

*На правах рукописи*



**Новиков Николай Сергеевич**

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ  
АВТОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ И МЕТРОПОЛИТЕНА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной службы  
МЧС России на кафедре пожарной безопасности в строительстве

**Научный руководитель:** **Голованов Владимир Ильич**  
доктор технических наук

**Официальные оппоненты:** **Гаращенко Анатолий Никитович**  
доктор технических наук, доцент,  
АО «Центральный Научно-исследовательский  
институт специального машиностроения»,  
ведущий научный сотрудник

**Пронин Денис Геннадьевич**  
кандидат технических наук,  
ФГБУ «ЦНИИП МИНСТРОЯ России»,  
начальник управления технического  
регулирования

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования ВО «Санкт-Петербургский  
университет Государственной  
противопожарной службы Министерства  
Российской Федерации по делам гражданской  
обороны, чрезвычайным ситуациям и  
ликвидации последствий стихийных  
бедствий»

Защита состоится «29» мая 2019 г. в 14 часов 00 минут на заседании  
диссертационного совета Д 205.002.02 на базе Академии Государственной  
противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва,  
ул. Б. Галушкина, 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/016/016cae2f495ef939b9fa8c92779c5638.pdf>

Автореферат разослан «27» марта 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в Российской Федерации интенсивно ведется строительство различных тоннельных сооружений. Основным требуемым параметром для тоннелей является эксплуатационная надежность, которая включает в себе сохранение эксплуатационных характеристик тоннелей на протяжении всего времени использования. Статистика аварий в тоннелях показывает, что основной их причиной являются пожары, вследствие которых происходит обрушение тоннелей, приводящее к гибели людей и значительному материальному ущербу.

В отличие от железобетонных конструкций надземных зданий и сооружений, железобетонные блоки тоннельных обделок имеют повышенную влажность (более 3,5 %), что при возникновении пожара на ранних стадиях может привести к взрывообразному разрушению бетона и преждевременной потере их несущей способности. Кроме того, в тоннелях используются, как правило, высокопрочные (тяжелые) бетоны, что повышает вероятность взрывообразного разрушения при высокотемпературном воздействии. (высокопрочные классы бетонов)

Для защиты тяжелого бетона от взрывообразного разрушения разработаны такие методы, как установка противооткольной сетки, использование огнезащитных покрытий и облицовок. Одним из методов защиты бетона от взрывообразного разрушения в EN 1992-1-2 и ряде зарубежных публикаций является в бетон полипропиленовой фибры (ППФ) в количестве 1–2 кг/м<sup>3</sup>.

При анализе научных трудов выявлено, что объем экспериментальных исследований огнестойкости конструкций из таких бетонов явно недостаточен для создания надежных обделок тоннелей. Недостаточно используются расчетные методики для оценки огнестойкости железобетонных тубингов и переноса результатов испытаний конструкций при огневом воздействии на другие условия. Известно, что добавки различной фибры в бетон обеспечивают повышение прочностных показателей при нормальных температурах. Однако анализ показал, что исследованиям прочностных характеристик в условиях высокотемпературного нагрева, необходимых для проведения расчетных оценок огнестойкости, уделено недостаточное внимание. Также недостаточно исследовано влияние фибры на особенности разрушения бетона при нагреве и на теплофизические характеристики бетонов с добавкой различной фибры. Это свидетельствует об актуальности и важности проведения таких исследований.

**Степень разработанности.** В Российской Федерации первыми работами о фибробетоне стали труды Некрасова В.П., Волкова И.В., Курбатова Л.Г. и др.

Знания об огнестойкости строительных конструкций, в том числе о методах расчета, причинах и методах защиты от взрывообразного разрушения, сформировали: Яковлев А.И., Олимпиаев В.Г., Гвоздев А.А., Пчелинцев В.А.,

Федоренко В.С., Ройтман М.Я., Ройтман В.М., Руссо В.Н., Гельмиза В.И., Голованов В.И., Милованов А.Ф., Федоров В.С., Мешалкин Е.А., Кузнецова И.С., Меркин В.Е., Хохлов И.А., Габдулин Р.Ш. и др.

Исследования фибробетонов проводили многие зарубежные ученые: J.P. Romualdi, B. Gordon, G.V. Watson, M. Jeffrey, I.A. Mandel, I.L. Carson, W.F. Chen и др.

При анализе вышеперечисленных работ остаются пробелы в области экспериментального исследования процесса взрывообразного разрушения и огнестойкости железобетонных конструкций. Требуется доработка методики расчета огнестойкости конструкций транспортных тоннелей, а также определение прочностных и теплотехнических характеристик фибробетонов. На основании проведенного анализа сформулирована цель и задачи диссертационных исследований.

**Научная гипотеза.** Предполагается, что при добавке в бетонную смесь ППФ снижается вероятность взрывообразного разрушения железобетонных конструкций из тяжелого бетона. При воздействии температурного режима пожара и прогреве конструкции ППФ за счет низкой температуры плавления примерно 160 °С создаст микроканалы, которые позволят избежать образования избыточного давления в порах бетона.

**Целью работы** является повышение огнестойкости железобетонных конструкций подземных сооружений с использованием бетона с полипропиленовой фиброй, обеспечивающей защиту бетона от взрывообразного разрушения.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи исследования:

– провести анализ литературных источников имеющихся исследований огнестойкости железобетонных конструкций на основе фибробетона, а также прочностных и теплофизических характеристик бетонов с добавкой фибры;

– экспериментально определить прочностные характеристики бетона с полипропиленовой фиброй, применяемого для отделки подземных сооружений, при нагреве;

– определить теплофизические характеристики бетона с добавкой ППФ, используемого в железобетонной отделке (тубингах) подземных сооружений;

– экспериментально определить огнестойкость железобетонных тубингов, а также исследовать взрывообразное разрушение в процессе эксперимента;

– адаптировать и апробировать аналитическую модель расчета огнестойкости железобетонной отделки подземных сооружений.

**Объект исследования:** пожарная безопасность железобетонной отделки автодорожных тоннелей и метрополитена.

**Предмет исследования:** огнестойкость железобетонных тубингов на основе бетона с полипропиленовой фиброй.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые получен значительный объем результатов экспериментальных исследований огнестойкости натуральных железобетонных тубингов, изготовленных с использованием полипропиленовой фибры.

2. Установлено, что ППФ позволяет избежать взрывообразного разрушения за счет своей низкой температуры плавления и образования микроканалов, снижающих избыточное давление в порах бетона;

3. Получены прочностные характеристики бетонов с добавкой отечественной и импортной ППФ при воздействии температур в диапазоне 20–800 °С, а также установлены зависимости прочностных характеристик от температуры прогрева;

4. Получены зависимости теплофизических характеристик бетонов с добавкой отечественной и импортной ППФ;

5. Обоснована формула для определения температурного прогиба железобетонных тубингов с учетом их геометрической нелинейности;

6. С помощью моделирования по апробированной и адаптированной методике установлено влияние ППФ на пределы огнестойкости железобетонных обделки (тубингов), получено соответствие экспериментальных и расчетных результатов.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

– получены результаты экспериментальных исследований огнестойкости железобетонных тубингов, изготовленных с использованием полипропиленовой фибры;

– уточнена методика проведения испытаний конструкций за счет разработки системы опирания и нагружения для железобетонных при оценки фактических пределов огнестойкости;

– получены зависимости предела прочности на осевое сжатие от температуры, коэффициенты снижения предела прочности от температуры, а также теплофизические характеристики, что позволило оценить огнестойкость железобетонных тубингов с добавкой ППФ расчетными методами;

– адаптирована и апробирована аналитическая модель расчета предела огнестойкости железобетонных тубингов, позволяющая оценивать огнестойкость железобетонной обделки тоннеля расчетными методами.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач проводились теоретические и экспериментальные исследования.

Теоретические исследования основаны на теории огнестойкости, методах моделирования с применением программных комплексов *Microsoft Office Excel*, *KOKON*, *ANSYS*.

Основу экспериментальных исследований составляли крупномасштабные огневые и лабораторные эксперименты.

**Материалы диссертации реализованы при разработке:**

– предложений в проект свода правил «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» (СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций»);

– рекомендаций по защите железобетонных конструкций от взрывообразного разрушения тоннелей метрополитена, а именно для строительства новых перегонных тоннелей;

– раздела о новом виде защиты железобетонных конструкций в учебник и курс лекций по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре» в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

– методика и экспериментальные результаты пределов прочности на осевое сжатие, коэффициентов снижения предела прочности и коэффициентов теплопроводности, теплоемкости от температуры прогрева для бетона без добавки и с добавками отечественной и импортной ППФ;

– экспериментальные данные по исследованию огнестойкости железобетонных тубингов с применением разработанной системы опирания и нагружения;

– результаты математического моделирования прогрева железобетонных тубингов для определения температурных полей и решения задачи огнестойкости;

– адаптированная и апробированная модель оценки огнестойкости и результаты расчетов предела огнестойкости железобетонных тубингов без добавки и с добавкой ППФ при различных режимах пожара.

#### **Степень достоверности и апробация результатов обеспечивалась:**

– апробированными экспериментальными методами определения прочностных и теплофизических характеристик и оценки огнестойкости строительных конструкций;

– использованием в экспериментальных исследованиях поверенных измерительных приборов и аппаратуры, обеспечивающих достаточную точность измерения;

– использование валидированных и верифицированных программных комплексов.

– статистической обработкой полученных эмпирических величин с использованием регрессионного анализа.

#### **Основные результаты работы были доложены на:**

– V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016» (М., Академия ГПС МЧС России, 2016);

– XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (М., Национальный

исследовательский Московский государственный строительный университет, 2016);

– X Международной научно-практической конференции молодых ученых, курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (Минск, Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, 2016);

– XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (М., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017);

– IV Международной научно-практической конференции «Ройтмановские чтения» (М., Академия ГПС МЧС России, 2017);

– I Международной научно-практической конференции и Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов и молодых ученых (Краснодар, Кубанский государственный технологический университет, 2017);

– VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017» (М., Академия ГПС МЧС России, 2017);

– XXII Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием, посвященная году экологии «Безопасность – 2017» (Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017);

– XXIV Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России «Горение и проблемы тушения пожаров» (М., ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2017);

– VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (Кокшетау, Кокшетауский технический институт, 2017);

– XVII Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Саранск, ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2017).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 2 – в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 – в международные реферативные базы данных и цитирования.

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материалы изложены на 167 страницах машинописного текста, включающего 13 таблиц, 99 рисунков и списка литературы из 156 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, показана научная новизна работы, ее практическая и теоретическая значимость, представлены методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробация результатов.

**В первой главе** приведен анализ состояния вопроса по тематике работы, рассмотрены основные результаты экспериментальных исследований огнестойкости конструкций из железобетона и основных факторов, влияющих на взрывообразное разрушение (далее – ВР) бетонов, механических и теплофизических свойств бетонов и фибробетонов. Рассмотрены расчетные методики оценки огнестойкости конструкций, для реализации которых требуется информация по их физико-механическим и теплофизическим свойствам.

Выполнен анализ работ по ВР бетонов и способы защиты от этого явления, рассмотрены крупномасштабные огневые испытания железобетонных конструкций (Яковлев А.И., Ройтман В.М., Мешалкин Е.А., Голованов В.И., Жого Paulo C. Rodrigues, Luns Lam, Antunio Moura и др.) из различных фибробетонов, где выявлено увеличение несущей способности и предела огнестойкости, а в случае испытаний железобетонных конструкций с добавкой ППР выявлена ее эффективность по защите от ВР.

В научных работах (В.П. Некрасов, И.В. Волков, Л.Г Курбатов и т.д.) по исследованию физико-механических показателей фибробетонов при нормальных температурах выявлен факт увеличения как прочности на осевое сжатие, так и прочности на растяжение по сравнению с бетоном без добавки фибры. Хотя остается неисследованным вопрос изменения прочности на осевое сжатие фибробетонов при прогреве, в том числе и бетона с добавкой ППФ. Исследования изменения механических свойств на осевое сжатие и теплофизических свойств фибробетона при прогреве, в том числе с добавкой ППФ, выполнены в недостаточном количестве и требуется дальнейшее изучение данного вопроса.

При рассмотрении работ, связанных с расчетными методиками оценки огнестойкости железобетонных конструкций, выявлено, что расчетная методика для оценки огнестойкости железобетонной обделки тоннелей в настоящее время требует доработки. Показано, что для этого необходимо совершенствование имеющихся методик (статическая задача) и привлечение программных комплексов для решения теплотехнической задачи.

Исходя из изложенных предпосылок, были определены цель и основные направления исследования в работе и сформулированы основные задачи.

**Во второй главе** представлены результаты исследования прочности на осевое сжатие в зависимости от температуры в диапазоне 20–800 °С бетонов

без добавки и с добавкой отечественной (ProZASK IGS 12 мм) и импортной (ProZASK IGS 6 мм) ППФ.

Исследования проводились по стандартным методикам с учетом действующих норм и на поверенном оборудовании в аккредитованной лаборатории.

Для проведения эксперимента прочности на осевое сжатие бетона с добавкой и без добавки полипропиленовой фибры на заводе ОАО «Моспромжелезобетон» были изготовлены бетонные кубы размером 100×100×100 мм. Образцы изготавливались из бетона, состоящего из вяжущего ПЦ I-500-Н, мелкого заполнителя – кварцевого песка, крупного заполнителя – гранитного щебня фракции 5–15 мм и пластификатора – Glenium 51.

После проведения исследования экспериментальные данные подверглись статистической обработке, а именно регрессионному анализу с помощью программного обеспечения *Microsoft Office Excel*. При этом в анализе экспериментальных данных не учитывалось повышение прочности бетона.

По проведенному регрессионному анализу получены зависимости предела прочности на осевое сжатие от температуры:

- для бетона без добавки фибры:

$$R_b = -0,00013t^2 + 0,0478t + 56,742, (R^2 = 0.78); \quad (1)$$

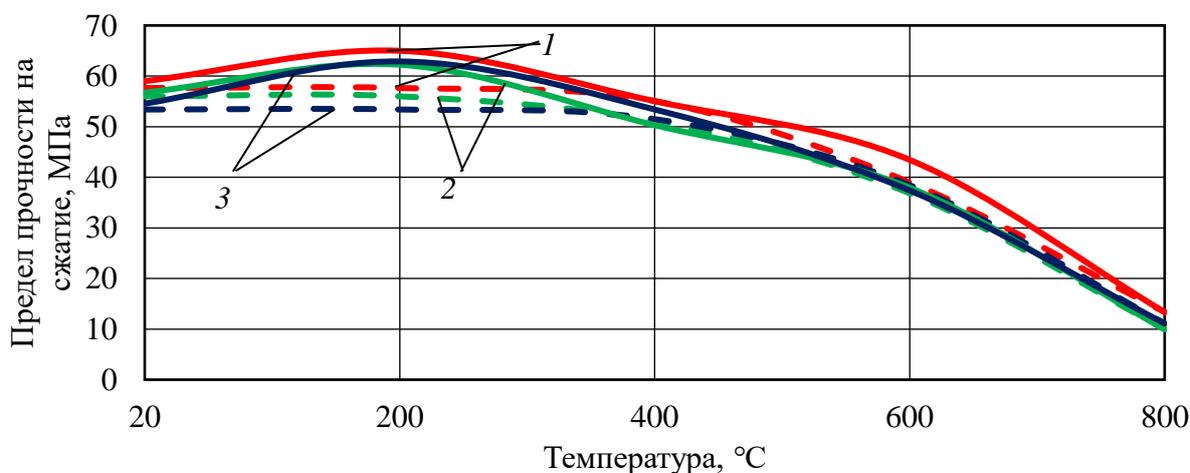
- для бетона с добавкой ProZASK IGS 12 мм:

$$R_b = -0,00011t^2 + 0,0352t + 55,336, (R^2 = 0.97); \quad (2)$$

- для бетона с добавкой ProZASK IGS 6 мм:

$$R_b = -0,00012t^2 + 0,0486t + 52,470, (R^2 = 0.89). \quad (3)$$

По результатам исследований строились зависимости предела прочности бетона ( $R_{bн,tem}$ ) с добавкой и без добавки ППФ в зависимости от температуры, которые представлены на рисунке 1.



— экспериментальные кривые; - - - расчетные кривые

Рисунок 1 – Температурные зависимости кубиковой прочности на сжатие бетона без добавки и с добавкой ППФ: 1 – бетон без добавки фибры; 2 – бетон с добавкой ProZASK IGS 12 мм; 3 – бетон с добавкой ProZASK IGS 6 мм

Исходя из полученных зависимостей прочности на осевое сжатие  $R_{bn,tem}$ , определены коэффициенты условий работы бетона  $\gamma_{b,tem}$  в зависимости от температуры, которые рекомендованы для оценки огнестойкости расчетными методами (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты условий работы бетона исследуемых составов в зависимости от температуры

Вид бетона	Значение коэффициента $\gamma_{b,tem}$ при температуре, °С								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
С добавкой ProZASK IGS 12 мм	1	1	1	0,98	0,91	0,81	0,66	0,47	0,18
С добавкой ProZASK IGS 6 мм	1	1	1	0,99	0,96	0,82	0,72	0,5	0,21

Результаты проведенных экспериментов приводят к выводу о том, что ППФ снижает прочность бетона на сжатие примерно на 16 %, что можно объяснить тем, что при добавке ППФ изменяется структура бетона (повышается его пористость), изменяется плотность и, в свою очередь, уменьшается прочность. Для повышения прочности бетона, в качестве рекомендации, необходимо комбинировать ППФ с другими видами фибр, которые в одном случае будут защищать бетон от ВР, в другом – повышать его прочность на сжатие и растяжение.

При сравнении прочностных свойств бетона с добавками из двух видов фибры можно сделать вывод, что на участке 20–300 °С прочность на осевое сжатие ProZASK IGS 12 мм выше ProZASK IGS 6 мм на 12 %. На участке 300–800 °С ProZASK IGS 12 мм уступает ProZASK IGS 6 мм примерно на 14 %. Объясняется это явление разностью длин фибр, то есть при прогреве пористость бетона с отечественной ППФ (длина 12 мм) выше, чем у бетона с импортной ППФ (длина 6 мм). Добавка в бетон отечественной ППФ с меньшей длиной волокон, позволит заменить использование импортной, более дорогой, ППФ. Выявлена особенность разрушения образцов бетонов без добавки и с добавкой ППФ. В диапазоне температур 20–200 °С для бетона без добавки ППФ характерно разрушение образцов с хлопком, откалыванием кусков цементного камня и крупного заполнителя, разлетом этих частей на расстояния 2–3 м. Разрушение бетонных образцов с добавкой ППФ было пластичным, и образец практически не изменил свою форму (рисунок 2).



Рисунок 2 – Образец из бетона с добавкой ППФ после проведения эксперимента

Известно, что для расчетов огнестойкости железобетонных конструкций используется призматическая (нормативная) прочность. После перерасчета, по эмпирической формуле были получены значения нормативной прочности, которые незначительно отличаются от нормативного показателя 32 МПа, поэтому в расчетах использовался показатель бетона класса В45.

**В третьей главе** представлено описание методов исследования, обоснование выбранного метода и результаты исследований теплофизических характеристик для бетона с добавкой отечественной и импортной ППФ.

Для исследования теплофизических характеристик использовались как экспериментальные методы (метод проведения испытаний по исследованию теплофизических характеристик, метод определения влажности бетона), так и программные комплексы *KOKON* и *ANSYS*, основанные на методе конечных элементов. Теплофизические характеристики определяются путем решения обратной задачи нестационарной теплопроводности, цель которой заключается в подборе коэффициента теплопроводности и теплоемкости до максимального совпадения расчетных и экспериментальных зависимостей прогрева.

Эксперимент проводился на оборудовании ВНИИПО МЧС России на огневой печи для определения теплофизических характеристик. Испытуемые образцы для проведения эксперимента изготавливались на заводе ОАО «Моспромжелезобетон» в виде плит размерами 1,1×1,1×0,15 м (рисунок 3), с установленными в них рамками держателей с термопреобразователями для регистрации температур (рисунок 4). Состав бетона и характеристики фибры брались как при исследовании прочности на осевое сжатие.



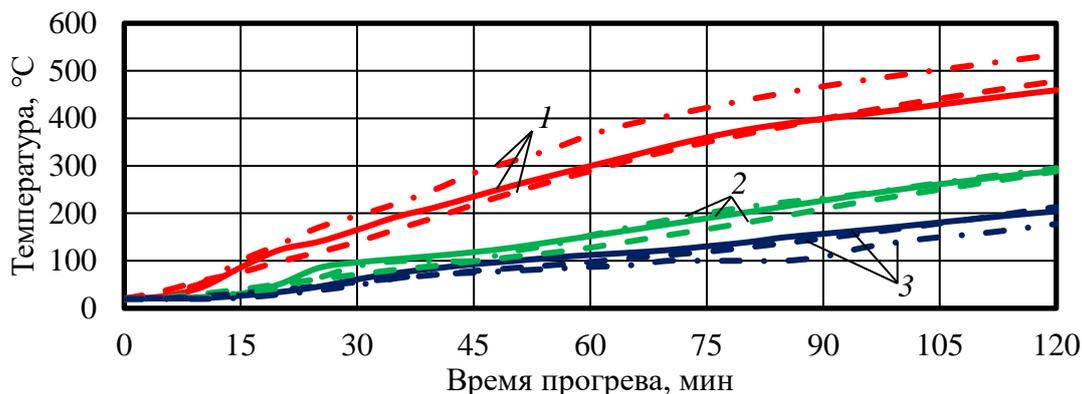
Рисунок 3 – Общий вид плит для исследования теплофизических характеристик



Рисунок 4 – Держатель с установленными термопреобразователями

В процессе исследования также была проведена проверка достоверности расчетов в предложенных комплексах и даны рекомендации по дальнейшему использованию одного из программных комплексов расчета теплотехнической задачи. По проведенным расчетам были построены зависимости температуры

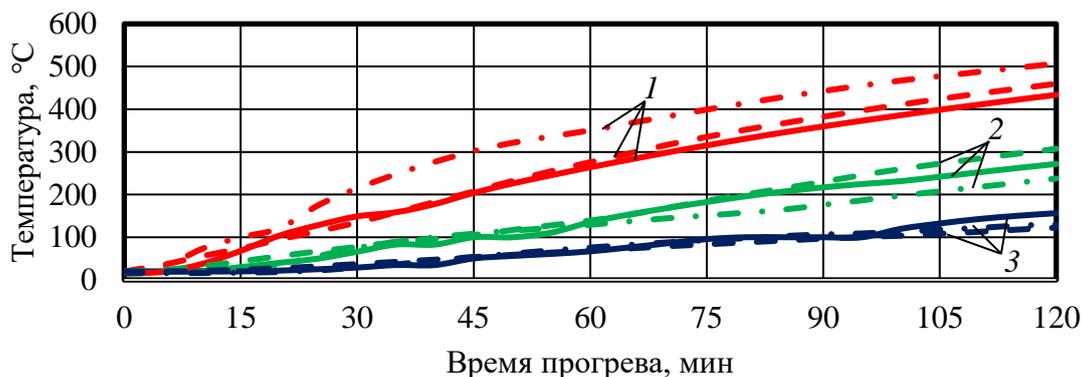
от времени. Расчетные и экспериментальные кривые представлены на рисунках 5–7.



— экспериментальная; - - - - расчетная ANSYS; - · - · - расчетная KOKON

Рисунок 5 – Экспериментальные и расчетные кривые для плиты без добавки ППФ:

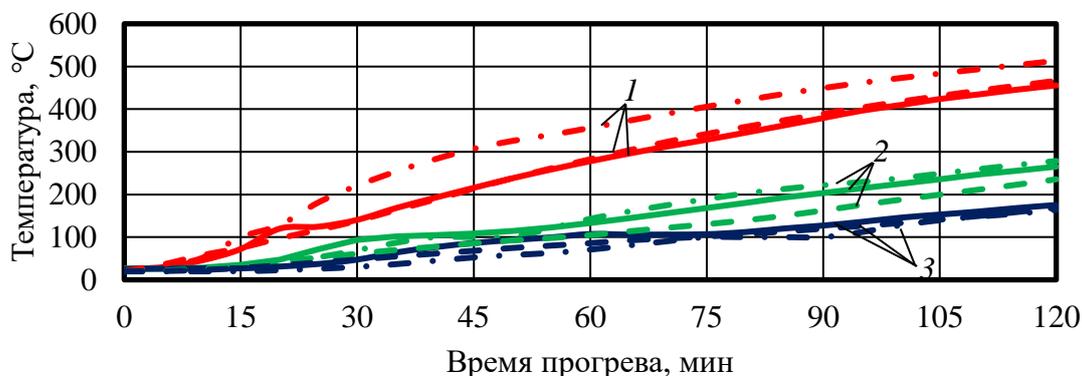
1 – измерение температуры прогрева в точке ТП1; 2 – измерение температуры в точке ТП2;  
3 – измерение температуры в точке ТП3



— экспериментальная; - - - - расчетная ANSYS; - · - · - расчетная KOKON

Рисунок 6 – Расчетные и экспериментальные кривые прогрева бетонных плит с добавкой ProZASK IGS 6 мм: 1 – измерение температуры прогрева в точке ТП1;

2 – измерение температуры в точке ТП2; 3 – измерение температуры в точке ТП3



— экспериментальная; - - - - расчетная ANSYS; - · - · - расчетная KOKON

Рисунок 7 – Расчетные и экспериментальные кривые прогрева бетонных плит с добавкой ProZASK IGS 12 мм: 1 – измерение температуры прогрева в точке ТП1;

2 – измерение температуры в точке ТП2; 3 – измерение температуры в точке ТП3

В результате расчета и сравнения кривых прогрева бетонов без добавки и с добавкой ППФ получены зависимости коэффициента теплопроводности и теплоёмкости в зависимости от температуры прогрева, которые имеют вид:

– для бетонной плиты без добавки ППФ:

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0005 t ; c_t = 481 + 0,9t ; \quad (4)$$

– для бетонной плиты с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм:

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0006 t ; c_t = 481 + 0,92t . \quad (5)$$

При сравнении полученных расчетных кривых с экспериментальными расхождение между двумя расчетными комплексами составило: *KOKON* – 18 %; *ANSYS* – 12 %, поэтому для расчетов теплотехнической задачи использовался программный комплекс *ANSYS*.

Также стоит отметить, что коэффициент теплопроводности для бетона с добавкой ППФ ниже, чем для бетона без добавки ППФ, следовательно, бетон с добавкой фибры будет прогреваться медленней.

**В четвертой главе** представлена методика, результаты исследований и оборудование для проведения крупномасштабных огневых испытаний железобетонных тубингов с добавкой ProZASK IGS 6 мм. В работе теплотехническая задача решалась, с использованием моделирования прогрева железобетонных тубингов без добавки ППФ и с добавкой ППФ ProZASK IGS 6 мм и ProZASK IGS 12 мм в программном комплексе *ANSYS*, где рассчитывались температурные поля при стандартном и углеводородном режимах пожара. Прочностная задача решалась с использованием полученных в результате исследований прочностных и теплофизических свойств исследованного фибробетона при температурных режимах стандартного и углеводородного пожаров.

Таким образом, для исследования огнестойкости железобетонных тубингов использовались как экспериментальные методы (метод проведения крупномасштабных огневых испытаний), так и расчетные методы (решение теплотехнической задачи методом конечных элементов, решение прочностной задачи методом предельных состояний). Экспериментальная часть исследования огнестойкости железобетонных тубингов с добавкой импортной ППФ проводилось на крупномасштабной огневой печи.

Для достижения цели дорабатывалась существующая методика огневых испытаний и впервые разработана система нагружения и опирания железобетонных тубингов для создания эксплуатационных нагрузок. Это позволило приблизить к реальным условиям схему воздействия и передачи усилий на конструкции в процессе испытаний. Общий вид крупномасштабной огневой печи с системой нагружения и опирания представлены на рисунке 8.

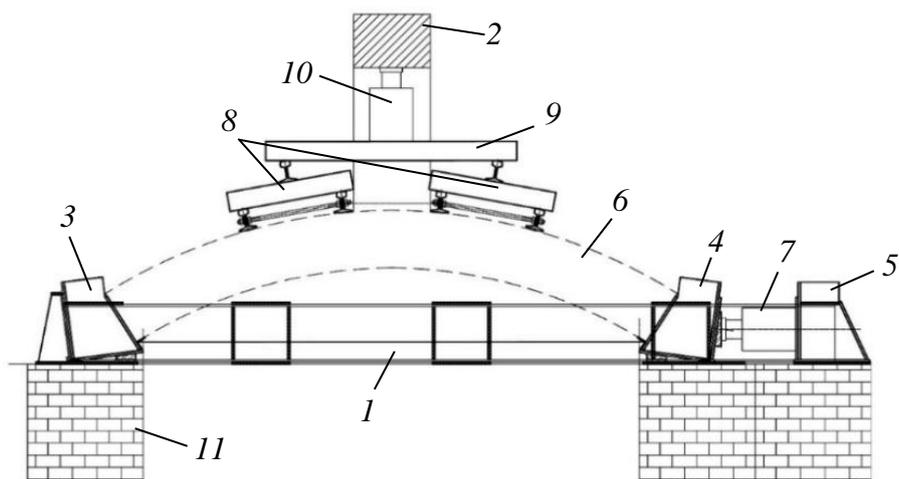


Рисунок 8 – Схема системы нагружения и опирания тюбингов:  
 1 – горизонтальная рама; 2 – вертикальная рама; 3 – неподвижная опора;  
 4 – подвижная опора; 5 – опора гидравлического домкрата; 6 – испытуемый образец;  
 7 – гидравлический домкрат для горизонтальной нагрузки;  
 8 – рамы для создания вертикальной нагрузки; 9 – упор домкрата;  
 10 – гидравлический домкрат для вертикальной нагрузки; 11 – огневая печь

Объектом исследований являлись натурные железобетонные тюбинги размером 300x1400x3000 мм, изготовленные из высокопрочного бетона класса В45 с добавкой ППФ ProZASK IGS 6 мм. Перед началом испытаний по ГОСТ 30247.0–94 определялся максимальный прогиб по представленной в данной методике формуле, который для железобетонного тюбинга равен 99,5 мм. Нагружались образцы за 30 минут до начала огневого воздействия вертикальной и горизонтальной нагрузками 490,5 и 294,3 кН соответственно. Результаты исследования огнестойкости железобетонных тюбингов с добавкой ProZASK IGS 6 мм представлены на рисунках 9–10.

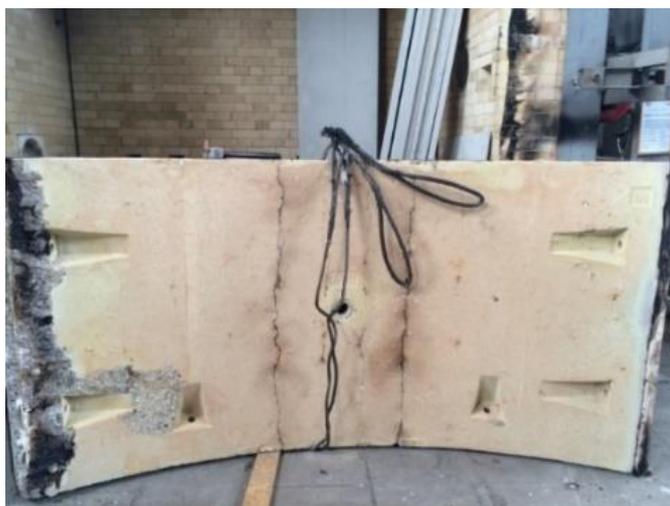


Рисунок 9 – Обогреваемая сторона железобетонного тюбинга после испытаний.

На обогреваемой поверхности (рисунок 9) обнаружены незначительные отколы защитного слоя бетона, образовавшиеся в результате демонтажа образца с опор установки. Это свидетельствует о том, что взрывообразного разрушения бетона не происходило.

Средняя температура на необогреваемой поверхности по пяти термопарам в интервале 0–120 мин. составила 25,1 °С, что значительно меньше допустимой температуры 160 °С.

Исследование показало, что прогиб конструкции в ходе эксперимента составил не более 10 мм, это меньше максимально допустимого прогиба (рисунок 10). Поэтому можно сделать вывод, что предельного состояния по потере несущей и теплоизолирующей способности не достигнуто. Нормативный предел огнестойкости тубингов составил REI 120.

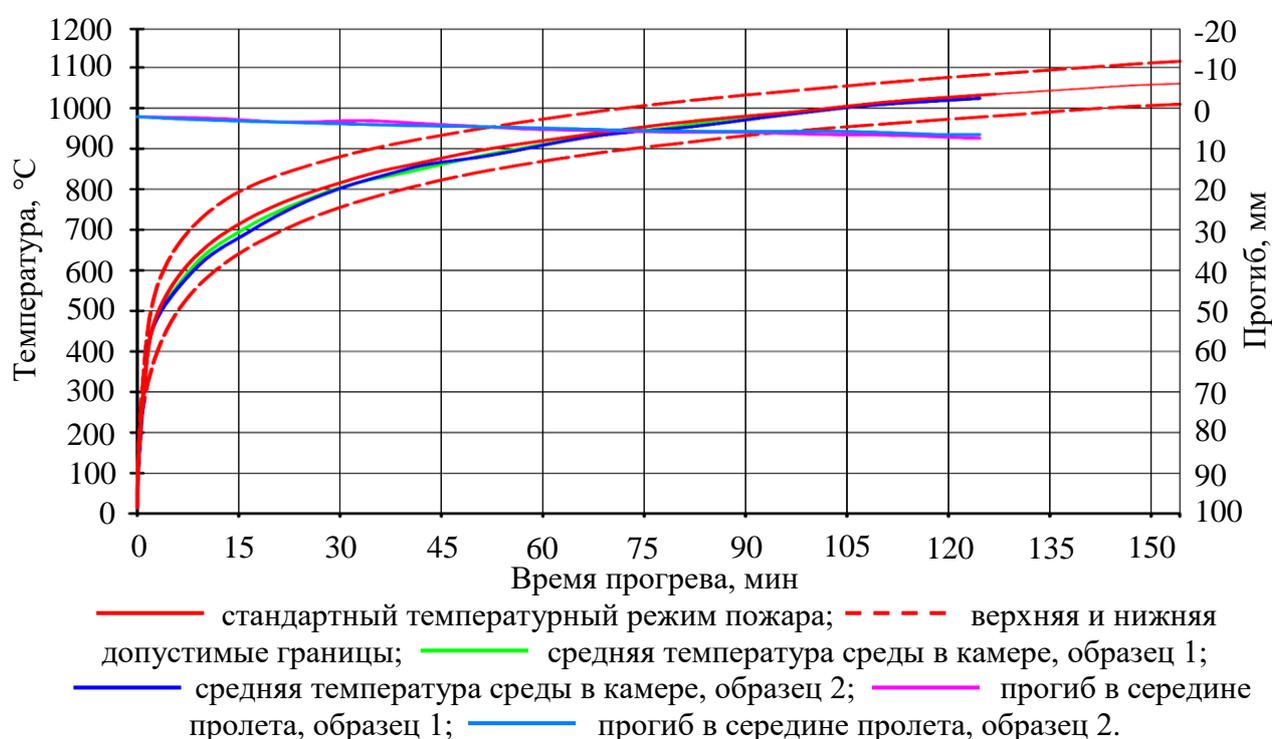


Рисунок 10 - Результаты испытаний на огнестойкость железобетонного тубинга с добавкой ProZASK IGS 6 мм

Перед расчетом теплотехнической части в программном комплексе необходимо было определить расчетное сечение, в котором образовывается максимальный момент. Поэтому для определения максимально нагруженного сечения моделировался тубинг в программном комплексе *Z\_Soil*.

По результатам численного эксперимента выявлено (рисунок 11), что присутствуют изгибающий момент и сжимающая продольная сила, из чего следует, что данный элемент является сжато-изгибаемым.

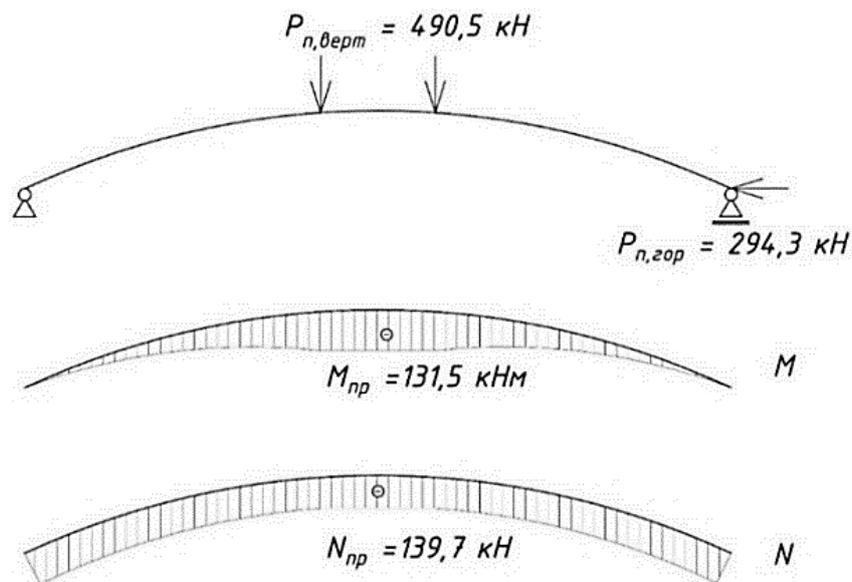


Рисунок 11 – Расчетная схема, эпюра изгибающего момента и сжимающей силы железобетонных тубингов

Далее с помощью программного комплекса ANSYS решалась теплотехническая задача с целью распределения температурных полей и определения параметров, необходимых для решения прочностной задачи. В программе моделировался железобетонный тубинг без добавки ППФ и с добавкой ППФ ProZASK IGS 6 мм и ProZASK IGS 12 мм, задавались свойства бетона и арматуры, граничные условия 3-го рода, модель разбивалась на конечные элементы и рассчитывалась при стандартном и углеводородном режимах пожара на интервале времени 0–120 минут. В результате проведенных расчётов получены температурные поля, представленные на рисунке 12.

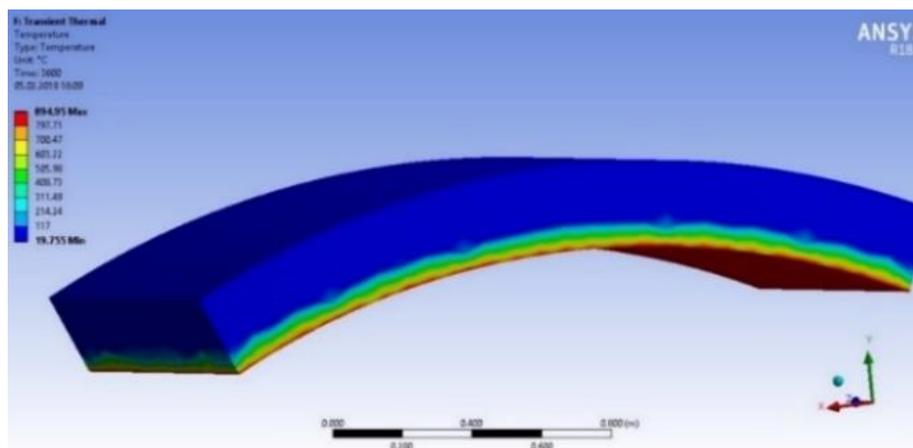


Рисунок 12 – Рассчитанные температурные поля для железобетонного тубинга

После проведения в ANSYS моделирования прогрева железобетонного тубинга с добавкой ProZASK IGS 6 мм по стандартному пожару сравнивались расчётная и экспериментальная зависимости для определения погрешности расчета (рисунок 13).

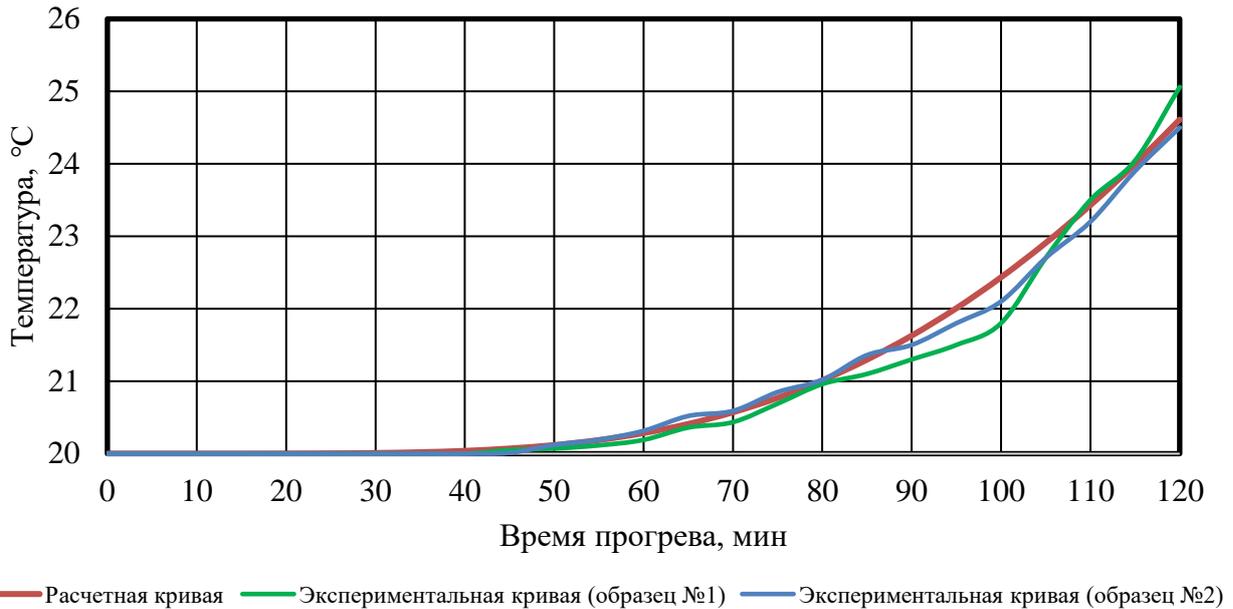


Рисунок 13 – Экспериментальная и расчетная кривая прогрева необогреваемой поверхности конструкции

В результате моделирования прогрева получена незначительная погрешность, которая составила не более 10 %. Исходя из этого, программный комплекс ANSYS использовался для моделирования и расчета теплотехнической задачи для железобетонных тубингов без добавки и с добавкой отечественной и импортной ППФ. Для определения изменения сопротивления арматуры растяжению  $R_{sn,tem}$  и сжатию  $R_{sc,tem}$  при нагреве используем коэффициент условий работы  $\gamma_{s,tem}$ :

$$R_{sn,tem} = R_{sn} \gamma_{s,tem} \tag{6}$$

$$R_{sc,tem} = R_{sc} \gamma_{s,tem} \tag{7}$$

где  $R_{sn}$ ,  $R_{sc}$  – нормативные характеристики арматуры при растяжении и сжатии, МПа.

В качестве продольной (несущей) арматуры в опытных образцах тубингов использована арматура класса В500С. При обработке численного эксперимента, определен показатель  $R_{sn,tem}$  для стандартного и углеводородного режимов пожара (рисунки 14–15). Показатель  $R_{sc,tem}$  принимался равным  $R_{sc}$  так как сжатая зона прогревалась незначительно и этот показатель не изменялся.

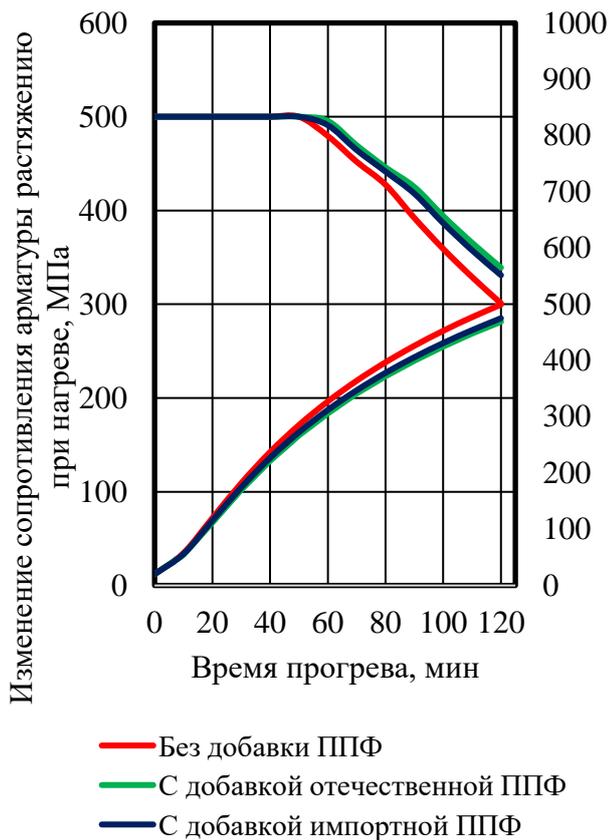


Рисунок 14 – Изменение сопротивления арматуры растяжению при нагреве по стандартному температурному режиму пожара

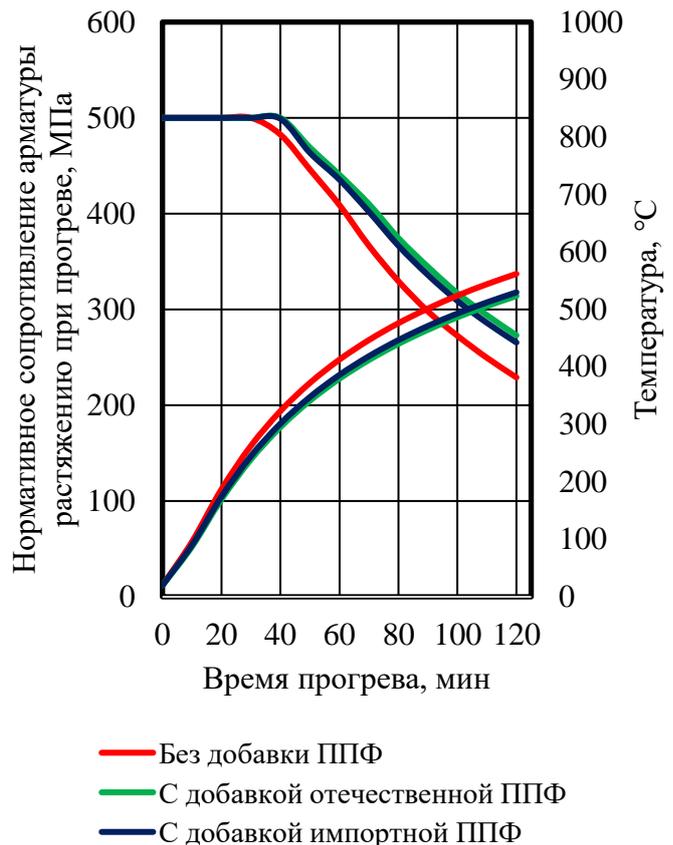


Рисунок 15 – Изменение нормативного сопротивления растяжению при нагреве по углеводородному температурному режиму пожара

По результатам расчетов строились совмещенные графики сопротивления арматуры растяжению при нагреве, где в нижней части графика представлена зависимость температуры от времени, в верхней части – зависимость изменения сопротивления арматуры при нагреве от времени. Данные графики рекомендовано использовать при расчете предела огнестойкости железобетонных тубингов без добавки ППФ и с добавкой ППФ ProZASK IGS 6 мм и ProZASK IGS 12 мм с толщиной защитного слоя арматуры 40 мм.

Исходя из полученных данных, решалась статическая или прочностная задача с целью определения пределов огнестойкости железобетонных тубингов. Далее расчет пределов огнестойкости адаптировался под характер работы железобетонной обделки и односторонний прогрев.

Элемент обделки является сжато-изгибаемым, тогда характер работы будет зависеть от продольной силы  $N$  и изгибающего момента  $M$ . Так как железобетонный тубинг является геометрически нелинейным элементом, то в процессе исследования получена формула дополнительного температурного прогиба от огневого воздействия для железобетонного тубинга:

$$e_t = \frac{3(\alpha_{st}t_s - \alpha_{bt}t_b)r^2 \sin^2 \varphi}{2h_0} \quad (8)$$

где  $r$  – длина от опоры тьюбинга до середины конструкции по нейтральной оси элемента, м;  $\varphi$  – угол, образованный между  $r$  и осью ОХ;  $\alpha_{st}$ ,  $\alpha_{bt}$  – коэффициент температурного расширения арматуры и бетона;  $t_s$ ,  $t_b$  – температура арматуры и бетона соответственно;  $h_0$  – высота рабочего сечения, м.

Результаты расчетного и экспериментального прогиба в ходе работы сравнивались, при этом расчетный прогиб определялся суммированием прогиба от нагрузки и температурным прогибом. В результате получена погрешность не превышающая 12 %.

В ходе расчета определялась схема для определения высоты сжатой зоны  $x_{tem}$  и несущей способности элемента  $M_{p,tem}$ , которая представлена на рисунке 16.

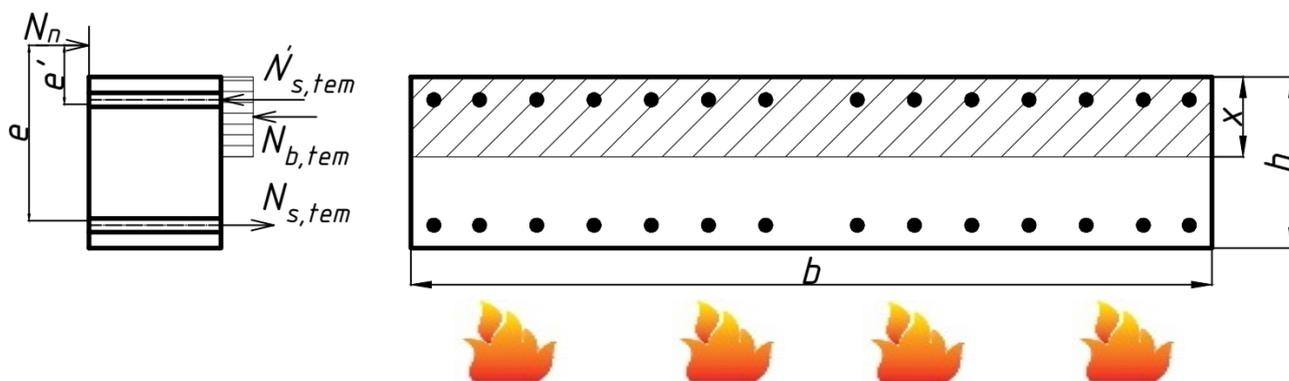


Рисунок 16 – Расчетная схема сечения железобетонного тьюбинга

Высота сжатой зоны бетона рассчитывается:

$$x_{tem} = \frac{N_n + R_{sn,tem}A_s - R'_{sc,tem}A'_s}{R_{bn,tem}b}, \quad (9)$$

где  $N_n$  – продольная сжимающая сила, Н;  $R_{sn,tem}$ ,  $R_{sc,tem}$  – расчетное сопротивление арматуры растяжению и сжатию в растянутой и сжатой зоне при нагреве, МПа;  $R_{bn,tem}$  – расчетное сопротивление бетона сжатию при нагреве, МПа;  $A_s$ ,  $A'_s$  – суммарная площадь сечения арматуры в растянутой и сжатой зоне, м<sup>2</sup>.

Несущая способность сечения:

$$M_{p,tem} = R_{bn,tem}bx_{tem}(h_0 - 0,5x_{tem}) + R'_{sc,tem}A'_s(h_0 - a'), \quad (10)$$

В результате получены пределы огнестойкости для всех образцов при стандартном и углеводородном режимах пожара и проиллюстрированы на рисунке 17.

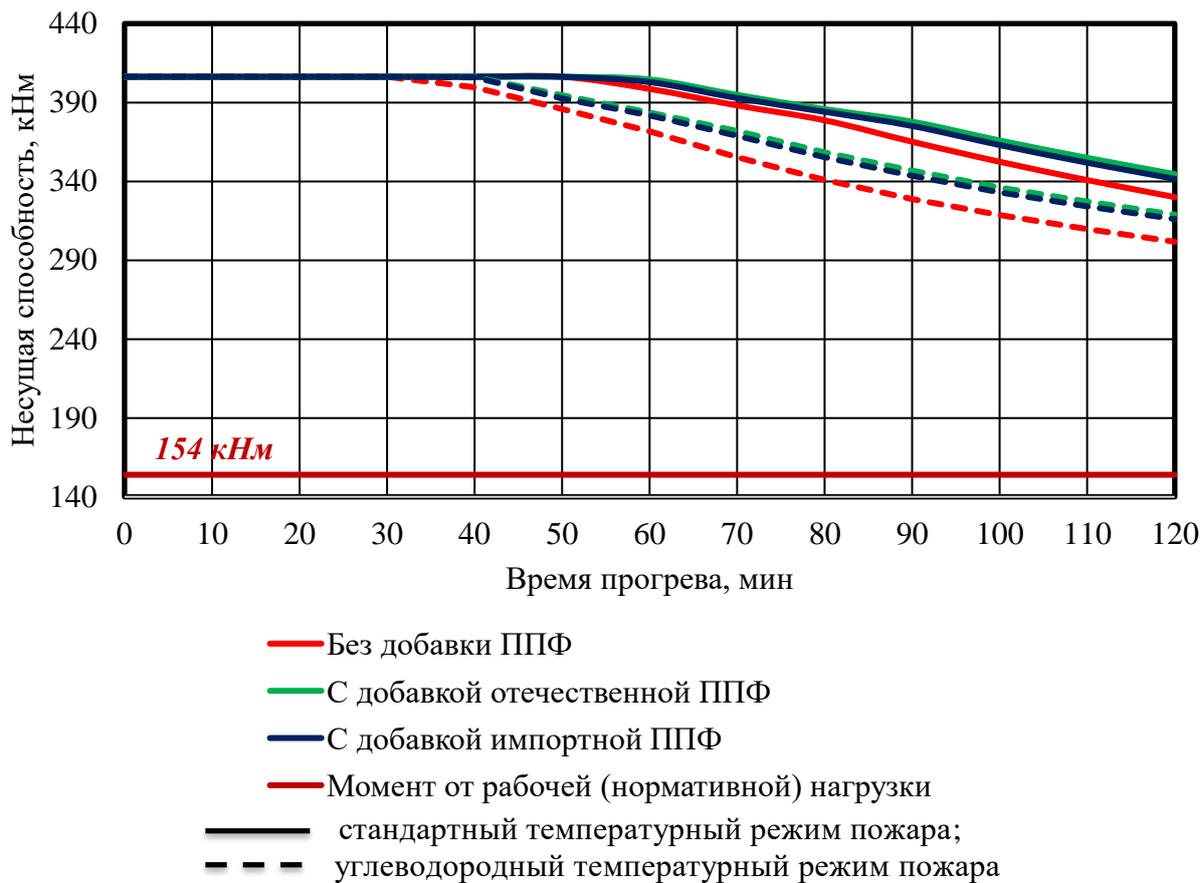


Рисунок 17 – Зависимость несущей способности конструкций от времени пожара по стандартному и углеводородному режиму пожара

Исходя из произведенных расчетов, несущая способность наиболее нагруженного сечения тубингов без добавки и с добавкой ППФ при воздействии стандартного и углеводородного режимом пожара при значении момента от рабочей (нормативной) нагрузки 154 кНм не утрачивается. Согласно ГОСТ 30247.0–94 конструкция соответствует пределу огнестойкости более REI 120.

При сравнении рассчитанных пределов огнестойкости, полученных при стандартном и углеводородном режимах пожара для железобетонных тубингов без добавки и с добавкой ППФ, выявлено, что значения несущей способности приблизительно одинаковы. Сравнивая же блоки с добавкой и без добавки ППФ, несущая способность для блока без добавки ППФ ниже. Связано это с низким коэффициентом теплопроводности для железобетонных тубингов с добавкой ППФ.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования. **В приложениях** представлены отчет об проведенных огневых испытаниях железобетонных тубингов с добавкой ППФ ProZASK IGS 6 мм и акты внедрения. При этом результаты работы реализованы:

- при разработке предложений в проект свода правил «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» (без акта внедрения);

– при разработке нормативно-технических документов по транспортному тоннелестроению, в том числе по обеспечению их огнестойкости (акт внедрения общероссийской общественной организации «Тоннельная ассоциация России», ФГБУ ВНИИПО МЧС России);

– при проектировании железобетонных конструкций и защиты их от взрывообразного разрушения, а также при определении пределов огнестойкости железобетонных тубингов расчетным методом (акт внедрения ООО «ИЦ ПРОЗАСК», ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКТОР»);

– при внесении метода защиты от взрывообразного разрушения бетона в проект ГОСТ «Средства огнезащиты железобетонных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности» и модернизации крупномасштабной огневой печи для испытания балок, перекрытий и покрытий на огнестойкость (акт внедрения ФГБУ ВНИИПО МЧС России);

– при разработке раздела о новом виде защиты железобетонных конструкций в учебник и курс лекций по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре» в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. На основании проведенного анализа пожаров и аварий, происшедших в тоннельных сооружениях, была научно обоснована защита конструкций тоннелей от взрывообразного разрушения за счет добавки ППФ. Обоснована необходимость определения прочностных и теплофизических показателей бетонов с добавкой ППФ для возможности оценки огнестойкости железобетонных конструкций расчетными методами и адаптации существующих методик по оценке огнестойкости железобетонных конструкций применительно к железобетонным тубингам.

2. Проведенный анализ существующих экспериментальных методик по оценке огнестойкости строительных конструкций позволил обосновать необходимость доработки экспериментальной крупномасштабной огневой печи дополнительной системой опирания и нагружения для железобетонных тубингов.

3. По результатам проведенной серии экспериментов огнестойкости железобетонных тубингов с добавкой ППФ ProZASK IGS 6 мм с использованием доработанной системы опирания и нагружения определен фактический предел огнестойкости, который составил более REI 120.

4. Получены экспериментальные данные прочности на осевое сжатие бетонов без добавки и с добавкой ППФ, а также эмпирические зависимости  $R_b = f(T)$  и коэффициенты снижения предела прочности бетона  $\gamma_{b,tem}$ , которые рекомендованы для оценки огнестойкости железобетонных конструкций расчетными методами и численного моделирования, в том числе, при строительстве автодорожных тоннелей и метрополитена. При анализе

полученных данных установлено, что при добавке ППФ в размере 1 кг/м<sup>3</sup> наблюдается снижение прочности примерно на 16 %.

5. В результате проведенных исследований и обработки данных определены зависимости  $\lambda_t = f(T)$  и  $c_t = f(T)$  для бетонов без добавки и с добавкой ППФ в условиях стандартного температурного режима пожара, которые рекомендованы для оценки огнестойкости железобетонных конструкций расчетными методами и численного моделирования, в том числе, при строительстве автодорожных тоннелей и метрополитена. Установлено снижение коэффициента теплопроводности и повышение удельной теплоемкости бетонов с добавкой ППФ, что увеличивает время прогрева конструкции по сравнению с вариантом без добавки ППФ, т.е. повышает предел огнестойкости конструкции.

6. В ходе адаптации методики оценки огнестойкости железобетонных туннелей, обоснована формула определения дополнительного температурного прогиба с учетом геометрической нелинейности железобетонных туннелей, при этом получена удовлетворительная сходимость расчетного прогиба с экспериментальным (максимальное расхождение величин не превышает 12 %).

7. Адаптирована методика, позволяющая проводить расчеты температурных полей при различных режимах пожара с использованием программного комплекса *ANSYS* и оценивать пределы огнестойкости железобетонных туннелей. С помощью данной методики установлено, что расчетная величина предела огнестойкости при стандартном и углеводородном режимах пожара для всех исследуемых образцов, составила REI 120.

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

1. Новиков, Н.С. Огнестойкость и прочность конструкций из фибробетона [Электронный ресурс] / Н.С. Новиков // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – 2016. – № 3 (67). – С. 122–127. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/14-03-16.ttb.pdf>

2. Новиков, Н.С. Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков, В.В. Павлов, С.П. Антонов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 2. – С. 63–67.

3. Новиков, Н.С. Прочностные и теплофизические свойства бетона с полипропиленовой фиброй в условиях температурного режима стандартного пожара [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков, В.В. Павлов, Е.В. Кузнецова // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 5. – С. 37–44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44.

**Остальные публикации по теме диссертации:**

4. Новиков, Н.С. Огнестойкость железобетонных конструкций из фибробетона [Текст] / Н.С. Новиков // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы

техносферной безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 30–33.

5. Новиков, Н.С. Огнестойкость железобетонных тубингов из фибробетона с полипропиленовой фиброй [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 19-й Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2016. – С. 510–513.

6. Новиков, Н.С. Огнестойкость железобетонных тубингов из фибробетона с полипропиленовой фиброй [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы». – Минск: Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, 2016. – С. 79–80.

7. Новиков, Н.С. Исследование характеристик фибробетона с полипропиленовой фиброй при воздействии температур, применяемых в строительстве подземных сооружений [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 20-й Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. – С. 499–501.

8. Новиков, Н.С. Влияние температуры на прочностные характеристики фибробетона с полипропиленовой фиброй [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 22–24.

9. Новиков, Н.С. Влияние температуры на теплофизические характеристики фибробетона с полипропиленовой фиброй [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 1-й Международной научно-практической конференции и Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и молодых ученых. Краснодар: «Кубанский государственный технологический университет», 2017. – С. 21–25.

10. Новиков, Н.С. Исследование прочностных и теплофизических характеристик фибробетона с полипропиленовой фиброй для строительства тоннельных сооружений [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 87–91.

11. Новиков, Н.С. Исследование характеристик фибробетона при высокотемпературном прогреве [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 22-й Всероссийской студенческой научно-практической

конференции с международным участием, посвященная году экологии «Безопасность – 2017». – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017. – С. 87–91.

12. Новиков, Н.С. Влияние нагрева на теплофизические характеристики и прочность при осевом сжатии бетона с полипропиленовой фиброй [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков, В.В. Павлов, Е.В. Кузнецова // Материалы 24-й Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России «Горение и проблемы тушения пожаров». – М: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2017. – С. 34–37

13. Новиков, Н.С. Влияние нагрева на теплофизические характеристики и прочность при осевом сжатии бетона с полипропиленовой фиброй [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». – Кокшетау: Кокшетауский технический институт, 2017. – С. 153–158.

14. Новиков, Н.С. Фибробетон с полипропиленовой фиброй – защита от взрывообразного (хрупкого) разрушения железобетонных конструкций при пожаре [Текст] / В.И. Голованов, Н.С. Новиков, Е.В. Кузнецова // Материалы 17-й Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства». – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2017. – С. 421–425.

Подписано в печать 13.03.2019. Формат 60x84<sup>1/16</sup>.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № 123.

---

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