

## УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения  
Российской академии наук,  
академик РАН

Алексеев С.В.

«23» ~~ноября~~ 2016 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук на диссертационную работу Шаклеина Артема Андреевича «Численное исследование сопряженного тепломассопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Актуальность темы диссертационной работы.** 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. В имеющихся на данный момент моделях распространения пламени по поверхности горючего материала, как правило, используются упрощенные подходы: теплопередача между газовой средой и твердым телом определяется по критериальным соотношениям, скорость газоприхода с поверхности задается на основании эмпирических данных, исследования, связанные с

теоретическим изучением влияния вихревого характера течения, вызванного силами плавучести на процесс тепломассопереноса при распространении пламени проводятся в несопряженной постановке. В связи с вышесказанным, диссертационная работа Шаклеина А.А. «Численное исследование сопряженного тепломассопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала», посвященная теоретическому исследованию теплофизических процессов при распространении пламени по поверхности горючего материала, учитывающему сопряженный характер взаимодействия газовой среды и твердого тела и вихревое течение, вызванное естественной конвекцией, является актуальной.

#### **Характеристика содержания диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений, изложенных на 131 странице машинописного текста, включая 38 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 139 наименований.

**Во введении** представлены актуальность, поставлены цель и задачи, сформулированы научная новизна, практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор работ по исследованию распространения пламени по поверхности горючего материала и описание существующих моделей физических процессов. Обоснован выбор теоретического подхода и сформулирована комплексная математическая модель, в которой гидродинамика вихревого течения описывается фильтрованными уравнениями Навье-Стокса. В качестве модели турбулентности выбран комбинированный вихререзающий подход DDES, основанный на RANS-модели  $k-\omega$  SST. Механизм газофазного горения представлен в виде глобальной реакции, при этом скорость протекания реакции рассчитывается на основании модифицированной модели турбулентного горения Сполдинга (EBU) с учетом кинетических эффектов. Теплоперенос излучением учитывается с помощью модели сферических аппроксимаций с коэффициентом поглощения, зависящим от состава смеси и температуры. Процесс теплопереноса в твердом теле описывается уравнением теплопроводности. Скорость термического разложения оценивается по зависимости Аррениуса. Сопряженный процесс тепломассопереноса между твердым телом и газовой средой связывается граничным условием четвертого рода для уравнений энергии, скорость газификации на поверхности горючего материала определяется в виде линейного интеграла от объемной скорости пиролиза. Представленная математическая модель описания распространения пламени по поверхности горючего материала в полной мере описывает основные протекающие в системе «газ-твердое тело» теплофизические процессы.

**Во второй главе** представлен метод решения уравнений сформулированной математической модели. Численный метод основан на методе конечных объемов в декартовой системе координат. Приводится описание перехода от входящих в исходные уравнения моделей дифференциальных операторов к их разностным аналогам. Уравнения интегрируются по времени вторым порядком аппроксимации, конвективные слагаемые определяются по пятиточечной схеме WENO, диффузионные слагаемые аппроксимируются вторым порядком по пространству. Связь скорости и давления устанавливается с помощью нестационарного алгоритма PISO. Системы линейных алгебраических уравнений решаются методом сопряженных градиентов и методом Гаусса-Зейделя. Представлен итерационный алгоритм решения нестационарных уравнений. Уравнения энергии газовой среды и твердого тела решаются одновременно.

**В третьей главе** представлены результаты моделирования тестовых задач. Проведено сравнение бесшовных вихреразрешающих моделей турбулентности DES и DDES с численными и экспериментальными результатами на задачах турбулентного течения в канале и обтекания пластины. Показано, что адекватное описание вихревого течения в ядре и локальных характеристик потока на стенке возможно при использовании модели DDES  $F_1$ . На задаче сопряженного теплообмена при ламинарном течении среды, ограниченной твердым материалом, показано преимущество метода сквозного счета для решения уравнений энергии гетерофазной системы по сравнению с итерационным решением.

**В четвертой главе** представлены результаты численного моделирования сопряженных задач теплопереноса при распространении пламени по поверхности горючего материала. Приведены теоретические оценки скорости распространения пламени при разных углах наклона поверхности. Выявлена существенная роль теплопередачи излучением в процессе распространения пламени. На задаче вихревого течения при распространении пламени показано влияние пульсаций поля течения на протекающий процесс теплообмена.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Среди полученных **новых** результатов следует отметить следующие:

- Сформулирована новая сопряженная 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 теплопереноса в гетерогенной системе «газ-твердое тело» в сопряженной постановке. В совокупности модель, алгоритм и

программная реализация позволяют проводить теоретические исследования фундаментальных закономерностей тепломассопереноса при распространении пламени по поверхности горючего материала.

- Проведенное сравнение турбулентных моделей показало, что для расчета распространения турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала необходимо использовать бесшовную вихреразрешающую модель LES-RANS DDES с функцией  $F_1$  для адекватного разрешения как пульсационных параметров 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.

**Обоснованность и достоверность результатов**, полученных автором в диссертационной работе, обеспечивается использованием фундаментальных законов сохранения, апробацией используемых методов решения, согласованием результатов численного моделирования с экспериментальными данными, опубликованными в научной литературе.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.** Разработанные в диссертационной работе математические модели и численные методы вносят существенный вклад в развитие теории теплофизики в части исследования процессов тепломассопереноса при распространении пламени по поверхности горючего материала. Полученные результаты могут быть использованы как фундаментальная основа инженерной практики снижения негативных последствий распространения пламени по полимерным материалам.

Основные результаты диссертации представлены в 22 печатных работах, в том числе 9 статей 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, 13 публикаций в сборниках материалов школы, съезда, семинара, международных и всероссийских (в том числе с международным участием) научных, научно-технических и научно-практических конференций.

По работе имеется ряд замечаний:

1. В первых двух главах диссертации приведен ряд подходов, методов и моделей, однако дальнейшее изложение не всегда позволяет понять, какой из них был использован в том или ином случае. Например, методы решения СЛАУ (Гаусса-Зейделя и предобусловленный метод сопряженных градиентов). Другим примером является вычисление свойств газовой смеси, которые, как указано в первой главе (1.7)-(1.9), определялись пропорционально составу. Однако, в главе 4 приводится таблица 4.1, из которой можно заключить, что свойства не зависят от состава. Можно предположить, что результаты моделирования слабо зависят от выбора подхода, тем не менее, для строгости изложения необходимо четко указывать какие методы использованы в том или ином случае.

2. Это же замечание касается и граничных условий, задание которых в случае использования метода крупных вихрей и гибридных методов типа DES, представляет собой весьма нетривиальную задачу. Например, на стр. 73 при рассмотрении тестовой задачи о течении в турбулентном пограничном слое указано, что «задавались параметры, полученные из RANS-расчета, с созданием искусственного шума». Эта информация не дает представления о том, были ли искусственные пульсации скоррелированы и чем обусловлен выбор той или иной амплитуды пульсаций и т.д.

3. Для исследованных в работе задач следовало бы привести спектры пульсаций. Именно они показывают то, насколько хорошо разрешаются турбулентные структуры.

4. Не вполне ясен смысл построения сложной высокоточной схемы интегрирования конвективных членов. Известно, что вполне удовлетворительные результаты можно получать при использовании существенно более простых схем типа ограниченной центрально-разностной схемы. Преимущества использования разработанной схемы следовало бы обосновать в работе.

5. Некоторое различие между результатами моделирования и экспериментальными данными на рис. 4.16 автор объясняет тем, что в экспериментах использовались материал с существенно большей толщиной. Возникает вопрос – почему моделирование нельзя было провести для точно таких же условий? Аналогичный вопрос и по рис. 4.3, где отличие от эксперимента объяснено тем, что в модели не учтен теплоперенос излучением.

Отмеченные замечания не противоречат основным положениям, полученным результатам и не снижают общую положительную оценку данной диссертационной работы.

**Заключение.** Содержание диссертационного исследования Шаклеина А. А. соответствует паспорту специальности 01.04.14 –

Теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация содержит совокупность новых научных результатов, имеет признаки завершения исследования. Оформление диссертации в целом отвечает требованиям, установленным ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

Рассмотренная диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача численного исследования сопряженного тепломассопереноса при распространении пламени по поверхности горючего материала. Работа имеет значение для развития теории моделирования теплофизических процессов при распространении пламени.

На основании изложенного считаем, что диссертация «Численное исследование сопряженного тепломассопереноса при распространении турбулентного диффузионного пламени по поверхности горючего материала» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шаклеин Артем Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Настоящий отзыв обсужден на заседании научного семинара в составе отделов теплоэнергетики и термогазодинамики (протокол №41/4-2016, от 10 ноября 2016 г.)

Заведующий Лабораторией термогазодинамики,  
профессор РАН,  
доктор физико-математических наук  
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)



Терехов Владимир Викторович

Научный сотрудник  
Лаборатории физических основ энергетических технологий  
кандидат физико-математических наук  
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)



Мулляджанов Рустам Илхамович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1; тел. (383) 330-70-50; [aleks@itp.nsc.ru](mailto:aleks@itp.nsc.ru); <http://www.itp.nsc.ru>

