов, требующих моделирования каждого из них в отдельности и сложным характером взаимодействия между этими процессами как в газовой среде так и в твердом теле.

Автором сформулирована новая математическая модель; разработан вычислительный алгоритм для решения сопряженной задачи тепломассообмена в

гетерогенной системе «газ-твердое тело» для расчета характеристик распространения пламени по поверхности горючего материала; обоснована необходимость применения вихреразрешающей модели турбулентности для описания турбулентного течения в ядре потока и локальных характеристик течения у стенки; проведена всесторонняя верификация модели на основе решения широкого круга задач; установлены фундаментальные закономерности тепломассопереноса при турбулентном режиме распространения пламени и условия, при которых турбулентный перенос является определяющим фактором. К наиболее практически важным результатам исследований следует отнести разработку средств численного моделирования для повышения точности прогнозирования процессов распространения пламени, которые могут присутствовать как в некоторых технологических и технических процессах, связанных с горением, так и в задачах пожаровзрывобезопасности. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие теплофизики в части разработки математических моделей и методов моделирования сопряженных процессов тепломассопереноса при горении конденсированных систем.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **П. А. Стрижак** является известным специалистом в областях развития фундаментальных основ ресурсоэффективных и безопасных технологий тушения крупных лесных пожаров, а также прогнозирования потенциальной пожароопасности взаимодействия источников энергии с различными топливами и полимерными материалами; автоматизации теплоэнергетических процессов и производств, тепломассопереноса при зажигании конденсированных веществ в условиях локального подвода энергии, исследования зажигания топлива в энергетических установках; **Ю.Н. Шебеко** является известным специалистом в области физики горения и взрыва, исследования горения газов и жидкостей, математического моделирования крупных аварий с пожарами и взрывами на предприятиях нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности; обеспечении пожаровзрывобезопасности реакторных установок атомных электростанций; **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук** является одним из ведущих

научных центров по теории теплообмена и физической гидрогазодинамике, основными направлениями научной деятельности которого являются изучение турбулентного теплопереноса в сложных условиях, пограничных слоев с физико-химическими превращениями, процессов переноса в потоках с гетерогенными химическими реакциями и в пограничных слоях с фронтом горения, разработка численных методов расчетов турбулентного горения с использованием различных моделей турбулентности и химической кинетики, исследования радиационного теплообмена теоретическими средствами.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана комплексная математическая модель, учитывающая основные протекающие при распространении пламени по поверхности горючего материала процессы: теплоперенос в газовой среде и твердом теле, вихревое течение реагирующего газа, газофазное горение, теплообмен излучением, термическое разложение твердого горючего материала;

разработан вычислительный алгоритм и пакет программ для решения задачи теплопереноса в гетерогенной системе «газ-твердое тело» в сопряженной постановке;

проведены численные исследования для обоснования использования моделей турбулентного переноса на базе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS), вихререзающего моделирования (LES) и их комбинированных модификаций (метод отсоединенных вихрей — DES/DDES).

проведены параметрические исследования теплопереноса при нестационарном распространении турбулентного пламени по поверхности горючего материала;

установлены закономерности протекания рассматриваемого процесса и определены его количественные параметры, такие как распределение теплового потока по поверхности, вклад теплопереноса излучением, характер воздействия турбулентного режима течения на теплоперенос, размеры зоны пиролиза и газофазного пламени, скорости распространения пламени по поверхности материала.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

создан универсальный алгоритм решения сопряженных задач теплообмена при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала;

разработанные в диссертационной работе математические модели и численные методы позволяют рассчитывать распространение пламени по поверхности и оценивать влияние различных физико-химических факторов на протекающий процесс.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики:

полученные результаты могут быть использованы как фундаментальная основа инженерной практики снижения негативных последствий распространения пламени по полимерным материалам.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Разработанные автором математические модели и численные методы могут быть использованы при решении широкого круга задач, связанных с определением параметров теплопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала. Предложенные соискателем методики расчета рекомендуются к применению при выполнении научных исследований и проведении практических расчетов, связанных с определением параметров распространения пламени по поверхности горючего материала, проводимых академическими, образовательными, отраслевыми организациями, а именно – Институтом механики УрО РАН (г. Ижевск), «Всероссийским научно-исследовательским институтом противопожарной обороны» МЧС России (г. Балашиха), Институтом теплофизики СО РАН (г. Новосибирск) и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для решения задачи использованы фундаментальные законы сохранения;

проведена апробация используемых методов решения;

проведенное сравнение показало хорошее согласование результатов численного моделирования с опубликованными в литературе экспериментальными данными.

Новизна результатов диссертационного исследования заключается в развитии теплофизики в части создания моделей и методов исследования параметров теплопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала.

В работе построена оригинальная математическая модель, созданы вычислительный алгоритм и пакет программ для решения сопряженной задачи теплопереноса при распространении пламени по поверхности горючего материала с учетом нестационарного вихревого течения реагирующего газа, теплопереноса энергии излучением, турбулентного диффузионного горения, термического разложения горючего материала и выделения газообразных продуктов пиролиза.

Верификация математической модели и реализованного численного алгоритма выполнена путем сопоставления результатов расчетов с результатами натуральных экспериментов.

Выполненные численные исследования показали, что теплоперенос излучением имеет значительный вклад в механизм передачи тепла в твердый горючий материал при распространении пламени, а развитие турбулентного течения продуктов сгорания приводит к существенному изменению характера распределения теплофизических параметров по поверхности горючего материала (в частности, обнаружен немонотонный характер теплового потока и появление второго максимума скорости газификации).

Личный вклад автора заключается в: построении модели расчета параметров теплопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности твердого материала, проведении численных исследований, сопоставлении полученных результатов с экспериментальными данными, проведении анализа полученных результатов под руководством научного руководителя.

Диссертация отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, установленным для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, согласно пункту 9, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по исследованию процесса тепломассопереноса при нестационарном распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала, имеющей значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники.

На заседании 23.12.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить **Шаклеину А.А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 21, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета
Ученый секретарь
диссертационного совета



Христенко Юрий Федорович

Пикушак Елизавета Владимировна

23 декабря 2016 г.