



Маркус Екатерина Сергеевна

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ЕСТЕСТВЕННО-
КОНВЕКТИВНОГО ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ
ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

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: Карпов Александр Иванович, д.ф.-м.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск, главный научный сотрудник лаборатории физико-химической механики

Дектерев Александр Анатольевич, к.т.н., доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, старший научный сотрудник, исполняющий обязанности руководителя Красноярского филиала

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

Защита состоится 24 декабря 2020 г. в 14 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета У 01.04.14 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29, Механический корп., 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. Распространение пламени по поверхности горючих материалов определяет динамику развития пожара в помещении. Данное явление представляет сложный физико-химический процесс, который является результатом одновременного протекания и двустороннего взаимодействия термического разложения горючего материала и газофазного горения летучих. Распространение пламени сводится к последовательному прогреву и воспламенению новых участков поверхности горючего материала. Режим распространения пламени определяется свойствами пожарной нагрузки, ее конфигурацией, ориентацией горящей поверхности, геометрией помещения, скоростью и направлением воздушного потока, а также концентрацией кислорода в нём.

Способность горючих материалов к распространению пламени по их поверхности – одна из характеристик их пожарной опасности, для определения которой разработаны стандартные методы испытаний. Это позволяет классифицировать материалы по группам, но не объясняет физико-химические механизмы, обуславливающие распространение пламени, и не позволяет дать количественный прогноз динамики реального пожара.

Для количественного прогнозирования динамики опасных факторов пожара с учетом распространения пламени требуется численное моделирование. В современной инженерной практике применяется метод «проектного пожара», в котором скорость роста мощности тепловыделения и скорость распространения пламени задаются заранее на основе имеющихся экспериментальных данных и экспертных оценок. Это не позволяет прогнозировать явления зажигания и погасания, а также нестационарную динамику горения. Пригодная для широкой инженерной практики методика численного моделирования распространения пламени с учетом тепловой обратной связи между газофазным пламенем и термическим разложением горючего материала к настоящему времени не разработана.

Несмотря на активные теоретические, численные и экспериментальные исследования, режимы и механизмы распространения пламени по поверхности горючих материалов остаются недостаточно изученными. Это снижает точность количественного прогноза динамики пламени и обуславливает необходимость всесторонней апробации численных моделей путём сравнения с имеющимися экспериментальными данными.

Необходимость разработки методики численного моделирования распространения пламени с учетом тепловой обратной связи между газофазным пламенем и термическим разложением горючего материала, и её применения для анализа режимов и механизмов распространения пламени в условиях лабораторных испытаний и реального пожара обуславливает **актуальность данной работы.**

Степень разработанности темы исследования. Работы по численному и экспериментальному исследованию распространения пламени по поверхностям горючих материалов ведутся в следующих отечественных и зарубежных исследовательских организациях: СПбПУ (Россия), ВНИИПО (Россия), ИХКГ СО РАН (Россия), Институт механики УрО РАН (Россия), университеты Мериленда и Беркли (США), FM Global (США), NIST (США), университеты Уорика и Эдинбурга (Великобритания), Гента (Бельгия), USTC (Китай) и

ряде других. Однако проблема разработки расчётной методики, пригодной для численного моделирования распространения пламени по поверхностям горючих материалов при решении инженерных задач, остаётся нерешённой.

Цели и задачи. Целью данной работы является разработка и апробация методики численных расчётов распространения пламени по поверхности твёрдого горючего материала на основе *совместного* моделирования термического разложения материала и горения летучих в газофазном пламени. Для достижения данной цели решены следующие задачи.

1. Анализ режимов и механизмов распространения пламени по поверхности твёрдых горючих материалов, идентификация режимов и механизмов распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности в условиях наземной гравитации. Анализ существующих подходов к теоретическому описанию распространения пламени, математических моделей и расчетных кодов.

2. Всесторонняя апробация модели и кода Fire Dynamics Simulator (FDS) на основании сравнения с экспериментальными данными для естественно-конвективного диффузионного пламени над горизонтальной поверхностью и у вертикальной поверхности, пиролиза твердого горючего материала, его воспламенения и горения.

3. Внедрение и апробация подсеточной модели (пристеночной функции) для расчёта конвективного теплового потока при недостаточном сеточном разрешении температурных градиентов и наличии диффузионного пламени вблизи поверхности горючего материала.

4. Совместное численное моделирование распространения пламени вверх по плоской вертикальной поверхности термопластика с использованием кинетической модели пиролиза. Выявление режимов распространения в зависимости от способа инициирования горения и условий газообмена на боковых поверхностях. Сравнение с экспериментальными данными.

5. Разработка и апробация приближённой аналитической (тепловой) модели распространения турбулентного пламени вверх по плоской вертикальной поверхности. Получение приближённых формул для зависимости координаты фронта и скорости его распространения от времени.

6. Численное моделирование распространения турбулентного пламени вверх по плоской вертикальной поверхности с использованием тепловой модели пиролиза. Интерпретация результатов с помощью приближённых формул и определение области применимости тепловой модели.

7. Численное моделирование распространения турбулентного пламени по дискретной пожарной нагрузке. Прогноз развития пожара в многоуровневом стеллажном хранилище. Сравнение скорости роста мощности тепловыделения с квадратичной зависимостью от времени, предусмотренной нормативными документами.

8. Анализ эффективности параллельных вычислений с помощью FDS на примере многопроцессорного кластера «Торнадо» Суперкомпьютерного центра «Политехнический».

Научная новизна заключается в следующем:

1. Подсеточная модель (пристеночная функция) для расчёта конвективного теплового

потока при недостаточном сеточном разрешении температурных градиентов и наличии неразрешаемого на сетке диффузионного пламени вблизи поверхности горючего материала впервые внедрена в расчётный код FDS. Результаты апробации удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для самоподдерживающегося горения горизонтальной и вертикальной пластин термопластика.

2. Приближенная аналитическая модель распространения турбулентного пламени вверх по поверхности горючего материала модифицирована таким образом, чтобы обеспечить существование решения с ускоряющимся распространением пламени, наблюдающимся в экспериментах.

3. Выявлено три режима распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности горючего материала, отличающиеся формой фронта пиролиза. Показано, как мощность и размеры нагревателя-воспламенителя, а также характер газообмена на боковых поверхностях влияют на режим распространения пламени.

4. Определена область применимости тепловой модели пиролиза для численного моделирования распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности. Установлено, что тепловая модель может применяться для тех сценариев, где пространственным изменением скорости выгорания можно пренебречь (дискретные вертикальные поверхности высотой до 1 м).

5. Тепловая модель пиролиза впервые применена для численного моделирования развития пожара на стеллажном хранилище. Показано, что скорость роста мощности тепловыделения может существенно превышать значения, предусмотренные нормативными документами.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в усовершенствовании компонентов модели, определяющих точность расчета тепловой обратной связи между пиролизом горючего материала и газофазным горением летучих, разработке приближенной аналитической модели распространения пламени вверх по поверхности горючего материала, выявлении области применимости упрощенной тепловой модели пиролиза. Практическая значимость работы определяется тем, что полученные результаты повышают достоверность численного прогноза динамики развития пожара на стадии проектирования, разработке систем обнаружения и тушения пожаров.

Результаты данной работы использованы в том числе при выполнении НИР по заказу международных (Boeing) и отечественных промышленных компаний («Гефест», Санкт-Петербург). Часть работ выполнена в рамках гранта РНФ 16-49-02017, а также поддержана грантами Правительства Санкт-Петербурга 2015, 2016, 2017 гг. и стипендией Президента Российской Федерации 2018-2020 гг.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является распространение турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности твёрдого горючего материала. В работе применяются методы численного моделирования турбулентного течения многокомпонентных реагирующих течений с учетом лучистого теплопереноса. Достовер-

ность полученных результатов подтверждается сравнением с опубликованными экспериментальными данными, аналитическими моделями и численными результатами других авторов.

В работе использованы модели и открытые расчетные коды FDS (версии поколения 6.*), модифицированные с учетом целей данной работы, а также специально разработанная приближённая аналитическая модель. Расчеты выполнены с использованием вычислительных ресурсов СКЦ «Политехнический».

Диссертация **соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»:** п.5. Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей; 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. Методика совместного численного моделирования термического разложения твёрдых горючих материалов и горения летучих в турбулентном газофазном пламени (трёхмерная постановка задачи, многопроцессорные вычисления).
2. Новые результаты апробации модели и расчетного кода FDS путем сравнения с экспериментальными данными. Рассмотренные сценарии включают: естественно-конвективное пламя над горизонтальной поверхностью, пламя у вертикальной стенки, воспламенение и горение пластины термопластика под действием внешнего нагрева.
3. Реализация в FDS подсеточной модели (пристеночной функции) для расчёта конвективного теплового потока при недостаточном сеточном разрешении температурных градиентов и наличии неразрешаемого на сетке диффузионного пламени вблизи поверхности горящего материала.
4. Приближенная аналитическая модель распространения турбулентного пламени вверх по поверхности твёрдого горючего материала и результаты её апробации.
5. Идентификация трёх режимов распространения турбулентного пламени вверх по сплошной поверхности горючего материала (осевой, первый и второй фронтальный) в зависимости от параметров нагревателя-воспламенителя и наличия боковых стенок.
6. Сравнение результатов моделирования с помощью кинетической и тепловой модели пиролиза и определение области применимости тепловой модели.
7. Методика применения тепловой модели пиролиза пожарной нагрузки при прогнозировании развития пожара в стеллажном хранилище.
8. Анализ скорости роста мощности тепловыделения при пожаре на высокостеллажном складе в зависимости от положения очага возгорания.

Личный вклад автора заключается в участии в постановке задач исследования, модификации программного обеспечения, разработке и обосновании приближенной аналитической модели распространения пламени (совместно с научным руководителем), разработке методики вычислений распространения пламени по поверхности сплошной и дискретной пожарной нагрузки, выполнении численных расчётов, апробации, интерпретации и анализе результатов, написании статей (совместно с соавторами), представлении результатов работы на профильных научных конференциях.

Апробация результатов. Результаты работы представлены и обсуждались на: 15-й Международной конференции и выставке по исследованиям и инженерным разработкам в области пожарной безопасности (Interflam2019, Великобритания, 2019), 9-м Международном семинаре по опасностям пожаров и взрывов (ISFEN9, Россия, 2019), VII Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7, Россия, 2018), 3-м Европейском симпозиуме по пожарной безопасности (3ESFSS, Франция, 2018 – премия за лучший доклад), 9-м Международном семинаре по структуре пламени (9ISFS, Россия, 2017), XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Россия, 2017 – премия за лучший стендовый доклад), 12-м Международном симпозиуме по пожаробезопасности (12 IAFSS, Швеция, 2017), Совместной летней школе по горению, организованной университетами Циньхуа, Принстона и Институтом Горения (Китай, 2017), 8-м Международном семинаре по опасностям пожаров и взрывов (ISFEN8, Китай, 2016 – премия за лучший доклад), 7-й Европейской конференции по горению (7ЕСМ, Венгрия, 2015), XXXI Сибирском теплофизическом семинаре (Россия, 2014), Научного Совета РАН по горению и взрыву (Россия, 2015), Неделе науки СПбПУ (Россия, 2012-2019).

Основные результаты опубликованы в 14 печатных работах, в том числе 6 из базы данных Scopus (Author ID: 57195585949, H-индекс: 2), 4 из базы данных WoS и 1 из базы данных SA.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, содержащего 232 наименования, и четырёх приложений. Текст диссертации изложен на 199 страницах, содержит 94 рисунка и 11 таблиц. Объем приложений 16 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, степень её разработанности, а также сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость, приведен список положений, выносимых на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор. Показано, что в зависимости от соотношения между временем задержки воспламенения материала, временем пребывания газовых реагентов в пламени и временем протекания химической реакции в газовой фазе реализуется один из трёх режимов распространения пламени: тепловой, кинетический и радиационный. В тепловом режиме, реализующемся при горении в наземных условиях и рассматриваемом в данной работе, динамика распространения пламени по поверхности

твёрдого горючего материала определяется длительностью нагрева слоя материала и скоростью его термического разложения.

Рассмотрено два существенно различающихся сценария распространения пламени: в направлении газового потока и против него. Скорость перемещения пламени по поверхности горючего материала определяется тепловым балансом в зоне прогрева, примыкающей к фронту пиролиза. Обзор предыдущих исследований приводит к следующим выводам.

1. Распространение пламени в направлении потока воздуха – наиболее быстрый и опасный механизм развития пожара. Данный сценарий определяется интенсивностью теплопередачи от пламени в зону прогрева материала перед фронтом пиролиза и не зависит от скорости реакций окисления в газовой фазе (по крайней мере для турбулентного пламени).

2. При распространении пламени в направлении потока воздуха основным механизмом теплопередачи в зону прогрева является тепловой поток от газофазного пламени, направленный по нормали к поверхности. Продольным тепловым потоком в слое материала можно пренебречь.

3. Динамика роста мощности тепловыделения определяется скоростью перемещения фронта пиролиза $V_p = dx_p/dt$, где $x_p(t)$ – координата фронта. Для распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности необугливающегося горючего материала (термопластики) $V_p \sim x_p^n$ ($n = 0.5-0.6$ термически тонкого слоя и $n = 2/3-1$ для термически толстого). В последнем случае скорость выгорания материала в зоне пиролиза и тепловой поток из пламени к поверхности материала увеличиваются с высотой.

4. Экспериментальные данные для высоты пламени вблизи вертикальной поверхности аппроксимируются зависимостью $x_f \sim x_p^n$, где для турбулентного пламени $n \approx 2/3$.

5. Соотношение конвективного и радиационного потоков на поверхности горючего материала определяется размером пламени. Если размер зоны пиролиза не превышает 0.2-0.3 м, то пламя остаётся ламинарным, и преобладает конвективный поток. Радиационный поток доминирует при достаточно больших размерах зоны пиролиза, обеспечивающих формирование развитого турбулентного пламени.

6. При распространении пламени вверх по вертикальной поверхности нижний участок пламени остаётся ламинарным даже при формировании развитого турбулентного пламени. Ламинарно-турбулентный переход сопровождается увеличением толщины и оптической плотности пламени, что приводит к смене доминирующего теплового потока с конвективного на радиационный.

7. Аналитическая теория распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности строится на соотношениях вида $dx_p/dt = (x_f - x_p)/\tau_{ign}$, где x_f – координата вершины пламени, τ_{ign} – время задержки воспламенения, вычисляемое в предположении заданной температуры воспламенения (тепловая теория). При этом предполагается прямолинейный фронт пиролиза.

8. В современной практике проблема численного расчёта теплового потока от пламени

к поверхности горючего материала с учётом смены доминирования конвективного и радиационного тепловых потоков и существования не разрешаемых на сетке фрагментов пламени вблизи поверхности остаётся нерешённой.

9. Тепловая теория воспламенения твёрдых горючих материалов представляет упрощённый и физически обоснованный метод для моделирования распространения пламени по поверхности. В литературе отсутствует её сравнение с результатами расчётов по кинетической теории и анализ области её применимости для численного моделирования распространения пламени.

10. Существующий опыт численных расчётов позволяет распространить совместное моделирование газофазного горения и термического разложения материала пожарной нагрузки на практически важные сценарии. Апробированная методика совместного численного моделирования указанных процессов даёт прогноз динамики пожара с помощью расчётного кода FDS в настоящее время отсутствует.

Во **второй главе** описана математическая модель FDS – открытого программного обеспечения, использованного в данной работе для выполнения численного моделирования. В основе FDS лежит численное решение уравнений Навье-Стокса в приближениях малых чисел Маха для многокомпонентной реагирующей среды. Для моделирования турбулентного течения используется моделирование крупных вихрей (LES). Для моделирования турбулентного горения применяется модель дробления вихрей для бесконечно быстрой одностадийной необратимой реакции окисления горючего. Скорость расходования реагентов и мощность тепловыделения определяются интенсивностью подсеточного смешения реагентов. Уравнение переноса теплового излучения решается методом контрольных объёмов. Спектральные свойства газообразных продуктов сгорания (CO_2 , H_2O и сажи) учитываются в приближении серого газа в зависимости от локальных значений концентраций и температуры. Эмиссия теплового излучения вычисляется с учётом локальных значений температуры и коэффициента поглощения и корректируется таким образом, чтобы обеспечить заданное значение доли излучённой энергии. Предполагается, что при сгорании единицы массы горючего образуется постоянное количество CO и сажи, которое задаётся с учётом имеющихся экспериментальных данных.

Для расчета твердой фазы решается одномерное уравнение теплопроводности с источниками/стоками тепла, обусловленными термическим разложением материала и поглощением теплового излучения. Для расчета переноса теплового излучения в слое твердого горючего материала в FDS используется двухпоточный метод. Для оценки конвективного теплового потока на поверхности твердого материала в FDS используется равенство $q_c'' = \alpha(\tilde{T} - T_w)$, где T_w – температура стенки, \tilde{T} – разрешённая температура в пристеночной ячейке. Коэффициент теплоотдачи вычисляется следующим образом: $\alpha = \max(\lambda/(\Delta_n/2), (\lambda/L)\max(1, \text{Nu}))$, где первый аргумент активируется на достаточно мелкой сетке, а второй использует эмпирическую корреляцию для числа Нуссельта при турбулентной естественной конвекции.

Для описания пиролиза горючего материала используются кинетическая и тепловая модели пиролиза (разложения твердого материала на летучие и твёрдый остаток). *Кинетическая модель* учитывает конечную скорость разложения материала. В FDS перенос летучих внутри слоя материала не учитывается, твердый материал и летучие находятся в локальном тепловом равновесии. Скорость химической реакции зависит от локальных значений плотности исходного вещества и температуры: $r_{\alpha,\beta} = \left(\rho_{s,\alpha}/\rho_s|_{t=0}\right)^{n_{\alpha,\beta}^s} X_{O_2}^{n_{\alpha,\beta}^{O_2}} A_{\alpha,\beta} \exp(-E_{\alpha,\beta}/\mathcal{R}T_s)$, где $n_{\alpha,\beta}^s$ и $n_{\alpha,\beta}^{O_2}$ – порядки реакции, $A_{\alpha,\beta}$ – предэкспоненциальный множитель, $E_{\alpha,\beta}$ – энергия активации, $X_{O_2}(x)$ – объемная доля кислорода в слое материала, $\rho_s|_{t=0}$ – начальная плотность слоя материала, $\rho_{s,\alpha}$ – текущая плотность компонента.

В соответствии с *тепловой* теорией имеет место инертный (без газификации) нагрев материала до достижения критической температуры поверхности (температуры воспламенения T_{ign}) и последующее выгорание материала с постоянной, наперёд заданной скоростью потери массы m'' . Когда температура поверхности достигает T_{ign} , тепловой поток, поступающий вглубь слоя материала, снижается на величину $\Delta h_g m''$, где Δh_g – теплота газификации. При этом продолжается расчёт температуры поверхности материала в отсутствие источников, что позволяет учесть существенный рост температуры поверхности для материалов, разлагающихся с образованием углистого остатка. Чтобы учесть конечную толщину слоя, δ , по истечении времени $\tau_b = (\rho_s|_{t=0} \delta)/m''$ после воспламенения скорость выгорания полагается равной нулю.

Третья глава посвящена разработке и апробации методики совместного численного моделирования пиролиза и газофазного горения. Для оценки адекватности расчёта структуры *газофазного пламени* и теплового потока на поверхности горючего материала в **разделе 3.1** рассмотрено естественно-конвективное пламя с заданным расходом горючего. Примеры расчёта турбулентного диффузионного горения метана над горизонтальной пористой охлаждаемой горелкой¹ показан на Рис. 1. Результаты расчёта турбулентного диффузионного пламени пропилена, формирующегося у поверхности вертикальной пористой горелки^{2,3} приведены на Рис. 2. В расчётах удовлетворительно воспроизводятся основные характеристики газофазного пламени: осредненная температура, вертикальная скорость, лучистый тепловой поток.

В **разделе 3.2.** для апробации модели *твёрдой фазы* используются экспериментальные данные по газификации пластин полимерных материалов в атмосфере инертного газа,

¹ Hostikka S. Numerical modeling of pool fires using les and Finite Volume Method for Radiation / S. Hostikka, K.B. McGrattan, A. Hamins // Fire Safety Science. – Proc. 7th Int. Symp., IAFSS. – 2003. – P. 383-394.

² De Ris J.L. Flame heat transfer. Part I: pyrolysis zone / J.L. De Ris, G.H. Markstein, L. Orloff, P.A. Beaulieu // Technical Report J.I. 0D0J9.MT – Factory Mutual Research Corp., 1999.

³ De Ris J. Similarity of Turbulent Wall Fires / J.L. De Ris, G.H. Markstein, L. Orloff, P.A. Beaulieu // Fire Safety Science – Proc. 7th Int. Symp., IAFSS. – 2003. – P. 259-270.

исключающей воспламенение летучих, а также результаты измерений времени задержки пилотного воспламенения летучих в воздухе^{4,5} при заданном внешнем тепловом потоке. Получено хорошее согласие с результатами измерений.

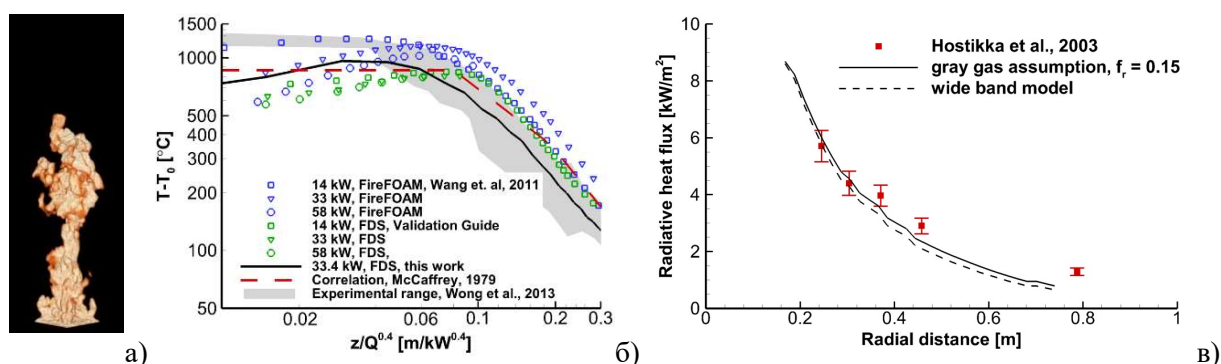


Рис. 1. Пламя над поверхностью квадратной газовой горелки (сторона квадрата 0.337 м, метан, мощность тепловыделения 175 кВт, количество ячеек сетки 16 млн). а) – Изоповерхность 200 кВт/м³; б) – Осреднённая по времени температура на оси симметрии пламени; в) – Осредненные по времени значения лучистого теплового потока вдоль радиального направления в плоскости поверхности горелки

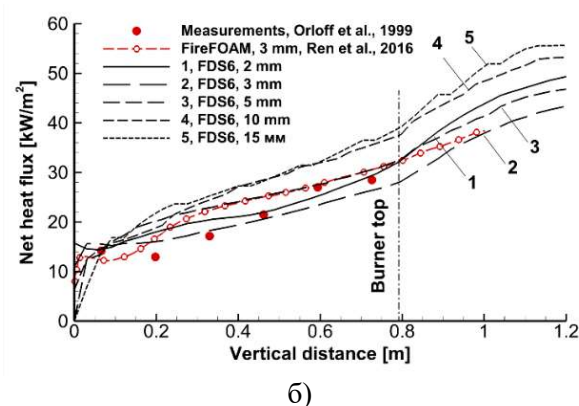
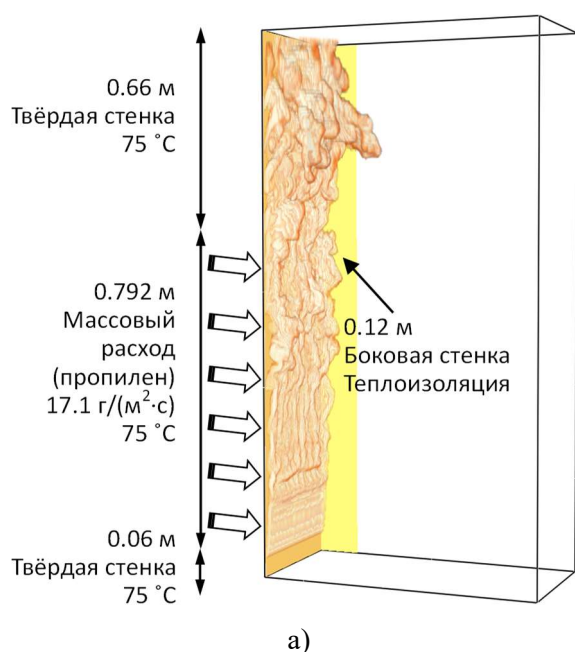


Рис. 2. Турбулентное диффузионное пламя у вертикальной поверхности: а) – расчётная область и граничные условия (показана мгновенная изоповерхность мощности тепловыделения 200 кВт/м³ и одна из двух боковых стенок); б) – распределение суммарного теплового потока вдоль вертикальной координаты в центральной плоскости

В разделе 3.3 приведены результаты совместного моделирования зажигания и горения горючих материалов с учетом тепловой обратной связи между их пиролизом и газофазным горением летучих. Рассматривается пилотное воспламенение летучих, выделяющихся в результате пиролиза пластины термопластика при нагреве радиационным потоком 25, 50 и 75 кВт/м² в конусном калориметре. Образец горючего материала (ПММА, 10 x 10 x 0.85

⁴ Stoliarov S.I. Prediction of the burning rates of non-charring polymers / S.I. Stoliarov, S. Crowley, R.E. Lyon, G.T. Linteris // Combustion and Flame. – 2009 – Vol. 156. – № 5 – P. 1068–1083.

⁵ Bal N., Rein G. Numerical investigation of the ignition delay time of a translucent solid at high radiant heat fluxes / N. Bal, G. Rein // Combustion and Flame. – 2011. – Vol. 158. – P. 1109–1116.

см) располагается поверх теплоизоляционного слоя (толщина 2.5 см). В результате формирования пламени над поверхностью горючего материала к внешнему тепловому потоку, падающему на поверхность образца, добавляется тепловой поток из пламени. В расчетах получено удовлетворительное согласие расчётных и экспериментальных зависимостей скорости выгорания от времени.

Важным требованием к расчетной методике является возможность воспроизвести неравномерное распределение тепловых потоков по поверхности образца, которое обусловлено структурой пламени. Расчеты, выполненные с помощью оригинальной версии FDS показали, что (в то время как результирующий тепловой поток от пламени согласуется с экспериментальным), полученная в расчёте доля лучистого теплового потока оказывается намного выше измеренной, особенно на периферии образца. Это указывает на неточный расчет как радиационного, так и конвективного потоков на поверхности образца, причём в данном случае указанные ошибки частично компенсируют друг друга. Данный недостаток используемого расчётного кода обусловлен, во-первых, невозможностью разрешения температурных градиентов вблизи поверхности при использовании грубых расчетных сеток и, во-вторых, приближённым расчётом эмиссии и переноса теплового излучения (априорное задание доли излучённой энергии, приближённое вычисление эффективного коэффициента поглощения). Измельчение сетки лишь незначительно приближает результаты расчёта к экспериментальным данным.

Поскольку численное разрешение структуры диффузионного пламени вблизи поверхности практически недостижимо в инженерных расчётах, в данной работе для приближённого учёта температурного градиента, не разрешаемого на сетке применена специальная пристеночная функция [11]. Соответствующий алгоритм, представленный в **разделе 3.4**, в данной работе впервые внедрён в расчётный код FDS. Конвективный тепловой поток на твердой поверхности вычисляется с учетом возможного присутствия в ячейке фрагмента тонкого ламинарного диффузионного пламени, максимальная температура которого $T_f = T_w + \tilde{Y}_{O_2} \Delta h_{c,O_2} / c_p$ оценивается с учетом концентрации кислорода в ячейке. Предполагается, что пристеночный фрагмент пламени существует, если массовый расход летучих m'' превышает предельное значение m''_{cr} . В противном случае конвективный поток определяется с учетом молекулярной и подсеточной турбулентной теплопроводности в пристеночной ячейке по градиенту температуры, разрешённому на сетке. Предполагается также, что в непосредственной близости от поверхности состояние фрагмента пламени близко к пределу погасания, на котором предельная температура пламени равна $T_{f,cr}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = (\lambda + \lambda_t) / (\Delta/2)$ умножается на параметр вдува $z / (\exp(z) - 1)$, где $z = c_p m'' / \alpha$. Применение указанного алгоритма в расчётах горения горизонтальных пластин ПММА под действием внешнего теплового потока показано на Рис. 3, а в случае самоподдерживающегося горения – на Рис. 4. Самоподдерживающееся горение вертикальных пластин ПММА

рассмотрено в условиях эксперимента⁶ (Рис. 5). Применение указанного алгоритма позволяет воспроизвести наблюдавшееся в экспериментах самоподдерживающееся горение как горизонтальной, так и вертикальной пластины ПММА, в то время как оригинальная версия расчётного кода предсказывает быстрое погасание пламени после выключения внешнего нагрева.

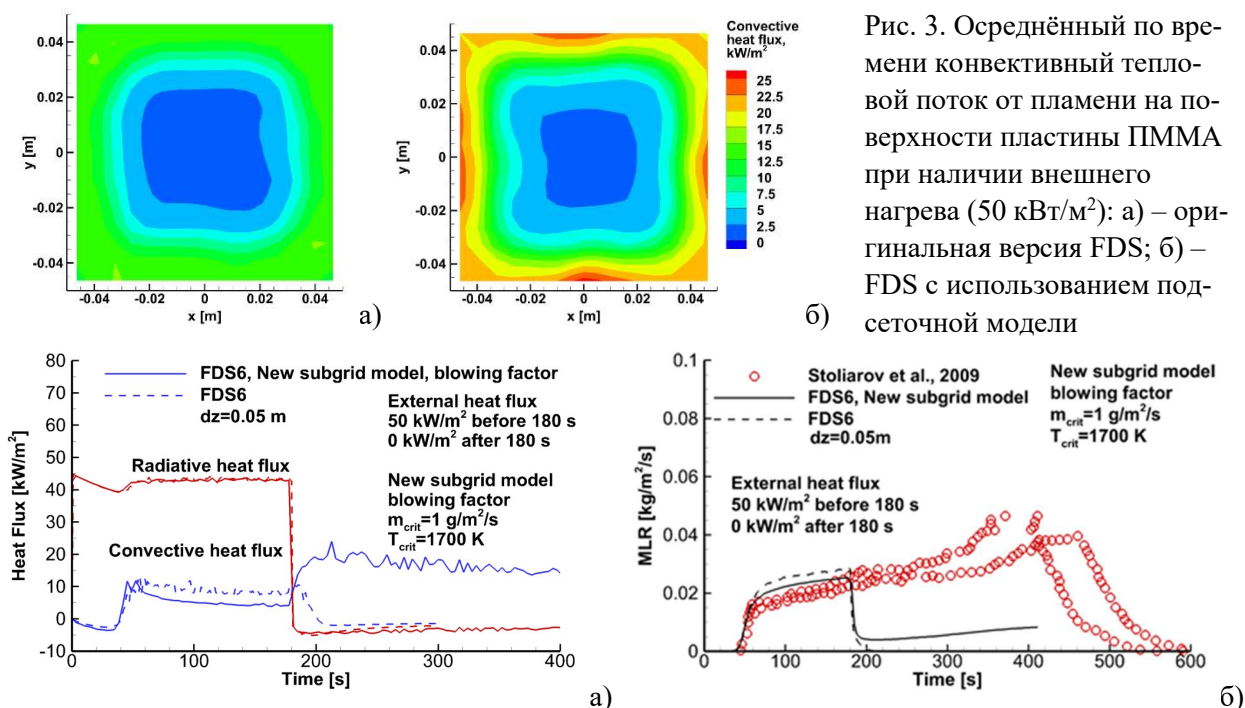


Рис. 3. Осреднённый по времени конвективный тепловой поток от пламени на поверхности пластины ПММА при наличии внешнего нагрева (50 кВт/м^2): а) – оригинальная версия FDS; б) – FDS с использованием подсеточной модели

Рис. 4. Расчетные зависимости тепловых (а) и скорости выгорания (б) при использовании подсеточной модели с учетом параметра ддува и стандартной версии FDS.

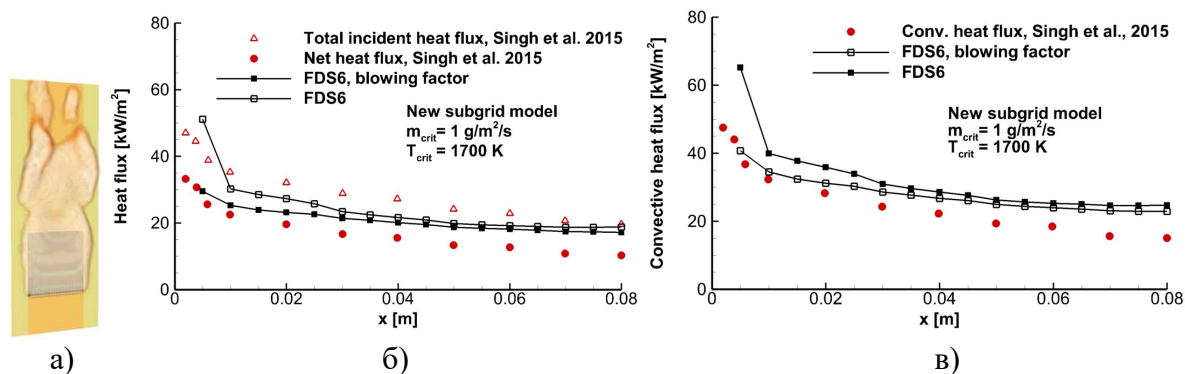


Рис. 5. Горение вертикальной пластины ПММА ($8 \text{ см} \times 8 \text{ см} \times 1.27 \text{ см}$): а) визуализация пламени мгновенной изоповерхностью мощности тепловыделения 200 кВт/м^2 ; б, в) – осреднённое по времени распределение суммарного (б) и конвективного (в) теплового потока вдоль вертикальной оси.

В четвёртой главе методика совместного моделирования термического разложения твёрдого горючего материала и горения летучих в турбулентном пламени применена для решения задачи о распространении пламени вверх по вертикальной поверхности. Приближённый анализ выполнен с помощью аналитической модели, использующей эмпирические

⁶ Singh A.V., Gollner M.J. A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames / A.V. Singh, M.J. Gollner // Combustion and Flame. – 2015. – Vol. 162. – № 5. – P. 2214-2230.

данные для высоты пламени, ступенчатое распределение теплового потока на поверхности слоя и аналитическое решение для температуры поверхности слоя. Ранее использовавшаяся формулировка модели⁷ приводит к решению, в соответствии с которым скорость распространения пламени достигает максимума, после чего снижается. Это противоречит экспериментальным данным для полностью газифицирующихся полимеров (ПММА)⁸ Указанное противоречие устранено в модифицированной модели, предложенной в данной работе. Для скорости распространения пламени и границы зоны пиролиза получено:

$$V_p = (x_* / \tau_{ign}) \left(t / (3\tau_{ign}) \right)^2 \quad \text{и} \quad x_p = x_* \left(t / (3\tau_{ign}) \right)^3, \quad \text{где} \quad x_* = C^3 \left(m'' f_c \Delta h_c / (\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}) \right)^2, \quad \tau_{ign} = \min(\tau_{ign}^{thick}, \tau_{ign}^{thin})$$

– время задержки воспламенения, которое определяется с помощью тепловой теории⁹ в пределах термически толстого и термически тонкого слоя.

Выполнено сравнение с результатами численного расчета воспламенения и горения вертикальной пластины термопластика. Согласно описанию эксперимента⁸, нижняя часть вертикальной пластины ПММА (ширина 0.58 м, высота 5 м, толщина 25 мм) воспламеняется внешним радиационным потоком от нагревателя-воспламенителя, после чего турбулентное пламя распространяется вертикально вверх и охватывает всю высоту пластины. В численных расчётах с использованием кинетической модели пиролиза в FDS показана возможность получить хорошее согласие расчётной и экспериментальной скорости распространения при условии надлежащего выбора условий воспламенения (Рис. 6). Максимальное значение суммарного теплового потока, полученное в расчётах, согласуется с результатами измерений.

В расчётах выявлены три режима распространения пламени, отличающиеся формой фронта пиролиза и зависящие от способа инициирования горения и условий на боковых гранях (Рис. 7). *Осевой* режим (Рис. 7, а) наблюдается в расчётах при наличии невысокого нагревателя малой мощности (высота менее 0.1 м, температура излучающей поверхности ниже 1000 °С), что приводит к неравномерному нагреву нижней части пластины горючего материала и к сужению зоны пиролиза в нижней части пластины. *Первый фронтальный* режим (Рис. 7, б) сопровождается формированием *выпуклого* фронта пиролиза при более равномерном и интенсивном нагреве нижней части пластины (высота нагревателя 0.1–0.3 м, ширина 1.2 м, температура излучающей поверхности более 1000 °С). *Второй фронталь-*

⁷ С См., например, Saito K. Upward Turbulent Flame Spread on Wood Under External Radiation / K. Saito, F.A. Williams, I.S. Wichman, J.G. Quintiere // Journal of Heat Transfer. – 1989. – Vol. 111. – № 2. – P. 438–445.

⁸ Wu P.K. Assessment of Material Flammability with the FSG Propagation Model and Laboratory Test Methods / P.K. Wu, L. Orloff, A. Tewarson // 13th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, NIST Report NISTIR 6030, Gaithersburg, MD, USA, 1996

⁹ $\tau_{ign}^{thick} = (\pi/4) \left(\lambda_s c_s \rho_s (T_{ign} - T_0)^2 / q_{net}'' \right)$ и $\tau_{ign}^{thin} = \delta c_s \rho_s (T_{ign} - T_0) / q_{net}'' - (1/\pi) \left(\delta^2 / (\lambda_s / (c_s \rho_s)) \right)$. В приведённых соотношениях λ_s , c_s , ρ_s – теплопроводность, теплоёмкость и плотность материала, δ – толщина слоя, ε – степень черноты поверхности, q_{inc}'' – суммарный (конвективный и радиационный) тепловой поток, падающий на поверхность (осреднённый по поверхности, охваченной пламенем). $q_{net}'' = q_{inc}'' - \varepsilon \sigma T_{ign}^4$ – результирующий тепловой поток, поступающий в слой.

ный режим с *вогнутой* (Рис. 7, в) формой фронта реализуется при наличии боковых вертикальных стенок, располагаемых по краям от пластины горючего материала, изменяющих условие бокового захвата воздуха.

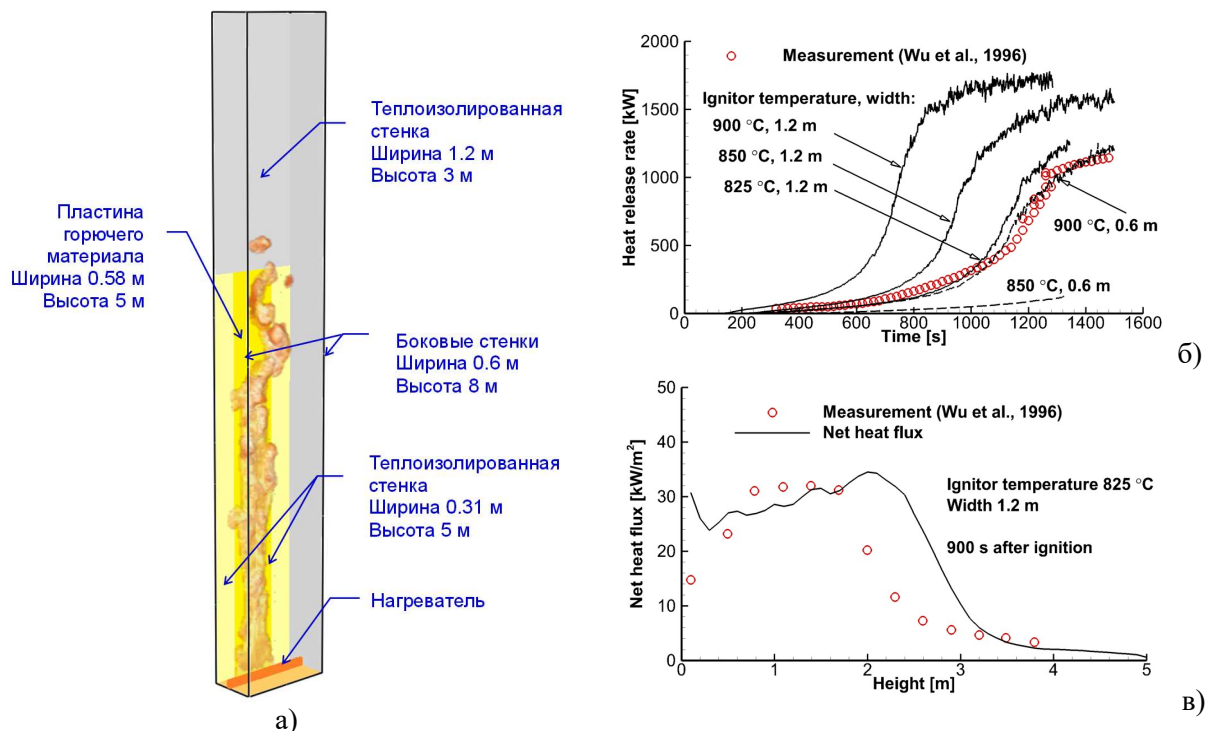


Рис. 6. Распространение турбулентного пламени вверх по поверхности ПММА: а) – расчётная область и мгновенная изоповерхность мощности тепловыделения 200 кВт/м^3 ; б) – зависимость мощности тепловыделения от времени; в) – распределение теплового потока по высоте пластины в момент времени 900 с (температура нагревателя 825 °C , ширина 1.2 м). Линии – расчёт, символы – измерения⁸

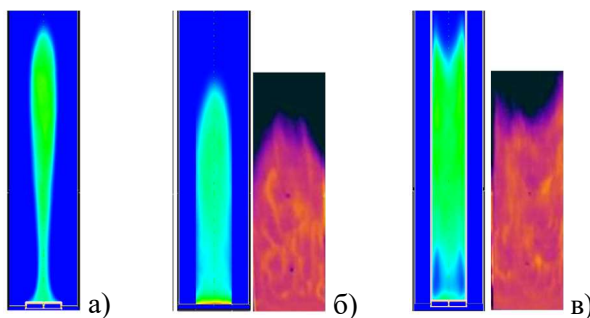


Рис. 7. Режимы распространения пламени по вертикальной поверхности горючего материала: а) – осевой; б) – первый фронтальный; в) – второй фронтальный. Показаны поля мгновенной скорости выгорания материала ($0\text{--}6 \text{ г/(м}^2\cdot\text{с)}$), а также (для фронтальных режимов) форма пламени, наблюдавшаяся в экспериментах¹⁰

Расчёты с использованием тепловой модели показали, что совместная калибровка двух основных модельных параметров (T_{ign} и m'') не позволяет полностью согласовать результаты численного расчёта с экспериментом. Причина рассогласования с экспериментальными данными и результатами кинетической модели заключается в неравномерности скорости выгорания в зоне пиролиза. Сравнение результатов расчетов с использованием тепловой и кинетической модели пиролиза позволило показать, что использование тепловой модели с постоянной скоростью выгорания допустимо для численного моделирования

¹⁰ Tsai K.C. Influence of sidewalls on width effects of upward flame spread / K.C. Tsai // Fire Safety Journal. – 2011. – Vol. 46. – № 5. – P. 294-304.

распространения пламени вверх по совокупности дискретных объектов, если их вертикальный размер не превышает 1 м. Это позволяет использовать тепловую модель при численном моделировании развития пожара в стеллажных хранилищах, где пожарная нагрузка представляет собой ящики из горючих материалов.

Пожары на высокостеллажных складах характеризуются очень быстрым развитием, трудно поддаются раннему обнаружению и тушению и приводят к значительному материальному ущербу. Благодаря большой концентрации горючих предметов, интенсивному массо- и теплообмену внутри стеллажа, мощность тепловыделения может достигнуть нескольких десятков мегаватт в течение короткого промежутка времени. Традиционный подход к численному моделированию динамики пожара в помещении заключается в раздельном рассмотрении газификации пожарной нагрузки и турбулентного горения в газовой фазе (проектный пожар). Действующие нормативные документы (NFPA 72, 92B, 204M и др) предусматривают задание квадратичной зависимости мощности тепловыделения от времени.

Результаты численного моделирования пожара в стеллажном хранилище приводятся в **Результаты численного моделирования пожара в стеллажном хранилище приводятся в пятой главе** диссертации, где рассмотрены два сценария пожара. С целью апробации расчётной методики и калибровки модельных параметров воспроизводятся результаты крупномасштабного эксперимента¹¹ для трехъярусного стеллажа с двумя рядами, содержащего $2 \times 4 \times 3 = 24$ коробки из гофрированного картона (Рис. 8). Каждая коробка имеет форму куба $1.07 \times 1.07 \times 1.07$ м, расстояние между коробками в горизонтальном направлении – 15 см, в вертикальном – 46 см. Нижний ряд коробок установлен на металлические подставки на высоте 13 см от пола.

Использование тепловой модели пиролиза обеспечивает адекватное воспроизведение динамики развития пожара на высокостеллажном складе, что подтверждается воспроизведением наблюдавшихся в эксперименте стадий пожара (Рис. 8) и согласием с экспериментальными данными для зависимости мощности тепловыделения от времени (Рис. 9). Выбор параметров для тепловой модели основывается на анализе литературных данных и результатов экспериментов.

Далее выполнено численное моделирование крупномасштабного сценария, в котором рассматривается развитие пожара в сегменте высокостеллажного склада с высотой перекрытия 20 м, включающем 3 стеллажа. В каждом горизонтальном сечении стеллажа расположено по 6 коробок в 2 ряда. Высота каждого стеллажа составляет 11 коробок, высота складирования – 15 м. Каждая коробка имеет размеры $0.8 \times 1.2 \times 1$ м, ширина пролётов между стеллажами 3.54 м. Рассмотрено три положения очага в центральном стеллаже (см. вставку на Рис. 10). Влияние положения очага оказывается наибольшим на начальных стадиях развития пожара. Далее в зависимости от положения очага реализуются различные сценарии развития пожара, характеризующиеся разной мощностью тепловыделения. Как показано на

¹¹ Numerical Simulation of Sprinkler Suppression of Rack Storage Fires / Wang Y., Meredith K. V., Zhou X. [et al.] // Fire Safety Science. – Proceedings of the Eleventh International Symposium, IAFSS. – 2014. – P. 1170–1193.

Рис. 10, мощность тепловыделения растёт значительно быстрее, чем по квадратичному закону. Это связано с развитой поверхностью горючего материала и эффектом дымовой трубы. Распространение пламени вверх по центральному стеллажу приводит к воспламенению соседних стеллажей за счет теплового излучения и последующему распространению пламени вниз по внутренней поверхности боковых стеллажей (Рис. 11). Полученные результаты предназначены для прогноза эффективности систем обнаружения и тушения пожаров.

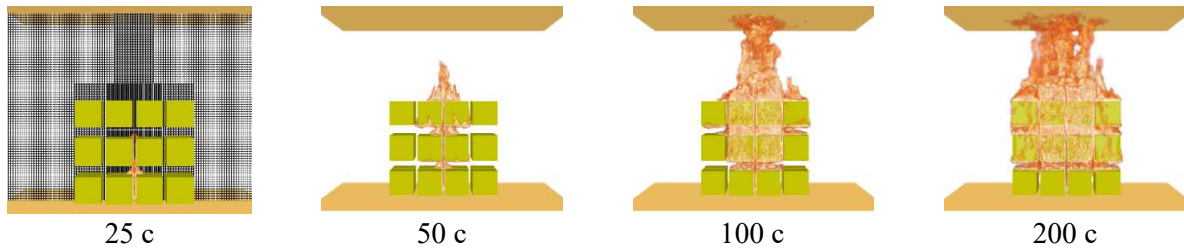


Рис. 8. Визуализация пламени (изоповерхность объемной мощности тепловыделения 200 кВт/м³) для стеллажа 2×4×3. На левой верхней картинке показана расчётная сетка в центральной плоскости

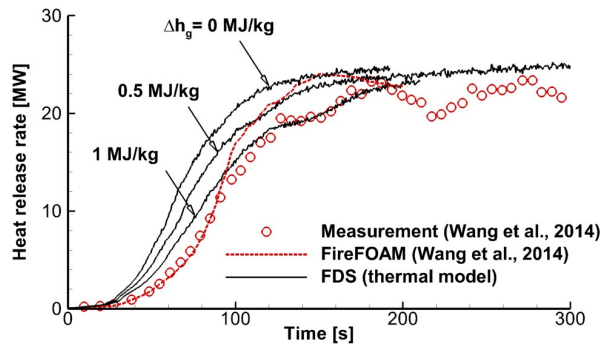


Рис. 9. Зависимость мощности тепловыделения от времени для сценария¹¹, показанного на Рис. 8

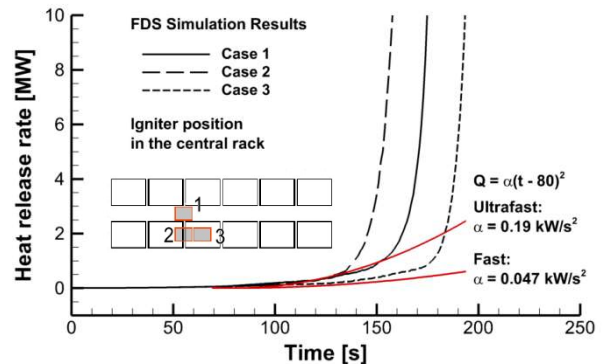


Рис. 10. Рост мощности тепловыделения для сценария, показанного на Рис. 9¹¹. Приведены нормативные кривые t^2 , соответствующие скорости роста “fast” и “ultra fast”¹².

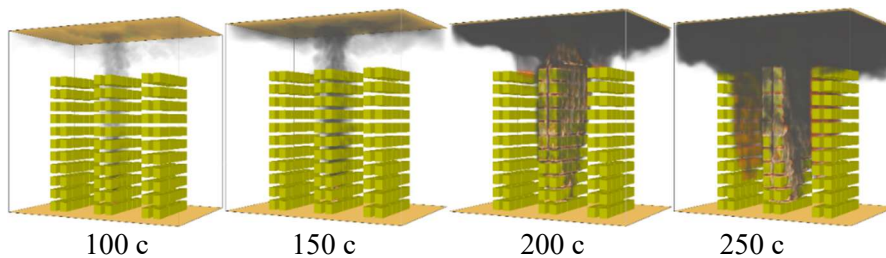


Рис. 11. Динамика развития пожара для сценария 1. Показана изоповерхность мощносты тепловыделения (200 кВт/м³) и концентрация доля сажи

В приложении П1 излагается приближённая (тепловая) теория воспламенения твёрдых горючих материалов. В приложении П2 обсуждается возможность определения скорости газификации конденсированных горючих с помощью числа теплопереноса. В приложении П3 и П4 приведены инструкции по запуску FDS и эффективности параллелизации расчетов с помощью FDS на СКЦ «Политехнический» (СПбПУ).

¹² NFPA 13. Standard for the Installation of Sprinkler Systems – 2010 – P. 101.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат работы заключается в создании и апробации расчётной методики для численного моделирования распространения пламени вверх по вертикальной поверхности твёрдых горючих материалов и её применении для прогнозирования развития крупномасштабного пожара. В основе методики лежит совместное моделирование термического разложения твёрдых горючих материалов и горения летучих в газофазном пламени в рамках единой сопряжённой задачи с учётом тесной взаимосвязи между этими процессами. Данная технология моделирования предназначена в качестве замены раздельному моделированию каждого из процессов, до сих пор широко используемому в инженерной практике.

В ходе работы решены следующие задачи и получены следующие результаты.

1. Выполнена всесторонняя апробация компонентов модели и расчётного кода FDS, задействованных в численном расчёте распространения турбулентного пламени по поверхности горючего материала. Продемонстрировано согласие результатов численного моделирования с имеющимися экспериментальными данными для распределений температуры и скорости в турбулентном диффузионном пламени, радиационных тепловых потоков, создаваемых пламенем, времени задержки воспламенения скорости выгорания термопластиков под действием внешнего теплового потока.

2. Выявлено неверное воспроизведение конвективного теплового потока на поверхности горючего материала в существующих версиях кода FDS. Существенная недооценка конвективного теплового потока на поверхности приводит к неверному прогнозу возможности самоподдерживающегося горения термопластика, противоречащему экспериментальным данным (а также препятствует расчёту распространения пламени навстречу газовому потоку). Показано, что это обусловлено невозможностью разрешения температурных градиентов вблизи поверхности на расчетных сетках, допустимых в инженерных расчётах.

3. Для устранения выявленного недостатка применена новая подсеточная модель (пристеночная функция) для расчёта конвективного теплового потока в условиях недостаточного сеточного разрешения температурных градиентов в пламени вблизи твердой поверхности. Показано, что данная аппроксимация конвективного теплового потока на поверхности позволяет получить хорошее согласие с экспериментальными данными для самоподдерживающегося горения пластины термопластика. Данная аппроксимация впервые внедрена в расчётный код FDS.

4. Сформулирована приближённая аналитическая модель для расчёта скорости распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности твёрдого горючего материала и выполнена её апробация в ходе сравнения с имеющимися результатами крупномасштабных экспериментов. Установлено, что ранее опубликованная аналогичная модель противоречит экспериментальным данным, в соответствии с которыми имеет место рост скорости распространения пламени с течением времени. Предложена модификация модели, которая позволяет получить зависимость скорости распространения пламени в соответствии с экспериментом.

5. В численных расчётах распространения турбулентного пламени вверх по вертикальной поверхности термопластика впервые выявлены три режима распространения пламени (осевой, первый и второй фронтальный), отличающиеся формой фронта пиролиза и зависящие от способа инициирования горения и условий на боковых гранях. Получено согласие расчётной и экспериментальной скорости распространения при надлежащем выборе условий воспламенения. Максимальное значение суммарного теплового потока, полученное в расчётах, согласуется с результатами измерений.

6. Сравнение результатов расчётов, выполненных с использованием тепловой модели пиролиза с экспериментальными данными и результатами кинетической модели, позволило установить область применимости тепловой модели пиролиза. Показано, что использование тепловой модели допустимо для численного моделирования распространения пламени вверх по совокупности дискретных объектов, если их вертикальный размер не превышает 1 м.

7. Методика совместного моделирования с использованием тепловой модели пиролиза пожарной нагрузки применена для прогноза развития пожара на высокостеллажном складе. Для полномасштабного экспериментального прототипа получено хорошее согласие расчётной и измеренной зависимости мощности тепловыделения от времени. Для высокостеллажного хранилища исследовано влияние положения очага возгорания и показано, что расчётная скорость роста мощности тепловыделения при пожаре данного типа существенно превышает скорость роста, определяемую по квадратичной зависимости от времени, заложенной в действующих нормативных документах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях Scopus, Web of Science, список ВАК:

1. **Markus E.** Application of a simplified pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load / **E. Markus**, A. Snegirev, E. Kuznetsov, L. Tanklevskiy // *Fire Safety Journal*. – 2019. – V. 108. – P. 102825.

2. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов / **Е.С. Маркус**, А.Ю. Снегирев, Е.А. Кузнецов [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2019. – Т. 28 № 4. – С. 29-41.

3. **Markus E.** Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities / **E. Markus**, A. Snegirev, E. Kuznetsov, L. Tanklevskiy // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2018. – Vol. 1107. – P. 042012.

4. **Маркус Е.С.** Естественнo-конвективное турбулентное диффузионное пламя у вертикальной поверхности / **Е.С. Маркус**, Е.А. Кузнецов, А.Ю. Снегирёв // *Физика горения и взрыва*. – 2018. – № 3 (54). – С. 36-46. Перевод на англ.: **Markus E.S.** Natural Buoyant Turbulent Diffusion Flame near a Vertical Surface / **E.S. Markus**, E.A. Kuznetsov, A.Yu. Snegirev // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2018. – Vol. 54. – № 3. – P. 284–293).

5. Snegirev A. On soot and radiation modeling in buoyant turbulent diffusion flames / A. Snegirev, **E. Markus**, E. Kuznetsov [et al.] // *Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 54, No 8. – P. 2275-2293.

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. – P. 74-83.

7. Snegirev A. The Effect of Soot Modeling on Thermal Radiation in Buoyant Turbulent Diffusion Flames / A. Snegirev, **E. Kokovina**¹³, A. Tsoy [et al.] // Journal of Physics: Conf. Series. – 2016. – Vol. 745. – P. 032028.

В других изданиях:

8. **Markus E.** Fire Growth in a High-rack Storage / **E. Markus**, A. Snegirev, E. Kuznetsov, L. Tanklevskiy // Proc. of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9), Eds: by Snegirev A., Liu N.A., Tamanini F., Bradley D., Chaumeix N. – St. Petersburg Polytechnic University Press, 2019. – P. 796-807.

9. **Маркус Е.С.** Распространение пламени по дискретной совокупности горючих объектов. Развитие пожара на высокостеллажном складе / **Е.С. Маркус**, А.Ю. Снегирёв, Е.А. Кузнецов [и др.] / Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 томах (22—26 октября 2018 г., Москва). Т. 1. — М.: Издательский дом МЭИ. — С. 425 - 428.

10. **Коковина**¹³ **Е.С.** Режимы распространения пламени по поверхности горючих материалов / **Е.С. Коковина**¹³, Е.А. Кузнецов, А.Ю. Снегирёв / Тезисы докладов Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А. И. Леонтьева (22-26 мая 2017 г., Санкт-Петербург): В 2х т. Т. 2. – М: Изд. дом МЭИ, 2017. – С. 31-32.

11. Кузнецов Е.А. Численное моделирование самоподдерживающегося горения термопластика: роль сеточного разрешения температурных градиентов у поверхности материала / Е.А. Кузнецов, **Е.С. Коковина**¹³, А.Ю. Снегирёв / Тезисы докладов Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А. И. Леонтьева (22-26 мая 2017 г., Санкт-Петербург): В 2х т. Т. 2. – М: Изд. дом МЭИ, 2017. – С. 35-36.

12. **Kokovina**¹³ **E.** Numerical simulation of flame spread over vertical and inclined combustible surfaces / **E. Kokovina**¹³, E. Kuznetsov, A. Snegirev // Proceedings of 9th International Seminar on Flame Structure – Novosibirsk, 2017. – P. 56

13. Snegirev A. Coupled simulations of turbulent flame and pyrolysis of combustible material / A. Snegirev, **E. Kokovina**¹³, A. Tsoy // Proceedings of the 7th European Combustion Meeting, March 30 – April 2, 2015, Budapest, Hungary. – P. 1-6.

14. Снегирёв А.Ю. Интеграция моделей турбулентного пламени и пиролиза горючего материала: горение термопластиков / А.Ю. Снегирёв, **Е.С. Коковина**¹³, А.С. Цой [и др.] // Труды XXXI Сибирского теплофизического семинара (17-19 ноября 2014 г., Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН). – Новосибирск, 2014. – С. 226-233.

¹³ Маркус Е.С.