

*На правах рукописи*



**Барановский Алексей Сергеевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ  
ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность  
(технические науки, отрасль строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики (Академия ГПС МЧС России)

Научный руководитель: **Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор Пузач Сергей Викторович**

Официальные оппоненты: **Гаращенко Анатолий Никитович, доктор технических наук, доцент, АО «ЦНИИСМ», центр прочности №9, ведущий научный сотрудник**

**Гравит Марина Викторовна, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, доцент**

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»**

Защита состоится «13» сентября 2022 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/23d/23d29e2200c6711328da17b1b2572d45.PDF>

Автореферат разослан «06» июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Сивенков Андрей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Современные темпы строительства приводят к необходимости наличия эффективной и надежной транспортной инфраструктуры. Одним из элементов этой инфраструктуры, особенно в пределах городской застройки, являются такие сложные и уникальные сооружения, как автотранспортные тоннели. Тоннели позволяют обеспечить быстрое и безостановочное движение транспортных потоков, пересекать густонаселенные микрорайоны и сложившиеся архитектурные комплексы, а также исторические и природные заповедники, промышленные и особые зоны, не нарушая их режим. Одним из ярких примеров такого строительства последних лет в России являются комплекс тоннелей третьего транспортного кольца и иных транспортных артерий Москвы, а также сооружение межтерминального перехода в аэропорту Шереметьево, состоящее из нескольких тоннелей, предназначенных для перемещения пассажиров и багажа между терминалами аэропорта. Тоннельное строительство стало особенно активным за последние 15-20 лет. Тенденция увеличения темпов строительства тоннелей будет продолжаться и далее.

Естественно, что для таких объектов как автотранспортные тоннели очень важен высокий уровень безопасности и надежности. Опыт эксплуатации автотранспортных тоннелей, особенно расположенных в пределах городов, указывает на немалую вероятность аварий и дорожно-транспортных происшествий, сопровождающихся пожарами. Вероятность пожара считается наиболее опасной из всех видов опасности в тоннеле, так как из-за недостаточного уровня вентиляции горячий дым быстро распространяется по тоннелю и его удаление сопряжено с большими трудностями. Кроме того, токсичные газы в тоннеле сильно влияют на возможность эвакуации людей и проведение спасательных работ.

Таким образом вопрос обеспечения пожарной безопасности автотранспортных тоннелей является актуальным и требует проведения серьезных исследований.

Однако, каждое из таких сооружений как тоннель имеет свои характерные особенности, которые необходимо учитывать при разработке комплексной системы противопожарной защиты. Таким образом, для построения эффективной системы противопожарной защиты конкретного тоннеля необходимы исследования, позволяющие учесть специфику данного сооружения. Проведение полномасштабных натурных испытаний для каждого такого объекта чрезвычайно дорого и трудоемко. Кроме того, даже в этом случае может быть рассмотрено лишь ограниченное количество аварийных ситуаций, связанных с пожаром.

Поэтому для решения задач пожарной безопасности для автодорожных тоннелей, чрезвычайно перспективным является использование методов

численного моделирования. Математические модели, апробированные на экспериментальных данных, могут стать основой для расчетов по прогнозированию распространения опасных факторов пожара (ОФП) и выбора оптимальных параметров систем защиты тоннеля. Это позволит обеспечить пожарную безопасность объекта с учетом его индивидуальных конструктивных и объемно-планировочных решений.

**Степень разработанности темы исследования.** В последние годы и в настоящее время теме противопожарной защиты автодорожных тоннелей уделяется большое внимание (Беляцкий В.П., Болодьян И.А, Голиков А.Д., Давыдкин Н.Ф., Есин В.М., Зотов Ю.С., Карпов А.В., Копылов Н.П., Пузач С.В., Рыжов А.М., Страхов В.Л.). Однако, количество отечественных исследований в части обеспечения пожарной безопасности автодорожных тоннелей вообще и моделирования пожара в тоннелях в частности не так значительно, как за рубежом (Carvel R., Fan C., Naack A, Ingason H., Tanaka F., Tuovinen H., Zhang L).

Анализ ранее выполненных работ подтверждает перспективность методов математического моделирования для разработки системы противопожарной защиты тоннелей. При этом одним из вопросов, которые могут быть решены такими методами, является принципиальная возможность исследования распространения опасных факторов пожара и влияния объемно-планировочных решений тоннеля на характер распространения ОФП.

Однако, рассматриваемые работы, основанные на применении методов математического моделирования, как правило, используют устаревшие модели, либо модели и программные комплексы, не апробированные на результатах натуральных испытаний непосредственно в тоннелях. Кроме того, при использовании полевых моделей недостаточное внимание уделяется выбору расчетной сетки и постановке граничных условий. Также отсутствуют численные исследования, где на примере одного модельного тоннеля рассматривается влияние нескольких основных характеристик на распространение опасных факторов пожара. В свою очередь, получение таких данных может быть использовано для разработки рекомендаций по проектированию оптимальных характеристик системы противопожарной защиты – путей эвакуации, геометрических параметров тоннеля, допустимых видов транспортных средств, инженерных систем и т.д.

Таким образом, **целью диссертационной работы** является моделирование развития пожара в автодорожном тоннеле для оптимизации проектных решений и повышения уровня его пожарной безопасности.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

- проведение анализа пожаров в автодорожных тоннелях и возможности влияния их характеристик на безопасность людей при пожаре;
- формулировка математической модели, используемой для расчета распространения опасных факторов пожара;
- проведение натуральных экспериментов на модели тоннеля;
- апробация математической модели на основе сравнения с данными экспериментов;

- исследование влияния геометрических характеристик и мощности тепловыделения на распространение ОФП в тоннеле;
- проведение численных расчетов с целью оптимизации проектных решений при проектировании системы пожарной безопасности нескольких автотранспортных тоннелей России.

**Объектом исследования** являлся процесс развития пожара на объектах автотранспортных тоннелей.

**Предметом исследования** являлись проектные решения, а также отдельные строительные и пожарно-технические характеристики автотранспортных тоннелей, оказывающие влияние на процесс развития пожара.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- на модели тоннеля получены новые экспериментальные данные по распространению ОФП в тоннеле, позволяющие на них апробировать полевую математическую модель;
- сформулирована математическая модель расчета и проведена ее апробация на основе сравнения с данными эксперимента;
- с помощью математической модели проведены численные эксперименты и установлено существенное влияние уклона, ширины тоннеля и мощности очага пожара на процесс распространения ОФП в тоннеле.

**Теоретическая значимость** работы:

- подтверждена эффективность применения методов математического моделирования для решения задач пожарной безопасности автотранспортных тоннелей;
- сформулирована полевая математическая модель, описывающая развитие пожара в автотранспортном тоннеле.

**Практическая значимость** работы:

- полевая математическая модель апробирована на основе данных экспериментов, что позволяет с ее помощью достоверно прогнозировать распространение ОФП при пожаре и оптимизировать проектные решения автодорожных тоннелей для снижения их пожарной опасности;
- получена качественная картина влияния уклона и ширины тоннеля, а также мощности очага пожара на процесс распространения ОФП, позволяющая обосновать объемно-планировочные решения автотранспортного тоннеля.

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы использованы методы математического моделирования, физического эксперимента, наблюдения, сравнения, обработки экспериментальных данных, описания и обобщения.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты экспериментальных исследований распространения ОФП на модели автотранспортного тоннеля;
- возможность использования метода численного моделирования и полевой модели, реализованной в программном комплексе SOFIE, для решения задач обеспечения пожарной безопасности автотранспортных тоннелей;

- результаты численного моделирования пожара в автотранспортном тоннеле;

- результаты анализа влияния уклона и ширины тоннеля, а также мощности очага пожара, на распространение ОФП.

**Степень достоверности** полученных результатов и выводов диссертации подтверждается: применением современных методов исследования, удовлетворительной сходимостью результатов численного моделирования и экспериментальных данных, использованием аттестованной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения, адекватностью полученных расчетных данных и внутренней непротиворечивостью результатов.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы представлены на российских и международных конференциях и иных научных мероприятиях: XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (Москва 2020), X Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы регулирования природной и техногенной безопасности в XXI веке» (2005 г.), Fourth International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Paris – France (2005), Международная научно-практическая конференция (2017) «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и гражданской обороны в период третьей модернизации Казахстана».

**Материалы диссертации реализованы при разработке** проектных решений и мероприятий по противопожарной защите следующих объектов:

- Автодорожный тоннель №6 на участке обхода г. Сочи автодороги Джубга-Сочи;

- Тоннель «Скальный» на км 23+370 автомобильной дороги А-149 Адлер-Красная Поляна;

- Тоннель «Мацестинский» на км 0+375 автомобильной дороги А-147 Джубга-Сочи – граница с Республикой Абхазия (Обход г. Сочи);

- Межтерминальный переход между СТК и ЮТК аэропорта Шереметьево.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, 3 из которых опубликованы в изданиях из перечня ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Содержание работы изложено на 153 страницах, включает в себя 7 таблиц, 47 рисунков и список литературы из 119 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, проанализированы объект и предмет исследования, показаны научная новизна работы и ее практическая значимость.

**В первой главе** диссертации рассмотрены наиболее известные случаи пожаров в тоннелях, а также их причины и последствия. Очевидно, что анализ

таких пожаров является важной информацией при постановке задачи и проведения исследования в этой области.

Пожары в тоннелях, как правило, являются следствием возгораний движущихся транспортных средств, которые возникают по разным причинам. Это может быть перегрев двигателя, неполадки электрооборудования и другие технические неисправности. Однако, наиболее часто причиной пожара является дорожно-транспортное происшествие (ДТП). Так, например, 29 мая 1999 г. произошел сильный пожар в австрийском тоннеле Tauern длиной 6400 м. В этом тоннеле было организовано двустороннее движение. Грузовик, двигавшийся с южной стороны, выехал на большой скорости на разделительную полосу и столкнулся с четырьмя автомобилями. В результате аварии погибли 8 человек, а один из грузовиков загорелся. Попытки потушить пожар не увенчались успехом. В результате пожар перекинулся на автомобиль, частью груза которого были аэрозольные баллоны с лаком для волос. В результате пожара были разрушены 14 грузовиков и 26 легковых автомобилей. 12 человек погибли, а 46 человек получили ранения.

Подобная авария не является единичным случаем. Крупные пожары в автодорожных тоннелях имели место в различных странах. Особенностью пожаров в тоннелях является процесс распространения опасных факторов, невозможность быстрого освобождения объема тоннеля от продуктов горения, значительные сложности, связанные с тушением пожара и эвакуацией людей. При этом, как показывает практика, даже полное оборудование тоннеля комплексом систем противопожарной защиты не всегда является достаточно эффективным в силу влияния различных факторов и их совокупности. Таким образом, проведение исследований в области обеспечения пожарной безопасности автодорожных тоннелей является актуальным.

Для решения задач пожарной безопасности уже несколько десятков лет активно используются методы математического моделирования. Значительное развитие данные методы получили благодаря серьезному прогрессу вычислительной техники и возможности численного решения многих сложных задач. Сюда можно отнести и вопросы расчета времени эвакуации людей, и прогрева строительных конструкций при пожаре, и даже моделирование работы инженерных систем, а также ряд иных задач. Однако, одним из важнейших и наиболее интересных направлений, безусловно, можно считать моделирование распространения опасных факторов пожара. В случае автодорожных тоннелей, возможность применения методов численного моделирования в ряде случаев является вообще незаменимым инструментом. В самом деле, сооружения тоннелей не являются типовыми, а наоборот, практически каждый из них имеет свои особенности (параметры продольного профиля, размеры и форма поперечного сечения, количество и ширина полос для движения, положение относительно уровня земли и т.д.).

В этой связи методы, используемые для исследования пожара в обычных зданиях, например, проведение натурных испытаний, статистические данные и т.д. не могут быть использованы применительно к сооружениям тоннелей. Таким

образом, зачастую только использование методов численного моделирования может являться основой для оценки эффективности системы противопожарной защиты сооружения, что еще более повышает значимость указанных методов.

В первой главе рассмотрены основные методы математического моделирования пожаров – интегральные, зонные и полевые. Изложены основные принципы, приведены уравнения указанных моделей. Сделан вывод о нецелесообразности применения интегрального и зонного методов моделирования пожара для объектов автотранспортных тоннелей. Далее приведен литературный обзор научных работ по использованию полевого метода моделирования для прогнозирования динамики распространения ОФП в тоннеле. Кроме того, для полевой модели изложено описание основных подмоделей, используемых при расчете динамики пожара. В рамках литературного обзора приведены основные результаты работ различных авторов по исследованию влияния тех или иных характеристик тоннеля на распространение ОФП. В частности, с помощью расчетных методов с использованием полевой модели были проведены следующие исследования:

- проведена оценка соответствия расчетных и опытных распределений концентраций кислорода и полей температуры по длине тоннеля и влияние принудительной вентиляции;
- исследование стратификации продуктов горения;
- развитие пожара в вентилируемом тоннеле;
- моделирование пожара на уменьшенной экспериментальной модели реального тоннеля;
- численное исследование тепломассообмена в районе очага пожара;
- исследование эффекта расположения очага пожара на производительность системы естественной вентиляции с помощью шахт;
- эффекты наклона шахты вентиляции.

На основе проведенного анализа обоснованы и сформулированы основные задачи исследования.

**Во второй главе** диссертации формулируется математическая модель, используемая в дальнейших расчетах и являющаяся основой программного комплекса SOFIE.

Принципиальной основой моделирования, как и всех полевых моделей, являются уравнения сохранения. Часто систему уравнений сохранения записывают в форме обобщенного уравнения переноса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi, \quad (1)$$

где  $\phi$  - консервативная величина (скаляр),  $\Gamma_\phi$  - соответствующий ей коэффициент переноса,  $S_\phi$  - источниковый член.

Уравнение (1) описывает сохранение импульса при  $\phi = u_i$ , сохранение энергии при  $\phi = h$ , сохранение массы при  $\phi = 1$ , сохранение массы компонентов



при  $\phi = Y_k$ , перенос кинетической энергии турбулентности при  $\phi = k$  и скорости ее диссипации при  $\phi = \varepsilon$ .

В качестве основных были использованы следующие подмодели.

Для моделирования турбулентности –  $k$ - $\varepsilon$  модель Лаундера – Сполдинга с поправкой на влияние естественной конвекции. Для моделирования процессов горения был применен вариант диффузионно-вихревой модели горения Магнуссена. Для расчета процессов излучения использовалась модель дискретного радиационного теплопереноса, а также  $\chi_R$  модель. При определении оптических свойств газа применялась модель взвешенной суммы серых газов с коэффициентами Трюлава. Оптическая плотность дыма рассчитывалась на основании допущения о подобии полей концентрации  $\text{CO}_2$  и оптической плотности дыма.

В качестве граничных условий для уравнений движения на твердых поверхностях использовались условия прилипания ( $\vec{u} = 0$ ) и условие постоянства динамического давления на свободных границах расчетной области. При решении уравнения энергии на всех внешних поверхностях конструкции задавались изотермические граничные условия. Теплообмен на внутренних поверхностях рассчитывался с помощью пристеночных функций. На плоскостях симметрии для всех уравнений переноса использовалось условие  $\partial\Phi/\partial n = 0$ . Стены тоннеля выполнены из бетона. Степень черноты поверхности бетона принималась равной 0,9. Начальная температура во всем тоннеле равнялась 293 К.

В этой же главе приведено описание экспериментов, проведенных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России, и сравнение этих результатов с результатами расчетов.

Экспериментальный стенд представлял собой модель тоннеля прямоугольного поперечного сечения размерами 2,0x2,4 м<sup>2</sup> и 2,0x2,1 м<sup>2</sup>. Длина стенда составляла 13 м. Стены модельного тоннеля кирпичные, пол и потолок – из бетонных плит. Один из торцов был закрыт кирпичной стеной. Вторым был оборудован металлическими воротами. В одной из стен имелись три технологических окна размерами 0,25x0,25 м<sup>2</sup>. Свежий воздух поступал в помещение тоннеля через открытый выход (оборудованный воротами), технологические окна и неплотности в проемах. Параметром пожара, измеряемым в эксперименте, являлась температура. Для измерений температуры использовались термопары «хромель-алюмель» в керамических трубках (в непосредственной близости от очага пожара), а также термопары в оплетке из стекловолокна (в остальном объеме экспериментального стенда).

Количество термопар при проведении эксперимента составило 55 шт. Это позволило провести измерения не только в центральном продольном сечении тоннеля, но и вблизи стен. В качестве очага пожара использовался противень с керосином размером 0,5x0,5 м, расположенный вблизи глухой торцевой стены тоннеля на равном удалении от боковых стен.

Схема экспериментального стенда с размещением термопар представлена на рисунке 1.

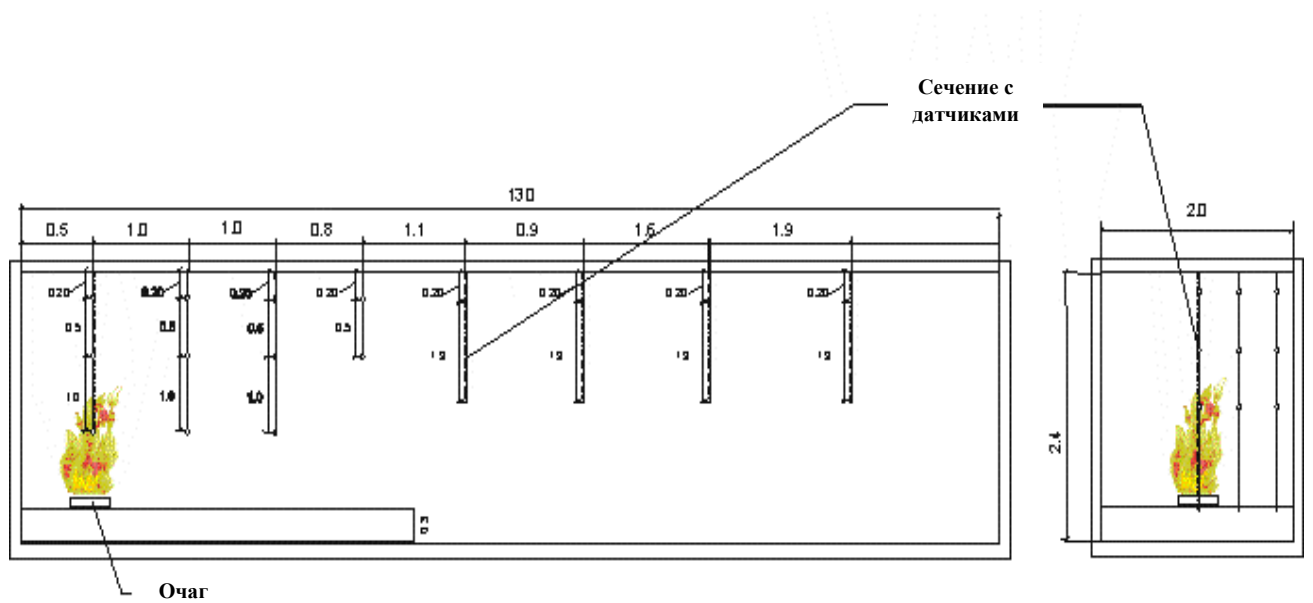


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда с размещением термопар

Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. На рисунке 2 представлена динамика изменения температуры в одной из точек размещения термопар (на расстоянии 0,2 м от потолка модели тоннеля).

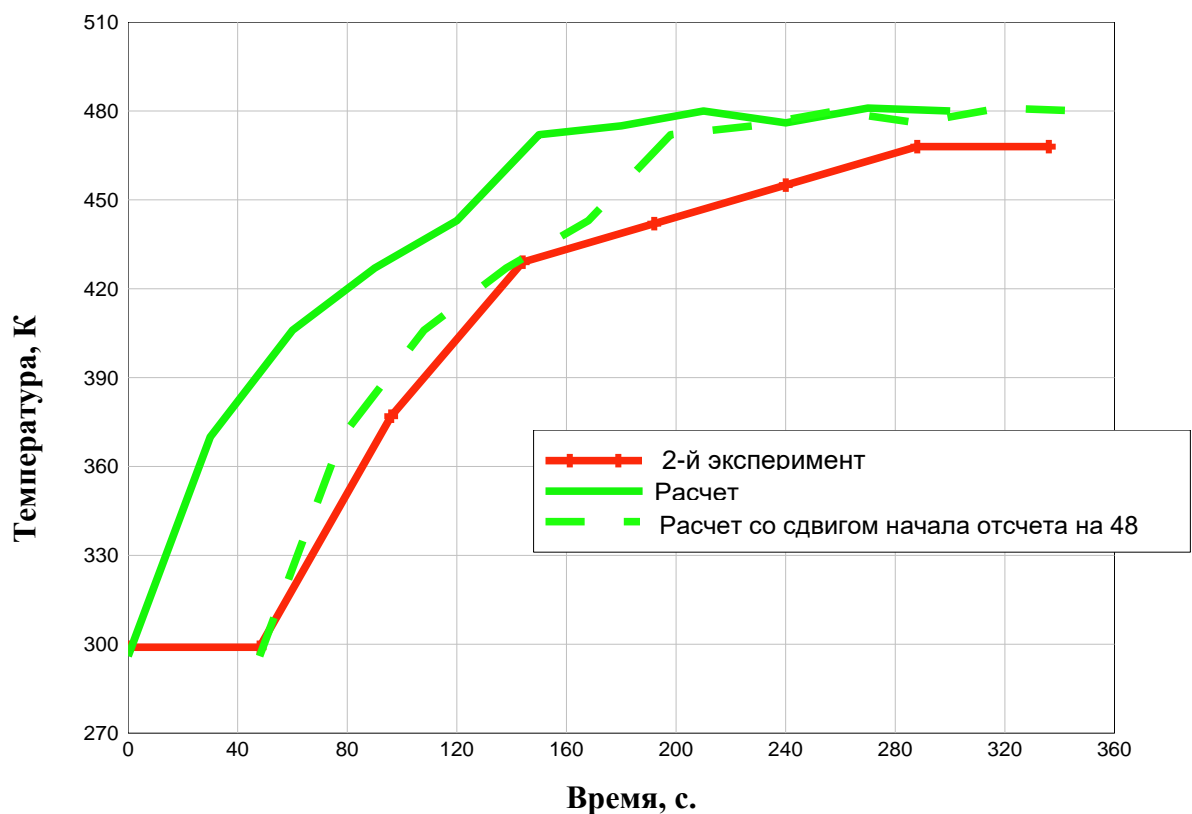


Рисунок 2 – Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов. Динамика изменения температуры на расстоянии 0,2 м от потолка модели тоннеля

Полученные результаты прогнозирования динамики температуры согласуются с экспериментом. Расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 20 %.

В качестве следующего эксперимента были использованы данные пожарных испытаний в тоннеле Memorial (США). Тоннель Мемориал – это двухполосный горный тоннель длиной около 850 м с уклоном 3,2%. Тоннель был переоборудован и подготовлен для проведения исследований и оценки возможностей различных конфигураций системы вентиляции, в том числе полной поперечной вентиляции, частично поперечной вентиляции, естественной вентиляции и т.д.

Тоннель был оборудован аппаратурой и регистрирующими приборами для записи данных. В тоннеле устанавливались датчики измерения скорости, температуры, концентрации монооксида углерода (СО), диоксида углерода (СО<sub>2</sub>). Данные с каждого датчика записывались. Образование и движение дыма, а также видимость, оценивались с использованием телевизионных камер.

Эффективность систем вентиляции проверялась для различных мощностей очага пожара: 10, 20, 50 и 100 МВт. Кроме изменения мощности очага, в экспериментах для каждой вентиляционной системы изменялись расходы воздуха, продольная скорость воздушного потока около очага пожара, время начала работы вентиляторов. Испытания также проводились, чтобы оценить воздействие продольных скоростей воздуха на эффективность системы пенного пожаротушения.

В испытаниях исследовались различные схемы и комбинации схем управления дымовыми потоками, включающие удаление, транспортировку, контроль направления движения и т.д. Всего было проведено 98 испытаний.

Для сопоставления расчетов по используемой модели и результатов испытаний был выбран один из серии экспериментов, проведенных в тоннеле Memorial. Рассматривался сценарий с мощностью тепловыделения 20 МВт и естественной вентиляцией. Схема тоннеля представлена на рисунке 3.

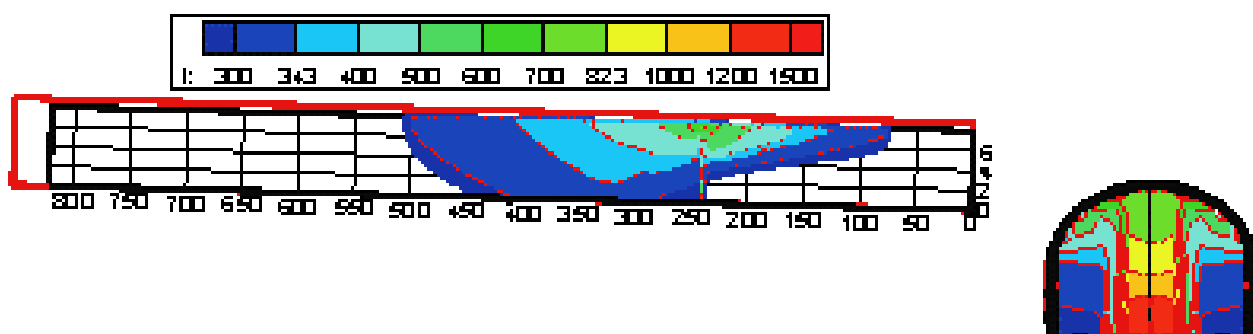


Рисунок 3 – Схема тоннеля Memorial

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для рассмотренного эксперимента в тоннеле Memorial представлены на рисунках 4 и 5.

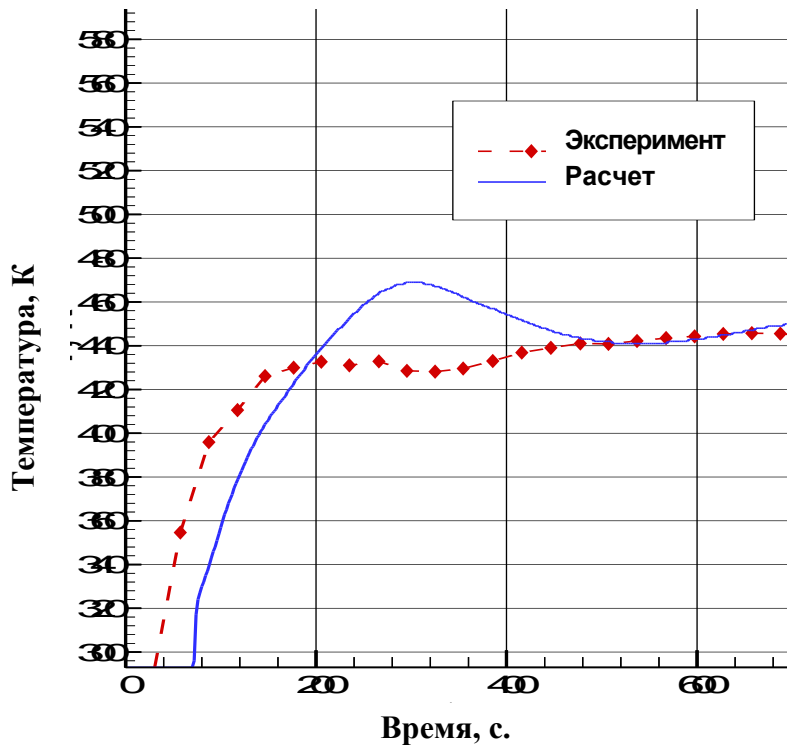


Рисунок 4 – Расчетная и экспериментальная динамика температуры на расстоянии 80 м от очага пожара вверх по уклону на высоте 7 м

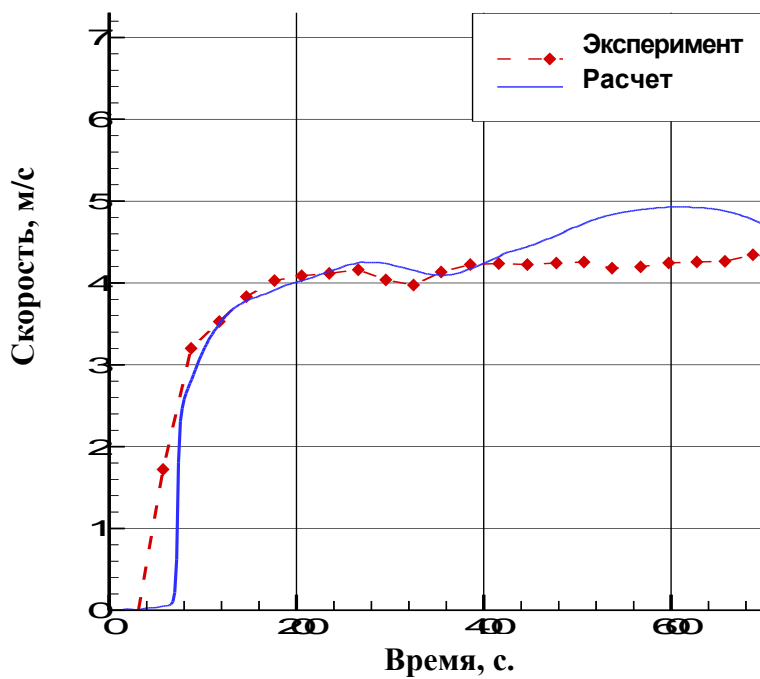


Рисунок 5 – Расчетная и экспериментальная динамика скорости на расстоянии 80 м от очага пожара вверх по уклону на высоте 7 м

Основными выводами второй главы являются подтверждение возможности использования полевой математической модели, реализованной в программном комплексе SOFIE, для моделирования распространения ОФП в тоннеле и целесообразность выполнения качественной и количественной оценок параметров ОФП при пожаре в тоннеле при изменении таких его характеристик как уклон и ширина, а также при изменении мощности очага пожара

**В третьей главе** диссертации проведены численные расчеты динамики ОФП на модельном тоннеле.

В данной главе с помощью проведения численных экспериментов рассматривается влияние на распространение ОФП следующих факторов:

- уклона тоннеля;
- мощности тепловыделения;
- ширины тоннеля.

Уклон и ширина тоннеля являются одними из основных строительных характеристик, поскольку определяют параметры продольного и поперечного профилей тоннеля. Мощность тепловыделения является основной характеристикой очага пожара, определяющейся в свою очередь типом и количеством горючей нагрузки. Таким образом, рассмотрение влияния указанных характеристик является наиболее интересным с практической точки зрения.

Для проведения численных экспериментов был выбран модельный тоннель прямоугольного поперечного сечения. Геометрические размеры модельного тоннеля составили – ширина 10 м, высота 5,2 м и длина 700 м. Площадь поперечного сечения тоннеля представлена на рисунке 6.

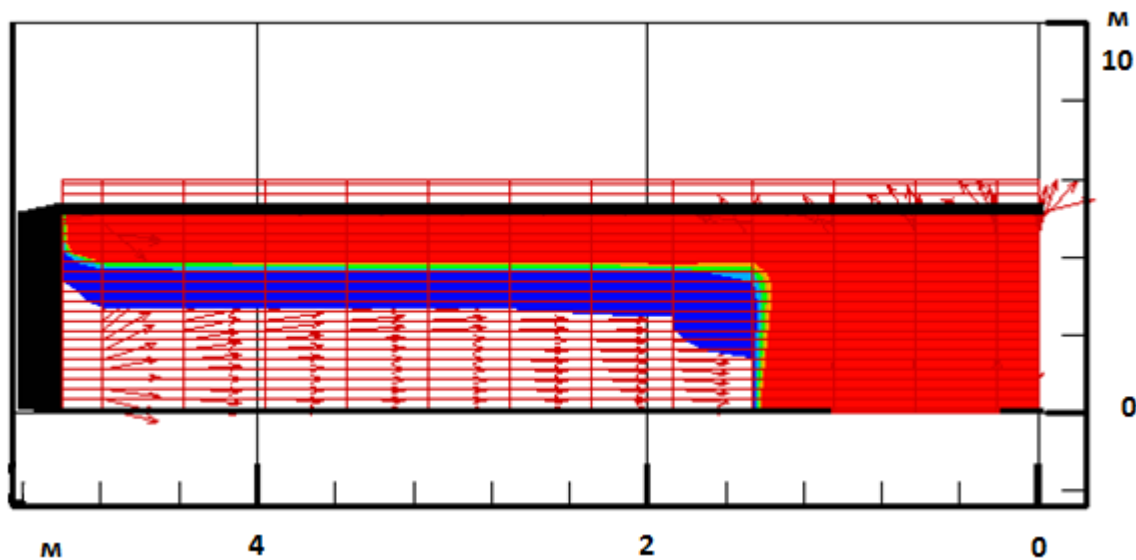


Рисунок 6 – Схема поперечного сечения модельного тоннеля

Задача являлась симметричной относительно центрального продольного сечения, поэтому моделировалась половина тоннеля. Расчеты проводились с помощью математической модели, описанной во второй главе. Для реализации модели использовался программный комплекс SOFIE.

Отдельное внимание при проведении расчетов уделено выбору расчетной сетки. Так, выбор сравнительно крупных ячеек сетки может сильно влиять на точность моделирования и серьезно исказить реальную картину пожара. Напротив, очень малый размер ячеек в разы увеличивает их общее количество, что, в свою очередь, негативно влияет на вычислительные ресурсы, увеличивает время расчета, а главное, может не соответствовать возможностям используемых программных комплексов в том случае, если максимально возможное внутреннее количество ячеек в них ограничено. Аналогичные ограничения присутствуют и в программном комплексе SOFIE, задействованном в настоящей работе.

Как правило, при определении расчетной сетки выбирается наименьший размер ячеек, а сетка является равномерной. При отсутствии такой возможности размеры и равномерность сетки предусматриваются максимально приближенными к указанным условиям, и выполняется оценка «работоспособности» выбранной расчетной сетки.

Используемый программный комплекс SOFIE позволяет использовать несколько расчетных областей, каждая из которых имеет свой размер ячеек. Для определения оптимального размера ячеек было выбрано четыре расчетные сетки для горизонтального (без уклона) модельного тоннеля. Модельный тоннель при этом был разбит на пять расчетных областей. Размеры ячеек по вертикальной оси (x) и поперечной оси (z) принимались фиксированными и имели значения 0,25 и 0,416 м соответственно. Размеры по продольной оси (y) были приняты в соответствии с таблицей 1. Очаг пожара размещался на расстоянии 200 м от одного из порталов.

Таблица 1 – Размеры используемых расчетных сеток

Тоннель метры	Сетка 1		Сетка 2		Сетка 3		Сетка 4	
	ячейки	размер ячейки	ячейки	размер ячейки	ячейки	размер ячейки	ячейки	размер ячейки
180	140	<b>1.285714</b>	150	<b>1.2</b>	150	<b>1.2</b>	150	<b>1.2</b>
20	50	<b>0.4</b>	50	<b>0.4</b>	50	<b>0.4</b>	50	<b>0.4</b>
20	50	<b>0.4</b>	50	<b>0.4</b>	50	<b>0.4</b>	50	<b>0.4</b>
180	150	<b>1.2</b>	225	<b>0.8</b>	300	<b>0.6</b>	300	<b>0.6</b>
300	100	<b>3</b>	150	<b>2</b>	200	<b>1.5</b>	250	<b>1.2</b>

Для оценки возможности использования принятых размеров ячеек рассматривался профиль температуры в центре нескольких поперечных сечений тоннеля (15, 50, 100, 206, 300 м от очага пожара) в различные моменты времени (300, 600 и 900 с). На рисунках 7 и 8 представлены результаты расчетов (профили температуры) для центра поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара, как наиболее характерные.

По результатам моделирования был сделан вывод, что результаты численных расчетов для моментов времени, не превышающих 600 с, принципиально не зависят от предложенных размеров сетки. Учитывая, что данный промежуток времени является наиболее «значимым» с точки зрения пожарной безопасности для оценки развития начальной стадии пожара и

эвакуации людей даже самая крупная из используемых сеток может быть использована для проведения расчетов.

Далее были проведены численные расчеты по оценке влияния геометрических параметров и мощности очага пожара на динамику распространения ОФП.

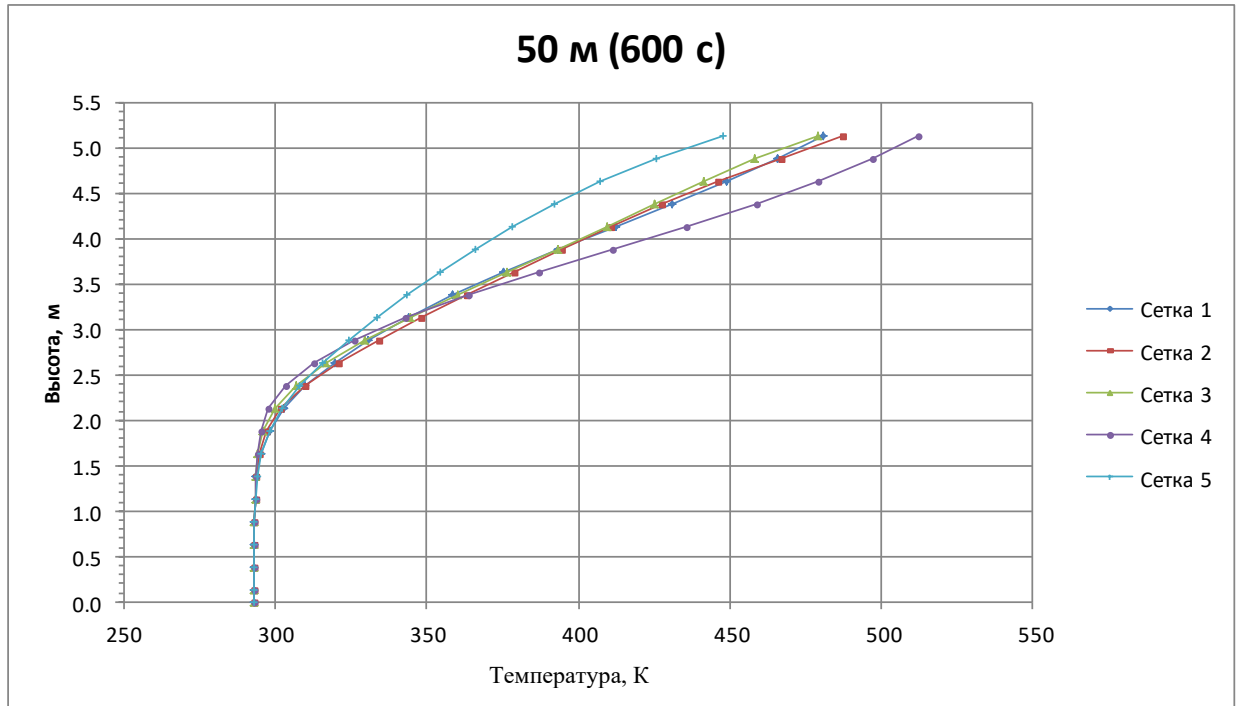


Рисунок 7 – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара в момент времени 600 с

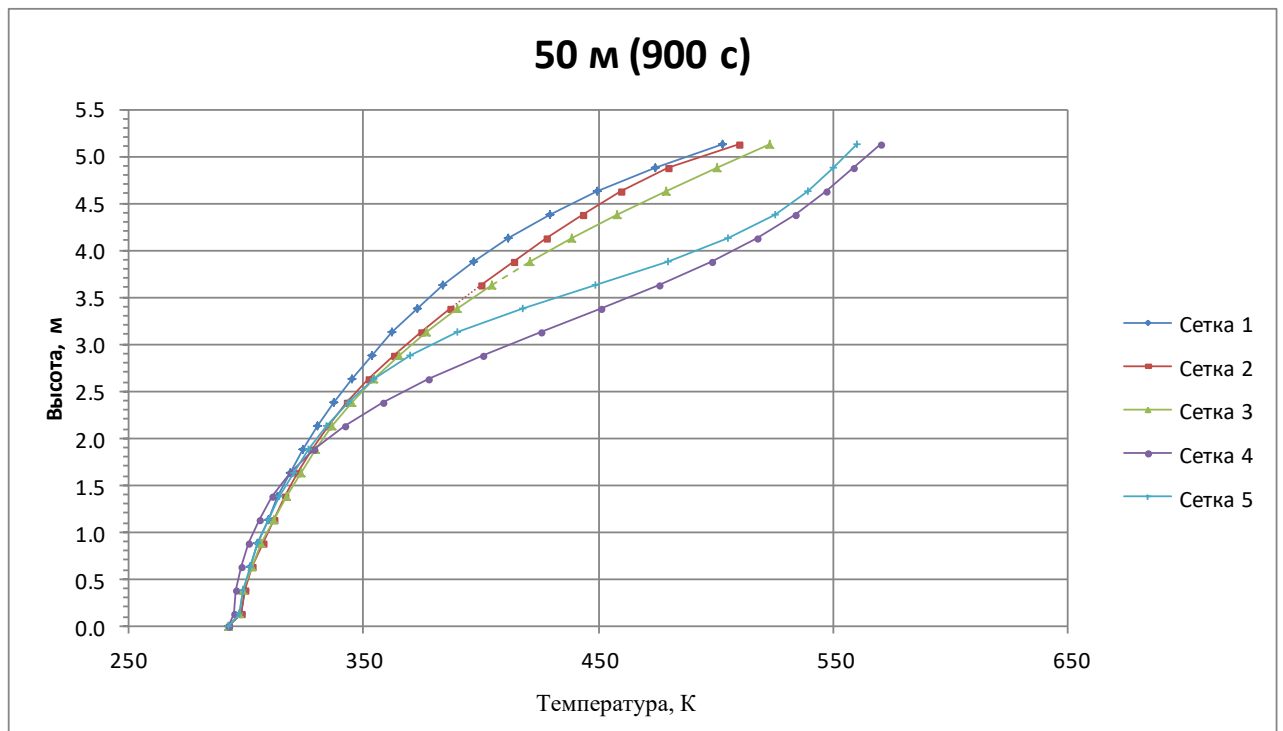


Рисунок 8 – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара в момент времени 900 с

**Уклон тоннеля.** моделирование проводилось для следующих значений уклона: 0%; 20%; 40%; 60%.

В качестве топлива был выбран бензин. Максимальная мощность пожара принималась равной 10 МВт. Мощность тепловыделения от времени определялась в соответствии с зависимостью:

$$Q = 2000000 + 8888,9 \cdot t \text{ [Вт]} \quad (2)$$

Принималось, что после выхода на максимальную мощность (через 15 минут после начала пожара) мощность тепловыделения остается постоянной. Площадь очага составляла около 4 м<sup>2</sup>.

При проведении расчетов на основании промежуточных результатов было принято решение о выполнении расчетной оценки для двух дополнительных вариантов уклона – 0,5 и 1% (рисунок 9).

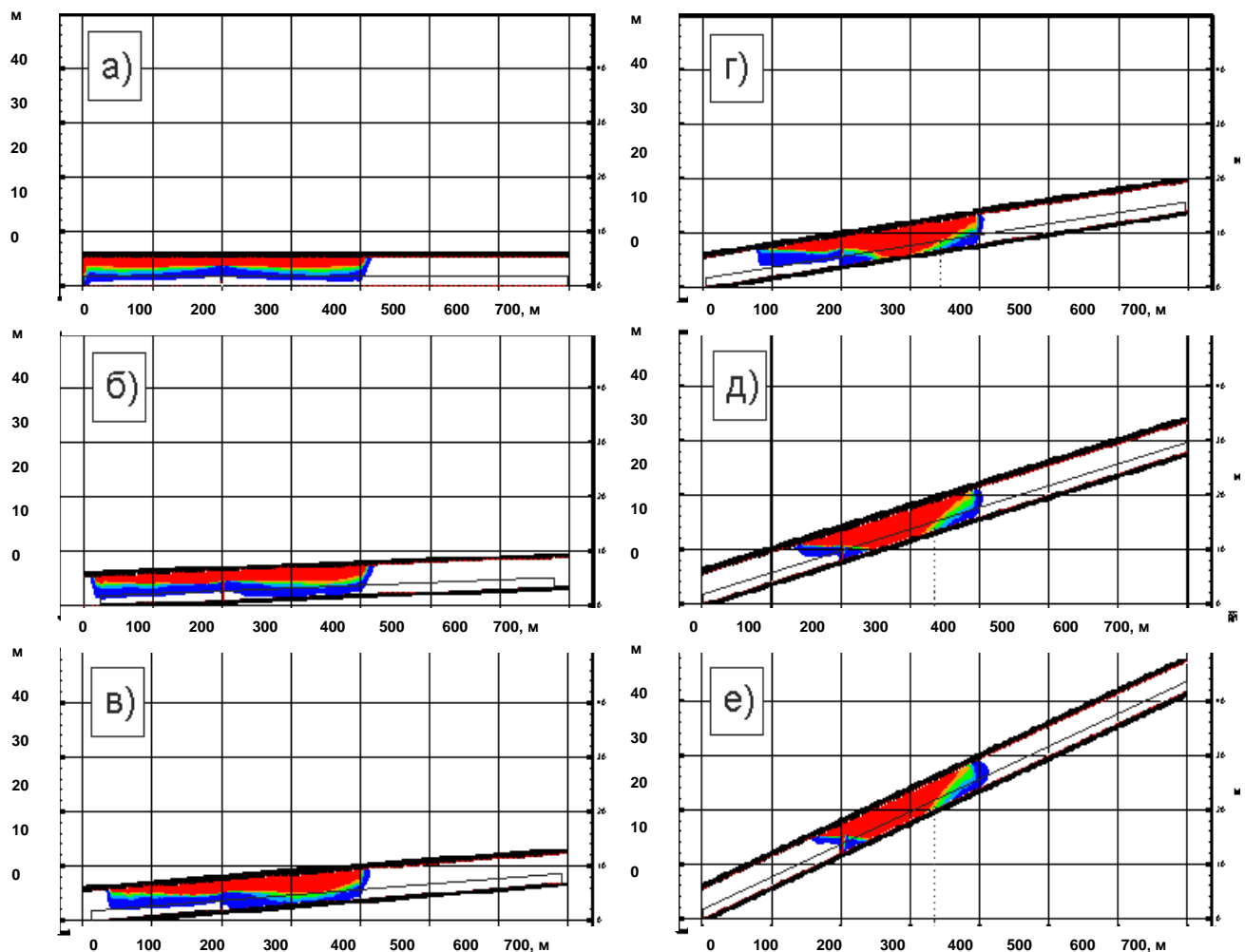


Рисунок 9 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 300 с при различных значениях уклона:

а) 0%, б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 4%, е) 6%



Результаты, полученные в расчете, показывают, что «классическое» качественное понимание картины пожара, основывающейся, как правило, на принципе «чем больше наклон тоннеля, тем быстрее происходит блокирование» при определенных условиях может не соответствовать действительности. В самом деле, из представленных графиков расчета видно, что в некоторые моменты времени меньшие значения уклона дают большее блокированное расстояние. При этом, такое блокирование наступает «внезапно» только через несколько минут после начала пожара («накрывание»), тогда как блокирование участков тоннеля для больших значений уклона происходит последовательно и наступает уже в первые минуты. В этой связи, при определенных условиях (например, значительное время начала эвакуации, большое расстояние до эвакуационных выходов) небольшие значения уклона могут быть даже более опасны с точки зрения распространения ОФП, особенно с учетом распространения ОФП в обе стороны от очага пожара.

Обобщенные данные по всем вариантам расчета уклона представлены на рисунке 10.

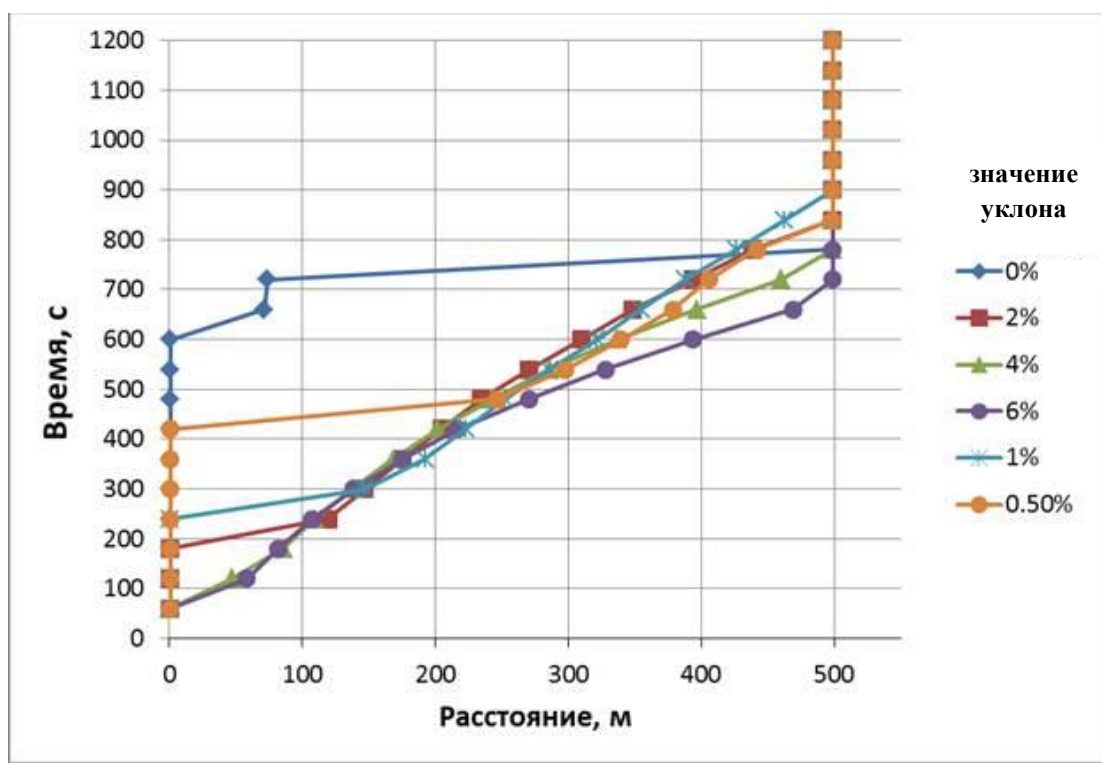


Рисунок 10 – Зависимость времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных вариантов уклона тоннеля

**Мощность очага пожара.** Для оценки влияния мощности тепловыделения на процесс развития пожара в настоящей работе проводилось моделирование для следующих значений максимальной мощности: 10, 25, 50, 100 МВт. В качестве топлива был выбран бензин.

Мощность тепловыделения с течением времени определялась в соответствии с зависимостью:

$Q = 2000000 + \alpha \cdot t$  [Вт], где коэффициент  $\alpha$  изменялся для разных значений мощности пожара в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Значение коэффициента  $\alpha$  в зависимости от максимальной мощности тепловыделения

Максимальная мощность тепловыделения, МВт	Значение коэффициента $\alpha$
10	8888,9
25	25555
50	53333,3
100	108888,8

Полученные данные в виде обобщенного графика зависимости времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных значений мощности тепловыделения представлены на рисунке 11.

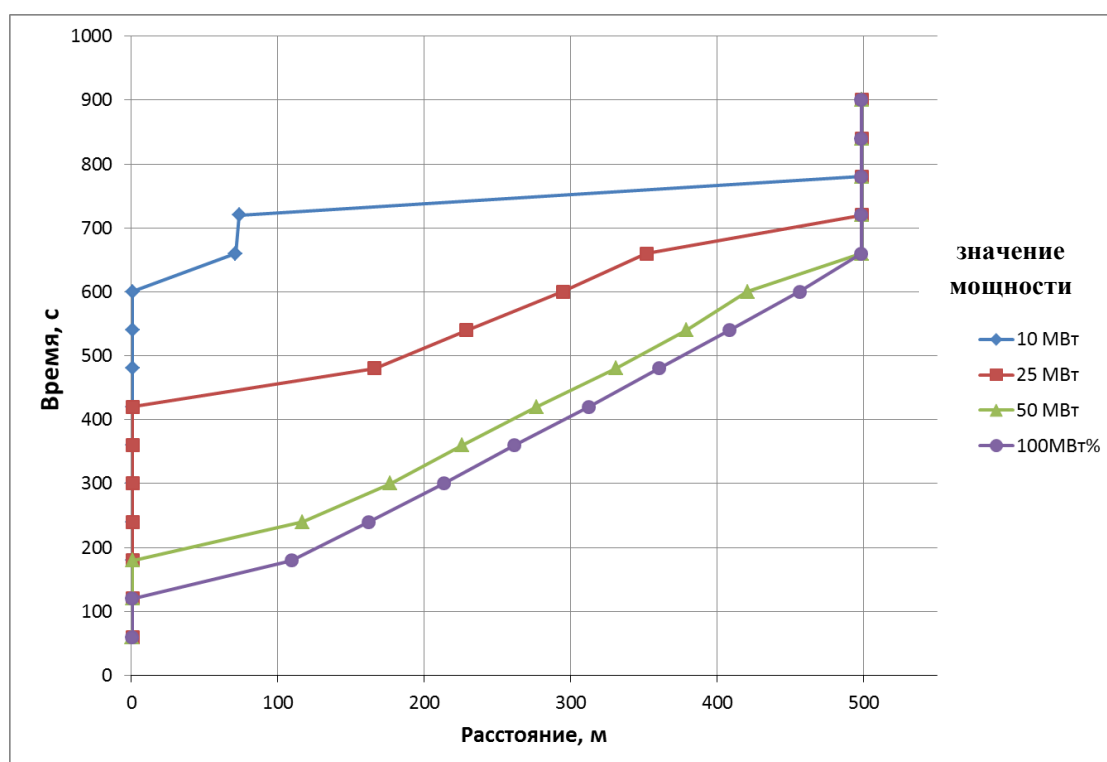


Рисунок 11 – Зависимость времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных вариантов мощности тепловыделения очага пожара

В качестве основных выводов по исследованию влияния показателя максимальной мощности пожара можно отметить:

- наличие некоторого «предельного» показателя, по достижении которого дальнейшее повышение максимальной мощности не будет оказывать существенного влияния на характеристики блокирования путей эвакуации (близкие параллельные графики для 50 и 100 МВт);

- возможность более высокой скорости блокирования участков тоннеля для вариантов расчета с меньшей мощностью, что может быть важно, например, для условий эвакуации с условно большим временем, требующимся для ее начала. При интерпретации полученных результатов замечена некоторая аналогия с расчетом влияния уклона в том смысле, что распространение пожара и быстрое блокирование путей эвакуации для различных вариантов расчета в каждом из случаев на начальном этапе становится более интенсивным для более высоких показателей (как уклона таки и мощности очага), а далее с течением времени влияние более низких показателей также становится значительным.

**Ширина тоннеля.** Следующей исследуемой характеристикой, имеющей важное значение при распространении опасных факторов пожара, является геометрия рассматриваемого сооружения. Была проведена оценка влияния ширины тоннеля на общую картину распространения ОФП. С учетом этого, было рассмотрено четыре варианта ширины тоннеля при размещении в нем от одной до четырех полос движения. Моделирование, при этом, проводилось для следующих значений ширины тоннеля – 5, 10, 15 и 20 м.

В качестве топлива был выбран бензин. Максимальная мощность пожара принималась равной 10 МВт. Параметры очага пожара и расчетных сеток были выбраны в соответствии с предыдущими вариантами расчетов.

Зависимости времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных значений ширины тоннеля, а также заблокированного расстояния в тоннеле от времени для различных вариантов ширины тоннеля представлены на рисунках 12 и 13.

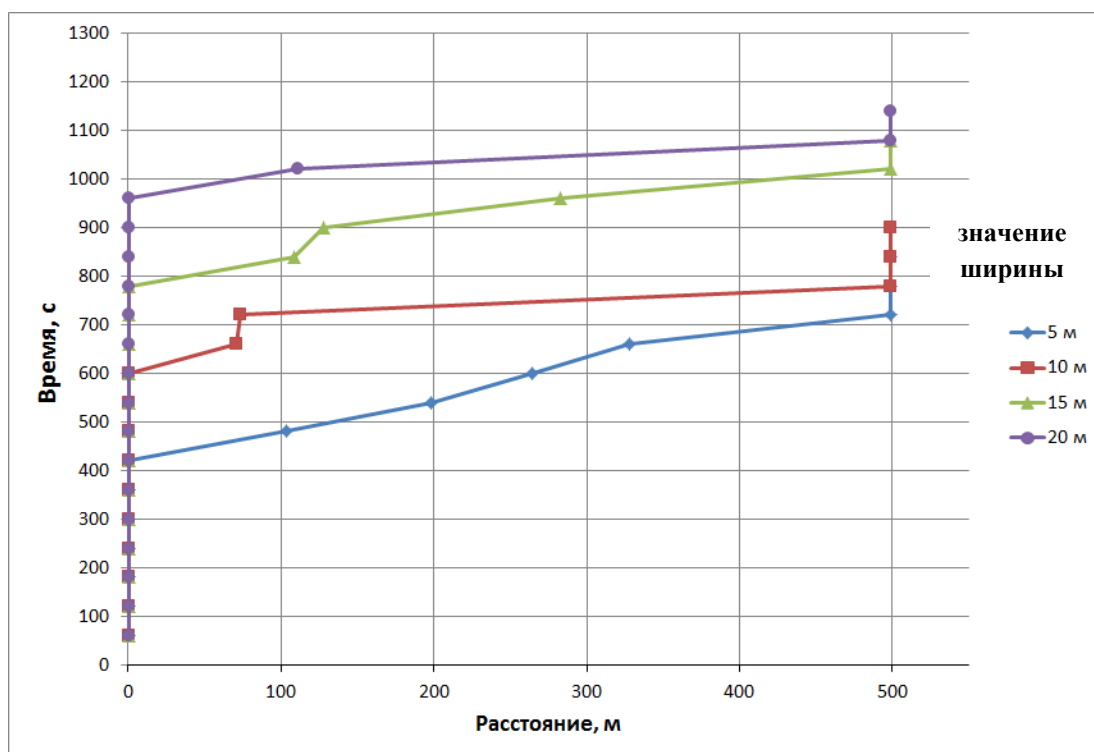


Рисунок 12 – Зависимость времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных значений ширины тоннеля

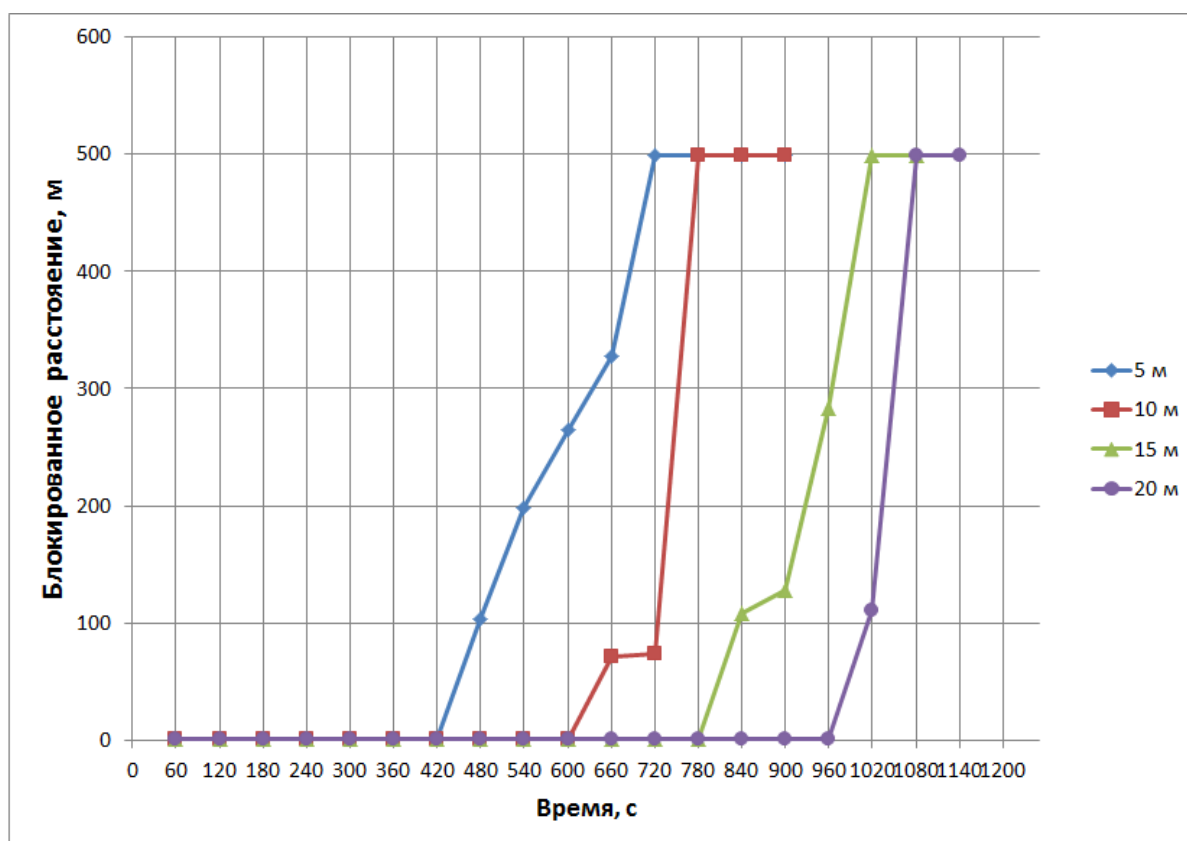


Рисунок 13 – Зависимость блокированного расстояния в тоннеле от времени для различных вариантов ширины тоннеля

Полученные результаты показывают, что наименьшие времена блокирования модельного тоннеля наблюдаются для первого варианта расчета, где ширина тоннеля, и, следовательно, его объем минимальны. Даже при сравнительно невысокой мощности очага пожара в 10 МВт участки тоннеля начинают блокироваться достаточно быстро, а весь тоннель оказывается задымленным через 12 минут после начала пожара. Отсюда следует, что наличие в тоннеле лишь одной полосы для движения, с точки зрения пожарной безопасности, требует тщательной оценки на предмет целесообразности такого решения. Аварийность в такого рода сооружениях может быть ниже, кроме того, параметры высоты также могут отличаться от рассмотренных в расчете (что в конечном итоге влияет на объем сооружения). Однако, наличие дополнительных неблагоприятных факторов (возможность возникновения затора при аварии, наличие уклона) может оказывать решающую роль при возникновении пожара в рассмотренных условиях и требует проработки дополнительных решений по противопожарной защите – уменьшение расстояния между эвакуационными сбойками, наличие инженерных систем и т.д.

В качестве основных выводов по исследованию ширины тоннеля отмечены:

- значительная опасность тоннелей небольшой ширины (однополосных) в сочетании с низким значением площади поперечного сечения. Необходимость проработки дополнительных мероприятий с точки зрения пожарной безопасности (ограничение возможной горючей нагрузки, установка

дополнительных инженерных систем, организационные мероприятия по снижению аварийности);

- эффективность увеличения ширины тоннеля, начиная с определенного значения (зависящего, в том числе от иных характеристик поперечного профиля), которая может быть сравнима с иными мероприятиями, в частности с установкой системы противодымной вентиляции.

Результаты проведенного моделирования влияния различных характеристик тоннеля на процесс распространения ОФП являются схожими, а именно наиболее экстремальные значения рассмотренных характеристик приводят к более быстрому последовательному блокированию участков путей эвакуации в первые минуты пожара, однако, в последующие моменты времени (8 и более минут) расстояния, блокированные опасными факторами для любых значений рассматриваемых характеристик могут фактически выравниваться, что является существенным при проектировании эвакуационных путей с учетом времени начала эвакуации.

Основные выводы по третьей главе работы:

1) Выбор расчетной сетки является важным этапом для моделирования пожара, поскольку позволяет с одной стороны оптимизировать проведение расчетов, а с другой стороны добиться их приемлемой точности.

2) Граничное условие постоянства давления играет существенную роль для процесса моделирования пожара в тоннеле. Наилучшим вариантом при этом является задание внешних областей и установка такого условия на их границах. Однако, указанное условие при необходимости может быть установлено на границе портала тоннеля. При этом полученные результаты (значения опасных факторов) будут иметь более высокие значения, что является некоторым запасом, с точки зрения пожарной безопасности.

3) Рассмотренные расчетные характеристики (уклон и ширина тоннеля, мощность тепловыделения) оказывают существенное влияние на распространение ОФП при пожаре в тоннеле.

4) Наиболее экстремальные значения рассмотренных характеристик приводят к более быстрому последовательному блокированию участков путей эвакуации в первые минуты пожара, однако, в последующие моменты времени (8 минут и более) расстояния, блокированные опасными факторами для любых значений рассматриваемых характеристик могут фактически выравниваться, что является существенным при проектировании эвакуационных путей с учетом времени начала эвакуации. При этом необходимо отметить, что на указанный результат имеет определенное влияние постановка граничного условия.

**В четвертой главе** работы приведена информация об объектах, на которых были использованы результаты и методы расчетов, описанные в диссертации. К указанным объектам относятся:

1) Автодорожный тоннель №6 на участке обхода г. Сочи автодороги Джубга-Сочи;

2) Тоннель «Скальный» на км 23+370 автомобильной дороги А-149 Адлер-Красная Поляна;

3) Тоннель «Мацестинский» на км 0+375 автомобильной дороги А-147 Джубга-Сочи – граница с Республикой Абхазия (Обход г. Сочи);

4) Межтерминальный переход между СТК и ЮТК аэропорта Шереметьево;

5) Участок Краснопресненского проспекта от МКАД до проспекта Маршала Жукова (Серебряноборские тоннели).

Для данных объектов с учетом результатов диссертационной работы были разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности и проектные решения, обеспечивающие безопасную эвакуацию людей при пожаре, в том числе:

- подтверждено безопасное расстояние между эвакуационными сбойками;
- доказана необходимость применения поперечной схемы противодымной вентиляции;

- произведен выбор наиболее оптимальных объемно-планировочных решений – определены геометрические параметры поперечного профиля, подтверждена возможность безопасной эвакуации при существующей совокупности проектируемых уклонов, установлена максимально допустимая мощность тепловыделения при возникновении пожара, определяющая соответствующие организационные мероприятия.

В **заключении** обобщены основные научные и практические выводы диссертационного исследования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Выбрана и сформулирована математическая расчетная модель с целью прогнозирования влияния различных характеристик на распространение ОФП в автодорожном тоннеле.

2. Проведены эксперименты по изучению динамики пожара на разработанной модели тоннеля и получены новые экспериментальные данные по полям температур, необходимые для апробации указанной математической модели.

3. Проведена апробация математической модели на основе полученных экспериментальных данных, а также на основе данных натурных испытаний в тоннеле Metoial (США). Получены удовлетворительные результаты и сделан вывод о возможности использования выбранной математической модели для прогнозирования распространения ОФП в автодорожных тоннелях.

4. Проведено моделирование нескольких сценариев развития пожара с целью выбора оптимальной расчетной сетки и указано на важность такого выбора.

5. Проведено численное моделирование для тоннеля прямоугольного сечения длиной 700 м, и проведена расчетная оценка влияния различных характеристик на распространение ОФП. В качестве таких характеристик выбраны уклон, ширина тоннеля и мощность тепловыделения очага пожара. Для

каждой из характеристик проведено несколько вариантов расчета и получены данные численного эксперимента.

6. В рамках численного эксперимента получено, что наиболее экстремальные значения рассмотренных характеристик приводят к более быстрому последовательному блокированию участков путей эвакуации в первые минуты пожара, однако, в последующие моменты времени (10 и более минут) расстояния, заблокированные опасными факторами для любых значений рассматриваемых характеристик могут фактически выравниваться, что является существенным при проектировании эвакуационных путей с учетом времени начала эвакуации.

7. При проведении расчета установлено, что существенную роль для процесса моделирования пожара в тоннеле играет граничное условие постоянства давления. Наилучшим вариантом при этом является задание внешних областей и установка такого условия на их границах. Однако, указанное условие при необходимости может быть установлено на границе портала тоннеля. При этом полученные результаты (значения опасных факторов) будут иметь более высокие значения, что является некоторым запасом, с точки зрения пожарной безопасности.

8. На основании полученных результатов разработаны практические рекомендации для проектирования системы пожарной безопасности нескольких автотранспортных тоннелей России.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях из перечня ВАК:**

1. Барановский, А.С. Численное моделирование пожара в автодорожном тоннеле. Выбор расчетной сетки / А.С. Барановский, И.А. Болодьян, С.В. Пузач // Пожарная безопасность – 2021. – № 3. – С. 47-54.

2. Барановский, А.С. Применение численного моделирования для оценки влияния продольного уклона в автотранспортном тоннеле на распространение опасных факторов пожара / А.С. Барановский, И.А. Болодьян, С.В. Пузач // Пожарная безопасность – 2021. – № 4. – С. 31-39.

3. Барановский, А.С. Оценка противопожарных расстояний между объектами различного назначения с учетом охлаждения наружных поверхностей / А.С. Барановский [и др.] // Пожарная безопасность – 2021. - №1. – С. 60-66.

**Остальные публикации по теме диссертации:**

4. Барановский, А.С. К вопросу обеспечения безопасности людей при пожаре в транспортных тоннелях / А.С. Барановский, И.А. Болодьян, А.Н. Бородкин, А.В. Карпов, Д.В. Ушаков, А.А. Абашкин // X Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы регулирования природной и техногенной безопасности в XXI веке». – М.: ЦСИ, МЧС России, 2005 г. – С. 52-58.

5. Baranovski, A.S. CFD Modelling of Fires in Full-Scale Tunnels / A.S. Baranovski, I.A. Bolodian, A.N. Borodkin, A.V. Karpov, D.V. Ushakov, A.A.

Abashkin // Fourth International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Paris – France, May 17-20, 2005. – pp 668-672.

6. Барановский, А.С. Полевое моделирование динамики пожара в полномасштабном тоннеле. Сравнение с экспериментом / А.С. Барановский, И.А. Болодьян, А.Н. Бородкин, А.В. Карпов, А.А. Абашкин // Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений. Материалы XIX научно.-практической конференции. ВНИИПО., Москва, 2005. – Ч1. – С. 5-8.

7. Baranovski, A.S. Peculiarities of computational assessment of people safety at road tunnels / A.S. Baranovski, I.A. Bolodian, A.N. Borodkin, A.V. Karpov, D.V. Ushakov, A.A. Abashkin // Proc. of International Symposium on Safety Science and Technology, Beijing, China, September 24-27. – 2008. – pp 636-647.

8. Барановский, А.С. Особенности расчетной оценки риска для людей при пожаре в автодорожных тоннелях / А.С. Барановский, С.В. Усолкин, А.В. Карпов, Д.В. Ушаков, А.А. Абашкин, М.В. Фомин // В сборнике: Школа молодых ученых и специалистов МЧС России – 2015. Сборник статей по материалам научно-практической конференции. – 2015. – С. 101-103.

9. Барановский, А.С. Моделирование развития пожара в автодорожных тоннелях: возможности и перспективы развития / А.С. Барановский, И.А. Болодьян, А.В. Карпов // «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и гражданской обороны в период третьей модернизации Казахстана». Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Алматы, 2017. – С.58-61.

10. Барановский, А.С. Исследование распространения опасных факторов пожара в автодорожном тоннеле с помощью полевого метода математического моделирования // «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию создания первого в Республике Беларусь научного подразделения в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и пожаров. – Минск. – 2021. – С. 44-48.

Подписано в печать 28.06.2022. Формат 60×84 1/16

Печать офсетная. Печ. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ №506.

Академия ГПС МЧС России, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4