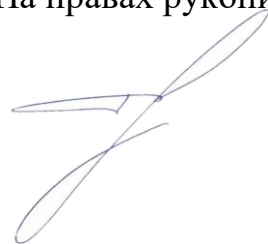


МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ
СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки
Российской Федерации,
доктор технических наук,
профессор Пузач Сергей Викторович

МОСКВА 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ПОЖАРЫ В АВТОТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЯХ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	14
1.1. Объемно-планировочные и конструктивные решения сооружений тоннелей и их влияние на обеспечение пожарной безопасности.....	14
1.2. Пожары в автотранспортных тоннелях. Причины, последствия.....	17
1.3. Система пожарной безопасности автотранспортных тоннелей.....	22
1.4. Влияние характеристик автодорожных тоннелей на обеспечение их пожарной безопасности. Особенности эвакуации людей.....	31
1.5. Прогнозирование распространения опасных факторов пожара с помощью методов численного моделирования. Уравнения полевой модели	33
1.6. Прогнозирование распространения опасных факторов пожара в тоннелях. Обзор существующих исследований	51
ГЛАВА 2. ФОРМУЛИРОВКА И АПРОБАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В РАМКАХ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SOFIE. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ	65
2.1 Формулировка математической модели программного комплекса SOFIE ..	65
2.2 Эксперименты на модели тоннеля.....	68
2.2.1 Постановка, методика и результаты экспериментов.....	68
2.2.2 Численное моделирование эксперимента	75
2.3 Эксперимент в тоннеле Memorial (США).....	80
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ТОННЕЛЕ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	85
3.1 Выбор расчетной сетки.....	86
3.2 Исследование влияния уклона тоннеля.....	90
3.3 Исследование влияния мощности тепловыделения	103

3.4 Исследование влияния ширины тоннеля	113
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
Список сокращений и условных обозначений	129
Список литературы.....	129
Приложение А (обязательное) Профили температуры для различных размеров расчетных сеток.....	144
Приложение Б (обязательное) Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	150

ВВЕДЕНИЕ

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, состоящим из нескольких тоннелей, предназначенных для перемещения пассажиров и багажа между терминалами аэропорта. В этом случае характерно, что тоннели размещены под взлетно-посадочной полосой, а строительство и последующая эксплуатация осуществлялись без нарушения режима работы как аэропорта в целом, так и взлетно-посадочной полосы в частности.

Тоннели также строятся там, где есть необходимость преодолеть естественные препятствия, такие как озера, реки, проливы или горы. Первый Европейский туннель был построен более 160 лет назад. В настоящее время общая протяженность действующих транспортных тоннелей по всей Европе превышает 15000 км [1].

В России, особенно в крупных городах с необходимостью развития сети автодорог, количество тоннелей также значительно возросло. Тоннельное строительство стало особенно активным за последние 15-20 лет. Одним из примеров необходимости тоннельного строительства, связанного преодолением естественных препятствий является инфраструктурное строительство в г. Сочи в рамках подготовки к Зимней олимпиаде 2014 г. Можно предположить, что тенденция увеличения темпов строительства тоннелей будет продолжаться и далее.

Естественно, что для таких объектов как автотранспортные тоннели очень важен высокий уровень безопасности и надежности. Одновременно, с ростом количества, длины тоннелей, а также скорости движения и плотности транспортного потока, чрезвычайные происшествия в тоннелях случаются все более часто. 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 [2], 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.

Объектами пожара, в первую очередь, являются сами транспортные средства. В автодорожных тоннелях это легковые и грузовые автомобили, автопоезда, автоцистерны, автобусы, мотоциклы. Например, в 1968 г. в тоннеле Мурфлит (ФРГ) пожар возник из-за перегрева и загорания шины колеса грузового автомобиля [3]. После остановки автомобиля огонь перекинулся на кузов с перевозившимся гранулированным полиэтиленом. Водителю не удалось потушить очаг пожара огнетушителем, и к моменту прибытия специальных подразделений тоннель уже был задымлен на всем протяжении в обе стороны от очага пожара.

Серьезные пожары не только чрезвычайно опасны для людей и часто приводят к полному разрушению автомобилей, но и наносят большой ущерб конструкциям тоннеля (Рисунок 1), требующий проведения сложных работ по его восстановлению. Прежде всего, это происходит в результате быстрого и интенсивного тепловыделения, в некоторых случаях с отколом бетона с поверхности из-за агрессивного воздействия горячих газов. И даже в случае если воздействия пожара на стабильность конструкции тоннеля удастся избежать, несомненно, что тоннель не сможет функционировать в течение длительного времени. Например, после пожара тоннель Tauern не работал более трех месяцев. В случае тоннеля под Монбланом период закрытия продолжался около 3 лет и

включил в себя комплекс работ по модернизации и переоснащению всего тоннеля, а также изменения концепции эвакуации людей и работ по спасению, которые явились следствием проведенных исследований, предпринятых властями. Очевидно, что невозможность использования такой важной части транспортной инфраструктуры как тоннель ведет к ощутимым экономическим потерям.



Рисунок 1 – Последствия пожара в тоннеле Mont-Blanc, 1999

Простой Евротоннеля после пожара продолжался 6 месяцев, а движение грузов отсутствовало 7 месяцев; ущерб от простоя, включая стоимость ремонтных работ, составил приблизительно 300 млн евро [1]. Действительно, убытки от пожаров в тоннелях, а также затраты на их восстановление составляют значительную величину (Таблица 1).

Таблица 1 – Убытки от пожаров в тоннелях

Тоннель	Ущерб от простоя, млн. евро	Затраты на ремонт и модернизацию, млн. евро	Всего, млн. евро
Евротоннель	211	87	298
Тоннель под Мон-Бланом	203	189	392
Тоннель Тауэрн	18,5	6,2	24,7

Серьезное количество пожаров в тоннелях Европы, приведших к людским потерям и значительным строительным повреждениям, побудило ряд стран на создание национальных программ их экспериментального изучения. В странах Европы, а также в США были проведены исследования и натурные испытания по изучению развития пожаров и аварий в автодорожных тоннелях. Одними из таких испытаний являются эксперименты, проведенные в Германии, Норвегии и Финляндии (проект Eureka) [4] и США (Memorial Tunnel) [5]. Кроме того, с 2001 по 2006 гг. в Европе была реализована комплексная программа по исследованию безопасности тоннелей. Основные проекты, входящие в эту программу (FIT, DARTS, Safe Tunnel, Sirtaki, Virtual fires, UPTUN, SafeT) имели различное назначение. В частности, это исследования чрезвычайных ситуаций в тоннелях, изучение различных аспектов их безопасности, исследования и разработки по совершенствованию существующих тоннелей и т.п. Однако, основной целью указанных исследований являлась работа по разработке и утверждению общеевропейских нормативных требований по обеспечению безопасности в тоннелях – SafeT.

Кроме совместной европейской программы по изучению и повышению безопасности тоннелей некоторые страны имеют собственные проекты, направленные на исследование пожаров в тоннелях.

Наряду с натурными испытаниями в реальных тоннельных сооружениях проводятся эксперименты на мелкомасштабных моделях тоннелей. В конечном итоге, целью исследований таких проектов является изучение закономерностей развития пожаров в тоннелях, прогнозирование параметров газовой среды, определение температурных полей и т.д. для проектирования оптимальной системы противопожарной защиты тоннелей. Однако, при этом необходимо помнить о том, что невозможно спроектировать универсальную систему противопожарной защиты для любого тоннеля. Каждое из таких сооружений 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. Вместе с тем, проведение полномасштабных натурных испытаний для каждого 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 и выбора оптимальных параметров систем защиты тоннеля. Это позволит обеспечить пожарную безопасность объекта с учетом его индивидуальных особенностей.

Степень разработанности темы исследования. В последние годы и в настоящее время теме противопожарной защиты автодорожных тоннелей уделяется большое внимание (Беляцкий В.П. [27], Болодьян И.А. [35,52], Голиков А.Д. [6-8], Давыдкин Н.Ф. [9,10,51], Есин В.М. [41,42], Зотов Ю.С. [40], Карпов А.В. [35, 36, 106, 107], Копылов Н.П. [9], Пузач С.В. [109], Рыжов А.М. [69, 71, 107, 108], Страхов В.Л. [10-11]) Однако, количество отечественных исследований в рамках пожарной безопасности автодорожных тоннелей вообще и моделирования пожара в тоннелях в частности не так значительно как за рубежом (Carvel R. [12], Fan C. [84, 87, 90, 92], Haack A. [1, 4], Ingason H. [83, 104], Tanaka F. [86, 93], Tuovinen H. [60, 72, 78], Zhang L [89, 92]).

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 влияние тех или иных параметров тоннеля на характер их распространения.

Однако, рассматриваемые работы, основанные на применении методов математического моделирования, как правило, используют устаревшие модели, либо модели и программные комплексы, не апробированные на результатах натурных 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 – пути эвакуации, геометрические параметры тоннеля, допустимые виды транспортных средств 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.

Задачами исследования являлись:

- 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 экспериментов на модели тоннеля;
- апробация математической модели на основе сравнения с данными экспериментов;
- численное моделирование распространения ОФП в тоннеле с целью исследования влияния геометрических характеристик (уклона и ширины) и мощности тепловыделения на распространение ОФП;
- анализ полученных результатов расчетов для возможности выполнения оптимальных проектных решений автотранспортных тоннелей и повышения уровня их пожарной безопасности;

- анализ оптимальной постановки задачи для ее численного решения;
- 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:

1. На модели тоннеля получены новые экспериментальные данные по распространению ОФП в тоннеле, позволяющие апробировать полевую математическую модель.
2. Сформулирована математическая модель расчета, описывающая развитие пожара в автотранспортном тоннеле, и проведена ее апробация на основе сравнения с данными эксперимента.
3. 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 и практическая 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;
- 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 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 с целью оптимизации их проектных решений;
- результаты численного моделирования пожара в тоннеле при различных значениях его проектных характеристик;
- результаты анализа влияния уклона и ширины тоннеля, а также мощности очага пожара на распространение ОФП;
- возможность использования результатов анализа для оптимизации проектных решений автотранспортных тоннелей для повышения уровня их пожарной безопасности.

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. 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» и др.

Практическая реализация результатов работы. 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, из них 3 в рецензируемых 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.

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 приводится классификация и особенности объемно-планировочных решений и инженерных систем тоннелей, влияющих на развитие пожара, описаны наиболее интересные и значимые случаи с пожарами в тоннелях. Рассмотрены основные причины и последствия указанных пожаров, а также основные системы противопожарной защиты, применяемые в данных

сооружениях. В этой же главе приводится описание математических моделей, используемых для расчета распространения ОФП на объектах различного назначения, и оценена их пригодность для таких расчетов в сооружениях автодорожных тоннелей, а также рассматривается подробное описание дифференциальной (полевой) математической модели – приводятся основные уравнения математической модели, подмоделей турбулентности, горения, радиационного теплопереноса. В заключение первой главы приводится обзор работ, посвященных исследованию и прогнозированию характеристик пожара в тоннелях.

Вторая глава посвящена сравнению экспериментальных данных и результатов численных расчетов, проведенных с помощью полевой модели. В качестве основы для моделирования использованы данные экспериментов (проведенных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России на модели тоннеля и данные о пожарных испытаниях в реальном тоннеле (США)). Приведены основные результаты апробации модели и сделан вывод о ее пригодности.

В **третьей главе** работы рассматривается влияние различных факторов на распространение ОФП в модельном тоннеле. Для исследования используются данные, полученные на основе математического моделирования. Рассматриваются и обсуждаются результаты проведенных расчетов, формулируются выводы.

В **четвертой главе** диссертации дано описание реальных объектов, на которых были применены результаты диссертационной работы, а также приведены объемно-планировочные решения автотранспортных тоннелей, оценка которых может быть проведена на основании указанных результатов.

В **заключении** описаны основные результаты работы. Приведены выводы относительно возможности применения полевого моделирования для прогнозирования распространения ОФП в автотранспортных тоннелях, пригодности и области применения рассмотренной математической модели, влияния различных характеристик на распространение ОФП и выбора оптимальных характеристик системы противопожарной защиты.

ГЛАВА 1. ПОЖАРЫ В АВТОТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЯХ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей главе приводится классификация и особенности объемно-планировочных решений и инженерных систем тоннелей, влияющих на развитие пожара, описаны наиболее интересные и значимые случаи с пожарами в тоннелях, рассмотрены причины и последствия этих случаев. Далее изложены существующие методы прогнозирования распространения опасных факторов пожара (ОФП) путем численного моделирования, приведены основные зависимости и положения полевого (CFD) метода моделирования. Кроме того, представлен обзор работ, связанных с исследованиями пожаров в тоннелях, рассмотрены их выводы и сделаны предположения относительно существующих проблем, связанных с проектированием системы противопожарной защиты рассматриваемых сооружений.

1.1. Объемно-планировочные и конструктивные решения сооружений тоннелей и их влияние на обеспечение пожарной безопасности

Современные подземные сооружения – это капитальные строения, рассчитанные на длительный срок эксплуатации, как правило, составляющий более 100 лет. В течение этого срока они должны удовлетворять требованиям надежности, долговечности и безопасности. Одним из видов таких сооружений являются тоннели.

Тоннелем называют горизонтальное или наклонное подземное искусственное сооружение, предназначенное для транспорта, пропуска воды, размещения коммуникаций и других целей, длина которого значительно превышает поперечные размеры. Тоннели классифицируются по назначению и положению относительно земной поверхности [9].

По назначению тоннели делятся на: 1 – тоннели на путях сообщения; 2 – тоннели гидротехнические; 3 – тоннели коммунальные; 4 – тоннели горнопромышленные; 5 – тоннели специальные.

Наибольшее распространение из них имеют тоннели на путях сообщения, к которым относят тоннели метрополитенов, железнодорожные, автодорожные (автотранспортные), судоходные и пешеходные тоннели, а также тоннели для нескольких видов транспорта. В настоящей работе рассматриваются тоннели, предназначенные для движения автотранспорта (автодорожные тоннели).

По положению относительно рельефа местности тоннели делятся на горные, подводные и равнинные. К последним относят в основном городские тоннели (метрополитены, автотранспортные, пешеходные и т.п.).

Глубина заложения тоннеля в значительной степени влияет на его конструкцию и способы постройки. Как правило, различают тоннели, сооружаемые со вскрытием поверхности или без вскрытия, то есть сооружаемые открытым или закрытым способом. При открытом способе с поверхности раскрывают котлован глубиной до 15 м, в котором сооружают конструкцию тоннеля с последующей обратной засыпкой и восстановлением поверхности. При закрытом способе работ разработку породы (проходку) и возведение обделки выполняют без нарушения земной поверхности через входные участки тоннеля (порталы) или стволы шахт. При этом в зависимости от конкретных условий применяют горный или щитовой способ. В первом случае сечение выработки разрабатывается за один прием или по частям с последующим сооружением обделки, во втором – используется специальное устройство (щит), которое может быть как механизированным, так и с применением домкратов. Характерно, что для тоннелей мелкого заложения также может быть использован закрытый способ работ.

Способы строительства и виды тоннелей определяют основные объемно-планировочные и конструктивные особенности данных сооружений, непосредственно влияющих на распространение опасных факторов при возникновении пожара. Так, перевальные тоннели, как правило, устраивают по прямой, тогда как мысовые

тоннели имеют радиус кривизны, что может значительно снижать видимость при движении в тоннеле, а также ухудшать их проветриваемость.

В продольном профиле тоннели устраивают односкатными и двускатными. Односкатные профили используются для тоннелей, устраиваемых при развитии линии для набора высоты (петлевые, спиральные), а также для коротких перевальных тоннелей. Двускатный профиль имеют перевальные и подводные тоннели. Очевидно, что характер продольного профиля является одной из важнейших характеристик с точки зрения развития пожара. В совокупности с наличием уклона и конкретными параметрами профиля (угол наклона, радиус кривизны), он может в значительной степени влиять как на процесс эвакуации людей, так и на возможности работы систем противопожарной защиты, например, дымоудаления. В частности, при проектировании автотранспортных тоннелей желательно располагать их на прямых, поскольку при расположении на кривых имеют место следующие недостатки: необходимость увеличения ширины проезжей части с устройством виражей, ухудшение видимости, особенно важное, при наличии встречных потоков. Поэтому, при необходимости наличия радиуса кривизны предпочтительно выполнять его максимальным. Продольный профиль тоннеля проектируют с учетом возможности улучшения естественной тяги воздуха, достигаемой за счет разности высот порталов. Поэтому горные тоннели небольшой длины (как правило, менее 300 м) обычно имеют односкатный профиль, обеспечивающий условия естественного проветривания. Напротив, двускатные тоннели обеспечивают естественную тягу только при наличии вентиляционных шахт.

Влияние геометрических характеристик также имеет место при выборе строительства между двухпутным и двумя однопутными тоннелями. В частности, сооружение двух тоннелей с односторонним движением имеет ряд преимуществ, к основным из которых можно отнести меньшую вероятность аварийных ситуаций, лучшую проветриваемость, возможность обеспечения безопасной эвакуации в соседний тоннель и т.д.

Таким образом, особенности основных объемно-планировочных и конструктивных характеристик автодорожных тоннелей играют существенную роль при проектировании системы их противопожарной защиты, главным образом, таких аспектов как: возможность безопасной эвакуации, удаление продуктов горения, возможность эффективной работы пожарных подразделений.

1.2. Пожары в автотранспортных тоннелях. Причины, последствия

Пожары в тоннелях, как правило, являются следствием возгораний транспортных средств, движущихся в тоннеле, 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). При этом по данным статистических исследований, проведенных в Японии, ДТП в тоннелях в 1,4 раза чаще приводят к пожарам, чем на скоростном шоссе [14]

В качестве примеров крупных пожаров в тоннелях можно привести несколько наиболее известных случаев.

В 1979 г. в автодорожном тоннеле Ниходзака между Токио и Нагойей (Япония) длиной около 2 км на расстоянии 400 м от портала произошла авария, что привело к множественным столкновениям автомобилей и возникновению пожара. В результате аварии 7 человек погибли и 2 тяжело ранены; повреждено 173 автомобиля, причем некоторые полностью уничтожены пожаром. Во время пожара возникло сильное задымление, а на участке тоннеля длиной более километра температура достигала 1000 °С. В тоннеле была предусмотрена спринклерная система пожаротушения и пожарный водопровод, но это не помогло ограничить развитие пожара [15]. После пожара отмечены значительные повреждения обделки с разрушением бетона на глубину до 25 см. Восстановление тоннеля длилось 2 месяца.

В тоннеле Холланд (США) возник пожар в кузове автомобиля, перевозившего сероуглерод. В результате интенсивного горения с длинными

языками пламени один за другим воспламенились автомобили, и очаг пожара охватил зону на расстоянии до 100 м от аварийной машины. Высокая температура, плотный и токсичный дым затрудняли работу пожарных подразделений. Людей удалось эвакуировать из опасной зоны, но автомобили в ее пределах полностью сгорели. Из-за перегрева вышло из строя две трети вытяжных вентиляторов, были разрушены некоторые конструкции тоннеля.

24 марта 1999 г. произошел пожар в тоннеле под Монбланом (Франция-Италия). Данный тоннель имеет двустороннее движение, его длина составляет 11,6 км. Тоннель был оборудован аварийными щитами, размещенными на расстоянии 300 м друг от друга и 18 укрытиями на расстоянии 600 м друг от друга. В эти укрытия обеспечивалась подача воздуха, и они могли противостоять воздействию пожара приблизительно на протяжении 2 ч. Пожар возник на грузовике, перевозившем 9 т маргарина и 12 т муки. Автомобиль следовал из Франции и остановился на расстоянии 6700 м от портала. Быстро разгорелся сильный пожар, который перекинулся на 23 грузовика и 10 легковых автомобилей. Пожар продолжался 53 ч. 29 человек из 39 погибших были найдены в своих автомобилях, 9 – в тоннеле или в укрытиях, которые не были рассчитаны на то, чтобы противостоять такому сильному пожару. Один из пожарных скончался от полученных на пожаре повреждений. Подробное описание пожара дано в [16,17].

Два месяца спустя 29 мая 1999 г. произошел еще один сильный пожар в австрийском тоннеле Tauern длиной 6400 м. В этом туннеле также было организовано двустороннее движение. В нем было установлено 30 аварийных щитов на расстоянии 212 м друг от друга, 61 щит с огнетушащим оборудованием через каждые 106 м и предусмотрено 7 противопожарных разрывов через каждые 750 м. К моменту происшествия в туннеле велись строительные работы, место которых было оборудовано светофором, регулирующим движение транспорта. Грузовик, двигавшийся с южной стороны, выехал на большой скорости на разделительную полосу и толкнул 4 автомобиля под грузовик, стоящий перед ними. В результате аварии погибли 8 человек, а один из грузовиков загорелся.

Попытки потушить пожар не увенчались успехом. В результате пожар перекинулся на грузовик, частью груза которого были аэрозольные баллоны с лаком для волос. В результате пожара были разрушены всего 14 грузовиков и 26 легковых автомобилей, 12 человек погибли, а 46 человек получили ранения.

Еще два серьезных пожара с гибелью людей произошли в 2001 году в тоннелях Европы: 6 августа в тоннеле Gleinalm (Австрия) длиной 8,3 км и 24 октября в тоннеле Сент Готтард (Швейцария) длиной около 17 км. В обоих случаях причиной пожара стало лобовое столкновение в туннеле с двусторонним движением. В первом случае автомобиль столкнулся с едущим навстречу миниавтобусом, поскольку водитель отвлекся от вождения из-за того, что двое его детей спорили на заднем сидении автомобиля. Оба автомобиля сразу же загорелись, и пять человек погибли. Пожар в тоннеле Сент Готтард, вероятно, начался из-за того, что водитель одного из грузовиков был сильно пьян. Этот водитель не справился с управлением своего грузовика и столкнулся с едущим навстречу грузовиком. Оба грузовика сразу же загорелись. Пожар развивался чрезвычайно быстро, он сопровождался сильным выделением дыма из-за соответствующей пожарной нагрузки. Один грузовик перевозил шины, другой – пластмассовые изделия. К концу пожара погибли 11 водителей, сгорели 13 грузовиков, 4 автофургона и 6 автомобилей. Подвесной потолок, отделяющий вентиляционные каналы от области движения транспорта разрушился на участке до 250 м.

Конечно, кроме описанных крупных пожаров, в автодорожных тоннелях имели место и множество других случаев менее масштабных пожаров, которые только подчеркивают актуальность настоящей работы.

В частности, в 2004 году случай пожара был зафиксирован в одном из недавно построенных тоннелей в г. Москве. Характерной особенностью данного происшествия является то обстоятельство, что тоннель был оборудован полным комплексом систем противопожарной защиты. Вместе с тем, незначительное возгорание в тоннеле выявило множество проблем, связанных с восстановлением нормальной работы объекта.

Пожар произошел во втором транспортном тоннеле Гагаринской развязки 9 августа 2004 года. Возгорание автомобиля марки «Газель» было обнаружено визуально диспетчером, с помощью системы телевизионного наблюдения. Приблизительно через одну минуту, пожарная сигнализация на базе сенсорной трубки выдала сигнал «Пожар», который являлся чисто информационным. Через 2 минуты пожарная сигнализация на базе термокабеля выдала сигнал «Пожар», который запустил в работу алгоритм противопожарной защиты тоннеля.

Все противопожарные и инженерные системы отработали сигнал «Пожар» в соответствии с заданным алгоритмом работы.

Вместе с тем, система дымоудаления не справилась с поступлением дыма от горевшего автомобиля, и тоннель был в течение 10 минут полностью задымлен. Только после ликвидации возгорания, с включением вытяжной вентиляции, в течение 12 минут тоннель был очищен от дыма.

Радиосвязь с посланным в тоннель эвакуатором периодически прерывалась, что сказывалось на управлении действиями персонала.

Участники дорожного движения никак не реагировали на включенные запрещающие сигналы реверсивных светофоров, и, несмотря на задымление, продолжали въезжать в тоннель. Въезд в тоннель был остановлен только после того, как по команде диспетчера поперек тоннеля был поставлен эвакуатор и грузовая машина. Установленные в тоннеле шлагбаумы не управлялись из диспетчерского пункта.

Специальные машины ГУП «Гормост» испытывали значительные трудности при проезде к месту ЧС без сопровождения ГИБДД.

Как видно из примеров, приведенных выше, одной из главных причин возникновения пожара в автотранспортном тоннеле является дорожно-транспортное происшествие. В свою очередь, одной из основных причин возникновения аварий является встречное движение, организованное в едином объеме (трубе) тоннеля. Наличие этой проблемы, как и большинство из случаев пожаров, описанных выше, рассмотрены в работе [1]. Однако, отмечено, что хотя повышение пожарной безопасности и снижение риска проезда через тоннель,

безусловно, являются важной задачей, но рассмотрение маловероятных (но возможных!) случаев чрезвычайных ситуаций не является целесообразным, поскольку не позволит для таких случаев обеспечить пожарную безопасность тоннеля на должном уровне. В частности, здесь может идти речь о столкновении двух автоцистерн, или автобуса и автоцистерны. Другими словами, основываясь на рассмотрении сценариев таких чрезвычайных ситуаций, движение в тоннелях может быть запрещено вовсе или станет очень дорогостоящим, таким образом, их строительство перестанет финансироваться.

Например, при строительстве многих европейских тоннелей в районе Альп наиболее часто обсуждался вопрос о допустимости эксплуатации длинных тоннелей с двусторонним движением. Несомненно, что два параллельных тоннеля с односторонним движением представляют меньший потенциальный риск и обеспечивают лучшие условия для эвакуации и спасательных работ. Несмотря на это, требование о возможности эксплуатации только таких тоннелей является слишком высоким, главным образом, с экономической точки зрения. Именно поэтому, формально придерживаясь концепции «двух тоннелей», строительство второй трубы во многих случаях было запланировано в отдаленном будущем, но так и не было реализовано. Вместо этого, как правило, применяются иные меры организационного характера – ограничение скорости, запрет обгона, въезда в тоннель наиболее опасного транспорта без соответствующего сопровождения и т.д. Кроме того, альтернативой полноценному второму тоннелю является решение с сооружением параллельного вентиляционного тоннеля, который можно также использовать в качестве эвакуационного. Подобное решение реализовано в тоннеле Сент Готтард в Швейцарии, и оно спасло многие жизни при катастрофическом пожаре 24 октября 2001 года. Аналогичное решение применено при строительстве тоннеля обхода автодороги Джубга-Сочи в Краснодарском крае.

Вместе с тем, существуют и иные примеры, например, Германии, где тоннели, как правило, строят именно в «двухтрубном» исполнении. Эти сооружения соответствуют высокому стандарту безопасности.

1.3. Система пожарной безопасности автотранспортных тоннелей

Частота и более тяжкие последствия пожаров в тоннелях по сравнению с аналогичными пожарами на наземных объектах указывают на особенности развития пожара в тоннелях и превращают тоннели в зону повышенного риска. Обзор пожаров, произошедших в автотранспортных тоннелях до настоящего времени, показывает, что большинство крупных пожаров случились за последние 20-25 лет. Поскольку, строительство и использование тоннелей за последнее время значительно возросло, а их конструктивные параметры и особенности усложнились, можно предположить, что число пожаров в подобных сооружениях также должно возрасти. Поэтому обеспечение требуемого уровня пожарной безопасности, создание соответствующей системы противопожарной защиты тоннелей является актуальной задачей.

Вместе с тем, в настоящее время можно констатировать недостаточность нормативных документов, в полном объеме регламентирующих вопросы противопожарной защиты тоннелей и учитывающих специфику таких объектов. Отчасти это связано как раз с индивидуальными особенностями каждого такого объекта, которые невозможно учесть в объеме одного или даже нескольких документов.

В нашей стране основным документом, в котором содержатся противопожарные требования по проектированию противопожарной защиты тоннелей, является СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автодорожные» (актуализированная редакция СНиП 32-04-97) [18]. Более детально требования пожарной безопасности изложены в [19], однако, область применения данного документа существенно ограничена. Также, косвенно вопросы пожарной безопасности отражены в [20,21].

Нормативные требования, касающиеся противопожарной защиты тоннелей в Европе, для каждой страны на этапе их развития могли существенно отличаться друг от друга, в некоторых странах они носили рекомендательный характер или отсутствовали вовсе. После ряда крупных пожаров в европейских тоннелях

страны Евросоюза объединили усилия в этом направлении, было создано несколько совместных программ по научному исследованию данной проблемы. В результате в 2004 году были приняты «Минимальные требования безопасности в тоннелях трансевропейской автодорожной сети». Эти требования также включают в себя и требования по пожарной безопасности.

В других странах (США, Япония и др.) противопожарные нормы по защите тоннелей по большей части носят рекомендательный характер. Хотя в некоторых случаях для отдельных систем защиты могут применяться и жесткие требования. В области противопожарной защиты тоннелей проводятся активные исследования, в том числе экспериментальные. Естественно, что при этом совершенствуется и нормативная база.

При пожаре на людей, находящихся в сооружении, могут воздействовать следующие опасные факторы [22-24]: повышенная температура окружающей среды, токсичные газовоздушные смеси, пониженная концентрация кислорода, комбинированное воздействие опасных факторов, дым. Система противопожарной защиты должна нейтрализовать либо снизить действие указанных факторов и обеспечить:

- безопасную эвакуацию людей;
- безопасную работу пожарных подразделений при тушении пожара;
- сохранение конструкций сооружения.

Рассмотрим, элементы системы противопожарной защиты, применяемой в тоннелях.

Система противодымной защиты. По статистике при пожарах люди погибают, в основном, в результате отравления оксидом углерода (воздействие дыма) [25]. Дым оказывает как физиологическое, так и психологическое воздействие на человека. Дым приводит к потере видимости. Люди перестают видеть эвакуационные выходы, теряют ориентиры, к которым нужно идти. Организованное движение людей нарушается и становится хаотичным. В таких сооружениях как тоннели распространение дыма происходит довольно быстро и в результате ситуация еще более усугубляется. В этом случае обеспечение

безопасной эвакуации людей представляет весьма сложную задачу. Ее решение значительно упрощается при наличии системы эффективной противодымной защиты.

Несмотря на то, что история транспортных тоннелей насчитывает более столетия, вопросы их *противодымной* защиты проработаны меньше, чем для других подземных объектов. Многие из построенных ранее тоннелей не оснащены системами искусственной вентиляции. Применительно к этим условиям невозможно говорить о противодымной защите в традиционном значении. Тем не менее, из описаний наиболее крупных пожаров в зарубежных тоннелях следует, что искусственная вентиляция в них отсутствовала, либо не могла обеспечить эффективность дымоудаления.

Следует отметить, что в протяженных автодорожных тоннелях всегда предусматривалась система вентиляции, однако только относительно недавно системы вентиляции стали рассматриваться в качестве систем безопасности при пожаре.

Первые системы вентиляции в тоннелях являлись естественными и представляли собой обычные вертикальные шахты, ведущие из тоннеля на поверхность земли. Они обеспечивали подачу свежего воздуха в тоннель за счет эффекта тяги, создающего направленный поток воздуха. Воздух внутри тоннеля обычно имеет более высокую температуру, чем снаружи. Поэтому этот воздух поднимается вверх по вертикальным шахтам, а свежий воздух входит в тоннель через порталы. На проветривание тоннелей существенное влияние оказывают такие естественные факторы как: различие барометрических давлений у порталов, ветровые потоки и тепловая депрессия [26]. Однако, естественная система вентиляции (с использованием вертикальных шахт) неприменима для тоннелей, проходящих через такие препятствия как реки или высокогорные районы. Кроме того, естественные факторы являются недостаточно устойчивыми и могут затруднять как нормальное, так и аварийное проветривание тоннелей. Естественный поток может, во-первых, иметь направление, не обеспечивающее безопасные условия для эвакуации, во-вторых, самопроизвольно изменить

направление под действием естественных факторов, в первую очередь тепловой депрессии пожара.

В связи с этим, роль системы противодымной защиты с искусственным побуждением значительно возрастает. К основным задачам системы противодымной защиты можно отнести:

- ограничение распространения токсичных газозводушных смесей (ТГВС) за пределы дымовой зоны, в которой возник пожар;
- исключение блокирования опасными факторами пожара эвакуационных путей и выходов;
- ограничение размеров пожара;
- обеспечение безопасного продвижения личного состава специальных подразделений к месту пожара.

Противодымная защита автодорожных тоннелей достигается: конструктивно-планировочными решениями по ограничению распространения ТГВС, дымоудалением, созданием избыточного давления воздуха при эксплуатации, созданием подпора воздуха при пожаре и т.д.

В настоящее время существует несколько способов вентиляции тоннелей [27]. В зависимости от направления движения воздуха в тоннеле по отношению к его продольной оси различают продольную, поперечную или комбинированную (полупоперечную) системы вентиляции [9,28].

При продольной вентиляции (Рисунок 2, а) воздух движется по всему сечению вдоль оси тоннеля, который тем самым является воздуховодом. Для реализации поперечной вентиляции (Рисунок 2, б) требуются два специальных вентиляционных канала для подачи свежего и удаления загрязненного воздуха. Воздухообмен происходит по всей длине тоннеля через рассредоточенные щели или отверстия. При полупоперечной вентиляции (Рисунок 2, в) свежий воздух подается по специальному вентиляционному каналу, параллельному оси тоннеля, через отверстия, а удаляется в продольном направлении. В качестве вентиляционного канала при этой системе проветривания может использоваться и самостоятельная подземная выработка - штольня (Рисунок 2, г).

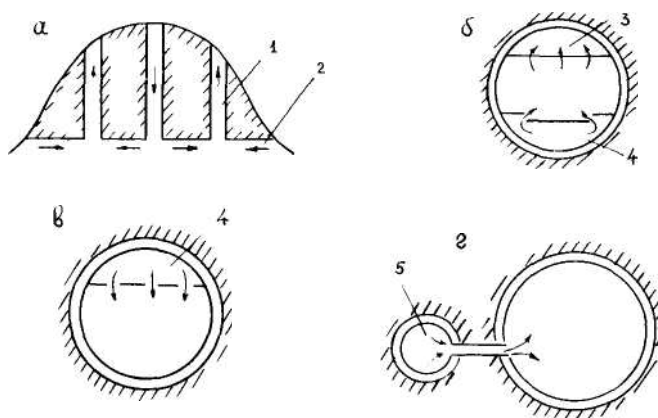


Рисунок 2 – Продольная (а), поперечная (б) и полупоперечная (в,г) системы вентиляции:

1 - ствол вентиляционной шахты; 2 – тоннель, 3,4 – вентиляционные каналы для удаления и подачи воздуха соответственно; 5 – вентиляционная штольня

Каждая из перечисленных систем имеет ряд вариантов реализации, классификация которых приведена в [29]. Работа различных схем вентиляции применительно к противодымной защите тоннелей описана, например, в [27].

Следует отметить, что отсутствие научных исследований в области противодымной защиты автотранспортных тоннелей сыграло роль в формировании нормативной базы, в которой данный вопрос также недостаточно освещен. Так отечественный СНиП П-44-78 устанавливал обязательность искусственной вентиляции автодорожных тоннелей длиной свыше 400 м. В более современной версии данного документа (СП 122.13330.2012) указанное расстояние вообще не нормируется. В проекте городских строительных норм города Москвы это расстояние было ограничено 300 м. Вместе с тем, в настоящее время уже разработан нормативный документ, регламентирующий требования к системе вентиляции автодорожных тоннелей, в том числе, при рассмотрении чрезвычайной ситуации в виде пожара [30]. Однако, в данном документе рассматриваются только продольный и комбинированные способы вентиляции.

Пожарная сигнализация. Естественно, что наличие системы противодымной вентиляции в тоннеле бесполезно, если отсутствует система обнаружения пожара. Современные тоннели оборудуются системами видеонаблюдения,

температурными и дымовыми датчиками, а также газоанализаторами, отслеживающими концентрацию монооксида углерода (CO) и других газов. Эти системы информируют операторов тоннеля об опасности или потенциально опасных ситуациях для принятия соответствующего решения. Кроме того, некоторые системы автоматически реагируют на возникшую ситуацию, приводя в действие систему вентиляции, пожаротушения, аварийные сигналы и т.д. Например, в Японии некоторые автоматические системы были специально разработаны для того, чтобы контролировать «обратное течение» дыма и регулировать параметры продольной вентиляции для того чтобы поддерживать уровень «обратного течения» дыма на допустимом уровне [31]. С другой стороны, в Англии, Норвегии, Франции в автодорожных тоннелях системы обнаружения пожара не предусматриваются – операторы тоннеля предупреждаются об опасных ситуациях участниками движения [32].

Система пожаротушения. Применение спринклерной системы пожаротушения в тоннелях до настоящего времени остается предметом многочисленных споров [33]. Некоторые считают, что спринклерная система может эффективно защищать тоннель и дает людям, находящимся в тоннеле дополнительное время для эвакуации. Другие, напротив придерживаются мнения, что спринклерная система не может потушить пожар, возникший на транспортном средстве (особенно если пожар возник внутри автомобиля). Кроме того, спринклеры не могут быть применены для тушения паров горючего, которые могут воспламениться на более позднем этапе, а в некоторых случаях при горении жидкого топлива могут привести к взрыву. В некоторых странах в тоннельных сооружениях требуется установка спринклерной системы, хотя обычно она не рекомендуется. Всемирная дорожная ассоциация (PIARC) в своем отчете «Контролирование развития пожара и распространения дыма в автодорожных тоннелях» [34] по данному вопросу дает следующие рекомендации:

«Европейские страны не используют спринклерные системы в тоннелях на постоянной основе. В некоторых европейских тоннелях спринклирование

используется для каких-либо специальных целей. В Японии спринклерные системы используются в тоннелях большой длины или в наиболее важных (с точки зрения объема перевозок и интенсивности движения) для охлаждения транспортного средства во время пожара. В США только несколько тоннелей, через которые перевозятся опасные грузы, используют некоторые виды спринклеров. Причина, по которой большинство стран не используют спринклеры в тоннелях в том, что большинство пожаров на транспортных средствах возникает в моторном отсеке или салоне автомобиля, таким образом спринклеры бесполезны пока пожар не выйдет наружу. Опыт их эксплуатации в Японии показывает, что спринклерные системы пожаротушения могут быть эффективны для охлаждения зоны вокруг очага пожара и облегчения борьбы с пожаром. Однако при этом, использование спринклеров вызывает некоторые проблемы, а именно:

- вода без специальных примесей и добавок может стать причиной взрыва при горении бензина и некоторых других химических веществ;
- существует риск, что при потушенном пожаре, все еще выделяются горючие газы, которые могут стать причиной взрыва;
- горячий пар может причинить вред людям;
- низкая эффективность при пожаре внутри автомобиля;
- слой дыма охлаждается и осаждается вниз, таким образом тоннель может быть полностью задымлен по высоте;
- дорогое обслуживание;
- очень сложно управлять спринклерами вручную;
- понижается видимость.

Таким образом, можно сделать вывод, что спринклерная система не должна использоваться до того момента пока все люди не покинут тоннель.

Основываясь на данных фактах можно сказать, что спринклерная система не может рассматриваться как система безопасности людей и может быть использована только для защиты самого тоннеля после завершения процесса эвакуации.

Другие системы. Одним из методов противопожарной защиты тоннелей является их секционирование. В данном случае идет речь о наличии нескольких дымовых зон, которые работают на удаление дыма при пожаре в соответствии с определенным алгоритмом. Включение в работу той или иной дымовой зоны зависит от места возникновения очага пожара, а также от других условий. Длина дымовых зон в тоннеле определяется специальными расчетами. По всей длине дымовой зоны устанавливаются дымоприемные устройства и, возможно, устройства для подачи воздуха (в зависимости от типа системы противодымной защиты). При этом, тело самого тоннеля подразделяется на секции условно (не существует каких-либо конструкционных преград или заградительных устройств).

Вместе с тем, в ряде случаев также используется деление непосредственно транспортной зоны тоннеля на участки. Одним из способов такого деления является организация противопожарных разрывов (открытых участков) в протяженном тоннеле (тоннель Tauern). В случае пожара в одной из таких секций вероятность задымления остальных участков крайне мала. Кроме того, при этом значительно снижаются требования к системе противодымной защиты, а эвакуация людей становится более безопасной. Однако, такой метод защиты применяется довольно редко. В большинстве случаев его невозможно организовать, поскольку невозможно нарушить целостность тоннельного сооружения.

Тем не менее, идея секционирования тоннеля для локализации пожара на одном из его участков продолжает рассматриваться. Одним из возможных противопожарных мероприятий является применение противодымных штор (экранов). Данные шторы представляют собой опускаемую в случае пожара противодымную завесу, перекрывающую сечение тоннеля от потолка до высоты 2-2,5 м от полотна тоннеля. Идея использования штор заключается в локализации образующегося при пожаре дыма в отсеке между шторами и его удалении с помощью системы противодымной вентиляции. При этом предполагается, что нижняя часть тоннеля останется незадымленной, и люди смогут свободно эвакуироваться.

Необходимо также отметить, что в рамках различных проектов по совершенствованию системы противопожарной защиты тоннелей разрабатываются и внедряются устройства и конструкции аналогичные по смыслу противопожарным шторам, например, такие как надувные тоннельные перегородки (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Надувная тоннельная перегородка

Вместе с тем, эффективность такой защиты в каждом конкретном случае должна быть четко обоснована, в противном случае указанная система может не только не улучшить, а даже негативно повлиять на безопасность людей при пожаре в тоннеле. Так например в работе [35] проведено моделирование пожара в автодорожном тоннеле, разделенном на участки противопожарными шторами. По результатам расчета сделан вывод, что шторы при рассмотренной конфигурации их размещения не только не справляются с возложенной на них задачей, но и ухудшают ситуацию в автодорожном тоннеле с точки зрения эвакуации и спасения людей.

1.4. Влияние характеристик автодорожных тоннелей на обеспечение их пожарной безопасности. Особенности эвакуации людей

Как правило, основной задачей системы обеспечения пожарной безопасности на объектах различного назначения является обеспечение безопасности людей. Основным способом достижения этой цели при пожаре традиционно является возможность осуществления беспрепятственной эвакуации людей в безопасную зону. Обеспечение такой возможности для автодорожных тоннелей имеет определенную специфику, в первую очередь, связанную с их объемно-планировочными решениями и конкретными особенностями каждого такого объекта. С точки зрения процесса движения людей, основным фактором в данном случае является большая протяженность пути эвакуации. С точки зрения распространения пожара, факторов, влияющих на обеспечение безопасной эвакуации людей, гораздо больше, и большинство из них связаны с геометрическими параметрами тоннелей, описанными в главе 1.1 (характеристики продольного и поперечного профилей, уклон и т.д.). Кроме того, значительно влияние параметров очага пожара – его мощности, типа горючей нагрузки. Таким образом, многофакторность процесса развития пожара в каждом конкретном тоннеле делает задачу обеспечения безопасной эвакуации людей нетривиальной и достаточно сложно нормируемой, тем более в сложных условиях, при необходимости применения систем активной противопожарной защиты и их эффективной работы. Это обстоятельство в подавляющем большинстве случаев делает необходимым (или крайне желательным) прогнозирование распространения ОФП и расчет времени блокирования путей эвакуации для объектов автотранспортных тоннелей.

Тем не менее, нормирование некоторых параметров все же является необходимым, хотя и может требовать расчетного уточнения. Как правило, в части эвакуации людей таким параметром является расстояние до эвакуационных выходов. В тоннелях в силу их большой протяженности в качестве эвакуационных выходов используются специально сооружаемые эвакуационные

сбойки – защищенные пространства (проходы), ведущие в объем параллельного тоннеля, либо в объем эвакуационной штольни. Таким образом, при проектировании тоннеля основным параметром в части эвакуации людей является расстояние до указанных сбоек, которое желательно предусмотреть минимальным. Вместе с тем, выполнение большого количества сбоек сопряжено с трудностями дополнительных объемов земляных работ и серьезными экономическими затратами. Кроме того, их сооружение может быть связано с выполнением других систем пожарной безопасности (например, противодымной защиты). Поэтому максимальное значение указанного расстояния нормируется. Например, в соответствии с [18] расстояние между выходами в безопасную зону должно составлять не более 700 м. На практике это значение может быть и меньше, однако, как правило, при проектировании объектов тоннельного строительства количество эвакуационных сбоек стремятся сократить, увеличивая расстояние между ними. В этом случае, такое решение должно быть тщательно обосновано, что обычно делается методами математического моделирования.

Однако, подтверждение безопасного расстояния до эвакуационных сбоек не единственная задача в части вопроса безопасной эвакуации, выполняемая методом моделирования. Так, например, ранее уже упоминалось об оценке эффективности размещения противодымных штор на путях эвакуации [35], где указанное решение признано неэффективным. А в работе [36] показано, что само по себе максимальное значение расстояния до эвакуационного выхода в тоннеле не всегда является объективной характеристикой обеспечения безопасности даже с учетом идеализации движения людей при пожаре. А именно, расчетным путем показано, что сравнение времени блокирования эвакуационного выхода и времени эвакуации через указанный выход может приводить к недооценке пожарной опасности для людей в таких сооружениях как автодорожные тоннели. Более правильным подходом в данном случае будет являться поэтапное сравнение указанных времен для последовательных участков пути эвакуации еще до выхода в безопасную зону, то есть сравнение значений времени в динамике. В противном случае это может приводить к результату, когда во время движения

человека к эвакуационному выходу происходит блокирование пути эвакуации, при этом сравнение конечных времени выхода в безопасную зону и времени блокирования показывает удовлетворительный результат. Это еще раз свидетельствует о принципиальных трудностях в возможности нормирования параметров, влияющих на безопасность людей в тоннелях и необходимости применения расчетных методов для эффективного решения этой задачи.

1.5. Прогнозирование распространения опасных факторов пожара с помощью методов численного моделирования. Уравнения полевой модели

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, как было указано выше, возможность применения методов численного моделирования вообще является в ряде случаев незаменимым инструментом. В самом деле, сооружения тоннелей не являются типовыми, наоборот, практически каждый из них имеет свои особенности. 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, часто только использование численного моделирования является основой для оценки эффективности системы противопожарной защиты сооружения, что еще более повышает значимость указанных методов.

Первые модели пожара появились и были сформулированы более 40 лет назад как в нашей стране [37], так и за рубежом [38, 39 и др.]. Речь идет об *интегральных* моделях.

Интегральный (однозонный) метод является наиболее простым среди существующих методов моделирования пожаров. Суть интегрального метода заключается в том, что состояние газовой среды оценивается через усредненные по всему объему помещения термодинамические параметры. Соответственно, температура ограждающих конструкций и другие подобные параметры оцениваются как усредненные по поверхности.

Интегральная модель пожара в помещении описывается системами обыкновенных дифференциальных уравнений, отражающих законы сохранения общей массы и энергии газовой среды в помещении, а также материальный баланс ее компонентов. Эти системы являются незамкнутыми и для своего решения требуют дополнительных соотношений, либо постановки сопряженных задач. В целом данные модели не содержат существенно огрубляющих предпосылок, построены на основе фундаментальных физических законов и используют строгие математические соотношения.

Благодаря своей простоте, указанные модели получили широкое практическое применение и успешно использовались ранее, а в некоторых случаях используются до сих пор, поскольку позволяют получить решение ряда задач с приемлемой для инженерных расчетов точностью. Так, в работе [40] интегральная модель развития пожара была модифицирована и усовершенствована для определения необходимого времени эвакуации людей (НВЭ) и времени срабатывания дымовых пожарных извещателей (ДПИ). Интегральная модель пожара для системы помещений (для зданий) подробно описана в работах [41, 42, 43] и других. Кроме того, обширный обзор литературы по интегральным методам моделирования приведен в [44].

Несмотря на очевидные плюсы, информативность интегрального метода может оказаться недостаточной для решения практических задач. Как правило, это справедливо если газовая среда характеризуется значительной

неоднородностью. Подобная ситуация обычно возникает на начальной стадии пожара и при локальных пожарах, когда в помещении наблюдаются струйные течения с явно выраженными границами и существует достаточно четкая стратификация среды.

Таким образом, оказывается, что при использовании интегрального метода предсказанные моделью параметры пожара можно интерпретировать как реальные, только в случае объемного горения, когда из-за интенсивного перемешивания газовой среды локальные значения параметров в любой точке близки к среднеобъемным. При моделировании начальной стадии пожара, а также локальных пожаров интегральная модель приводит к существенным ошибкам.

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что интегральный метод нецелесообразно применять при моделировании пожаров в помещениях большого объема или помещениях, в которых один из геометрических размеров существенно превышает остальные, поскольку отсутствие необходимой детализации не позволяет даже качественно описать картину пожара. Такая позиция однозначно отражена в [45,46].

Зонные методы моделирования пожаров позволяют более детально описать развитие пожара. Они основываются на предположении о формировании в помещении нескольких (как правило, двух) слоев: верхнего слоя продуктов горения (задымленная зона) и нижнего слоя невозмущенного воздуха (свободная зона). Таким образом, состояние газовой среды в зонных моделях оценивается через осредненные термодинамические параметры не одной, а нескольких зон, причем межзонные границы обычно считаются подвижными. Зонный метод, по сравнению с интегральным, более адекватно отражает физическую картину пожара и позволяет точнее воспроизвести особенности его начальной стадии, особенно в помещениях относительно большого объема.

Подробный анализ зонных моделей приводится в монографии [47]. Основные физические процессы, учитываемые зонной моделью, рассматриваются в [48].

Как было отмечено выше, главной идеей многозонных моделей пожара

является разделение газовой среды на верхний припотолочный слой продуктов горения (задымленная зона) и нижний слой воздуха (свободная зона) с описанием состояния каждого слоя через его среднеобъемные параметры. Поскольку в большинстве моделей рассматривается начальная стадия пожара, параметры нижней зоны в типичном случае полагаются неизменными (за исключением давления) и моделируется только верхняя зона. По этим причинам основные уравнения зонной модели подобны соответствующим уравнениям интегральной модели и наиболее существенное различие между ними определяется изменением геометрического объема задымленной зоны в процессе развития пожара. Основу зонных моделей составляют законы сохранения массы и энергии, описывающие баланс:

- массы дыма m в задымленной зоне

$$\frac{dm}{dt} = G_K - G_{\Pi}; \quad (1.1)$$

- энтальпии q задымленной зоны

$$\frac{dq}{dt} = Q_K - Q_{\Pi} - Q_{\text{кон}} - Q_{\text{луч}}; \quad (1.2)$$

- массы кислорода m_K в задымленной зоне

$$\frac{dm_K}{dt} = 0.23G_K - \eta \Psi L_K - x_K G_{\Pi}; \quad (1.3)$$

- оптического количества дыма S в задымленной зоне

$$\frac{dS}{dt} = \Psi D - \mu \left(\frac{G_{\Pi}}{\rho} + k_s F_s \right); \quad (1.4)$$

- массы i -го продукта горения m_i в задымленной зоне

$$\frac{dm_i}{dt} = \Psi L_i - x_i G_{\Pi}; \quad (1.5)$$

- энергии во всем объеме помещения

$$\frac{V}{k_m - 1} \frac{dP_m}{dt} = (\eta Q_n^p + I_n) \Psi + c_{p,a} T_a G_a - \frac{q}{m} G_{\Pi} - Q_{\text{КОН}} - Q_{\text{ЛУЧ}}, \quad (1.6)$$

где t – текущее время; G_K и G_{Π} – массовый приток дыма в задымленную зону через конвективную колонку и массовый расход дыма через открытые проемы; Q_K , Q_{Π} и $Q_{\text{КОН}}$ – тепловые потоки, соответственно вносимый в задымленную зону конвективной колонкой, удаляемый через открытые проемы с дымом и теряемый в ограждающие конструкции; $Q_{\text{ЛУЧ}}$ – тепловой поток, теряемый за счет излучения; ψ и η – скорость выгорания и полнота сгорания горючей нагрузки; L_K и L_i – массовое потребление кислорода и выделение i -го продукта горения при сгорании единицы массы горючего материала; x_K и x_i – массовая концентрация кислорода и i -го продукта горения в задымленной зоне; D – дымообразующая способность ГМ; μ и ρ – натуральный показатель ослабления и плотность среды в задымленной зоне; k_s и F_s – коэффициент (нормальная скорость) и площадь поверхностей седиментации дымовых частиц.

Как правило, основной трудностью при решении системы уравнений зонной модели является необходимость наличия дополнительных соотношений для вычисления функций, входящих в правые части уравнений, поскольку значения указанных функций не могут быть определены аналитически. В ряде случаев достаточно ограничиться допущениями, вытекающими из особенностей решаемой задачи и конкретных объектов моделирования, что позволяет исключить часть уравнений и упростить оставшиеся так, что становится возможным их аналитическое интегрирование. Вместе с тем, при достаточно полной постановке задачи существенно нелинейный характер уравнений не позволяет получить их аналитическое решение. В этом случае вполне успешно могут применяться методы численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Кроме того, для решения системы уравнений

зонной модели необходима дополнительная информация, как правило, получаемая из данных эксперимента – функции, описывающие процесс горения, конвективную колонку с припотолочной веерной струей, процесс конвективного теплообмена с внешней средой, теплообмен с конструкциями и т.д.

Формально различные зонные модели отличаются набором подмоделей для вычисления функций, входящих в правые части данных уравнений, либо детализацией и качеством самих подмоделей. Кроме того, существуют варианты зонных моделей с увеличенным числом зон (свыше двух).

Понятно, что зонные модели, в отличие от интегральных, более адекватно описывают картину пожара, особенно в его начальной стадии. Однако, при создании зонных моделей необходимо делать большое количество упрощений и допущений, основанных на априорных предположениях о структуре потока. Такая методика не применима в тех случаях, когда отсутствует полученная из экспериментов информация об этой структуре и, следовательно, нет основы для зонного моделирования. Кроме того, часто требуется более подробная информация о пожаре, чем осредненные по слою (зоне) значения теплофизических параметров.

Основным из недостатков зонного метода является то, что в существующих моделях данного класса рассматривается стационарная конвективная колонка и подпотолочная струя. Это допущение означает, что параметры очага горения полагаются неизменными за время достижения истекающими из очага продуктами горения припотолочной зоны и, далее, за время их растекания под перекрытием. Такое допущение относительно приемлемо лишь для помещений в определенной степени ограниченных размеров. В реальности, время всплытия и растекания продуктов горения может составлять десятки секунд, за это время характеристики очага успевают существенно измениться. В этом случае приближение стационарности заметно огрубляет расчет.

Как следует из вышеизложенного, применение интегральных и зонных моделей для решения задач пожарной безопасности путем численного моделирования для объектов автотранспортных тоннелей не является

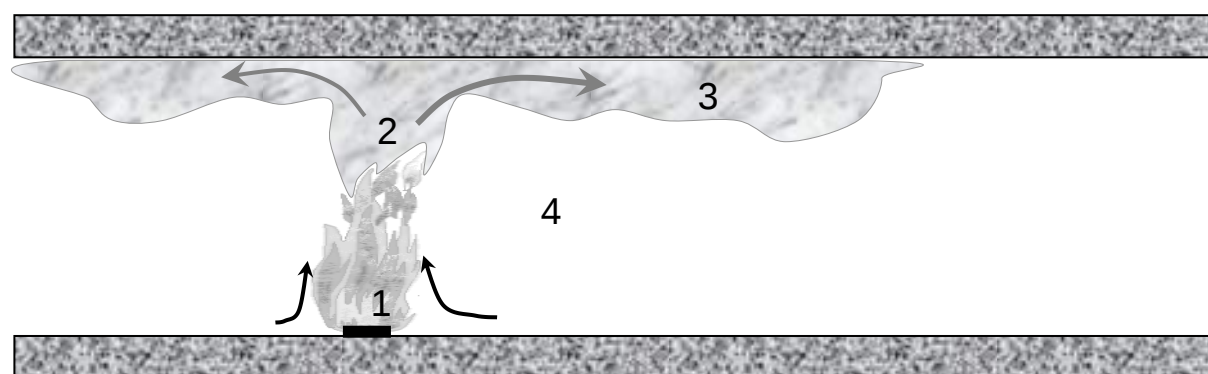
целесообразным. Так при использовании интегрального метода, полученная в результате расчета информация не имеет какого-либо практического значения, поскольку представляет средние значения теплофизических параметров по всему объему тоннеля. При этом невозможно оценить задымление различных участков тоннеля и блокирование эвакуационных выходов вдоль тоннеля в различные моменты времени.

Аналогично предположение об образовании при пожаре задымленной зоны над всей площадью тоннеля с последующим опусканием ее нижней границы одновременно по всей поверхности неадекватно реальному распространению продуктов горения, таким образом, возможность использования классической зонной модели для таких объектов является сомнительной. Однако, здесь следует отметить, что несмотря на указанные недостатки зонные модели в ряде случаев использовались для описания пожара в тоннеле при принятии некоторых допущений, учитывающих специфику развития пожара в объеме протяженного помещения. Например, особенности такого развития пожара и его описания с помощью зонной модели рассмотрены в работе [49], где в рамках модели рассматриваются зоны, полученные разбиением объема помещения вертикальными плоскостями и определенными условиями сопряжения на границах этих зон.

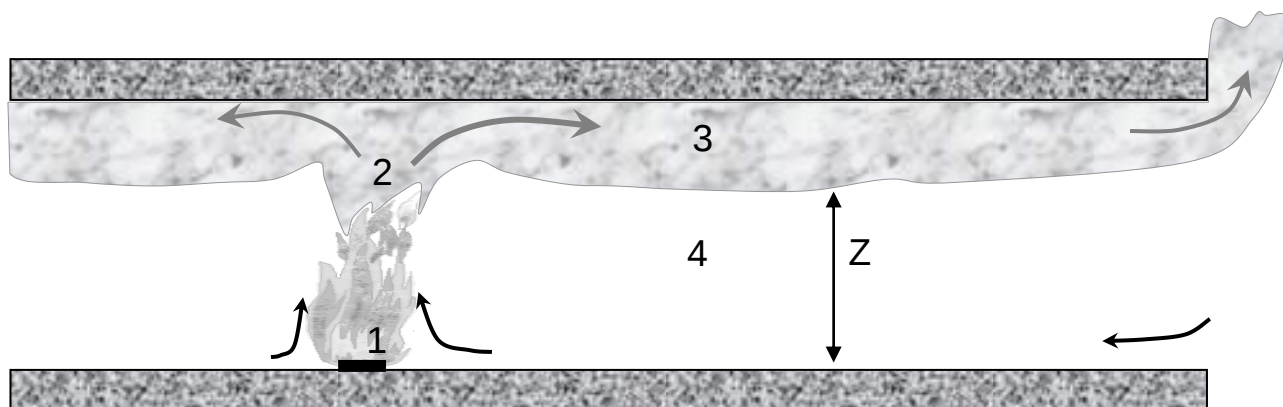
Так Heims и Kordina [50] модифицировали зонную модель и получили результаты расчетов, согласующиеся с экспериментами, проведенными в тоннеле Звенгерга (Австрия).

В работе [51] для прогнозирования обстановки при пожаре в тоннеле с целью разработки оперативных планов пожаротушения предлагается задымление тоннеля разбить на два этапа. На первом этапе происходит растекание дыма под сводом тоннеля в обе стороны от очага, формируется припотолочная струя (Рисунок 4, а). На этом этапе толщина припотолочной струи предполагается постоянной и скорость распространения фронта струи определяется притоком дыма через колонку.

На втором этапе припотолочная струя достигает портала и формируется задымленная зона (Рисунок 4, б). Высота незадымленной зоны устанавливается на уровне Z при котором расход конвективной колонки сравнивается с количеством дыма покидающего тоннель через порталы. Температура задымленной зоны определяется из уравнения баланса энергии с учетом энтальпии, вовлекаемого конвективной колонкой воздуха, излучения от факела и теплопотерь в конструкции. При этом, также может быть учтена работа системы дымоудаления, добавив в уравнения баланса массы и энергии члены, соответствующие оттоку дыма.



а – формирование припотолочной струи



б – формирование задымленной зоны

Рисунок 4 – Схема задымления тоннеля при пожаре:

1 – очаг пожара; 2 – конвективная колонка; 3 – припотолочная струя;
4 – незадымленная зона

Крупномасштабные эксперименты, а также описание реальных пожаров свидетельствуют, что задымление тоннеля по всей высоте может произойти

намного раньше, чем дым достигнет порталов. При этом, область с которой начнется блокирование тоннеля не обязательно “привязана” к фронту распространяющейся струи дыма или зоне очага пожара. Поэтому чтобы учесть эффект возможного “проседания” холодного дыма, а также локальных различий в значении параметров пожара вдоль тоннеля в работе [52] предлагается разбить тоннель на ряд зон по длине и высоте. Динамика основных консервативных параметров каждой i -ой зоны определяется численным интегрированием стандартной системы уравнений баланса массы дыма m , энтальпии Q , массы кислорода $k m$, массы j -того компонента $j m$ дыма.

Несмотря на приведенные примеры использования зонной модели для описания пожара в объеме тоннеля, очевидно, что применение рассматриваемых допущений носит весьма ограниченный характер, не всегда возможно, в ряде случаев может сильно исказить реальную картину пожара и не дает детального описания теплофизических параметров внутри рассматриваемых зон. Поэтому в общем случае применение указанной модели для получения объективной картины распространения ОФП в тоннеле нецелесообразно, особенно, когда на основе такого моделирования строится система обеспечения пожарной безопасности объекта.

В этой связи, наиболее целесообразным для моделирования пожара в тоннеле представляется использование *дифференциального (полевого)* метода.

Полевые модели являются более мощным и универсальным инструментом, чем зональные, поскольку они основываются на совершенно ином принципе. Вместо одной или нескольких больших зон, в полевых моделях выделяется большое количество (обычно тысячи или десятки тысяч) маленьких контрольных объемов, никак не связанных с предполагаемой структурой потока. Для каждого из этих объемов с помощью численных методов решается полная система уравнений в частных производных, выражающих принципы локального сохранения массы, импульса, энергии и масс компонентов. Таким образом, динамика развития процессов определяется не априорными предположениями, а исключительно результатами расчета.

Естественно, что такие модели, по сравнению с интегральными и зональными, требуют больших вычислительных ресурсов. Однако в настоящее время возможности вычислительной техники являются очень значительными, поэтому указанные модели широко используются при проектировании многих систем (вентиляции и кондиционирования воздуха, камер сгорания, печей и т. д.), для решения задач в области пожарной безопасности (расчет необходимого времени эвакуации людей из помещений и зданий и т.д.), а также в других научных исследованиях (гидродинамика, теплообмен и т.д.)

Указанный метод за последние 10 лет является наиболее популярным для решения не только научных, но и практических задач в области пожарной безопасности, причем не только для тоннелей, но и для обычных зданий.

Основными уравнениями полевого метода моделирования являются уравнения сохранения массы, импульса, энергии и масс компонентов, записанных для контрольного объема, на которые делится расчетная область.

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 . \quad (1.7)$$

Уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i . \quad (1.8)$$

где τ_{ij} – тензор вязких напряжений, который для ньютоновских жидкостей, подчиняющихся закону Стокса, определяется выражением

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} . \quad (1.9)$$

Уравнение энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j} , \quad (1.10)$$

где $h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k$ - статическая энтальпия смеси;

H_k – теплота образования k -го компонента;

$c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$ - теплоемкость смеси при постоянном давлении;

q_j^R - радиационный поток энергии в направлении x_j .

Уравнение сохранения химического компонента k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + S_k. \quad (1.11)$$

Для замыкания системы уравнений (1.7)-(1.11) используется уравнение состояния идеального газа. Для смеси газов оно имеет вид:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (1.12)$$

где R_0 – универсальная газовая постоянная;

M_k – молярная масса k -го компонента.

Учитывая наличие эффектов турбулентности и их значительное влияние на процесс пожара, данные уравнения осредняют, представляя переменные в виде суммы средней величины и пульсационной составляющей.

При этом, как правило, для описания процесса пожара используется осреднение по плотности, что существенно при рассмотрении областей, где происходит горение и уравнения (1.7), (1.8), (1.10) принимают следующий вид:

$$- \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j'' u_i''} \right) + g_i, \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial(\overline{\rho h})}{\partial \tau} + \frac{\partial \overline{\rho \tilde{u}_j h}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j'' h''} \right) - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j}, \quad (1.15)$$

Указанная система уравнений переноса является незамкнутой, поскольку включает в себя неизвестные - тензор турбулентных напряжений $(-\overline{\rho u_j'' u_i''})$ и турбулентный поток энергии $(-\overline{\rho u_j'' h''})$.

Незамкнутость уравнений переноса, обусловленная присутствием в этих уравнениях корреляционных членов, выражающихся через пульсационные характеристики движения, приводит к необходимости постулирования дополнительных соотношений (инженерных гипотез), связывающих входящие в уравнения параметры осредненного и пульсационного движения, либо к необходимости пренебрежения влиянием указанных пульсаций. Особенностью большинства инженерных гипотез турбулентности (моделей турбулентности), служащих для замыкания системы уравнений переноса, является использование дополнительной экспериментальной информации, из-за чего эти гипотезы и получили наименование полуэмпирических.

Практически все модели турбулентности базируются на гипотезе Буссинеска о вихревой вязкости. Коэффициент пропорциональности ν_t , называемый турбулентной или вихревой вязкостью является характеристикой потока, а не жидкости как молекулярная вязкость, и изменяется во времени и пространстве. Коэффициент турбулентной вязкости ν_t определяется с помощью той или иной модели турбулентности.

Подавляющее большинство подобных моделей базируются на первой гипотезе турбулентности Прандтля, которая является развитием локально - градиентного подхода Буссинеска к описанию процессов турбулентного переноса.

В теории Прандтля принимается, что местное изменение осредненной продольной скорости в пограничном слое определяется "длиной пути смешения", другими словами масштабом турбулентности, характеризующим геометрическую структуру потока, или средний размер участвующих в турбулентном переносе "вихрей" [53].

Существенным достоинством моделей, основанных на гипотезе Прандтля, является простота реализации, гибкость, доступная при определении длины пути смешения ℓ , вплоть до задания эмпирических зависимостей. Модели турбулентности, в основу которых положена гипотеза Прандтля, дают достаточно достоверные результаты в случае простых течений (без интенсивного перемешивания), что позволяет использовать их при моделировании пожаров и в настоящее время. Недостатком данной группы моделей является то, что в большинстве случаев для определения длины пути смешения приходится либо использовать данные, полученные из результатов исследования пограничного слоя, либо просто задаваться ее величиной. Кроме того, в рамках этих моделей невозможно описать перенос характеристик турбулентности (турбулентная вязкость, кинетическая энергия турбулентных пульсаций, скорость ее диссипации, корреляционные моменты).

Данные обстоятельства заставляют все чаще применять модели турбулентности, созданные на основе гипотез, позволяющих связать параметры турбулентности (вязкость) с ее масштабом и иными параметрами. Такие гипотезы так же являются локальными, но они лучше описывают физику процесса.

Наиболее распространенной в данной группе моделей является так называемая k - ε модель турбулентности. Данная модель также получила наибольшее распространение при моделировании пожаров.

В ней решаются два уравнения переноса, аналогичные уравнениям (1.13)-(1.15): одно для турбулентной кинетической энергии k и второе для вязкостной диссипации этой энергии, ε , во внутреннюю энергию жидкости. Эти уравнения отражают баланс изменения турбулентной энергии с учетом процессов конвективного и диффузионного переноса, а также механизмов ее генерации и диссипации. Далее при моделировании вводится предположение о масштабе длины и с помощью ряда эмпирических констант определяется турбулентная вязкость и решается система уравнений переноса. На практике используются различные модификации k - ε модели турбулентности с отличными значениями констант и коэффициентов.

Вместе с тем, при моделировании пожаров используется и другой подход [54,55], когда система (1.7)-(1.11) с помощью ряда допущений и без перехода к осредненным параметрам решается на самой мелкой сетке, какая возможна. При этом удастся напрямую смоделировать поведение турбулентных вихрей, масштаб которых превышает масштаб расчетной сетки. Достоинством такого подхода является то, что в нем не используется модель турбулентности, однако он требует больших затрат машинного времени и мало апробирован.

Кроме модели турбулентности, в полевых моделях используются дополнительные модели, характеризующие процессы, имеющие место при пожаре – модель горения, модель радиационного теплопереноса и ряд других.

Для моделирования процессов тепло- и массовыделения при горении используются два подхода: моделирование химических реакций или задание эквивалентных горению тепловых и массовых потоков в качестве граничных условий на поверхностях горения.

Наиболее простым способом является моделирования очага пожара с помощью теплового источника с предварительно заданной мощностью тепловыделения. При этом уравнения сохранения масс компонентов не решаются.

Выражение для энтальпии принимает вид
$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT,$$
 а в уравнение энергии

вводится дополнительный источниковый член. Хотя в ряде случаев такие модели дают неплохие результаты, они не позволяют учитывать зависимость величины тепловыделения от условий потока и возможного недостатка одного из реагентов.

Более строгим является подход Баума и др. [54], когда горение моделируется с помощью множества лагранжевых элементов, в пределах каждого из которых имеются источники тепловыделения и образования дыма с постоянными заранее заданными величинами. Это позволяет, например, учитывать отклонение пламени при наличии ветра.

Однако, несмотря на простоту «источниковых» методов в большинстве случаев очаг пожара моделируется с помощью непосредственно моделей горения. Это позволяет, во-первых, смоделировать процесс перемешивания горючего и

воздуха, и, таким образом, рассчитать (а не задать предварительно) величину тепловыделения; во-вторых, с помощью расчета образования и переноса химических компонентов, оценить локальные концентрации токсичных компонентов и радиационные свойства среды.

В задачах по оценке распространения ОФП часто бывает достаточно представить процесс горения в виде одной одноступенчатой реакции



где F , O и P обозначают массы горючего, окислителя и продукта соответственно.

При этом часто можно считать, что химическое взаимодействие протекает бесконечно быстро, и скорость реакции определяется скоростью перемешивания горючего и окислителя, а не химической кинетикой. Таким образом, задача включает в себя решение уравнений сохранения для каждого из компонентов реакции. Однако влияние турбулентности на источниковые члены этих уравнений создает значительные дополнительные сложности. Для упрощения этой проблемы прибегают к использованию функции смешения, а также допущению, что коэффициенты диффузии компонентов смеси равны между собой, и, получают выражение для определения локальных массовых долей топлива и окислителя.

Предложенный метод не учитывает влияние пульсаций на химическую реакцию. Они могут быть учтены с помощью диффузионно-вихревой модели [56], которая была первоначально предложена Сполдингом для предварительно перемешанных систем. В этой модели скорость потребления топлива определяется скоростью молекулярного перемешивания реагентов (от которой зависит химическая реакция), которая, в свою очередь, связана со скоростью рассеяния турбулентных вихрей [57].

Впоследствии Магнуссен и Хьертагер [58] модифицировали указанную модель для диффузионных пламен, предположив, что изменение флуктуаций концентраций отдельных компонент пропорционально их среднему значению, и что скорость определяется находящимся в дефиците реагентом, воздухом или

топливом. Таким образом, в случае открытого пожара реакция будет определяться местной концентрацией топлива, за исключением области вблизи источника топлива. При регулируемых вентиляцией пожарах в помещениях, наблюдается дефицит воздуха, и, следовательно, потребление топлива будет определяться концентрацией кислорода.

Предложенная модель позволяет решать уравнение для массовой доли топлива и рассчитывать массовую долю каждого компонента упрощенной химической реакции. Модели этого типа успешно использовались в пожарных задачах и в других областях горения. Достоинством модели является ее простота. Она позволяет рассчитывать распределенное по объему выделение энергии, определяемое геометрией помещения и доступом воздуха. Можно определить концентрации стабильных компонентов, CO_2 и H_2O , если предположить, что они являются единственными продуктами горения. Однако, с помощью такой схемы нельзя учесть влияние конечности скорости химических реакций. Для корректного расчета концентраций продуктов неполного окисления, таких как CO и сажа, необходима более усложненная модель.

Наиболее перспективным из использующихся в настоящее время методов, учитывающих конечность скорости химических реакций при пожаре, является модель ламинарных элементов пламени (см. например [59], [60]). В ней предполагается, что горение происходит только в тонких ламинарных элементах пламени, входящих в турбулентное поле потока. Соотношения между мгновенным химическим составом и функцией смешения, в таких условиях, могут быть определены вычислительным путем, для простых топлив, таких как метан и пропан, с достаточно хорошо известной химией. Этот подход имеет отношение не только к расчету концентраций газовых компонентов топлива, но и концентраций сажи, а также к проблеме расчета радиационного теплопереноса.

Еще одним подходом к моделированию происходящего при пожаре взаимодействия турбулентности и горения является использование двухжидкостной концепции Сполдинга [61]. В ней предполагается, что перемежающиеся структурные характеристики можно представить через

смешение двух различных жидкостей, каждая из которых обладает собственной температурой, скоростью и составом. Эти жидкости взаимодействуют друг с другом через совместно занимаемое пространство внутри каждого контрольного объема и через обмен массой, импульсом и энергией. Одна жидкость может быть, например окислителем, а другая смесью несгоревшего топлива, продуктов горения и окислителя.

Следующей, относящейся к основным подмоделям полевого метода, является *модель радиационного теплопереноса*.

Для реалистичного моделирования радиационного теплопереноса, когда требуется расчет тепловых потоков излучением необходимо решить две основные проблемы. Первая – ‘геометрическая’ – связана с тем, что метод должен позволять учитывать сложную геометрию помещения, вторая – с вычислением локальных излучательных и поглощательных свойств. Например, относительный вклад излучения сажи сильно отличается от излучения газов в пламени и дымовых продуктах. Хорошая модель должна учитывать не только эти различия, но и различие между сравнительно плотными дымовыми слоями и прозрачными слоями входящего воздуха.

Влияние радиационного теплопереноса выражается через источниковый член в уравнении сохранения энергии. Кроме того, радиационные потоки сильно влияют на температуры поверхностей стен помещения, а, следовательно, на распространение пламени.

Основное уравнение радиационного переноса можно записать в виде

$$\frac{dI}{ds} = -(k_a + k_s)I + k_a \frac{E_g}{\pi} + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega, \Omega') I(\Omega') d\Omega', \quad (1.17)$$

где I – интенсивность радиационного излучения в направлении Ω , S – расстояние в направлении Ω , $E_g = \sigma T_g^4$ – энергия излучаемая абсолютно черным газом при температуре газа T_g , k_a и k_s – коэффициенты поглощения и рассеяния,

$P(\Omega, \Omega')$ - вероятность того, что излучение в направлении Ω' после рассеяния попадет в телесный угол $d\Omega$ в окрестности направления Ω .

Это уравнение необходимо интегрировать по всем направлениям и длинам волн. Вместе с тем, для большинства практических задач точное решение уравнения радиационного переноса невозможно, вместо него разработано несколько приближенных методов, которые и используются для решения задач о пожарах в помещениях.

«Потоковые методы» для упрощения задачи используют разделение пространственного и углового распределения интенсивности излучения. При этом, в предположении, что спектральная интенсивность постоянна в пределах заданных интервалов телесного угла, решение уравнения радиационного переноса существенно упрощается. Первоначально была разработана «двухпотоковая» модель для одномерных астрофизических задач, Патанкар и Сполдинг [62] расширили ее до шести потоков в трех декартовых направлениях, чтобы описывать трехмерные системы.

Эта модель очень привлекательна для использования в полевых моделях, главным образом, в предположении, что телесные углы совпадают с поверхностями контрольного объема в декартовом пространстве, поскольку в этом случае уравнение радиационного переноса имеет тот же вид, что и обобщенное уравнение сохранения, и может быть решено с помощью того же численного алгоритма. Однако этот метод имеет ряд недостатков, среди которых одним из главных, применительно к пожарам, является неточность метода при моделировании радиационного переноса под углом к декартовой сетке.

«Метод дискретного радиационного переноса», разработанный Локвудом и Шахом [63], преодолевает многие из упомянутых выше трудностей и сочетает в себе необходимую вычислительную экономичность и точность. В ней используется моделирование прохождения лучей электромагнитного излучения через вычислительную область между границами. При этом, направления выбираются предварительно, таким же образом, как выбирается расположение

гидродинамической сетки. Метод включает в себя решение уравнения радиационного переноса вдоль путей этих лучей, выбираемых обычно таким образом, чтобы они приходили в центры граничных поверхностей гидродинамических контрольных объемов.

Число и направление лучей для каждой точки выбирается предварительно, чтобы обеспечить желаемый уровень точности, аналогично тому, как выбирается конечно-разностная сетка для проведения гидродинамических расчетов.

Необходимо также отметить, что методы радиационного переноса также в ряде случаев могут использовать подмодели более высокого уровня для реалистичного описания процесса в случае значительного влияния определенных эффектов, например, модель сажеобразования.

Потоковые методы и модель дискретного радиационного переноса получили широкое распространение при решении задачи радиационного теплопереноса. Однако, как правило, использование этих моделей приводит к значительным затратам машинного времени и не всегда оправдано. В этом случае, наиболее простым способом учета радиационных тепловых потерь является так называемая χ_R - модель. Она состоит в том, что мощность тепловыделения в очаге горения путем занижения теплоты сгорания, уменьшается на долю тепла χ_R , теряемую за счет излучения. Эта доля задается на основе экспериментальных данных в зависимости от вида топлива. Несмотря на кажущуюся примитивность, такая модель на начальной стадии пожара часто дает хорошие результаты.

Применение полевого метода с описанием используемых подмоделей и соответствующий пример расчета изложены, например, в методических рекомендациях [64].

1.6. Прогнозирование распространения опасных факторов пожара в тоннелях. Обзор существующих исследований

Поскольку полевая модель развития пожара лишена недостатков зонных (интегральных) моделей, полевые методы часто используются для решения задач,

связанных с распространением опасных факторов пожара в помещениях сложной геометрии, в системе нескольких помещений, в помещениях большой высоты и объема и т.д. Большинство работ, посвященных моделированию развития пожара в тоннелях в последние годы также выполнены с применением полевого метода.

Моделирование пожара в тоннеле с помощью полевой модели имеет свои особенности. Если технические сложности при описании геометрии объекта практически отсутствуют (в сравнении, например, с помещениями сложной формы), то проблемы иного характера могут быть значительны. Во-первых, речь идет о необходимости задания подробных расчетных сеток для областей, требующих детального моделирования, главным образом, область очага пожара, что приводит к необходимости решения большего количества уравнений, и, следовательно, может серьезно увеличивать время расчета. Во-вторых, это относится к корректному заданию параметров очага пожара (мощность тепловыделения, зависимость указанной мощности от времени, свойства горючей нагрузки и т.д.) Кроме того, при численном моделировании возникают дополнительные сложности, связанные с определением полноты сгорания, а также проблемы сходимости некоторых алгоритмов расчета на вытянутых расчетных областях.

Одной из первых работ, посвященных сравнению результатов моделирования с экспериментальными данными по развитию пожара в тоннеле, является статья [65]. Моделирование производилось с помощью программного комплекса JASMINE. В качестве эксперимента для апробации были выбраны опыты, проведенные в тоннеле прямоугольного сечения 5 x 4 м и длиной 390 м [66]. В ходе численного эксперимента исследовалось соответствие расчетных и опытных распределений концентраций кислорода и полей температуры по длине тоннеля и влияние принудительной вентиляции со скоростью вентиляционного потока 0; 2 и 4 м/с. В ходе натурного эксперимента пожар имитировался горением бензина в квадратном поддоне размерами 2,6 x 2,6 м. При моделировании скорость выгорания принималась постоянной во времени и зависящей от скорости вентиляции и заимствовалась из экспериментальных данных для

горения открытого пламени. В численных расчетах моделировалось горение гексана со скоростью, обеспечивающей тепловую мощность пожара 14,45; 20,25 и 24,95 МВт для скорости вентиляции 0; 2 и 4 м/с, соответственно. Используемая сетка составляла всего $6 \times 9 \times 27 = 1566$ узлов, что чрезвычайно мало для столь протяженного тоннеля. Неудивительно, что для условий естественной конвекции добиться сходимости системы уравнений k - ε модели турбулентности не удалось, и авторы были вынуждены вместо модели турбулентности использовать соотношение $\mu_t = 1000\mu_{lam}$.

Тем не менее, несмотря на столь грубые вычислительные сетки, в расчете были получены реалистичные результаты, в основном совпадающие с результатами экспериментов. Интересно, что совпадение тем лучше, чем выше скорость вентиляции.

Моделирование распространения опасных факторов пожара не всегда связано с моделированием горения. Так, статья [67] примечательна разумно упрощенной постановкой задачи. Поскольку авторы ставили своей целью получение данных о взаимодействии стратифицированных слоев в тоннеле, они отказались от моделирования очага горения, являвшегося источником горячих продуктов горения и дыма, а рассчитывали только часть тоннеля ($75 \times 2,5$ м), на торцах которой использовались следующие граничные условия: 1-ого рода на входе, и условия $\partial u / \partial x = \partial v / \partial x = 0$ – на выходе. В стационарном двумерном расчете использовалась, как обычно, k - ε модель турбулентности Роды с пристенными функциями и упрощенная модель расчета радиационного теплового потока, учитывающая радиационный теплообмен в вертикальном направлении не только между стратифицированными слоями, но и с полом и потолком. Использовалась сетка 34×23 расчетных точки (увеличение количества ячеек сетки в 2 раза в продольном направлении приводило к разнице результатов менее чем на 10%). Результаты исследования показали, что ни изменения начальной температуры дымовых газов, ни скорости вентиляции не приводят к неустойчивости стратификации продуктов горения и воздуха, что авторы считают важным практическим выводом.

Исследование австралийских авторов [68] посвящено моделированию пожара в вентилируемом тоннеле размерами 5,4x130x2,4 м при скорости нагнетаемого воздуха до 2 м/с. Расчет производился с помощью трехмерной модели, включающей $k-\varepsilon$ модель турбулентности (без учета влияния подъемных сил), модель горения схожа в основных чертах с моделью Магнуссена-Хьертагера. Радиационный теплообмен в тоннеле не учитывался. Данное упрощение опирается на предположение о высокой температуре стен тоннеля и отсутствии теплообмена между стенами тоннеля и продуктами горения. Расчетная сетка составляла $89 \times 10 \times 12 = 10680$ узлов.

Несмотря на применение авторами трехмерной модели, имеется существенное расхождение результатов расчета и экспериментальных данных по углу отклонения пламени, полям температур вниз по вентиляционному потоку и, особенно, вверх, против потока.

В работе [69] отмечается, что вероятной причиной такого расхождения является некорректность стационарного подхода к решению данной задачи. В этой связи с помощью модели в двухмерном плоском приближении произведено моделирование динамики конвективных потоков при горении бензина на площади 1 м^2 и скорости вентиляционного потока 0,85 м/с в том же тоннеле. Для экономии машинного времени использована "тепловая" полевая модель, в которой заданное общее количество выделяемого тепла в очаге пожара (объемном источнике высотой 0,96 м) соответствовало экспериментальным данным. Основное решение задачи получено на сетке 100×10 в расчетном вертикальном сечении $100 \times 2,4 \text{ м}$ при расположении очагов в центре тоннеля с максимальной мощностью конвективного тепловыделения 1980 кВт. Решение задачи с помощью нестационарной модели позволило проследить динамику взаимодействия конвективных и вентиляционных потоков в процессе развития пожара. Показано, что к исходу 1,5 мин. горения конвективная струя над очагом пожара принимает почти вертикальное положение и начинает поворот в сторону набегающего вентиляционного потока. К 2,5-3 мин. поток с температурой 30-50 °С распространяется на 25 м от очага, с температурой 60 °С - на расстояние 12 м

вверх по потоку. В установившейся стадии взаимодействия конвективных и вентиляционных потоков получено более реальное, чем в [68] согласование расчетных температур с экспериментальными при небольшом завышении расчетных значений, как по ходу вентиляционной струи, так и против нее. Следует отметить, что завышение расчетных температур связано с особенностями двухмерной модели. Показано также, что согласуются и максимальные значения скоростей в районе очага пожара.

В работе [70] описано моделирование пожара в тоннеле, математическая модель и постановка задачи, для которого отлаживалась на экспериментальной модели размерами всего 21x1,5x1,6 м, который являлся макетом масштаба 1:4 реального тоннеля длиной 84 метра. В работе обсуждаются детали эксперимента, в особенности общая тепловая мощность пожара и скорость выгорания топлива. Расчетная модель этого эксперимента отличается следующими чертами. Вместо расчета радиационного переноса использовалась упрощенная модель радиационного теплообмена со стенами тоннеля. При этом полагалось, что на потолок тоннеля радиационный тепловой поток не падает, т.к. он прикрыт плотным дымом. Тепловые потери за счет радиационного теплообмена были учтены уменьшением теплоты сгорания на 15%. Модель турбулентности – обобщенная на трехмерный случай алгебраическая модель. Использовались расчетные сетки 14760 и 22491 узлов. Результаты расчета для масштабного тоннеля хорошо соотносились с экспериментальными данными.

В работе [71] этот же эксперимент моделировался с помощью двумерной плоской математической модели, включавшей в себя диффузионно-вихревую модель горения. Полученные в результате расчета температура, оптическая плотность и профили скорости также были близки к экспериментальным.

Статья [72], в которой рассматривается распространение ОФП в тоннеле длиной 300 м является комплексной работой, посвященной оценке безопасной эвакуации людей из тоннеля. При этом, моделирование динамики пожара проводилось на базе программного комплекса JASMINE, реализующего решение трехмерных уравнений движения, $k-\varepsilon$ модели турбулентности с пристенными

функциями и том же упрощении модели радиационного теплообмена со стенами и потолком тоннеля, что и в [70]. Расчетная сетка составляла 7020 узлов. Предварительно были проведены проверочные расчеты по моделированию пожара в более коротком тоннеле, для которого имелись экспериментальные данные. В качестве основного опасного фактора рассматривался критический тепловой поток со значением $2,5 \text{ кВт/м}^2$. Расчеты производились для очагов пожара, в которых мощность тепловыделения менялась в соответствии с выражением $Q = \alpha t^2$. При этом рассматривались очаги с $\alpha=0,1; 0,3; 1,54; 3,5$; и $10,5 \text{ кВт/с}^2$. По результатам расчетов контролировалась динамика блокирования ствола тоннеля и сравнивалась с динамикой эвакуации. В работе также было исследовано влияние наличие продольного воздушного потока, наличие шахт естественного дымоудаления, а также ширины и уклона тоннеля. К сожалению, автор не указывает в статье высоту тоннеля, а также размеры отверстий естественного дымоудаления, поэтому приведенные им результаты позволяют получить лишь качественную информацию.

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

- изменение теплового потока во времени не равномерно и зависит от интенсивности массообмена в тоннеле, который устанавливается спустя некоторое время. Поэтому, начавшаяся эвакуация может быть прервана где-то в середине тоннеля;
- в некоторых случаях наличие горизонтального воздушного потока может ухудшать условия эвакуации;
- эвакуация в сторону подъема тоннеля ухудшает ее условия по мере увеличения угла наклона. Чем больше угол наклона, тем выше опасность эвакуации в ее начальный период;
- увеличение ширины тоннеля, как ни странно, ухудшает условия эвакуации. Вероятно, что на этот результат влияет заданная тепловая мощность очага, которая определяет интенсивность массообмена: чем меньше ширина тоннеля, тем выше скорость массообмена, тем меньше вероятность воздействия

на людей ОФП во время эвакуации (дым интенсивно выносится наружу, не скапливаясь в тоннеле).

Вопросы моделирования пожара и безопасной эвакуации людей из тоннеля также рассматриваются в работах [73-75].

Похожие исследования изложены в статьях [76,77], где рассматривается задача моделирования пожара в протяженном тоннеле высотой 2,5 м и длиной 366 м в условиях вынужденной вентиляции и влияние отдельных факторов на точность расчета, которая оценивалась в сравнении с экспериментальными данными. Скорость принудительно подаваемого воздуха составляла 1,72 м/с. Расчет проводился при помощи программного комплекса FLOW3D. Использование криволинейных обобщенных координат позволило описать цилиндрическую кровлю и наклонные стены тоннеля. Использовалась расчетная сетка с общим количеством узлов 10080.

Моделирование проводилось в 2 этапа: сначала проводилось численное исследование тепломассообмена в районе очага (длина расчетной области - 40 м), затем в области вниз по течению от очага пламени (252 м). Наличие естественной вентиляции позволило использовать для уравнений движения граничные условия первого рода. Расчетная область включала в себя стены тоннеля, которые принимались теплопроводными. Расчет радиационного теплообмена в описываемой работе не проводился, а его учет происходил на этапе задания теплоты сгорания: при реальном экспериментальном тепловыделении 2,3 МВт, моделировался тепловой источник 1,5 МВт (67% от реального). В статье тщательно исследовалось влияние на точность расчета модели турбулентности, в частности, учет шероховатости стен тоннеля. В качестве одного из критериев оценки точности расчета выступал факт опрокидывания припотолочной струи вентиляционным потоком. Было показано, что при использовании различных моделей турбулентности значения касательных напряжений на стенах и потолке тоннеля отличались в 1,5 раза; в результате в некоторых случаях не было смоделировано опрокидывание тепловой колонки. Во всех вариантах расчета были получены завышенные температуры продуктов горения (в среднем на 35K).

В итоге, авторы делают вывод, что учет в модели турбулентности шероховатости стен может изменить суммарный тепловой поток на стены конструкции до 26%, более детальный учет естественной конвекции - на 18%. Кроме того, существенной оказалось влияние формы моделируемого очага пламени: использование прямоугольного источника пламени вместо круглого значительно изменяло результаты расчета.

В работе [78] для воспроизведения процессов в тепловых колонках и припотолочных струях, возникающих в длинном помещении, применялся программный комплекс JASMINE. Особый интерес к моделированию припотолочных процессов (и, соответственно, тепловых колонок) связан с тем, что пожарные извещатели и спринклерные системы располагаются, как правило, на потолке. Одной из целей описываемого исследования являлось моделирование поведения пожара и распространения его опасных факторов при различном положении вентиляционных люков: над очагом, по центру тоннеля на удалении от очага и без вентиляции вовсе. При расчете использовались те же математические модели, доступные в данном программном комплексе, что и обычно: к-ε модель турбулентности с пристенными функциями, модель радиационного теплообмена со стенами, модель горения Магнуссена.

Результаты моделирования распространения ОФП при пожаре в полномасштабных тоннелях, полученные с помощью программного комплекса SOFIE изложены в работах [79-81].

Несмотря на успешное применение соответствующих программных комплексов 3D моделирования для решения задач, связанных с распространением пожара, в вышеописанных работах, в последние несколько лет наибольшую популярность приобретает использование американского программного комплекса Fire Dynamics Simulator (FDS), разработанного Национальным институтом стандартов и технологий (США) [82]. Очевидно, что особо привлекательным этот программный продукт делает возможность свободного использования, а также результаты его тестирования и валидации при проведении различных исследований полей температуры и скоростей при пожарах [83].

Поэтому все больше численных исследований пожаров в тоннеле проводятся с его помощью.

Так, работа [84] посвящена численному исследованию эффекта расположения очага пожара на производительность системы естественной вентиляции с помощью шахт в городском тоннеле. Рассмотрено влияние размещения очага пожара на различном расстоянии от двух шахт естественной вентиляции, в том числе с наличием продольного воздушного потока от 1 до 3 м/с. В качестве модельного тоннеля рассмотрен тоннель длиной 100 м, шириной 10 м и высотой 5 м. Две вертикальных шахты размером 2х2 м размещались на расстоянии 25 и 75 м от начала тоннеля. Зависимость для мощности очага пожара квадратичная на протяжении 3-х секунд, далее постоянна и составляет 3 МВт. Автором проведена целая серия численных экспериментов. Одним из предметов исследования являлось наличие т.н. plug-holing эффекта, который заключается в снижении эффективности работы шахт из-за «подсоса» некоторого количества воздуха и, как следствие, уменьшение объема удаляемого дыма. А именно, для случаев пожара в пространстве между двумя шахтами без ветра наблюдается эффект plug-holing в обеих шахтах. При добавлении ветра, эффект plug-holing наблюдается только в шахте ниже по потоку. Если скорость продольного ветра повышается, явление эффекта plug-holing постепенно исчезает, а затем наступает эффект бифуркации (расслоения) дыма. Шахта, расположенная прямо над зоной бифуркации не может удалять дым эффективно. Для случаев с меньшей скоростью ветра по большому счету эффекты аналогичны. В случае с большой скоростью ветра, увеличивается концентрация СО и массовый поток дыма, удаляемого через шахты вне зависимости от расположения очага. В целом эффективность дымоудаления значительно лучше при небольших скоростях ветра.

Автор работы считает изучение и применение систем вентиляции с естественным побуждением для тоннелей достаточно перспективным из-за их надежности, простоты и существенной экономической выгоды. Кроме, собственно, проведенных исследований автором приведены интересные ссылки

на работы по системам естественной вентиляции тоннелей с помощью вертикальных шахт.

Например, в работе [85] проведены полномасштабные испытания в автодорожном тоннеле с естественной вентиляцией с использованием шахт и получено, что большое количество дыма и тепла может быть удалено через указанные шахты.

В работе [86] исследовались характеристики распространения дыма в тоннеле мелкого заложения с использованием открытых пространств (проемов) в перекрытии. Расстояние от очага пожара до дымового фронта и толщина дымового слоя вдоль потолка исследовались в зависимости от величины мощности тепловыделения. Толщина дымового слоя уменьшалась быстро благодаря наличию естественной вентиляции.

В работе [87] проведена серия экспериментов по исследованию высоты вертикальных шахт на естественную вентиляцию. Были исследованы два особых явления – подсос воздуха (plug-holing) и турбулентное разделение пограничного слоя, которые оказывают влияние на удаление дыма. Было получено, что существует критическое значение высоты шахты для которого может быть значительно уменьшено разделение граничного слоя, а также чрезмерное вовлечение свежего воздуха (plug-holing) сведено к минимуму.

В работе [88] было проведено экспериментальное исследование влияния мощности пожара и параметров тоннеля на эффект plug-holing на уменьшенной модели тоннеля с естественной вентиляцией. Указанный эффект был проанализирован для получения модифицированного числа Фруда, учитывающего влияние геометрических размеров и мощности пожара на систему естественной вентиляции.

В работе [89] исследованы эффекты наклона шахты вентиляции. Получено, что эффект разделения граничного слоя исчезает для наклонных шахт. При этом, оптимальный угол наклона для шахты составляет около 76 градусов.

Кроме того, исследования по эффективности использования вертикальных шахт для дымоудаления из тоннеля содержатся в [90-93].

Следующая статья [94] посвящена исследованию распространения дыма в тоннеле, имеющем значительный уклон. Проблема рассмотрена с практической точки зрения проектирования системы противодымной вентиляции, параметры которых в некоторых тоннелях могут быть существенно занижены. Дело в том, что во многих тоннелях с поперечной вентиляцией объем удаляемого дыма определяется на основе оценки выделяемого дыма из «проектируемого» очага. Этот метод косвенно предполагает наличие стабильной стратификации дымового слоя. В случае, если предположение о стратификации дымового слоя не подтверждается (имеют место высокие скорости потоков), системой должен быть удален весь объем воздуха перемешанного с дымом.

Скорость потока зависит от эффективной разности давлений на порталах, которая в свою очередь является функцией разности высот порталов и температур внутри и снаружи тоннеля. Скорость потока также зависит от длины тоннеля.

Например, для тоннеля с уклоном около 2% небольшая разница температур может вызывать скорость потока в пределах критических значений. А разница температур от 5 до 10 градусов вполне возможна даже без пожара. При этом, когда скорость превышает 2,5 м/с дымовой слой быстро перемешивается по всему поперечному сечению тоннеля. Удаление перемешанных газов при этом требует более высокой мощности системы, чем определенной исходя из выделяемых из очага продуктов горения. В тоннелях с уклоном, превышающим 3%, так называемый «эффект трубы» из-за повышенных температур может вызывать скорости 4 м/с и более. Поэтому, мощность системы должна быть заранее спроектирована с учетом ожидаемой продольной скорости в месте расположения очага пожара.

В статье сравниваются три модели расчета эффективной разности давлений вследствие эффекта трубы. С помощью этих моделей может быть вычислена ожидаемая скорость потока, основанная на плавучести и действии внешних сил.

Моделирование пожара мощностью 30 МВт в тоннеле длиной 2 км с уклоном 5% дает интересный результат. Пока скорость потока достаточно мала, дым распространяется в обе стороны от очага. При больших скоростях нижний

фронт разворачивается обратно в сторону очага, в то время как верхний фронт ускоряется в сторону портала. Таким образом, наблюдается полное отсутствие эффекта «бэк лэйринг» (обратного течения дыма) широко исследуемого некоторыми другими авторами.

В работе приведены примеры систем ДУ для существующих и проектируемых тоннелей, показано, что для некоторых из существующих тоннелей мощность используемой системы вентиляции явно недостаточна.

Особенно следует отметить исследования распространения ОФП в тоннеле, проводимые экспериментальным путем. Эти исследования очень немногочисленны из-за их высокой стоимости и поэтому очень ценны не только с точки зрения получения конкретных характеристик пожара, но и как основа для численного моделирования, поскольку на основании именно таких экспериментов, как правило, осуществляется проверка и апробация тех или иных математических моделей и программных комплексов.

Поскольку стоимость таких экспериментов существенна, к тому же не всегда возможно реализовать в натуре те или иные интересующие характеристики объекта, в последнее время получили распространение экспериментальные исследования с использованием не полномасштабных тоннелей, а в несколько раз уменьшенных моделей. Основой таких экспериментов являются, в частности, работы [95,96]. Так в работе [97] были проведены эксперименты, основанные на законе соответствия Фруда, на уменьшенной модели тоннеля (1/10) для изучения эффекта наклона на критическую скорость в тоннеле с продольной вентиляцией при пожаре. Как источник пожара был использован поддон с метанолом. Было изучено распространение дыма в модельном тоннеле с различными значениями уклона (-3%, -1,8%, -1%, 0%, 1%, 1,8%, 3%) и продольной вентиляцией. Измерялось продольное распространение температуры и скорость. Исследовалась критическая скорость продольной вентиляции для предотвращения обратного движения дыма. Было проведено 14 серий испытаний на модельном тоннеле с различными размерами очага, скоростями продольной вентиляции и тоннельными уклонами. Получены и оценены профили температуры и критической скорости.

Критическая скорость в горизонтальном тоннеле, полученная в этом исследовании, была использована для сравнения с предыдущими исследованиями. Экспериментальные данные хорошо согласуются с моделью, предложенной другими авторами [98]. Получено, что критическая скорость понижается с увеличением уклона тоннеля от -3 до +3%. Когда уклон тоннеля растет снизу вверх, критическая скорость понижается вне зависимости от мощности пожара. Предложена зависимость между критической скоростью и уклоном тоннеля, основанная на эксперименте. Вместе с тем, отмечено, что полученные данные имеют различие с зависимостями, полученными в [99], также основанными на экспериментальных данных, причину которых авторы усматривают в различных конфигурациях экспериментов.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- обеспечение пожарной безопасности является одним из приоритетных направлений при строительстве автодорожных тоннелей и требует применения научного подхода;
- вопрос обеспечения пожарной безопасности автодорожных тоннелей не может быть решен только в нормативной плоскости, а зачастую требует проведения дополнительных исследований;
- полевая математическая модель является наиболее предпочтительной для проведения численных исследований распространения опасных факторов пожара в автодорожных тоннелях;
- исследование влияния различных геометрических и иных характеристик на процесс распространения ОФП в автодорожных тоннелях с целью оценки обеспечения безопасности людей при пожаре является востребованной и актуальной задачей;
- целесообразно проведение численных расчетов с целью изучения влияния на распространение пожара наиболее характерных факторов (геометрических характеристик, мощности пожара), на основе которых качественно могут быть выработаны рекомендации по повышению уровня безопасности людей при пожаре в тоннеле.

В связи с этим целью настоящей работы является моделирование развития пожара в автодорожном тоннеле для оптимизации проектных решений и повышения уровня его пожарной безопасности.

Для реализации указанной цели необходимо:

1. Сформулировать математическую модель расчета распространения опасных факторов пожара в автодорожном тоннеле.
2. Провести натурные эксперименты на модели тоннеля.
3. Провести апробацию математической модели на основе сравнения с данными экспериментов.
4. Провести моделирование и исследовать влияние геометрических характеристик и мощности тепловыделения на распространение ОФП в тоннеле.

ГЛАВА 2. ФОРМУЛИРОВКА И АПРОБАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В РАМКАХ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SOFIE. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

2.1 Формулировка математической модели программного комплекса SOFIE

Решение задачи численного моделирования, тем более с помощью полевой модели, не может быть реализовано без соответствующего программного комплекса. Очевидно, что решение приведенной в предыдущем разделе системы уравнений, использование необходимых подмоделей, а также необходимость «привязки» всей системы к расчетной сетке являются сложной задачей, связанной с разработкой программного комплекса по реализации полевой модели. С учетом этого, в настоящее время количество программных комплексов основанных на CFD методе не так велико. В качестве отечественных разработок можно отметить программы, используемые в [108-110], из которых только одна является законченным коммерческим продуктом. Самые известные зарубежные программы упомянуты в предыдущей главе. Это FLOW 3D, JASMINE, FDS, Phoenix, Fluent, CFX, Fenix, из которых наибольшей популярностью в настоящее время пользуется комплекс FDS. Вместе с тем, существуют и менее известные программные комплексы, также нацеленные на решение пожарных задач и имеющие некоторые преимущества в виде простоты использования, наличия более эффективных подмоделей, обладающих лучшей устойчивостью, возможностью использования более грубых сеток для инженерных расчетов. Одним из таких программных комплексов является SOFIE [111], разработанный в Великобритании и специально предназначенный для моделирования пожаров.

Цель настоящей главы диссертации состоит в оценке возможности использования конкретной полевой модели для прогнозирования распространения ОФП в автодорожных тоннелях. Путь этой оценки заключается в сравнении имеющихся экспериментальных данных с результатами численных

расчетов с помощью имеющегося инструмента моделирования в виде программного комплекса SOFIE.

Используемая математическая модель включала в себя следующие основные уравнения:

- уравнения неразрывности и сохранения количества движения

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i, \quad (1.19)$$

- уравнения к-ε модели турбулентности Лаундера – Сполдинга [100] с поправкой на влияние естественной конвекции [101]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_K + G_B - \rho \varepsilon, \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} [c_1 (G_K + G_B)] - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (1.21)$$

где $\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, $G_K = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, $G_B = -\beta g \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_j}$, $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$,

- уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial \rho h}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_{h,rad}, \quad (1.22)$$

- уравнения сохранения масс компонентов

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j Y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + S_i. \quad (1.23)$$

При расчетах были использованы следующие значения констант [47]:

$$C_\mu = 0,09; C_1 = 1,44; C_2 = 1,92; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3;$$

$$\sigma_t = \sigma_h = Sc_h = Sc_t = 0,7$$

Для моделирования процессов горения был применен вариант диффузионно-вихревой модели горения Магнуссена [58]:

$$S_f = -\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ C \cdot Y_f, C \frac{Y_{ox}}{s}, B \frac{Y_{pr}}{s+1} \right\}, \quad (1.24)$$

где $C=4$, $B=2$.

Для расчета процессов излучения использовалась модель дискретного радиационного теплопереноса [63]. При определении оптических свойств газа применялась модель взвешенной суммы серых газов [102] с коэффициентами Трюлава [103]. Оптическая плотность дыма рассчитывалась на основании допущения о подобии полей концентрации CO_2 и оптической плотности дыма. Данный метод расчета оптической плотности дыма был предложен и апробирован на экспериментальных данных в работе [104].

В качестве граничных условий для уравнений движения на твердых поверхностях использовались условия прилипания ($u=0$) 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 [47]. На плоскостях симметрии для всех уравнений переноса использовалось условие $\partial\Phi/\partial n=0$. Стены тоннеля полагались бетонными. Степень черноты поверхности бетона принималась равной 0,9. Начальная температура во всем тоннеле равнялась 293 К.

Приведенная математическая модель при использовании программного комплекса SOFIE ранее уже была успешно апробирована в работе [105] для моделирования распространения продуктов горения в обычных помещениях и в работах [106,107] для мелкомасштабных экспериментов в тоннелях.

В настоящей работе в качестве основы для апробации модели рассматривались две экспериментальные работы по изучению распространения ОФП в тоннелях. В качестве первой были рассмотрены натурные испытания на фрагменте тоннеля, проведенные в ФГБУ ВНИИПО МЧС России, и представлены результаты их моделирования, полученные с использованием полевой модели. Далее представлены результаты моделирования пожарных испытаний, проведенных в тоннеле Memorial Tunnel (США) [5], с помощью той же модели.

2.2 Эксперименты на модели тоннеля

2.2.1 Постановка, методика и результаты экспериментов

На полигоне института ФГБУ ВНИИПО были проведены эксперименты на модели тоннеля.

Основной целью указанных экспериментов являлось изучение характера движения ОФП внутри тоннеля при пожаре и получение экспериментальных данных необходимых для моделирования и апробации математической модели.

Экспериментальный стенд представлял собой модель тоннеля прямоугольного поперечного сечения размерами $2,0 \times 2,4 \text{ м}^2$ и $2,0 \times 2,1 \text{ м}^2$. Длина стенда составляла 13 м. Стены тоннеля кирпичные, пол и потолок – из бетонных плит. Один из торцов был закрыт кирпичной стеной. Второй был оборудован металлическими воротами и вел непосредственно наружу. В одной из стен имелись три технологических окна размерами $0,25 \times 0,25 \text{ м}^2$. Свежий воздух поступал в помещение тоннеля через открытый выход, 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);
- термопары в оплетке из стекловолокна (в остальном объеме экспериментального стенда).

Сигналы термопар выводились на приборы типа КСП и регистрировались на бумажную ленту. Схема экспериментального стенда с размещением термопар представлена на рисунке 5.

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 0,5х0,5 м, расположенный вблизи глухой торцевой стены тоннеля на равном удалении от боковых стен.

Методика проведения эксперимента соответствовала поставленным целям. А именно, установка термопар производилась в одной из продольных половин фрагмента тоннеля с учетом симметричности исследуемого процесса относительно продольной оси. В каждом из измерительных сечений устанавливалось от 6 до 9 термопар на расстоянии от потолка от 0,2 до 1,7 м, учитывающем предполагаемую толщину дымового слоя. После установки термопар и подготовки противня с горючим и приборов регистрации по сигналу оператором с помощью факела поджигался поддон с керосином. Далее в течение всего эксперимента фиксировалось время и температура в точках установки термопар. Эксперимент проводился до полного выгорания топлива при естественной вентиляции фрагмента тоннеля.

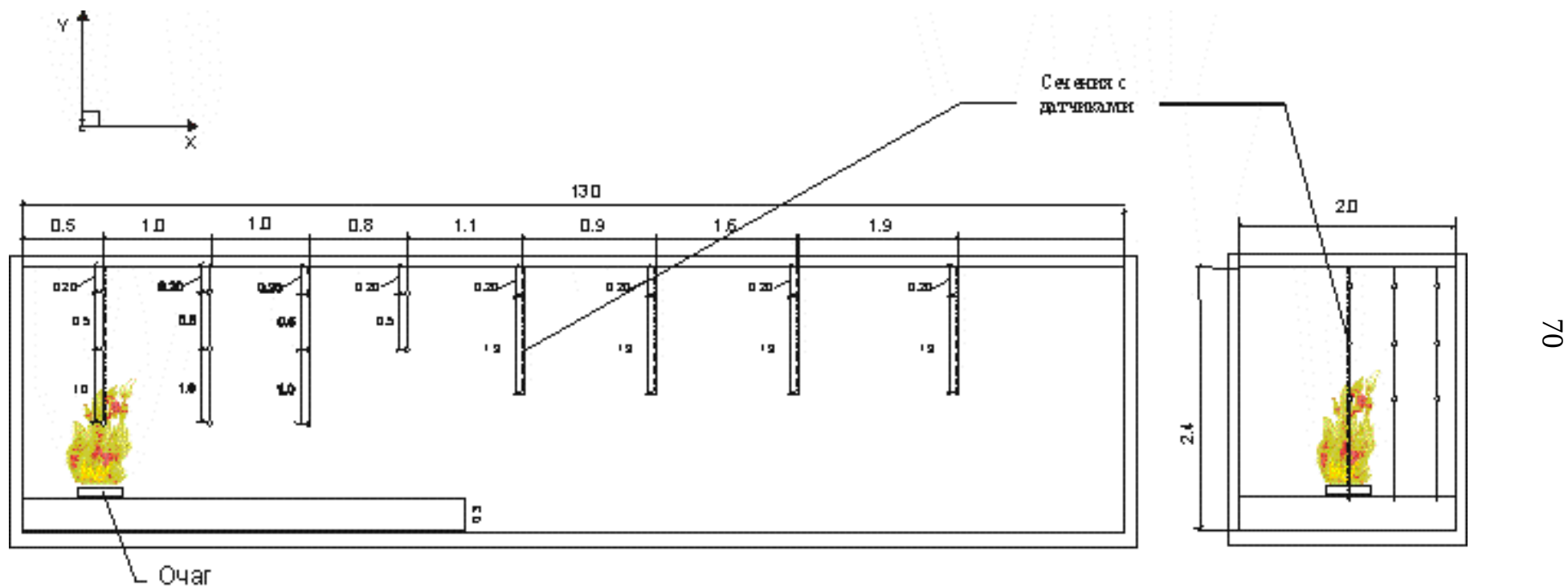


Рисунок 5 – Схема экспериментального стенда с размещением термопар

Эксперимент состоял из трех стадий. На первой стадии происходило горение керосина при открытых створках ворот. Затем через 17 минут после начала эксперимента створки ворот были закрыты, и в течение 11 минут горение происходило при закрытых створках. После этого створки ворот были вновь открыты, и в течение 5 минут керосин полностью выгорел. Таким образом, полное время эксперимента составило 33 минуты. Технологические окна были открыты в течение всего времени эксперимента.

Фотографии, иллюстрирующие горение керосина при открытых створках ворот, представлены на рисунках 6-7. Из рисунка 7 видно, что при открытых створках ворот полного задымления объема тоннеля не происходит и выходящий из помещения дым имеет бледно серый цвет.

После закрытия ворот произошло полное задымление тоннеля густым черным дымом, что объясняется недостатком кислорода при сильно ограниченном воздухообмене. Однако при открытии ворот произошло удаление дыма из нижней части тоннеля, и наблюдалась та же картина газообмена, что и до закрытия створок.

На рисунках 8-9 представлена динамика температуры на оси очага пожара и на расстоянии 1 м от очага под потолком тоннеля (0,2 м от потолка) для обоих экспериментов. Видно, что результаты двух экспериментов незначительно отличаются друг от друга.

На рисунке 10 представлена динамика изменения температуры под потолком тоннеля на расстоянии 1 м и 2 м от очага пожара на различных этапах проведения эксперимента. На первом этапе эксперимента (до закрытия ворот) наблюдаются два ярко выраженных участка. Первый участок, соответствующий неустановившемуся горению керосина характеризуется быстрым повышением температуры газовой среды. Второй участок установившегося горения характеризуется практически постоянной температурой. На втором этапе эксперимента (после закрытия ворот) температура газовой среды несколько повышается по сравнению со стационарной температурой первого участка. Это связано с тем, что вместо свежего воздуха из окружающей среды в конвективную

колонку и припотолочную струю вовлекается дым с более высокой температурой. На третьем этапе после открытия ворот происходит догорание керосина в противне. Из-за малого количества горючего стационарный режим при этом установиться не успевает.

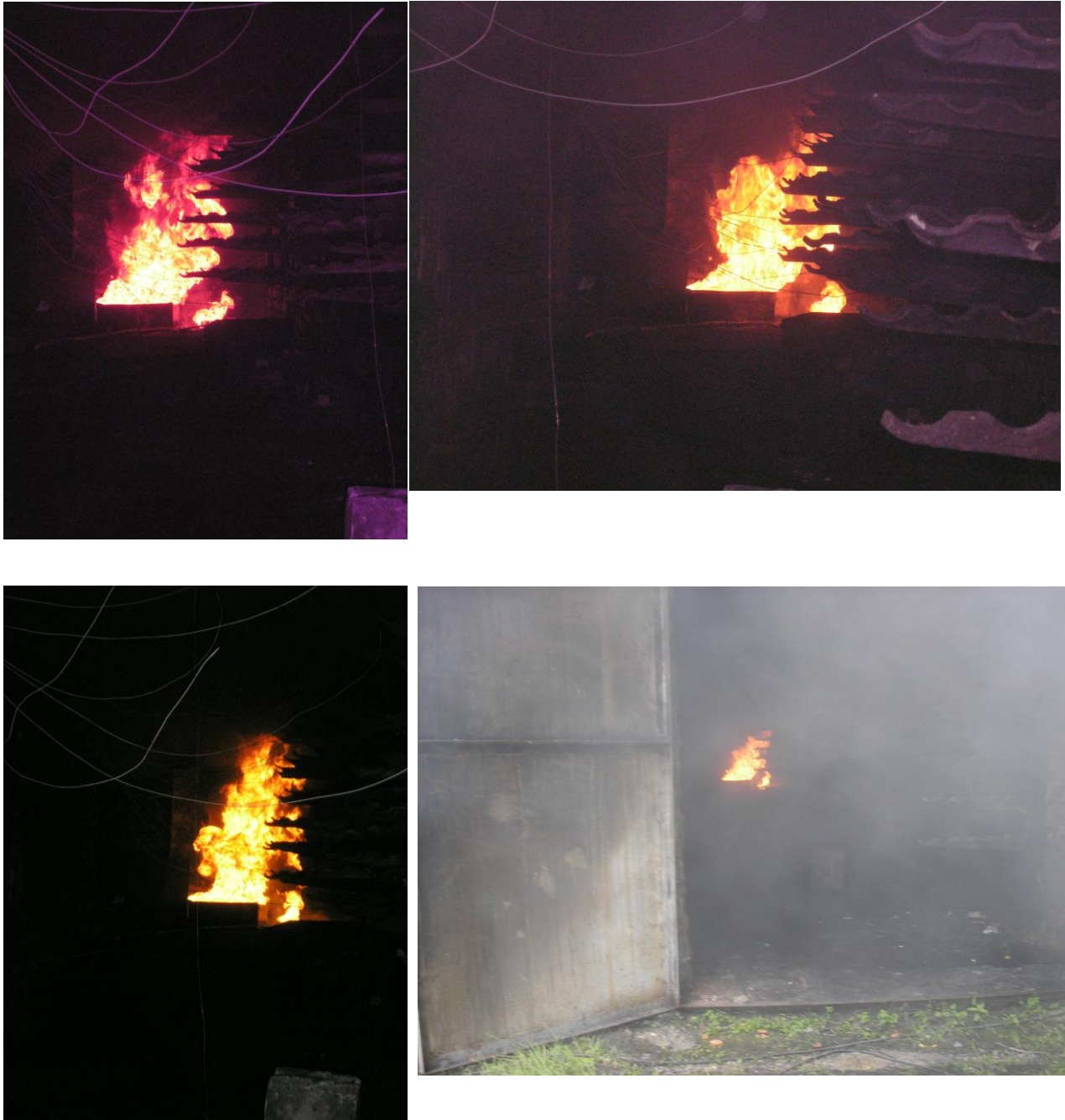


Рисунок 6 – Горение керосина при открытых створках ворот



Рисунок 7 – Выход продуктов горения наружу

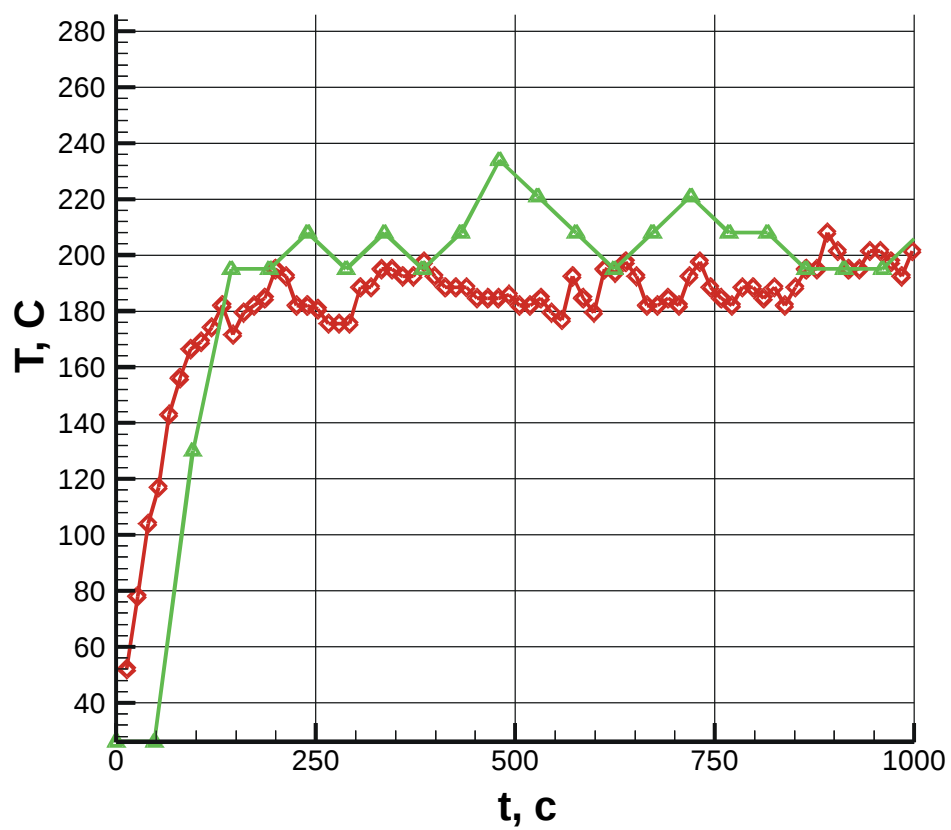


Рисунок 8 – Динамика температуры на оси очага пожара на расстоянии 0,2 м от потолка. Красная линия – 1-й эксперимент, зеленая линия – 2-й эксперимент

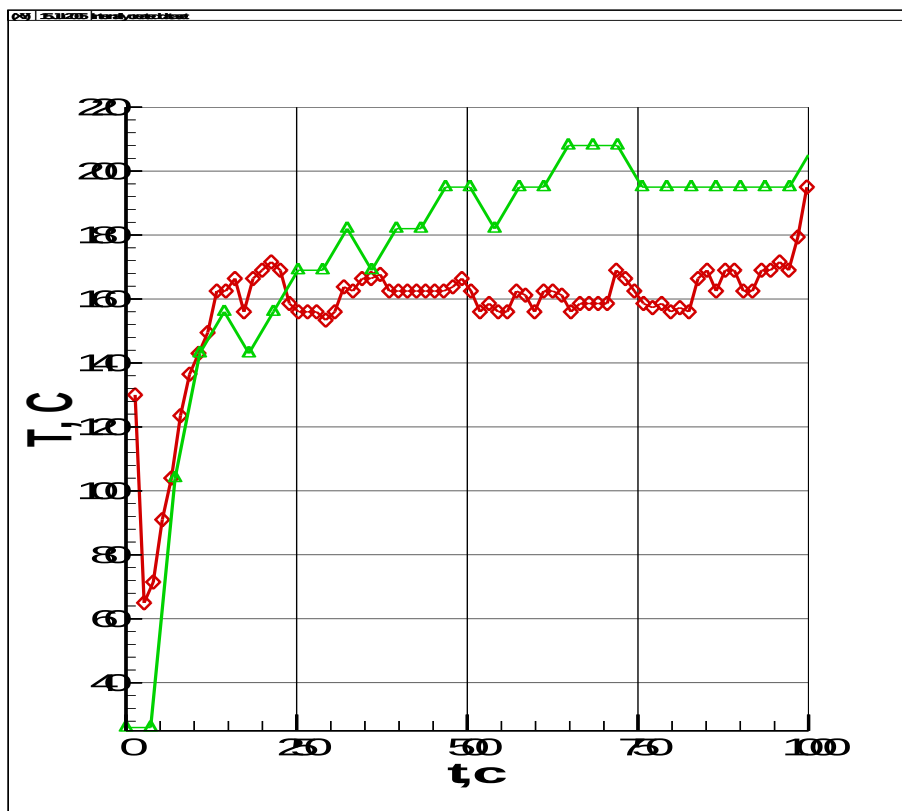


Рисунок 9 – Динамика температуры на расстоянии 1 м от оси очага пожара на расстоянии 0,2 м от потолка. Красная линия – 1-й эксперимент, зеленая линия – 2-й эксперимент

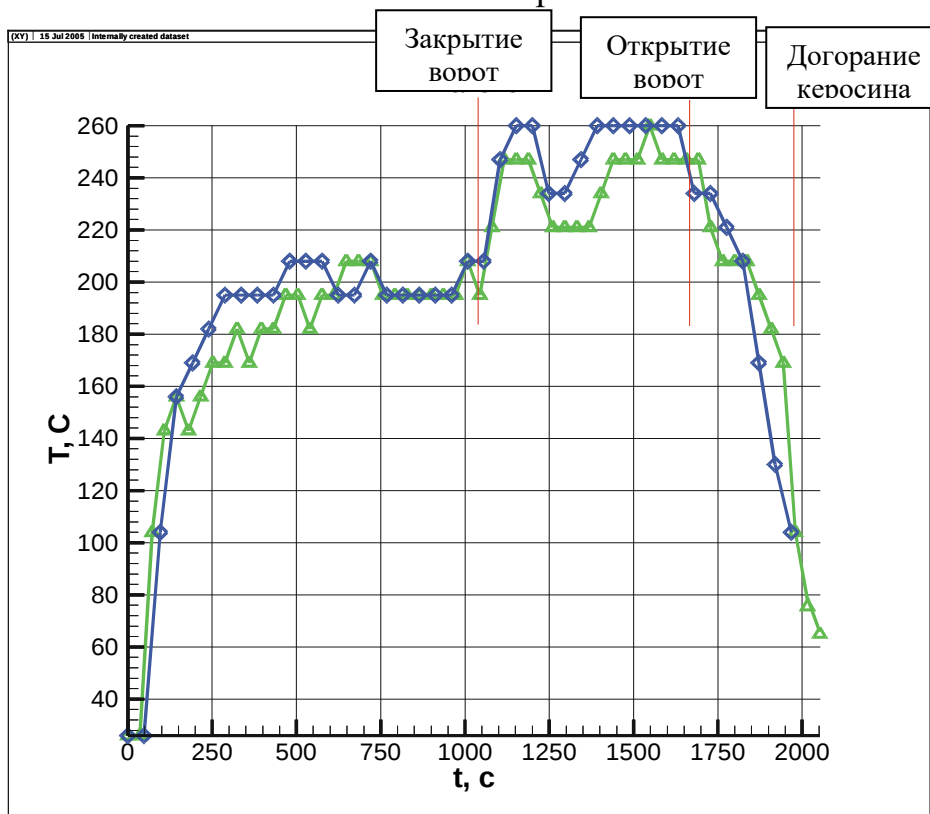


Рисунок 10 – Динамика изменения температуры под потолком тоннеля на расстоянии 1 м (зеленая кривая) и 2 м (синяя кривая) от очага пожара на различных этапах проведения эксперимента

2.2.2 Численное моделирование эксперимента

Расчетная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 11.

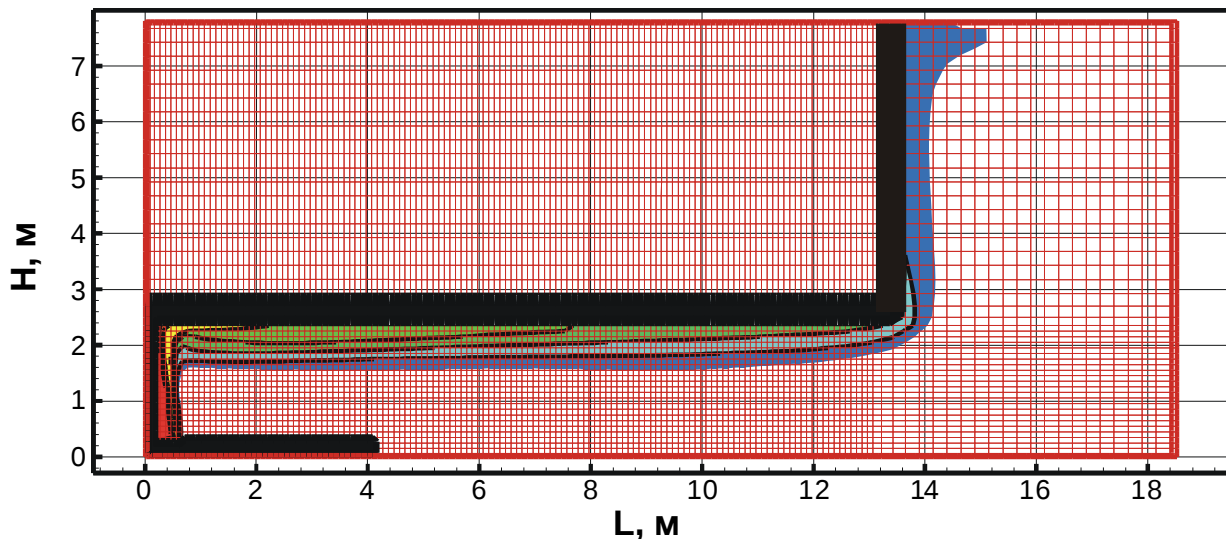


Рисунок 11 – Схема расчетной области. Продольное сечение фрагмента тоннеля

Для моделирования использовалась математическая модель, описанная в подразделе 2.1.

Расчеты производились с временным шагом 0,1 с. Внутри исследуемого объема использовалась равномерная расчетная сетка с размером ячейки 0,1 м. Во внешней области размер ячеек вдоль вертикальной и продольной осей составлял 0,25 м.

В качестве критерия сходимости использовалась сумма невязок уравнения энергии в каждой точке расчетной области, нормированная по потоку энтальпии, поступающему в расчетную область. Значение данного критерия при проведении расчетов не превышало значения 0,001.

Для описания зависимости скорости выгорания от времени была использована зависимость [112]

$$\psi = \begin{cases} \psi_0 \sqrt{t/t_0} & \text{при } t < t_0 \\ \psi_0 & \text{при } t > t_0 \end{cases}$$

где ψ_0 - установившаяся скорость выгорания;

t_0 - время достижения установившейся скорости выгорания.

При этом для установившейся скорости выгорания было использовано значение $0,020 \text{ кг/с/м}^2$, соответствующее эквивалентному диаметру противня $0,32 \text{ м}$ [112].

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рисунках 12-17. Из рисунков, на которых показано распределение температур в момент времени 300 с , видно что расхождение расчета с экспериментальными данными не превышает 30% , за исключением точки на расстоянии $0,6 \text{ м}$ от торцевой стенки на высоте $1,7 \text{ м}$, т.е. находящейся непосредственно вблизи пламени.

Некоторых комментариев требуют графики, иллюстрирующие динамику температуры (Рисунки 16-17). Из рисунков видно, что согласно расчету (сплошные зеленые линии) температура в рассматриваемых точках начинает повышаться практически сразу, в то время как согласно экспериментальным данным это повышение начинается с существенной задержкой. Это объясняется тем, что в эксперименте отсчет времени был начат не в момент воспламенения керосина, а в момент поднесения к нему факела. В первом эксперименте, когда отсчет времени был начат в момент воспламенения керосина такой задержки не наблюдалось (Рисунок 16). При просмотре видеозаписи второго эксперимента было установлено, что промежуток времени между поднесением факела и воспламенением керосина составил $40\text{-}50 \text{ секунд}$. В связи с вышеизложенным результаты расчетов были скорректированы для совмещения начальных моментов времени (штриховые линии). Видно, что с учетом произведенной поправки результаты прогнозирования динамики температуры также хорошо согласуются с экспериментом. Расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 20% .

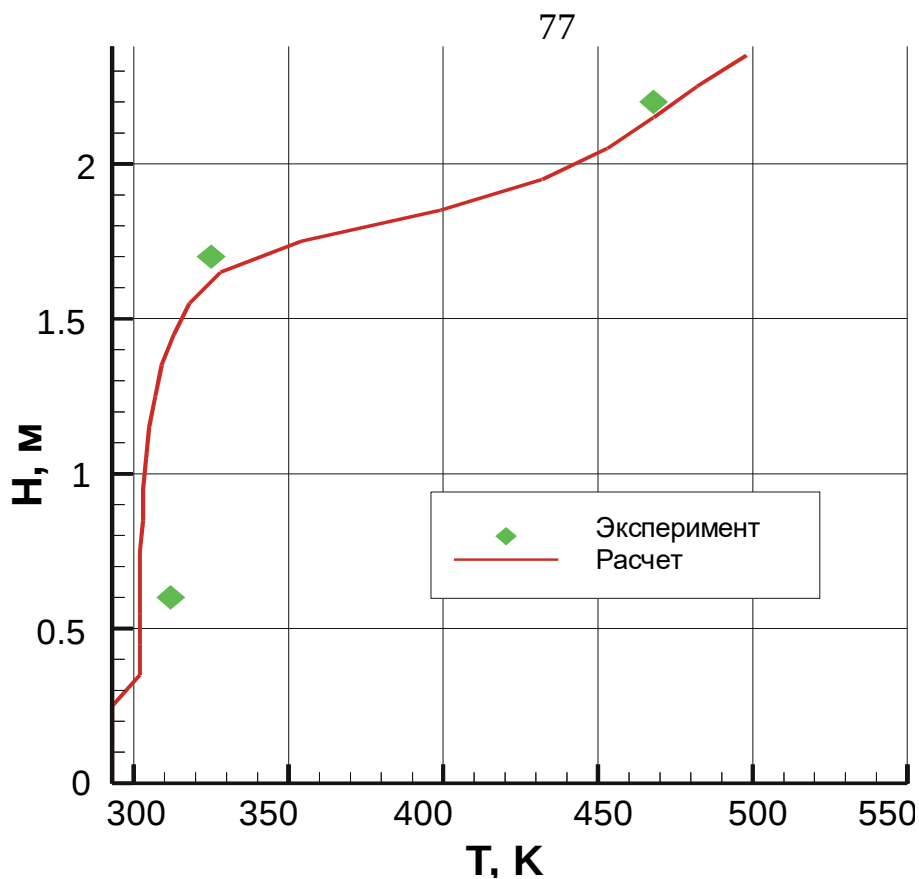


Рисунок 12 – Вертикальный профиль температуры в центральном вертикальном сечении тоннеля на расстоянии 2,2 м от торцевой стены в момент времени 300 с

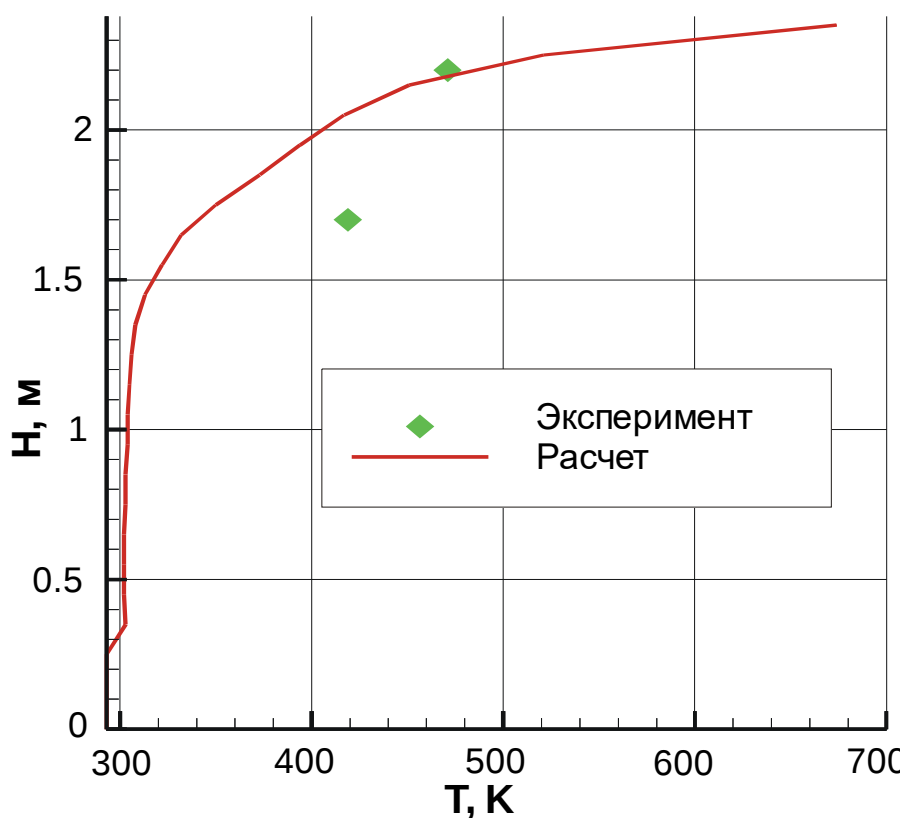


Рисунок 13 – Вертикальный профиль температуры в центральном вертикальном сечении тоннеля на расстоянии 0,6 м от торцевой стены (0,1 м от очага пожара) в момент времени 300 с

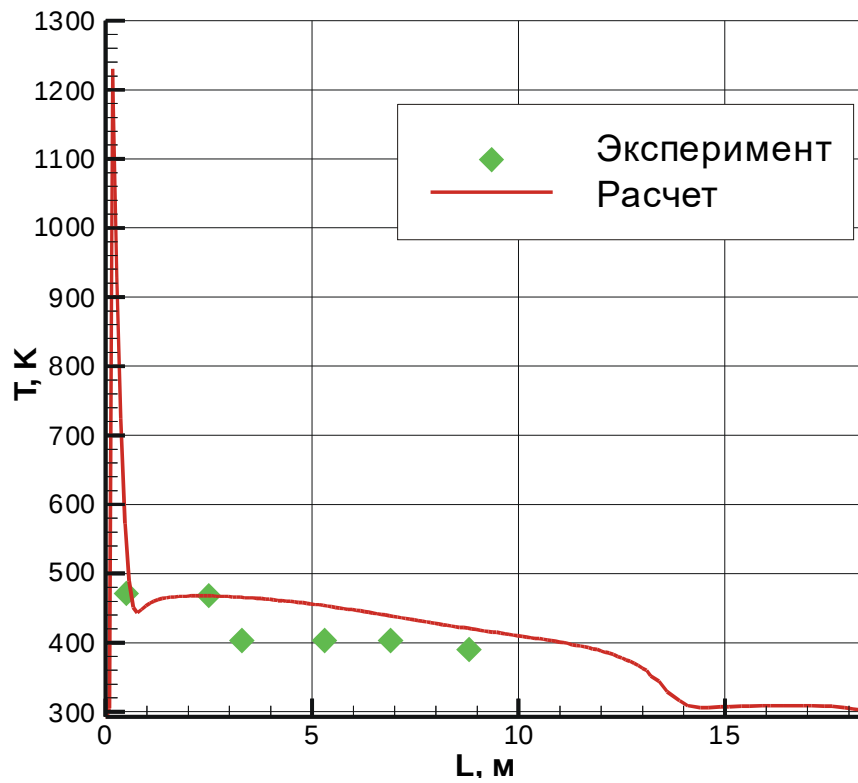


Рисунок 14 – Горизонтальный профиль температуры в центральном вертикальном сечении тоннеля на расстоянии 0.2 м от потолка в момент времени 300 с

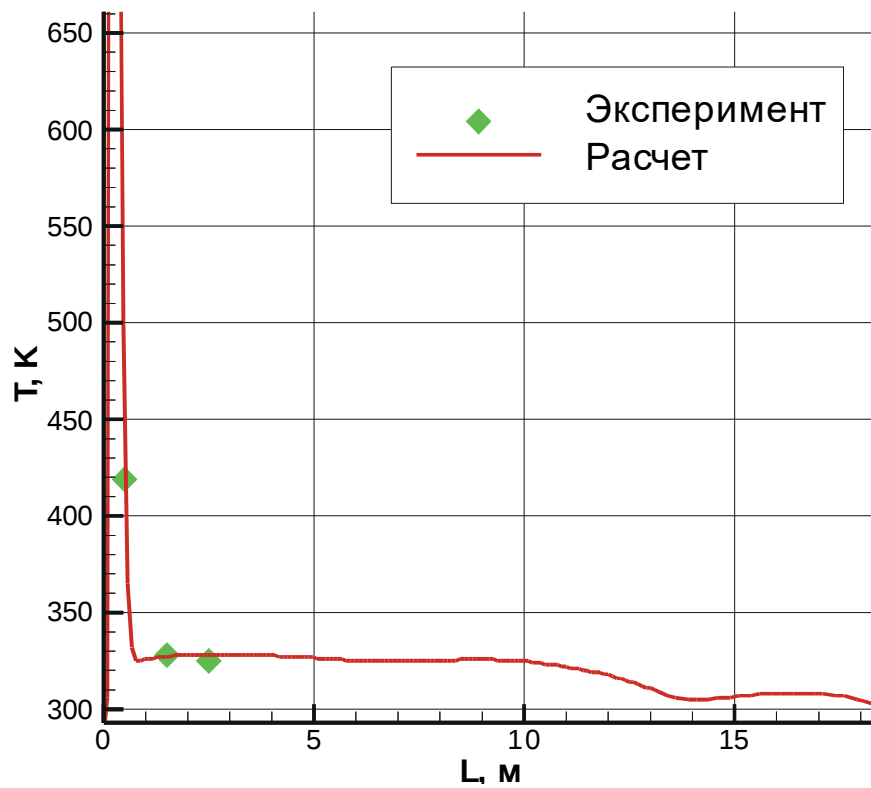


Рисунок 15 – Горизонтальный профиль температуры в центральном вертикальном сечении тоннеля на расстоянии 0.7 м от потолка 300 с

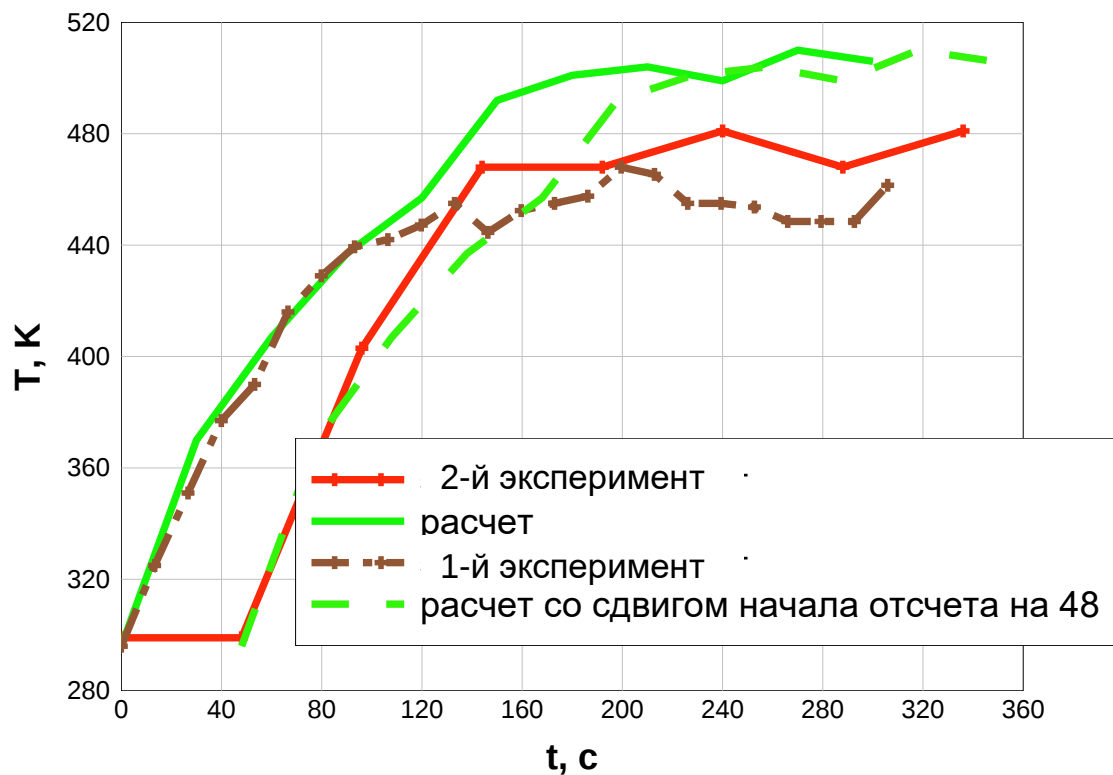


Рисунок 16 – Динамика температуры на оси очага пожара на расстоянии 0,2 м от потолка

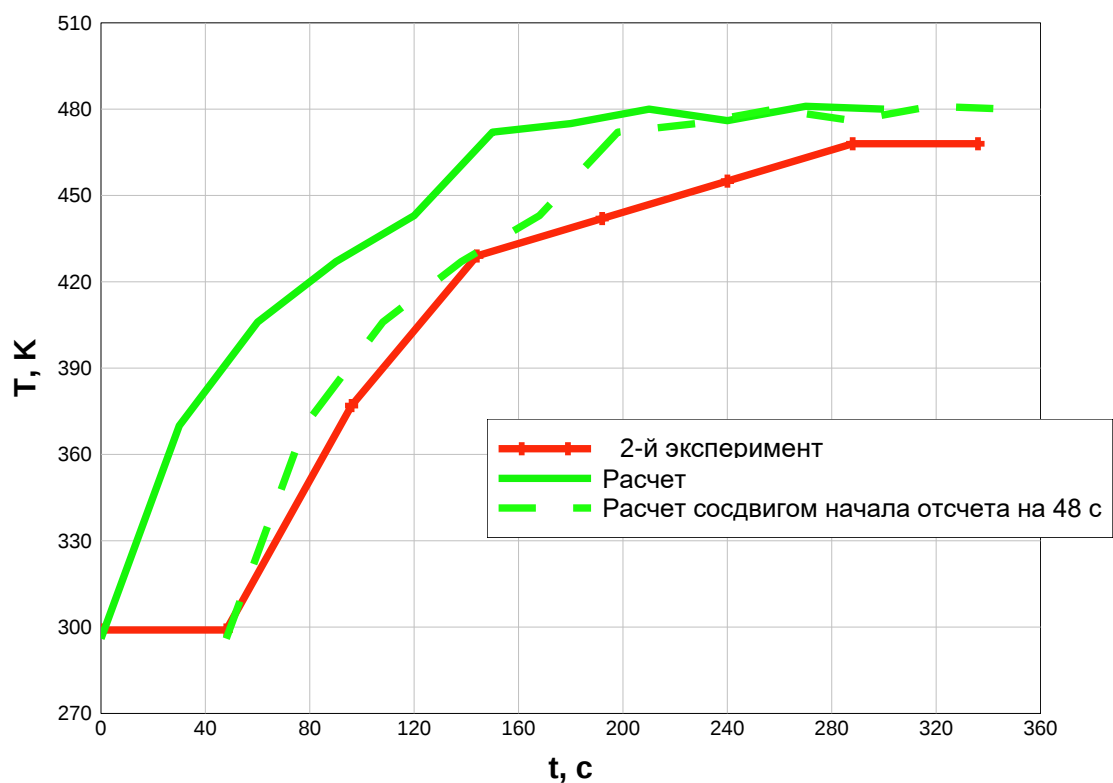


Рисунок 17 – Динамика температуры на расстоянии 0,2 м от потолка на расстоянии 2,5 м от торцевой стены

2.3 Эксперимент в тоннеле Memorial (США)

Программа пожарных испытаний в тоннеле Memorial состояла из серии полномасштабных экспериментов, проведенных в выведенном из эксплуатации автодорожном тоннеле [5]. В экспериментах испытывались различные вентиляционные системы и различные конфигурации этих систем для оценки их эффективности при пожаре. В результате испытаний получены важные данные для проектирования и управления системами вентиляции в автодорожных тоннелях в случае пожара.

Тоннель Мемориал – это двухполосный горный тоннель длиной около 850 м с уклоном 3,2%. Тоннель был переоборудован и подготовлен для исследования и оценки возможностей различных конфигураций системы вентиляции, в том числе полная поперечная вентиляция, частично поперечная вентиляция, естественная вентиляция и т.д.

Тоннель был оборудован аппаратурой и регистрирующими приборами для записи данных. В тоннеле устанавливались датчики измерения скорости, температуры, монооксида углерода (CO), диоксида углерода (CO₂). Данные с каждого датчика записывались. Образование и движение дыма, а также видимость оценивались с использованием телевизионных камер.

Эффективность систем вентиляции проверялась для различных мощностей 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. Были получены интересные результаты, некоторые из которых приведены ниже:

1. Продольный поток воздуха возле очага пожара является такой же важной характеристикой для контроля температуры и дыма как величина расхода удаления дыма. Поэтому определять эффективность вентиляции основываясь исключительно на значении расхода дымоудаления является недостаточным. Кроме того, любые установленные для аварийной вентиляции критерии должны включать влияние других характеристик тоннеля (физические свойства, общеобменная система вентиляции и т.д.);

2. Продольная вентиляция с использованием струйных вентиляторов эффективна при мощностях пожара до 100 МВт. Например, требуемая скорость воздушного потока в тоннеле Мемориал, при которой отсутствует расслоение (опускание) дыма, для пожара в 100 МВт составила около 3 м/с. Однако, система продольной вентиляции при пожаре эффективна только с одной стороны от очага пожара в ущерб условиям на другой стороне, поэтому данная система может быть применена только в тоннелях с односторонним движением;

3. Полностью поперечные системы вентиляции могут использоваться в однозональных или многозональных конфигурациях и могут управляться в равновесном или в неравновесном режимах. Однозонные равновесные полностью поперечные системы (одинаковые расходы подачи и удаления воздуха) показали очень ограниченные возможности управления движением дыма и температурным режимом. Расход в $170 \text{ м}^3/\text{ч}$ с погонного метра не способен управлять дымовыми потоками в условиях пожара при мощности тепловыделения 20 МВт и выше, если система не используется в неравновесном режиме (уменьшенный расход притока). Эффективность поперечных систем в несбалансированном режиме значительно выше. Однако, даже вышеупомянутый расход обеспечивает довольно ограниченные возможности по управлению дымом для пожара 20 МВт. Многозонные полностью поперечные системы имеют свойственную особенность управлять дымовыми потоками, создавая продольный поток воздуха.

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 18.

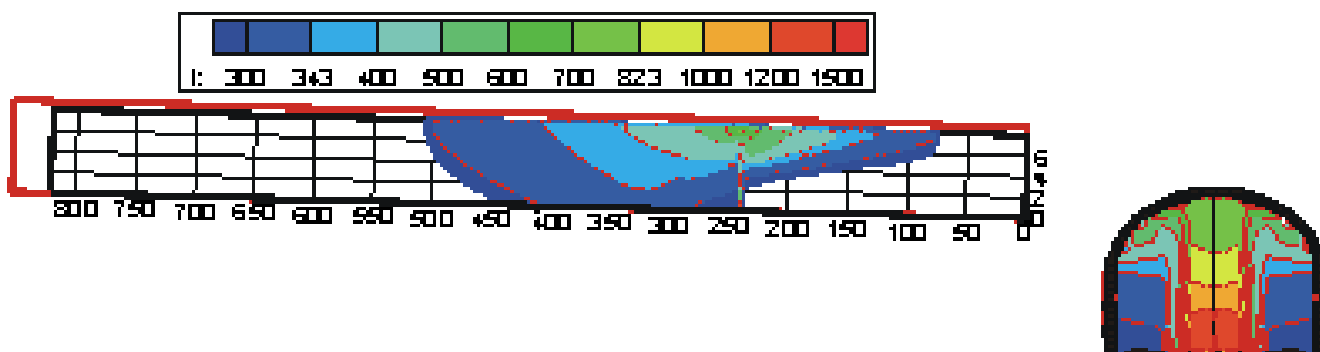


Рисунок 18 – Схема тоннеля

Используемая для расчетов математическая модель приведена выше в разделе 2.1.

Расчеты производились с временным шагом 0,1 с. Использовалась расчетная сетка с различными размерами ячеек от 0,1 до 1 м в продольном направлении.

На рисунках 19-20 представлены результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными. Результаты моделирования показали, что расчетные значения температуры и скорости удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, расхождение которых не превышает 20 %.

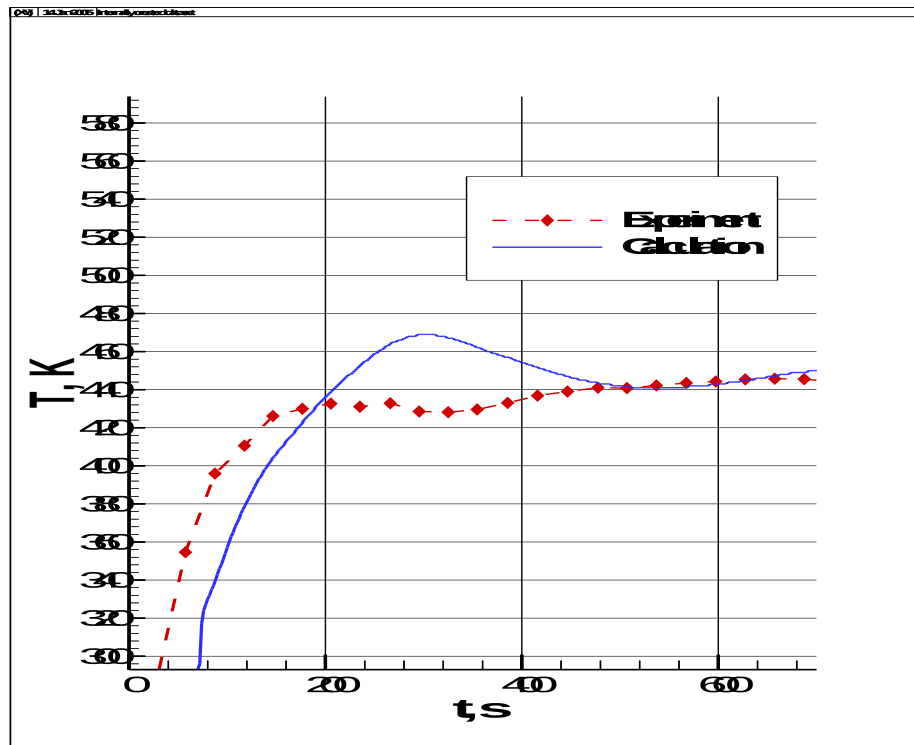


Рисунок 19 – Расчетная и экспериментальная динамика температуры на расстоянии 80 м от очага пожара вверх по уклону на высоте 7 м

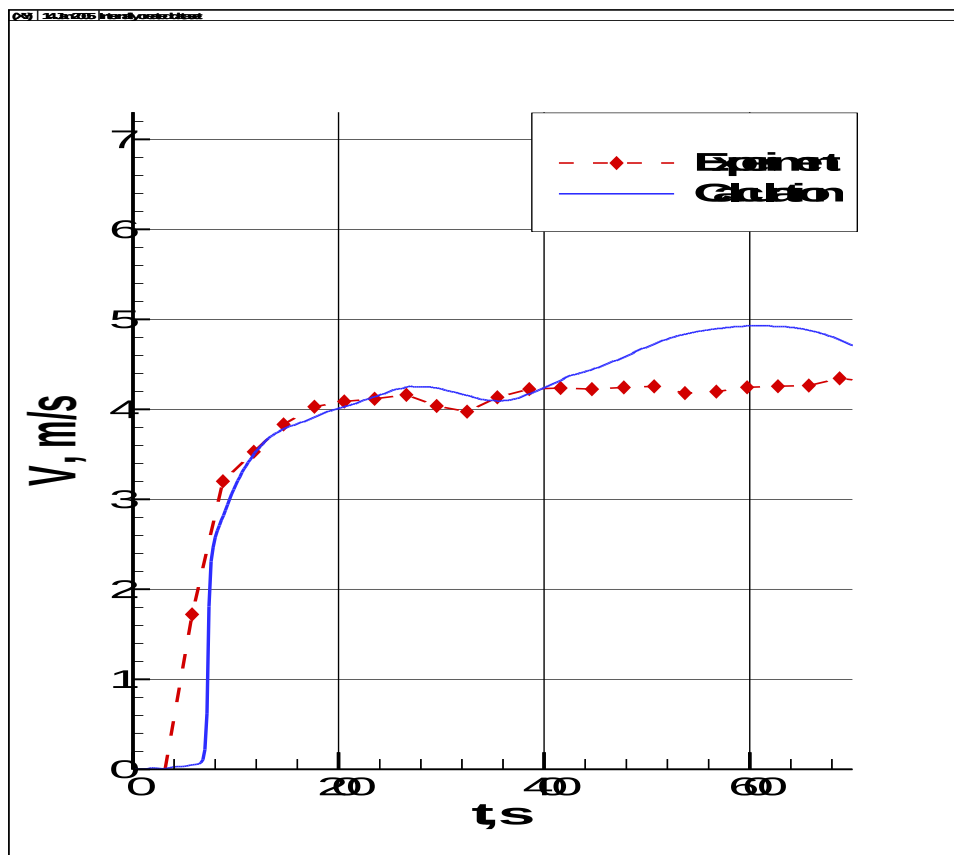


Рисунок 20 – Расчетная и экспериментальная динамика скорости на расстоянии 80 м от очага пожара вверх по уклону на высоте 7 м

Выводы: сравнение результатов численного моделирования с данными экспериментов, приведенных в настоящей главе, показало, что используемая математическая модель, реализованная в программном комплексе SOFIE, адекватно описывает термодинамические характеристики газовой среды при пожаре и может быть использована для прогнозирования распространения опасных факторов пожара в тоннеле.

Таким образом, на основе численных расчетов с использованием указанной модели целесообразно провести качественную и количественную оценку параметров ОФП при пожаре в модельном тоннеле при изменении таких его характеристик как геометрические параметры и мощность пожара, оказывающих существенное влияние на пожарную опасность.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ТОННЕЛЕ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Распространение продуктов горения при пожаре в тоннеле является многофакторным процессом. Вместе с тем, можно выделить несколько основных факторов, которые имеют приоритетное влияние при рассмотрении данного процесса. К ним можно отнести:

- геометрию поперечного сечения сооружения;
- наличие уклона;
- мощность тепловыделения;
- наличие и вид системы противодымной защиты.

Понятно, что влияние всех четырех факторов должно рассматриваться в совокупности, поскольку изменение каждого в значительной степени меняет общую картину пожара. Тем не менее, получение качественной картины, описывающей влияние каждого из факторов в отдельности, является полезной практической задачей, решение которой может значительно облегчить задачи проектирования данных сооружений (размещение эвакуационных выходов), нормирования требований для них, подбора оптимальной и эффективной системы активной противопожарной защиты.

Для решения этой задачи в данной главе с помощью проведения численных экспериментов рассматривается влияние на распространение ОФП следующих факторов:

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

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. Поперечное сечение тоннеля представлено на рисунке 21. Задача являлась симметричной

относительно центрального продольного сечения, поэтому моделировалась половина тоннеля. Расчеты проводились с помощью математической модели, описанной в предыдущей главе. Для реализации модели использовался программный комплекс SOFIE.

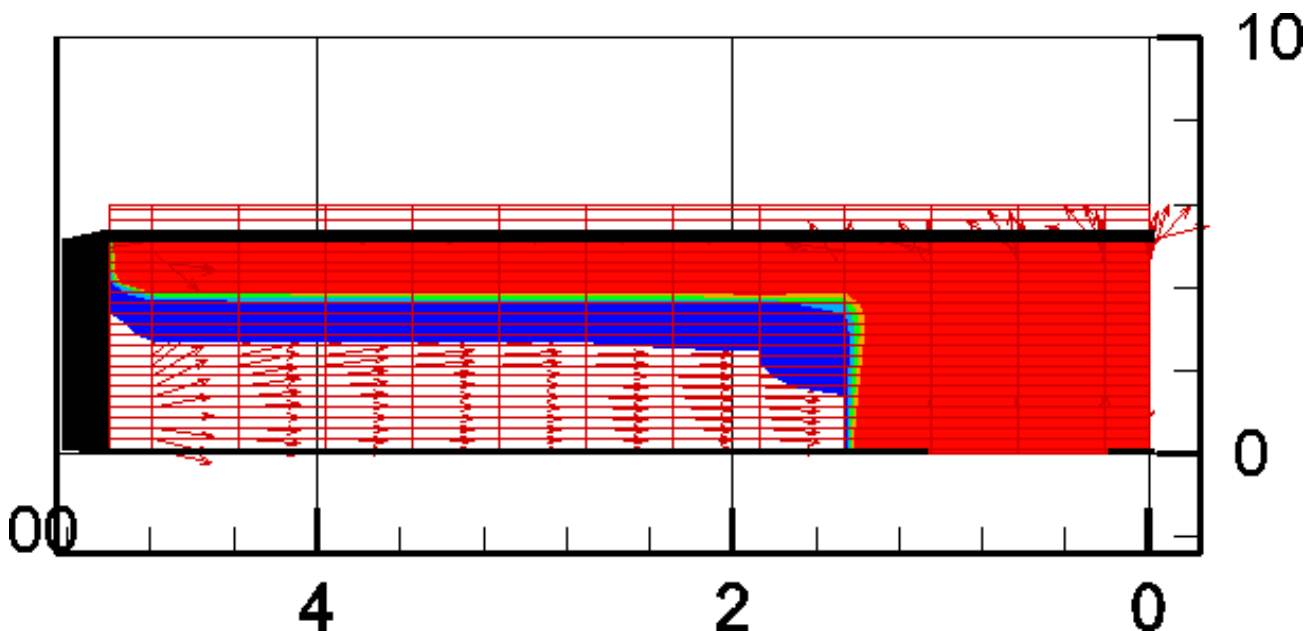


Рисунок 21 – Поперечное сечение модельного тоннеля

3.1 Выбор расчетной сетки

Очевидно, что задачи, решаемые с помощью методов полевого моделирования, неразрывно связаны с оптимальным выбором расчетной сетки, на основе которой построена область моделирования. Так, выбор сравнительно крупных ячеек сетки может сильно влиять на точность моделирования и серьезно искажать 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 расчетных сетки для горизонтального (без уклона) модельного тоннеля. Модельный тоннель при этом был разбит на пять расчетных областей (Рисунок 22).

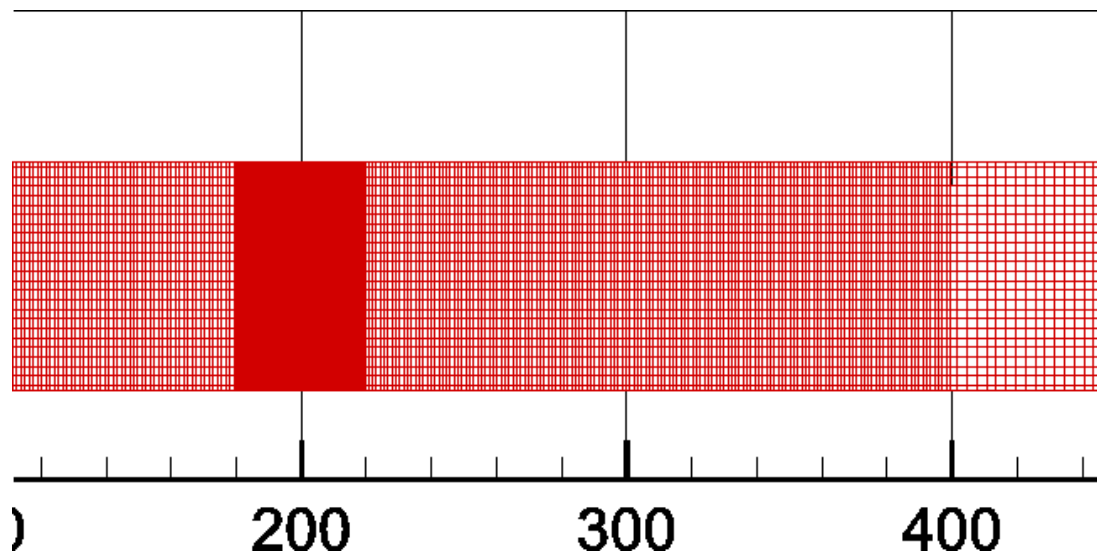


Рисунок 22 – Расчетная сетка модельного тоннеля

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 2. Очаг пожара размещался на расстоянии 200 м от одного из порталов.

Таблица 2 – Продольные размеры ячеек сетки (ось y)

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

В дополнение к этому, был проведен расчет для пятой сетки, размеры которой соответствовали сетке №1, но при этом были введены дополнительные внешние области для оценки возможного влияния на результаты расчета граничных условий постоянства давления, которые для первых четырех сеток были поставлены непосредственно на границах порталов тоннеля. 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). Аналогично оценка использования возможных размеров ячеек сетки проводилась, например, в работе [113].

На рисунках ниже представлены результаты расчетов (профили температуры) для центра поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара, как наиболее характерные. Графики для остальных сечений в различные моменты времени представлены в приложении 1.

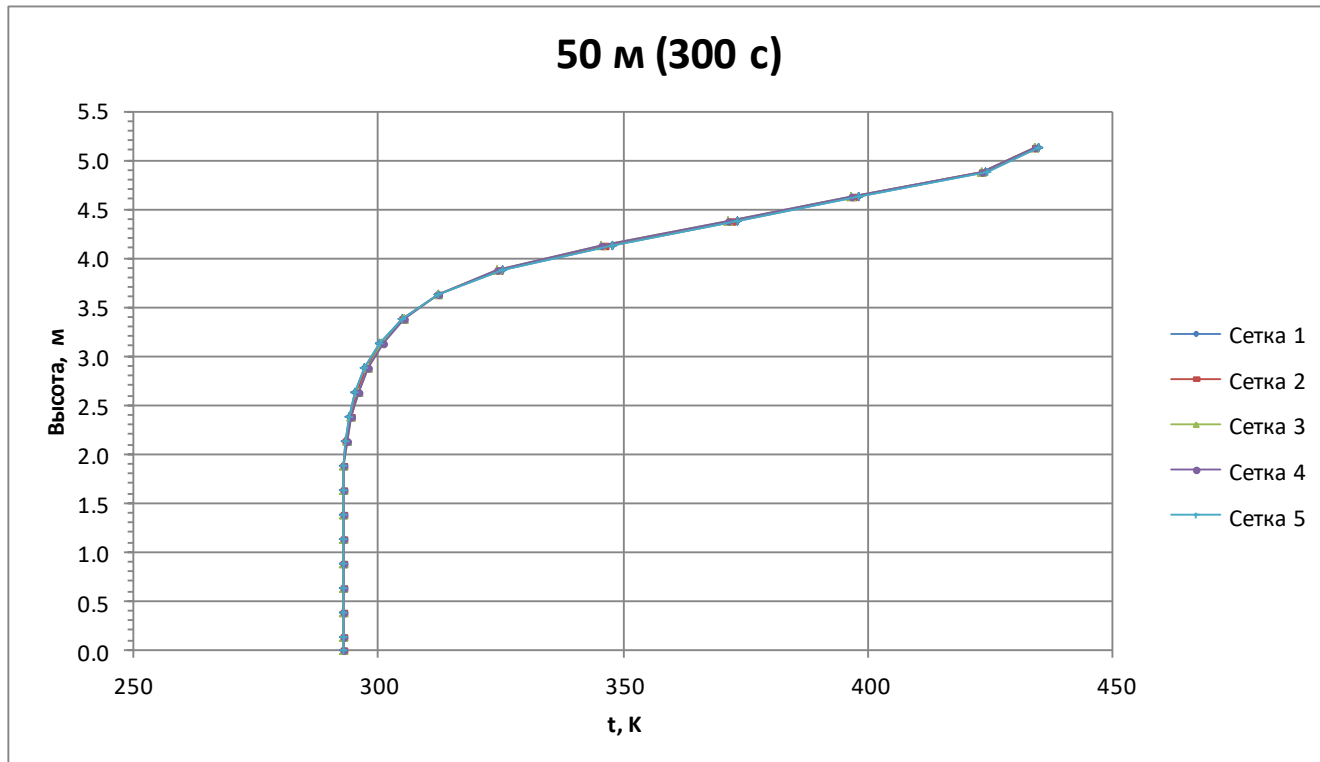


Рисунок 23 – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара в момент времени 300 с

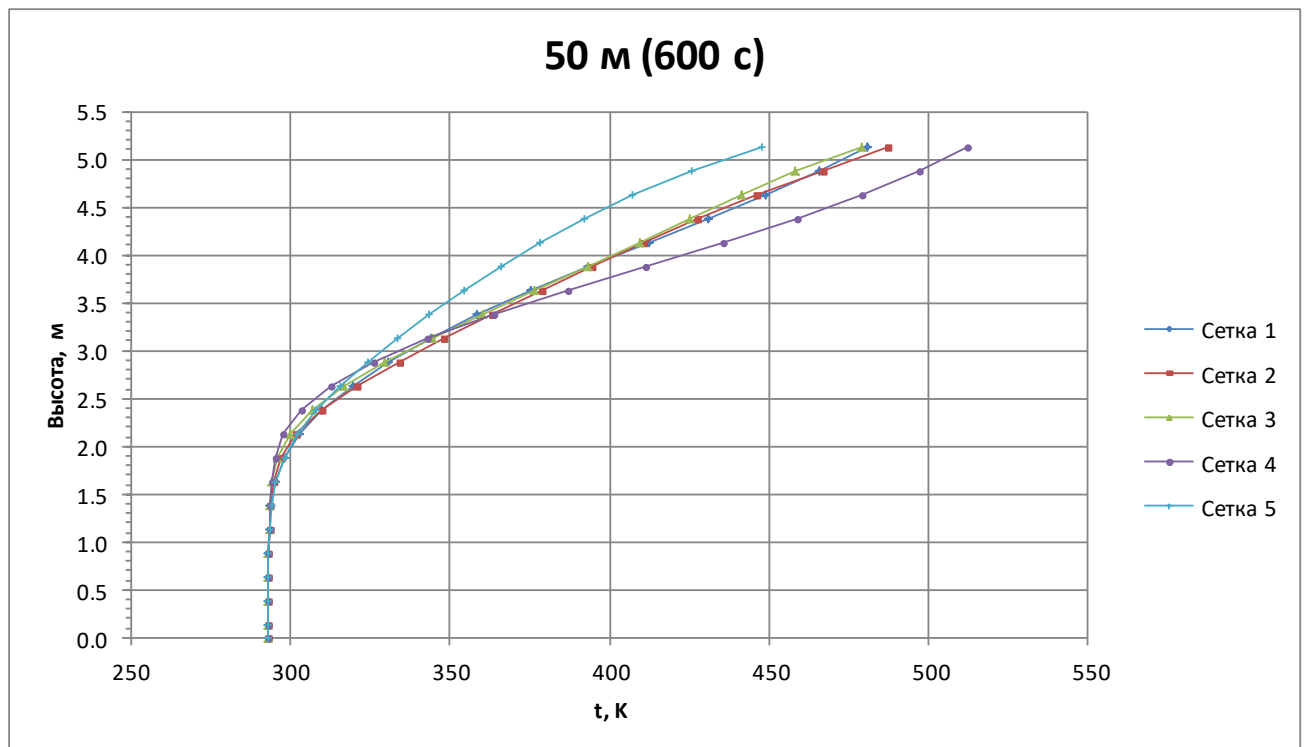


Рисунок 24 – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара в момент времени 600 с

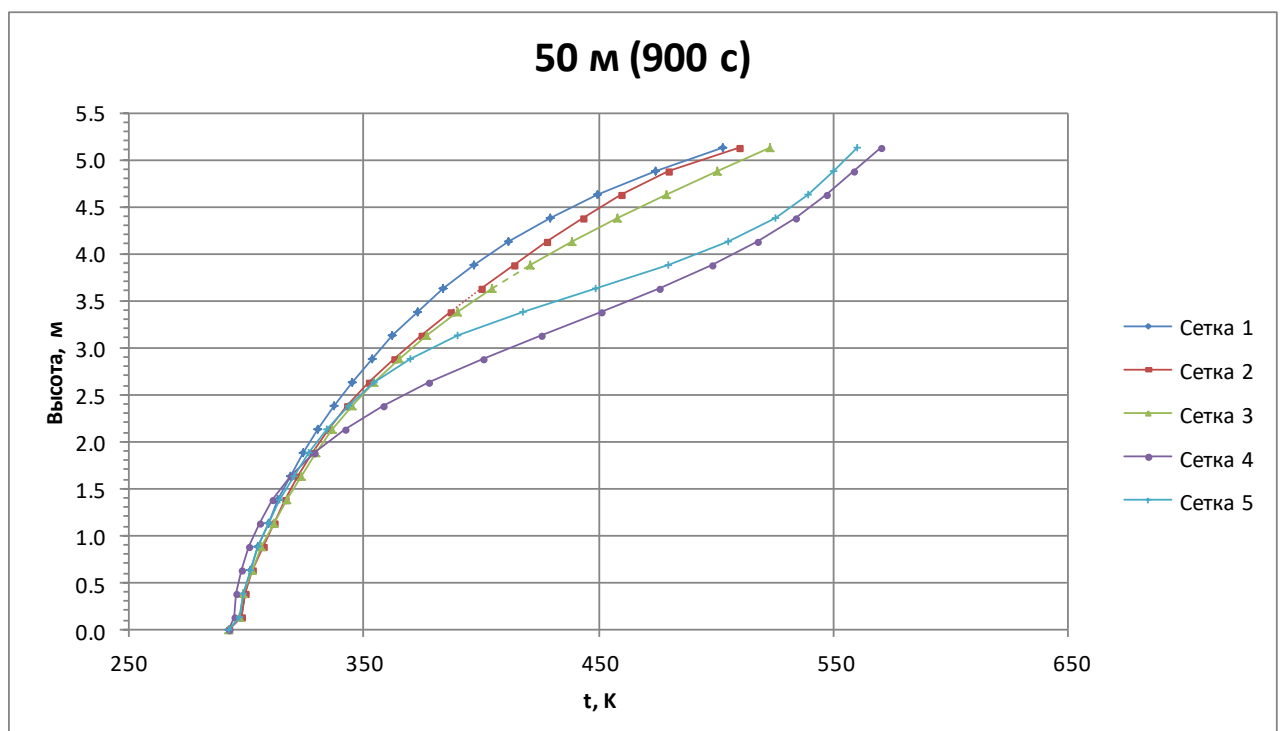


Рисунок 25 – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара в момент времени 900 с

Из представленных графиков следует, что наиболее серьезные расхождения между результатами, полученными на разных расчетных сетках, наблюдаются для момента времени 900 с. Кроме того, указанные расхождения наиболее значительны в областях с максимально повышенной температурой, то есть под потолком тоннеля, тогда как в исследуемой области на высоте человеческого роста они минимальны. Наибольшие значения температур при этом дает самая мелкая сетка, однако, как следует из графиков приложения 1 такой эффект не является стабильным и может не наблюдаться для других рассматриваемых сечений. Более того, отсутствует четкая тенденция по распределению рассматриваемых профилей между собой.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать 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 [114]. Естественно, что использование указанной сетки может быть ограничено рассматриваемой зависимостью для мощности очага пожара, главным образом ее максимальной величиной. Однако, в первом приближении даже для вариантов с иной мощностью такая сетка может быть использована, учитывая неплохие результаты сходимости для сечения 15 м от очага пожара, где наблюдается область наиболее повышенных температур.

3.2 Исследование влияния уклона тоннеля

Одним из параметров, характеризующих продольный профиль автомобильной дороги, является уклон дорожного полотна. Максимальная величина этого параметра регламентируется нормативными документами ([115]) и, как правило, зависит от категории дороги. Значение уклона обычно выражается в промилле (‰) – тысячных долях отношения высоты подъема к горизонтальной

проекции пройденного расстояния (т.е. тангенса угла наклона). Например, для автодороги I категории с максимальной расчетной скоростью 150 км/ч в соответствии с [115] величина уклона не должна превышать 30‰ (см. таблицу 3)

Таблица 3 – Зависимость максимальных продольных уклонов автодороги от расчетной скорости

Расчетная скорость, км/ч	Наибольшие продольные уклоны, ‰
150	30
120	40
100	50
80	60
60	70
50	80
40	90
30	100

Для автодороги, проходящей в тоннеле в соответствии с требованиями нормативных документов [18] максимальное значение уклона может отличаться от максимального значения, регламентируемого [115], а именно максимальные продольные уклоны в автодорожных тоннелях не должны превышать 40 ‰, а в сложных топографических и инженерно-геологических условиях — 60 ‰.

Таким образом, в настоящей работе 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 [36]:

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

Принималось, что после выхода на максимальную мощность (через 15 минут после начала пожара) мощность тепловыделения остается постоянной. Площадь очага составляла около 4 м².

Размеры ячеек расчетной сетки, а также расположение очага пожара, принимались в соответствии с разделом 3.2 (сетка 1) и составили:

По оси X (вертикальная ось) размер ячейки принимался постоянным для всей расчетной области и составил 0,25 м.

По оси Y (горизонтальная ось в продольном направлении) размер ячейки был различным в зависимости от местоположения ячейки в расчетной области и составил от 0,4 м в области очага до 3 м в областях, примыкающих к порталам. Промежуточное значение указанного размера ячейки составил 1,2 м.

По оси Z (горизонтальная ось в поперечном направлении) размер ячейки принимался постоянным и составил 0,416 м.

Результаты расчетов представлены на рисунках ниже. Как следует из результатов расчетов, как правило, фактором пожара, наиболее быстро достигающим критических значений, является потеря видимости, то есть повышенная оптическая плотность газовой среды, которая рассчитывается на основе данных о дымообразующей способности горючего вещества и данных о полях концентрации монооксида углерода в соответствии с [104]. Поэтому на рисунках ниже приведены поля оптической плотности дыма для различных значений уклона тоннеля в одинаковые моменты времени.

Развитие пожара за первые две минуты представлено на Рисунке 26. Из рисунка хорошо видно, что блокирование участков тоннеля на высоте роста человека (1,7 м) к моменту времени 120 с уже наступает в модельных тоннелях, имеющих наибольший уклон. При этом, если для вариантов 0 и 2% ярко выражен характер горизонтального движения дыма под потолком с последующим опусканием («накрывание»), то для 4 и 6% уклона наблюдается фактически движение наклонного вертикального фронта, последовательно блокирующего новые участки тоннеля. Это еще более заметно на рисунках, отражающих последующие моменты времени.

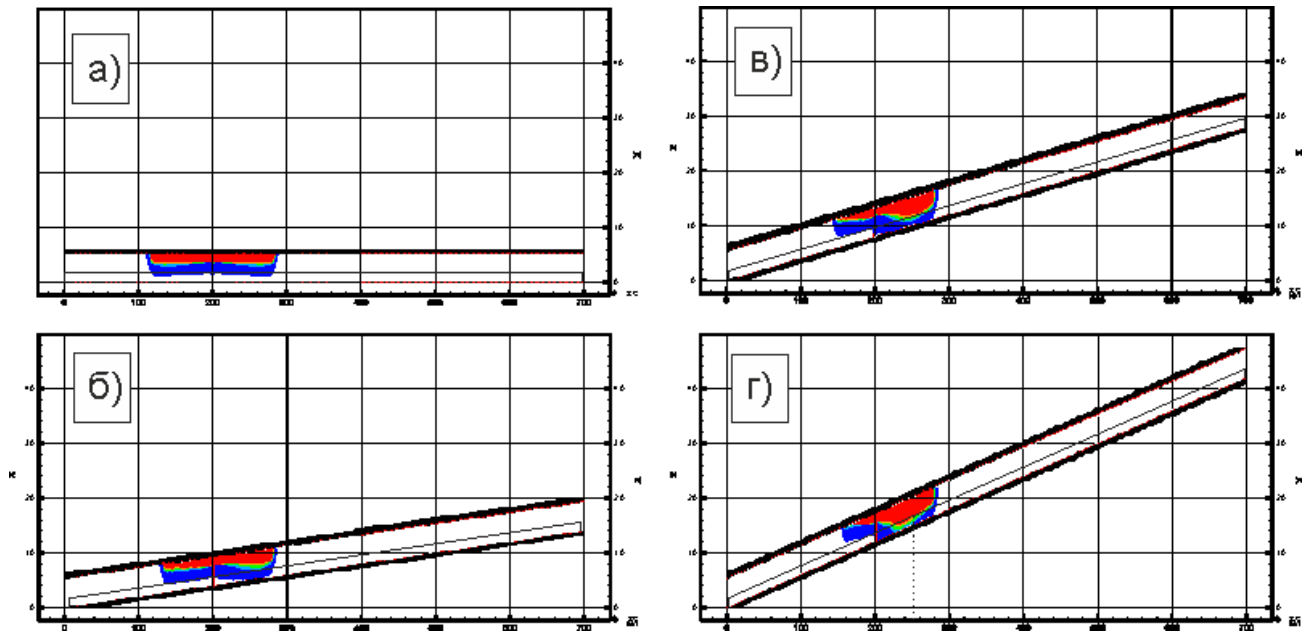


Рисунок 26 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 120 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 2%, в) 4%, г) 6%

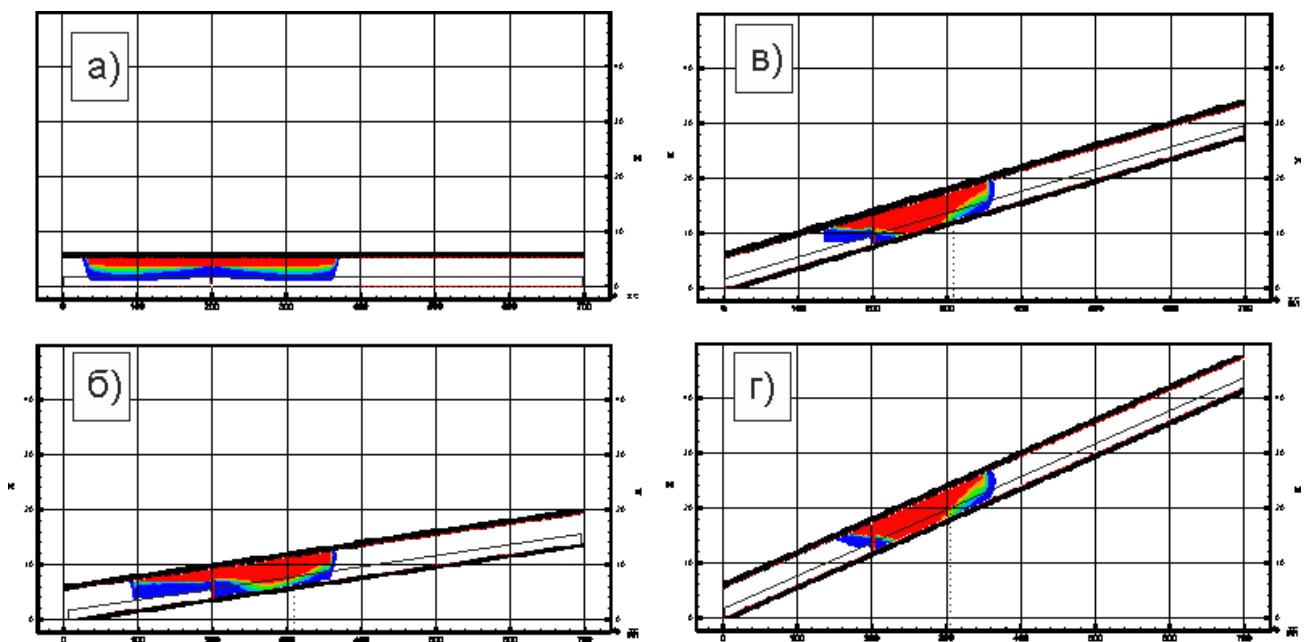


Рисунок 27 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 240 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 2%, в) 4%, г) 6%

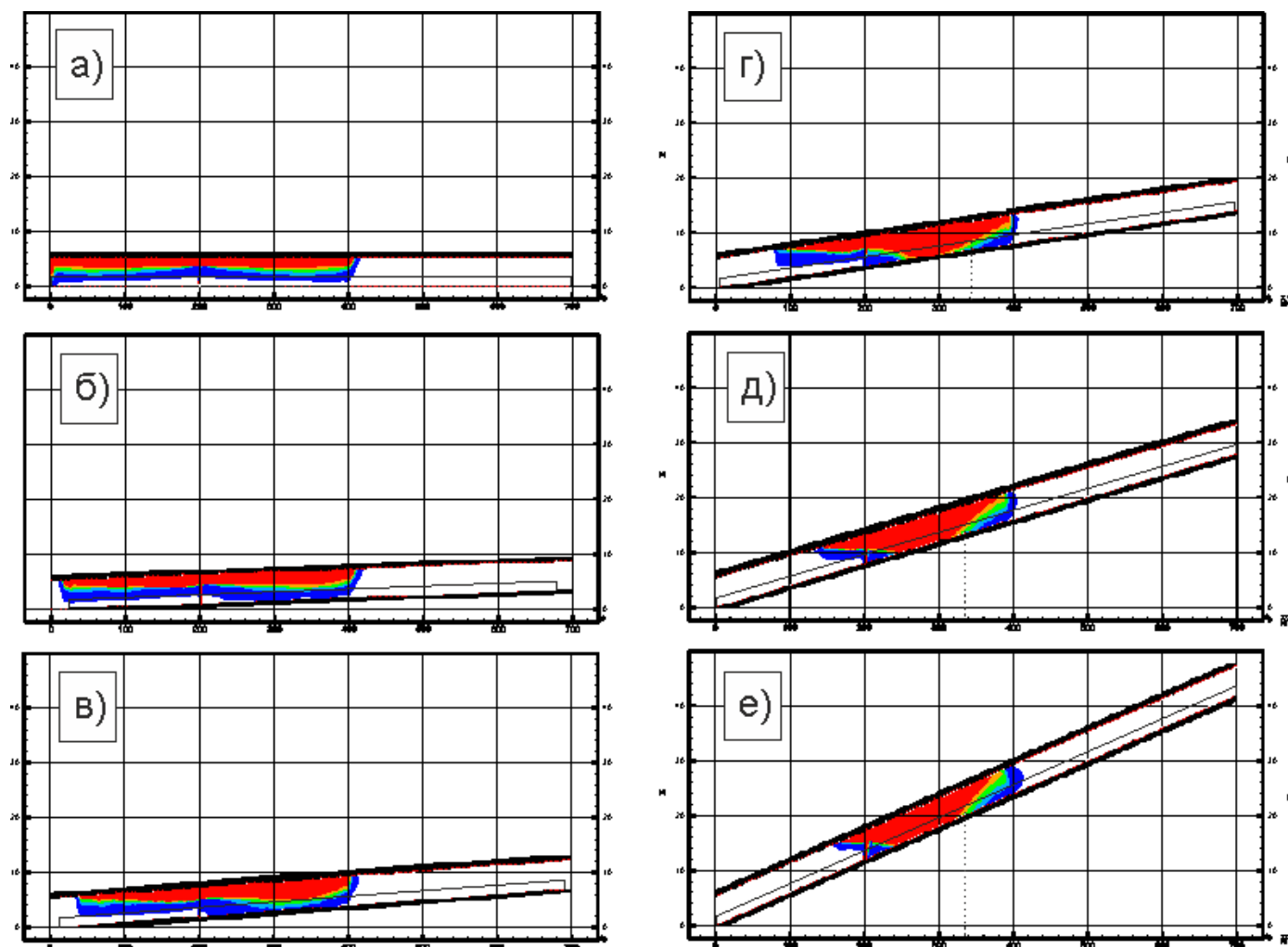


Рисунок 28 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 300 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 4%, е) 6%

Также в первые минуты наблюдается закономерное более раннее блокирование областей тоннеля в вариантах с большими уклонами, объясняемое, как правило, более сильным влиянием «эффекта трубы», напрямую зависящего от уклона. Однако, далее наблюдается интересная картина (Рисунок 27). А именно, расстояние блокирования от очага в момент времени 240 с для всех вариантов уклона, за исключением нулевого, становится приблизительно равным. Более того, это значение для уклона 2% даже несколько выше остальных (см. таблицу 4), что еще более ярко проявляется в последующие моменты времени.

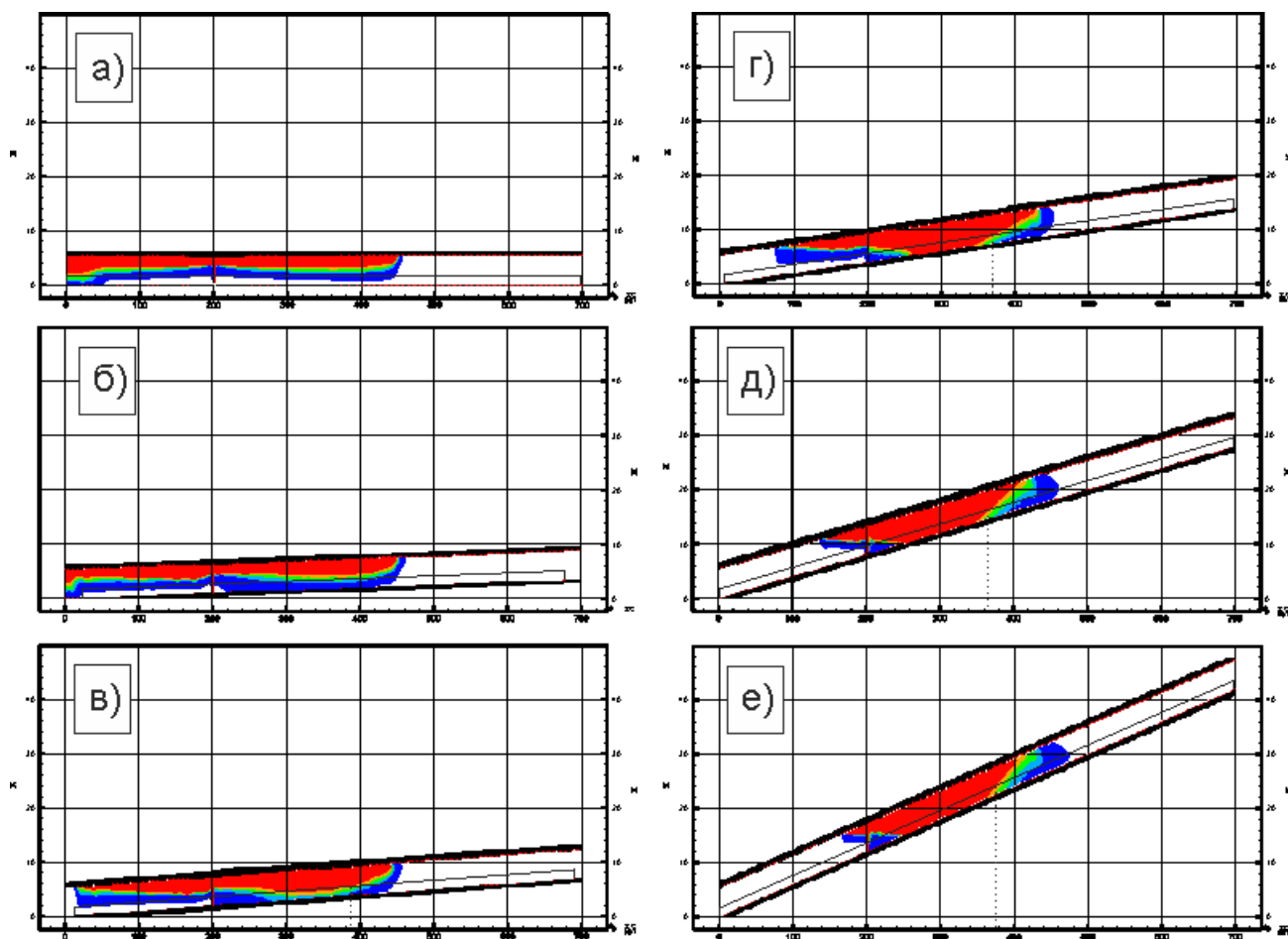


Рисунок 29 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 360 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 4%, е) 6%

Наличие такого неожиданного эффекта привело к необходимости проведения двух дополнительных вариантов расчета для промежуточных значений уклона (0,5 и 1%) и анализа полученного результата. Полученные данные отражены на рисунках 28-33.

Рассмотрение указанных рисунков подтверждает полученный результат. Так в момент времени 300 с блокированными являются участки вверх по уклону для вариантов 6,4,2 и 1% на расстоянии от 137 до 147 м. При этом, большее расстояние блокирования наблюдается для 1 и 2% уклонов. Еще через минуту этот разрыв становится еще больше (193 и 176 м для 1 и 6% соответственно).

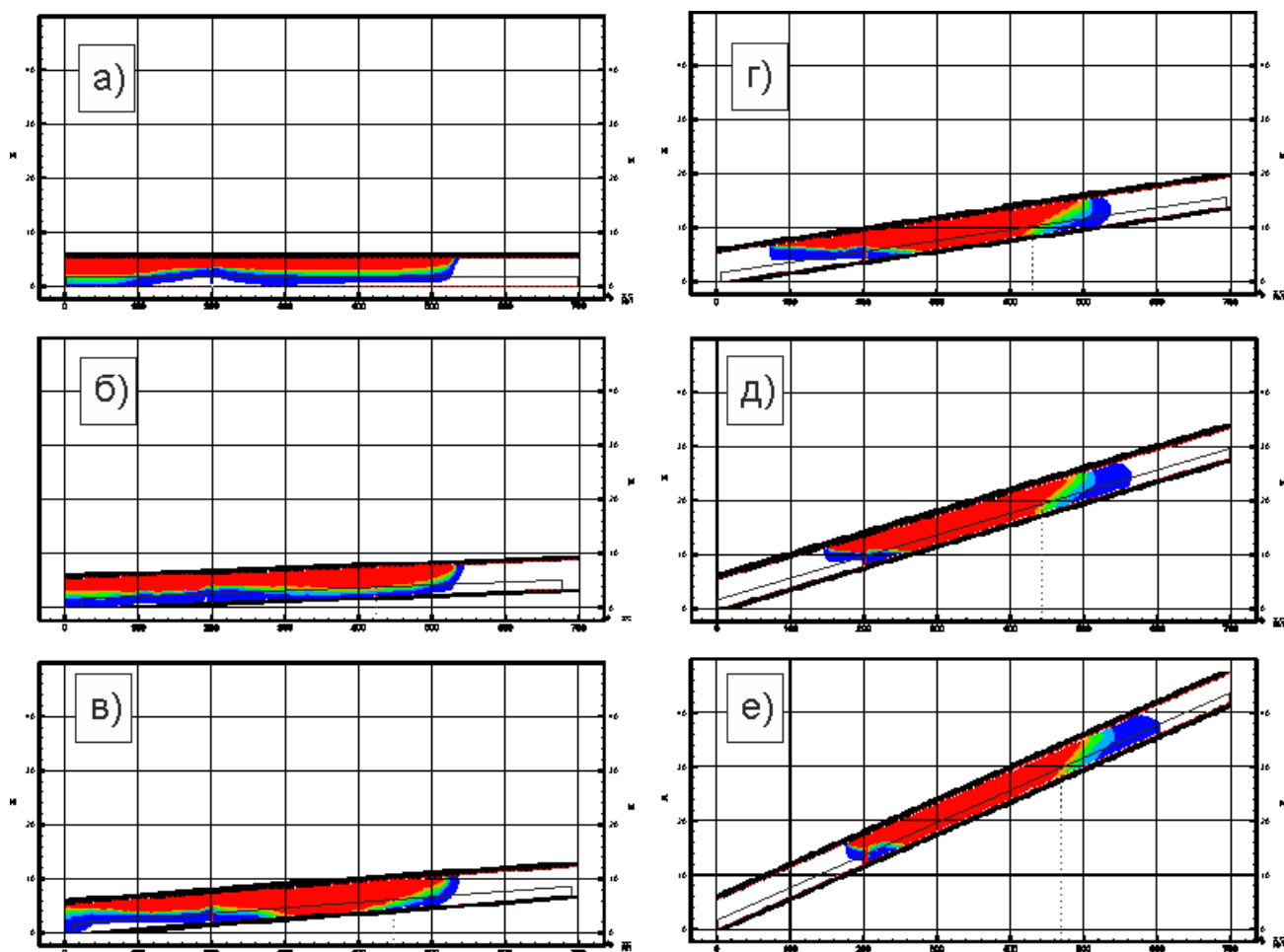


Рисунок 30 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 480 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 4%, е) 6%

Примечательно, что в указанный момент времени (360 с) значение заблокированного расстояния для значений уклона 2,4 и 6%, является почти одинаковым и составляет приблизительно 176 м. Далее, в момент времени 480 с снова наблюдается наибольшее расстояние блокирования для тоннеля с максимальным уклоном. В это же время впервые можно зафиксировать блокирование тоннеля с уклоном 0,5%, которое происходит сразу на расстоянии 246 м от очага пожара. Примерно такое же расстояние блокирования соответствует уклонам 1,2 и 4 %. Кроме того, в горизонтальном тоннеле блокирования на высоте роста человека к указанному моменту времени вообще не наблюдается. Дополнительным характерным моментом, на которое стоит обратить внимание, является ярко выраженный характер наличия обратного течения «back layering» для вариантов расчета с меньшим уклоном, что позволяет

говорить о необходимости учета при рассмотрении пространства тоннеля вниз по уклону.

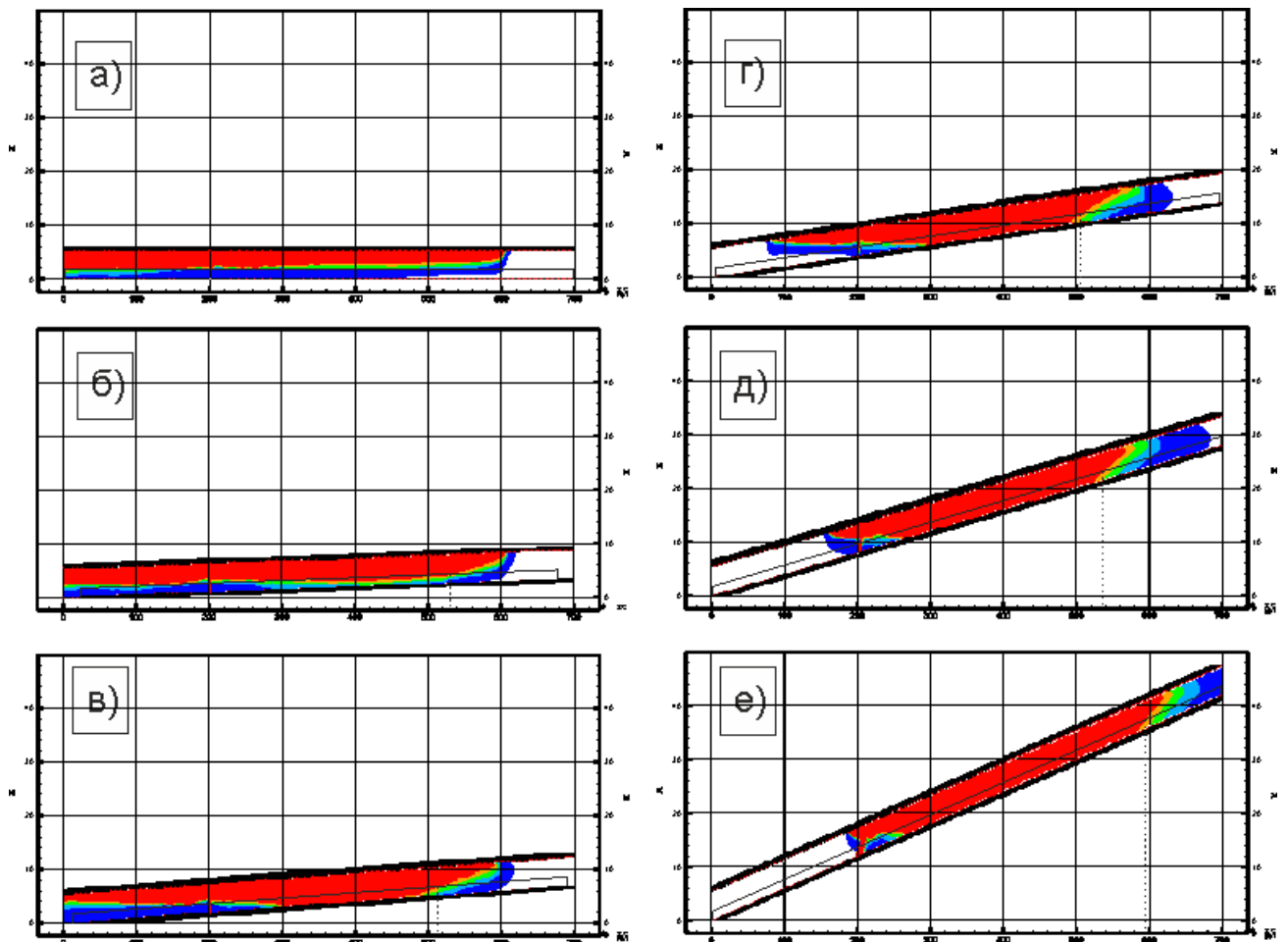


Рисунок 31 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 600 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 4%, е) 6%

К моменту 600 с влияние так называемого «эффекта трубы» становится еще сильнее и расстояние блокирования для варианта 6% существенно превосходит расстояния по другим вариантам. Кроме того, уклон 4% также не существенно, но превышает значения расстояния по меньшим уклонам, за исключением 0,5%. Первое блокирование горизонтального тоннеля происходит только к 11-й минуте после начала пожара на расстоянии около 70 м от очага пожара. Тем не менее, из графика хорошо видно, что указанные время и расстояние в значительной степени условны, поскольку слой дыма с критическими параметрами фактически граничит с плоскостью, расположенной на высоте 1,7 м от пола тоннеля.

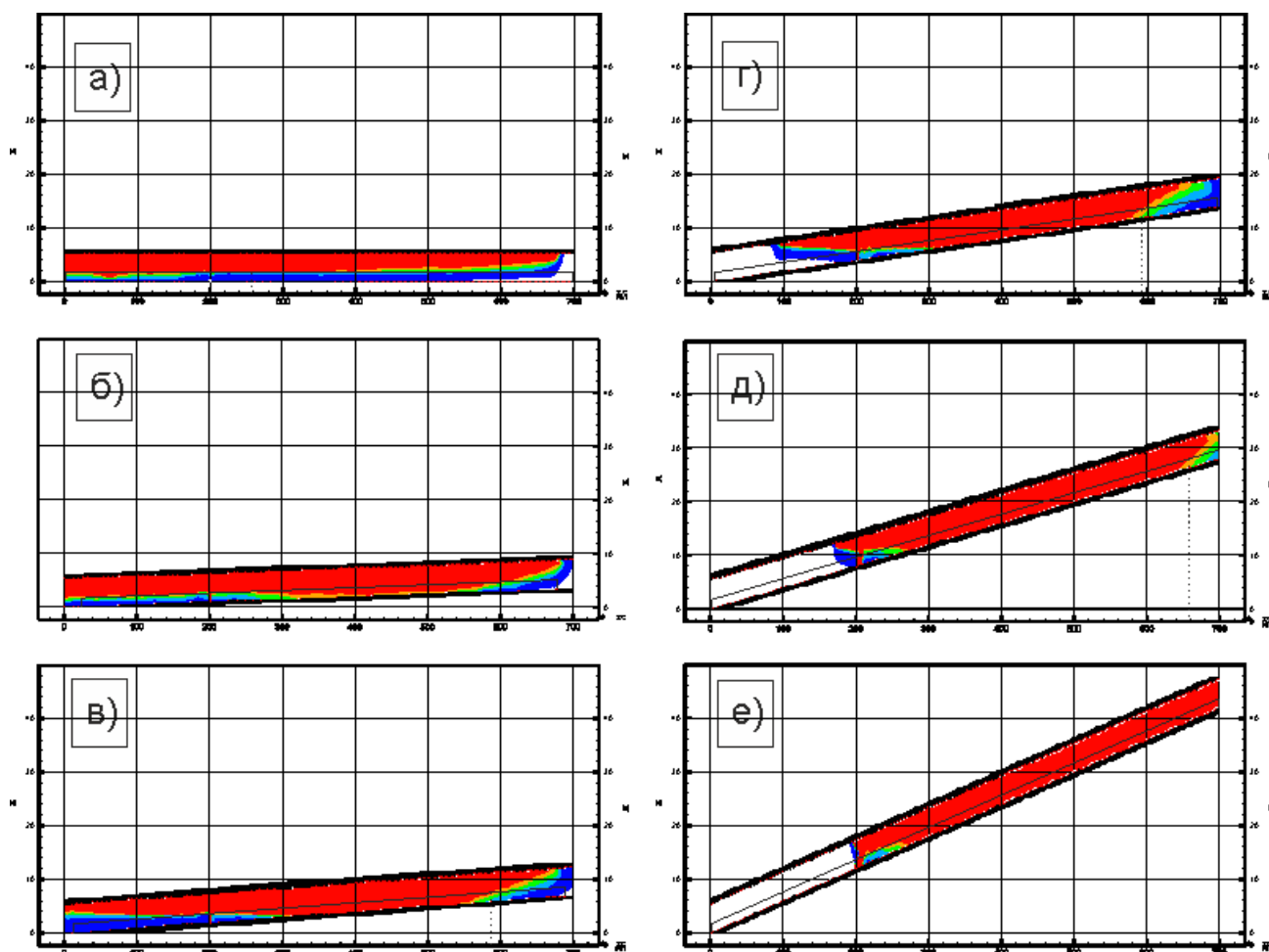


Рисунок 32 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 720 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 4%, е) 6%

В следующий момент времени, равный 720 с полностью блокируется вверх по уклону тоннель с его максимальным значением.

Еще через минуту блокируется тоннель в варианте расчета 4% и одновременно с ним полностью горизонтальный тоннель 0%. Остальные варианты по убыванию блокированного расстояния располагаются в следующем порядке – 0,5% (442 м), 2% (439 м), 1% (427 м). К моменту времени 780 с полностью блокируются все расчетные варианты, кроме 1% (463 м), который блокируется еще через минуту (840 с).

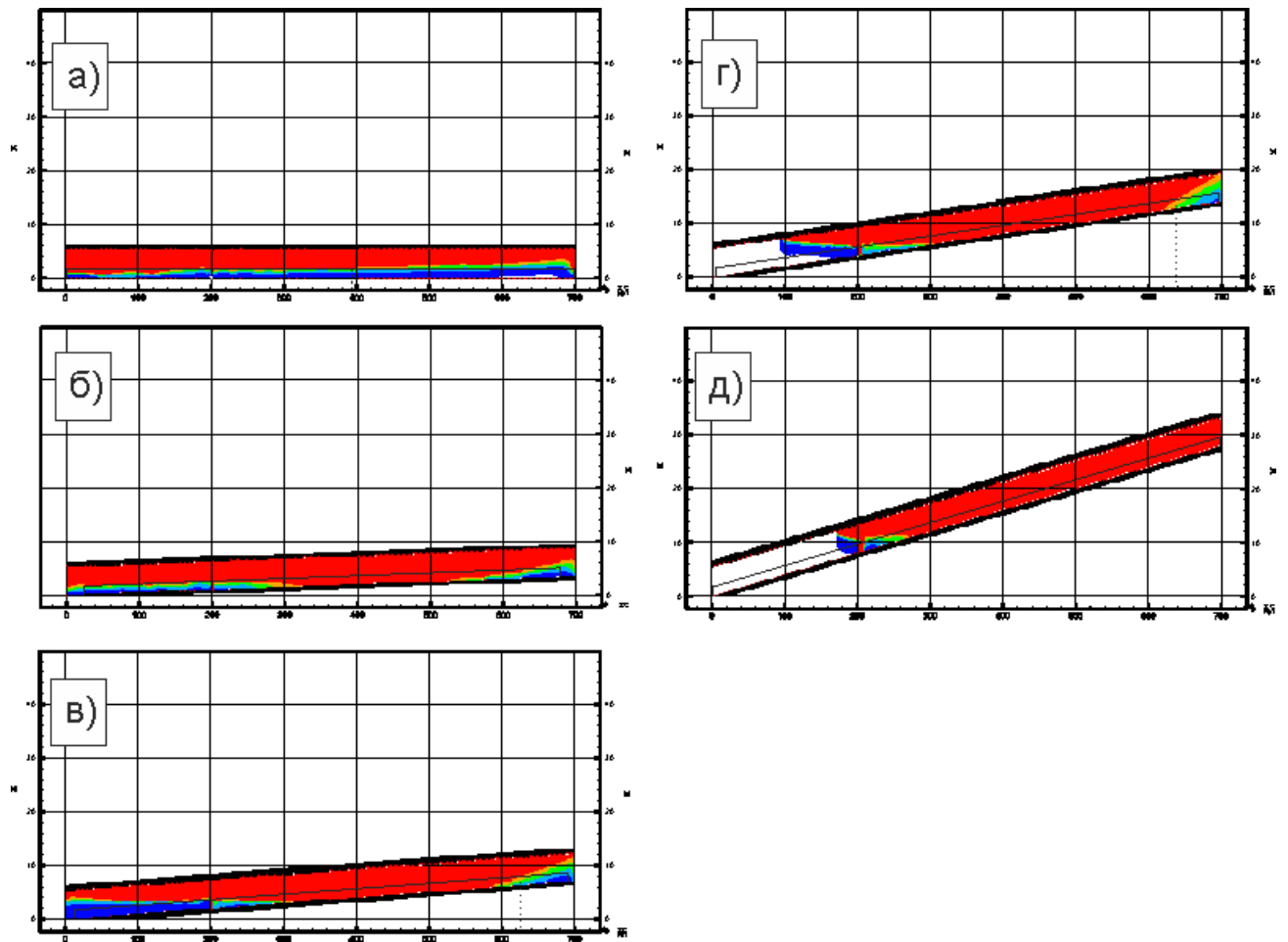


Рисунок 33 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 780 с при различных значениях уклона: а) 0%, б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 4%

Обобщенные данные по временам и блокированным расстояниям (от места очага пожара) приведены ниже в таблице 4, а также на графиках (Рисунки 34-35) и в работах [116], [117].

Таблица 4 – Обобщенные расчетные данные. Зависимость блокированного расстояния от времени для различных значений уклона тоннеля

Время, с	Блокированное расстояние вверх по уклону, м					
	0%	0,5%	1%	2%	4%	6%
60	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
120	0.8	0.8	0.8	0.8	47.2	58
180	0.8	0.8	0.8	0.8	85.6	82
240	0.8	0.8	0.8	119.2	109.6	107.2
300	0.8	0.8	146.8	146.8	137.2	138.4
360	0.8	0.8	192.4	175.6	168.4	175.6
420	0.8	0.8	222.7	204.7	201.7	216.7
480	0.8	246.7	252.7	234.7	243.7	270.7
540	0.8	297.7	285.7	270.7	285.7	327.7
600	0.8	339.7	321.7	309.7	336.7	393.7
660	71.2	378.7	354.7	348.7	396.7	468.7
720	73.6	405.7	387.7	393.7	459.7	498.7
780	498.7	441.7	426.7	438.7	498.7	498.7
840	498.7	498.7	462.7	498.7	498.7	498.7
900	498.7	498.7	498.7	498.7	498.7	498.7

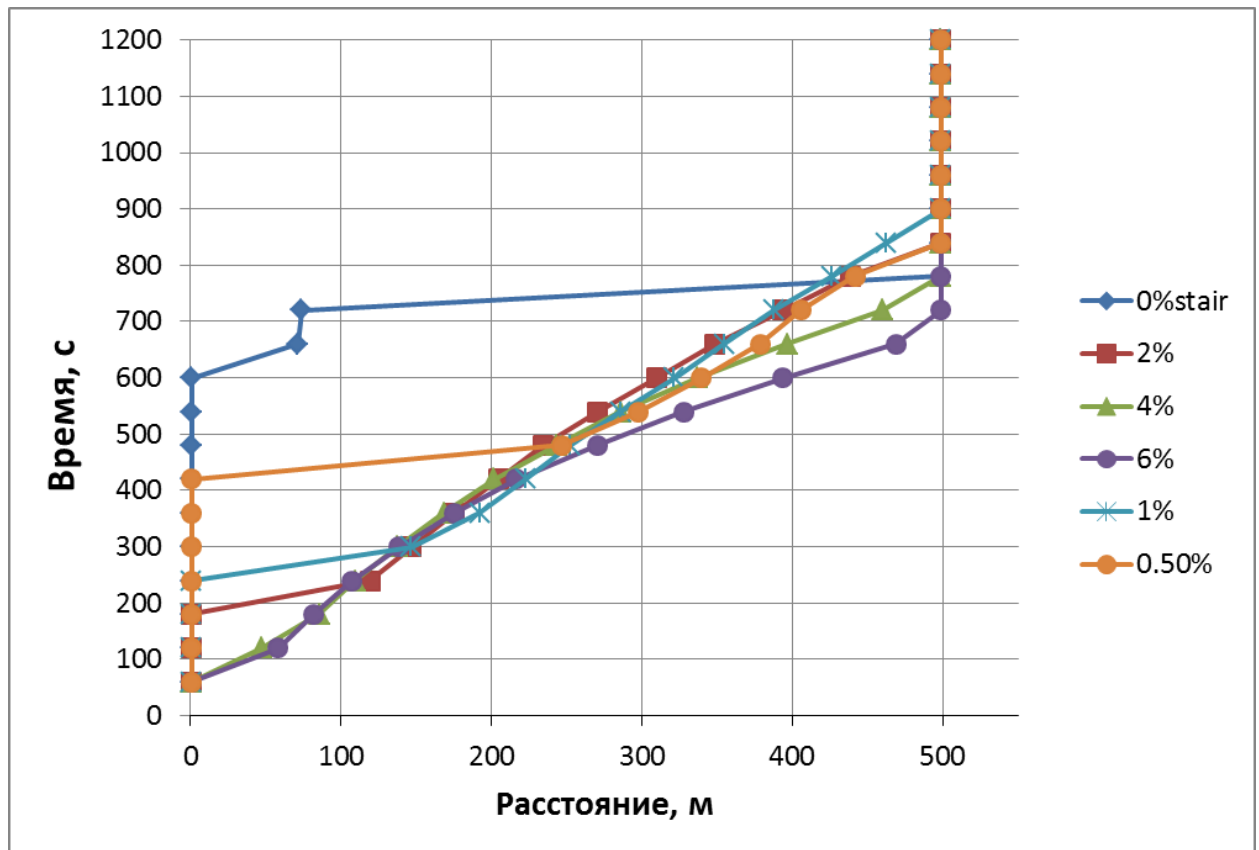


Рисунок 34 – Зависимость времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных вариантов уклона тоннеля

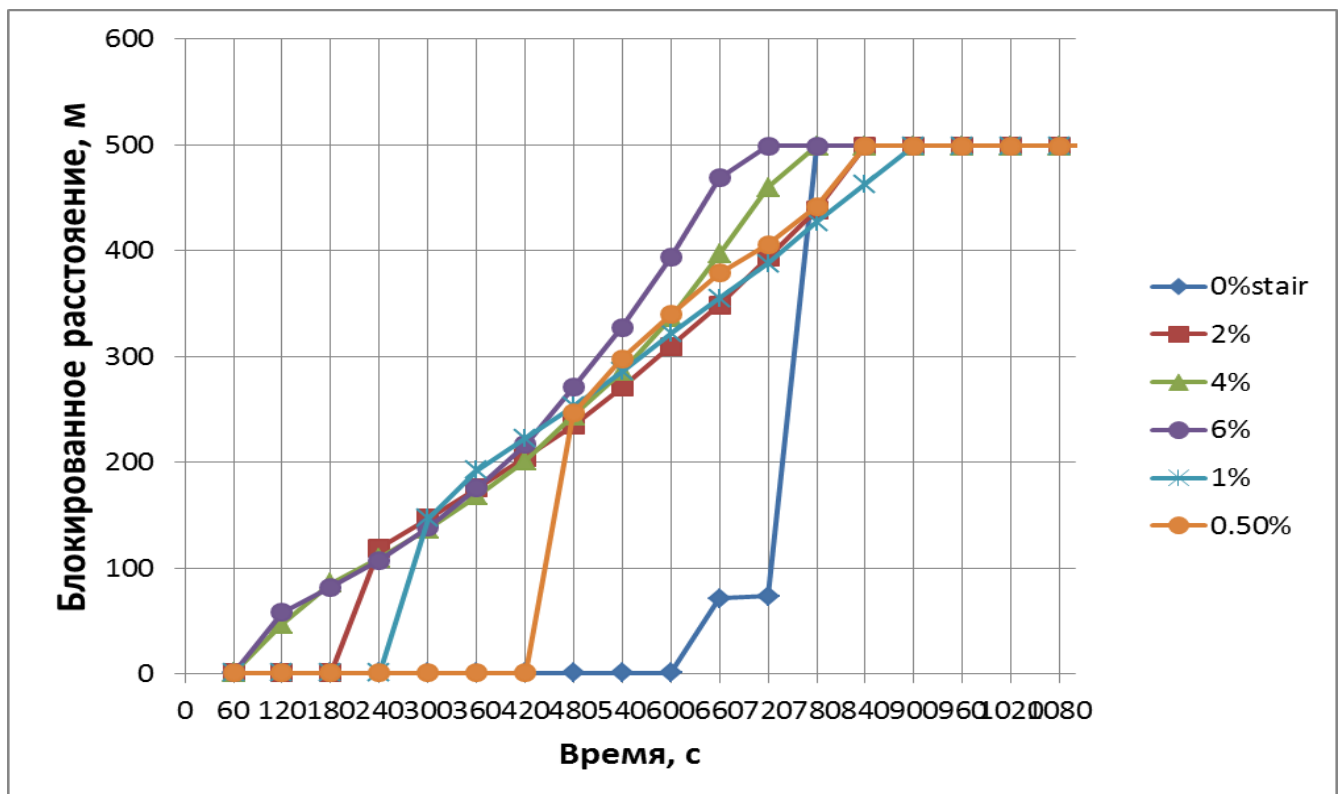


Рисунок 35 – Зависимость блокированного расстояния в тоннеле от времени для различных вариантов уклона тоннеля

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 заблокированное 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.

Полученный результат может быть объяснен следующими доводами. В вариантах с небольшими уклонами тоннеля (0, 0.5, 1%) так называемый «эффект трубы» выражен в меньшей степени. Соответственно, распространение ОФП идет под потолком тоннеля в направлении порталов в виде «припотолочной струи», которая при прохождении определенного расстояния остывает, в результате чего дым «садится» и наблюдается «эффект накрывания», что вызывает быстрое блокирование тоннеля на довольно больших расстояниях, но через сравнительно большой промежуток времени. При этом, этот промежуток наибольший для полностью горизонтального тоннеля, тогда как для вариантов 0,5 и 1% некоторое влияние «эффекта трубы» все же присутствует. Таким образом, это может влиять на более быстрое перемешивание и турбулизациюдвигающейся под потолком струи и ее более быстрому осаждению вниз.

Для вариантов с большим уклоном такое перемешивание происходит практически сразу, и участки тоннеля блокируются последовательно идущим фронтом ОФП с критическими значениями. По этой же причине, в промежуточные моменты времени это движение кажется более медленным по

сравнению с блокированием участков менее наклонных тоннелей. Однако, далее, несмотря на турбулизацию, более сильный «эффект трубы» в совокупности с повышающейся мощностью очага пожара в конечном итоге приводят к более быстрому блокированию областей, расположенных дальше от очага пожара.

Таким образом, в первые минуты пожара наиболее опасными, с точки зрения эвакуации людей, являются наибольшие значения уклона. Однако, в последующие моменты времени блокированные расстояния для меньших уклонов становятся сопоставимыми с уклонами 4 и 6%.

3.3 Исследование влияния мощности тепловыделения

Еще одним параметром, непосредственно влияющим на развитие пожара, является мощность тепловыделения. Как правило, при моделировании пожара в зданиях различного назначения, задаются различной максимальной мощностью пожара в зависимости от функционального назначения рассматриваемого объекта (производство, торговля, офис и т.д.) Указанная мощность зависит от вида и количества пожарной нагрузки, размещаемой в здании. Для автодорожных тоннелей величина максимальной мощности также зависит от вида и количества нагрузки, которые, в свою очередь, определяются рассматриваемой аварийной ситуацией. Как правило, в качестве аварийных ситуаций рассматриваются дорожно-транспортные происшествия с участием автомобилей разного класса. Например, тепловыделение при мощности пожара в 20 МВт приблизительно соответствует горению автобуса или грузовика. Мощность пожара в 100 МВт эквивалентна пожару пролива ЛВЖ на площади около 45 м². Таким образом, «стандартными» пожарами являются – загорание легковых, грузовых автомобилей, а также пожар автоцистерны, перевозящей ЛВЖ. При этом, теоретическая мощность тепловыделения меняется от 5 до 100 МВт.

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 [36]:

$Q = 2000000 + \alpha \cdot t$ [Вт], где коэффициент α изменялся для разных значений мощности пожара в соответствии с таблица 5.

Таблица 5 – Значение коэффициента α в зависимости от максимальной мощности тепловыделения

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

Принималось, что после выхода на максимальную мощность (через 15 минут после начала пожара) мощность тепловыделения остается постоянной. Площадь очага горения составила от 4 до 39 м². Очаг пожара размещался в центре поперечного сечения тоннеля.

Размеры ячеек расчетной сетки, а также расположение очага пожара, принимались в соответствии с разделом 3.2 (сетка 1).

Результаты расчетов представлены на рисунках ниже, которые отражают поля оптической плотности дыма для различных значений максимальной мощности пожара в одинаковые моменты времени.

Развитие пожара за первые две минуты представлено на рисунке 36. Из рисунка видно, что хотя максимальное расстояние, на которое распространились ОФП для всех вариантов расчета приблизительно одинаково, объем густого дыма с увеличением мощности также значительно повышается. В варианте расчета 100МВт дым с критической плотностью опускается почти до отметки роста человека, причем на значительном расстоянии (более 50 м) от очага пожара, а к моменту времени 180 с тоннель уже блокируется на расстоянии 110 м от очага пожара. Ситуация в вариантах 10 и 25 МВт значительно лучше – блокированных

областей на высоте роста человека не наблюдается. Но в целом наблюдаемая картина пожара достаточно предсказуема. Более высокая мощность тепловыделения приводит к более быстрому блокированию участков тоннеля. К моменту времени 240 с впервые наступает блокирование для варианта 50 МВт сразу на расстоянии 117 м (Рисунок 37).

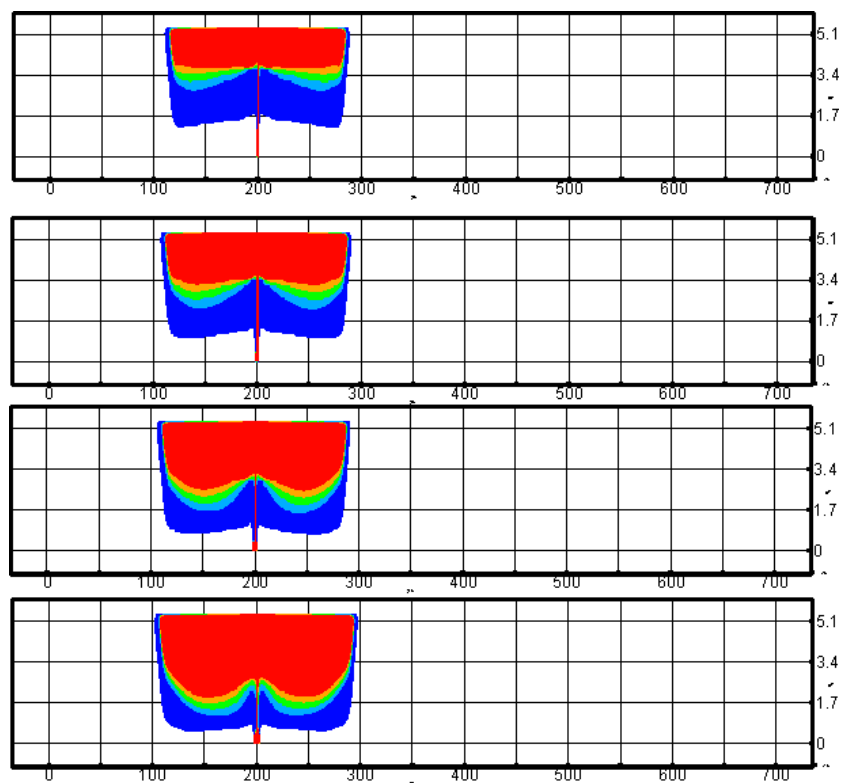


Рисунок 36 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 120 с при различных значениях мощности (сверху вниз 10, 25, 50, 100 МВт)

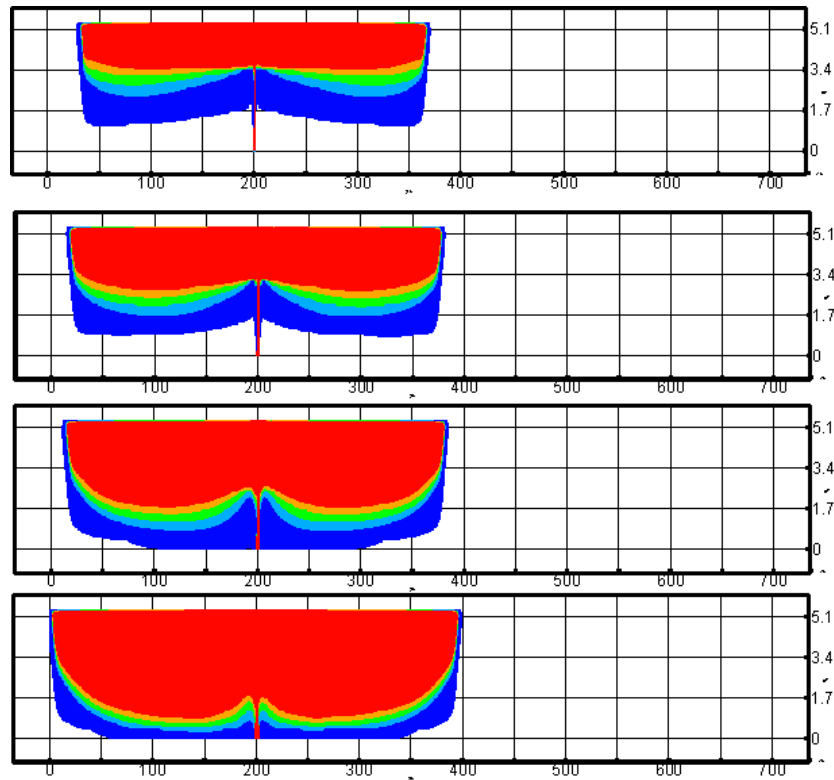


Рисунок 37 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 240 с при различных значениях мощности (сверху вниз 10, 25, 50, 100 МВт)

Дальнейшее развитие пожара (момент 360 с) характеризуется последовательным блокированием участков тоннеля в направлении порталов для вариантов 50 и 100 МВт, лишь с тем отличием, что для варианта с большей мощностью блокирование происходит быстрее, при этом, опасные факторы пожара имеют критические значения от потолка до пола почти на всем протяжении этого расстояния от очага пожара. Для варианта 50 МВт область отсутствия критических значений ОФП все же имеется, хотя и находится ниже роста человека (Рисунок 38). К указанному моменту времени блокирования по двум первым вариантам расчета не наблюдается, тогда как для вариантов 50 и 100 МВт блокированное расстояние очень значительно – 225 и 260 м от очага пожара соответственно.

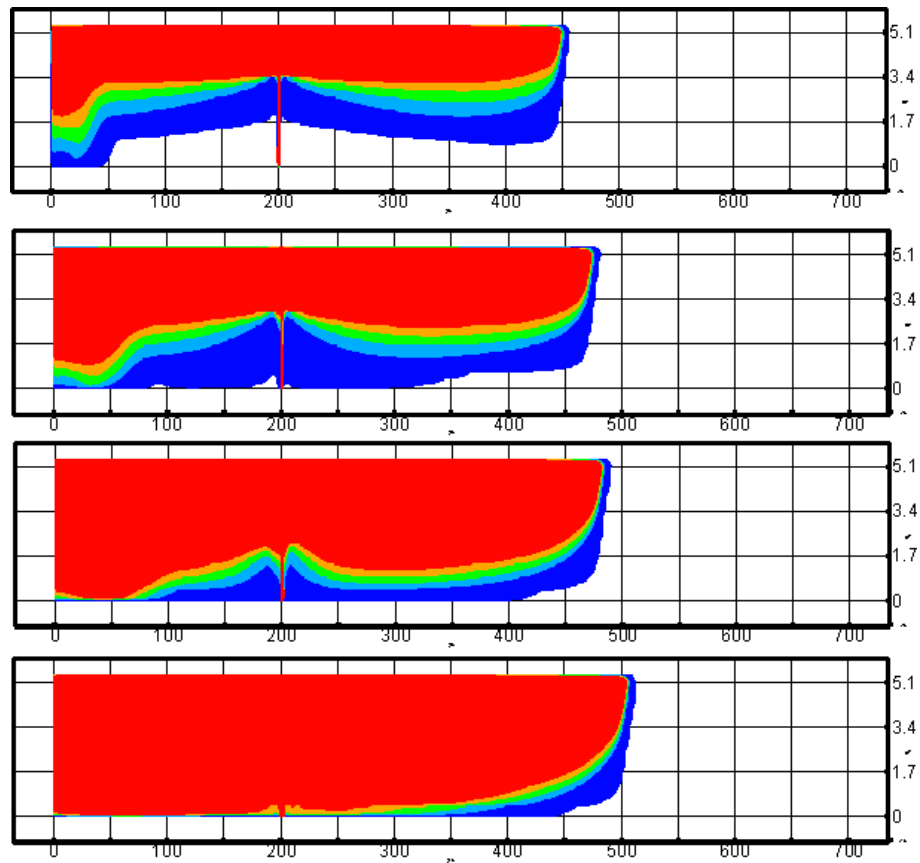


Рисунок 38 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 360 с при различных значениях мощности (сверху вниз 10, 25, 50, 100 МВт)

К моменту времени 480 с пожар в варианте 25 МВт впервые блокирует тоннель, расстояние блокирования, при этом, составляет почти 170 м (Рисунок 39).

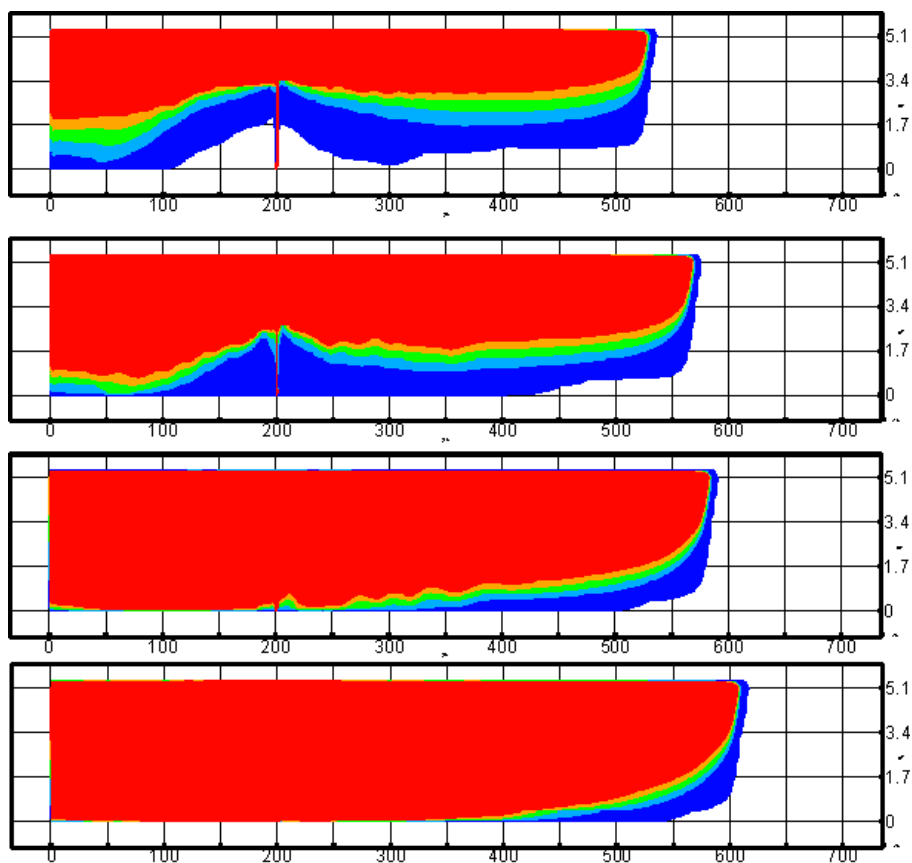


Рисунок 39 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 480 с при различных значениях мощности (сверху вниз 10, 25, 50, 100 МВт)

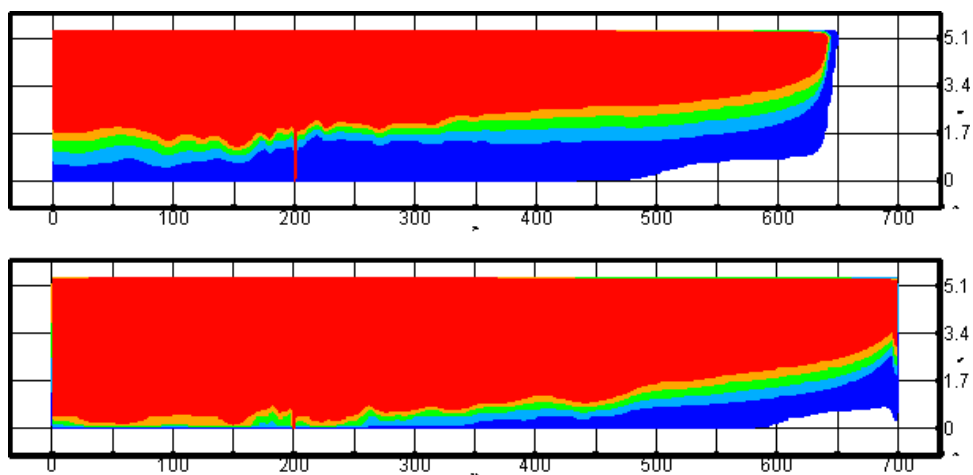


Рисунок 40 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 660 с при различных значениях мощности (сверху вниз 10, 25 МВт)

Через 11 минут после начала пожара впервые блокируется 70 – метровый участок тоннеля для варианта 10 МВт. К этому же моменту времени

блокированное расстояние при мощности пожара 25 МВт достигает 350 м (Рисунок 40), а в вариантах расчета 50 и 100 МВт тоннель блокируется полностью. Полное блокирование тоннеля для всех вариантов достигается к моменту времени 780 с.

Обобщенные данные по временам и блокированным расстояниям (от места очага пожара) приведены ниже в таблице 6, а также на графиках (Рисунки 41-42) и в работе [118].

Таблица 6 – Обобщенные расчетные данные. Зависимость блокированного расстояния от времени для различных значений мощности тепловыделения

Время, с	Блокированное расстояние, м			
	10 МВт	25 МВт	50 МВт	100 МВт
60	0.8	0.8	0.4	0.4
120	0.8	0.8	0.8	0.4
180	0.8	0.8	0.8	109.2
240	0.8	0.8	116.8	162
300	0.8	0.8	176.8	213.3
360	0.8	0.8	225.7	261.3
420	0.8	0.8	276.7	312.3
480	0.8	166	330.7	360.3
540	0.8	228.7	378.7	408.3
600	0.8	294.7	420.7	456.3
660	71.2	351.7	498.7	498.3
720	73.6	498.7	498.7	498.3
780	498.7	498.7	498.7	498.3
840	498.7	498.7	498.7	498.3
900	498.7	498.7	498.7	498.3

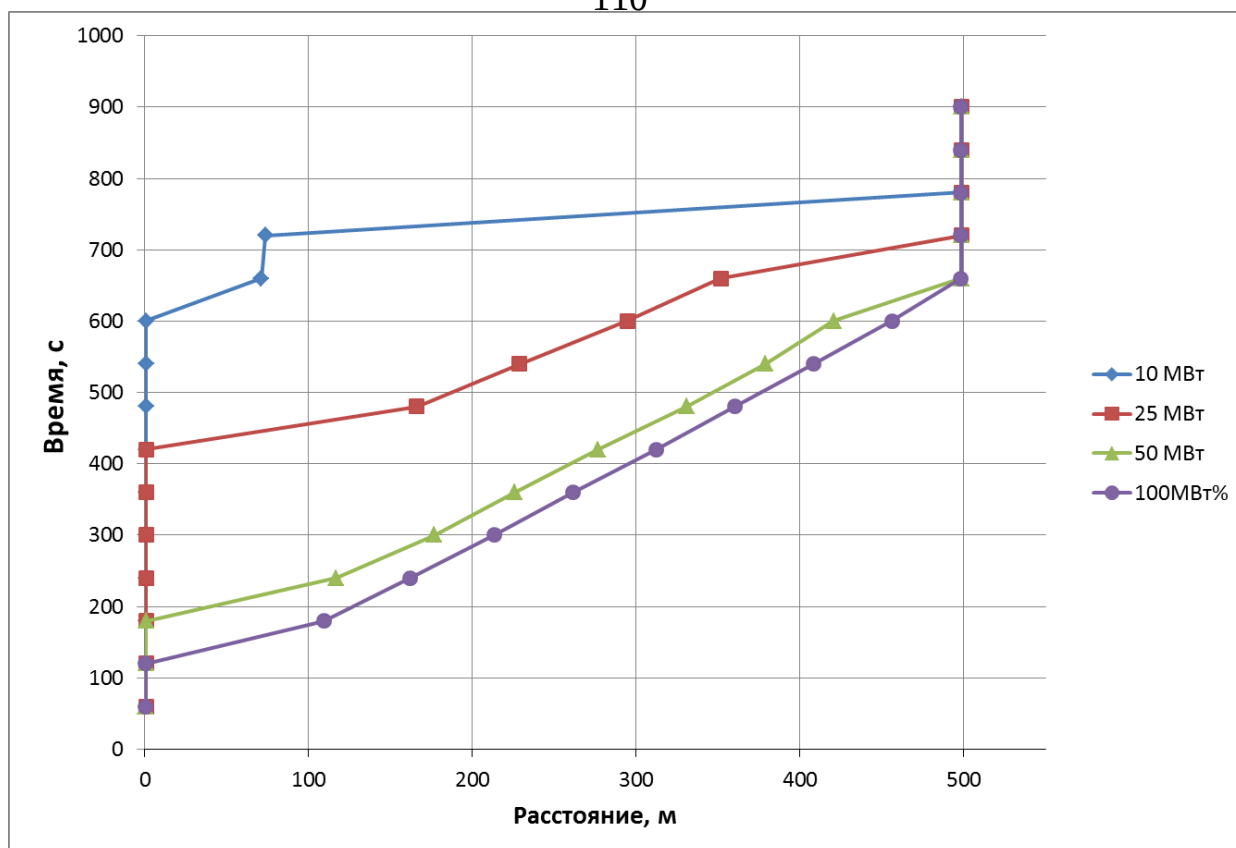


Рисунок 41 – Зависимость времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных вариантов максимальной мощности пожара

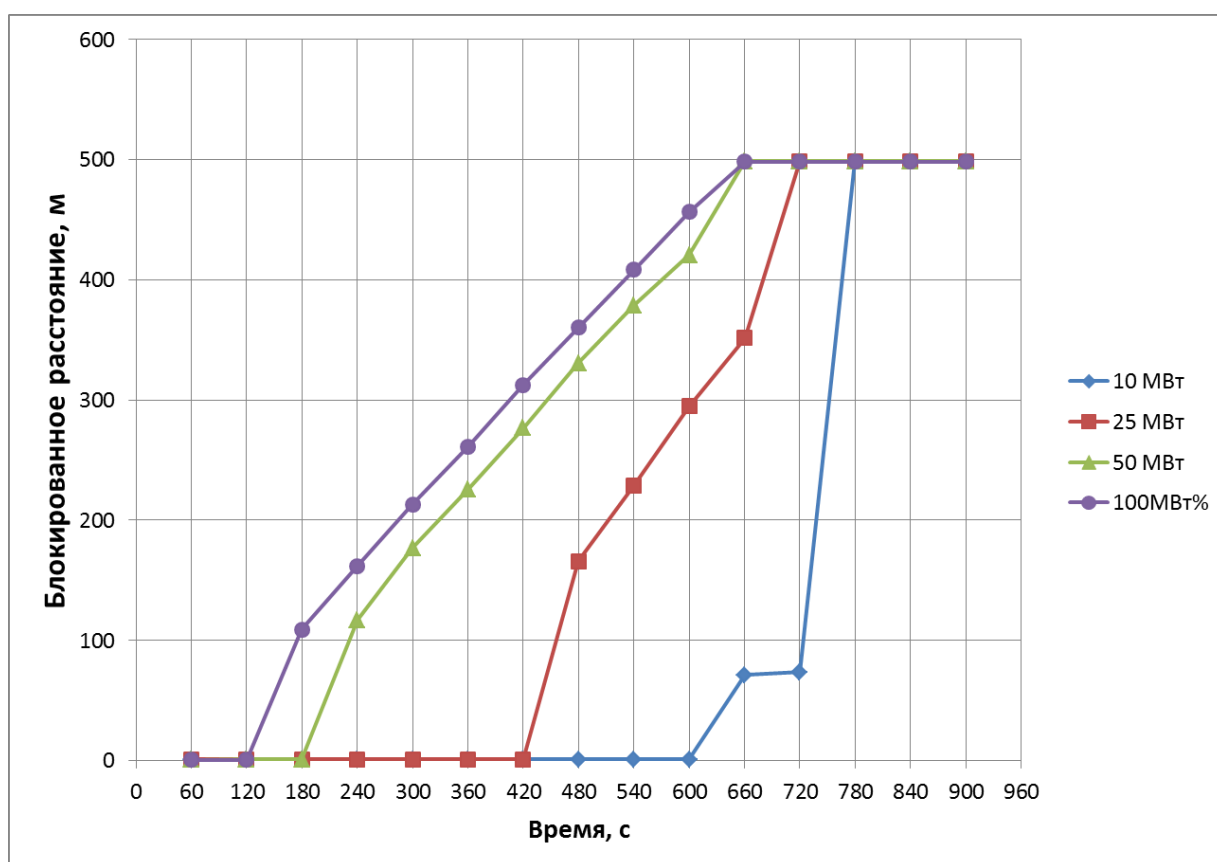


Рисунок 42 – Зависимость блокированного расстояния в тоннеле от времени для различных вариантов максимальной мощности пожара

Как уже было отмечено ранее, результаты, полученные в расчете, являются в достаточной степени предсказуемыми. Наиболее опасными сценариями с более быстрым блокированием путей эвакуации являются расчетные варианты с большей мощностью тепловыделения. Вместе с тем, при рассмотрении указанных вариантов все же можно выделить ряд особенностей развития пожара.

Как видно из данных таблицы 6 и графиков, варианты пожара с высокой максимальной мощностью тепловыделения минимально отличаются друг от друга, несмотря на серьезное различие в значении максимальной мощности (в два раза). В самом деле, линии графиков для 50 и 100 МВт являются почти параллельными, а характер распространения для обоих вариантов почти одинаков – после блокирования первого участка начинается последовательное блокирование оставшейся области тоннеля с почти постоянной скоростью. Интересно, что при всей очевидности картины скорость блокирования новых участков незначительно, но более высока, для варианта с мощностью 50 МВт. Это приводит к тому, что полностью тоннель блокируется в одно и то же время для двух указанных вариантов – 660 с. Еще больше это заметно для варианта расчета 25 МВт. Несмотря на то, что первый участок тоннеля для этого варианта блокируется лишь спустя 480 с после начала пожара, этот участок представляет серьезную величину (166 м), а далее распространение ОФП с последовательным блокированием участков тоннеля не уступает вариантам с более высокой мощностью. Кроме того, скорость блокирования может существенно возрастать. Например, следуя результатам расчета (таблица 6) с 11 по 12 минуту развития пожара ОФП для данного варианта расчета блокируют завершающий 150-метровый участок.

Конечно, при рассмотрении вышеизложенного следует учитывать наличие погрешности, связанной с не совсем точным моделированием распространения ОФП в области портала из-за некоторой некорректности работы граничного условия постоянства давления на границе портала по причине наличия особенностей программы SOFIE. Однако, в целом представленное описание качественно можно считать адекватным.

Объяснение полученной картины пожара можно представить аналогично предыдущему разделу расчета, в котором исследовалось влияние на распространение ОФП продольного уклона. В самом деле, можно заметить некоторую аналогию 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 исследуемых показателей, а далее, с течением времени влияние более низких показателей также становится значительным. В первом случае таким показателем является уклон тоннеля и, как следствие, «эффект трубы», во втором случае – максимальная мощность тепловыделения.

При этом, сама картина для обоих случаев качественно может быть объяснена одинаково. Для меньших показателей (в данном случае мощности) распространение ОФП происходит более «равномерно» в виде движения припотолочной струи без интенсивного перемешивания и без быстрого блокирования, однако, спустя определенное время за счет остывания и опускания дыма, в том числе, с учетом накопления его дополнительного «критического» объема блокируются значительные расстояния и далее весь объем тоннеля полностью. Хотя происходит это за достаточно длительные промежутки времени. Напротив, при наличии более высоких исследуемых показателей вследствие более интенсивного перемешивания уже в первые моменты времени могут блокироваться участки тоннеля, ближайшие к очагу пожара. Далее, последовательно блокируются другие участки, однако, видимо, из-за этого же интенсивного перемешивания скорость движения «фронта» ОФП с критическими показателями замедляется.

Еще более интересными на этом фоне выглядят промежуточные варианты расчета, которые совмещают в себе «свойства» экстремальных вариантов. А именно, блокирование ближайших участков происходит не в первоначальные моменты времени, но достаточно быстро. А скорость блокирования последующих участков может быть даже выше, чем в варианте для самого высокого показателя, в том числе, за счет «опускания» дыма. В этом смысле, при определенных

конкретных условиях эвакуации людей и параметрах тоннеля указанные промежуточные варианты могут быть даже более «коварными», чем для экстремальных показателей.

Таким образом, 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.

3.4 Исследование влияния ширины тоннеля

Следующей исследуемой характеристикой, имеющей важное значение при распространении опасных факторов пожара, является геометрия рассматриваемого сооружения. В настоящей главе проведена оценка влияния ширины тоннеля на общую картину распространения ОФП. Ширина автодорожного тоннеля, как правило, определяется необходимым количеством полос движения, ширина которых для различных условий также регламентируется [18] и составляет около 3,5 м. Кроме того, как правило, могут проектироваться дополнительные элементы – служебные проходы, защитные и остановочные полосы, разделительные полосы, карманы и уширения. С учетом этого, в настоящей главе было рассмотрено четыре варианта ширины тоннеля при размещении в нем от одной до четырех полос. 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. Мощность тепловыделения от времени определялась в соответствии с зависимостью [36]:

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

Принималось, что после выхода на максимальную мощность (через 15

минут после начала пожара) мощность тепловыделения остается постоянной. Площадь очага составляла около 4 м².

Размеры ячеек расчетной сетки, а также расположение очага пожара, принимались в соответствии с разделом 3.1 (сетка 1)

Результаты расчетов представлены на рисунках 43-45, которые отражают поля оптической плотности дыма для различных значений ширины тоннеля в одинаковые моменты времени.

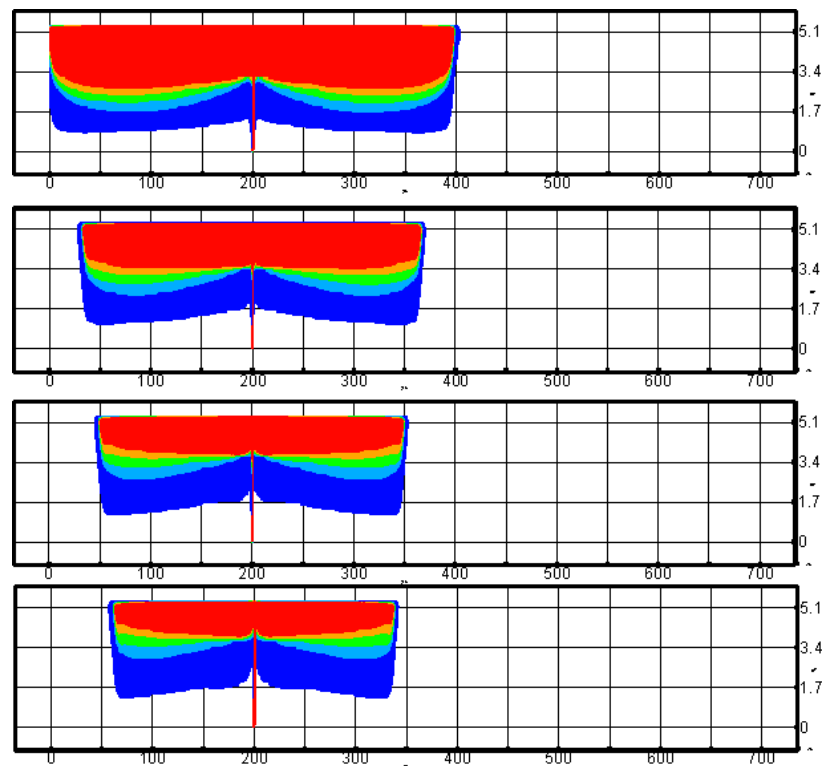


Рисунок 43 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 240 с при различных значениях ширины тоннеля (сверху вниз 5, 10, 15, 20 м)

Как видно из рисунка 43 через 4 минуты после начала пожара блокирования тоннеля на высоте роста человека не наблюдается ни для одного из рассмотренных вариантов. Характер распространения ОФП при этом достаточно очевиден – наибольший объем, соответствующий большому количеству полос движения, имеет более благоприятные условия, с точки зрения пожарной безопасности. В частности, критические значения оптической плотности дыма

для варианта 20 м имеют место лишь в ограниченной области под потолком, тогда как область распространения для варианта 5 м достаточно существенна.

Еще через 4 минуты (момент времени 480 с) блокируется первая область (около 100 м) для первого варианта расчета (Рисунок 44). Блокирование на высоте 1,7 м для остальных вариантов не происходит.

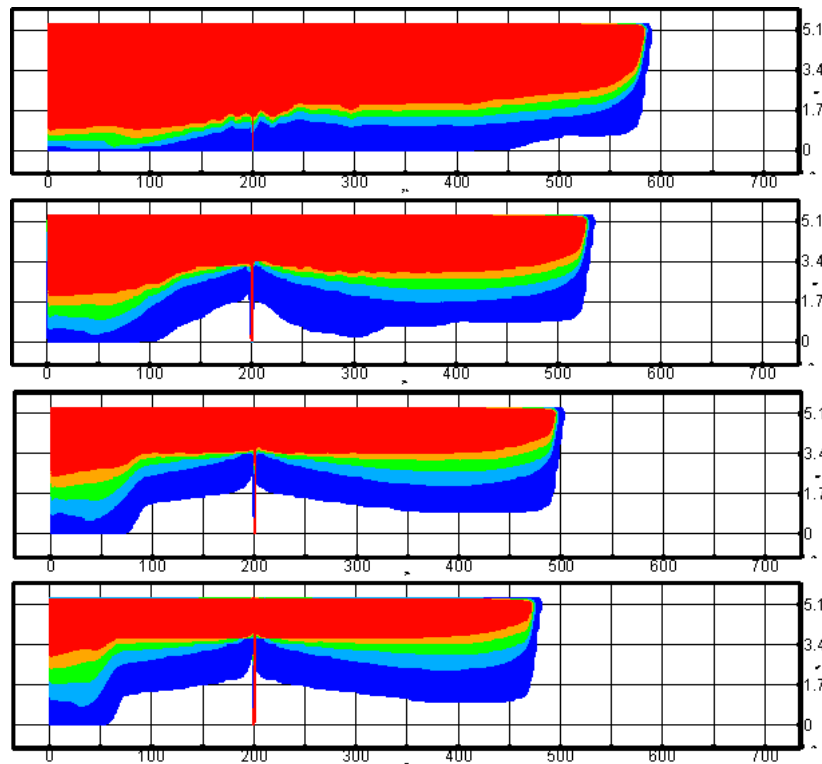


Рисунок 44 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 480 с при различных значениях ширины тоннеля (сверху вниз 5, 10, 15, 20 м)

В следующие несколько минут последовательно блокируются достаточно большие области тоннеля для первого варианта расчета – не менее 60 м каждая. Остальные три варианта показывают полное отсутствие блокирования на высоте 1,7 м. Через 11 минут после начала горения блокируется первая область (70 м) для второго варианта расчета. А в момент времени 840 с блокируется первая область для третьего варианта расчета – расстояние блокирования более 100 м (рисунок 45).

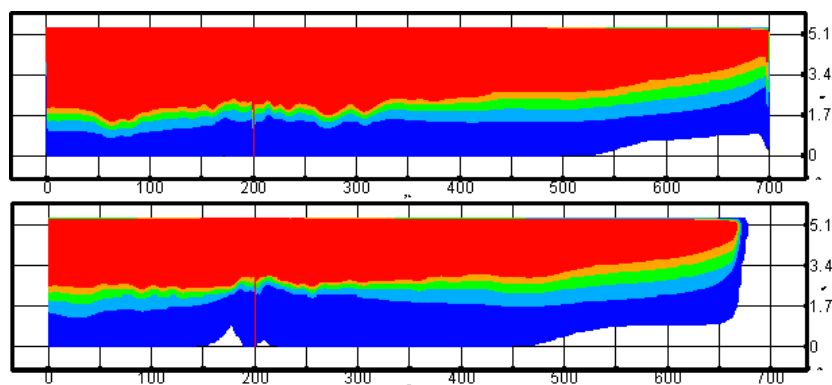


Рисунок 45 – Поля оптической плотности дыма в центральном продольном сечении модельного тоннеля в момент времени 840 с при различных значениях ширины тоннеля (сверху вниз 15, 20 м)

Рассмотрение четвертого варианта показывает, что даже первоначальное блокирование существенно отличается от остальных вариантов и наступает значительно позже, а именно в момент времени 1020 с.

Обобщенные данные по временам и блокированным расстояниям (от места очага пожара) приведены ниже в таблице 7, а также на графиках (Рисунки 46-47).

Таблица 7 – Обобщенные расчетные данные. Зависимость блокированного расстояния от времени для различных значений ширины тоннеля

Время, с	Блокированное расстояние, м			
	5 м	10 м	15 м	20 м
60	0.8	0.8	0.8	0.8
120	0.8	0.8	0.8	0.8
180	0.8	0.8	0.8	0.8
240	0.8	0.8	0.8	0.8
300	0.8	0.8	0.8	0.8
360	0.8	0.8	0.8	0.8
420	0.8	0.8	0.8	0.8
480	103.6	0.8	0.8	0.8
540	198.4	0.8	0.8	0.8
600	264.7	0.8	0.8	0.8
660	327.7	71.2	0.8	0.8
720	498.7	73.6	0.8	0.8
780	498.7	498.7	0.8	0.8
840	498.7	498.7	108.4	0.8
900	498.7	498.7	127.6	0.8
960	498.7	498.7	282.7	0.8
1020	498.7	498.7	498.7	110.8
1080	498.7	498.7	498.7	498.7
1140	498.7	498.7	498.7	498.7
1200	498.7	498.7	498.7	498.7

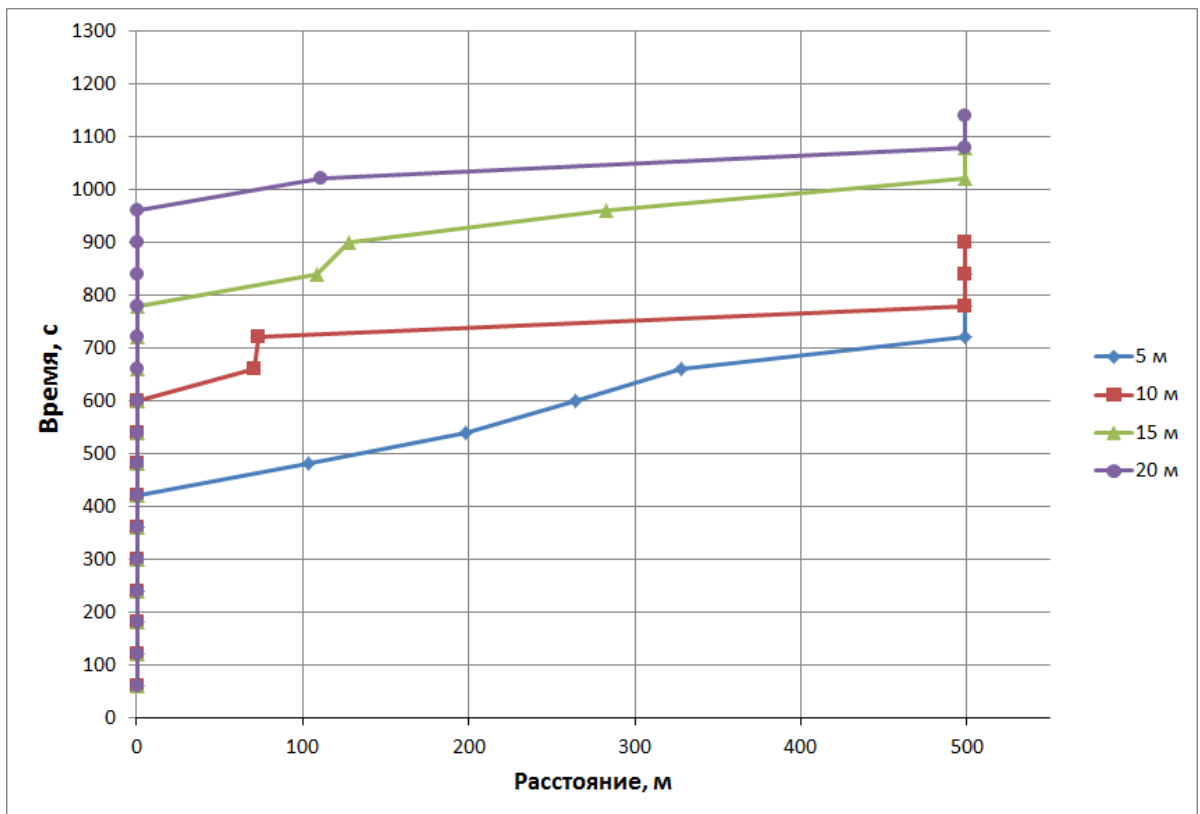


Рисунок 46 – Зависимость времени блокирования участков тоннеля от расстояния для различных вариантов ширины тоннеля

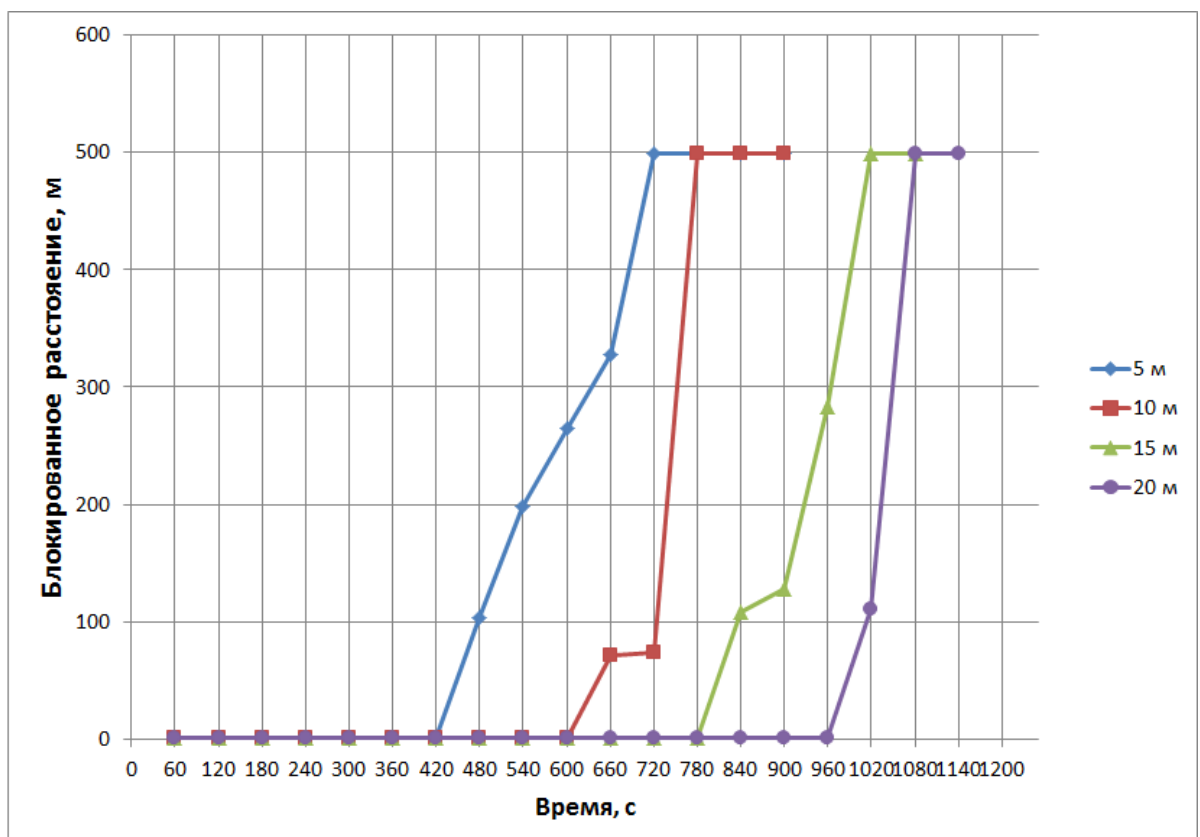


Рисунок 47 – Зависимость блокированного расстояния в тоннеле от времени для различных вариантов ширины тоннеля

Из представленных данных можно сделать следующие основные выводы.

Как и следовало ожидать, 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. Ведь как было указано ранее наиболее безопасными сооружениями являются двухтрубные тоннели, строительство которых, как правило, реализуется в Германии. Конечно, 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 эвакуационным сбойками, наличие инженерных систем и т.д.

Более благоприятная ситуация наблюдается для второго варианта расчета. При этом, несмотря на отсутствие критических значений на высоте 1,7 м в течение 10 минут (в отличие от первого варианта расчета) время полного блокирования тоннеля отличается от первого варианта всего на 1 минуту, что напоминает эффект, описанный в предыдущих главах, где рассматривалось влияние на распространение ОФП уклона и мощности.

Расчет вариантов для 15 и 20 м ширины в этом смысле похож на первые два варианта – разница полного блокирования между ними составляет также 1 минуту. Однако, абсолютные времена блокирования в этих вариантах существенно отличаются от первых двух в лучшую сторону. Так, полное

блокирование для варианта 15 м (1020 с) превышает указанное время для варианта 10 м (780 с) на 4 минуты, а в варианте 20 м – на 5 минут.

Это говорит о том, что в ряде случаев увеличение ширины тоннеля может давать серьезный положительный эффект с точки зрения пожарной безопасности. А это, в свою очередь, является предметом дальнейшей оценки с экономической точки зрения, о целесообразности выполнении тех или иных инженерных мероприятий или изменения геометрических характеристик тоннеля взамен этого.

В частности, возможно, для некоторых объектов эффект от выполнения дополнительной полосы движения может быть сравним с эффектом наличия противодымной вентиляции или высокого сводчатого потолка тоннеля, что, безусловно, может быть намного более значимым (даже с учетом более высокой стоимости), например, в условиях города с большим траффиком.

В качестве основных выводов по исследованию влияния показателя ширины можно отметить:

- значительную опасность тоннелей небольшой ширины. Необходимость проработки дополнительных мероприятий с точки зрения пожарной безопасности;

- эффективность увеличения ширины тоннеля, начиная с определенного значения, которая может быть сравнима с иными мероприятиями.

Таким образом, в рамках настоящей главы было выполнено исследование влияния различных факторов на распространение ОФП в модельном тоннеле. Полученные результаты позволяют отметить следующее:

- 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 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. При этом необходимо отметить, что на указанный результат имеет определенное влияние постановка граничного условия.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Результаты настоящей работы были использованы при проведении численного моделирования и разработке практических рекомендаций при проектировании системы противопожарной защиты для следующих объектов:

1) **Автодорожный тоннель №6 на участке обхода г. Сочи автодороги Джубга-Сочи.** Тоннель располагается в Центральном районе города Сочи на участке обхода г. Сочи федеральной автодороги Джубга-Сочи в Краснодарском крае. Трасса тоннеля проложена в направлении Север-Юг.

Длина тоннеля составляет 2620,2 м. Площадь поперечного сечения – около 70 м².

Параллельно тоннелю расположена эвакуационная штольня. Длина штольни составляет 2518,04 м.

В штольне предусматривается размещение путей эвакуации людей на случай ЧС. В полу штольни устраиваются открытые водоотводные лотки, над эвакуационным коридором предусмотрено размещение водоотводного зонта.

Тоннель соединен со штольней эвакуационными сбойками. Каждая сбойка отделена от тоннеля и штольни сплошными монолитными железобетонными стенами с эвакуационными проемами. В сбойках размещаются эвакуационные лестницы, ведущие на отметку уровня пола штольни. Кроме того, в каждой сбойке устанавливаются металлические стремянки с промежуточными площадками для эксплуатационного прохода в вентиляционный канал, расположенный над проезжей частью тоннеля.

Для обеспечения дымоудаления в случае пожара, а также для удаления загрязненного выхлопными газами воздуха, над проезжей частью тоннеля сооружается перекрытие, которое вместе с верхней частью транспортной зоны тоннеля (сводом) образует вытяжной вентиляционный канал.

К основным конструктивным, объемно-планировочным и другим особенностям проектируемого тоннеля, характеризующим его пожарную опасность, относятся:

- длина тоннеля составляет более 2,5 км;
- движение со встречным направлением по двум полосам.

2) **Тоннель «Скальный» на км 23+370 автомобильной дороги А-149 Адлер-Красная Поляна.** Тоннель располагается на участке автодороги А-149 Адлер-Красная Поляна в Краснодарском крае. Трасса тоннеля проложена в направлении Север-Юг. Год постройки тоннеля – 2005. Длина тоннеля составляет 2475,16 м. Площадь поперечного сечения – около 70 м².

Для эвакуации из тоннеля предусмотрены три сервисно-эвакуационные штольни. Штольни размещены перпендикулярно тоннелю. Длина каждой штольни не превышает 240 м. Сечение центральной штольни разделено на две части, одна из которых также используется в качестве канала для дымоудаления. Каждая штольня отделена от тоннеля сплошными монолитными железобетонными стенами с эвакуационными проемами. Кроме того, в каждой штольне устанавливается технологическое оборудование различного назначения.

Система вентиляции искусственная совмещенная с системой дымоудаления. Для обеспечения дымоудаления в случае пожара, а также для удаления загрязненного выхлопными газами воздуха, над проезжей частью тоннеля предусматривается размещение осевых вентиляторов.

Система противопожарной защиты включает в себя автоматическую пожарную сигнализацию, противопожарный водопровод и посты с огнетушителями. Также в тоннеле осуществляется видеонаблюдение (52 видеокамеры); у порталов и через каждые 150 м внутри тоннеля установлены телефонные аппараты; действует сотовая связь; присутствует система громкоговорящего оповещения.

К основным конструктивным, объемно-планировочным и другим особенностям тоннеля, характеризующим его пожарную опасность, относятся:

- длина тоннеля составляет более 2,4 км;
- движение со встречным направлением по двум полосам.

3) **Тоннель «Мацестинский» на км 0+375 автомобильной дороги А-147 Джубга-Сочи – граница с Республикой Абхазия (Обход г. Сочи).** Тоннель располагается на км 0+375 автодороги «Обход г. Сочи» в Краснодарском крае. Трасса тоннеля проложена в направлении Север-Юг. Год постройки тоннеля –

2001. Длина тоннеля составляет 1317 м. Площадь поперечного сечения – около 70 м².

Для эвакуации из тоннеля предусмотрена сервисная штольня. Штольня размещена частично перпендикулярно и частично параллельно тоннелю. Длина штольни составляет 447 м. Штольня также используется в качестве канала для дымоудаления. Штольня отделена от тоннеля сплошными монолитными железобетонными стенами с эвакуационным проемом. Кроме того, в штольне установлено технологическое оборудование различного назначения.

Для обеспечения дымоудаления в случае пожара, а также для удаления загрязненного выхлопными газами воздуха, над проезжей частью тоннеля предусматривается размещение осевых вентиляторов, имеющих различных алгоритмы действия.

К основным конструктивным, объемно-планировочным и другим особенностям проектируемого тоннеля, характеризующим его пожарную опасность, относятся:

длина тоннеля составляет более 1,3 км;

высокая интенсивность движения.

Для указанных выше автодорожных тоннелей с учетом результатов диссертационной работы:

- оптимизированы проектные решения;
- доказана необходимость применения поперечной схемы противодымной вентиляции;
- подтверждено безопасное расстояние между эвакуационными сбойками.

4) Межтерминальный переход между СТК и ЮТК аэропорта Шереметьево. Целевое назначение объекта – скоростная, регулярная, круглосуточная перевозка пассажиров и багажа между Северным и Южным терминальными комплексами аэропорта Шереметьево.

Объект капитального строительства расположен в границах территории действующего международного аэропорта Шереметьево в г. Химки Московской области.

Объект капитального строительства представляет собой комплекс сооружений, состоящий из Северного станционного комплекса (далее – ССК), Южного станционного комплекса (далее – ЮСК) и тоннельного участка между ними.

Тоннельный участок МТП предусмотрен в подземном исполнении в двух тоннелях:

- Тоннель АСПП – предназначенный для размещения Автоматизированной системы перевозки пассажиров;
- Тоннель АСПБ - предназначенный для размещения Автоматизированной системы перевозки багажа.

Каждый тоннель имеет внутренний диаметр 5,4 м. Между тоннелями предусмотрены три технологические сбойки на расстоянии не более 700 м друг от друга и камера водоотливной установки.

К основным конструктивным, объемно-планировочным и другим особенностям объекта, характеризующим его пожарную опасность относятся:

- преимущественно подземное размещение объекта;
- встречное движение пассажирских составов внутри одного подземного тоннеля;
- наличие многосветных пространств в объеме станционных комплексов.

Для рассматриваемого объекта с учетом результатов диссертационной работы:

- реализованы проектные решения в части интеграции заглубленных сооружений межтерминального перехода в сооружение терминала В;
- обосновано отсутствие необходимости эвакуации пассажиров в объем тоннеля при пожаре в вагоне состава с разработкой соответствующего алгоритма эвакуации;
- подтверждена возможность технологических решений для перевозки пассажиров с использованием зоны режимных ограничений на посадочных платформах.

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

Тоннель является «двухтрубным» и состоит из двух ниток, обеспечивающих одностороннее движение по трем полосам в каждую сторону, и имеет длину 3126 м, включая рамповую часть длиной 360 м. Кроме того, для коммуникаций и эвакуации людей между основными тоннелями сооружен сервисный тоннель.

К основным конструктивным, объемно-планировочным и другим особенностям объекта, характеризующим его пожарную опасность относится двухъярусная конструкция тоннелей – нижний ярус предназначен для поездов метрополитена, верхний ярус – для движения автотранспорта.

Для рассматриваемого объекта с учетом результатов диссертационной работы разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности и проектные решения, обеспечивающие безопасную эвакуацию людей при пожаре.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для выполнения оценки конкретных объемно-планировочных решений любых автотранспортных тоннелей с точки зрения пожарной безопасности, таких как:

- параметры эвакуационных путей и выходов (максимальные расстояния до эвакуационных сбоек, наличие/отсутствие пешеходной дорожки, оценка наиболее безопасного направления движения);
- оценка эффективности работы систем противопожарной защиты, в первую очередь, противодымной защиты;
- выбор наиболее оптимальных объемно-планировочных решений (параметры продольного профиля, увеличение площади поперечного сечения вместо затрат на систему противодымной защиты, необходимость сооружения двухтрубного тоннеля, либо наличие двустороннего движения и т.д.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы:

1. Проведен анализ пожаров в автодорожных тоннелях и возможности влияния их характеристик на безопасность людей при пожаре.
2. Сформулирована математическая расчетная модель с целью прогнозирования влияния различных характеристик на распространение ОФП в автодорожном тоннеле.
3. Проведены эксперименты по изучению динамики пожара на модели тоннеля и получены новые экспериментальные данные для апробации указанной математической модели.
4. Проведена апробация математической модели на основе полученных экспериментальных данных, а также на основе данных натурных испытаний в тоннеле Memorial (США). Получены удовлетворительные результаты и сделан вывод о возможности использования выбранной математической модели для прогнозирования распространения ОФП в автодорожных тоннелях.
5. Проведено численное моделирование распространения ОФП для тоннеля прямоугольного сечения длиной 700 м, и проведена расчетная оценка влияния геометрических характеристик тоннеля (уклона и ширины) и мощности тепловыделения на распространение ОФП. Для каждой из характеристик проведено несколько вариантов расчета и получены данные численного эксперимента. Перед проведением расчета проведено моделирование нескольких сценариев с целью выбора оптимальной расчетной сетки и указано на важность такого выбора.
6. Проведен анализ результатов численного эксперимента и 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, блокированные 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 систем противопожарной защиты нескольких автотранспортных тоннелей в России.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

C_μ, C_1, C_2 - константы в модели турбулентности;

c_p - удельная массовая изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

f - функция смешения;

G_k - генерация турбулентности за счет вынужденной конвекции, Па/с

G_B - генерация турбулентности за счет естественной конвекции, Па/с

g - ускорение свободного падения, м/с²;

H_k - теплота образования k -го компонента смеси, Дж/кг

$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k$ - удельная массовая энтальпия смеси, Дж/кг;

k - кинетическая энергия турбулентных пульсаций, м²/с²;

m - масса, кг;

p - давление, Па;

$Pr = \nu / a$ - критерий Прандтля;

Q - мощность тепловыделения, кВт;

R - приведенная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

s – стехиометрическое отношение;

S_Φ - источниковый член

t - время, с

T - термодинамическая (абсолютная) температура, К;

$\dot{q}_R$ - радиационный тепловой поток, Вт/м²;

Y_k – массовая концентрация k -го компонента смеси, кг/кг;

α - темп роста пожара, Вт/с²; коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К)

β - коэффициент объемного расширения, 1/К;

Γ_Φ - коэффициент переноса;

ε - скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м²/с³

Φ - обобщенная переменная

λ - коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$;

μ_t - турбулентная динамическая вязкость, $Па \cdot с$

$\mu_{эфф}$ - эффективная динамическая вязкость, $Па \cdot с$

ν - кинематическая вязкость, $м^2/с$;

ρ - плотность, $кг/м^3$;

σ_k , σ_ε - аналоги критерия Прандтля для уравнений кинетической энергии турбулентных пульсаций и скорости ее диссипации;

χ_R - доля тепла, теряемая за счет излучения;

ψ - скорость выгорания (скорость потери массы конденсированной фазой горючего), $кг/с$

ДПИ – дымовой пожарный извещатель;

ДТП – дорожно-транспортное происшествие;

НВЭ – необходимое время эвакуации;

ОФП – опасные факторы пожара;

ТГВС – токсичные газовоздушные смеси;

CFD – computational fluid dynamics;

FDS - Fire Dynamics Simulator;

PIARC – Всемирная дорожная ассоциация;

Расшифровка обозначений, приводимая непосредственно в тексте имеет приоритет перед приведенным списком. Для всех физических величин использованы основные единицы измерения системы СИ, если явно не оговорено иное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haack, A. Catastrophic Tunnel Fires – What have we learnt? [Текст] / A. Haack // Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires. – Cologne, Germany. – 2003. – Pp. 7-17.
2. Tuovinen, H. CFD modelling of tunnel fires [Текст] / H. Tuovinen, G. Holmstedt, S. Bengtson // International Conference on Fires in Tunnels. – Boras, 1994. – Pp. 297-312.
3. Провести поисковые исследования по верификации математических моделей для прогнозирования распространения опасных факторов пожара в протяженных помещениях (П.3.4.П.0 .2003 «Модель-тоннели»): отчет о НИР (промежуточный) / Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны. – 2003. – 93 с.
4. Haack, A. Introduction to the Eureka – EU 499 firetun project / Proceedings of the Int. Conference on Fires in Tunnels. – Boras, 1994. – Pp. 3-19.
5. Luchian, S. The West Virginia Memorial Tunnel Fire Test Program [Текст] / S. Luchian, A. Bendelius // Proceedings of the Int. Conference on Fires in Tunnels. – Boras, 1994. – Pp. 215-221.
6. Агеев, П.М. Расчет основных параметров пожара подвижного состава в тоннеле метрополитена [Текст] / П.М. Агеев, С.В. Шарапов, А.Д. Голиков // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2011. – № 4. – С. 67-75.
7. Голиков, А.Д. Предел огнестойкости чугунных тоннельных обделок без огнезащитных покрытий [Текст] / А.Д. Голиков [и др.] // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2014. – Т. 1. – № 1 (5). – С. 130-134.
8. Голиков, А.Д. История исследования в области пожарной безопасности метрополитенов [Текст] / А.Д. Голиков [и др.] // Метро и тоннели. – 2016. – № 3. – С. 22-26.
9. Давыдкин, Н.Ф. Пожарная безопасность подземных сооружений / под общей редакцией Н.Ф. Давыдкина: в 5 томах / Противодымная защита

подземных сооружений и прилегающих к ним территорий, зданий и микрорайонов / Н.Ф. Давыдкин, Н.П. Копылов, И.Н. Кривошеев; под ред. И.Я. Дормана – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 1998. – Т.4. – 136 с.

10. Давыдкин, Н.Ф. Пожарная безопасность подземных сооружений / под общей редакцией Н.Ф. Давыдкина: в 5 томах / Огнестойкость конструкций подземных сооружений / Н.Ф. Давыдкин, В.Л. Страхов; под ред. И.Я. Дормана – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 1998. – Т.2. – 296 с.

11. Давыдкин, Н. Ф. Расчет огнестойкости и параметров огнезащиты пролетных строений тоннеля в районе пересечения Беговой улицы с Ленинградским проспектом [Текст] / Н.Ф. Давыдкин, В. Л. Страхов, Вл. О. Каледин // Подземное пространство мира. – 2004. – № 2-3. – С. 63-69.

12. Beard, A. The Handbook of Tunnel Fire Safety [Текст] / A.Beard, R. Carvel. – London: Thomas Telford, 2015. – 514 p.

13. Волков, В.П. Тоннели и метрополитены [Текст] / В.П. Волков [и др.] – М.: Транспорт, 1975. – 551 с.

14. Kohyu, S. A. Numerical Study of Large Fire in Tunnels [Текст] / S. Kohyu, M. Sanae // Fire Research Institute of Japan. – 1989. – № 68. – Pp. 19-35.

15. Ingason, H. Small Scale Tests For a Road Tanker Fire Scenario [Текст] / H. Ingason // Fire Technology. – Boras, Sweden, Swedish National Testing And Research Institute. – Pp. 3-20.

16. Пожар в тоннеле Монблан. [Электронный ресурс] // Клуб пожарных и спасателей: [сайт]. – Режим доступа: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pozhar-v-tunnele-monblan>, дата обращения 25.11.2021.

17. Кошмар под Монбланом: как загоревшийся грузовик убил 39 человек в горном тоннеле. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fishki.net/2558764-koshmar-pod-monblanom-kak-zagorevshijsja-gruzovik-ubil-39-chelovek-v-gornom-tonnele.html>, дата обращения 10.06.2021.

18. СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автодорожные. – М.: Стандартинформ, 2012. – Текст: непосредственный.

19. СП 166.1311500.2014 Городские автотранспортные тоннели и путепроводы тоннельного типа с длиной перекрытой части не более 300 м. Требования пожарной безопасности. – М.: Стандартинформ, 2014. – Текст: непосредственный.

20. ГОСТ Р 56521-2015 Тоннели автомобильные. Требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2015. – Текст: непосредственный.

21. ГОСТ 24451-80 Тоннели автодорожные. Габариты приближения строений и оборудования. – М.: Издательство стандартов, 1981. – Текст: непосредственный.

22. Батчер, Е. Опасность дыма и дымозащита [Текст] / Е. Батчер, А. Парнэлл. – М.:Стройиздат, 1983. – 153с.

23. Иличкин, В.С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов. Обзорная информация [Текст] / В.С. Иличкин, А.А. Фукалова. – М.:ГИЦ, 1987. – 68 с.

24. Characteristics and behavior of fire. Ch. 3. Products of combustion and their effects on life safety / Fire protection handbook, 1969. – Vol.13. – Pp. 4-32.

25. Грушевский, Б.В. Пожарная профилактика в строительстве [Текст] / Б.В. Грушевский [и др.]; под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М.:ВИПТШ МВД СССР, 1985. – 452 с.

26. Веденин А.Н. О влиянии естественных факторов на режим проветривания тоннелей [Текст] / А.Н. Веденин, В.И. Фомичев, Ю.Б. Мостепанов // Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: Тезисы докладов. – 1983. – С.107-108.

27. Беляцкий, В.П. Противодымная защита подземных сооружений: Обзорная информация [Текст] / В.П. Беляцкий – М.: ГИЦ МВД СССР.– 1990. – 58 с.

28. Величкин, Е.А. Строительство тоннелей и метрополитенов [Текст] / Е.А. Величкин, П.Т. Ленец – М.: Транспорт, 1971. – 390 с.

29. Фомичев, В.И. Классификация схем (систем) вентиляции автодорожных тоннелей [Текст] / В.И. Фомичев // Физико-технические

проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: Тезисы докладов. – 1983. – С.110-111.

30. СП 298.1325800.2017 Свод правил. Системы вентиляции тоннелей автодорожных. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2019. – Текст: непосредственный.

31. Kuboki, R. The ventilation system and its control plan under fire accidents for a complexed road tunnel in urban aria [Текст] / R. Kuboki, M. Ishida // Proc. 1st Int.Conf. on Long Road and Rail Tunnels. – Basel, Switzerland, 29 November – 1 December, 1999. – Pp. 273-282.

32. Day, J.R. Active and passive safety systems for road tunnels [Текст] / J.R. Day // Proc. Int. Tunnel Fire and Safety Conf. – Rotterdam, 2-3 December, 1999. –12 p.

33. Rhodes, N. Debate: Should tunnel operators install sprinklers as a safety measure? [Текст] / N. Rhodes, D. Charters // New Civil Engineer, 7th December, 2000. –16 p.

34. Fire and Smoke Control in Tunnels: report no. 05.05.B [Текст] / The World Road Association (PIARC /AIPCR). – 1999. – ISBN 2-84060-064-1.

35. Болодьян, И.А. Оценка эффективности применения противодымных штор в автодорожных тоннелях с помощью трехмерного полевого моделирования [Текст] / И.А. Болодьян [и др.] // Пожарная безопасность. – 2003. – №5. – С. 55-62.

36. Karpov, A.V. Optimization of Measures Directed on the People Safety at Tunnel Fire by Means of Computational Methods [Текст] / A.V. Karpov [и др.] // Proceedings from the 5th International Simposium on Tunnel Safety and Security. – New York, USA, March 14-16, 2012. – Pp. 547-557.

37. Кошмаров, Ю.А. Уравнения развития пожара в помещении [Текст] / Ю.А. Кошмаров // Проблемы противопожарной защиты зданий и сооружений: Сб. науч. тр. – М.: ВПИТШ МВД СССР, 1978. – С. 27-33.

38. Babrauskas, V. Post flashover compartment fires: basis of a theoretical model [Текст] / V. Babrauskas, R.B. Williamson // Fire and Materials. – 1978. – Pp. 39-53.

39. Pettersson, O. Fire engineering design of structures [Текст] / O. Pettersson, S.E. Magnusson, J. Thor // Swedish Institute of Steel Construction. – 1976. – Publication 50.

40. Зотов, Ю.С. Расчет динамики задымления помещений [Текст] / Ю.С. Зотов // Безопасность людей при пожарах: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1984. – С. 79-85.

41. Есин, В.М. Математическая модель движения продуктов горения по зданию при пожаре [Текст] / В.М. Есин [и др.] // Пожарная техника и тушение пожаров: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1982. – С.147-149.

42. Есин, В.М. Математическая модель движения продуктов горения по зданию при пожаре [Текст] / В.М. Есин [и др.] // Пожарная техника и тушение пожаров: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1981. – С. 110-116.

43. Evers, E. / A complete model for analysing smoke movement in buildings. Building Research Establishment [Текст] / E. Evers, A. Waterhouse – BRE CP 69/78, 1978.

44. Молчадский И.С. Пожар в помещении [Текст] / И.С. Молчадский – М.: ВНИИПО, 2005. – 456 с.

45. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: Приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382. – Режим доступа: URL: <http://pravo.gov.ru/>, дата обращения 25.11.2021.

46. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» [Текст] – М.: ВНИИПО, 2012. – 83 с.

47. Cox G. Combustion Fundamentals of Fire [Текст] / G. Cox – London: Academic Press, 1995. – 476 p.

48. Hanseel, G.O. Design approaches for smoke control in atrium buildings: Buildings Research Establishment Report CI/SIB 981 (k23) [Текст] / G.O. Hanseel, H.P.Morgan. – IHS BRE Press, 1994. – 57 p.

49. Гутов, В.Н. Зонная математическая модель развитой стадии пожара [Текст] / В.Н. Гутов // Безопасность людей при пожарах в зданиях и сооружениях: сборник научных трудов – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1987. – С. 62-69.

50. Heims Untersuchungen uber die Brand- und Rauchentwicklung in Unterirdischen Verkehrsanlagen [Текст] / Heims, Kordina // Katastrophenschutz in Verkehrstunneln. – 1990.

51. Матюшин, А.В. Метод разработки оперативных планов пожаротушения для тоннелей [Текст] / А.В. Матюшин, Н.Ф. Давыдкин, М.М. Шлепнев, А.Н. Щеглов // Пожарная безопасность. – 2002. – № 2. – С. 68-71.

52. Болодьян, И.А. Моделирование параметров пожаров в тоннелях большой протяженности [Текст] / И.А. Болодьян [и др.] // Материалы XVI научно-практической конференции «Крупные пожары: предупреждение и тушение». – М: 2001. – Часть 1. – С. 5-7.

53. Хинце, И.О. Турбулентность [Текст] / И.О. Хинце – М.: Физматгиз, 1963. – 680 с.

54. Baum, H.R. Three dimensional simulations of fire plume dynamics [Текст] / H.R. Baum, K.B. McGrattan, R.G. Rehm // The Fifth International Symposium on Fire Safety Science. – 1997. – Pp. 511-522.

55. Baum, H.R. Prediction of heat and smoke movement in enclosure fires [Текст] / H.R. Baum, R.G. Rehm, G.W. Mullholand // Fire Safety Journal. – 1983. – №6. – Pp. 193-201.

56. Spalding, D.B. Mixing and chemical reaction in steady-state confined turbulent flames [Текст] / D.B. Spalding // 13th International Symposium on Combustion . The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. – 1971. – Pp. 649-657.

57. Mason, H.B. (1973) Prediction of reaction rates in turbulent premixed boundary-layer flows [Текст] / H.B. Mason, D.B. Spalding // Combustion Institute European Symposium, Academic Press, New York. – 1973. – Pp. 601-606.

58. Magnussen, B.F. On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion [Текст] / B.F. Magnussen, B.H.

Hjertager // 16th Symp. (Int.) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. – 1976. – Pp. 719-729.

59. Peters, N. Laminar flamelet concept in turbulent combustion [Текст] / N. Peters // 21th Symp. (Int.) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. – 1986. – Pp. 1231-1250.

60. Tuovinen, H. Modelling of laminar diffusion flames in vitiated environment [Текст] / H. Tuovinen // The Fourth International Symposium on Fire Safety Science. – 1994. – Pp. 113-124.

61. Spalding, D.B. Chemical reaction in turbulent fluids [Текст] / D.B. Spalding // Physicochem. Hydrodynam. – 1983. – №4. – С. 323 - 328.

62. Patankar, S.V. A computer model for three-dimensional flow in furnaces [Текст] / S.V. Patankar, D.B. Spalding // 14th Symp. (Int.) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. – 1973. – Pp. 605-614.

63. Lockwood, F.C. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures [Текст] / F.C. Lockwood, N.G. Shah // 18th Symp. (Int.) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. – 1981. – Pp. 1405-1414.

64. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации. [Текст] – М.: ВНИИПО, 2003. – 35 с.

65. Cox, G. Mathematical Modelling of Fires in Road Tunnels [Текст] / G. Cox, S. Kumar // Proceedings of the 5th International Symposium «Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels», Lille, France. – 1985. – Pp.61-76.

66. Final Report on the Tests in the Offenegg tunnel from 17 May to 31 May, 1965 [Текст] / Published by the Commission for Safety Measures in Road Tunnels, Bern. – 1965.

67. Van de Leur, P.H.E. Numerical Study of the Stratified Smoke Flow in a Corridor: Full Scale Calculations [Текст] / P.H.E. Van de Leur, C.R. Kleijn, C.J. Hoedergoor // Fire Safety Journal. – 1989. – Vol.14. – Pp. 289 – 302.

68. Apte, V.B. Pool Fire Plume Flow in a Large-Scale Ventilated Tunnel [Текст] / V.B. Apte, A.R. Green, J.H. Kent // Fire safety science : proceedings of the third international symposium. – 1991. – Pp. 425-434.

69. Рыжов, А.М. Динамика конвективных потоков при пожарах в вентилируемых туннелях [Текст] / А.М. Рыжов // Материалы 14 Всероссийской научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности. – М.: ВНИИПО, 1997. – Ч. 2. – С. 193-195.

70. Satoh, K. A Numerical Study of Large Fires in Tunnels: Report Of Fire Research Institute of Japan [Текст] / K. Satoh, S. Miyazaki. – 1989. – № 68. – P.19-34.

71. Ryzhov, A.M. Numerical simulation of fires in compartments [Текст] / A.M. Ryzhov // Proceedings of the Russian - Japanese seminar on combustion. The Russian section of the Combustion Institute. – 1993. – С. 85 – 86.

72. Tuovinen, H. CFD Modelling of Tunnel Fires [Текст] / H. Tuovinen, G. Helmstedt, S. Bengtson // Proceedings of International Conference on Fires in Tunnels, Borås. – 1994. – Pp. 297-312

73. Барановский, А.С. К вопросу обеспечения безопасности людей при пожаре в транспортных тоннелях [Текст] / А.С. Барановский [и др.] // Материалы X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы регулирования природной и техногенной безопасности в XXI веке». – М.: ЦСИ, МЧС России, 2005 г. – С. 52-58.

74. Baranovski, A.S. Peculiarities of computational assessment of people safety at road tunnels [Текст] / A.S. Baranovski [и др.] // Proc. of International Symposium on Safety Science and Technology, Beijing, China. – 2008. – Pp. 636-647.

75. Барановский, А.С. Особенности расчетной оценки риска для людей при пожаре в автодорожных тоннелях [Текст] / А.С. Барановский [и др.] // Сборник «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России – 2015»: Сборник статей по материалам научно-практической конференции. – 2015. – С. 101-103.

76. Woodburn, P.J. CFD prediction of a Tunnel Fire – Part I [Текст] / P.J. Woodburn, R.E. Britter // Fire Safety Journal. – 1996. – V.26. – №1. – Pp. 35 – 62.

77. Woodburn, P.J. CFD prediction of a Tunnel Fire– Part II [Текст] / P.J. Woodburn, R.E. Britter // Fire Safety Journal. – 1996. – V.26. – №1. – Pp. 62 - 90.

78. Tuovinen, H. Validation of Ceiling Jet Flows in a Large Corridor with Vents Using the CFD Code JASMINE [Текст] / H. Tuovinen // Fire Technology. – 1996. – V.32. – №.1. – Pp.25 - 49.

79. Baranovski, A.S. CFD Modelling of Fires in Full-Scale Tunnels [Текст] / A.S.Baranovski [и др.] // Fourth International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Paris – France. – 2005. – Pp. 668-672.

80. Барановский, А.С. Полевое моделирование динамики пожара в полномасштабном тоннеле. Сравнение с экспериментом [Текст] / А.С. Барановский [и др.] // «Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений». Материалы XIX научно-практической конференции – ВНИИПО, Москва, 2005. – Ч.1. – С. 5-8.

81. Барановский, А.С. Моделирование развития пожара в автодорожных тоннелях: возможности и перспективы развития [Текст] / И.А. Болодьян, А.С. Барановский, 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.

82. Mcgrattan, K. Fire Dynamics Simulator: User's Guide [Текст] / K. Mcgrattan [и др.] – NIST Special Publication, 2013.

83. Li, Y.Z. Scale modeling and numerical simulation of smoke control for rescue stations in long railway tunnels [Текст] / Y.Z Li, B. Lei, H. Ingason // Journal of Fire Protection Engineering. – 2012. – № 22(2). – Pp.101-131.

84. Fan, C. Effects of fire location on the capacity of smoke exhaust from natural ventilation shafts in urban tunnels [Текст] / C. Fan, J. Chen, Y. Zhou, X. Liu // Fire and materials. – 2018. – № 42. – Pp.974-984.

85. Tong, Y Full scale experimental study on smoke flow in natural ventilation road tunnel fires with shafts [Текст] / Y. Tong, M.H. Shi, Y.F. Gong, J.P.He // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2009. – № 24(6). – Pp. 627-633.

86. Ura, F Characteristics of smoke extraction by natural ventilation during a fire in a shallow urban road tunnel with roof openings [Текст] / F. Ura, N. Kawabata, F. Tanaka // Fire Safety Journal. – 2014. – № 67. – Pp. 96-106.

87. Ji, J. A study of the effect of plugholing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road tunnel fires [Текст] / J. Ji, Z.H. Gao, C.G. Fan, W. Zhong, J.H. Sun // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – № 55(21–22). – Pp. 6032-6041.

88. Baek, D Experimental study on the effect of heat release rate and aspect ratio of tunnel on the plug-holing phenomena in shallow underground tunnels [Текст] / D. Baek, K.H. Sung, H.S. Ryou // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – № 113. – Pp. 1135-1141.

89. Yao, Y. Effects of shaft inclination angle on the capacity of smoke exhaust under tunnel fire [Текст] / Y. Yao, S. Zhang, L. Shi, X. Cheng // Indoor and Built Environment. – 2017. – Pp. 77-87.

90. Fan, C.G. Experimental study of air entrainment mode with natural ventilation using shafts in road tunnel fires [Текст] / C.G. Fan, J. Ji, Z.H. Gao, J.Y. Han, J.H. Sun // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – 56(1–2). – Pp. 750-757.

91. Xie, B. Numerical study of natural ventilation in urban shallow tunnels: impact of shaft cross section [Текст] / B. Xie, Y. Han, H. Huang // Sustainable Cities and Society. – 2018. – № 42. – Pp. 521-537.

92. Fan, C. Smoke spread characteristics inside a tunnel with natural ventilation under a strong environmental wind [Текст] / C. Fan, L. Zhang, S. Jiao, Z. Yang, M. Li, X. Liu // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – № 82. – Pp. 99-110.

93. Takeuchi, S. Modeling for predicting the temperature distribution of smoke during a fire in an underground road tunnel with vertical shafts [Текст] / S. Takeuchi, T. Aoki, F. Tanaka, K.A.M. Moinuddin // Fire Safety Journal. – 2017. – № 91. – Pp. 312-319.

94. Riess, I. Smoke extraction in tunnels with considerable slope [Текст] / I. Riess, M. Bettelini, R. Brandt // 4th International Conference Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid. – 2001. – Pp. 503-512.

95. McCaffrey, B.J. Buoyancy driven Countercurrent flows generated by fire source [Текст] / B.J. McCaffrey, J.G. Quintiere // Heat Transfer and Turbulent

Buoyant Convection In: Spalding, D.B., Afgan, N. (Eds.). Hemisphere Publishing Co., Washington, USA. – 1977. – Pp. 457–472.

96. Quintiere, J.G. Scaling Applications in Fire Research [Текст] / J.G. Quintiere // Fire Safety Journal. – 1989. – №15. – Pp. 3–29.

97. Yi, L. An experimental study on critical velocity in sloping tunnel with longitudinal ventilation under fire [Текст] / L. Yi, Q. Xu, Z. Xu, D. Wu // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2014. – № 43. – Pp. 198–203.

98. Wu, Y. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity [Текст] / Y. Wu, M.Z.A. Bakar // Fire Safety Journal. – 2000. – № 35 (4). – Pp. 363–390.

99. Atkinson, G.T. Smoke control in sloping tunnels [Текст] / G.T. Atkinson, Y. Wu // Fire Safety Journal. – 1996. – №27. – Pp. 335–341.

100. Launder, B.E. The Numerical Computation of Turbulent Flow [Текст] / B.E. Launder, D.B. Spalding // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – №3. – Pp. 269–289.

101. Hossain, M.S. A Turbulence Model for Buoyant Flows and Its Application for Vertical Buoyant Jets [Текст] / M.S. Hossain, W. Rodi // Turbulent Buoyant Jets and Plumes (Rodi W. ed.), HMT Series: Oxford, England. – 1982. – V.6. – Pp. 121–172.

102. Bressloff, N.W. Assessment of a Total Absorptivity Solution to the Radiative Transfer Equation as Applied in the Discrete Transfer Radiation Model [Текст] / N.W. Bressloff, J.B. Moss, P.A. Rubini // Numerical Heat Transfer, Part B. – 1996. – V.29. – Pp. 381–397.

103. Truelove, J.S. HTSF DR33 [Текст] / J.S. Truelove. – AERE, Harwell, Oxon, England, – 1975.

104. Ingason, H. Prediction of optical density using CFD [Текст] / H. Ingason, B. Persson // Fire Safety Science: Proceedings of the Sixth International Symposium. – 2000. – Pp. 817–828.

105. Карпов, А.В. Трехмерное моделирование структуры течения в припотолочном слое и ее влияние на время обнаружения пожара в помещении [Текст] / А.В. Карпов, В.В. Мольков, А.М. Рыжов // Проблемы горения и

тушения пожаров на рубеже веков: материалы XV научно-практической конференции – ВНИИПО, Москва. – 2001. – Ч.1. – С. 8-10.

106. Karpov, A.V. Fires in Tunnels: Three-Dimensional Numerical Simulation and Comparison with the Experiment [Текст] / A.V. Karpov, D.V. Makarov, V.V. Molkov, A.M. Ryzhov // The Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Tokyo, Japan. – 2000. – Pp. 565-576.

107. Волков, А.В. Математическое моделирование пожара в туннеле с системой продольного вентилирования [Текст] / А.В. Волков, А.В. Карпов, А.М. Рыжов // Крупные пожары: предупреждение и тушение: Материалы XVI научно-практической конференции – ВНИИПО, Москва, 2001. – Ч.1. – С. 7-9.

108. Рыжов А.М. Моделирование пожаров в помещениях с учетом горения в условиях естественной конвекции [Текст] / А.М. Рыжов // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т.27. – №3. – С. 40-47.

109. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности: монография [Текст] / С.В. Пузач – М.: Акад. ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

110. Литвинцев, К.Ю. Расчетно-аналитический программный комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации [Текст] / К.Ю. Литвинцев [и др.] // Пожарная безопасность. – 2016. – №4. – С. 51-59.

111. Welch, S. SOFIE, Simulations of Fires in Enclosures, User Guide [Текст] / S. Welch, P. Rubini. – Cranfield University. – 1996. – 340 p.

112. Блинов, В.И. Диффузионное горение жидкостей [Текст] / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 208 с.

113. Wang, Zh. Numerical investigation on the effect of tunnel width and slope on ceiling gas temperature in inclined tunnels [Электронный ресурс] / Zh. Wang [и др.] // International journal of thermal sciences. – 2020. – DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106272, дата обращения 5.06.2021.

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

115. СП 34.13330.2012 Свод правил. Автомобильные дороги. – М.: Стандартинформ, 2019. – Текст: непосредственный.

116. Барановский, А.С. Моделирование развития пожара в автодорожных тоннелях: анализ влияния продольного уклона [Текст] / И.А. Болодьян, А.С. Барановский, А.В. Карпов // Тезисы XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. – Москва, 2020. – Т.2. – С.22-23.

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

118. Барановский, А.С. Исследование распространения опасных факторов пожара в автодорожном тоннеле с помощью полевого метода математического моделирования [Текст] / А.С. Барановский // «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.

119. Rodi, W. The New Algebraic Relation for Calculation the Reynolds Stresses [Текст] / W. Rodi // ZAMM. – 1976. – V.56. – Pp.219-221.

Приложение А
(обязательное)

Профили температуры для различных размеров расчетных сеток

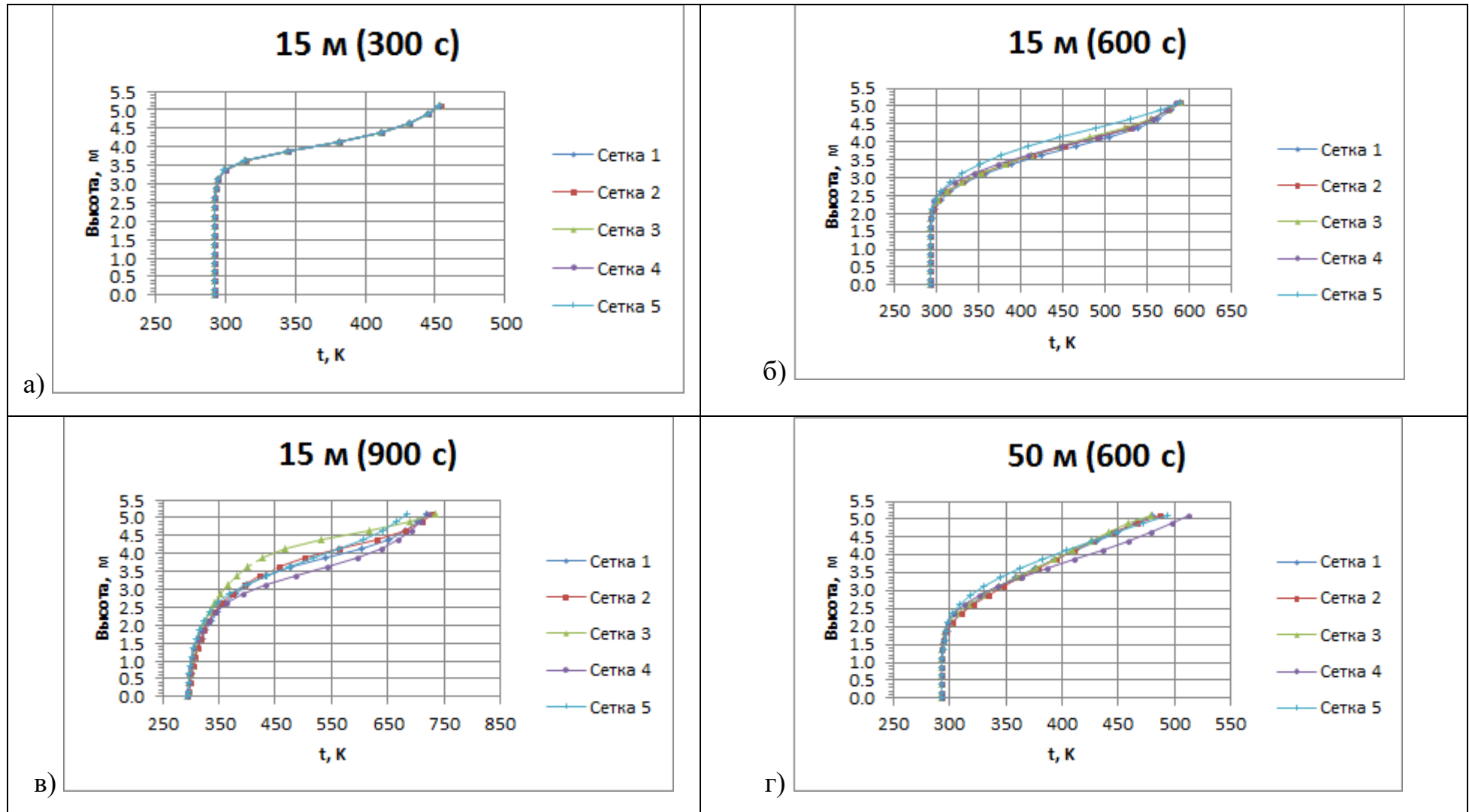


Рисунок 1А – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 15 м от очага пожара в моменты времени а) 300 с, б) 600 с, в) 900 с, г) 1200 с

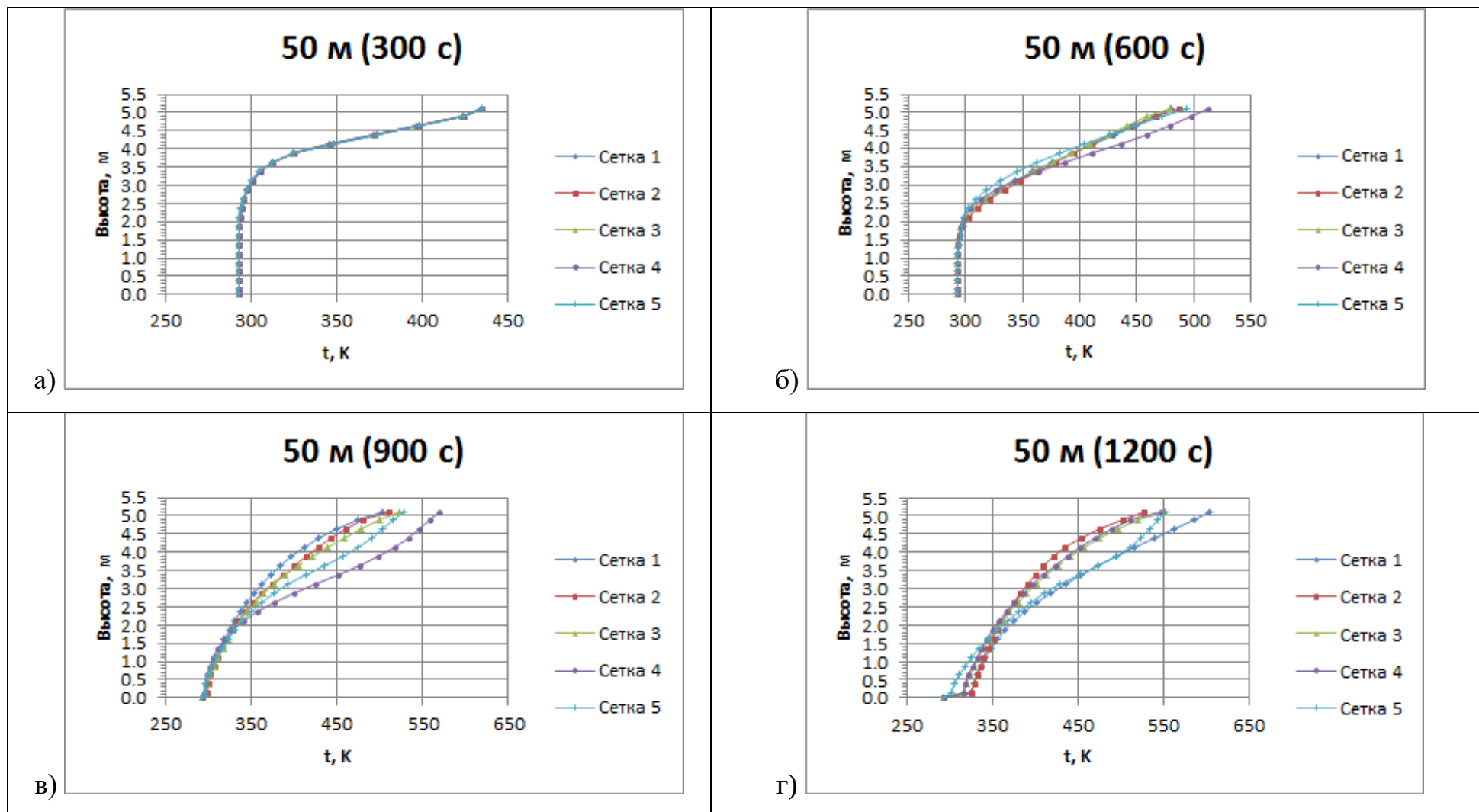


Рисунок 2А – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 50 м от очага пожара в моменты времени а) 300 с, б) 600 с, в) 900 с, г) 1200 с

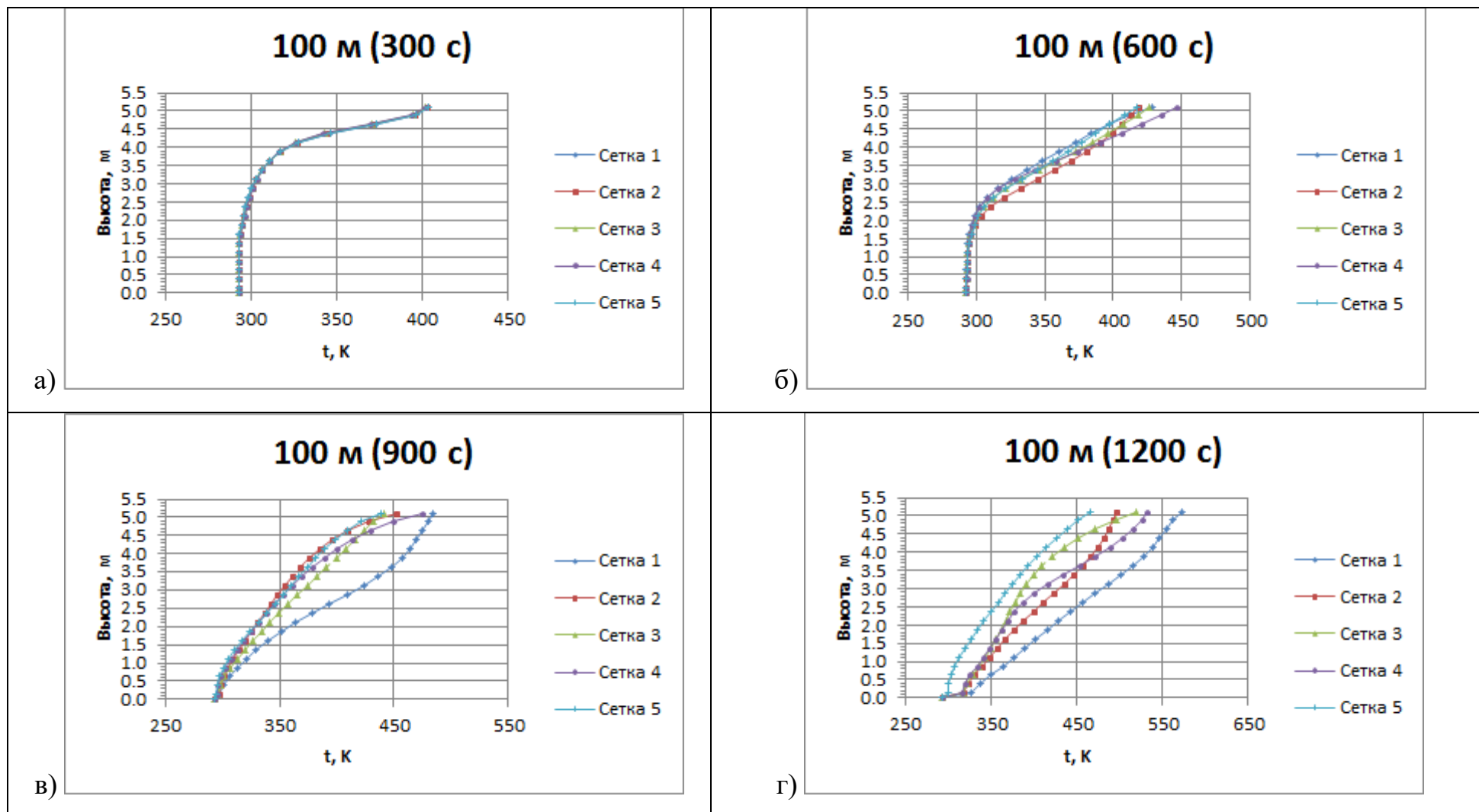


Рисунок 3А – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 100 м от очага пожара в моменты времени а) 300 с, б) 600 с, в) 900 с, г) 1200 с

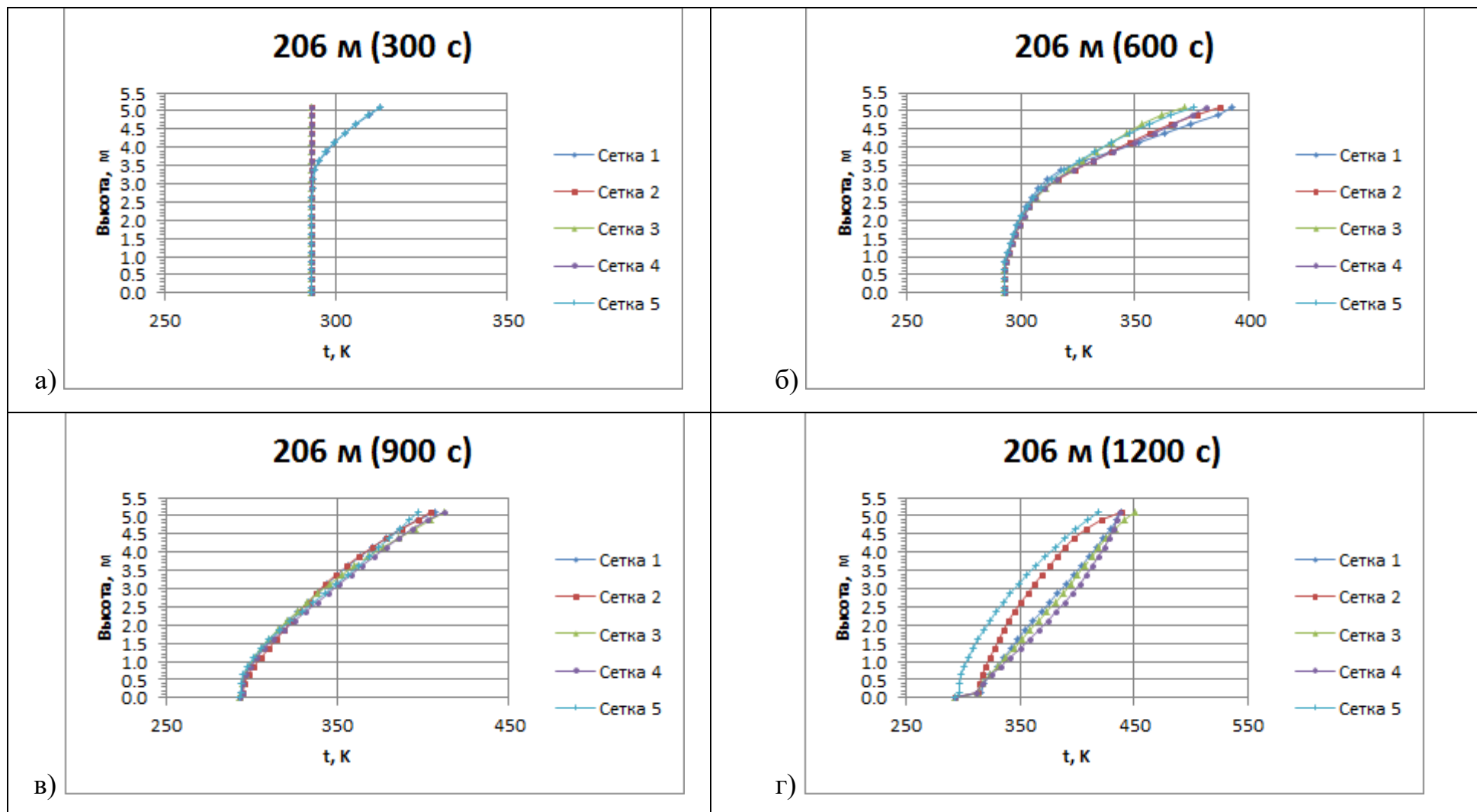


Рисунок 4А – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 206 м от очага пожара в моменты времени а) 300 с, б) 600 с, в) 900 с, г) 1200 с

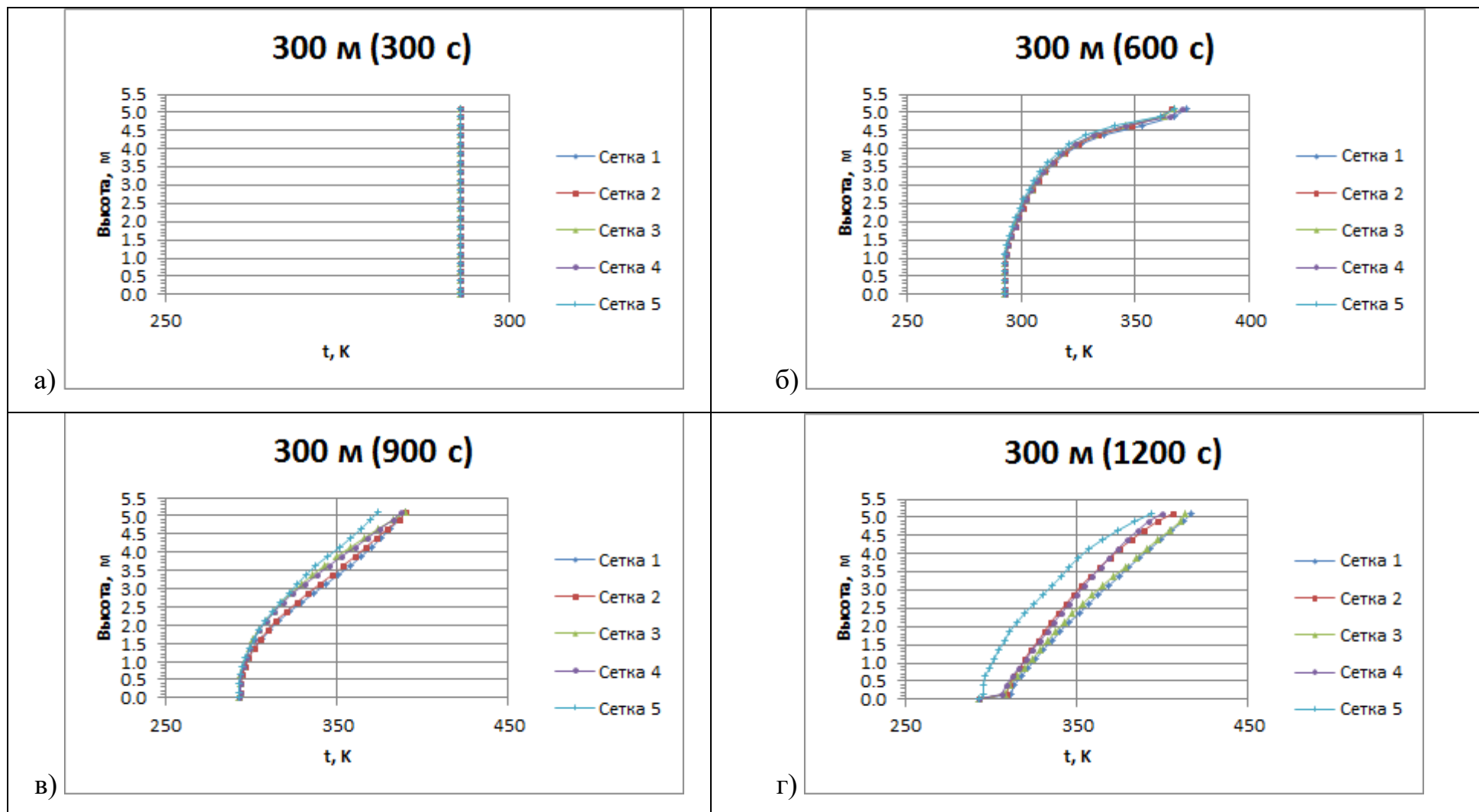


Рисунок 5А – Профиль температуры в центре поперечного сечения на расстоянии 300 м от очага пожара в моменты времени а) 300 с, б) 600 с, в) 900 с, г) 1200 с

Приложение Б
(обязательное)

Акты внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор

ОАО «Минскметропроект»

 М.В. Рудько

«16» 07 2021г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Барановского А.С. на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Моделирование развития пожара для оптимизации проектных и строительных решений автотранспортных тоннелей»

Комиссия в составе:

Протасов Георгий Николаевич (председатель комиссии),

Чеканов Валерий Владимирович (член комиссии),

Журик Александр Дмитриевич (член комиссии)

констатирует, что результаты диссертационной работы Барановского А.С. «Моделирование развития пожара для оптимизации проектных и строительных решений автотранспортных тоннелей» были использованы при разработке проектных решений в части обеспечения безопасности людей при пожаре для объекта: «Автодорожный тоннель №6 на участке обхода г. Сочи автодороги Джубга-Сочи».

Председатель комиссии



Протасов Г.Н.

Члены комиссии



Чеканов В.В.

Журик А.Д.

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ОАО «Минскметропроект»
М.В. Рудько
«16» 07 2021г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Барановского А.С. на
соискание ученой степени кандидата технических наук по теме
«Моделирование развития пожара для оптимизации проектных и
строительных решений автотранспортных тоннелей»

Комиссия в составе:

Протасов Георгий Николаевич (председатель комиссии),

Чеканов Валерий Владимирович (член комиссии),

Журик Александр Дмитриевич (член комиссии)

констатирует, что результаты диссертационной работы Барановского А.С.
«Моделирование развития пожара для оптимизации проектных и
строительных решений автотранспортных тоннелей» были использованы при
разработке проектных решений в части обеспечения безопасности людей при
пожаре для объекта: «Межтерминальный переход между СТК и ЮТК
аэропорта Шереметьево».

Председатель комиссии

Протасов Г.Н.

Члены комиссии

Чеканов В.В.

Журик А.Д.

Утверждаю:

Генеральный директор
АО «Мосметрострой»



С.А. Жуков

«20» сентября 2021г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Барановского А.С.
на соискание учетной степени кандидата технических наук
по теме «Моделирование развития пожара для оптимизации проектных и
строительных решений автотранспортных тоннелей»

Комиссия в составе:

Камышов Сергей Георгиевич (председатель комиссии),
Романов Анатолий Александрович (член комиссии),
Гаррас Артем Петрович (член комиссии)

констатирует, что результаты диссертационной работы Барановского А.С. «Моделирование развития пожара для оптимизации проектных и строительных решений автотранспортных тоннелей» были использованы при строительстве объекта: «Участок Краснопресненского проспекта от МКАД до проспекта Маршала Жукова» (Серебряноборские тоннели) в части разработки мероприятий по обеспечению пожарной безопасности и проектных решений обеспечивающих безопасную эвакуацию людей при пожаре, с обеспечением интервала времени от момента обнаружения пожара до завершения эвакуации людей в безопасные зоны.

Председатель комиссии

С.Г. Камышов

Члены комиссии

А.А. Романов

А.П. Гаррас