

На правах рукописи



Цой Анна Сергеевна

**РЕЖИМЫ И МЕХАНИЗМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПЛАМЕНИ  
РАСПЫЛЁННОЙ ВОДОЙ**

Специальность 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2016

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 кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ

Официальные оппоненты: Емельянов Владислав Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург

Гавриков Андрей Игоревич, к. ф.-м. н., начальник лаборатории численного моделирования Института прикладной химической физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» (ФГБУ ВНИИПО) МЧС России, г. Балашиха, Московская область

---

Защита состоится 18 октября 2016 года в 16:00 часов на заседании Диссертационного совета Д 212.229.06 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь

Диссертационного совета Д 212.229.06



Талалов Виктор Алексеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Пожаротушение распылённой водой является самой распространённой технологией борьбы с пожарами. Системы водяного пожаротушения применяются в зданиях и сооружениях промышленного, административного и коммерческого назначения, на транспорте и в жилых домах. По мере экономического развития и ужесточения нормативных требований пожарной безопасности растут как количество уже установленных систем, так и объём производства новых. Развитие технологии пожаротушения распылённой водой идёт по нескольким направлениям, включая использование тонкораспылённой воды (ТРВ), создание специальных оросителей для работы в специфических условиях (внутристеллажные, для защиты кабельных каналов, для создания завес и др.), разработку новых алгоритмов активации оросителей. В то же время, остаётся нерешённым ряд проблем, требующих углублённого понимания режимов и физико-химических механизмов взаимодействия струй распылённой воды и пламени над очагом пожара. В самом деле, современная статистика пожаров на объектах с установленной системой пожаротушения показывает, что весьма малое количество возгораний (10-30% в зависимости от страны и года) подавляется единственным оросителем. В большинстве случаев срабатывает слишком много оросителей, в результате чего наносится значительный ущерб как вышедшим из-под контроля пожаром, так и большим количеством воды.

В связи с расширением применения тонкораспылённой воды в системах водяного пожаротушения требуется определить условия, в которых именно эта технология является предпочтительной. К настоящему времени установлено, что в ряде случаев применение ТРВ позволяет подавить очаг пожара быстрее и с меньшим количеством воды, чем использование традиционных спринклерных оросителей. Однако практическое применение систем пожаротушения на основе ТРВ часто встречает противоречивое отношение практиков к их эффективности и к оправданности дополнительных затрат на более сложную инфраструктуру. Причина противоречивых заключений заключается в недостатке информации о том, при каких условиях грубый или тонкий распыл воды даёт максимальные преимущества в конкретном сценарии пожара. В свою очередь, для выявления надлежащих условий применения систем пожаротушения необходимо понимание физических механизмов и внешних условий, определяющих реализацию того или иного режима взаимодействия очага пожара, пламени и восходящего потока горячего газа со струёй распылённой воды. Несмотря на то, что указанные режимы и механизмы уже известны, их особенности в условиях конкретных сценариев, а также разделяющие их критические условия требуют тщательного изучения.

К настоящему времени остаются нерешёнными следующие проблемы. Во-первых, недостаточен опыт количественной апробации (validation) моделей и расчётных кодов, применяемых для прогнозирования пожаротушения распылённой водой. В результате оказывается, что требования по применению моделей и кодов недостаточно определены, а уровень ожидаемых ошибок неизвестен. В то же время, в последние годы были выполнены новые эксперименты, которые можно использовать для апробации моделей и кодов.

Как показано в данной работе, сравнение результатов расчётов и экспериментов позволяет отработать методику моделирования и показывает необходимость усовершенствования важных компонентов модели. Во-вторых, необходимо показать, как реализация разных режимов взаимодействия струи и пламени (восходящего факела) влияет на эффективность подавления пламени в практически важных сценариях. Необходимость решения этих проблем обуславливает актуальность данной работы.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования, направленные на повышение эффективности систем водяного пожаротушения, включая разработку моделей и расчётных кодов, выполняются в последние десятилетия в ВНИИПО (Россия), FM Global (США), NIST (США), VTT (Финляндия), SINTEF (Норвегия) и ряде других организаций. Однако, несмотря на интенсивность исследований, модели и расчётные коды, применяющиеся в настоящее время для моделирования пожаротушения распылённой водой, недостаточно апробированы и требуют проверки путём сравнения с новыми экспериментальными данными. Важные компоненты существующих моделей (модель локального погасания фрагментов турбулентного пламени) не в полной мере отражают физику взаимодействия струи и пламени и должны быть модифицированы. Из-за отсутствия информации об оптимальных режимах работы систем пожаротушения тонкораспылённой водой, возможны неверные заключения об их эффективности.

**Цели данной работы** заключаются в совершенствовании методики численного моделирования пожаротушения распылённой водой; выявлении режимов взаимодействия струи и пламени (восходящего факела) в практически важных сценариях пожаротушения; определении влияния характеристик систем водяного пожаротушения, в первую очередь – дисперсности распыла, на эффективность подавления пламени. Указанные цели достигаются решением следующих **задач**:

1. Апробация модели и кода FDS путём сравнения с экспериментальными данными для газочапельных струй распылённой воды, естественно-конвективного диффузионного горения и подавления турбулентного пламени струёй распылённой воды. Анализ чувствительности результатов расчёта к используемым компонентам модели, особенностям численных алгоритмов, модельным и вычислительным параметрам (расчётным сеткам и количеству вычислительных частиц).
2. Разработка новой подсеточной модели погасания фрагментов турбулентного пламени и её внедрение в существующий код.
3. Идентификация и анализ режимов взаимодействия газочапельной струи и турбулентного диффузионного пламени (для стационарного и растущего очага пожара), определение критических условий, разделяющих режимы. Анализ влияния начальной дисперсности распыла на эффективность подавления пламени.
4. Анализ влияния параметров водяной завесы на динамику подавления опасных факторов пожара в защищаемом помещении.
5. Оценка эффективности системы пожаротушения при использовании нового алгоритма групповой принудительной активации оросителей.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Получены новые результаты апробации модели и расчётного кода FDS путём сравнения с экспериментальными данными для турбулентных струй распылённой воды, турбулентных естественно-конвективных пламён, и для подавления турбулентного естественно-конвективных пламён струями распылённой воды.
2. Обоснована необходимость численного разрешения крупномасштабных вихревых структур в турбулентных газокапельных струях для воспроизведения экспериментальных распределений скоростей и расходов жидкости в струе.
3. Исследовано влияние перепада давления в распылителе на структуру струи тонкораспылённой воды и показано, что увеличение перепада давления приводит к сильному увеличению скорости потока при слабом увеличении скорости испарения и концентрации пара.
4. Разработана новая подсеточная модель локального погасания фрагментов турбулентного пламени, учитывающая конечную скорость реакции окисления горючего и деформацию поля скорости газа.
5. Выявлено влияние водяной завесы на интенсивность газообмена через дверные проёмы помещений. Показано, что вызванное завесой ослабление газообмена через проём приводит к увеличению концентрации продуктов сгорания в защищаемом помещении.
6. Исследована эффективность принудительной групповой активации оросителей в условиях растущего очага пожара. Показано, что рост размеров и мощности очага приводит к реализации гравитационного режима, в котором уменьшение размера капель препятствует подавлению пламени. Установлено, что в случае тепловой активации мелкие и крупные фракции полидисперсной струи могут взаимодействовать с восходящим факелом в разных режимах (импульсном и гравитационном соответственно).

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость работы заключается в выявлении и усовершенствовании компонентов модели, определяющих достоверность прогноза пожаротушения распылённой водой, а также в демонстрации роли дисперсности распыла в зависимости от режима взаимодействия струи распылённой воды и восходящего факела. Практическая значимость работы определяется тем, что её результаты предназначены для повышения достоверности численного прогноза динамики пожаротушения распылённой водой на стадии проектирования и согласования проекта в органах государственного надзора. Результаты также могут быть использованы при выполнении моделирования в ходе экспертизы произошедших пожаров. Автором данной работы было выполнено численное моделирование динамики опасных факторов пожара и блокирования путей эвакуации при пожарах в производственных помещениях, в терминале аэропорта Пулково, вычислительном центре университета и других объектах. Результаты данной работы применяются в группе компаний «Гефест» (Санкт-Петербург), специализирующейся на разработке и внедрении инновационных технологий противопожарной защиты.

**Методология и методы исследования.** В диссертации использованы теоретические методы анализа и методы численного моделирования двухфазных, многокомпонентных реагирующих турбулентных течений и теплового излучения. Достоверность результатов теоретического анализа и численного моделирования подтверждается сравнением с опубликованными экспериментальными данными. В расчётах использованы полевые модели и расчётные коды открытого доступа, модифицированные с учётом целей данной работы. Расчёты выполнялись использованием вычислительных ресурсов СПбПУ и программы «Университетский кластер».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Идентификация режимов подавления пламени в практически важных сценариях и анализ влияния дисперсности распыла на эффективность пожаротушения.
2. Результаты анализа погрешностей прогнозирования турбулентных струй распылённой воды и их зависимость от используемых компонентов модели и численных алгоритмов.
3. Влияние перепада давления в оросителе на структуру струи тонкораспылённой воды.
4. Подсеточная модель локального погасания фрагментов турбулентного пламени, учитывающая конечную скорость реакции окисления горючего и деформацию поля скорости газа.
5. Влияние водяной завесы в проёме смежных помещений на вертикальную стратификацию температуры и концентраций, интенсивность газообмена через внешний проём и изменение опасных факторов пожара в помещении.
6. Сравнение эффективностей принудительной групповой активации оросителей и традиционной тепловой активации в условиях растущего очага пожара, прогноз влияния высоты помещения, расхода воды, дисперсности распыла, бокового ветра на динамику подавления пожара.

**Личный вклад автора.** Участие в разработке и обосновании модели локального погасания (совместно с научным руководителем), освоение, применение и модификация существующих моделей и программного обеспечения, разработка методики вычислений, выполнение всех численных расчётов, анализ чувствительности и определение требований к расчётным сеткам и числу вычислительных частиц, анализ и интерпретация результатов, сравнение с экспериментальными данными, написание статей (совместно с соавторами), личные доклады на профильных научных конференциях и семинарах.

**Апробация результатов.** Результаты работы представлены и обсуждались на: заседании Научного Совета РАН по горению и взрыву (Санкт-Петербург, 20.05.2015), заседании Национальной академии наук пожарной безопасности (Балашиха, ВНИИПО, 16.04.2014); 35-ом Международном симпозиуме по горению (США, 2014); 10-м Международном симпозиуме по опасностям и предотвращению взрывов в промышленности ISHPMIE-X (Норвегия, 2014); 10-й Международной научно-практической конференции «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам»

(Санкт-Петербург, 2014); 13-й Международной конференции INTERFLAM (Великобритания, 2013); 7-м Международном семинаре по опасностям пожаров и взрывов (США, 2013); 3-й Международной конференции «Облачные вычисления. Образование. Исследования. Разработка» (Москва, 2012); 8-й международной научно-практической конференции «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам» (Санкт-Петербург, 2012); Международном Симпозиуме по вычислительному теплообмену (Великобритания, 2012); 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму» (Санкт-Петербург, 2012); 5-й Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-5 (Москва, 2010).

Основные результаты опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 4 из списка ВАК и 2 из базы данных SCOPUS.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, содержащего 134 наименования, и 3 приложений. Диссертация изложена на 177 страницах, содержит 94 рисунка и 4 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его основные цели и задачи, научная новизна, практическое значение работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведён литературный обзор, состоящий из семи разделов, и охватывающий теоретические, экспериментальные и численные исследования взаимодействия пламени над очагом пожара и струи распылённой воды. Современное понимание режимов и механизмов взаимодействия струи распылённой воды с пламенем заключается в следующем. Известно, что воздействие струи на пламя определяется тепловым, разбавляющим и динамическим механизмами. Все три механизма реализуются одновременно, однако их вклад различен для разных типов и сценариев пожаров. То, какой механизм подавления пламени будет преобладать, зависит не только от класса пожара и тепловой мощности очага, но и от дисперсности распыла жидкости, взаимного расположения очага и сопла-распылителя и других факторов.

К настоящему времени установлено, что существуют два качественно разных режима взаимодействия струи и пламени: гравитационный и импульсный. В *гравитационном* режиме восходящий газовый факел незначительно изменяется из-за встречного движения капель, в то время как капли оседают под действием силы тяжести. В этом режиме проникающая способность струи определяется характерным диаметром капель: чем крупнее распыл, тем большая доля воды, истекающей из оросителя, достигает поверхности очага. В *импульсном* режиме вес капель недостаточен, чтобы преодолеть сопротивление восходящего потока продуктов сгорания. Проникающая способность струи и общая масса капель воды, отклоняемой восходящим потоком, определяется соотношением импульсов газокapельной струи и восходящего газового потока. Существует критическое значение

указанного отношения, ниже которого струя не достигает поверхности очага, и подавление пламени не происходит. Если же критическое значение превышено, то газокапельная струя подавляет пламя. В импульсном режиме со сверхкритическим значением импульса более тонкий распыл способствует более быстрому подавлению пламени и требует меньшего расхода воды. Приведённые результаты проиллюстрированы в тексте диссертации примерами из экспериментальных работ, выполненных в FM Global (США), ВНИИПО (Россия) и других исследовательских организациях.

Принципиально важный вывод из приведённых результатов заключается в том, что понимание того, какой именно режим реализуется, позволяет ответить на вопросы, насколько эффективным является применение тонкораспылённой воды и как ускорить подавление пламени и уменьшить расход воды.

Обзор литературы показывает, что нет общепринятого, физически обоснованного, определения *тонкого* распыла воды. Существующие формальные определения на основе характерного диаметра капель являются неполными, поскольку, во-первых, не учитывают вид распределения капель по размерам и, во-вторых, не отражают особенностей структуры и динамики струи. В то же время, структура и динамика турбулентной газокапельной струи зависит от характерной длины пробега (торможения) капель до потери скорости. Физически обоснованное определение ТРВ должно опираться на безразмерные критерии, такие как число Стокса, определяемое как отношение характерной длины пробега капель к характерному пространственному масштабу (например, расстояние от оросителя до очага). Данный вывод подтверждается более ранними расчётами с помощью модели Fire3D.

Необходимость оптимизации режима подавления пожара приводит к вопросу об оптимальном диаметре капель, образующихся при распыле. В обзоре анализируются разные подходы к определению оптимального диаметра капель в зависимости от того, что понимается под эффективностью подавления пожара.

Обзор предыдущих исследований показывает, что принципиальная возможность значительного повышения эффективности подавления пламени за счёт более тонкого распыла воды хорошо известна и многократно наблюдалась в экспериментах. Это послужило обоснованием для развития новой (по сравнению с традиционными спринклерными оросителями) технологии пожаротушения тонкораспылённой водой (ТРВ). В рамках данной технологии используются специальные оросители с малым диаметром сопел (доли миллиметра), а системы пожаротушения на основе ТРВ выдвигают высокие требования к чистоте воды и рабочему давлению, не характерные для традиционных систем. Важно подчеркнуть, что заключения об эффективности систем пожаротушения на основе ТРВ оказываются крайне противоречивыми.

Причиной противоречивых заключений является недостаток информации о том, при каких условиях грубый или тонкий распыл воды даёт максимальные преимущества в конкретном сценарии пожара. Требуется понимание того, какой именно (гравитационный или импульсный) режим взаимодействия струи распылённой воды и создаваемого пламенем восходящего потока горячих продуктов сгорания доминирует для данного сценария

пожаротушения. Несмотря на то, что о существовании качественно разных режимов указанного взаимодействия уже известно, идентификация режимов в конкретных сценариях пожаротушения, как правило, не выполняется.

Далее в обзоре анализируются существующие программные средства, которые используются для численного моделирования динамики пожара и пожаротушения. Выделяются три вида программного обеспечения (универсальные коммерческие коды, специализированные открытые (в первую очередь FDS и FireFOAM) и коммерческие коды, а также коды собственной разработки) и анализируется накопленный опыт численного моделирования подавления пламени распылённой водой. При этом отдельно рассматриваются модели на основе осреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу (RANS) и модели на основе метода крупных вихрей (LES). Показано, что применение метода RANS, даже в его нестационарной модификации (URANS), не позволяет адекватно воспроизводить существенно нестационарный процесс подавления пламени, динамика которого обусловлена крупномасштабными структурами течения. Этим обусловлен переход к моделированию подавления пламени с помощью метода крупных вихрей (LES), состоявшийся в последнее десятилетие.

Общие выводы из обзора литературы заключаются в следующем:

1. К настоящему времени механизмы, управляющие взаимодействием пламени и струй распылённой воды в конкретных условиях эксплуатации систем пожаротушения на основе распылённой воды, недостаточно изучены. Это препятствует достоверному прогнозированию эффективности указанных систем. Требуется специальное численное исследование указанных механизмов с помощью метода крупных вихрей. Необходимо выявить основные требования к методике выполнения расчётов, которые снижают ошибку численного прогноза. Сравнение численного прогноза с помощью разных версий моделей и расчётных кодов позволяет выявить роль отдельных компонентов модели и применяемых численных методов.

2. Необходимо специальное численное исследование для определения ожидаемой эффективности систем пожаротушения на основе распылённой воды с учётом практически важных областей применения (водяные завесы) и новых методов активации оросителей.

Во **второй главе** описывается математическая модель, применяемая для анализа режимов и механизмов подавления пламени. В работе использованы специализированная модель и расчётный код открытого доступа FDS (Fire Dynamics Simulator). Основные компоненты модели включают: средства расчёта турбулентного течения многокомпонентной газовой реагирующей смеси; модель переноса теплового излучения; модель горения; модель истечения, атомизации, движения, нагрева и испарения огнетушащей жидкости; модель газификации пожарной нагрузки; модель локального погасания фрагментов турбулентного пламени; модель для учёта влияния орошения на скорость газификации пожарной нагрузки. Для расчёта трёхмерных турбулентных течений, возникающих при горении и распространении дыма, в FDS численно решается система уравнений Навье-

Стокса, записанная в существенно дозвуковом приближении. Для моделирования турбулентности применяется метод крупных вихрей (LES) с использованием статической модели Смагоринского или модели Дидорфа. При моделировании горения рассматривается глобальная необратимая одностадийная реакция окисления горючего, в которой помимо конечных продуктов окисления ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) образуется моноксид углерода (CO) и сажа (C). Выход CO и C при сгорании 1 кг горючего задаётся с учётом имеющихся экспериментальных данных. Мощность тепловыделения определяется подсеточным временем смешения компонентов. Модель переноса теплового излучения включает численное решение уравнения радиационного переноса методом контрольных объёмов. Для смеси продуктов сгорания используется эффективный коэффициент поглощения, вычисляемый с учётом учёта спектральных свойств газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) и сажи. Учитывается эмиссия и поглощение излучения продуктами сгорания, а также поглощение и рассеяние излучения полидисперсным коллективом сферических капель воды. Для моделирования турбулентной испаряющейся газочапельной струи используется дискретно-траекторный подход. Применяется классическая модель нагрева и испарения сферических капель. Атомизация жидкости моделируется комбинированным начальным распределением капель по диаметрам (логнормальное и распределение Розина-Раммлера). Давление воды в оросителе, направление струи и форма конуса, а также К-фактор сопла-распылителя задаются пользователем. Начальный объёмный медианный диаметр капель ( $d_{v50}$ ) либо задаётся пользователем вместе с дисперсией распределения капель по диаметрам, либо вычисляется, как показано ниже.

Начальная скорость вылета капель  $V_0$ , начальный медианный диаметр полидисперсного распыла  $d_{v50}$ , расход воды определяются перепадом давления  $\Delta P$  в оросителе и диаметром отверстия  $D_0$ , из которого происходит истечение, с помощью следующих соотношений:

$$F_w = K\sqrt{\Delta P}, \quad V_0 = F_w / (\pi D_0^2 / 4), \quad d_{v50} / D_0 = CWe^{-1/3}, \quad (1)$$

где  $K = \xi(\pi D_0^2 / 4)\sqrt{2/\rho_w}$  – К-фактор оросителя,  $We = \rho_w V_0^2 D_0 / \sigma_w$  – число Вебера,  $C$  – эмпирическая константа, соответствующая данному распылителю. Изменение перепада давления в оросителе приводит к синхронному изменению параметров распыла так, что

$$F_w \sim D_0^2 \Delta P^{1/2}, \quad V_0 \sim \Delta P^{1/2}, \quad d_{v50} \sim D_0^{2/3} \Delta P^{-1/3}. \quad (2)$$

Погасание газового пламени из-за охлаждения и разбавления водяным паром моделируется с использованием концепции критической температуры погасания. Кроме того, с помощью эмпирической зависимости<sup>1</sup>

<sup>1</sup> В равенстве (3)  $\dot{m}_{\text{fuel},0}''(t)$ , кг/(м<sup>2</sup>·с) – скорость выгорания при отсутствии орошения;  $m_w''(t)$ , кг/м<sup>2</sup> – масса воды, полученная единицей площади поверхности к моменту времени  $t$ ;  $e_w$ , (м<sup>2</sup>/кг)/с – эмпирический коэффициент, характеризующий чувствительность скорости газификации материала к увлажнению.

$$\dot{m}_{\text{fuel}}''(t) = \dot{m}_{\text{fuel},0}''(t) \exp\left(-e_w \int m_w''(t) dt\right), \quad (3)$$

учитывается возможное подавление выхода летучих продуктов пиролиза пожарной нагрузки при смачивании поверхности очага.

**Третья глава** посвящена отработке методики моделирования и апробации моделей и кодов, далее используемых для решения практических задач. Оценка достоверности результатов расчётов выполнена путём сравнения с ранее опубликованными измерениями и новыми данными экспериментов, опубликованными в последние годы. При этом рассмотрены три класса задач: 1) турбулентная струя распылённой воды в открытом пространстве; 2) турбулентное естественно-конвективное пламя в открытом пространстве; 3) подавление турбулентного естественно-конвективного пламени струёй распылённой воды.

Расчёты турбулентной струи распылённой воды в открытом пространстве выполнены для условий экспериментов из работ Ditch и Yu (2008)<sup>2</sup> и Santangelo (2010)<sup>3</sup>, в которых используются аналогичные оросители, но с разным диаметром отверстия. В первом случае рассматривается струя при перепаде давления  $\Delta P = 20.68$  бар, во втором – при  $\Delta P = 60, 70$  и  $80$  бар. В расчётах использованы две версии FDS 5.5 и 6. Основные отличия гидродинамических решателей двух рассматриваемых версий заключаются в разных методах обеспечения ограниченности и монотонности численного решения и разных подсеточных моделях турбулентности. Основные отличия в моделировании дисперсной фазы заключаются в том, что в версии 6 дополнительно учитываются следующие факторы: снижение коэффициента сопротивления капли в плотных струях, влияние подсеточной турбулентности на движение (дисперсию) капель, повышенная вероятность вылета капель в направлениях, близких к оси струи.

Сравнение результатов расчётов, полученных с помощью разных версий модели и кода, с данными измерений (см. Рис. 1) позволило установить, что использовании метода крупных вихрей ключевую роль для получения качественного решения играет способность решателя воспроизводить крупномасштабные пульсации скорости газа в струе. При недостаточной точности аппроксимации уравнений переноса импульса и концентраций (в первую очередь это относится к конвективным слагаемым) крупные вихри не воспроизводятся в расчёте, а распад струи затягивается. В результате расчёт предсказывает нефизичную фокусировку потока вблизи оси. В то же время, применение метода TVD при аппроксимации конвективных членов и учёт подсеточной турбулентной дисперсии капель существенно улучшают качество численного решения, что имеет принципиальное значение для прогноза воздействия струи на пламя.

Ещё один важный вывод заключается в том, что при увеличении перепада давления скорость газа увеличивается в значительно большей степени, чем концентрация пара.

<sup>2</sup> Ditch, B., Yu, H.Z., Water Mist Spray Characterization and Its Proper Application for Numerical Simulations. Fire Safety Science. – 2008. – Vol. 9. – pp. 541-552.

<sup>3</sup> Santangelo P.E., Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion // Exp. Thermal and Fluid Science. – 2010. – Vol. 34. – P. 1353–1366.

Это указывает на то, что увеличение давления воды в системах пожаротушения тонкораспылённой водой приводит к увеличению относительной роли деформации поля скорости в погашении фрагментов турбулентного пламени (по сравнению с разбавлением паром и охлаждением).

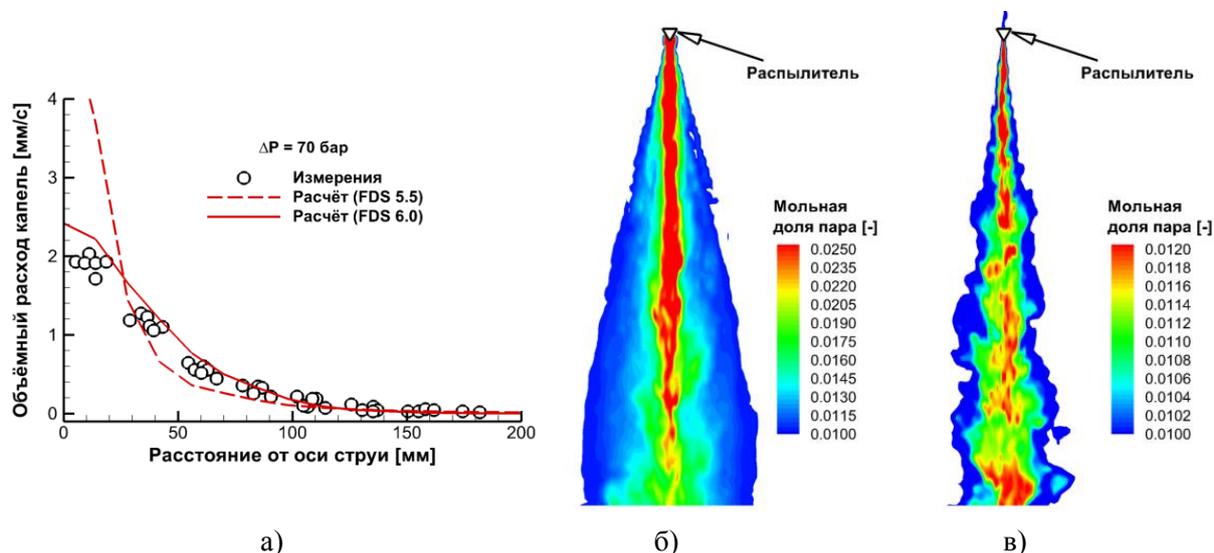


Рис. 1. Истечение газокapельной струи,  $\Delta P = 70$  бар, расход воды 1.6 л/мин,  $d_{v50} = 90$  мкм: а) – радиальное распределение удельного объёмного расхода жидкой фазы через сечение, удалённое от сопла на 1 м; б, в) – мгновенные поля объёмной доли водяного пара, полученные с помощью FDS 5.5 (б) и FDS 6.0 (в)

Во втором разделе третьей главы представлены результаты моделирования естественно-конвективных диффузионных пламён в широком диапазоне тепловых мощностей (от 15-37 кВт до 2500 кВт), без воздействия струи распылённой воды. Показано, что имеет место удовлетворительное согласие численных прогнозов и экспериментальных данных для вертикального распределения средних температуры и скорости, а также для радиационных тепловых потоков.

В третьем разделе третьей главы исследованы режимы и механизмы подавления пламени струями распылённой воды для двух сценариев, существенно отличающихся пространственными масштабами, мощностями очага и характеристиками газокapельных струй. Для пламени малой мощности<sup>4</sup> (15 кВт) установлено, что модель и расчётный код качественно верно воспроизводят смену режимов взаимодействия газокapельной струи и восходящего факела при изменении дисперсности распыла (см. Рис. 2). При этом получено удовлетворительное согласие для количественных характеристик распыла, соответствующих границе между режимами.

Из равенства равновесной скорости осаждения капли и скорости восходящего потока продуктов сгорания, в данной работе получено *критическое условие*, разделяющее гравитационный и импульсный режимы взаимодействия газокapельной струи и пламени. Для характерного начального диаметра распыла критическое условие принимает вид

<sup>4</sup> Schwille J.A., Lueptow R.M. The reaction of a fire plume to a droplet spray // Fire Safety Journal. – 2006. – Vol. 41, No 5. – P. 390-398.

$$d_{cr} = \sqrt{18C\dot{Q}^{1/5}(v/g)(\rho/\rho_w)f(Re_d)}, \quad (4)$$

где  $C \approx 2 \text{ (м/с)/кВт}^{1/5}$ ,  $f(Re_d) = C_D Re_d/24$ ,  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления капли, тепловая мощность пламени  $\dot{Q}$  выражена в кВт. При выполнении условия  $d_{v50} < d_{cr}$  подавление пламени протекает в импульсном режиме, и если импульс струи превосходит импульс продуктов сгорания, то использование более тонкого распыла приведёт к ускорению подавления пламени. Это подтверждается численным расчётом.

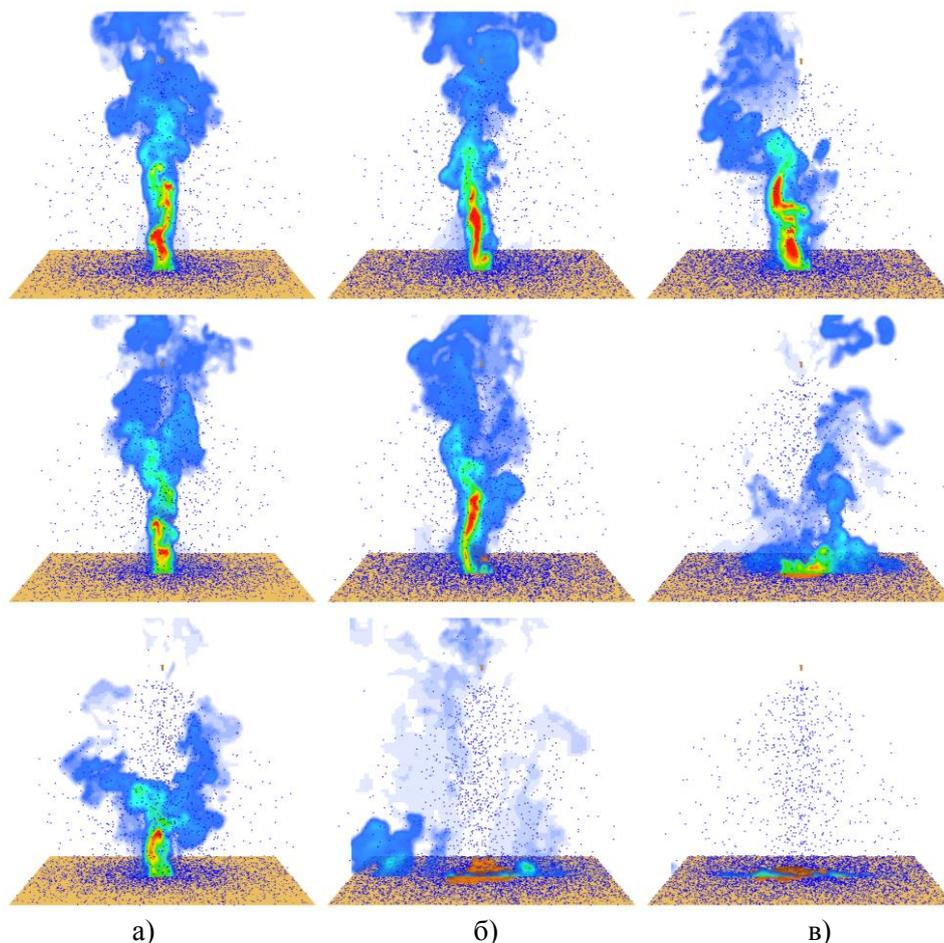


Рис. 2. Влияние начального диаметра капель на подавление пламени мощностью 15 кВт, диаметр горелки 0.18 м. Расход воды 7.57 л/мин. Начальный размер капель, сверху вниз:  $d_{v50} = 1.2, 0.9$  и 0.6 мм (критический диаметр  $d_{cr} = 0.76$  мм). Время после активации: а) – 4 с, б) – 8 с, в) – 30 с. Показаны мгновенные поля температуры в осевой плоскости и положения вычислительных капель

Для пламени большой мощности<sup>5</sup> (2500 кВт, см. Рис. 3) в расчётах получено согласие не только с наблюдавшимися в экспериментах результатами воздействия струи на пламя (подавление пламени или продолжение горения), но и с измеренными промежутками времени между активацией оросителя и подавлением пламени.

Однако результаты расчёта показали, что даже при полном подавлении пламени струей, модель и код не предсказывает прекращения тепловыделения в ходе окисления

<sup>5</sup> Blanchat T.K., Nichols R.T., Figueroa V.G. Benchmark Enclosure Fire Suppression. Experiments. – Phase 1 Test Report. Sandia Report SAND 2007-3220, – 2007. – P. 59.

горючего. Детальное исследование причин столь важного дефекта модели позволило установить, что модель локального погасания на основе критической температуры пламени непригодна при больших градиентах скорости, имеющих место при воздействии высокоскоростной струи на пламя.

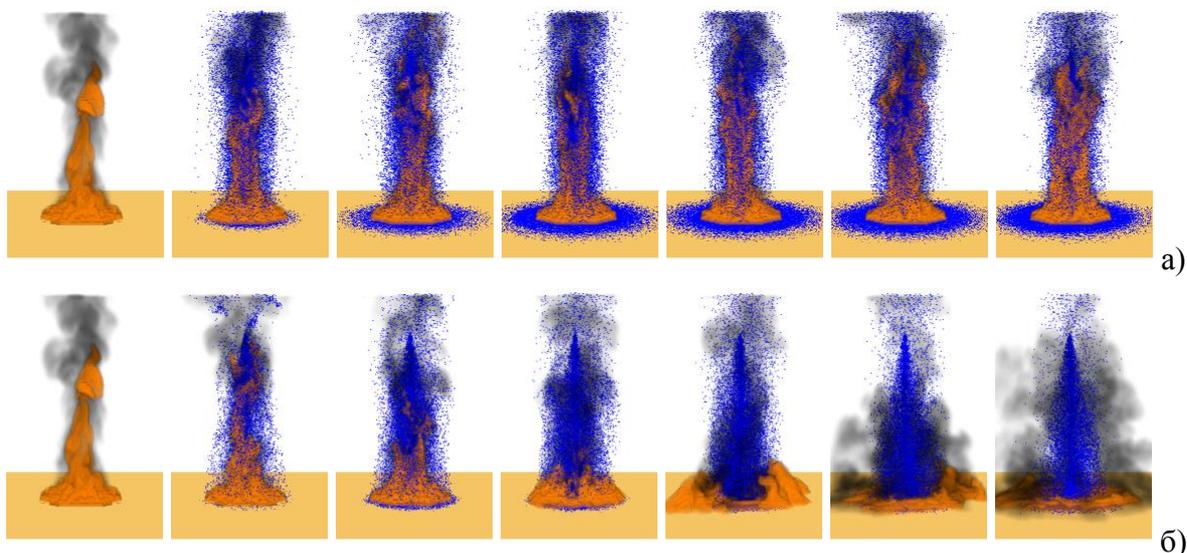


Рис. 3. Воздействие вертикальной струи распылённой воды на пламя (диаметр очага 2 м, тепловая мощность 2500 кВт): а) –  $\Delta P = 1.72$  бар,  $d_{v50} = 1.05$  мм. Временной шаг 4с; б) –  $\Delta P = 6.89$  бар,  $d_{v50} = 0.66$  мм. Временной шаг 0.06. Левый кадр соответствует началу подачи воды. Критический диаметр  $d_{cr} = 1.9$  мм. Показаны изоповерхности мощности тепловыделения  $200 \text{ кВт/м}^3$ , распределения концентрации дыма и положения вычислительных капель

Выявленная проблема модели локального погасания решается в **четвертой главе**, в которой разработана новая подсеточная модель локального погасания фрагментов турбулентного пламени. Модель опирается на теорию реактора идеального перемешивания, которая применяется для приближённого описания зоны реакции диффузионного пламени, не разрешаемой на сетке. Модель позволяет учесть конечную скорость химической реакции окисления горючего с помощью глобальной одностадийной необратимой реакции. Предложенный подход состоит в том, что определяемое аналитически критическое (соответствующее погасанию) время пребывания реагентов в зоне реакции фрагмента пламени, сравнивается с подсеточным временем перемешивания компонентов, которое обратно пропорционально разрешённому на сетке градиенту поля скорости. Тем самым оценивается, достаточно ли фактическое время пребывания реагентов в зоне реакции (зависит от градиента скорости) для существования стационарного фрагмента пламени. Если данное условие не выполняется, принимается решение о погасании пламени в данной ячейке сетки.

Данный подход впервые внедрён в расчётный код FDS, что (в отличие от ранее использовавшейся модели погасания) позволило качественно верно воспроизвести влияние расхода воды в струе на снижение тепловой мощности пламени (Рис. 4).

В работе также предложен алгоритм для калибровки кинетических параметров глобальной реакции, используемой в данной модели. При этом на примере горения метана

и гептана показано, что данная модель может также использоваться для теоретического расчёта минимальных гасящих концентраций инертных газов (подробнее см. в [2]).

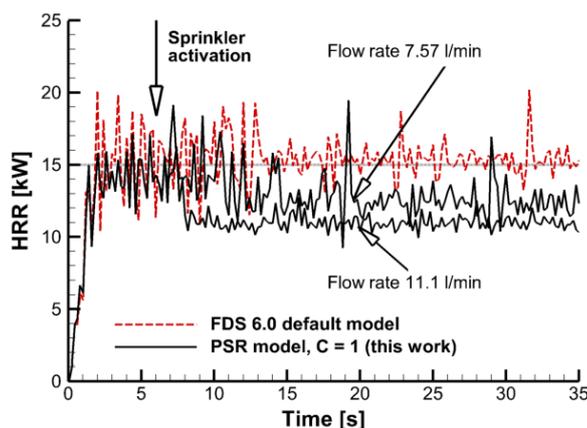


Рис. 4. Влияние модели погасания на мощность тепловыделение пламени, подавляемого распылённой водой.

В пятой главе отработанная методика моделирования применяется для анализа практически важных сценариев пожаротушения. В первом разделе пятой главы рассмотрен сценарий, при котором противопожарная водяная завеса с тонкораспылённой водой активируется в проёме двух смежных помещений (защищаемое и помещение с пожарной нагрузкой). Помимо общего внутреннего проёма помещение с пожарной нагрузкой также имеет внешний проём.

В данной работе показано, что активация водяной завесы приводит к существенной перестройке полей скорости внутри помещений и сильно сказывается на интенсивности газообмена через проёмы. Во-первых, газокпельная струя разрушает припотолочный слой продуктов сгорания и смешивает его с воздухом из нижней части помещения. Во-вторых, для рассмотренной геометрии помещений оказалось, что водяная завеса снижает входящий поток воздуха через внешний проём. Это приводит к более высокой концентрации дыма в случае активации водяной завесы. В то же время, активация завесы приводит к снижению температуры газа в защищаемом помещении и уменьшению радиационного теплового потока, проникающего от пламени через проём. Другими словами, активация водяной завесы позволяет снизить воздействие одних опасных факторов (температура газа, падающий тепловой поток) при одновременном увеличении других (концентрация продуктов сгорания) и при нарушении стратификации продуктов сгорания и чистого воздуха.

Использование тонкого распыла воды в завесе (при сохранении остальных характеристик, в том числе — расхода воды) приводит к интенсификации циркуляции газа в защищаемом помещении и повышению концентрации пара в нём. Более тонкий распыл позволяет уменьшить температуру (Рис. 5, а) и снизить радиационный тепловой поток, проходящий через завесу. Однако, при этом возможно увеличение концентрации продуктов сгорания ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и сажи), как показано на Рис. 5, б.

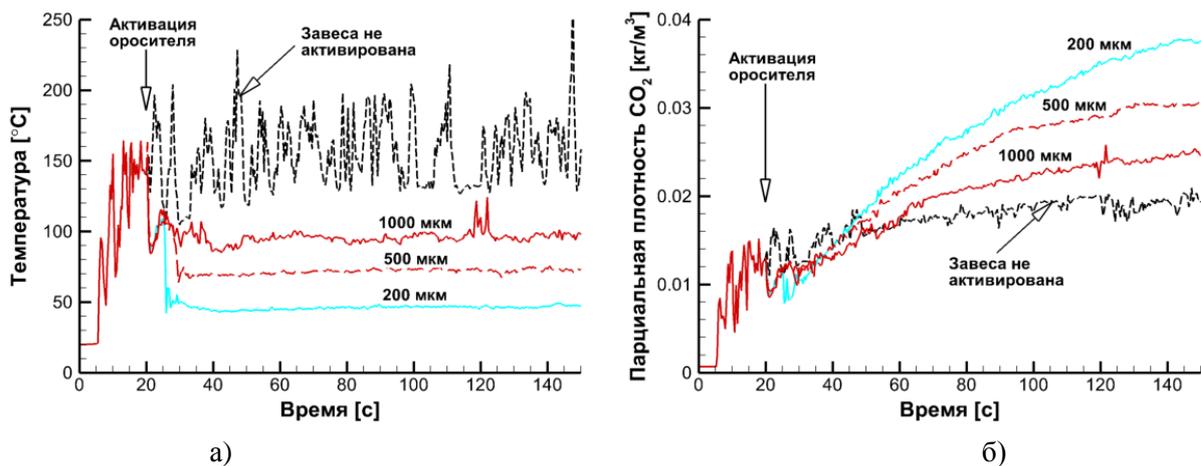


Рис. 5. Влияние начальной дисперсности капель на зависимость характеристик газа в контрольной точке от времени: а) – температура; б) – парциальная плотность углекислого газа

Во *втором разделе* пятой главы описанная выше методика численного моделирования применяется для анализа эффективности нового алгоритма активации спринклерной системы пожаротушения. Данная часть работы преследует следующие цели: 1) средствами численного моделирования исследовать эффективность новой технологии динамической групповой активации оросителей в системах пожаротушения; 2) проанализировать влияние определяющих факторов на динамику подавления растущего очага пожара при использовании традиционного (теплового) и нового (принудительного группового) алгоритмов активации. В качестве определяющих факторов рассмотрены удельная тепловая мощность тепловыделения (зависит от калорийности горючих материалов и скорости их газификации), высота помещения, расход воды, дисперсность распыла, скорость бокового ветра.

Под *тепловой активацией* понимается начало истечения воды из оросителя в момент времени, когда температура теплового замка (стеклянной колбы) достигает заданного предельного значения (принятого равным  $70^{\circ}\text{C}$ ). Отметим, что для температуры колбы  $T_b$  решается дифференциальное уравнение<sup>6</sup>

$$\frac{dT_b}{dt} = -\sqrt{|\tilde{u}|} \frac{T_b - \tilde{T}}{RTI} - C_1 \frac{T_b - T_m}{RTI} - C_2 f_w \frac{|\tilde{u}|}{RTI}, \quad (5)$$

учитывающее теплообмен с окружающим газом, конструкцией оросителя и каплями воды (три слагаемых в правой части (5)). Альтернативный алгоритм активации спринклеров предложен ООО «Гефест» (Санкт-Петербург) и заключается в следующем. Первый спринклер («лидер») активируется по тепловому механизму. В частности, в случае отсутствия бокового ветра первым активируется спринклер, расположенный на оси пламени. После этого с задержкой в 10 с принудительно активируется заранее определённая группа

<sup>6</sup> В уравнении (5):  $T_b$ ,  $\tilde{T}$ ,  $T_m$  – температура колбы, газа и корпуса оросителя,  $\tilde{u}$  – скорость газа, величина RTI (response time index) характеризует тепловую инерционность колбы,  $f_w$  – объёмная доля капель в потоке,  $C_1$  и  $C_2$  – эмпирические константы.

спринклеров, расположенных в непосредственной близости от лидера. Если лидер расположен на оси пламени, то в группу входят 8 спринклеров, окружающие лидера и расположенные в три ряда. Если же лидер расположен в боковом ряду, то в группу входят только два ряда – ряд, содержащий лидера, и центральный (всего 6 спринклеров). Данный алгоритм целесообразно называть *групповой принудительной активацией*.

В работе рассмотрена упрощённая геометрия расчётной области, воспроизводящая условия больших незагромождённых помещений с горизонтальным перекрытием (Рис. 6).

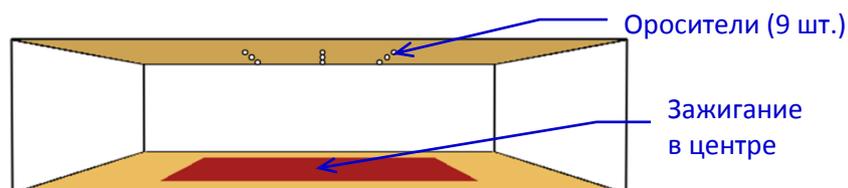


Рис. 6. Расчётная область и взаимное расположение пожарной нагрузки (квадрат 12x12 м на уровне пола) и спринклеров (9 шт., 10 см ниже поверхности потолка, шаг 3 м)

Важными особенностями анализа являются рассмотрение расширяющегося очага, тепловая мощность которого растёт со временем по квадратичному закону, и учёт снижения скорости газификации пожарной нагрузки в соответствии с равенством (3). В начальный момент времени происходит зажигание в центре поверхности пожарной нагрузки (Рис. 6), после чего граница очага распространяется во все стороны с заданной скоростью, зависящей от типа горючего материала.

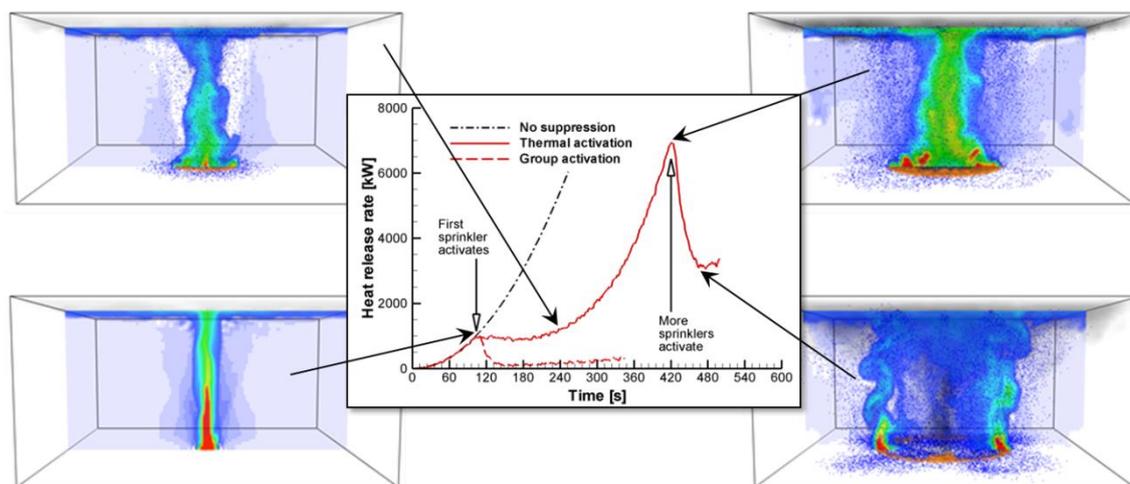
Анализ численных расчётов приводит к следующим выводам.

1. Существуют практически важные сценарии пожара, в которых групповая принудительная активация приводит к локализации и подавлению растущего очага пожара, в то время как тепловая активация оказывается неспособной предотвратить его рост (Рис. 7). Указанные сценарии охватывают достаточно широкий диапазон определяющих параметров (удельная тепловая мощность тепловыделения, высота помещения, расход воды, дисперсность распыла, скорость бокового ветра).

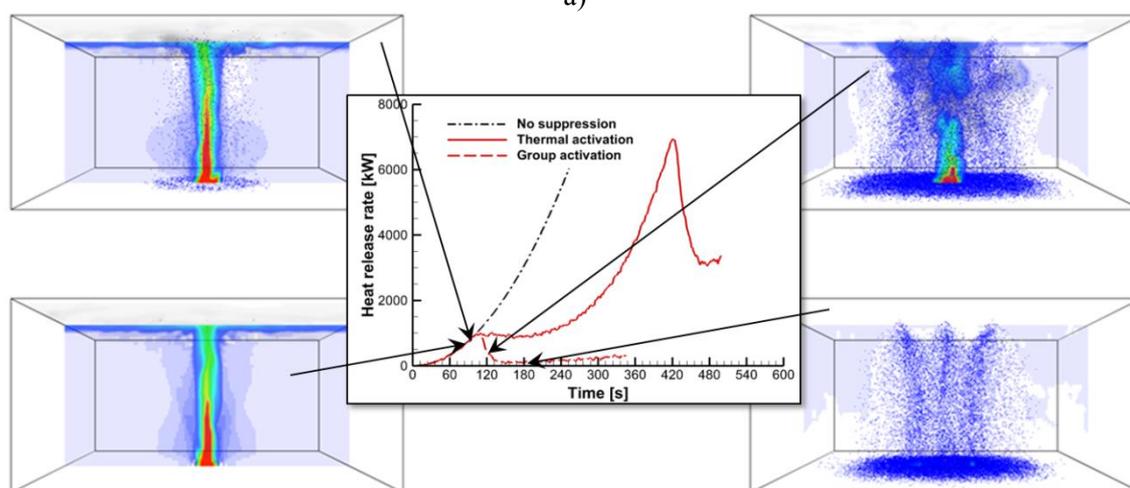
2. В рассматриваемом сценарии доминирующим механизмом подавления пожара является смачивание поверхности горючего материала, а режим взаимодействия струи и восходящего факела зависит не только от мощности очага и дисперсности распыла, но и от способа активации оросителей. В случае *принудительной групповой* активации имеет место импульсный режим. В случае *тепловой* активации может оказаться, что мелкие и крупные фракции полидисперсной струи взаимодействуют с восходящим факелом в разных режимах (импульсном и гравитационном соответственно).

3. В случае растущего очага пожара при *тепловой* активации оросителей измельчение капель приводит к снижению эффективности подавления горения из-за того, что мелкие капли сносятся потоками продуктов сгорания и не достигают поверхности горючего.

Это объясняется тем, что по мере роста мощности очага импульс струи становится недостаточен для преодоления импульса восходящего потока.



а)



б)

Рис. 7. Тепловая (а) и принудительная групповая (б) активация спринклеров в помещении

4. По мере увеличения высоты помещения увеличивается максимальная мощность тепловыделения, при которой происходит активация оросителей, и уменьшается количество активируемых оросителей.

5. Увеличение расхода воды в оросителе сопровождается уменьшением числа активируемых спринклеров (при тепловой активации) и в связи с этим не гарантирует более быстрого подавления *расширяющегося* очага пожара. В данном сценарии более эффективной представляется принудительная активация группы спринклеров, окружающих очаг.

6. Эффективность принудительной групповой активации и её преимущество перед тепловой активацией значительно уменьшаются при наличии боковой вентиляции. Это связано с тем, что как в случае тепловой, так и в случае принудительной групповой активации значительная часть воды расходуется за пределами зоны горения.

В **приложении 1** приводится описание процедуры калибровки кинетических параметров для модели локального погасания, разработанной в четвертой главе. В **приложении 2** даётся информация о расчётных сетках и количестве вычислительных частиц, используемых в расчётах. В **приложении 3** приводится пример прогноза развития пожара и пожаротушения в помещениях фабрики по производству медикаментов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы заключаются в следующем.

1. Модель и расчётный код FDS, широко применяющийся в современной инженерной практике для численного прогнозирования динамики опасных факторов пожара, апробированы путём сравнения расчётных и экспериментальных данных для трёх типов задач: турбулентная струя распылённой воды, турбулентное естественно-конвективное горение и подавление пламени над очагом пожара струёй распылённой воды. В результате отработана методика численного моделирования струй распылённой воды, воздействующих на пламя и очаг пожара. При этом, в частности, установлено, что:

1.1. Ключевую роль для получения качественного численного решения играет способность решателя воспроизводить крупномасштабные пульсации скорости газа в струе. При недостаточной точности аппроксимации уравнений переноса импульса и концентраций (в первую очередь это относится к конвективным слагаемым) имеют место неприемлемые ошибки в расчёте струи распылённой воды (задержка распада струи, нефизичная фокусировка потока вблизи оси). Применение метода TVD при аппроксимации конвективных членов и учёт подсеточной турбулентной дисперсии капель существенно улучшают качество численного решения и позволяют значительно уменьшить рассогласование расчётных и измеренных распределений потока жидкой фазы по радиусу струи.

1.2. При значительном изменении перепада давления (от 10 до 80 бар) в рассмотренном распылителе (характерный диаметр капель менее 0.200 мм) имеет место слабое изменение доли испарившейся жидкости и средней концентрации пара при значительном (в три раза) увеличении скорости потока.

2. Исследованы режимы и механизмы подавления пламени струями распылённой воды для двух сценариев, существенно отличающихся пространственными масштабами, мощностями очага и характеристиками газочапельных струй. При этом, в частности, установлено, что:

2.1. Модель и расчётный код верно воспроизводят смену режимов взаимодействия газочапельной струи и восходящего факела при изменении дисперсности распыла. Если расход горючего не зависит от интенсивности орошения очага, то для подавления пламени свойства струи распылённой воды должны обеспечивать переход в импульсный режим. Если импульс струи превышает критическое значение, зависящее от мощности очага, то уменьшение начального диаметра капель существенно ускоряет подавление пламени и достигается при меньшем расходе воды. Это связано с тем, что в тонкораспылённой струе импульс и массовый расход струи концентрируются на оси струи и пламени, в то время

как в случае крупного распыла импульс и массовый расход распределяются внутри широкого конуса.

2.2. Модель локального погасания на основе критической температуры пламени непригодна для расчёта подавления пламени при больших деформациях поля скорости. Это проявляется в том, что даже при полном подавлении пламени струёй, модель и код не предсказывает прекращения тепловыделения в ходе окисления горючего. Для преодоления указанного недостатка разработана и внедрена в текущую версию FDS новая подсеточная модель локального погасания фрагментов турбулентного пламени.

3. Исследована эффективность противопожарных водяных завес с тонкораспылённой водой. При этом выявлено противоположное влияние завесы на разные опасные факторы пожара. В частности, установлено, что завеса разрушает припотолочный слой продуктов сгорания, снижает температуру продуктов сгорания и радиационные тепловые потоки, но одновременно снижает входящий поток воздуха через внешний проём, в результате чего в защищаемом помещении возрастает концентрация дыма. Использование более тонкого распыла воды в завесе оказывает аналогичное влияние на разные опасные факторы пожара.

4. Исследована эффективность принудительной групповой активации оросителей в условиях растущего очага пожара. При этом выявлены практически важные сценарии пожара, в которых групповая принудительная активация имеет преимущества перед тепловой. Установлено существенное влияние на режимы взаимодействия струй распылённой воды и восходящего потока продуктов сгорания таких факторов как рост мощности очага, увлажнение поверхности очага, полидисперсность распыла воды. Впервые показано, что в случае тепловой активации мелкие и крупные фракции полидисперсной струи могут взаимодействовать с восходящим факелом в разных режимах (импульсном и гравитационном соответственно). Продемонстрировано влияние калорийности пожарной нагрузки, высоты помещения, расхода воды, наличия бокового ветра на эффективность пожаротушения при двух способах активации оросителей.

Перспективы дальнейшей разработки данной тематики включают совместное моделирование турбулентного горения, пиролиза пожарной нагрузки и воздействия огнетушащих веществ как на газофазное пламя, так и на поверхность горючего материала. При этом потребуется одновременное моделирование всех перечисленных явлений с учётом тесных взаимосвязей между ними.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Цой А.С., Снегирёв А.Ю. Моделирование струи тонкораспылённой воды методом крупных вихрей: сравнительный анализ двух моделей и расчётных кодов // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22, №5. – С.633-645 (Tsoy A.S., Snegirev A.Yu. Large eddy simulation of fine water sprays: comparative analysis of two models and codes // Thermophysics and Aeromechanics. – 2015. – Vol. 22, №5. – P. 633-645) – Список ВАК, Scopus, WoS

2. Snegirev A.Yu., Tsoy A.S. Treatment of local extinction in CFD fire modeling // Proc. of the Combustion Institute. – Vol. 35, № 3. – 2015. – P. 2519-2526 – Scopus, WoS
3. Цой А.С., Снегирёв А.Ю. Водяные завесы: анализ нормативной базы и численное моделирование // Пожарная безопасность. – 2015. – №3. – С. 100-108 – Список ВАК
4. Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A. Coupled simulations of turbulent flame and pyrolysis of combustible material // Proc. of the European Combustion Meeting. – 2015. – Paper P4-16.
5. Таранцев А.А., Танклевский Л.Т., Снегирев А.Ю., Цой А.С., Копылов С.Н., Мешман Л.М. Оценка эффективности спринклерной установки пожаротушения // Пожарная безопасность. – 2015. – №1. – Стр. 72-79 – Список ВАК
6. Цой А.С., Снегирёв А.Ю., Коковина Е.С. Численное моделирование струи тонкораспылённой воды методом крупных вихрей // Труды 6й Российской национальной конференции по теплообмену – Секция 6. – М: Изд-во МЭИ. – 2014. – 4 С.
7. Snegirev A.Yu., Talalov V.A., Stepanov V.V., Tsoy A.S. Oxidation kinetics of pyrolysis volatiles and its implication to critical conditions of flame extinction // Proc. of the 10 Int. Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions – 2014. – P. 71-84.
8. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I., Flame Suppression by Water Sprays: Exploring Capabilities and Failures of FDS // Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards. – Research publishing. – 2013. – P. 482-491.
9. Tanklevskiy L.T., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A.Yu., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation // Proc. of the 13th Int. conference Interflam 2013. – London: Interscience Comm. – 2013. – P. 503-508.
10. Цой А.С., Снегирёв А.Ю. Режимы и механизмы пожаротушения распылёнными огнетушащими жидкостями: численное моделирование // Труды VII Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму». — СПб: Изд-во Любавич. – 2012. – С. 55–67.
11. Шейнман И.Я., Шабров Н.Н., Киев В.А., Снегирёв А.Ю., Цой А.С. Масштабируемость открытого программного обеспечения для полевого моделирования пожаров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – №5 (157). – С. 77-85 – Список ВАК
12. Цой А. С., Снегирёв А.Ю. Численное моделирование пожаротушения распылённой водой. // XL неделя науки СПбГПУ. Материалы международной научно-практической конференции, ч. V. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2011 – С. 127-128.
13. Снегирёв А.Ю., Фролов А.С., Цой А.С. Вихреразрешающие технологии численного моделирования турбулентного диффузионного пламени// Труды 5й Российской национальной конференции по теплообмену. – М: Изд-во МЭИ. – 2010. – Т.3. – С.316–319.