



Кузнецов Егор Александрович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ
ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ПОЖАРООПАСНОСТЬ**

Специальность 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: Снегирёв Александр Юрьевич, д.т.н., доцент, профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты: Барботько Сергей Львович, д.т.н., Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва, начальник сектора Лаборатории климатических, микробиологических исследований и пожаробезопасности

Шебеко Юрий Николаевич, д.т.н., 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», г. Балашиха, Московская область, главный научный сотрудник Отдела пожарной безопасности объектов и технологий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)

Защита состоится «24» декабря 2020 г. в 12 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета У 01.04.14 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: г. Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29, Механический корпус, ауд. 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru

Автореферат разослан «__» ноября 2020 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета У 01.04.14



Гусаков Андрей Александрович,
к.т.н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Полимерные материалы используются во всех областях человеческой деятельности и представляют значительную пожарную опасность. Поскольку именно полимерные материалы составляют основную часть пожарной нагрузки, динамика развития пожара определяется термохимическими свойствами полимеров. Для экспериментального определения способности практически важных полимерных материалов к воспламенению и горению разработано значительное количество стандартных методов, на основании которых материалы классифицируют по их пожарной опасности. Существующие методы испытаний полимерных материалов на горючесть нацелены на определение конкретных характеристик материала, каждая из которых по отдельности не даёт исчерпывающей информации о поведении данного материала в условиях, отличающихся от стандартных. При этом непрерывно создаются новые конструкционные, отделочные, упаковочные и специальные материалы, для сертификации которых в разных отраслях промышленности применяются разные методы испытаний.

Необходимость выработки единой стратегии оценивания пожарной опасности полимерных материалов и прогнозирования динамики пожара с их участием делает актуальной задачу создания и валидации нового программного обеспечения для виртуальных испытаний полимерных материалов на воспламеняемость и горючесть.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени накоплен значительный опыт численного моделирования термического разложения полимерных материалов и диффузионного горения газообразных продуктов их пиролиза. Интенсивные исследования в указанных областях ведутся в настоящее время в СПбПУ (Россия), ВНИИПО (Россия), ИХКГ СО РАН (Россия), Институт механики УрО РАН (Россия), университетах Мериленда и Беркли (США), FM Global (США), NIST (США), университете Эдинбурга (Великобритания), USTC (Китай) и ряде других исследовательских организаций. Применительно к полимерным и композитным материалам, применяющимся в авиастроении, экспериментальные и расчётные методики определения пожарной опасности разрабатываются в исследовательских подразделениях Федеральной авиационной администрации США, Boeing, Airbus и отечественных отраслевых институтов (ВИАМ).

В последние годы основной объём численных исследований выполняется с помощью специализированного ПО с открытым кодом (FDS, FireFOAM). Опубликованные примеры применения крупных коммерческих пакетов для решения данного класса задач крайне редки. Это обусловлено отсутствием в составе современных версий коммерческих пакетов (в частности, ANSYS Fluent) моделей термического разложения полимерных и композитных материалов с выделением горючих газов, участвующих в газофазном горении.

Цели данной работы включают: создание нового программного обеспечения для моделирования воспламенения и горения полимерных материалов на основе коммерческого ПО ANSYS Fluent, отработку и апробацию методики численного моделирования

воспламенения и горения полимерных и композитных материалов, выявление новых закономерностей воспламенения и горения указанных материалов в условиях нормальной гравитации и в невесомости, а также демонстрацию возможности прогноза результатов испытаний материалов на пожароопасность. Для достижения указанных целей решаются следующие **задачи**:

1. Модификация модели пиролиза твёрдых горючих материалов PyroPolis, разработка параллельного интерфейса и внедрение указанной модели пиролиза в ПО ANSYS Fluent.

2. Отработка и валидация методики численного моделирования газофазного горения для ламинарного диффузионного пламени (в условиях нормальной гравитации и в невесомости) и для естественно-конвективного турбулентного диффузионного пламени (методом крупных вихрей).

3. Применение методики совместного численного моделирования термического разложения полимерных и композитных материалов и газофазного горения летучих для расчёта воспламенения и горения полимерных и композитных материалов.

4. Теоретический анализ пилотного воспламенения термопластиков под действием внешнего теплового потока с учётом конечной скорости термического разложения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Модель термического разложения твёрдых горючих материалов PyroPolis модифицирована и внедрена в программное обеспечение ANSYS Fluent. В результате создан новый вычислительный инструмент (Fluent-PyroPolis) для численного моделирования воспламенения и горения полимерных и композитных материалов с помощью многопроцессорных кластерных систем и суперкомпьютеров.

2. Впервые выполнено прямое численное моделирование ламинарного диффузионного пламени (в условиях нормальной гравитации и в невесомости) в трёхмерной нестационарной постановке, с учётом детальных химических механизмов, образования и окисления сажи, эмиссии, переноса и поглощения теплового излучения.

3. С помощью численного моделирования показано, что для диффузионного пламени, возникающего при горении твёрдых горючих материалов в невесомости, имеет место погасание, протекающее в радиационном режиме, обусловленном снижением температуры в зоне реакции из-за лучистых теплопотерь. Впервые изучена нестационарная динамика неустойчивого пламени и дана интерпретация результатов космического эксперимента на борту МКС.

4. Разработан новый алгоритм динамического определения длины пути луча, который повышает точность расчёта эмиссии теплового излучения нестационарного пламени.

5. Предложен новый способ аппроксимации концентрации углеводородного прекурсора, предназначенный для расчёта скорости образования сажи при использовании

глобального химического механизма окисления углеводородного горючего в диффузионном пламени.

6. Разработана новая подсеточная модель для расчёта эмиссии теплового излучения с учётом не разрешаемых на сетке горячих фрагментов диффузионного пламени. Показано, что применение данной модели позволяет улучшить согласие расчётных и измеренных радиационных тепловых потоков.

7. Предложен новый алгоритм для аппроксимации конвективного теплового потока на поверхности горючего материала, охваченной пламенем. Данный алгоритм учитывает существование не разрешаемого на сетке фрагмента диффузионного пламени и позволяет выполнять расчёт самоподдерживающегося горения термопластика при использовании грубой пространственной сетки.

8. Впервые выполнено прямое численное моделирование воспламенения твёрдого горючего материала под действием ламинарного диффузионного пламени.

9. Предложена модификация тепловой модели пилотного воспламенения термопластиков, которая учитывает конечную скорость реакции термического разложения горючего материала и позволяет определить температуру воспламенения в зависимости от падающего теплового потока.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в усовершенствовании существующих моделей и программного обеспечения, разработке новых компонентов моделей и методики вычислений для создания цифрового аналога виртуальной лаборатории для испытаний полимерных и композитных горючих материалов на пожароопасность.

Практическая значимость работы определяется тем, что разработка новых теоретических моделей и расчётных кодов для моделирования прогрева, термического разложения, воспламенения и горения полимерных материалов, а также распространения пламени открывает возможность оптимизации программы лабораторных и натурных испытаний на пожароопасность и прогноза поведения материалов в условиях реального пожара.

Результаты данной работы были получены при выполнении НИР по заказу компании Boeing (США) в 2016-2019 гг. и АО «ЦНИИМаш» Госкорпорации «Роскосмос» в 2018-2020 гг. при выполнении космического эксперимента «Фламенко» на борту МКС. Работа поддержана грантом РФФИ 20-08-00478, грантом Правительства Санкт-Петербурга 2019 г. и стипендией Правительства Российской Федерации 2019 г.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является термическое разложение, воспламенение и горение полимерных и композитных материалов под действием внешнего теплового потока в условиях, приближенном к условиям стандартных испытаний материалов на пожарную опасность. Методы исследования включают численное моделирование (основной метод), теоретический анализ с помощью приближённой аналитической модели и лабораторный эксперимент. Используется ранее опубликованная модель пиролиза твёрдого горючего материала (Pyropolis), модифицированная и внедрён-

ная автором в коммерческое ПО ANSYS Fluent с помощью пользовательских функций. В численных расчётах газофазного пламени используются уравнения переноса массы, импульса и энергии для многокомпонентных реагирующих (ламинарных и турбулентных) течений с учётом лучистого теплопереноса. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с собственными и опубликованными экспериментальными данными, результатами космического эксперимента, а также результатами расчётов, выполненных с разными моделями. Расчёты выполнены с использованием многопроцессорных кластеров Суперкомпьютерного центра «Политехнический».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует двум пунктам паспорта специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» для технических наук, а именно: п. 6. Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях; п. 7. Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая математическая модель и программное обеспечение Fluent-Pyropolis для численного моделирования нагрева, термического разложения, воспламенения и горения полимерных и композитных материалов в условиях испытаний на пожароопасность.

2. Результаты прямого численного моделирования струйного ламинарного диффузионного пламени в трёхмерной нестационарной постановке, новые данные о структуре пламени и чувствительности результатов расчёта к параметрам модели.

3. Результаты прямого численного моделирования формирования, роста, потери устойчивости и погасания низкоскоростного диффузионного пламени над плоской поверхностью в условиях невесомости.

4. Результаты численного моделирования естественно-конвективных турбулентных диффузионных пламен углеводородных горючих с малым (метан) и большим (гептан) выходом сажи. Методика численного расчёта методом крупных вихрей с усовершенствованной моделью образования сажи и новой подсеточной моделью эмиссии теплового излучения.

5. Результаты численного моделирования нагрева, термического разложения, воспламенения и горения термопластика (ПММА) и конструкционного композитного материала при радиационном нагреве в конусном калориметре. Алгоритм расчёта конвективного теплового потока на поверхности горючего материала, охваченной пламенем.

6. Результаты численного моделирования нагрева, термического разложения, воспламенения и горения трудногорючего композитного материала и легкогорючего термопластика под действием пламени газовой горелки.

7. Результаты численного моделирования распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности горючего материала в условиях крупномасштабного эксперимента.

8. Модификация тепловой модели пилотного воспламенения термопластиков, учитывающая конечную скорость реакции термического разложения материала и позволяющая определить температуру воспламенения для заданного внешнего теплового потока.

Личный вклад автора включает: применение и модификацию существующих моделей и программного обеспечения; разработку, имплементацию и апробацию новых моделей; создание интерфейса для взаимодействия модели Pyropolis с решателем ANSYS Fluent в режиме параллельных вычислений на современных суперкомпьютерах; разработку методики вычислений; определение направлений исследований и постановку задач (совместно с научным руководителем); выполнение численных расчётов; участие в постановке эксперимента; анализ и интерпретацию результатов; написание статей (совместно с соавторами); доклады на профильных научных конференциях и семинарах.

Апробация результатов. Результаты работы представлены и обсуждались на: 15-й Международной конференции и выставке по исследованиям и инженерным разработкам в области пожарной безопасности (Interflam 2019, г. Эгам, Великобритания, 1-3 июля 2019 г.), 9-м Международном семинаре по пожаровзрывобезопасности (ISFEN9, г. Санкт-Петербург, Россия, 21-26 апреля 2019 г. – премия за лучший доклад), VII Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7, г. Москва, Россия, 22-26 октября 2018 г. – диплом за лучший доклад), 3-м Европейском симпозиуме по пожарной безопасности (ZESFSS, г. Нанси, Франция, 12-14 сентября 2018 г.), 9-м Международном семинаре по структуре пламени (9ISFS, г. Новосибирск, Россия, 10-14 июля 2017 г.), Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Санкт-Петербург, Россия, май 2017 г. – диплом за лучший доклад), 12-м Международном симпозиуме по пожаробезопасности (12 IAFSS, г. Лунд, Швеция, 9-17 июня 2017 г.), Совместной летней школе по горению, организованной университетами Циньхуа, Принстона и Институтом Горения (2017 Tsinghua-Princeton-Combustion Institute Summer School on Combustion, Пекин, 16-22 июля 2017 г.), Неделе науки СПбПУ (г. Санкт-Петербург, Россия, 2016-2017 гг.).

Работа автора включена в программу 38 Международного симпозиума по горению (Аделаида, Австралия, 24-29 января 2021 г.).

Основные результаты опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 6 из базы данных Scopus. Author ID: 57195590678, H-index: 2 (Scopus), 3 (РИНЦ).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, содержащего 260 наименований, и двух приложений. Текст диссертации изложен на 212 страницах, содержит 114 рисунков и 16 таблиц. Объем приложений 5 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его основные цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, объект и методы исследования, положения, выносимые на защиту, а также личный вклад автора и данные о презентации результатов работы на профильных научных форумах и статистика публикационной активности автора.

В **первой главе** приведён литературный обзор, охватывающий экспериментальные методы исследования полимерных и композитных материалов на пожароопасность, численные методы моделирования термического разложения твёрдых горючих материалов, моделирование газофазного диффузионного пламени в условиях нормальной гравитации и в невесомости, а также работы по совместному моделированию пиролиза полимерных материалов и газофазного горения летучих для лабораторных методов испытаний материалов. Основные выводы из обзора литературы заключаются в следующем:

1. Отсутствует опыт численного моделирования воспламенения и горения полимерных и композитных материалов с помощью ANSYS Fluent. Данный код не содержит модели термической деградации твёрдых горючих материалов при нагреве.

2. Используемая в данной работе модель PyroPolis пригодна для расчёта пиролиза как полностью газифицирующихся термопластиков, так и обугливающих материалов. Для моделирования стандартизированных испытаний материалов на горючесть данную модель необходимо дополнить учётом следующих процессов: 1) двусторонний нагрев плоского слоя горючего материала; 2) течение летучих внутри материала с возможностью двустороннего отвода; 3) расчёт переноса теплового излучения в слое частично прозрачного материала.

3. В литературе недостаточно представлен опыт расчётов диффузионного горения в низкоскоростных ламинарных и естественно-конвективных пламёнах с применением ANSYS Fluent.

4. Современная практика моделирования газофазного пламени использует наперёд заданные значения выхода сажи и доли излучённой энергии. Необходимо разработать методику вычислений, в которой данные характеристики не являются входными параметрами, а рассчитываются с учётом локальных значений температуры и концентраций компонентов.

5. К настоящему времени устойчивость низкоскоростного ламинарного пламени над поверхностью твёрдого горючего материала в невесомости не исследована, критические условия возникновения и погасания пламени не могут быть надёжно предсказаны с помощью существующих теорий, а соответствующие примеры трёхмерных численных расчётов в литературе отсутствуют. Имеются новые экспериментальные данные, полученные в результате серии экспериментов BRE-Фламенко в рамках действующей программы АСМЕ, нацеленной на исследование горения в условиях космического полёта (2018-2020 гг.). Необходимо разработать методику трёхмерного численного моделирования ламинар-

ного диффузионного пламени в условиях невесомости, позволяющую исследовать режим радиационного погасания пламени.

6. Современная практика моделирования пожара опирается на концепцию раздельного моделирования. В рамках данного подхода скорость выгорания материала задаётся на основе экспериментальных данных или измерений в стандартизированных испытаниях на горючесть. Основным недостатком такой методики является предположение об идентичности теплового воздействия при пожаре и в лабораторных испытаниях. Воспламенение и горение материалов зависит не только от химической природы материала, но и от температуры источника горения, условий воспламенения, наличия поблизости легкогораемых материалов, формы и положения образца по отношению к пламени и т.д. Для учёта этих факторов, влияющих на динамику и развитие пожара, необходимо разработать методику совместного моделирования термического разложения горючего материала и газофазного горения летучих.

7. Для совместного моделирования с применением решателя ANSYS Fluent и модели Pyropolis необходимо разработать специальный интерфейс, обеспечивающий обмен информацией между программными средствами в параллельном режиме.

Во второй главе описывается математическая модель, использованная в данной работе и реализованная в программном обеспечении Fluent-Pyropolis. Указанное ПО включает газодинамический решатель ANSYS Fluent (модель газовой фазы), библиотеку программ модели Pyropolis (модель твёрдой фазы) и интерфейс для передачи данных между ними при многопроцессорных вычислениях (Рис. 1).

Модель Pyropolis (Рис. 2, а) предназначена для описания прогрева и термического разложения полимерных и композитных горючих материалов и включает модули для расчёта теплопереноса, пиролиза и переноса продуктов газификации. Учитывается вспучивание и обугливание материалов, а также изменение объёма образцов при пиролизе. Оригинальная модель Pyropolis¹ применялась только для одностороннего нагрева при заданном тепловом потоке на границе (без сопряжения с газодинамическим решателем).

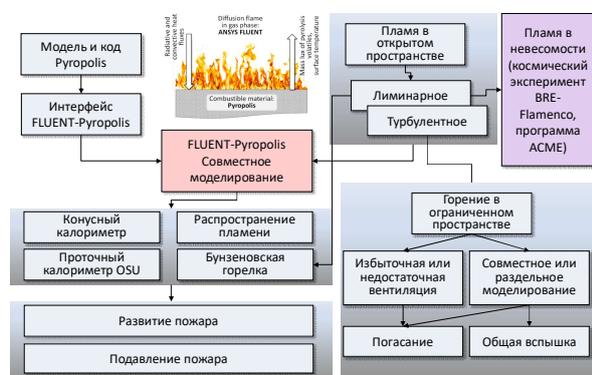


Рис. 1. Создание, апробация и применение модели и программного обеспечения Fluent-Pyropolis

В данной работе с помощью специального параллельного интерфейса (Рис. 2, б)

¹ A. Snegirev, V. Talalov, V. Stepanov, J. Harris. A new model to predict pyrolysis, ignition and burning of flammable materials in fire tests // Fire Safety Journal. – 2013. – Vol. 59. – pp. 132-150.

выполнено сопряжение модели Pyropolis с газодинамическим решателем ANSYS Fluent и разработана версия модели, пригодная для двустороннего нагрева плоского слоя горючего материала и двустороннего отвода летучих. В модель Pyropolis внедрён двухпоточковый метод расчёта переноса теплового излучения в слое частично прозрачного материала.

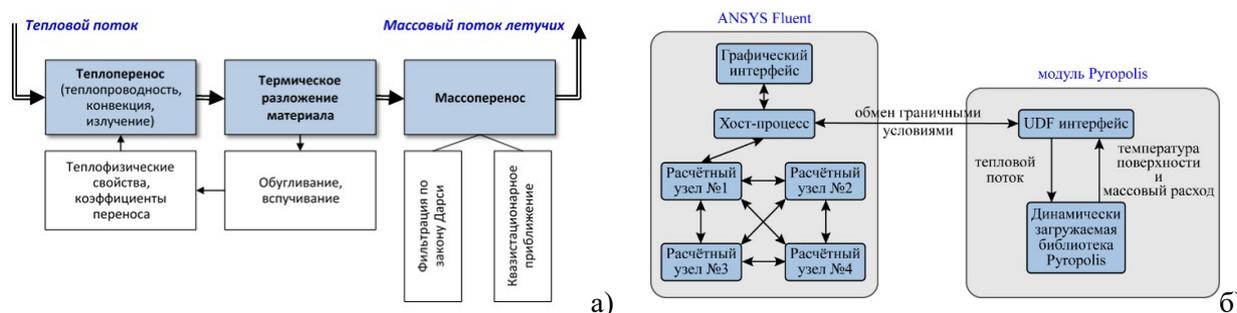


Рис. 2. Компоненты модели Pyropolis и обмен информацией между ними (а); параллельный интерфейс (б)

Течение газовой фазы описывается нестационарными уравнениями Навье-Стокса, записанными для многокомпонентной реагирующей смеси. В численных расчётах ламинарного диффузионного пламени используются глобальный механизм, предполагающий протекание одностадийной необратимой реакции полного окисления горючего газа, или многостадийные химические механизмы (DRM22, USC-sk32 и GRI-Mech3.0), представленные совокупностью обратимых химических реакций.

Расчёт турбулентных течений выполняется методом крупных вихрей. В численных расчётах турбулентного диффузионного пламени рассматриваются глобальные одностадийные необратимые реакции окисления горючих, а для расчёта скорости расходования реагентов и образования продуктов применяется модель диссипации вихрей.

Образование и окисление сажи в ламинарном пламени рассчитывается по моделям Мосса-Брукса и Фенимора-Джонса. При использовании многостадийного химического механизма в качестве концентрации прекурсора принимается расчётная мольная доля ацетилена. В турбулентном пламени при использовании одностадийной глобальной реакции концентрация прекурсора оценивается с помощью её корреляции со смесевой долей и используется модель окисления сажи Ли и др.

Моделирование теплового излучения включает расчёт спектральных характеристик среды и решение уравнения переноса энергии излучения в пространстве. Эффективный коэффициент поглощения продуктов сгорания вычисляется по методу взвешенной суммы серых газов. Уравнение переноса энергии излучения численно решается методом дискретных ординат.

Третья глава посвящена разработке и апробации методики моделирования горения в газовой фазе. Оценка достоверности результатов расчётов выполнена путём сравнения с ранее опубликованными измерениями и имеющимися новыми данными экспериментов. При этом рассмотрены следующие сценарии: 1) струйное ламинарное диффузионное пламя над цилиндрической горелкой; 2) естественно-конвективное ламинарное

диффузионное пламя метана и этилена над пористой горелкой в условиях невесомости; 3) естественно-конвективные турбулентные диффузионные пламена метана и гептана.

Расчёты струйного ламинарного диффузионного пламени метана над цилиндрической горелкой выполнены для условий экспериментов К.С. Smyth и др. (NIST): истечение метана из латунной цилиндрической трубки с внутренним диаметром 11.1 мм и толщиной стенки 0.8 мм в спутном потоке воздуха (7.8 см/с, 400 К). Для описания окисления горючего применяются многостадийные и одностадийные химические механизмы.

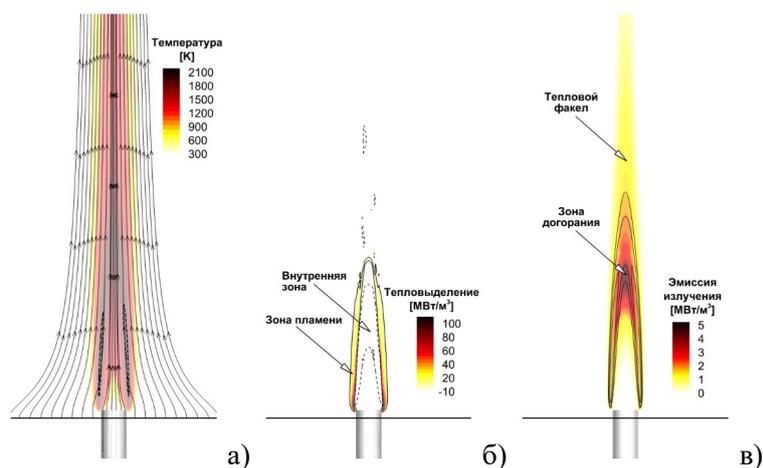


Рис. 3. Расчётная структура ламинарного струйного пламени: а) – поле температуры и линии тока в осевой плоскости (пунктир – температура 2050 К); б) – объёмная мощность тепловыделения (сплошная линия – тепловыделение 10 MW/m^3 , пунктир - отрицательное значение -0.1 MW/m^3); в) – эмиссия теплового излучения (линии – температура 1800, 1900 и 2000 К)

Существующий опыт численного моделирования ламинарного диффузионного горения относится к моделям и кодам собственной разработки и охватывает только осесимметричные стационарные режимы горения вдали от пределов погасания. Методика численного моделирования ламинарного диффузионного пламени, созданная в данном разделе, свободна от этих ограничений. В данной работе впервые выполнены трёхмерные численные расчёты данного типа пламени с разрешением пространственных масштабов, характерных для его внутренней структуры, в которой идентифицированы три пространственные зоны (см. Рис. 3), отличающиеся протекающими в них химическими реакциями, концентрацией сажи, температурой, мощностью тепловыделения, эмиссией и поглощением теплового излучения. Показано, что во внутренней зоне пламени доминируют эндотермические реакции, а мощность тепловыделения отрицательна. Области тепловыделения и эмиссии теплового излучения разнесены в пространстве, а часто используемое допущение о пропорциональности тепловыделения при горении и теплопотерь за счёт излучения является неверным.

Результаты численных расчётов согласуются с экспериментальными данными для распределений температуры (см. Рис. 4). Наблюдается заметное отличие между расчётной и измеренной концентрацией сажи, в то время как измеренные и расчётные максимальные значения объёмной доли сажи близки. Расчёты показали, что, используя модель образования сажи Мосса-Брукса в ANSYS Fluent и варьируя её параметры, не удаётся получить лучшее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными.

Установлено, что характерный размер ячеек сетки 0.3-0.4 мм даёт пространственное разрешение, достаточное для данного типа задач.

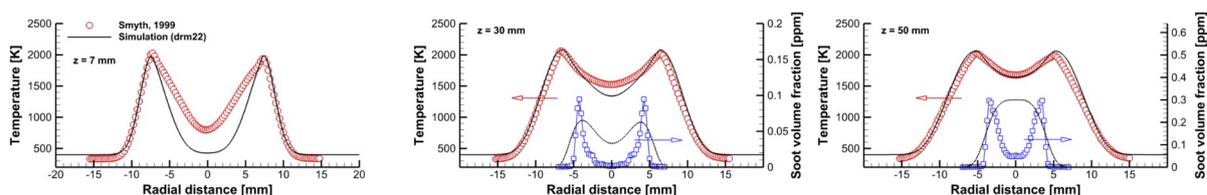


Рис. 4. Радиальные профили температуры и объёмной доли сажи в горизонтальных сечениях на разной высоте от среза горелки (7, 30 и 50 мм). Символы – измерения К. Smyth и др. (NIST), линии – расчёты (многостадийный механизм)

В рамках данной задачи продемонстрирована возможность применения глобально-одностадийного механизма реакции для расчёта структуры пламени вдали от пределов воспламенения и погасания. Показано, что для согласия расчётных и измеренных профилей температуры необходимо учесть температурную зависимость коэффициентов переноса для всех компонентов смеси и скорректировать теплоёмкости продуктов сгорания (в случае горения метана в воздухе – увеличить теплоёмкость CO_2 и H_2O на 16%).

Методика численного моделирования ламинарного диффузионного пламени далее применяется для расчёта диффузионного горения над плоской поверхностью круглой горелки Burning Rate Emulator (BRE) в невесомости. Значения массового потока горючего на поверхности воспроизводят соответствующие значения, характерные для горения твёрдых горючих материалов, и попадают в ранее неисследованный диапазон очень малых чисел Рейнольдса (менее 10). Опыт трёхмерных нестационарных численных расчётов пламен данного типа является новым.

В работе представлены две серии расчётов. Сначала результаты численного моделирования сравниваются с данными наземных экспериментов² по горению в условиях кратковременной невесомости при падении в испытательной башне. Расчётная динамика начальной стадии роста пламени близка к наблюдавшейся в экспериментах. Результаты расчётов указывают на существование двух стадий динамики пламени: 1) начальная стадия устойчивого роста сферического пламени, которая прекращается в момент локального погасания на вершине пламени, и 2) последующее нестационарное разрушение пламени, которое приводит к полному погасанию. Расчёты предсказывают непрерывное снижение максимальной температуры и увеличение доли излучённой энергии на первой стадии роста пламени. Когда максимальная температура снижается до 1200 К, а доля излучённой энергии достигает 60-75% от текущей мощности тепловыделения при горении, происходит локальное погасание пламени на его вершине. После этого пламя становится нестационарным, испытывает одну или несколько пульсаций и полностью гаснет. Установлено, что потеря устойчивости и погасание пламени вызвано лучистыми теплотерями из пламени (радиационное погасание). Важно отметить, что получено хорошее количественное согласие расчётных и измеренных тепловых потоков на поверхности горелки. В данной серии расчётов предсказано влияние расхода горючего газа (метан и этилен) на динамику

² Y. Zhang, M. Kim, H. Guo, P.B. Sunderland, J.G. Quintiere, J. de Ris, D.P. Stocker. Emulation of condensed fuel flames with gases in microgravity // *Combustion and Flame*. – 2015. – Vol. 162. – 3449-3455.

роста и погасания пламени и показано, что при горении в нормальной атмосфере стационарное состояние пламени не достигается, и имеет место радиационное погасание.

Данный прогноз получил экспериментальное подтверждение результатами космического эксперимента BRE (Фламенко³), выполняющегося в настоящее время на МКС при участии научной группы, в состав которой входит автор данной работы. Экспериментальные сценарии, соответствующие горению в нормальной атмосфере (21% O₂, 1 атм) при длительной невесомости воспроизведены во второй серии расчётов. Расчётная динамика пламени хорошо согласуется с экспериментальной видеозаписью как качественно (по форме и размеру пламени, см. Рис. 5), так и количественно (по времени жизни пламени и тепловому потоку на поверхности горелки, см. Рис. 6). Расчётная концентрация сажи достигает максимума вскоре после воспламенения и затем быстро снижается практически до нуля, что согласуется с визуальными наблюдениями сине-фиолетового цвета пламени в экспериментах.

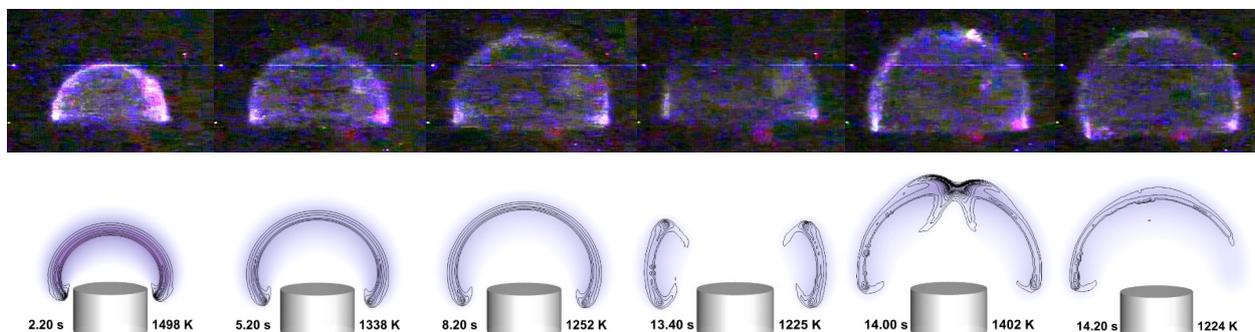


Рис. 5. Динамика роста, распада и погасания пламени, наблюдаемая в эксперименте (вверху, сценарий 19039H2) и предсказываемая в расчётах (внизу, механизм DRM22).

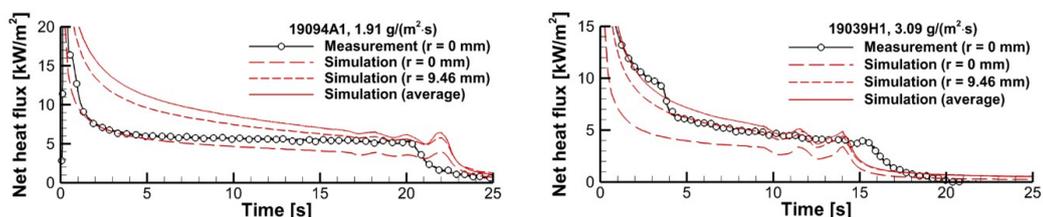


Рис. 6. Динамика теплового потока на поверхности горелки BRE для сценариев из космического эксперимента BRE-Фламенко. Красные линии – результаты расчёта, чёрные линии с символами – данные измерений. Химический механизм DRM22

Для повышения точности расчёта эмиссии теплового излучения нестационарного пламени разработан и применён новый алгоритм динамического определения длины пути луча. Предложенный алгоритм особенно полезен при решении задач, в которых рассматриваются существенно нестационарные пламена с низкой концентрацией сажи.

Описание разработки и апробации методики моделирования газофазного горения с помощью ANSYS Fluent завершается рассмотрением естественно-конвективных турбу-

³ Космический эксперимент "Фламенко". АО "ЦНИИМаш", Госкорпорация Роскосмос, 2019, http://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/flamenko/?sphrase_id=3100; Advanced Combustion via Microgravity Experiments (ACME), <http://spaceflightsystems.grc.nasa.gov/acme/>

лентных диффузионных пламён метана⁴ и гептана⁵ (Рис. 7), отличающиеся малым и большим выходом сажи. Ключевые особенности численной методики включают применение вихреразрешающего метода моделирования турбулентности, применение кинетических моделей образования и окисления сажи, расчёт эмиссии теплового излучения с учётом неразрешаемых на сетке флуктуаций температуры. На основании сравнения с результатами измерений выхода сажи и радиационных тепловых потоков показано, что оптимальной является комбинация модели Мосса-Брукса для образования сажи и модели Ли и др. для окисления сажи.

В работе предложена модификация модели Мосса-Брукса, предназначенная для приближённого расчёта концентрации углеводородного прекурсора, которая определяет скорость образования сажи. При этом используется универсальная кусочно-линейная корреляция между концентрацией прекурсора и смесевой долей. Корреляция включает в себя только один модельный параметр (отношение максимальной концентрации прекурсора для рассматриваемого горючего к соответствующему значению для метана). Этот параметр калибруется по экспериментальным данным для концентрации сажи в пламени (и интегральному выходу сажи) и радиационного теплового потока (и интегральной доле излучённой энергии). Такой подход позволяет расширить область применимости модели Мосса-Брукса на горение продуктов газификации полимеров, точный состав которых неизвестен.

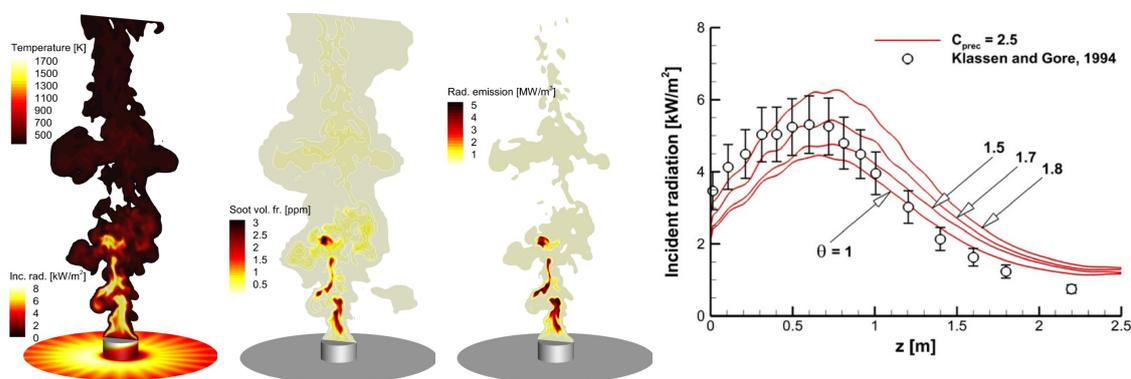


Рис. 7. Мгновенные разрешённые поля температуры (также показан радиационный тепловой поток на горизонтальной поверхности), объёмной доли сажи, мощности теплового излучения и распределения радиационного теплового потока по вертикали на расстоянии 0.825 м от оси пламени (гептан, 116 кВт, диаметр горелки 0.3 м).

Предложена и имплементирована новая формула для учёта влияния подсеточных турбулентных пульсаций и неразрешаемых на сетке фрагментов пламени на расчётное значение эмиссии теплового излучения. Результаты расчётов пламени гептана (Рис. 7, справа) показали успешность применения данной модификации при надлежащем выборе

⁴ S. Hostikka, K.B. McGrattan, A. Hamins. Numerical modeling of pool fires using LES and finite volume method for radiation / Fire Safety Science – Proc 7th Int Symp, IAFSS. – 2003. – pp. 383-394.

⁵ M. Klassen, G.P. Gore. Structure and radiation properties of pool fires / Report NIST-GCR-94-651. – 1994. – 139 p.

модельного параметра θ (отношение максимальной температуры в зоне реакции к температуре смеси, окружающей рассматриваемый фрагмент в ячейке сетке).

С помощью указанных модификаций показано, что в рамках метода моделирования крупных вихрей, даже при использовании сравнительно грубого сеточного разрешения, возможен расчёт образования сажи и эмиссии теплового излучения на основе локальных характеристик, разрешаемых на сетке.

В четвёртой главе модель Pyropolis совместно с решателем ANSYS Fluent применяется для расчётов воспламенения и горения как полностью газифицирующихся, так и обугливающих пластиков и композитных материалов в условиях стандартных испытаний на горючесть. Численное моделирование и сравнение с опубликованными экспериментальными и расчётными данными выполняется для следующих сценариев:

В расчётах воспламенения и горения пластины ПММА (10x10 см) в конусном калориметре рассмотрены два сценария, в одном из которых (как и в экспериментах⁶) имеет место газификация без воспламенения, а во втором имеет место воспламенение и горение летучих. В последнем случае выполнены расчёты газификации материала под действием внешнего теплового потока 52 кВт/м^2 , а также в самоподдерживающемся режиме (после выключения нагревателя). При включённом внешнем нагреве получено хорошее согласие с результатами экспериментов (Рис. 8).

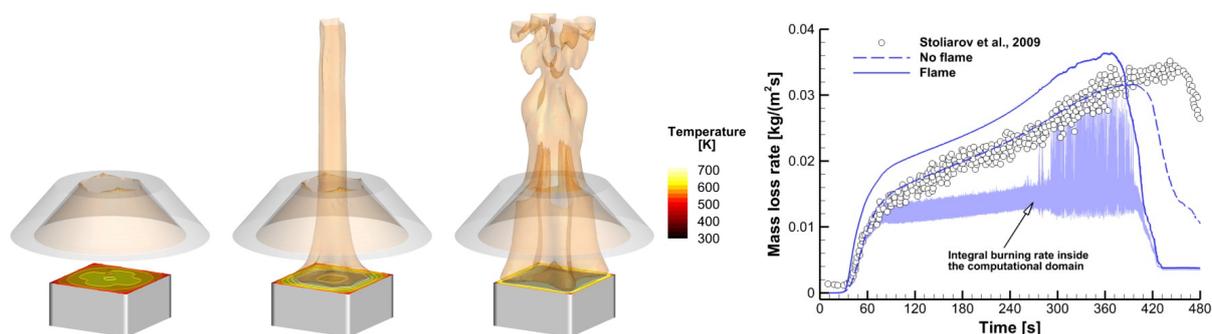


Рис. 8. Развитие пламени над образцом материала в конусном калориметре (пламя показано изоперфорностью мгновенной разрешённой температуры $500 \text{ }^\circ\text{C}$ в моменты времени 30, 42 и 72 с) и изменение во времени скорости выгорания. Линии – результаты расчёта (штриховая – газификация без воспламенения, сплошная – пилотное воспламенение), символы – измерения⁶. Материал образца – ПММА, падающий лучистый тепловой поток 52 кВт/м^2

Однако после выключения внешнего нагрева расчёт предсказывает погасание пламени, что противоречит наблюдавшемуся в экспериментах продолжению горения в самоподдерживающемся режиме. Такое рассогласование указывает на то, что расчёт занижает тепловой поток, поступающий из пламени в материал. В свою очередь, это связано с тем, что вблизи поверхности материала расположен фрагмент ламинарного диффузионного пламени, не разрешаемый на сетке. Для того, чтобы учесть существование такого фрагмента (температура которого зависит от концентрации кислорода в ячейке: $T_f =$

⁶ S.I. Stoliarov, S. Crowley, R.E. Lyon, G.T. Linteris. Prediction of the burning rates of non-charring polymers // Combustion and Flame. – 2009. – Vol. 156. – pp. 1068-1083.

$T_{surf} + \tilde{Y}_{O_2} \Delta h_{c,O_2} / c_p$), предложен новый алгоритм для аппроксимации конвективного теплового потока на поверхности горючего материала, охваченной пламенем:

$$q_c'' = -\frac{\lambda + \lambda_{SGS}}{\Delta n} \left\{ \begin{array}{l} \tilde{T} - T_{surf}, \\ \max \left(\underbrace{\tilde{T} - T_{surf}}_{\substack{\text{Температурный градиент,} \\ \text{разрешаемый на сетке}}}, \underbrace{\min(T_{f,cr}, T_f) - T_{surf}}_{\substack{\text{Если температурный градиент} \\ \text{не разрешается на сетке}}} \right), \end{array} \right. \begin{array}{l} \underbrace{m'' \leq m''_{cr}}_{\text{До воспламенения и после погасания}} \\ m'' > m''_{cr} \end{array}, \quad (1)$$

где $\Delta h_{c,O_2} = 13$ МДж/кг O_2 , Δn – расстояние от поверхности до центра приповерхностной ячейки, m'' – массовый поток летучих, рассчитываемый моделью Pyropolis, m''_{cr} – критические массовый поток летучих ниже которого ожидается погасание пламени, $T_{f,cr}$ – критическое значение температуры пламени перед погасанием. Результаты расчётов показали, что применение алгоритма позволяет воспроизвести самоподдерживающееся горение даже с использованием сравнительно грубой пространственной сетки, причём расчётная скорость выгорания (как распределение по поверхности горючего материала, Рис. 9, так среднее значение) соответствует экспериментальным данным.

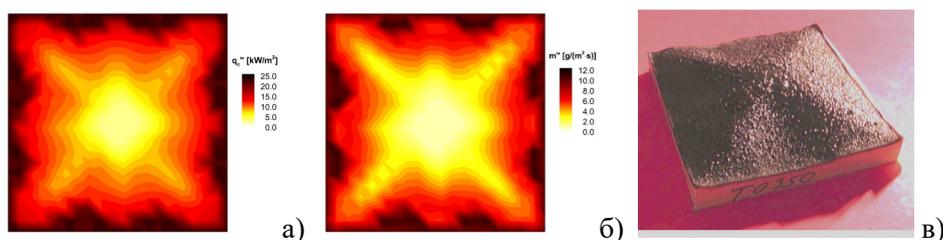


Рис. 9. Расчётное распределение конвективного теплового потока (а) и скорости выгорания (б) по нагреваемой поверхности пластины при самоподдерживающемся горении пластины ПММА; в) – вид пластины ПММА после горения в самоподдерживающемся режиме⁷.

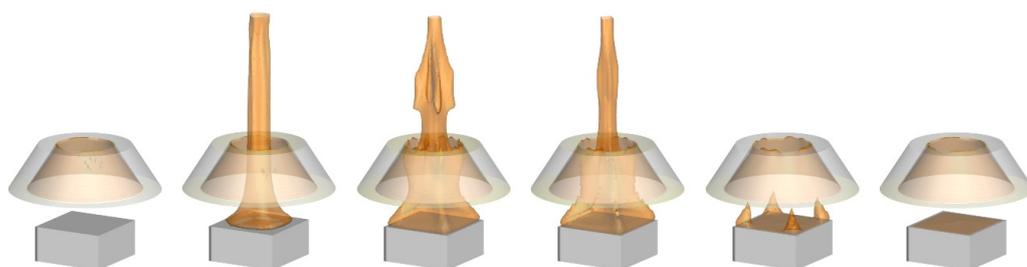


Рис. 10. Развитие пламени над образцом композитного материала в конусном калориметре в моменты времени 50, 100, 150, 200, 250 и 300 с. Пламя показано изоповерхностью мгновенной разрешённой температуры 500 °С. Падающий лучистый тепловой поток 35 кВт/м²

Данная методика вычислений применена в расчётах, в которых воспроизводятся термическое разложение, воспламенение и горение армированной углеволокном пластины из композитного материала, используемого в конструкциях гражданских самолётов. Пластина (квадрат 10x10 см, толщина 3.2 мм) расположена горизонтально на подложке из

⁷ G. Linteris, L. Gewuerz, K. McGrattan, G. Fourney. Modeling solid sample burning // Fire Safety Science - Proceedings of the 8th International Symposium. – 2005. – pp. 625-636.

теплоизоляционного материала. Выполнены два вида расчётов, в которых моделирование нагрева и термического разложения композитного материала рассматривалось отдельно и совместно с течением и горением в газовой фазе (Рис. 10). В обоих случаях расчёты с хорошей точностью предсказывают время воспламенения и описывают тенденцию уменьшения скорости выгорания материала с течением времени после зажигания (Рис. 11).

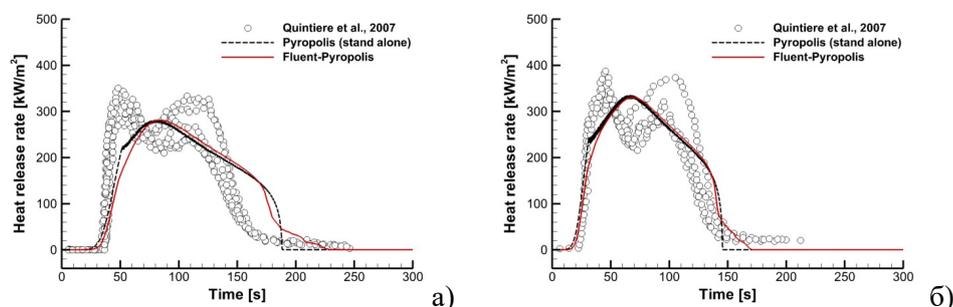


Рис. 11. Изменение во времени мощности тепловыделения $Q'' = f_c \Delta h_c m''$ при горении композитного материала под действием внешнего теплового потока 75 кВт/м^2 (а) и 100 кВт/м^2 (б). Штриховые линии – модель PyroPolis с заданным тепловым потоком на поверхности, сплошные линии – совместное моделирование ANSYS Fluent-PyroPolis, символы – измерения⁸

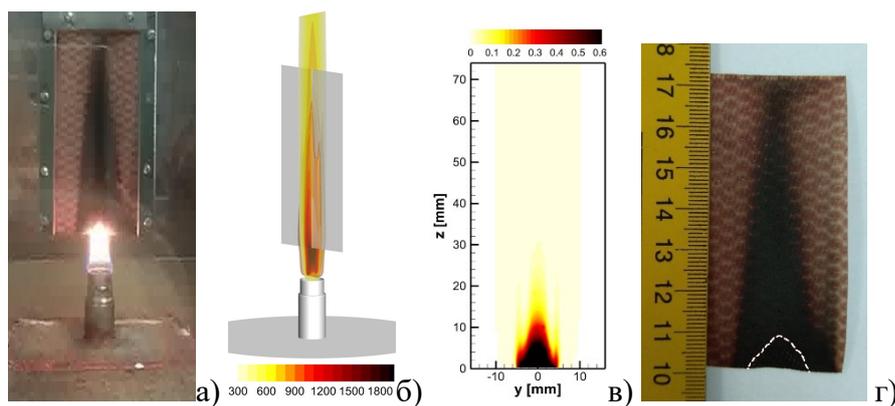


Рис. 12. Пластина композитного материала в пламени газовой горелки: а) – эксперимент; б) – визуализация пламени в расчёте; в) – скорость выгорания, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ через 60 с; г) – образец с обозначенной зоной выгорания через 60 с

Приведённые выше результаты расчётов воспроизводят нагрев, воспламенение и горение пластины горючего материала под действием заданного внешнего теплового потока. Поведение горючего материала под действием пламени газовой горелки представляет более сложный сценарий, тепловой поток на поверхности определяется в ходе численного моделирования с учётом внутренней структуры пламени, создаваемого горелкой. Расчёты данного типа выполнены для вертикальных образцов трудногорючего композитного материала (Рис. 12) и легкогорючего термопластика в условиях, приближённо соответствующих стандартным испытаниям на пожароопасность с использованием бунзеновской горелки. Применяется совместное (сквозное) решение уравнений для газовой и твёрдой фазы и рассматривается одновременное горение газа, истекающего из горелки, и летучих продуктов пиролиза. Учитывается нагрев, воспламенение и горение на обеих сторонах пластины. Результаты численного моделирования для пластины трудно-

⁸ J.G. Quintiere, R.N. Walters, S. Crowley. Flammability properties of aircraft carbon-fiber structural composite // Report DOT/FAA/AR-07/57. Federal Aviation Administration. – 2007. – 43 p.

рючего композитного материала с хорошей точностью воспроизводят результаты выполненного автором эксперимента (убыль массы полимера и размер зоны выгорания по истечении 60 с контакта пластины с пламенем, см. Рис. 12).

В *четвертом разделе* четвертой главы воспроизводятся условия крупномасштабного эксперимента⁹ по воспламенению и горению вертикальной пластины ПММА (ширина 0.58 м, высота 5 м, толщина 2.5 см). В численных расчётах применяется реализованная в программном обеспечении Fluent-Ругоролis методика совместного (сквозного) решения уравнений для газовой и твёрдой фазы. Расчёты показали, что длительность промежутка времени, по истечении которого начинается быстрый рост мощности тепловыделения, сильно зависит от параметров воспламенителя (не указаны в описании эксперимента). Расчётная длительность указанного промежутка времени оказалась значительно меньше, чем наблюдавшаяся в экспериментах. Однако по истечении периода индукции расчётная скорость роста мощности тепловыделения при надлежащем выборе параметров модельного воспламенителя согласуется с экспериментальной.

Приведённые в работе результаты расчётов показывают возможность применения методики совместного моделирования с помощью программного обеспечения Fluent-Ругоролis для прогноза результатов испытаний горизонтальных и вертикальных образцов на пожароопасность. Отметим, что в данной работе прямое численное моделирование воспламенения твёрдого горючего материала в результате воздействия ламинарного диффузионного пламени выполнено впервые.

В *пятом разделе* четвертой главы формулируется и применяется аналитическая теория пилотного воспламенения и горения твёрдых горючих материалов. При этом классическая тепловая модель пилотного воспламенения термопластиков модифицирована с учётом конечной скорости реакции термического разложения. В данном подходе температура пилотного воспламенения полностью газифицирующихся термопластичных материалов не является постоянной (как это полагается в классической теории¹⁰), а определяется тепловым балансом на нагреваемой поверхности и скоростью пиролиза в объёме слоя горючего материала. Для этого используется следующее выражение (полученное в пределе большой энергии активации реакции пиролиза)

$$m_{ign}'' = \rho A \exp\left(-\frac{E_a}{\mathcal{R}T_{surf}}\right) \min\left(\underbrace{\frac{\mathcal{R}T_{surf}^2/E_a}{T_{surf} - T_0}}_{\text{Толщина зоны реакции}}, \underbrace{\frac{\overbrace{\lambda \frac{T_{surf} - T_0}{q_{net}''}}^{\text{Толщина прогретого слоя}}}{\delta}}_{\text{Толщина прогретого слоя}}, \delta\right), \quad (2)$$

где $T_{surf} = T_{ign}$ – температура поверхности в момент воспламенения, δ – толщина слоя горючего материала, $q_{net}'' = \varepsilon q_{ext}'' - \varepsilon \sigma T_{ign}^4 - \Delta h_g m_{ign}'' - \alpha (T_{ign} - T_0)$ – тепловой поток, поступаю-

⁹ P.K. Wu, L. Orloff, A. Tewarson. Assessment of material flammability with the FSG propagation model and laboratory test methods // 13th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, NISTIR 6030, NIST, Gaithersburg MD, USA. – 1996.

¹⁰ См., например, Quintiere J. G. Fundamentals of fire phenomena / Wiley, Chichester, UK, 2006. – 460 p.

щий в слой. Использование критического массового потока летучих ($m'' = m''_{ign}$ при $T_{surf} = T_{ign}$) в качестве критерия зажигания позволяет определять температуру воспламенения T_{ign} . Время задержки воспламенения вычисляется с помощью приближённых выражений, соответствующих термически толстому и термически тонкому слою материала:

$$\tau_{ign} = \min\left(\left(\frac{\pi}{4}\right)\lambda c\rho\left(\frac{T_{ign} - T_0}{q''_{net}}\right)^2, \delta c\rho(T_{ign} - T_0)/q''_{net} - (1/\pi)(\delta^2/a)\right). \quad (3)$$

Значения T_{ign} и τ_{ign} определяются в ходе быстро сходящихся итераций.

В работе выполнено сравнение расчётных значений температуры воспламенения и времени задержки зажигания (которые также вычислялись с помощью модели Pyropolis) с опубликованными экспериментальными данными для трёх необугливающих полимеров (полиметилметакрилат, полиэтилен и полипропилен). Пример расчёта для ПММА показан на Рис. 13 и Рис. 14. Результаты расчётов по аналитической теории хорошо воспроизводят опубликованные результаты измерений.

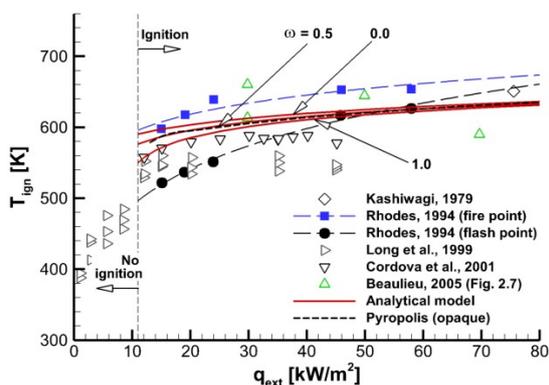


Рис. 13. Зависимость температуры воспламенения ПММА от внешнего теплового потока. Сплошные линии – расчёт по аналитической модели, штриховые линии – расчёт по модели Pyropolis, символы – измерения

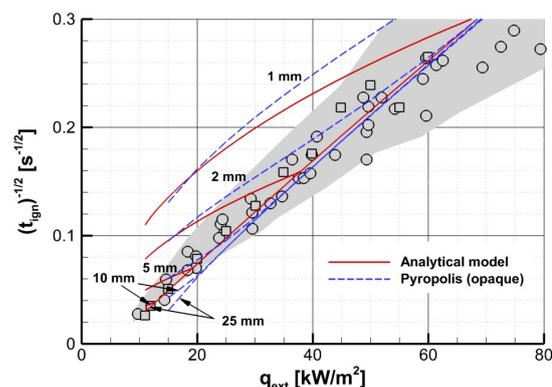


Рис. 14. Зависимость времени задержки воспламенения ПММА от внешнего теплового потока и толщины образца. Сплошные линии – расчёт по аналитической модели, штриховые линии – численный расчёт по модели Pyropolis.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами данной работы является разработка и валидация нового программного обеспечения для моделирования воспламенения и горения полимерных и композитных материалов и демонстрация возможности прогноза результатов испытаний полимерных и композитных материалов на пожароопасность.

В ходе работы решены три группы задач и получены следующие результаты.

При построении и апробации модели ламинарного диффузионного пламени:

- Разработана методика трёхмерного численного моделирования ламинарного диффузионного горения с помощью ANSYS Fluent. Впервые выполнены трёхмерные численные расчёты данного типа пламени с разрешением пространственных масштабов, характерных для его внутренней структуры. Изучена структура струйного ламинарного пламе-

ни, установлены требования к сеточному разрешению, показана возможность применения глобального одностадийного механизма реакции для расчёта структуры пламени вдали от пределов воспламенения и погасания.

- Для условий горения летучих над поверхностью твёрдого горючего материала численно исследована динамика формирования, роста, потери устойчивости диффузионного пламени в невесомости. Исследовано влияние гравитации на структуру и динамику данного типа пламени и показана возможность радиационного погасания пламени в невесомости. Изучена динамика неустойчивого пламени и дана интерпретация результатов космического эксперимента на борту МКС.

- Разработан новый алгоритм динамического определения длины пути луча, который повышает точность расчёта эмиссии теплового излучения нестационарного пламени.

При построении и апробации модели турбулентного диффузионного пламени:

- Разработана методика трёхмерного численного моделирования естественно-конвективного турбулентного пламени с помощью ANSYS Fluent. Показана возможность численного моделирования естественно-конвективного турбулентного пламени без дополнительных допущений о выходе сажи и доле излучённой энергии.

При построении методики совместного моделирования термического разложения твёрдого горючего материала и газофазного горения летучих:

- Модель термического разложения твёрдых горючих материалов Pyropolis модифицирована и внедрена в программное обеспечение ANSYS Fluent. В результате создан новый вычислительный инструмент для численного моделирования воспламенения и горения полимерных и композитных материалов.

- Разработана методика численного моделирования воспламенения и горения полимерных и композитных материалов с помощью Fluent-Pyropolis. Ключевые особенности методики включают: 1) совместное (сквозное) моделирование термического разложения твёрдого горючего материала и горения летучих в газофазном пламени; 2) кинетическое моделирование образования и окисления сажи; 3) расчёт эмиссии теплового излучения с учётом локальных значений температуры и концентраций продуктов сгорания; 4) новый алгоритм для аппроксимации конвективного теплового потока на поверхности горючего материала, охваченной пламенем, учитывающий существование не разрешаемого на сетке фрагмента диффузионного пламени.

- Показана применимость методики совместного моделирования с помощью программного обеспечения Fluent-Pyropolis для прогноза результатов испытаний полимерных и композитных материалов на воспламеняемость и распространение пламени. Расчёт воспламенения твёрдого горючего материала в результате воздействия ламинарного диффузионного пламени выполнен впервые.

- Тепловая модель пилотного воспламенения термопластиков модифицирована с учётом конечной скорости реакции термического разложения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Snegirev A. Transient dynamics of radiative extinction in low-momentum microgravity diffusion flames / A. Snegirev, **E. Kuznetsov**, E. Markus, P. Dehghani, P. Sunderland // Proceedings of the Combustion Institute. – 2020. – Vol. 38 (Scopus, WoS, Q1).
2. **Кузнецов Е.А.** Радиационное погасание ламинарного диффузионного пламени над плоской пористой горелкой в условиях невесомости. Численное моделирование / **Е.А. Кузнецов**, А.Ю. Снегирёв, Е.С. Маркус // Физика горения и взрыва. – 2020. – Т. 56. – №4. – С. 26-45 (ВАК, РИНЦ). Пер. на англ.: [3].
3. **Kuznetsov E.A.** Radiative extinction of laminar diffusion flame above the flat porous burner in microgravity: a computational study / **E.A. Kuznetsov**, A.Yu. Snegirev, E.S. Markus // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2020. – Vol. 56. – №4. – pp. 394-411 (Scopus, WoS, Q3).
4. **Kuznetsov E.** Radiative extinction of a diffusion flame in microgravity / E. Kuznetsov, A. Snegirev, E. Markus // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 21-26 April 2019, St. Petersburg, Russia, Ed. by Snegirev A., Tamanini F., Bradley D., Liu N., Molkov V., Chaumeix N., St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – 2019. – Vol. 1. – pp. 214-224.
5. Snegirev A. Performance and calibration of two subgrid extinction models for turbulent diffusion combustion in an under-ventilated enclosure fire / A. Snegirev, **E. Kuznetsov**, E. Markus, J. Harris, B. Moravec // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1107. – pp. 042011 (РИНЦ, Scopus).
6. Snegirev A. Coupled analytical approach to predict piloted flaming ignition of non-charring polymers / A. Snegirev, **E. Kuznetsov**, E. Markus // Fire Safety Journal. – 2017. – Vol. 93. – pp. 74-83 (Scopus, WoS, Q1).
7. Snegirev A. On soot and radiation modeling in buoyant turbulent diffusion flames / A. Snegirev, E. Markus, **E. Kuznetsov**, J. Harris, T. Wu // Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 54. – №8. – pp. 2275-2293 (Scopus, WoS, Q2).
8. **Кузнецов Е.А.** Численное моделирование самоподдерживающегося горения термопластика: роль сеточного разрешения температурных градиентов у поверхности материала / **Е.А. Кузнецов**, Е.С. Коковина, А.Ю. Снегирёв // Тезисы докладов Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (22-26 мая 2017 г., Санкт-Петербург). В 2х т. Т. 2. – М: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 35-36.