

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

Академия Государственной противопожарной службы

На правах рукописи



Новиков Николай Сергеевич

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ АВТО-
ДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ И МЕТРОПОЛИТЕНА**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Голованов Владимир Ильич

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ФИБРОБЕТОНА, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. Анализ конструктивных особенностей и условий эксплуатации обделок тоннелей	11
1.2. Анализ исследования прочности фибробетонов и влияние добавки фибры на огнестойкость строительных конструкций	14
1.3. Причины и механизм взрывообразного разрушения бетона при высокотемпературном воздействии	30
1.4. Влияние добавки полипропиленовой фибры на огнестойкость железобетонных конструкций	33
1.5. Влияние добавки фибры на теплофизические характеристики бетонов.....	38
1.6. Обзор существующих методов оценки огнестойкости железобетонных конструкций	41
1.7. Формулирование цели и задач диссертационного исследования	46
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА С ДОБАВКОЙ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРЫ.....	47
2.1. Предварительное планирование эксперимента по определению прочности на осевое сжатие бетона при прогреве	47
2.2. Описание экспериментальной установки и вспомогательного оборудования.....	49
2.3. Описание методики и проведение эксперимента	52
2.4. Обработка полученных экспериментальных данных.....	55
2.5. Выводы по главе.....	62
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ.....	63
3.1. Описание экспериментального и вспомогательного оборудования.....	63

3.2. Методика проведения исследования влажности бетона и результаты исследования.....	69
3.3. Описание испытываемых образцов для исследования теплотехнических характеристик.....	70
3.4. Методика проведения исследования теплофизических характеристик бетона с полипропиленовой фиброй.....	73
3.5. Обработка полученных экспериментальных данных после проведения испытания. Верификация программных комплексов <i>KOKON</i> и <i>ANSYS</i>	75
3.6. Выводы по главе.....	83
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТЮБИНГОВ С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ	84
4.1. Методика проведения исследований огнестойкости железобетонных тюбингов с полипропиленовой фиброй	84
4.2. Описание испытываемых образцов железобетонных тюбингов с полипропиленовой фиброй	94
4.3. Проведение испытаний на огнестойкость железобетонных тюбингов с полипропиленовой фиброй и результаты этих испытаний	96
4.4. Адаптация и апробация аналитической модели расчета огнестойкости железобетонных тюбингов	100
4.4.1. Моделирование теплотехнической задачи в программном комплексе <i>ANSYS</i>	102
4.4.2. Решение статической (прочностной) задачи по стандартному температурному режиму пожара.....	112
4.5. Выводы по главе.....	124
РЕКОМЕНДАЦИИ К ДАЛЬНЕЙШИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное).....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)	150

ВВЕДЕНИЕ

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 [1–4].

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 [5–9] и преждевременной потере их несущей способности. Кроме того, в тоннелях используются, как правило, высококачественные (тяжелые) марки бетонов, что повышает вероятность взрывообразного разрушения при высокотемпературном воздействии.

Для защиты тяжелого бетона от взрывообразного разрушения разработаны такие методы как установка противооткольной сетки, использование огнезащитных покрытий и облицовок [10–16]. Одним из методов защиты бетона от взрывообразного разрушения в EN 1992-1-2 и ряде зарубежных публикаций является добавка в бетон полипропиленовой фибры (ППФ) в количестве 1–2 кг/м³ [17].

При анализе научных трудов выявлено, что объем экспериментальных исследований огнестойкости конструкций из таких железобетонов 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 относительно низких температурах. Однако анализ показал, что исследования прочностных характеристик в усло-

виях высокотемпературного нагрева, необходимых для проведения расчетных оценок огнестойкости, уделено недостаточное внимание. Также недостаточно исследованы 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. [18–31].

Знания об огнестойкости строительных конструкций, в том числе о методах расчета, причинах и методах защиты от взрывообразного разрушения, сформировали: Яковлев А.И., Олимпиев 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. [32–60].

Исследования фибробетонов проводили многие зарубежные ученые: J.P. Romualdi, B. Gordon, G.B. Batson, M. Jeffrey, I.A. Mandel, I.L. Carson, W.F. Chen и др. [61–68].

При анализе вышеперечисленных работ остаются пробелы в области экспериментального исследования процесса взрывообразного разрушения и огнестойкости железобетонных конструкций. Требуется доработка методики расчета огнестойкости конструкций подземного строительства, 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°C 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 обделки подземных сооружений, при нагреве;
- определить теплофизические характеристики бетона с добавкой ППФ, используемого в железобетонной обделке (тюбингах) подземных сооружений;
- экспериментально определить огнестойкость железобетонных тюбингов, а также исследовать взрывообразное разрушение в процессе эксперимента;
- адаптировать и апробировать аналитическую модель расчета огнестойкости железобетонной обделки подземных сооружений.

Объект исследования – пожарная безопасность железобетонной обделки автодорожных тоннелей и метрополитена.

Предмет исследования – огнестойкость железобетонных тюбингов на основе бетона с полипропиленовой фиброй.

Научная новизна работы:

1. Впервые получен значительный объем результатов экспериментальных исследований огнестойкости натуральных железобетонных тюбингов, изготовленных с использованием полипропиленовой фибры.
2. Установлено, что ППФ позволяет избежать взрывообразного разрушения за счет своей низкой температуры плавления и образования микроканалов снижающие 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 тюбингов с учетом их геометрической нелинейности;

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

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- получены результаты экспериментальных исследований огнестойкости железобетонных тюбингов, изготовленных с использованием полипропиленовой фибры;

- уточнена методика проведения испытаний конструкций за счет разработки системы опирания и нагружения для железобетонных при оценке 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 тюбингов с добавкой ППФ расчетными методами;

- адаптирована и апробирована аналитическая модель расчета огнестойкости железобетонной обделки (тюбингов) позволяющая оценивать огнестойкость железобетонной обделки (тюбингов) 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 натурные и лабораторные эксперименты.

Материалы диссертации реализованы при разработке:

– предложений в проект Свода правил «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» (изменения в 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 рассчитанных пределов огнестойкости железобетонных тубингов без добавки и с добавкой ППФ при различных режимах пожара.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность представленных результатов достигалась:

– 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 представлены 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, посвящённая 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.

Объём и структура работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Материалы изложены на 165 страницах машинописного текста, включающего 13 таблиц, 99 рисунков и списка литературы из 156 источников.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ФИБРОБЕТОНА, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ конструктивных особенностей и условий эксплуатации обделок тоннелей

В настоящее время во всем мире широко ведётся строительство тоннельных сооружений. В работе [4] дано понятие тоннеля. Тоннели – капитальные сооружения, рассчитанные на длительный срок эксплуатации. Соответственно, в течение срока эксплуатации тоннели должны выполнять свои функции, при этом сохраняя эксплуатационные показатели при заданных режимах работы.

Основные аварии, возникающие в тоннелях и нарушающие его эксплуатационную надежность, вызваны стихийными бедствиями (землетрясения, лавины, камнепады, наводнения), несоблюдением условий эксплуатации, дефектами конструкций и т.д.

Одним из частых и опасных явлений, возникающих при эксплуатации тоннелей, являются взрывы и пожары, зачастую происходящие одновременно. Пожары, возникающие в тоннелях, приводят к длительному прекращению их функционирования, что в наиболее худших случаях приводит к гибели людей, и всегда – к финансовым убыткам. [69].

Например, пожар, произошедший в Лондонском метрополитене в 1987 году, унес из жизни 30 человек. Произошло обрушение конструкций станции «Кингз Кросс», в результате чего станция была полностью уничтожена. В 1979 году в г. Сан-Франциско при пожаре в подводном тоннеле погиб 1 человек и 27 человек пострадало. В том же году в автодорожном тоннеле Надзака в Японии при пожаре погибло 7 человек и 2 получили ранения. Практически за 13 лет эксплуатации тоннеля в г. Гамбурге произошло более 36 пожаров.

Трагические результаты событий делают особо актуальной проблему обеспечения высокой несущей способности конструкций во время эксплуата-

ции тоннелей и их высокой огнестойкости во время пожара.

Одним из конструкционных материалов в строительстве является бетон, который применяется при изготовлении тоннельных обделок. Использование данного материала обусловлено его долговечностью, не горючестью, не токсичностью, а также наличием у конструкций на основе железобетона высокого предела огнестойкости (более 150 мин.). Но так как бетон является композиционным, гигроскопичным материалом, то он предрасположен к взрывообразному разрушению. Данное явление не стоит оставлять без внимания, так как оно приводит к обрушению конструкций на ранних этапах развития пожара (фактически снижает огнестойкость конструкций до 20–30 мин.), что значительно влияет на общую устойчивость сооружений и делает их небезопасными.

Так как на тоннели в ходе их эксплуатации воздействуют грунты и грунтовые воды, влажность таких конструкций может быть достаточно высокой, что увеличивает вероятность возникновения взрывообразного разрушения. Поэтому защита конструкций тоннельных обделок от взрывообразного разрушения является актуальной проблемой.

Существуют разные способы повышения несущей способности и огнестойкости железобетонных конструкций, а также защиты бетона от взрывообразного разрушения [13–16, 70]. Первый способ можно реализовать за счет увеличения сечения и защитного слоя арматуры конструкций, что повышает экономические затраты на изготовление конструкций и их массивность. К тому же усложняется монтаж таких конструкций ввиду их высокого веса. Второй способ – использование огнезащитных покрытий, которые повышают несущую способность, предел огнестойкости конструкции и защищают от взрывообразного разрушения, без увеличения массивности конструкций. При этом для железобетона возможно использование таких же огнезащитных покрытий как для металлических конструкций (вспучивающиеся составы, штукатурки, плитные материалы). Однако недостатком такого метода является дополнительные экономические затраты.

Относительно недавно разработан еще один способ повышения несущей способности железобетонных конструкций. Он заключается во введении в со-

став бетона фибры, которая армирует бетон во всех плоскостях, повышает марку бетона, прочность, ударостойкость и снижает образование усадочных трещин, а ППФ позволяет защитить бетон от взрывообразного разрушения. Данный материал (фибробетон) является весьма эффективным в том числе и при строительстве тоннельных [71] сооружений, что отражено в ряде научных работ [72–88]. Так, например, все исследования описывают повышение несущей способности железобетонных конструкций, а в случае с бетоном – компенсирование таких его недостатков, как хрупкость, низкая прочность при растяжении и т.д. Однако использование фибробетона в целях защиты от взрывообразного разрушения в настоящее время в Российской Федерации не применяется. Также отсутствуют какие-либо нормативные документы, регламентирующие количество фибры, вводимой в состав для повышения несущей способности конструкции, и область применения того или иного вида фибры.

Также предполагается, что при повышении несущей способности конструкций с фибробетоном повышается и их огнестойкость. Однако вопрос о повышении огнестойкости недостаточно исследован, что делает актуальным вопрос изучения огнестойкости фиброжелезобетона.

В основном фибру можно разделить на два класса: металлическая и неметаллическая [78]. Материалом, из которой изготавливается металлическая фибра, является сталь. Неметаллическая фибра может состоять из таких материалов, как стеклопластик, базальт, углерод, полипропилен и др.

Металлическая фибра позволяет повысить предел прочности бетона при растяжении и сжатии, снижает усадку и образование трещин. Однако металлическая фибра подвержена коррозии, что снижает срок эксплуатации конструкций.

Неметаллическая фибра также повышает предел прочности бетона при растяжении и сжатии, устойчивость к агрессивным средам и т.д. Однако не вся неметаллическая фибра устойчива к агрессивным средам. Например, стекловолокно или базальтовая фибра, имея высокий показатель упругости (от чего зависит пластичность материала), неустойчивы к щелочным средам, поэтому данные материалы необходимо обрабатывать полимерами, которые позволяют

избежать данной проблемы. Но тогда применение данного типа фибры потребует дополнительных финансовых вложений [78].

Практика показывает, что проведение крупномасштабных испытаний огнестойкости конструкции не всегда возможно. Заключается это в больших трудозатратах подготовки к испытаниям, привлечению дополнительной техники для транспортировки конструкций, их перемещения до испытательных лабораторий и установку на испытательный стенд, что в конечном итоге приводит к большим экономическим затратам. Поэтому в мире все большее место занимает моделирование и расчёт огнестойкости строительных конструкций на ЭВМ. Но для возможности оценки огнестойкости конструкций необходимо знать такие показатели, как прочностные и теплотехнические характеристики, зависящие от температуры. В случае с бетоном данные характеристики достаточно исследованы и нашли отражение в нормативной базе, чего нельзя сказать про фибробетон.

При добавке в состав бетона фибры, как уже отмечено выше, изменяются прочностные показатели материала при нормальных условиях. То же можно сказать и про коэффициенты теплоёмкости и теплопроводности [89–91]. Изменяются эти показатели и при воздействии высоких температур, как и у традиционного бетона. Однако данных по прочностным и теплофизическим характеристикам при воздействии температуры очень мало, а для некоторых фибробетонов они просто отсутствуют. Так как эти показатели неизвестны на данный момент, то не представляется возможным оценить огнестойкость расчётными методами. Основываясь на этом, на начальном этапе необходимо провести анализ существующих работ по определению этих показателей.

1.2. Анализ исследования прочности фибробетонов и влияние добавки фибры на огнестойкость строительных конструкций

При исследовании фибробетона следует учитывать множество свойств фибры, которые будут как положительно, так и отрицательно влиять на его прочностные характеристики. Определение этих свойств имеет большое значение в исследовании огнестойкости тоннельных сооружений.

Одним из таких свойств является равномерность распределения фибры в объёме смеси. В 2014 году в Томском государственном архитектурно-строительном институте проводились исследования по определению расхода фибры в объёме смеси, ведь на прочность фибробетона отрицательно влияет как недостаток, так и избыток волокна. За основу были взяты образцы кубической формы с углеродной фиброй. По результатам исследования (рисунки 1.1 и 1.2) получен прирост прочности на осевое сжатие 43 % и на осевое растяжение 18 %, также получен диапазон коэффициента армирования бетона углеродным волокном 0,2...0,3 % от массы цементного вяжущего [92].

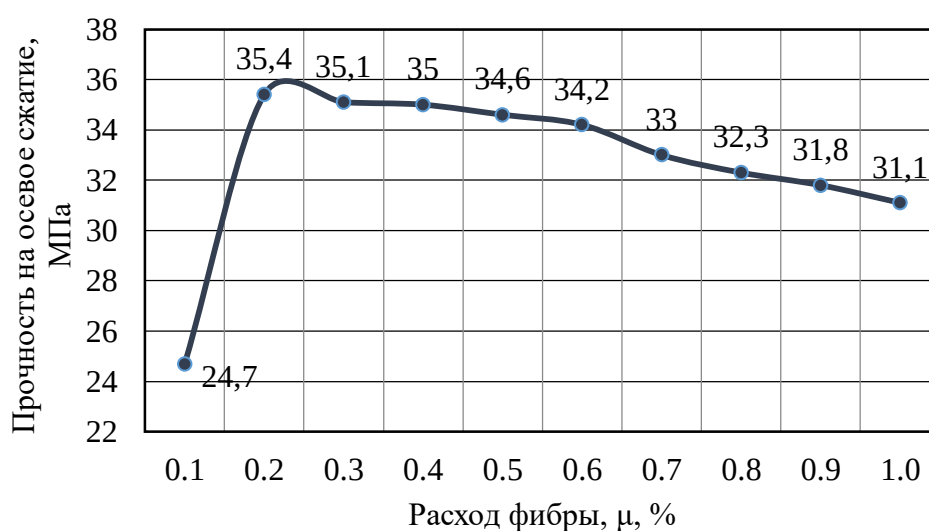


Рисунок 1.1 – Зависимость предела прочности углеродофибробетона при осевом сжатии от процента армирования фиброй [92]

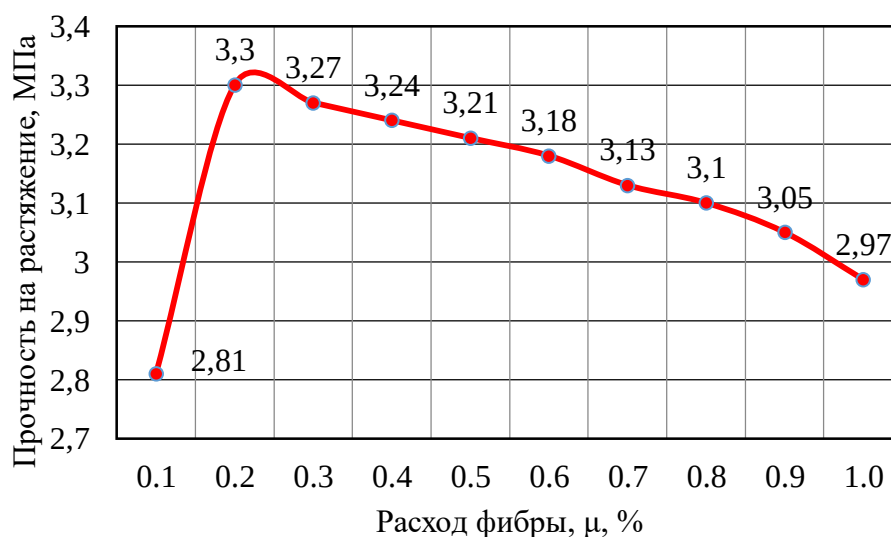


Рисунок 1.2 – Зависимость предела прочности углеродофибробетона при растяжении от процента армирования фиброй [92]

Разностороннее изучение сталефибробетона проводилось в ФГБОУ ВПО Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова в 2012 году [93–94]. Первое исследование было направлено на разработку составов сталефибробетона на различных составах бетона с различными по форме фибрами для повышения прочностных характеристик. Для исследования использовались три вида вяжущих приведенные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики вяжущего, используемого при изготовлении фибробетона [93]

Вяжущее	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$	Начало схватывания, ч.	Конец схватывания, ч.	Прочность бетона	
				При изгибе, МПа	При сжатии, МПа
ЦЕМ I 42,5Н	320	2,30	3,30	7,8	9,3
ТМЦ-70	504	2,15	3,15	10,2	57,4
ВНВ-70	520	1,50	2,50	11,1	68,9

В состав бетона были введены три вида фибр: фибра стальная волнообразная – длина 30 мм, диаметр 0,8 мм (рисунок 1.3 а); фибра стальная анкерная – длина 50 мм, диаметр 0,8 мм (рисунок 1.3 б); фибра стальная плоская – длина 32 мм, ширина 3,2 мм (рисунок 1.3 в), также были изготовлены образцы без фибры для сравнения характеристик бетона.



а



в

Рисунок 1.3 – Стальная фибра, используемая при изготовлении фибробетона [93]

Испытания проводились при нормальных условиях среды без прогрева бетона, по методике ГОСТ [95]. Результаты испытаний сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты испытаний бетона со стальной фиброй [93]

Определяемая характеристика	Размерность	Без фибры	Виды фибр		
			Плоская фрезерованная	Анкерная	Волновая
Кубиковая прочность	МПа	50,2	56,3	55,8	57,4
Призменная прочность	МПа	35,0	39,2	38,7	39,9
Прочность на растяжение при изгибе	МПа	13,7	15,9	16,6	16,8
Модуль упругости	МПа	$35,8 \cdot 10^3$	$41,1 \cdot 10^3$	$39,8 \cdot 10^3$	$41,7 \cdot 10^3$

Исходя из данных, полученных при испытании сталефибробетона, можно сделать вывод, что фибра увеличивает характеристики примерно в 1,2 раза (рисунки 1.4 и 1.5) по сравнению с бетоном без использования фибры, что объясняет превосходство фибробетона и описывает перспективу дальнейшего исследования.

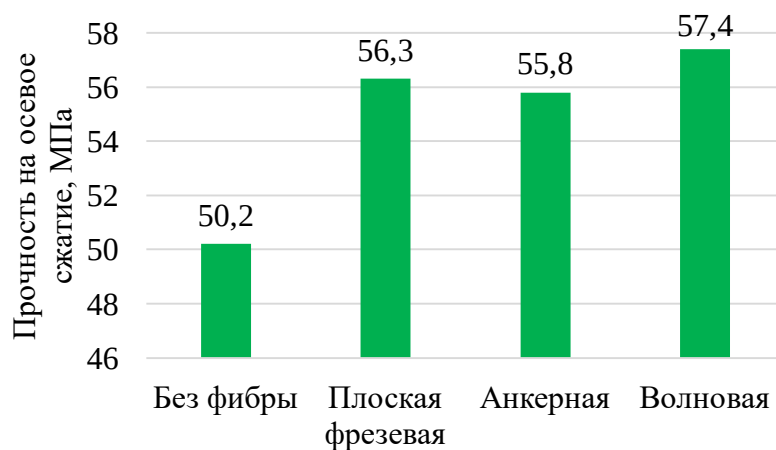


Рисунок 1.4 – Диаграммы прочности на осевое сжатие сталефибробетона с различной формой фибры [93]

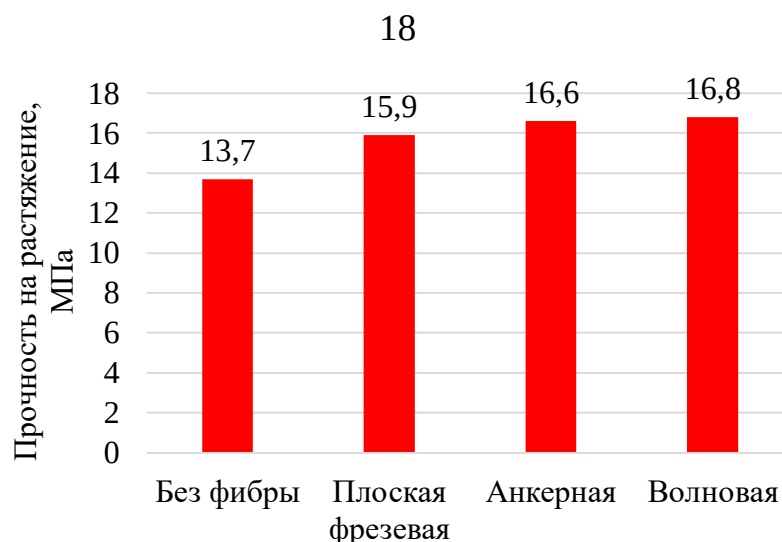


Рисунок 1.5 – Диаграммы прочности на растяжение сталефибробетона с различной формой фибры [93]

Второе исследование [94] было направлено на определение влияния расхода стальной фибры на прочность при сжатии. Испытаны три различных состава сталефибробетона: первый состав без добавки фибры в бетон; второй – 2 % армирования фиброй по массе стальной фибры на 1 м^3 в форме «елочка»; третий – 2 % армирования фиброй по массе стальной фибры на 1 м^3 в форме «анкерная».

Результаты исследования показаны на рисунке 1.6. Наиболее эффективной оказалась стальная фибра в форме «елочка», она позволяет повысить прочность на осевое сжатие в 1,2 раза по сравнению с бетоном без добавки фибры.

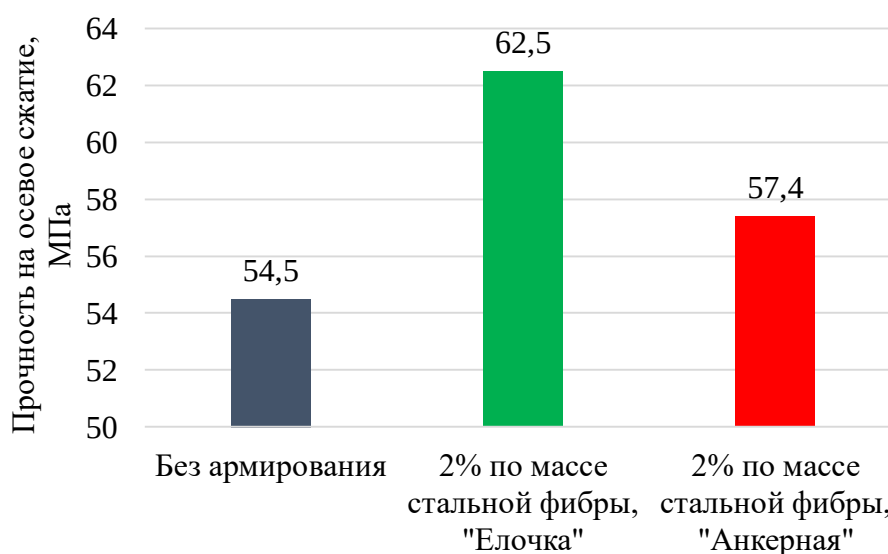


Рисунок 1.6 – Диаграмма расхода фибры в смеси сталефибробетона [94]

Также в указанном выше учреждении проводились исследования бетонов на различном вяжущем с добавлением стальной фибры [96]. Основные применявшиеся виды вяжущего, а также результаты эксперимента представлены в таблице 1.3. Расход фибры во всех случаях принимался 72 кг/м^3 .

Таблица 1.3 – Результаты испытания бетона со стальной фиброй на различных вяжущих [96]

Вид вяжущего	Прочность на осевое сжатие, МПа	Прочность на растяжение, МПа
ЦЕМ 42,5Н	50,2	13,7
ЦЕМ 42,5Н со стальной фиброй	72,2	21,1
ТМЦ-100	71,4	21
ТМЦ-100 со стальной фиброй	94,7	22,2
ВНВ-100	82,2	21,9
ВНВ-100 со стальной фиброй	104,8	23,2

В каждом случае видно, что при введении фибры в состав бетона с различными вяжущими значительно повышается прочность на осевое сжатие и прочность на растяжение. Показатели прочности представлены на рисунках 1.7 и 1.8.

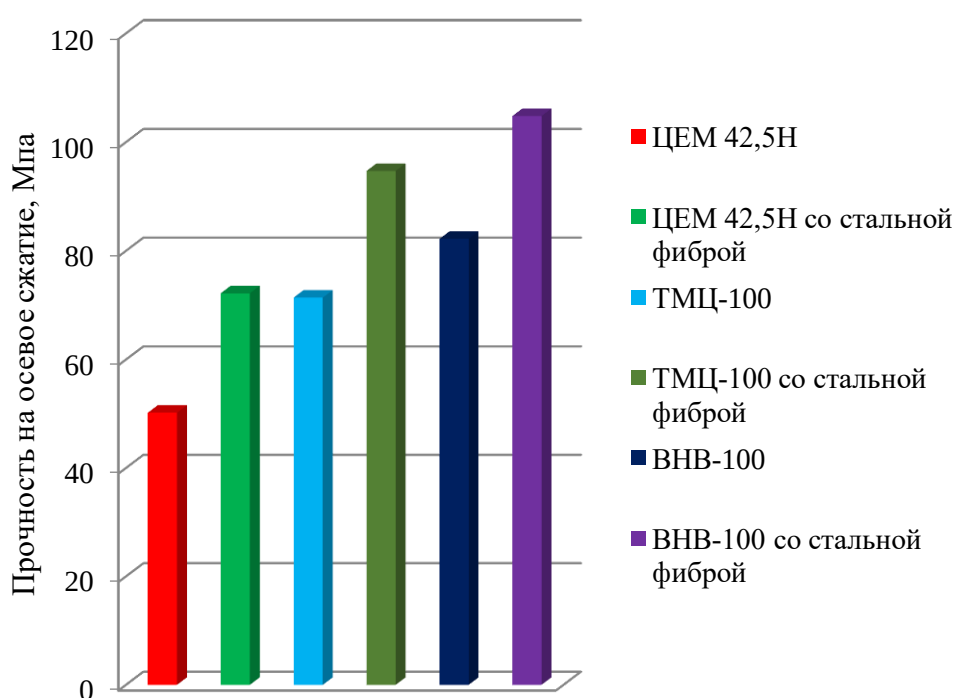


Рисунок 1.7 – Гистограммы прочности на осевое сжатие [96]

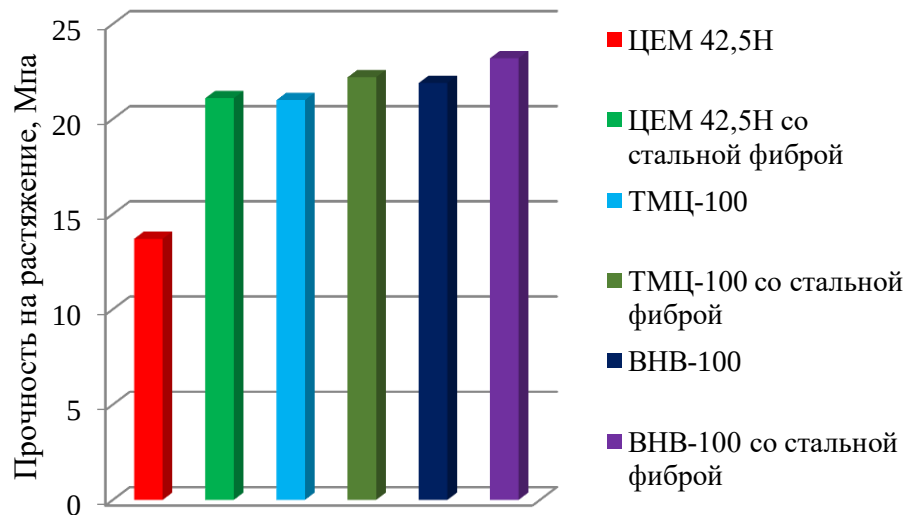


Рисунок 1.8 – Гистограммы прочности на растяжение [96]

Исследования [97] проводились уже со стеклофибробетоном на базе стеклоровинга. Образцами, представленными на испытания, были кубы $10 \times 10 \times 10$ см и балки $12 \times 12 \times 60$ см. Длина фибры выбиралась от 20 до 50 мм, диаметр 0,8 мм. Целью исследования было определение прочностных характеристик стеклофибробетона в зависимости от процента армирования. Результаты исследования представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты исследования стеклофибробетона с различным расходом и длиной волокон [97]

№ образца	Длина волокна, l_f , мм	Процент армирования волокном, V_f , %	Прочность на осевое сжатие, R_b , МПа	Прочность на растяжение, R_n , МПа
1	20	1,5	27,1	5,2
2	20	3,0	27,4	6,0
3	20	4,5	24,0	6,3
4	35	1,5	29,5	7,1
5	35	3,0	28,2	8,5
6	35	4,5	20,0	9,0
7	50	1,5	22,2	9,0
8	50	3,0	21,1	9,5
9	50	4,5	18,1	10,1

На рисунках 1.9 и 1.10 видно, что при длине стекловолокна 20 и 35 мм и расходе фибры 1,5 и 3,0 % прочность на сжатие увеличивается на 28 %. Проч-

ность на растяжение при различных длинах и расходе в среднем увеличивается от 44 до 181 %.

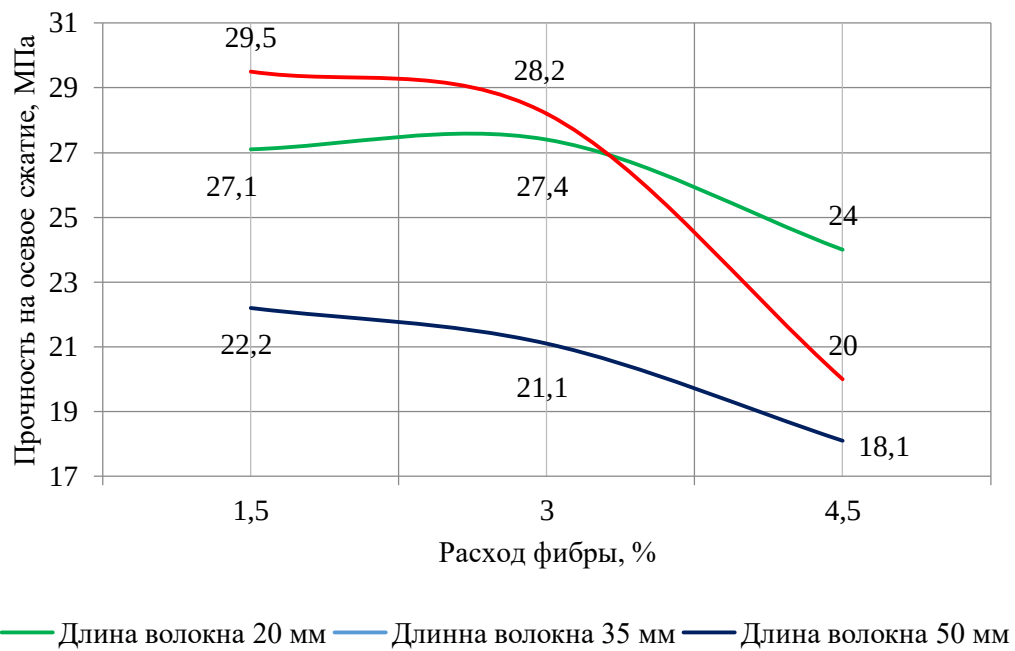


Рисунок 1.9 – График зависимости прочности на осевое сжатие фибробетона со стекловолокном от процента армирования [97]

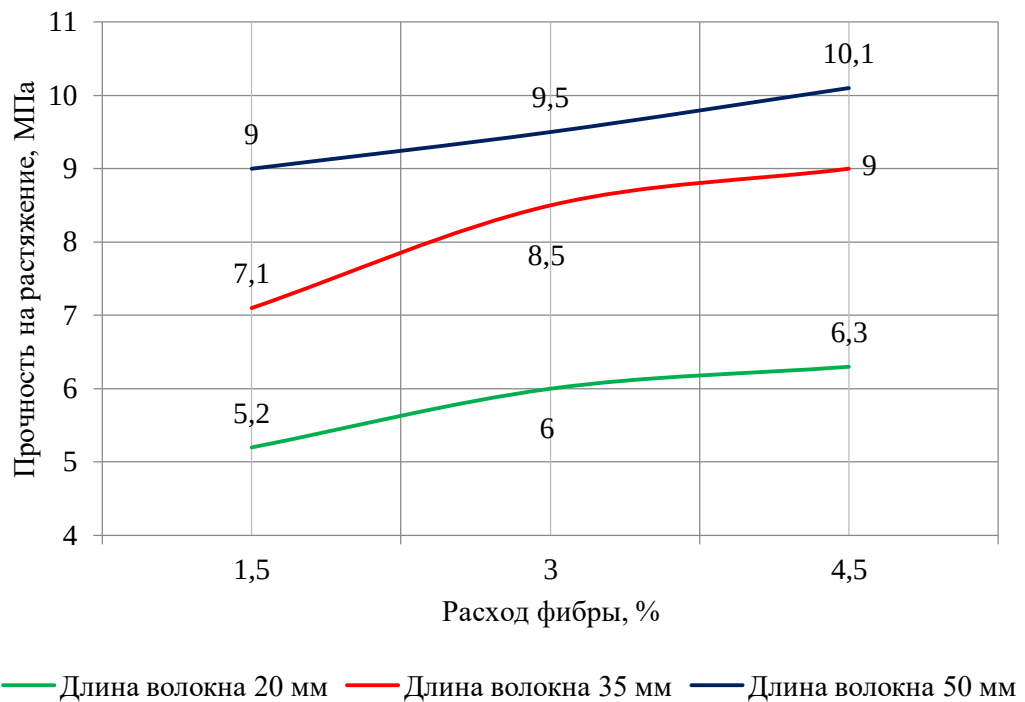


Рисунок 1.10 – График зависимости прочности на растяжение фибробетона со стекловолокном от процента армирования [97]

В научных трудах описаны исследования бетонов с добавкой различных фибр, показатели которых, как установлено в статьях [98-105], положительно влияют на прочность бетона. Изучение этих работ показало на недостаточность результатов изменения прочностных показателей при их нагреве, что очень важно для расчетных методик.

Предположение, что при добавке фибры в состав бетона повышаются пределы огнестойкости конструкций, обязывает рассмотреть результаты проведенных в настоящее время крупномасштабных огневых испытаний конструкций.

В 1985 году [106] исследована огнестойкость сталефибробетонных предварительно напряженных плит перекрытий во ВНИИПО совместно с НИИЖБ и ЛенЗНИИЭП. В результате данного исследования было установлено, что предел огнестойкости плит перекрытий составил 1 ч. 26 мин., что позволяет применять данную конструкцию для зданий со II степенью огнестойкости и выше. Рекомендовано дополнительно армировать приопорные зоны ребер стержнями и каркасами для предотвращения разрушения по косому сечению, чтобы повысить предел огнестойкости. Выяснено, что при влажности плиты выше 3,5 % и расходе стальной фибры 85 кг/м^3 бетон может взрывообразно разрушаться, что может значительно снизить предел огнестойкости конструкции [106].

Также проведены исследования огнестойкости центрально сжатых колонн с добавкой и без добавки стальной фибры. Итоги исследований показали, что фактические пределы огнестойкости колонн со стальной фиброй незначительно увеличились по сравнению с колоннами без фибры [107].

В 2013 году проведен теоретический расчет железобетонной колонны с усилением ее облойкой из фибробетона в целях увеличения прочностных характеристик и предела огнестойкости колонны. В качестве фибры в облойке использовали базальт. Расчет показал, что прочность и огнестойкость конструкции повышается [108].

В Национальном университете гражданской защиты Украины было проведено исследование [109] несущей способности и огнестойкости изгибаемых

железобетонных конструкций с добавками фибры. Для изготовления конструкции использовался бетон класса В25. В целях исследования использовалась стальная и базальтовая фибра с расходом в пределах 0,5...2,0 %. В результате (таблица 1.5 и 1.6) установлено, что несущая способность конструкции (рисунок 1.11) с использованием стальной или базальтовой фибры выше, чем у конструкции без дисперсного армирования. Предел огнестойкости конструкций (рисунок 1.12) с армированием в интервале от 0,5 до 1,5 % примерно одинаковый по сравнению с конструкциями без армирования, но при армировании 2,0 % предел огнестойкости повышается. То есть с повышением процента армирования железобетонной конструкции предел огнестойкости конструкции начинает увеличиваться [109].

Таблица 1.5 – Результаты испытаний несущей способности железобетонных плит с различным расходом фибры [109]

№ образца	Несущая способность железобетонных плит, МПа			
	0,5	1,0	1,5	2,0
1	152	312	542	676
2	219	395	542	676
3	200	365	525	672

Таблица 1.6 – Результаты испытаний огнестойкости железобетонных плит с различным расходом фибры [109]

№ образца	Предел огнестойкости железобетонных плит, мин.			
	0,5	1,0	1,5	2,0
1	105	99	92	80
2	95	94	91	83
3	100	98	95	90

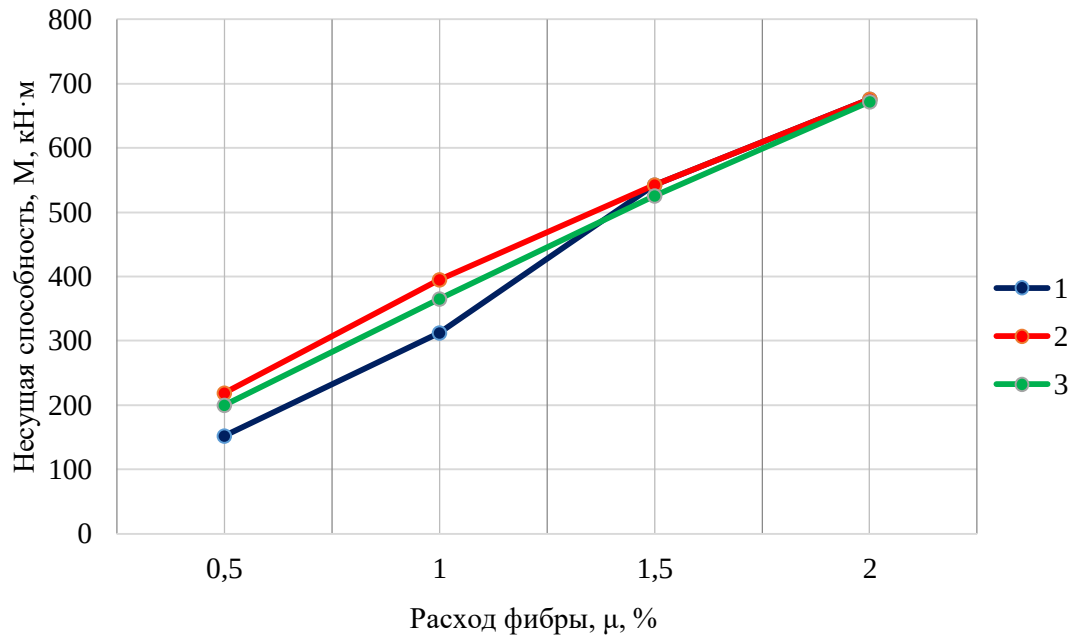


Рисунок 1.11 – Зависимость несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций от расхода фибры [109]:
1 – без добавки фибры; 2 – стальная фибра; 3 – базальтовая фибра

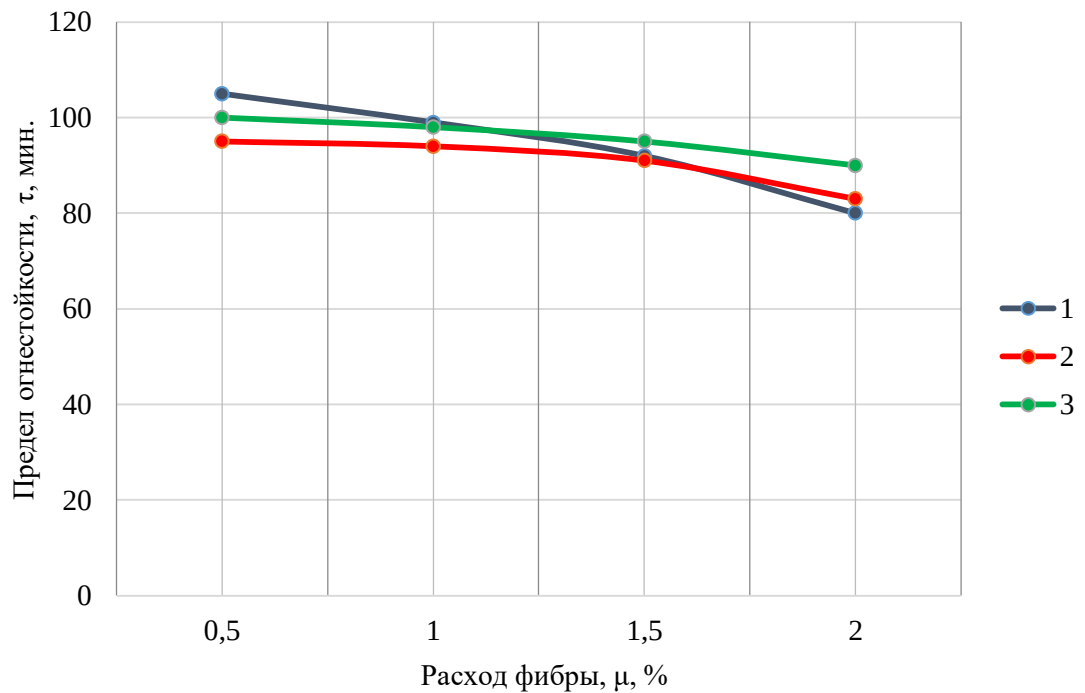


Рисунок 1.12 – Зависимость предела огнестойкости изгибаемых железобетонных конструкций от расхода фибры [109]:
1 – без добавки фибры; 2 – стальная фибра; 3 – базальтовая фибра

В Великобритании при строительстве тоннелей при введении в состав сталефибробетона стало возможным не использовать арматуру и уменьшить

толщину облицовочных элементов до 150 мм, тем самым сократив расход бетона, но при этом сохранив прочностные характеристики конструкции [110–112]. Этот же материал использовался для строительства тоннелей East London Line's Brunel Tunnel, аэропорта Хитроу и др.

Исходя из результатов небольшого количества существующих исследований огнестойкости подтверждается предположение о повышении огнестойкости железобетонных конструкций. Однако количество таких испытаний недостаточно велико для окончательных выводов. Отсутствуют наглядные испытания конструкций тоннельных сооружений на огнестойкость, что дает повод для дальнейшего исследования.

Так как наличие ППФ важно для защиты железобетонных конструкций от взрывообразного разрушения, необходимо провести анализ отечественных и зарубежных работ, исследующих повышение прочности бетона при нормальных условиях и при высокотемпературном нагреве.

В статье [113] представлено исследование конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов. Для исследования использовались фибробетоны с базальтовой и полипропиленовой фиброй с различной длиной. В результате исследования микроструктуры бетонов выявлено, что базальтовое волокно имеет большую адгезионную способность к заполнителю (рисунок 1.13), что негативно влияет на прочностные характеристики. Полипропилен же дает возможность получать композиты с высокими технико-эксплуатационными характеристиками за счет отсутствия взаимодействия с вяжущим (рисунок 1.14). При этом при использовании полипропилена предоставляется возможность создавать конструкции с меньшей толщиной, увеличивая полезную площадь помещений и уменьшая нагрузки на фундамент.

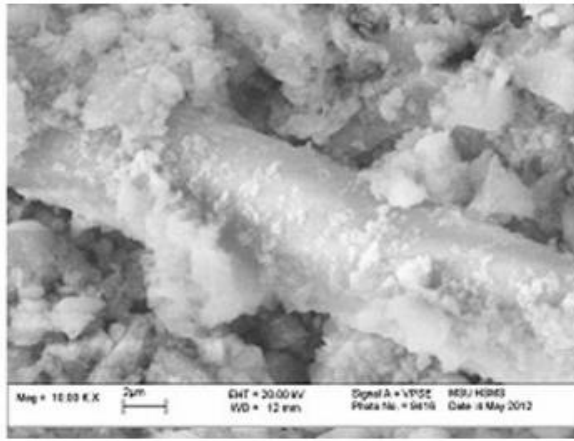


Рисунок 1.13 – Микроструктура бетона с базальтовой фиброй [113]

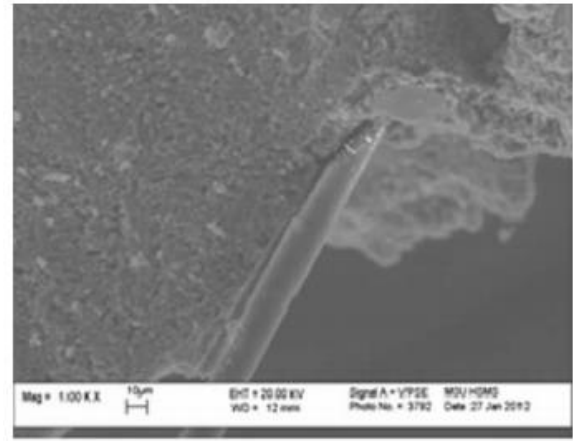


Рисунок 1.14 – Микроструктура бетона с ППФ [113]

Например, в Белгородском государственном технологическом университете [114] проведены исследования фибробетонов с добавкой стальной и ППФ. Испытания проводились при нормальных условиях. При этом для исследования прочностных характеристик бетона использовалась стальная фибра в количестве 32 кг и полипропиленовая – 3 кг. Сравнивалась данная фибра с составом бетона без добавки фибры и с составом, в который была добавлена фибра в количестве 72 кг. Результаты представлены на рисунке 1.15.

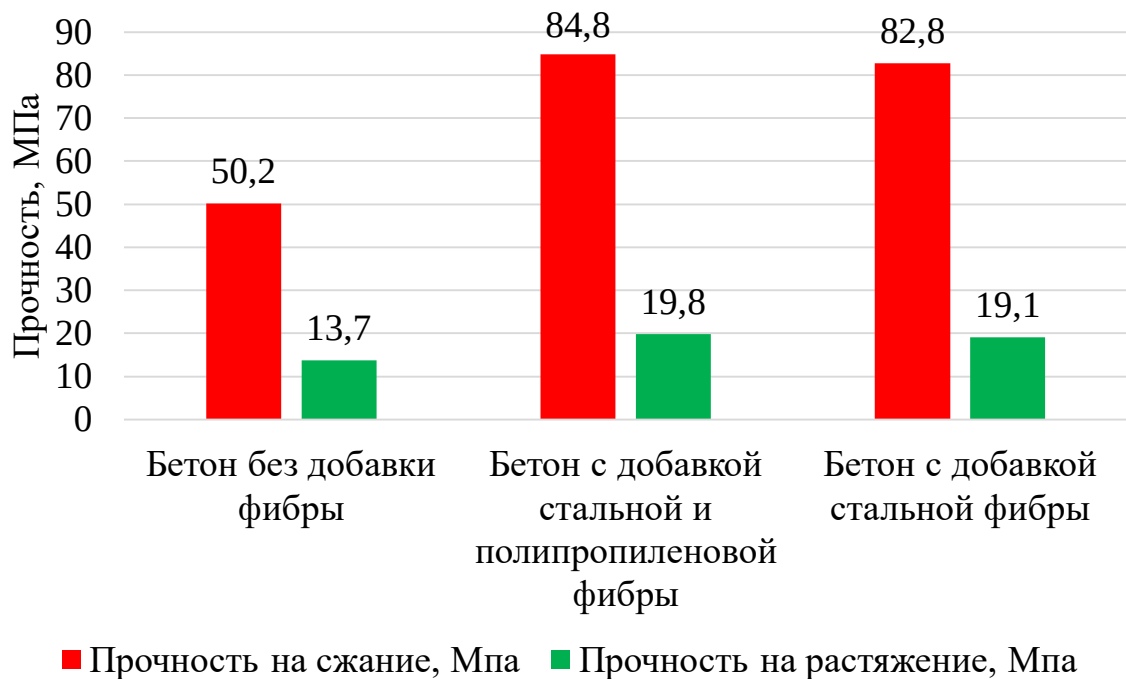


Рисунок 1.15 – Гистограмма прочности на сжатие бетона без добавки и с добавкой стальной и полипропиленовой фибры [114]

По результатам видно, что предел прочности на сжатие по сравнению с бетоном без добавки увеличивается в 1,7 раза, предел прочности при растяжении – в 1,4 раза. При сравнении бетонов с добавкой и без добавки ППФ показатели фактически равны, при этом стоимость состава бетона с добавкой стальной и полипропиленовой фибры ниже на 25 %, чем у бетона с добавкой только стальной фибры.

Исследования, проведенные в Уфинском государственном нефтяном техническом университете [115], показывают повышение прочности бетона с добавкой ППФ. При этом оптимальный расход ППФ от объема смеси составил 1 %. Прочность на сжатие повысилась в 1,1 раза.

В НИУ МГСУ в 2014 году [116] проведены исследования пределов прочности бетонов с добавкой ППФ с различным содержанием (3 и 6 кг/м³) для разных марок бетона (В40 и В50). Результаты представлены на рисунке 1.16.

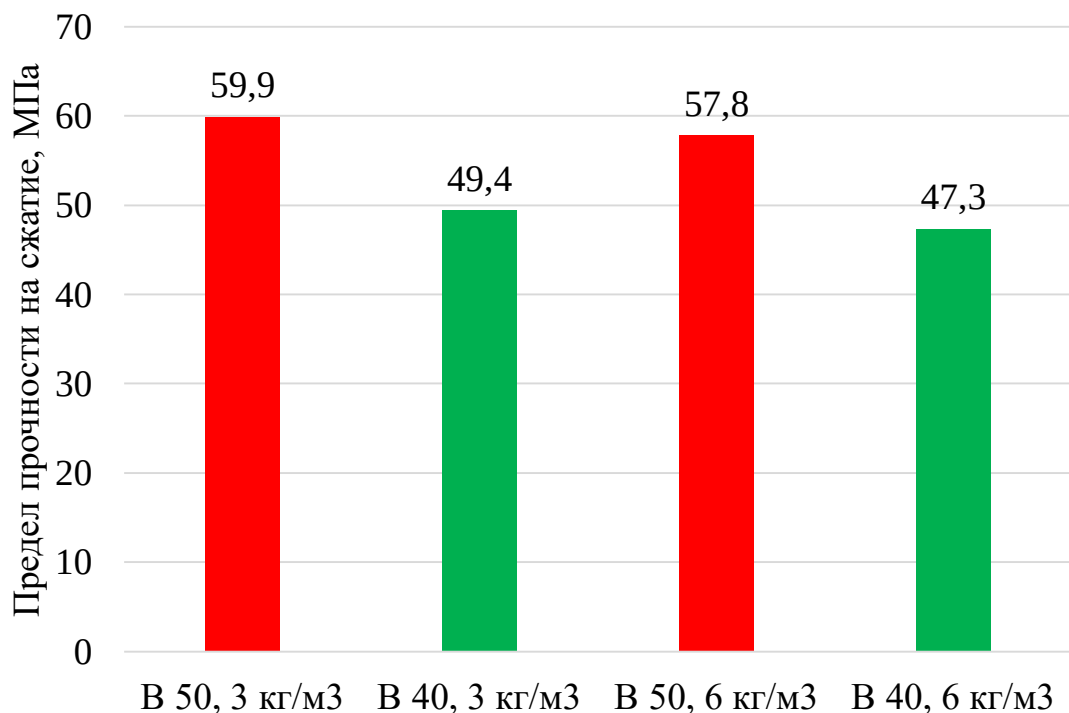


Рисунок 1.16 – Гистограмма прочности на сжатие бетонов без добавки и с добавкой полипропиленовой фибры различных марок [116]

Во-первых, автором сделан вывод о снижении предела прочности на сжатие бетона с добавкой ППФ и понижении марки бетона. Во-вторых, из рисунка 1.16 видно, что при добавке ППФ в размере 6 кг/м³ предел прочности бетона

снижается, поэтому не рекомендуется применять большее количество ППФ для повышения прочности бетона.

В Санкт-Петербурге в 2015 году проведены исследования бетона с ППФ [117–118]. Целью исследований была оценка прочностных характеристик бетона с различным расходом ППФ. При исследовании выявлено, что армирование бетона не влияет на его прочность. Однако остаточное сопротивление растяжению при изгибе выше, чем у неармированного бетона, но при низком сцеплении фибры с бетоном происходит процесс выдергивания (рисунок 1.17).

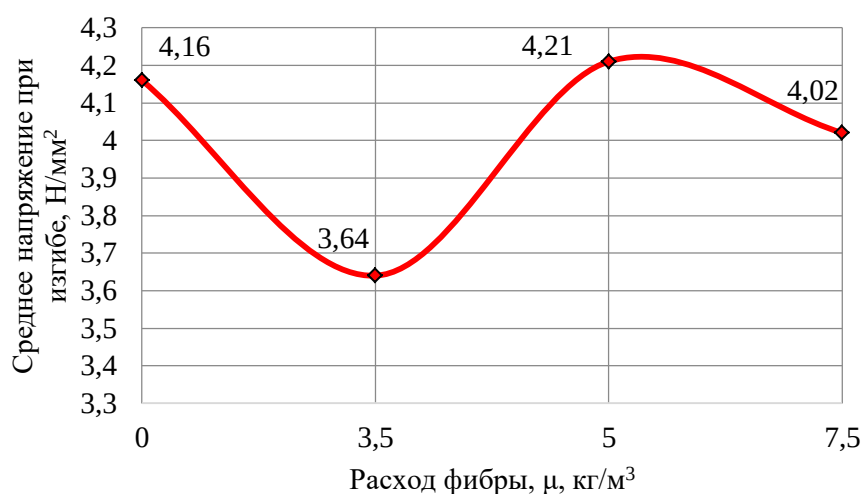


Рисунок 1.17 – График зависимости среднего напряжения при изгибе образцов от количества содержания фибры в бетоне [118]

Самый эффективный расход фибры составил 5 кг/м³ (рисунок 1.9). При расходе ППФ в бетоне 7,5 кг/м³ происходит переармирование бетона, что приводит к снижению прочности.

Исследования прочностных показателей ППФ также проводили [119–120]. Результатами этих исследований являлось улучшение прочностных характеристик бетона.

Ещё одним важным свойством ППФ в бетоне является противодействие растрескиванию материала и защита от взрывообразного разрушения. Полипропиленовая фибра снижает риск растрескивания и усадки бетона, придает бетону эластичность, стойкость к перепадам температур, а также обеспечивает

пожаробезопасность. Эта фибра легко распределяется и перемешивается в растворах и создает трехмерное упрочнение бетона.

Анализ указанных источников позволяет сделать вывод о повышении прочности бетонов при добавке ППФ, однако остается открытым вопрос, как изменяются свойства бетонов с ППФ при воздействии высоких температур, что является очень важным для обеспечения огнестойкости конструкций и возможности определения ее расчетными методами. Также выявлено, что в отечественной научной литературе исследований, посвященных использованию ППФ для защиты от взрывообразного разрушения, нет, в отличие от зарубежных источников.

В качестве примера приведем исследования, проводимые в Австралии [121] на образцах в виде цилиндров размерами 100×200 мм по три образца на каждую серию испытаний с использованием нейлоновой и полипропиленовой фиброй с разными длинами этих волокон. Целью данного эксперимента было установить наиболее оптимальный расход волокна для защиты бетона от растрескивания.

Это исследование показало, что при сочетании волокон нейлона длиной 9 мм и полипропиленовых волокон длиной 19 мм (NY 9 mm / PP 19 mm) достигается высокий уровень защиты от растрескивания бетона и более высокая прочность бетона на сжатие. При этом стоит отметить, чем выше количество полипропиленовых волокон, тем выше связь между порами бетона. Это свойство особенно важно при исследовании взрывообразного разрушения бетона (рисунок 1.18).

NY 9 mm/PP
19 mm

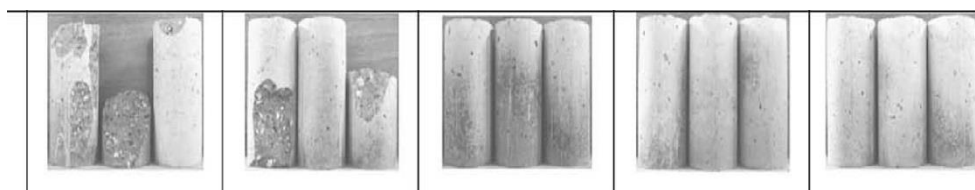


Рисунок 1.18 – Образцы испытания фибробетона на прочность при нагреве (слева направо: процент содержания фибры 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05) [121]

По итогам анализа сделан вывод о необходимости исследования прочностных характеристик фибробетонов, в том числе и бетонов с добавкой ППФ. Актуальность этого обусловлена тем, что, во-первых, ППФ изменяет, а в некоторых случаях улучшает прочностные характеристики бетонов, а во-вторых,

защищает бетон от взрывообразного разрушения. Однако для понимания процесса защиты от взрывообразного разрушения необходимо рассмотреть процесс и механизмы, протекающие в бетоне при взрывообразном разрушении, а также механизмы, позволяющие избежать этого явления при добавке ППФ.

1.3. Причины и механизм взрывообразного разрушения бетона при высокотемпературном воздействии

Взрывообразное разрушение бетона во время пожара чрезвычайно опасно, так как приводит к преждевременному разрушению конструкции вследствие отслаивания защитного слоя бетона, прогреву рабочей арматуры до критической температуры и обрушению конструкции. Исследованиям в данной области положили начало ученые В.Л. Руссо, В.Н. Морозов, Л.В. Павлова, В.И. Гельмиза, В.В. Жуков, А.А. Гусев, В.М. Ройтман, Е.А. Мешалкин.

Основные положения исследований данного явления приведены в статьях [8–9, 122–123], где также представлены теоретические расчеты. Целью всех этих работ являлось изучение такого опасного явления как взрывообразное разрушение нагретого бетона с учетом влажности, газонепроницаемости, деформативности при различных температурах и нагрузках.

Сам процесс является процессом накопления повреждений в капиллярно-пористой структуре материала при нагружении. Объясняется это явление действием сжимающих напряжений и испаряющейся в порах бетона влаги, фильтрационным переносом паровоздушной смеси, возникновению растягивающих и температурных напряжений и особенностями видов бетона.

Практически на начальном этапе прогрева конструкции в зоне, примыкающей к обогреваемой поверхности (зона испарения), создается высокий градиент температур, давлений и влагосодержания [8] (происходит процесс нагрева влаги, которая при температуре примерно 90–170 °С начнет переходить в пар). При этом по мере прогрева конструкции зона испарения влаги будет двигаться вглубь материала и стремиться к необогреваемой поверхности конструкции, по мере продвижения увеличивая избыточное давление, рост градиента темпера-

тур и влагосодержания, что при воздействии нагрузки в дальнейшем приводит к еще большим накоплениям нарушений структуры материала. При дальнейшем воздействии пожара на конструкцию будет продолжаться процесс накопления нарушений k до тех пор, пока это значение не приблизится к показателю критических накоплений нарушений $k_{кр}$, вследствие чего образуется магистральная трещина, которая приведет к образованию осколка и его последующему отслоению. При этом условие послойной потери целостности материала записывается следующим образом [8]:

$$k \geq k_{кр}. \quad (1.1)$$

На рисунке 1.19 в графическом виде представлены причины взрывообразного разрушения бетона [8].

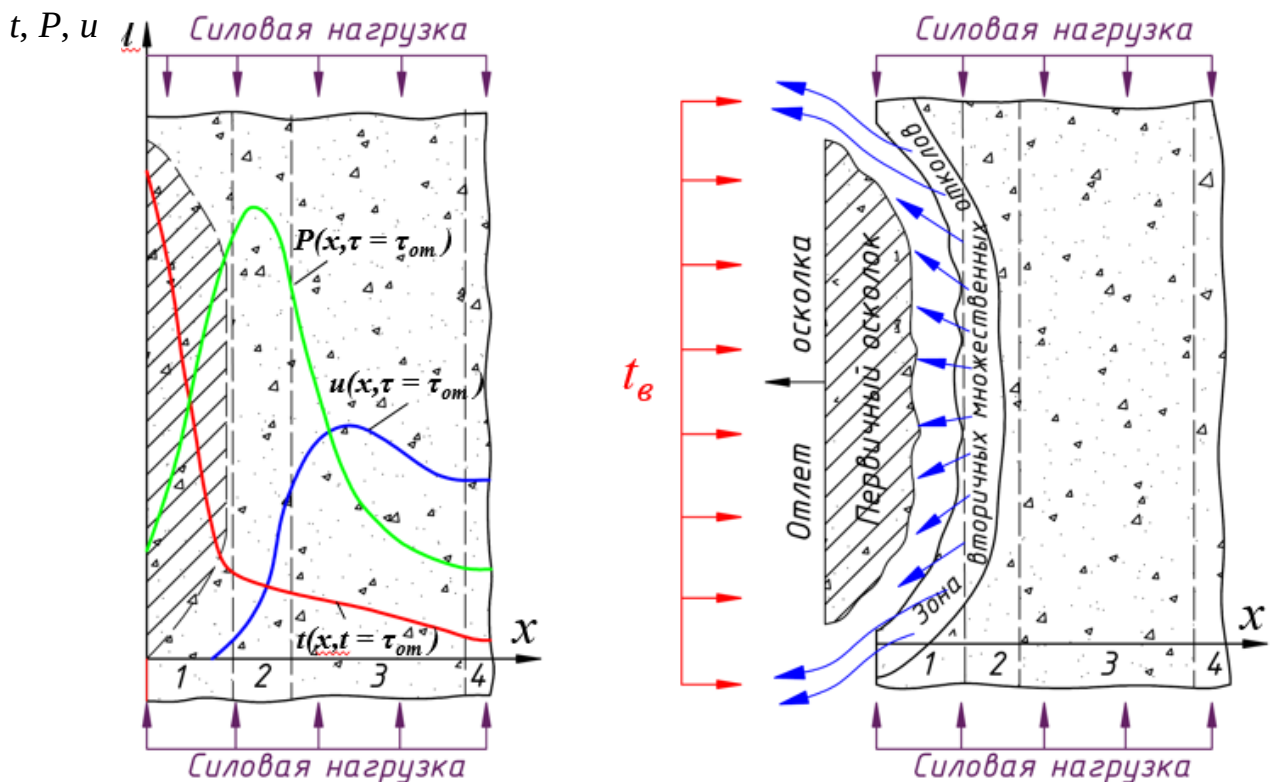


Рисунок 1.19 – Причины взрывообразного разрушения тяжелого бетона: 1 – сухая зона бетона; 2 – зона испарения; 3 – зона повышенного влагосодержания; 4 – зона начального влагосодержания [8]

Данное явление можно исследовать двумя путями: первый – проведение большого количества натурных экспериментов с конструкциями с применением

разных видов бетонов и при разных процентах содержания влаги, второй – расчетный метод, представленный в вышеуказанных статьях.

Результаты, описанные в статьях В.Л. Руссо, В.Н. Морозова, Л.В. Павловой, В.И. Гельмиза, В.В. Жукова, А.А. Гусева, В.М. Ройтмана, легли в основу работы [124], где представлены основные положения по защите железобетонных конструкций от взрывообразного разрушения при проектировании и возможности теоретического расчета этого явления.

Вариант предотвращения данного явления представлен на графике (рисунок 1.20), где отражены толщины конструкций и нагрузки, которые не должны превышать значений для разных видов бетона.

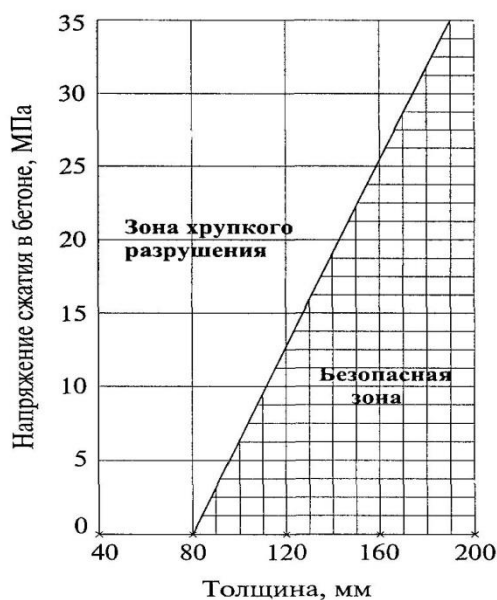


Рисунок 1.20 – Зависимость взрывообразного разрушения бетона от напряжения сжатия в бетоне и его толщины [124]

Взрывообразное разрушение в основном происходит в конструкциях, в которых влажность превышает [124]:

- 3,5 % для тяжелого бетона с силикатным заполнителем;
- 4 % для тяжелого бетона с карбонатным заполнителем;
- 5 % для легкого конструкционного керамзитобетона плотностью 1200 кг/м³.

Однако в [124] не представлен такой метод защиты от взрывообразного разрушения как введение в состав бетона микроволокон полипропилена.

Как было отмечено выше, при высокой влажности железобетонной конструкции (3,5 % и более) и ее прогреве создается зона испарения, т.е. влага, находящаяся в структуре материала, переходит в пар. При этом диапазон температуры перехода влаги составляет 90–170 °С. В зоне испарения создается избыточное давление, а при сочетании давления и нагрузки происходит накопление нарушений в структуре бетона. Добавление ППФ позволит избежать этого вследствие низкой температуры плавления полипропилена, которая равна примерно 140–160 °С. При нагреве конструкции одновременно с преобразованием воды в пар выплавляется ППФ. В результате, на месте фибры образуются микроканалы, по которым пар может перемещаться, не создавая избыточного давления. А так как температура нагретого пара и влаги выше температуры плавления полипропилена, то при дальнейшем нагреве конструкции нагретый пар по мере перемещения и плавления фибры будет свободно двигаться к необогреваемой поверхности. При этом минимизируется накопление нарушений структуры бетона.

Эта мера защиты железобетонных конструкций подтверждается и описывается в статьях [66, 121].

Исходя из этого, необходимо рассмотреть крупномасштабные испытания огнестойкости конструкций с ППФ.

1.4. Влияние добавки полипропиленовой фибры на огнестойкость железобетонных конструкций

Экспериментальные исследования огнестойкости перекрытий с добавкой ППФ проводились на базе научно-производственной компании «Си Айрлайд» [125].

Для проведения эксперимента использовался тяжелый бетон марки В60 с плотностью 2200 кг/м³, в одно перекрытие добавлялась ППФ. Размеры железобетонных перекрытий составляли 1700×1000×200 мм. В результате, перекрытия с добавкой фибры показали предел огнестойкости в 180 мин. В перекрытиях без добавки произошло взрывообразное разрушение в первой трети часа, в пе-

рекрытиях с добавкой ППФ такое явление не происходило. В течение эксперимента делались фото полипропиленовой фибры до и после нагрева (рисунок 1.21, 1.22).

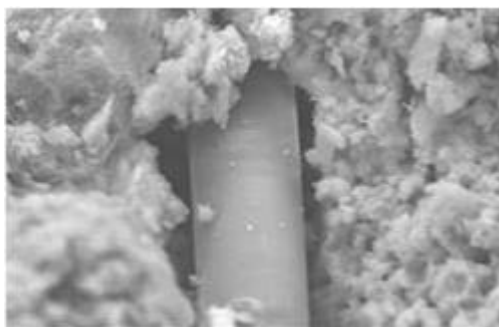


Рисунок 1.21 – Полипропиленовая фибра в бетоне до начала огневых испытаний [125]

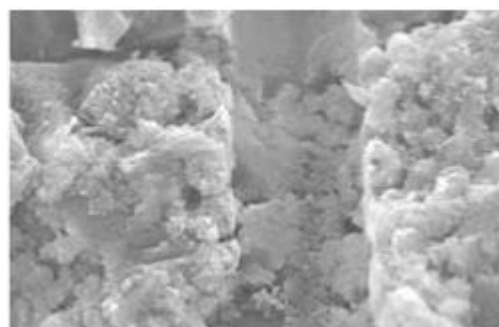


Рисунок 1.22 – Выплавление ППФ в бетоне после огневых испытаний [125]

На фото видно наличие полипропиленовой фибры в бетоне до нагрева и отсутствие ее после воздействия температуры более 200 °С, что подтверждает предположения о ее выплавлении и образовании микроканалов.

Однако остается необходимость в исследовании возможности защиты бетонов от взрывообразного разрушения посредством добавки ППФ.

В зарубежных научных источниках говорится о защите железобетонных конструкций от взрывообразного разрушения за счет добавления в состав бетона ППФ, способ и механизм защиты описан в статье [126] и представлен ниже.

Исследования, проводимые в Португалии в 2010 году [127] с железобетонными колоннами с использованием стальной и полипропиленовой фибры, показали свою эффективность. Для испытаний были изготовлены железобетонные колоны размерами 250×250 и высотой 3 м. Процент арматуры в тестируемых колоннах варьировался в зависимости от процентного содержания стальной фибры, что является обычно суммарным количеством стали (стальные волокна + стальная арматура). Целью данного исследования было изучение возможности замены продольных арматурных стержней в бетонной колонне на стальные волокна. Кроме того, в бетон были также добавлены полипропиленовые волокна в целях повышения огнестойкости колонн и избежание его взры-

вообразного разрушения. Испытания проводились в условиях стандартного температурного режима. Колонна С3 изготавливалась из бетона с добавлением стальной фибры в размере $16,56 \text{ кг/м}^3$ и полипропиленовой фибры в размере $1,5 \text{ кг/м}^3$, а также с четырьмя арматурными стержнями диаметром 20 мм. Колонна С4 изготавливалась без добавления фибры и с четырьмя арматурными стержнями диаметром 25 мм. В результате выявлено, момент потери несущей способности колонн С4 и С3 одинаков. За счет уменьшения диаметра рабочей арматуры и добавления стальной фибры колонна С3 показывает такие же результаты. Тем самым можно сделать вывод, что за счет добавления стальной фибры можно уменьшить расход стальной рабочей арматуры. Также в качестве положительного момента можно отметить то, что в результате стальная фибра придает конструкции высокую пластичность и уменьшает раскрытие трещин.

Полипропиленовая фибра защищает конструкции от взрывообразного разрушения, что также положительно влияет на огнестойкость конструкций (рисунки 1.23, 1.24).



Рисунок 1.23 – Колонна С1
после испытания [127]



Рисунок 1.24 – Колонна С4
после испытания [127]

На рисунках 1.23, 1.24 представлен вид колонн С1 и С4. Видно, что на колонне С4 по всей высоте произошло взрывообразное разрушение, колонна С1

такому явлению не была подвержена. Связано это с тем, что в колонне С1 в объеме бетона присутствовала ППФ с расходом $1,5 \text{ кг/м}^3$.

Стоит отметить, что железобетонные конструкции предрасположены к явлению взрывообразного разрушения в основном в средах с высокой влажностью, где бетон может насыщаться этой влагой. Особенно это актуально для тоннелей метрополитена или автодорожных тоннелей.

Основным конструктивным элементом в тоннелях автодорожных и метрополитена являются железобетонные блоки обделки (тубинги), которые эксплуатируются в условиях повышенной влажности. Ранее установлено [1, 12, 106], что железобетонные конструкции из тяжелого бетона с влажностью более 3,5 % при пожаре имеют склонность к взрывообразному разрушению.

Например, в статье [128] описано, что возникновение пожаров в тоннелях сопровождается разрушением конструкций вследствие взрывообразного разрушения. Для предотвращения последствий этого явления и повышения прочности конструкции применяют сталефибробетон в сочетании с полипропиленовыми микроволокнами, что позволяет минимизировать эффект взрывообразного разрушения. Данная технология защиты железобетонных конструкций, а особенно для тоннельных сооружений, является очень эффективной и позволяет повысить как их прочность, так и огнестойкость. Так, например, проводимые исследования железобетонной обделки с добавкой и без добавки ППФ показали ее эффективность (рисунок 1.25).



Рисунок 1.25 – Испытания железобетонных тубингов с добавкой и без добавки полипропиленовой фибры на огнестойкость

На рисунке 1.25 видно, что в железобетонном тьюбинге без добавки фибры имеются достаточно сильные повреждения защитного слоя и вскрытие рабочей арматуры. В бетоне с добавкой фибры отсутствуют разрушения защитного слоя арматуры. Следует вывод, что данный способ пассивной защиты эффективен. Это говорит о необходимости исследований в данном направлении и определения прочностных и теплотехнических показателей.

Взрывообразное разрушение вызывает большую опасность обрушения конструкций зданий и сооружений, в том числе тоннельных сооружений. При откалывании защитного слоя конструкции ее несущая способность и огнестойкость значительно падает, что может привести к гибели множества людей и большому материальному ущербу, поэтому крайне важным является проведение дальнейших исследований в данном направлении.

1.5. Влияние добавки фибры на теплофизические характеристики бетонов

Предел огнестойкости железобетонных конструкций определяется путем решения теплотехнической и прочностной задачи [34]. В свою очередь, для решения теплотехнической задачи необходимо знать теплофизические характеристики компонентов железобетонных конструкций (бетон, арматура и др.). Основными теплофизическими характеристиками строительных материалов являются теплопроводность и теплоёмкость c_t .

Для бетона в процессе его прогрева эти характеристики сильно отличаются от нормальных температур. Зависят эти изменения от вида, плотности, влажности, а также температуры. Теплофизические характеристики изменяются также с введением различных добавок в бетон, например, фибры.

В настоящее время существует большое количество методов определения теплофизических характеристик, которые делятся на две группы: стационарные и нестационарные [129]. Основой стационарных методов является неизменность во времени температурных полей, поэтому они относятся к более простым. Так, для исследования твёрдых тел относят метод плоского слоя, метод

продольного теплового потока. К отрицательным сторонам этих методов относятся невозможность одновременного определения коэффициентов теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности, а также высокую стоимость их проведения.

Один из таких методов описан в статье [130]. Исследования проводились на оборудовании для термического анализа и измерения теплофизических характеристик *STA 449* на образцах кубической формы со стороной грани 0,15 м с добавкой стальной фибры диаметром 0,4 мм и длиной 20 мм.

В результате исследования получены эмпирические зависимости для:

- марочного бетона [130]:

$$\lambda_t = \sqrt{0,71 + 32,92/(T - 273)} , \quad (1.2)$$

$$c_t = \sqrt{918742 + 1667,92/(T - 273)} ; \quad (1.3)$$

- для торкрет-бетона [130]:

$$\lambda_t = \sqrt{0,73 + 29,28/(T - 273)} , \quad (1.4)$$

$$c_t = \sqrt{995628 + 1607,33/(T - 273)} ; \quad (1.5)$$

- для торкрет-фибробетона [130]:

$$\lambda_t = \sqrt{0,66 + 29,28/(T - 273)} , \quad (1.6)$$

$$c_t = \sqrt{643563 + 1058,48/(T - 273)} . \quad (1.7)$$

В основе второй группы методов лежит идея об определении теплофизических характеристик при изменении температуры во времени. В нашем случае используется температурная зависимость стандартного режима пожара.

В России исследованиями теплофизических характеристик бетона при стандартном температурном режиме пожара занимались такие ученые, как А.И. Яковлев, Л.В. Шейнина, А.Н. Сорокин, В.М. Ройтман.

В статье [34] описаны основные положения определения теплофизических характеристик путем решения обратной задачи нестационарной теплопроводности. Заключается этот метод в определении коэффициентов теплопровод-

ности λ_t и теплоёмкости c_t за счет сопоставления экспериментальных и расчётных зависимостей прогрева бетона во времени.

Экспериментальные зависимости прогрева бетона во времени находятся путем огневых испытаний специально изготовленных бетонных плит. Для получения расчётных зависимостей прогрева бетона во времени теплотехническую задачу можно решить численными методами (метод элементарных балансов Ваничева, метод конечных элементов, метод конечных разностей).

В данной работе [34] производились огневые испытания различных бетонных плит с целью получения теплофизических характеристик. Для эксперимента применялись такие бетоны, как керамзитобетон со степенями уплотнения 1500 кг/м^3 и 1600 кг/м^3 , бетон на трепельном заполнителе, поризованный бетон.

Для фибробетонов такие показатели фактически отсутствуют, имеется незначительное количество работ, где исследовались, в основном, сталефибробетоны.

Например, исследования [107] теплофизических характеристик сталефибробетона. Для экспериментов были изготовлены 6 плит размерами $1,1 \times 1,1 \times 0,1$ м. Изготавливались плиты с различным расходом фибры: три плиты имели расход 47 кг/м^3 , остальные плиты – расход 117 кг/м^3 . Обусловлены расходы тем, что оптимальный процент армирования по объему лежит в пределах от 0,6 до 1,6 %.

При изготовлении плит для измерения экспериментальных температурных зависимостей в сечении плиты по высоте устанавливали 6 хромель-алюмелевых термопар.

В ходе проведения эксперимента было установлено, что теплофизические характеристики сталефибробетона не показали существенных различий в коэффициентах теплопроводности и теплоемкости по сравнению с тяжелым бетоном. Поэтому для решения теплотехнической задачи и определения пределов огнестойкости расчетными методами использовались коэффициенты теплоемкости и теплопроводности для тяжелого бетона на гранитном щебне [107]:

$$\lambda_t = 1,2 - 0,00035 \cdot t \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \quad (1.8)$$

$$c_t = 0,71 + 0,0084 \cdot t \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}. \quad (1.9)$$

Показатели теплоёмкости и теплопроводности важны при оценке огнестойкости строительных конструкций расчётными методами. в технической литературе достаточно хорошо изучены и описаны коэффициенты для различных бетонов для использования их при оценке огнестойкости железобетонных конструкций зданий и сооружений. Что касается фибробетонов, в том числе и бетонов с добавкой ППФ, то для них данные показатели недостаточно изучены, поэтому исследования их теплофизических характеристик особенно актуальны. Особенно важно определить данный показатель для решения задач огнестойкости посредством расчётных методов и численного моделирования.

1.6. Обзор существующих методов оценки огнестойкости железобетонных конструкций

Согласно пункту 9 статьи 87 [131] предел огнестойкости строительных конструкций определяется в условиях натурных огневых испытаний. Однако исходя из пункта 10 статьи 87 имеется возможным определять пределы огнестойкости строительных конструкций расчётно-аналитическими методами, установленными нормативными документами по пожарной безопасности, при условии, если аналогичные конструкции проходили испытания. Поэтому необходимо рассмотреть существующие в настоящее время расчётно-аналитические методики.

Расчет огнестойкости железобетонных конструкций производится по теории сопротивления железобетона. Данная теория является частью механики твердого тела и главная ее задача — определение напряжённо-деформированного состояния вследствие действия различных нагрузок, а также температурного воздействия при пожаре.

В основе теории расчёта железобетонных конструкций заложен метод расчёта сечений по двум группам предельных состояний. Расчет огнестойкости

относится к первой группе, где рассчитывается потеря несущей способности железобетонных элементов от совместного действия нагрузки и пожара.

Впервые расчеты огнестойкости предложены учеными А.И. Яковлевым, В.П. Бушевым и др., и изложены в работах [3, 37, 41–42, 47]. Численное определение огнестойкости сводится к решению двух задач: теплотехнической и статической. Основной целью теплотехнической задачи является определение распределения температурных полей по сечению железобетонной конструкции при воздействии стандартного температурного режима пожара. Также это зависит от вида воздействия пожара на конструкцию (обогрев с одной стороны, трехсторонний и четырехсторонний прогревы) и от разновидности температурного режима пожара.

Целью решения статической части расчёта является определение несущей способности конструкций с учетом изменения прочностных показателей основных составляющих ее материалов, зависящие от температуры и времени, что определяется в теплотехнической задаче. Решение этих задач дает возможность определить фактический предел огнестойкости конструкций.

Яковлевым А.И. предложены несколько методов расчета железобетонных конструкций, зависящих от расположения их в здании и от действия нагрузок. Первая группа расчетов предложена для статически определимых изгибаемых элементов, к которым относятся плоские элементы (плиты, настилы, панели), стержневые элементы (балки, прогоны, ригели). Вторая группа – статически неопределимые изгибаемые конструкции: плиты, опертые по контуру, балки и балочные плиты с заделкой на опорах. Третья группа – сжатые элементы (колонны и стены).

В работе [52] авторами предложен метод расчёта подземных сооружений после воздействия высоких температур. В статье рассмотрены показатели, влияющие на снижение несущей способности железобетонных конструкций при воздействии пожара. Также выявлено, что несущая способность сегмента железобетонной обделки утрачивается в результате прогрева арматуры до критических температур. Однако в ходе расчёта несущей способности необходимо учи-

тывать температурный момент, образующийся от неравномерного нагрева конструкции по высоте сечения. Предложено, что данная конструкция является сжато-изгибаемой, однако метод расчёта в данной статье не рассмотрен. Исходя из этого сделан вывод, что в настоящее время нет расчётного метода оценки огнестойкости. Поэтому одна из задач данной работы – адаптировать такой метод, исходя из вида нагружения конструкции.

Также при расчёте по расчётно-аналитическим методам существуют различные допущения, которые влияют на его точность. В основном они относятся к теплотехнической части, так как теплопередача является сложным нелинейным процессом с большим количеством переменных. К основным допущениям относят следующие:

- замена граничных условия 3-го рода на условия 1-го рода. На поверхности материала задается определенная температура, после чего вычисляется температура прогрева конструкции от времени;
- на поверхности задается мгновенно установившаяся температура равная 1250 °C;
- введение усредненных значений коэффициентов теплопроводности и теплоемкости.

Исходя вышеизложенного, для улучшения точности расчёта необходимо привлечь такие программные комплексы, которые позволят учесть все недостатки. Для моделирования и расчёта огнестойкости используются зарубежные программные комплексы *ANSYS*, *NASTRAN*, *SAFISTIC* и др.

Указанные программные комплексы основаны на методе конечных элементов (МКЭ). Одним из главных преимуществ этих комплексов заключается в выполнении расчётов большого количества задач, включая механические задачи (механика твердого тела). При этом они позволяют учитывать упругопластические деформации, которые могут зависеть от температур. Производят теплотехнический и статический расчёт с учетом геометрической и физической нелинейности конструкций и материалов. Также могут учитывать различные температурные режимы пожаров. Однако у данных комплексов имеется и ряд

недостатков. Первый недостаток заключается в высокой стоимости лицензии на эти программы. Второй – в необходимости высоких компьютерных мощностей, затрачиваемых в процессе решения задачи.

Сегодня разрабатываются отечественные программы, позволяющие оценивать огнестойкость тоннельных сооружений. Например, в [132] представлен метод оценки огнестойкости на основе математического моделирования несущих конструкций типа многоэлементных рам. Программа учитывает нелинейную задачу тепломассопереноса и физическую нелинейность статике. Также в программе учитываются поры бетона с имеющейся в них жидкостью, что очень важно при оценке огнестойкости неоднородных материалов. Однако данная программа рассчитывает тоннели прямоугольного сечения. В рамках данной диссертационной работы планируется произвести расчет конструкций двухпутных тоннелей круглого очертания, поэтому данная программа не подходит для исследований. В настоящее время все более широко развиваются программные комплексы, которые позволяют произвести расчёты теплотехнической задачи с учетом физической и теплотехнической нелинейности свойств материалов, например, позволяющие учесть влагу в порах бетона [133–137], однако эти программы платные. Поэтому необходимо выбрать такой программный комплекс, который позволит решать сложные задачи с наименьшими финансовыми затратами.

Для решения задач был выбран продукт *ANSYS*, так как на данную программу разработчиками предоставляется студенческая лицензия для студентов, магистров и аспирантов, что делает эту программу доступной. Данный продукт планируется применять для определения распределения температурных полей, т.е. для решения теплотехнической задачи. Статический расчет планируется выполнять с привлечением известных методик, учитывающих вид загрузки конструкции.

Стоит отметить, что особенностью тоннельных сооружений является возникновение таких режимов пожара, которые будут отличаться от стандартного. Принимая это во внимание, при расчете огнестойкости необходимо учесть тем-

пературные режимы, которые могут в значительной степени отличаться от стандартного режима пожара.

Тоннели в основном служат для доставки из одной точки в другую различного рода грузов, в числе которых разные нефтепродукты (бензин, дизельное топливо и т.д.). Данный вид продуктов легковоспламеняем и представляет высокую пожарную опасность и взрывоопасность. Поэтому при пожарах в тоннельных сооружениях и при разливе нефтепродуктов существует угроза возникновения более интенсивного горения, характеризующегося более высокими температурами и высокой скоростью распространения пламени в процессе развития пожара. В настоящее время в Российской Федерации разработан и утвержден в нормативных документах «углеводородный температурный режим пожара», который описывает процесс горения нефтепродуктов и характеризуется резким скачком температуры на интервале 0–10 мин. примерно с 20 до 1100 °С. Данная кривая, представленная в [138], описывается следующей зависимостью (рисунок 1.27) [138]:

$$T=1080 \left[1 - 0,325^{-0,167t} - 0,675^{-2,5t} \right] + 20. \quad (1.10)$$

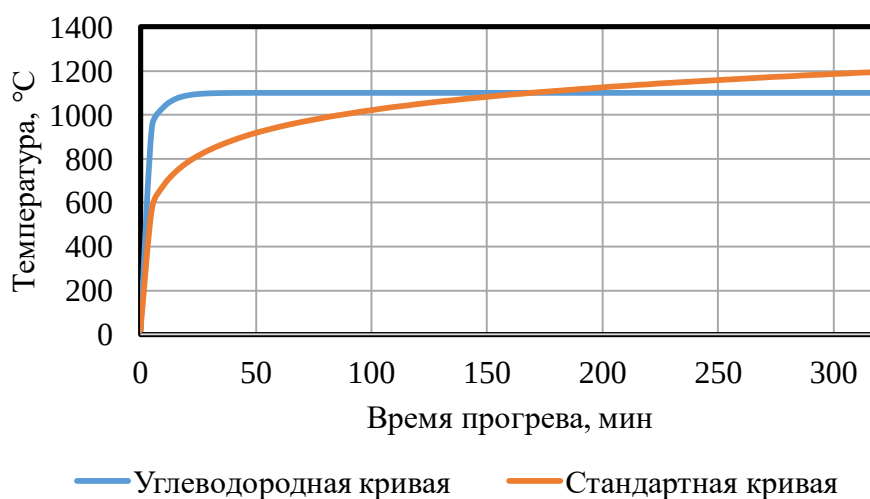


Рисунок 1.27 – Зависимость температурного режима пожара от времени воздействия [138]

При наложении стандартной и углеводородной температурных зависимостей видно, что на промежутке от 0 до 180 мин. температуры углеводородного

режима значительно превышают температуры стандартного режима примерно в 1,6 раза. Особенно важным участком является интервал 0–50 мин., когда для углеводородного режима происходит резкий скачок роста температур до 1100 °С. В результате на конструкцию будет воздействовать температурный удар и в последующем высокая температура, которая увеличит интенсивность и уменьшит время прогрева конструкции до критической температуры, при которой произойдет потеря несущей способности.

Исходя из перечисленных предпосылок направление исследований огнестойкости конструкций при реальных температурных зависимостях пожара является также актуальным.

1.7. Формулирование цели и задач диссертационного исследования

На основании вышеизложенного анализа видно, что ППФ при добавке в бетон позволяет увеличить его прочностные характеристики и устранить недостатки, а именно повысить прочность при растяжении, уменьшить хрупкость. Также ППФ защищает бетон от взрывообразного разрушения. Однако остаются открытыми вопросы поведения бетона с ППФ при высокотемпературном нагреве, а именно: как изменяется предел прочности бетона при сжатии, каково влияние фибры на коэффициенты теплопроводности и теплоемкости и на огнестойкость конструкций в целом.

В связи с обозначенными проблемами целью работы является повышение огнестойкости железобетонных конструкций подземных сооружений с использованием бетона с ППФ для защиты его от взрывообразного разрушения.

Основными задачами при проведении исследования являются:

- экспериментальное определение прочностных характеристик бетона с ППФ, применяемого для отделки подземных сооружений, при нагреве;
- определение теплофизических характеристик бетона с добавкой ППФ, используемого в железобетонной отделке подземных сооружений;

– экспериментальное определение огнестойкости железобетонных тюбингов, а также рассмотрение взрывообразного разрушения в процессе эксперимента;

– адаптация и апробация аналитической модели расчета огнестойкости железобетонных тюбингов с ППФ.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА С ДОБАВКОЙ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРЫ

2.1. Предварительное планирование эксперимента по определению прочности на осевое сжатие бетона при прогреве

Для уменьшения вероятности хрупкого разрушения бетона в строительных конструкциях тоннелей в настоящее время используют пассивный метод защиты за счет добавки ППФ в его состав [128]. Однако до сих пор остаются пробелы в области изучения прочностных характеристик и поведения бетонов с добавкой фибры (в том числе и полипропиленовой) при воздействии пожара.

Поэтому целью данного исследования является получение экспериментальных данных о прочностных свойствах бетона с добавкой ППФ при воздействии высоких температур и сравнение полученных прочностных характеристик бетона с добавкой отечественной и импортной ППФ.

Для достижения поставленной цели использовалась методика проведения эксперимента по ГОСТ [83]. Однако в указанной методике содержатся положения для проведения эксперимента с образцами без предварительного нагрева. Кроме того, в ней не отражены основные положения исследования предела прочности бетона на сжатие при высокотемпературном прогреве. Поэтому данная методика дорабатывалась в ходе исследования.

Перед началом проведения экспериментов стоит вычислить нужное количество испытываемых образцов для уменьшения затрат на их изготовление. Чтобы решить данную задачу, нужно установить внутрисерийный коэффициент вариации $\bar{V}$.

Согласно приложению А [95] коэффициент вариации рассчитывается по результатам любых последовательных 30 серий испытания образцов бетона одного класса. Для этого определяют размах W_i и прочность бетона R_i в каждой серии, а также средний размах $\bar{W}$, МПа, и среднюю прочность $\bar{R}$, МПа по всем 30 сериям по формулам:

$$W_i = R_{i,\max} - R_{i,\min}, \quad (2.1)$$

$$\overline{W} = \frac{\sum_{i=1}^{30} W_i}{30}, \quad (2.2)$$

$$\overline{R_i} = \frac{\sum_{i=1}^{30} R_i}{30}, \quad (2.3)$$

$$\overline{V} = \frac{\overline{W}}{d \overline{R_i}}, \quad (2.4)$$

где $R_{i,\max}$ и $R_{i,\min}$ – максимальное и минимальное значения прочности бетона в каждой серии образцов, МПа; d – коэффициент, принимаемый в зависимости от числа образцов в каждой серии по таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Коэффициент, зависящий от числа образцов [95]

Количество образцов	2	3	4	6
d	1,13	1,69	2,06	2,50

По таблице 2.2 с помощью найденного коэффициента вариации можно определить нужное количество образцов для проведения испытаний.

Таблица 2.2 – Определение числа образцов в серии для проведения испытаний [95]

Внутрисерийный коэффициент вариации $\overline{V}$, %	5 и менее	Более 5 до 8	Более 8
Требуемое число образцов в серии, шт., не менее	2	3 или 4	6

Для определения внутрисерийного коэффициента вариации были использованы результаты испытаний, проведенных в МГСУ на кубах размером 100×100×100 мм.

В результате расчетов по формулам (2.1–2.4), описанным в [95], внутрисерийный коэффициент вариации составил 4 %. Следовательно, по полученному коэффициенту для исследования прочности бетона на осевое сжатие будет достаточно двух образцов на каждую заданную температуру при прогреве.

2.2. Описание экспериментальной установки и вспомогательного оборудования

Для подготовки образцов и проведения испытаний прочности на сжатие при нагреве использовалось лабораторное оборудование, описанное по методикам [3, 95]:

- испытательные машины (прессы) для исследования прочности на сжатие;
- сушильный электрический шкаф типа СНОЛ;
- камерная электрическая печь типа СНОЛ;
- сетчатые стеллажи для размещения образцов и оборудование для испытания образцов;
- ванна с крышкой для выдержки образцов над водой.

На рисунке 2.1 представлена камерная лабораторная электропечь сопротивления типа СНОЛ 6/10, которая использовалась для сушки и прогрева образцов.



Рисунок 2.1 – Электропечь сопротивления камерная лабораторная типа СНОЛ 6/10

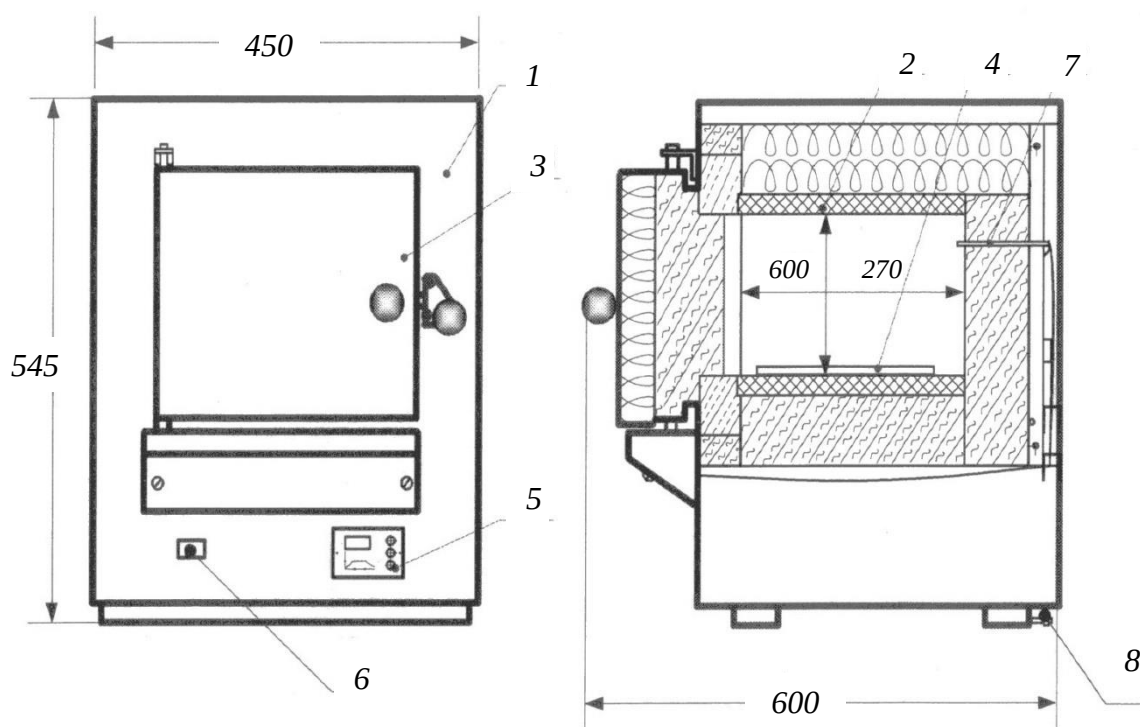


Рисунок 2.2 – Эскиз электропечи СНОЛ 6/10:
 1 – корпус; 2 – керамический муфель; 3 – дверца;
 4 – керамическая подставка; 5 – регулятор температуры;
 6 – выключатель клавишный; 7 – термопара

Электропечь предназначена для термообработки бетонных образцов. Составляет электропечь (рисунок 2.2) из металлического корпуса 1, в верхней части которого расположена нагревательная камера, в нижней части – блок управления. Рабочее пространство электропечи оснащено керамическим муфелем 2, смонтированным в него спиральными нагревателями из железохромоалюминевой проволоки. Нагреватели расположены на боковых стенках и своде печи и полностью заделаны в керамические панели.

Футеровка печи включает в себя два слоя: огнеупорный и теплоизоляционный из легких и сверхлегких материалов на основе шамотно-волоконистых плит и базальтового волокна. Электропечь загружается через проем, закрываемый дверцей 3. Садка устанавливается на керамическую подставку 4.

На лицевой панели размещены регулятор температуры 5 и выключатель клавишный с подсветкой 6. В нагревательной камере на задней стенке расположена термопара 7.

В электрической схеме печи предусмотрен предохранитель для защиты силовых панелей от короткого замыкания, симисторный контактор и магнитный пускатель в качестве исполнительного устройства, регулятор температуры для проведения технологического режима прогрева.

Технические характеристики электропечи СНОЛ 6/10:

- максимальная температура 1050 °С;
- номинальная температура 1000 °С;
- номинальная мощность 2,2 кВт;
- напряжение питающей сети 220 В;
- число фаз – 1;
- частота 50 Гц;
- размеры нагревательной камеры (ширина/длина/высота), мм:
180/270/130.

Для исследования прочности на осевое сжатие использовался пресс БКК-200 (рисунки 2.3, 2.4).



Рисунок 2.3 – Гидравлический пресс БКК-200

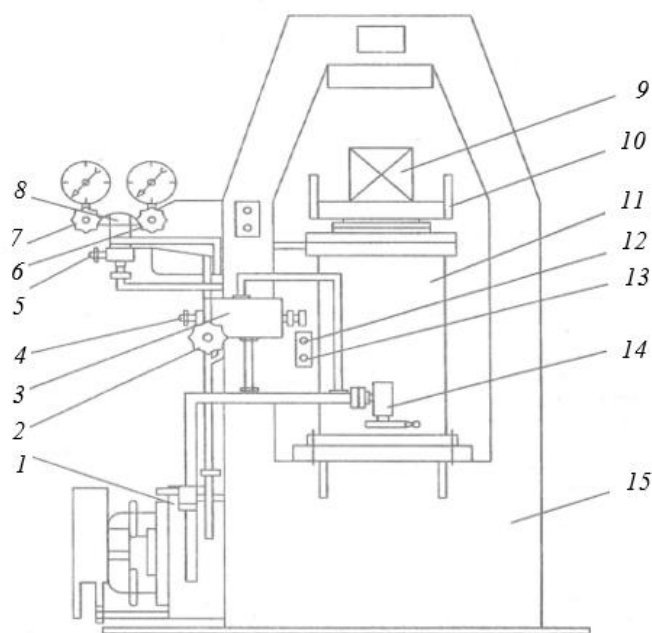


Рисунок 2.4 – Схема гидравлического пресса БКК-200:

- 1 – насосный агрегат; 2 – вспомогательный вентиль; 3 – гидропанель;
 4 – регулировочный вентиль; 5 – вентиль обратного клапана;
 6 – вентиль основного манометра; 7 – вентиль дополнительного манометра;
 8 – манометродержатель; 9 – образец; 10 – плавающая платформа;
 11 – рабочий цилиндр; 12 – кнопка «Пуск»; 13 – кнопка «Стоп»;
 14 – спускной клапан; 15 – станина пресса

Гидравлический пресс БКК-200 состоит из станины, насосного агрегата, рабочего цилиндра, гидропанели, манометродержателя с манометрами и обратным клапаном. На гидропанели имеются регулировочный и вспомогательные вентили для спуска избытка масла. Питание электродвигателя пресса осуществляется от сети переменного тока напряжением 380 В.

2.3. Описание методики и проведение эксперимента

Для исследований прочности бетона с добавкой и без добавки ППФ на осевое сжатие на заводе ОАО «Моспромжелезобетон» были изготовлены кубы размером 100×100×100 мм [3, 95]. 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 (рисунок 2.5).

Для других образцов помимо вышеприведенных составляющих в бетонную смесь добавляли полипропиленовую фибру ProZASK IGS в количестве 1 кг/м³. Диаметр фибры составлял 18 мкм. Длина отечественной полипропиленовой фибры составляла 12 мм (далее – ProZASK IGS 12 мм), импортной – 6 мм (далее – ProZASK IGS 6 мм). Применение ППФ разной длины обусловлено разницей в ее производстве в России и в Англии.



Рисунок 2.5 – Импортная полипропиленовая фибра фирмы ProZASK IGS

В ходе подготовки образцов каждой партии была присвоена маркировка: бетонные кубы без добавки фибры – «К»; бетонные кубы с добавкой ProZASK IGS 12 мм – «Р»; бетонные кубы с добавкой ProZASK IGS 6 мм – «А».

Исследования прочности бетона с ППФ на осевое сжатие при высоких температурах нагрева образцов проводились по разработанной методике с учетом действующих норм. Сущность методов заключается в определении прочности бетона посредством измерения минимальных усилий, разрушающих специально изготовленные и прогретые до определенных температур контрольные образцы бетона при их статическом нагружении с постоянной

скоростью нарастания нагрузки, и последующем вычислении напряжений при этих усилиях.

Образцы изготавливались в лабораторных условиях по установленным методикам. Время твердения образцов до испытаний составила 28 дней. По окончании срока твердения образцы были перевезены в Академию ГПС МЧС России.

Далее образцы выдерживались при температуре 20 °С (±5 °С) 7 дней. После выдержки образцы помещались в сушильный шкаф на 48 часов при температуре 105 °С, при этом скорость нарастания температуры составляла 50 °С/ч в течение 2 часов.

По истечении срока остывшие образцы устанавливались в муфельные печи типа СНОЛ 6/10, описанные выше, и прогревались 4 часа до постоянных температур 200, 400, 600 и 800 °С.

Прогретые образцы вынимались из муфельных печей и устанавливались в гидравлический пресс БКК-200. После установки образца на опорные плиты гидравлического пресса БКК-200 совмещали верхнюю плиту пресса с верхней опорной гранью образца так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Образец нагружали до разрушения непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки до его разрушения (0,6±0,2) МПа/с, при этом время нагружения образца до его разрушения не составляло 30 сек. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принималось за разрушающую нагрузку.

Далее по результатам испытаний рассчитывалась прочность прогретого бетона на осевое сжатие. За прочность бетона на осевое сжатие принимают временное сопротивление R эталонных кубов, определяемое по выражению [95]:

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \quad (2.5)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; A – средняя рабочая площадь образца, мм²; α – переводной коэффициент, зависящий от размеров образца.

Переводной коэффициент α зависит от размера бетонных образцов и принимается равным 0,95 [95] для бетонного куба со сторонами $100 \times 100 \times 100$.

2.4. Обработка полученных экспериментальных данных

Проведенные эксперименты прочности бетона на осевое сжатие позволили получить результаты, которые сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Прочность на осевое сжатие образцов исследуемых составов в зависимости от температуры

Маркировка образцов	Температура образцов, °С				
	20	200	400	600	800
	Прочность на осевое сжатие, R_b , МПа				
К	61.4	68.2	58.6	46.8	14.6
	56.6	61.8	51.5	40.1	12.1
Р	59.3	63.3	51.3	39.1	10.3
	54.2	61.2	49.3	36.8	9.6
А	56.7	60	55.4	39.3	10.5
	52.4	65.8	51.4	35.5	11.7

После проведения исследования экспериментальные данные подверглись статистической обработке, а именно регрессионному анализу. При этом в анализе экспериментальных данных не учитывалось увеличение прочности бетона, так как при расчете огнестойкости железобетонных конструкций с воздействием нагрузки бетон не может набирать свою прочность. Данная обработка проводилась в программном обеспечении *Microsoft Office Excel* по методу наименьших квадратов [139].

Предположим, что точки описывают функцию (2.6), представляющую вид параболы второго порядка (полином второй степени), направленной ветвями вниз:

$$y = -ax^2 + bx + c. \quad (2.6)$$

Следовательно, для описания данной функции нужно воспользоваться системой линейных уравнений (2.7):

$$\begin{cases} a \sum_{n=1}^n x_i^4 + b \sum_{n=1}^n x_i^3 + c \sum_{n=1}^n x_i^2 = \sum_{n=1}^n x_i^2 y_i; \\ a \sum_{n=1}^n x_i^3 + b \sum_{n=1}^n x_i^2 + c \sum_{n=1}^n x_i = \sum_{n=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{n=1}^n x_i^2 + b \sum_{n=1}^n x_i + cn = \sum_{n=1}^n y_i. \end{cases} \quad (2.7)$$

Далее производился расчет зависимостей предела прочности сжатия от температуры. Результаты эксперимента с учетом регрессионного анализа представлены на рисунке 2.6.

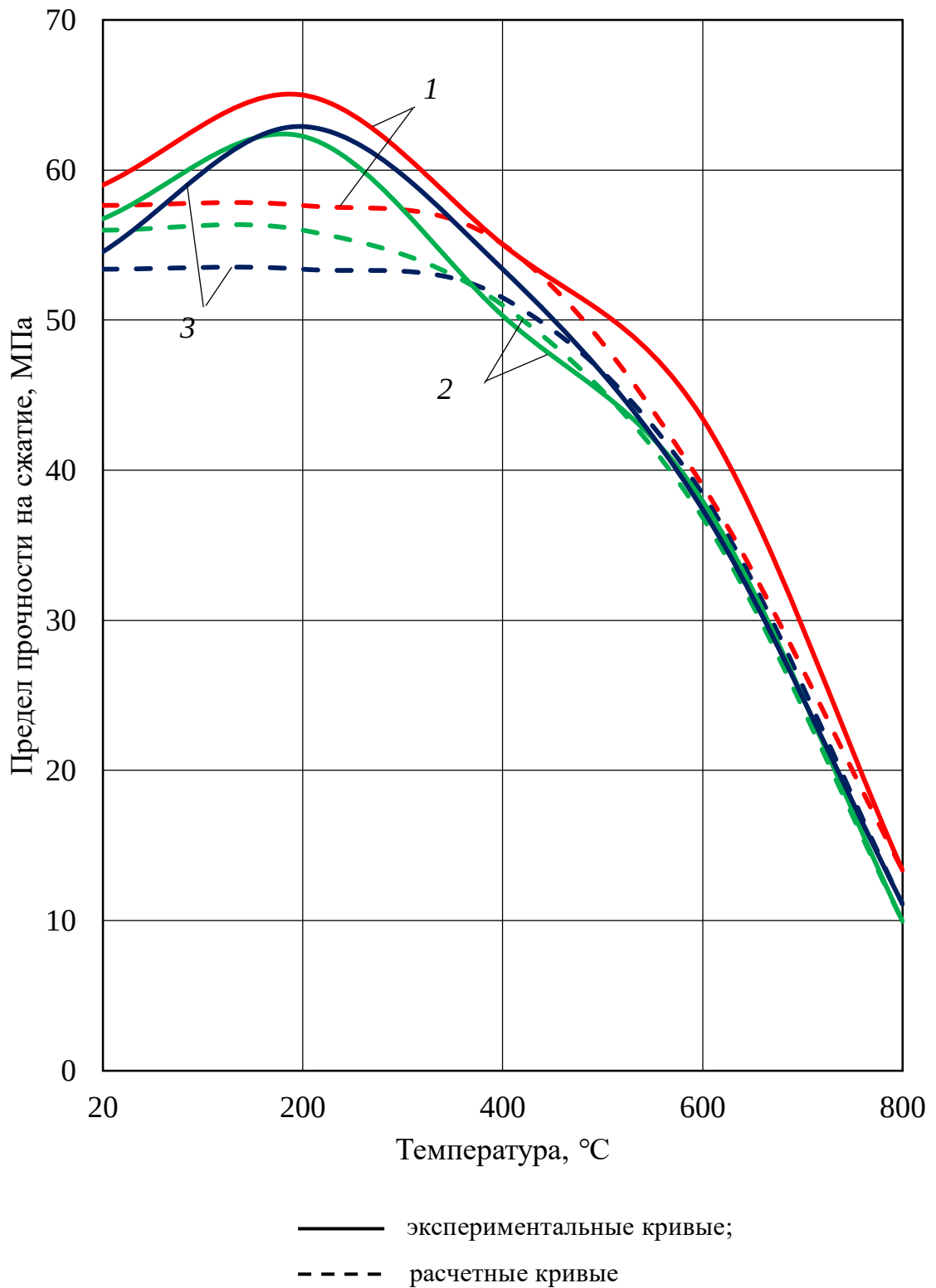


Рисунок 2.6 – Температурные зависимости прочности на сжатие бетона без добавки фибры и с добавкой:
 1 – бетон без добавки фибры; 2 – бетон с добавкой ProZASK IGS 12 мм;
 3 – бетон с добавкой ProZASK IGS 6 мм

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных получены эмпирические зависимости для расчета прочности на осевое сжатие бето-

на без добавки и с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм в зависимости от температуры, которые, как видно из графика не учитывают увеличение прочности бетона (рисунок 2.6). Зависимости имеют следующий вид:

- для бетона без добавки фибры:

$$R_b = -0,00013t^2 + 0,0478t + 56,742, (R^2 = 0,78); \quad (2.8)$$

- для бетона с добавкой ProZASK IGS 12 мм:

$$R_b = -0,00011t^2 + 0,0352t + 55,336, (R^2 = 0,97); \quad (2.9)$$

- для бетона с добавкой ProZASK IGS 6 мм:

$$R_b = -0,00012t^2 + 0,0486t + 52,470, (R^2 = 0,89). \quad (2.10)$$

Коэффициент корреляции R^2 показывает тесноту связей между полученными экспериментальными данными. В нашем случае во всех уравнениях регрессии связь между переменными достаточно высокая.

С помощью полученных выражений можно рассчитывать показатели прочности на осевое сжатие исследованных бетонов при различных температурах нагрева.

Исходя из полученных зависимостей прочности на сжатия, определялись коэффициенты снижения предела прочности γ_{bt} , которые представлены на рисунке 2.7.

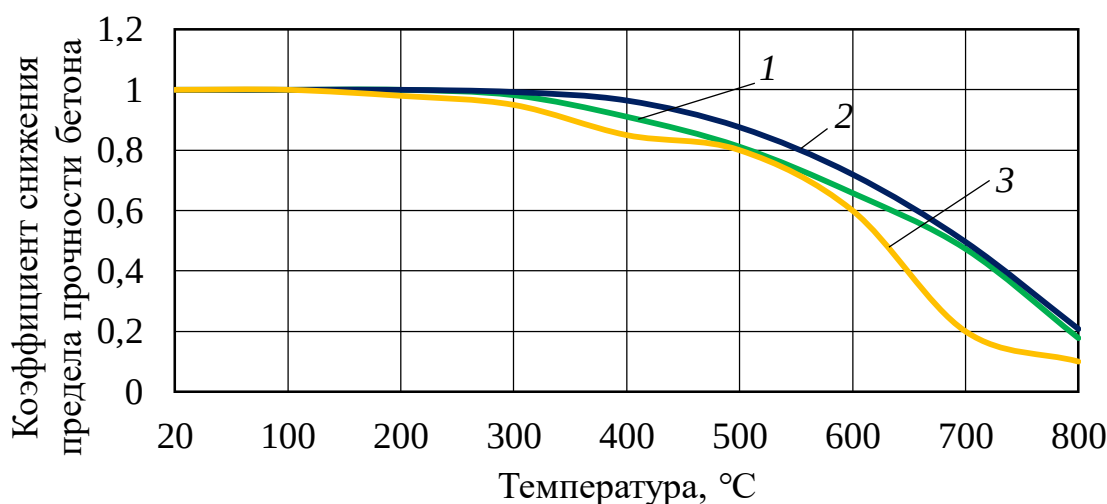


Рисунок 2.7 – Температурные зависимости коэффициента изменения предела прочности на сжатие бетона без добавки фибры и с добавкой:
1 – бетон с добавкой ProZASK IGS 12 мм; 2 – бетон с добавкой ProZASK IGS 6 мм; 3 – данные СТО

Исходя из рисунка 2.7 видно, что полученные данные хорошо согласуются с СТО. Поэтому для расчета огнестойкости рекомендовано использовать следующие значения коэффициентов изменения предела прочности, которые сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Коэффициенты изменения прочности на осевое сжатие образцов исследуемых составов в зависимости от температуры

Вид бетона	Значение коэффициента γ_{bt} при температуре, °C								
	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

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что ППФ снижает прочность бетона на сжатие примерно на 16 % как при нормальной температуре, так и при повышенной. Факт снижения прочности на осевое сжатие подтверждается недавно представленными результатами полученными в НИИЖБ, где снижение прочности для бетонов с добавкой ППФ составляет 15 % [140].

В качестве гипотезы, объясняющей снижение прочности бетона, можно использовать предположение, что добавление ППФ в бетон в количестве 1 кг/м³ вытесняет такое же количество объема цемента и мелкого наполнителя из структуры и не позволяет набрать прочность обычного бетона. Еще одной причиной снижения прочности при нагреве, возможно, является низкая температура плавления ППФ, которая составляет всего 160 °C [121]. В результате нагрева фибробетона до температуры плавления полипропилена изменяется структура бетона, повышается его пористость, что приводит к уменьшению плотности и снижению прочности.

Из этого можно сделать вывод, что добавка полипропиленовых волокон в бетон [121] не способна повысить его прочность даже при высоком процентном содержании фибры в составе бетона. Данная фибра не подходит для этой цели.

Ее использование целесообразно для защиты материала от взрывообразного разрушения. Для повышения же прочности бетона необходимо комбинировать ППФ с другими видами фибр.

При проведении экспериментов были визуально выявлены закономерности разрушения образцов из бетона с добавкой фибры и без добавки. Так, в диапазоне температур 20–200 °С для бетона без добавки фибры характерно разрушение образцов с хлопком, откалыванием кусков цементного камня и крупного заполнителя, разлетом этих частей на расстояние 2–3 м. Разрушение бетонных образцов с добавкой фибры в данном интервале температур было пластичным и бетонный куб практически не изменил свою форму (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Образец из бетона с добавкой полипропиленовой фибры после проведения эксперимента

При нагреве бетонных образцов без добавки и с добавкой фибры выше температуры 600 °С и воздействии нагрузки разрушение бетонных образцов происходит в виде рассыпания составляющих компонентов. Можно предположить, что по достижении высоких температур сцепление между основными компонентами бетона практически отсутствует.

По окончании эксперимента образец имел форму, как и обычный бетон, в виде двух усеченных пирамид, сомкнутыми малыми основаниями (рисунки 2.9, 2.10).



Рисунок 2.9 – Образец из бетона без добавки фибры после проведения эксперимента



Рисунок 2.10 – Образец из бетона с добавкой ProZASK IGS 12 мм после проведения эксперимента

Это явление можно описать следующим образом [141]. При испытании на кубиковую прочность бетона образцы разрушаются вследствие разрыва в поперечном направлении. Объясняется это силами трения, возникающими между поверхностями опор пресса и бетона, которые направлены вовнутрь и препятствуют поперечным деформациям куба. Называется это явление эффектом обоймы (рисунок 2.11).

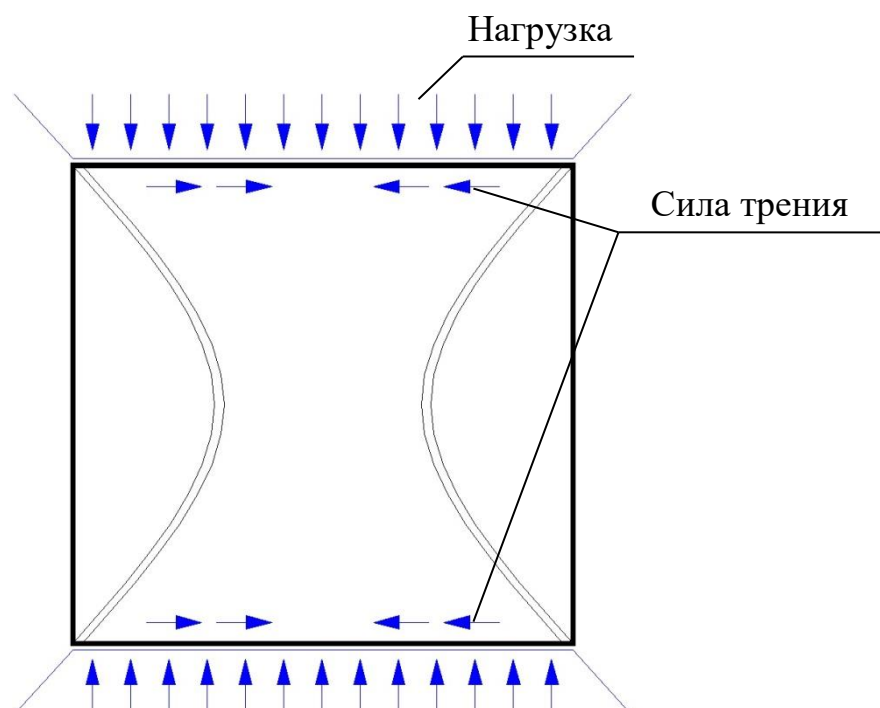


Рисунок 2.11 – Эффект обоймы при испытаниях бетона на прочность

По мере удаления силы трения от торцевых краев кубов их сила становится значительно меньше. Поэтому при исследовании кубиковой прочности бетона образцы после испытаний принимают форму усеченных пирамид. Такое же явление наблюдается и у обычного марочного бетона.

При сравнении прочностных свойств бетона с добавками из двух видов фибры (рисунок 2.9) видно, 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 %. Это возможно объясняется разностью длин волокон отечественной и импортной фибры. При нагреве бетона происходит плавление полипропиленовых волокон и образование пор в структуре бетона. Структура бетона с отечественной фиброй, длина волокон которой 12 мм, при нагреве образуются поры большей длины, чем у бетона с импортной фиброй, длина волокон которой 6 мм. Именно по этой причине прочность бетона с ProZASK IGS 12 мм незначительно снижается по отношению к ProZASK IGS 6 мм. Добавка в бетон отечественной фибры с

меньшей длиной волокон позволит заменить использование импортной, более дорогой, фибры.

Анализ результатов испытаний показал, что характер кривых изменения прочности на сжатие при росте температуры [142] бетона без добавки фибры и с добавкой одинаков для всех образцов, участвовавших в испытаниях (рисунок 2.9). В интервале температур от 20 до 300 °С происходит набор прочности, который характерен для бетона с добавкой и без добавки фибры. В интервале температур от 300 до 800 °С, возможно, в связи с происходящими процессами дегидратации и термической диссоциации, прочность снижается.

В расчётных методиках оценки огнестойкости за нормативную прочность бетона принимается призмная, используемая для расчета железобетонных конструкций. Следовательно, необходимо было провести перерасчёт прочности. Исходя из полученных данных по эмпирической формуле можно рассчитать призмную прочность, которая и будет в расчёте являться нормативной прочностью на сжатие [143]:

$$R_{bn} = B(0,77 - 0,00125B) \quad (2.11)$$

В результате получена призмная прочность: для бетона без добавки фибры – 36,9 МПа; для бетона с добавкой ProZASK IGS 12 мм – 36,8 МПа; для бетона с добавкой ProZASK IGS 6 мм – 33,7 МПа. Так как отличие данных показателей прочности от показателя для бетона В45 (32 МПа), описанного в нормативных документах, незначительно, то в расчёте принимался показатель прочности для бетона В45.

2.5. Выводы по главе

Выполнены экспериментальные исследования прочностных характеристик бетона с добавкой и без добавки ППФ при воздействии температур в диапазоне 20–800 °С, по результатам которых видно, что при добавлении ППФ в объеме 1 кг/м³ наблюдается снижение прочности бетона на осевое сжатие на 16 %.

Получены аналитические зависимости для определения прочностных характеристик бетона на осевое сжатие с добавлением фибры ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм.

В качестве причины снижения прочности бетона с добавкой фибры, по сравнению с обычным бетоном, возможно, является вытеснение из объема бетона цемента, а при нагреве бетона до высоких температур низкая температура плавления ППФ (160 °С) приводит к увеличению его пористости.

Сравнение прочности бетона с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм показало, что в интервале температур от 20 до 300 °С бетон с ProZASK IGS 12 мм имеет более высокие прочностные характеристики (повышение прочности на 12 %), а в интервале температур от 300 до 800 °С у бетона с ProZASK IGS 12 мм прочностные показатели ниже ProZASK IGS 6 мм на 14 %.

При определении прочностных характеристик бетона с добавкой ППФ наблюдается более пластичное разрушение бетонных образцов по сравнению с образцами без добавки фибры.

Уменьшение длины волокон отечественной фибры позволит заменить использование импортной более дорогой фибры в качестве добавки в бетон.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ

Так как в работе предлагается защитить железобетонные тубинги подземных сооружений от взрывообразного разрушения посредством введения в состав ППФ, то необходимо определить теплофизические характеристики, необходимые для оценки огнестойкости расчетными методами. Поэтому в соответствии с поставленными задачами исследования в ходе работы следует определить вышеуказанные характеристики бетонов без добавки и с добавкой фибры ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм. Для решения данной задачи требуется рассмотреть экспериментальные и расчётные методы, приборы и оборудование, необходимое для достижения цели диссертационного исследования.

3.1. Описание экспериментального и вспомогательного оборудования

Для расчета огнестойкости важно учитывать как коэффициент теплопроводности, так и теплоёмкости. В главе 1 выявлено, что с использованием стационарных методик возможно определить только коэффициент теплопроводности. В связи с этим в работе был применен нестационарный метод исследования теплофизических характеристик, при котором можно определить как коэффициент теплопроводности, так и теплоёмкости (описание методов представлено в главе 1).

Для экспериментального исследования теплофизических характеристик использовалось следующее оборудование:

- горизонтальная огневая печь для проведения исследований теплофизических характеристик;
- оборудование для определения влажности бетона;
- оборудование для регистрации экспериментальных данных.

Общий вид горизонтальной огневой печи для исследования теплофизических характеристик представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Малая горизонтальная огневая печь для исследования теплофизических характеристик

Состоит данная установка из огневой камеры, представляющей собой кирпичную кладку из огнеупорного кирпича, двух форсунок для создания стандартного температурного режима в ходе испытаний, двух печных термопар для контроля стандартного температурного режима и смотровое окно. В верхнюю часть установки помещают испытуемый образец (рисунок 3.2).

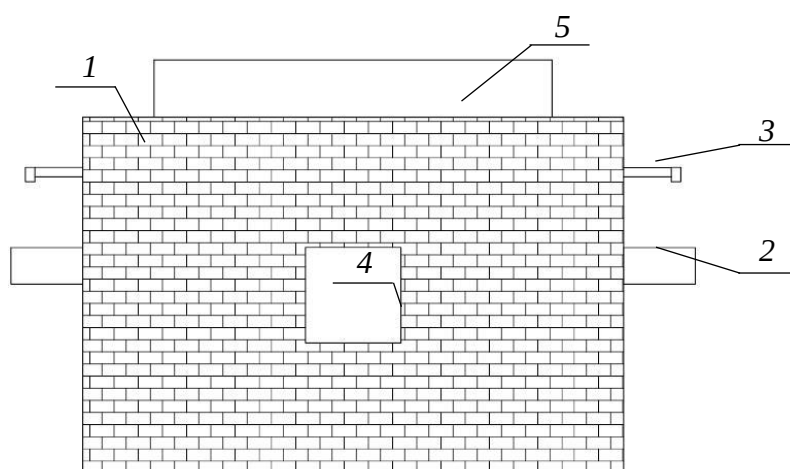


Рисунок 3.2 – Схема малой горизонтальной огневой печи для проведения исследований теплофизических характеристик: 1 – огневая камера; 2 – керосиновые форсунки; 3 – печные термопары; 4 – смотровое окно; 5 – испытуемый образец; 6 – форсунки

В ходе эксперимента необходимо производить измерение температур на определенном промежутке времени и контроля температур в огневой камере печи, для чего использовалось следующее оборудование (рисунок 3.3, 3.4):

– устройство контроля температуры «Микролаб ПРО»;

– электронно-вычислительная машина с установленным программным обеспечением для записи экспериментальных данных.



Рисунок 3.3 – УКТ «Микролаб ПРО»
с ЭВМ для проведения
эксперимента



Рисунок 3.4 – Устройство контроля
температуры «Микролаб ПРО»

«Микролаб ПРО» представляет собой электронный прибор, который посредством термопреобразователей регистрирует показатели температур на ЭВМ. Технические характеристики устройства контроля температуры «Микролаб ПРО»:

- емкость энергонезависимого ОЗУ, кбайт32 (до 512);
- количество измерительных каналов15;
- диапазон измерения температуры термопар ТХА, °С–270...1300;
- диапазон измерения температуры термопар ТХК, °С–200...800;
- диапазон измерения температуры холодного спая термопар встроенным датчиком температуры ТХС, °С.....–45...125;
- диапазон измерения времени, сек 0,1...15359,9;
- скорость обмена информацией с компьютером через интерфейс RS-232 Байт/сек 115000;
- входное сопротивление измерительных каналов, МОм10;
- напряжение питания, В~220(+10 %; –15 %);
- класс точности 0,5.

Описанное измерительное оборудование «Микролаб ПРО» использовалось для измерения температурной среды в огневой печи и температуры образ-

цов как на необогреваемой поверхности, так и непосредственно внутри испытуемого образца. Для непосредственного измерения температур образца использовались термопреобразователи (термопары):

- для измерения температуры среды ТПК 125-0314.1600 (рисунок 3.5);
- для измерения температуры образца и необогреваемой поверхности ТПК 031Э-0,5/0,35/1,65.

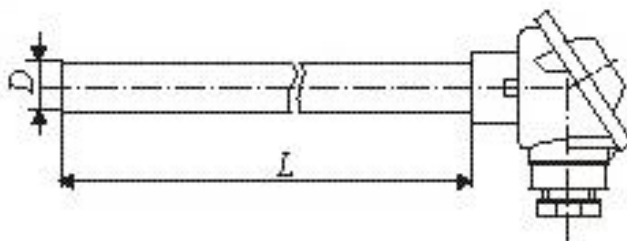


Рисунок 3.5 – Термопреобразователь ТПК 125-0314.1600

Технические характеристики термопреобразователя для измерения температурной среды в печи ТПК 1250314.1600:

- номинальная статическая характеристика:.....К(ХА);
 - рабочий диапазон температур, °С–40...+1200;
 - класс допуска:.....2;
 - диаметр термоэлектродной проволоки, мм.....3,2;
 - материал арматуры.....сталь ХН45Ю (при T° max до 1200 °С);
 - диаметр защитной арматуры, D мм.....20;
 - длина защитной арматуры, L мм.....1600;
 - сопротивление изоляции, МОм, не менее:.....100;
 - количество рабочих спаев в изделии, шт.....1;
 - защищенность от воздействия пыли и воды.....IP54;
 - группа климатического исполнения.....Д2 и Р2;
 - вид климатического исполнения.....ТЗ;
 - устойчивость к механическим воздействиям.....вибропрочная группа
- исполнения № 3.

Технические характеристики термопреобразователей ТПК 031Э6-0,5/0,35/1,65, используемых для измерения температуры образца:

- класс допуска.....2;
- диапазон измерений, °C.....–40 ÷ +1100;
- показатель тепловой инерции, с, не менее.....5;
- сопротивление изоляции, Ом.....100;
- защищённость от воздействия воды и пыли.....IP00.

Также для проведения исследований необходимо было измерить влажность бетона, так как данный параметр влияет на теплофизические характеристики при прогреве. Для измерения влажности бетона использовалась методика [93].

Согласно данной методике для проведения измерения влажности использовалось следующее оборудование:

- весы лабораторные соответствующие;
- шкаф сушильный типа СНОЛ;
- бюксы.



Рисунок 3.6 – Лабораторные весы AND GF – 6100

Для исследования влажности бетона применялись лабораторные весы AND GF-6100 (рисунок 3.6). Основные технические характеристики:

- НПВ, г.....6100;
- дискретность, г.....1;
- класс точности.....I;
- тип калибровки.....ручная;

- гиря для калибровки.....5 кг – E2;
- пылевлагозащита.....IP54;
- интерфейс.....RS-232C, USB;
- тип дисплея.....вакуумно-флуоресцентный;
- источник электрического питания.....220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность, Вт.....11;
- рабочая температура, °Cот +5 до +40.

Также при исследовании влажности бетонных образцов использовался сушильный шкаф типа СНОЛ-3,5, вид которого представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Электронный сушильный шкаф СНОЛ-3,5

Технические характеристики сушильного шкафа СНОЛ-3,5:

- номинальная мощность, кВт, не более.....2;
- напряжение питающей сети, В.....220;
- номинальная частота, Гц.....50;
- число фаз.....1;
- номинальная температура в рабочем пространстве, °C.....350;
- стабильность температуры в тепловом режиме, °C.....±2.

Перед сушкой бетона в сушильном шкафу для более точного измерения массы в эксперименте использовались калиброванные бюксы, представленные на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Бюксы для сушки бетона с образцами в сушильных шкафах

Также учитывался вес каждой бюксы, который в результате взвешивания образцов до и после сушки вычитался из общей массы.

3.2. Методика проведения исследования влажности бетона и результаты исследования

Метод исследования влажности бетона представлен в [144]. Сущность метода заключается в экспериментальном определении влажности бетона для всех видов бетона.

Перед началом испытания образцы должны соответствовать данной методике и быть для тяжелого бетона не более максимального размера зерен в бетоне. После отбора образцов бетона их укладывают в бюксы, взвешивают и фиксируют массу. Далее испытуемые образцы устанавливают в сушильный шкаф и высушивают до постоянной массы при температуре $105 (\pm 5) ^\circ\text{C}$. Затем образцы охлаждают совместно с сушильным шкафом и взвешивают с дальнейшей фиксацией их массы. Затем влажность бетона по массе рассчитывают по формуле [144]:

$$W_m = \frac{m_g - m_c}{m_c} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где W_m – влажность бетона по массе, %; m_g – масса пробы (образца) бетона до сушки, г; m_c – масса пробы (образца) бетона после сушки, г.

При исследовании влажности бетона по массе получены результаты, которые представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исследование влажности бетона по массе

№ пробы	Масса пробы до сушки, г		Масса пробы после сушки, г		Влажность пробы, %
	С буюсой	Без буюсы	С буюсой	Без буюсы	
1 (буюса № 3)	62,73	7,59	62,59	7,3	3,82
2 (буюса № 10)	68,54	9,62	68,17	9,25	3,84
Средняя влажность, %					3,83

В результате исследований влажность бетона по массе была принята 3,8 %, что будет учитываться при исследовании теплофизических характеристик бетона с добавкой и без добавки ППФ и определении коэффициентов теплоёмкости и теплопроводности, необходимых для решения.

3.3. Описание испытываемых образцов для исследования теплотехнических характеристик

Испытываемые образцы для проведения эксперимента изготавливались на заводе ОАО «Моспромжелезобетон» в виде плит размера 1,1×1,1×0,15 м. Также как бетонные кубы, железобетонные плиты были изготовлены трех видов: плита без добавки ППФ (К); плита с добавкой ProZASK IGS 12 мм (Р); плита с добавкой ProZASK IGS 6 мм (А).

Общие характеристики ППФ, расход и основные составляющие компоненты бетонной смеси описаны в главе 2, раздел 2.1.3.

Плотность образцов плит составила: плита без добавки ППФ – 2405 кг/м³; плита с добавкой ProZASK IGS 12 мм – 2465 кг/м³; плита с добавкой ProZASK IGS 6 мм – 2380 кг/м³.

Для изготовления трех испытываемых образцов использовалась схема армирования, которая представлена на рисунке 3.9.

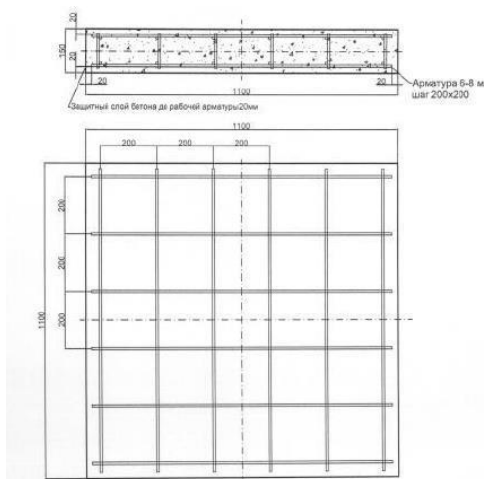


Рисунок 3.9 – Схема армирования испытываемых плит

Перед началом заливки плит были изготовлены специальные формы и сварены сетки из металлических прутков диаметром 6 мм для армирования плит и придания жёсткости (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Форма для заливки плит с металлической сеткой для армирования бетона

Перед изготовлением плит в середине сечения плиты закреплялись специальные держатели для термопреобразователей в количестве трёх штук для каждой плиты. Термопары устанавливались на разных высотах в вертикальной плоскости для определения экспериментальных зависимостей прогрева во времени. Схема держателей представлена на рисунках 3.11, 3.12.



Рисунок 3.11 – Держатель
с установленными
термопреобразователями

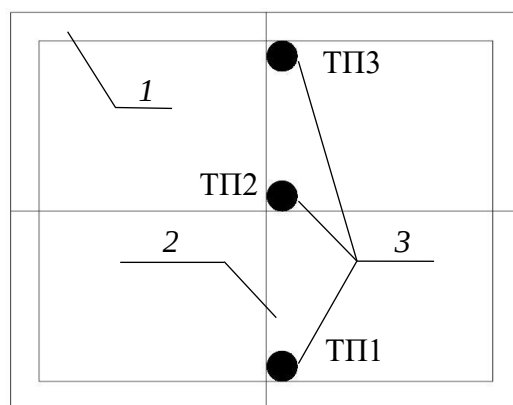


Рисунок 3.12 – Схема держателя
для термопреобразователей:
1 – металлическая рамка;
2 – металлическая проволока;
3 – термопреобразователи

На рисунке 3.13 представлен вид форм для испытываемых образцов перед заливкой в них бетона.

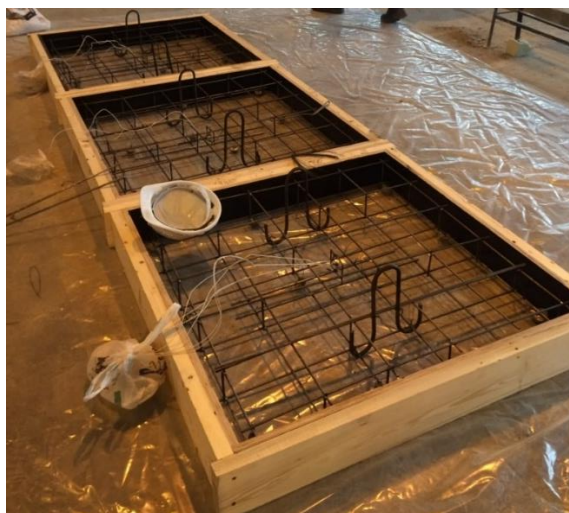


Рисунок 3.13 – Формы для испытываемых плит
перед заливкой их бетоном

Далее после всех подготовительных работ начинается сам процесс заливки бетонной смеси в формы. Сначала на специальном производственном оборудовании изготавливают бетонную смесь. Затем готовая бетонная смесь доставляется к месту заливки. Во время процесса используется специальный вибратор, который помогает равномерно распределить бетонную смесь в формах. Общий вид трех плит для проведения испытаний представлен на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Общий вид плит для исследования теплофизических характеристик

По истечении 28 дней и набора прочности бетона, изделия были перевезены во ВНИИПО МЧС России для непосредственного проведения испытаний и исследования теплофизических характеристик бетонов.

3.4. Методика проведения исследования теплофизических характеристик бетона с полипропиленовой фиброй

Для исследования теплофизических характеристик бетонов без добавки и с добавкой ППФ использовалась методика [145], где описано используемое оборудование, основные этапы проведения эксперимента и температурный режим, воспроизводимый при проведении эксперимента.

Перед началом эксперимента все задействованное в нем оборудование проверяется, подключаются термопреобразователи к измерительной аппаратуре («Микролаб ПРО»), и настраивается специальное программное обеспечение ЭВМ для регистрации данных в ходе испытаний. Затем на малую горизонтальную огневую печь укладывается испытуемый образец и на необогреваемую поверхность закрепляются термопреобразователи для измерения температуры с необогреваемой стороны.

Согласно методике [145] на образец в ходе эксперимента должна действовать нормативная нагрузка. В случае проведения данного эксперимента и определения теплофизических характеристик во время испытания образец не нагружается, так как целью является не исследование огнестойкости, а определение температур бетона для получения коэффициентов теплоёмкости и теплопроводности.

После настройки оборудования и установки испытуемого образца с помощью керосиновых форсунок создаётся стандартный температурный режим пожара, который описан на рисунке 3.15 [145].

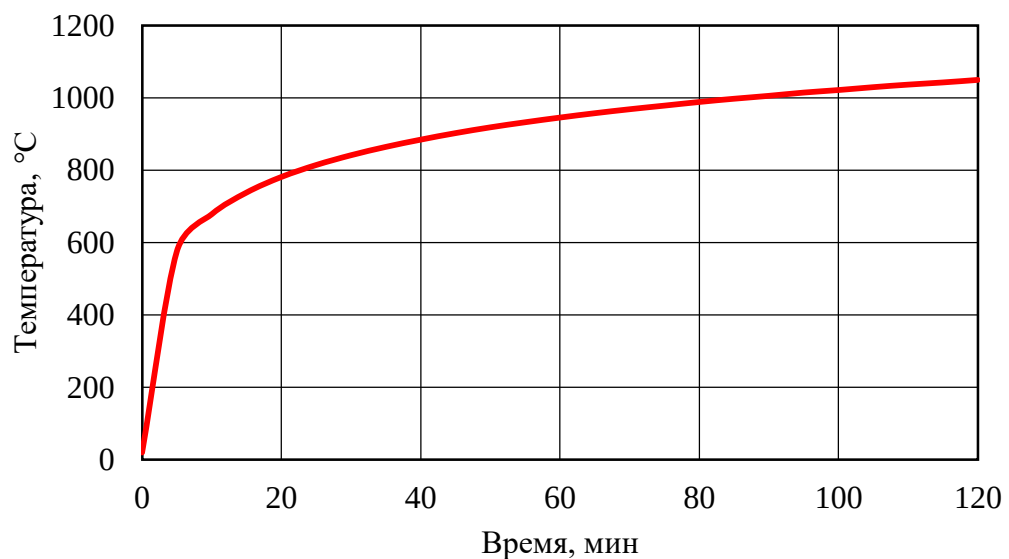


Рисунок 3.15 – Стандартный температурный режим пожара [145]

Стандартный температурный режим пожара рассчитывается по следующей формуле [145]:

$$T - T_0 = 345 \lg(8\tau + 1) . \quad (3.2)$$

Согласно значениям температур, рассчитанным по формуле (3.2), в огневой камере создавался описанный выше температурный режим. Далее с момента начала прогрева испытуемого образца все параметры фиксировались на ЭВМ с помощью УКТ «Микролаб ПРО». Испытание заканчивалось при достижении на необогреваемой поверхности испытуемого образца температуры равной 160 °C.

3.5. Обработка полученных экспериментальных данных после проведения испытания. Верификация программных комплексов *KOKON* и *ANSYS*

Определение теплотехнических характеристик заключается в решении обратной задачи нестационарной теплопроводности, то есть полученные зависимости температуры от времени, зафиксированные в ходе эксперимента, сопоставляются с расчётными зависимостями, которые в ходе исследования рассчитываются посредством численного моделирования.

Для решения поставленной задачи в работе применялись два программных комплекса *KOKON* и *ANSYS*. Обоснованность применения данных комплексов заключается в простоте ввода данных, наглядности, точности расчёта, удобном древовидном интерфейсе (в случае с *ANSYS*), возможности решения сопряженных задач, например, решение совместной задачи «температурный нагрев–статика» (в случае с *ANSYS*). Также к перечисленному можно отнести доступность программы *ANSYS*, связанную с предоставлением разработчиками бесплатной студенческой лицензии. Стоит отметить, что *KOKON* является верифицированной разработкой ВНИИПО МЧС России.

Основной целью данных программных комплексов является расчёт прогрева различных материалов с указанием их основных прочностных и теплофизических свойств. Также моделирование прогрева в двух программных комплексах обуславливается определением достоверности расчётной модели *ANSYS*. Так как программа *KOKON* в настоящее время верифицирована и используется в расчетах теплотехнической задачи, с помощью нее и эксперимента будет проверяться достоверность результатов расчёта в *ANSYS*.

Для расчёта модели в программе используется метод конечных элементов, где создавалась твердотельная объемная (конечными элементами *SOLID 70*) геометрия, которая в последующем разбивается на конечные элементы в виде сетки (рисунок 3.16). Сетка имеет узлы, в каждом из которых во времени рассчитывается температура. Вследствие этих расчётов строятся графики расчётных зависимостей.

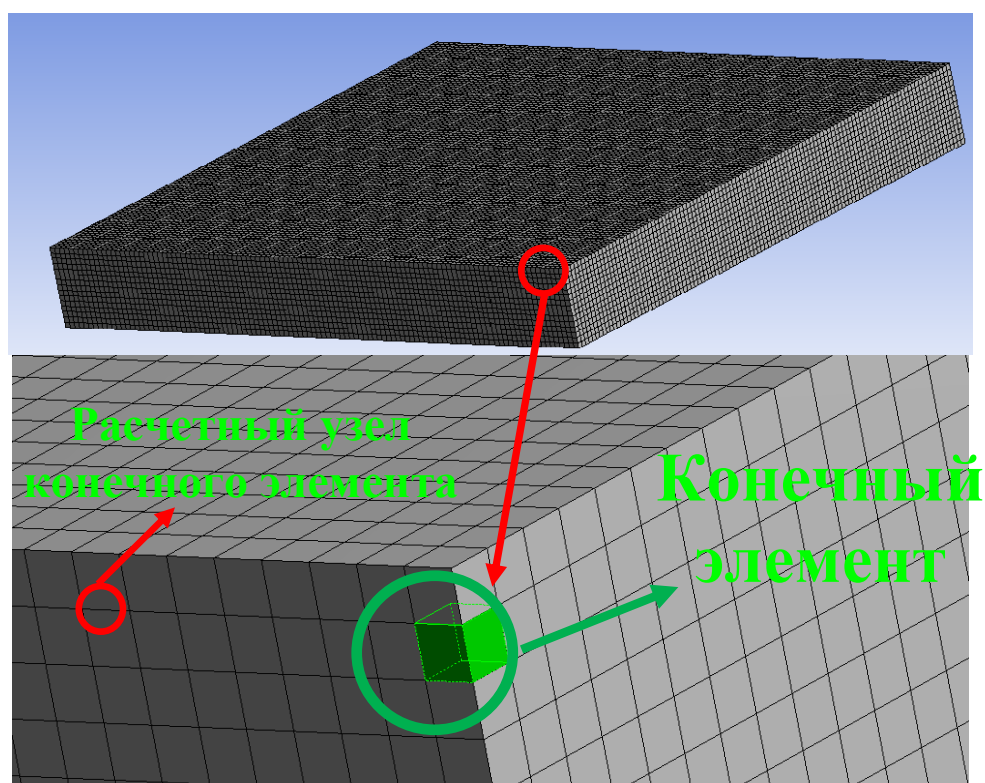


Рисунок 3.16 – Твёрдотельная геометрия с наложенной расчётной сеткой

В ходе проведения численного эксперимента необходимо рассмотреть расчётные модели, заложенные в этих комплексах.

Все расчётные модели двух комплексов основаны на первом законе термодинамики.

Для расчётной модели задавались переменные, которые определяли начальные и граничные условия. В качестве исходных данных задавались свойства материала, зависящие от температуры, и начальная температура среды. Свойства материала описаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Свойства бетона

Характеристика	Значение
Начальный коэффициент теплопроводности, λ_t Вт/м·К	$1,3-0,00035t$
Начальный коэффициент теплоёмкости, c_t , Дж/кг К	$481+0,84t$
Влажность бетона, W , %	3,8

Далее задавались параметры для граничных условий как на обогреваемой, так и на необогреваемых поверхностях. Исходные данные для обогреваемой поверхности приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Граничные условия для обогреваемой поверхности

Характеристика	Значение
Коэффициент передачи тепла конвекцией, α_k , Вт/м ² ·°С	29
Приведенная степень черноты системы «огневая камера–бетонная поверхность», $\varepsilon_{пр}$	0,67–0,0004t

На обогреваемой поверхности (таблица 3.3) задавались значения коэффициента передачи тепла конвекцией, приведенная степень черноты для излучения и стандартный температурный режим, описанный формулой (3.2). На необогреваемой поверхности в табличном виде задавался коэффициент теплоотдачи α' , рассчитанный по формуле (3.3) в программе *Microsoft Office Excel* [3].

$$\alpha' = 1.5 \cdot \sqrt[3]{t_i - t_n} + 5.77 \cdot \varepsilon_{пр} \cdot \left(\frac{\left(\frac{t_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_n}{100} \right)^4}{t_i - t_n} \right), \quad (3.3)$$

где α' – коэффициент теплоотдачи от необогреваемой поверхности к среде, Вт/м²·К; t_i – температура необогреваемой поверхности, К; t_n – начальная температура конструкции, К; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты конструкции.

Так как бетон является гигроскопичным материалом, то в ходе моделирования следовало учесть выпаривание свободной влаги из пор бетона. Учитывалось выпаривание свободной влаги за счет увеличения коэффициента теплоёмкости на промежутке 100–200 °С. Окончательно модель учёта влажности выглядит следующим образом: при достижении средней температуры конечного элемента 100 °С теплоёмкость бетона скачкообразно увеличивается до эффективной теплоёмкости (рисунок 3.17). Рассчитывается этот скачок по формуле (3.4):

$$C_p = \frac{W \cdot E}{\Delta t} + c_p, \quad (3.4)$$

где C_p – эффективная теплоёмкость, Дж/кг К; c_p – коэффициент теплоёмкости сухого бетона, Дж/кг К; W – влагосодержание бетона в долях; E – удельная теплота испарения воды, равная 2260 кДж/кг; Δt – промежуток фазового перехода воды, °С.

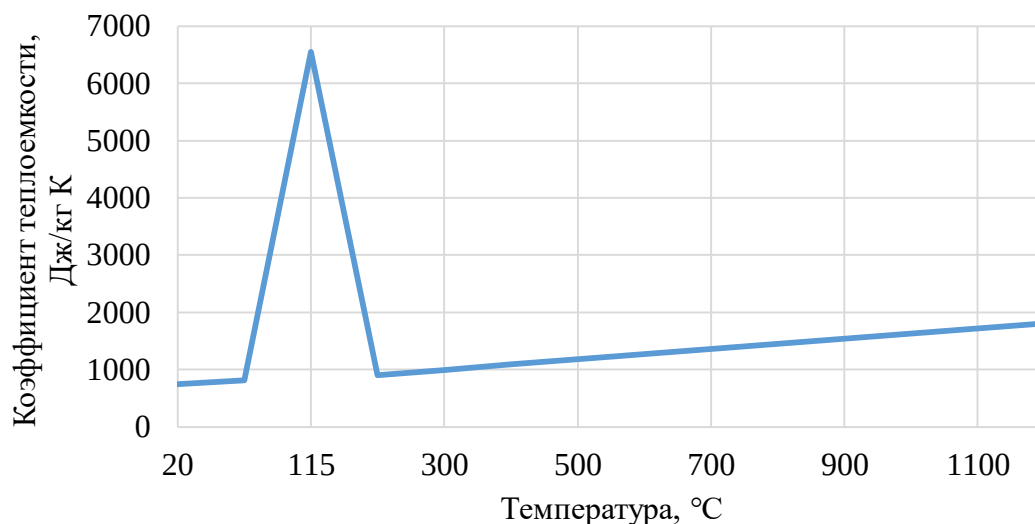


Рисунок 3.17 – Зависимость коэффициента теплоёмкости от температуры с учетом влажности материала

В конечном итоге при задании начальных и граничных условий в *ANSYS* модель выглядит следующим образом: к обогреваемой поверхности прикладывается нагрузка в виде коэффициента передачи тепла конвекцией, и нагрузка в виде излучения, для которой задается приведённая степень черноты (таблица 3.3). Для всех нагрузок задаётся температура среды, а именно стандартный температурный режим пожара.

На необогреваемую поверхность в табличном виде задаётся коэффициент теплопередачи (конвективной и лучистой составляющих), зависящий от температуры, определяемый по формуле (3.3). Данная модель представлена на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Расчётная модель плиты
для определения теплофизических характеристик

Первый закон термодинамики для трёхмерной задачи описывается следующим образом:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \bar{q}, \quad (3.5)$$

где ρ – плотность, кг/м^3 ; c – коэффициент теплоёмкости, $\text{Дж/кг}^\circ\text{C}$; T – температура, $^\circ\text{C}$; t – время, с ; $\{L\}$ – векторный оператор; $\{V\}$ – вектор скорости тепло-массопереноса; $\{q\}$ – вектор плотности теплового потока; $\bar{q}$ – скорость тепло-выделения на единицу объёма.

Начальными условиями в выражении (3.3) будет являться температура, записывается в виде зависимости $T(x, y, z, t)$.

Согласно закону Фурье, плотность теплового потока через изотермическую поверхность пропорциональна градиенту температуры. В руководстве к ANSYS данный закон имеет следующий вид:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T, \quad (3.6)$$

где $[D]$ – матрица теплопроводности для трехмерной модели.

В ANSYS матрица теплопроводности для трехмерной модели записывается следующим образом:

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

где K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коэффициенты теплопроводности в элементе по x , y , z .

Дифференцируя уравнения (3.5), с учетом (3.6) и (3.7), получаем уравнение теплопроводности для трехмерной модели:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \bar{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (3.8)$$

Для экономии компьютерного ресурса в качестве упрощения коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости задавались линейными функциями, зависящими от температуры.

При расчёте задачи нестационарной теплопроводности задавались граничные условия 3-го рода:

$$q = h_f (T_s - T_B), \quad (3.9)$$

где h_f – коэффициент теплопередачи, Вт/м²°С; T_B – температура среды, °С; T_s – температура поверхности.

Характеризуется граничное условие 3-го рода передачей температуры от обтекаемой поверхности газовой среды к поверхности тела. Коэффициент теплоотдачи – это есть передаваемое количество тепла, отдаваемое единицей поверхности тела при разности температур поверхности и окружающей среды. В отечественных научных источниках коэффициент теплопередачи обозначается буквой « α », поэтому для удобства далее будем использовать этот символ.

В ходе расчета также учитывалось излучение, которое в руководстве к ANSYS описывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4, \quad (3.10)$$

где N – количество излучающих поверхностей; ε_i – эффективная степень черноты i -й поверхности; F_{ji} – угловой коэффициент облучённости; A_i – площадь i -й поверхности; Q_i – потеря энергии i -й поверхности; σ – постоянная Стефана – Больцмана; T_i – абсолютная температура i -й поверхности.

Во время численного расчёта за счет корректировки начальных коэффициентов теплоёмкости и теплопроводности полученные расчётные зависимости сопоставлялись с экспериментальными до максимального совпадения. Графики с экспериментальными и расчётными кривыми представлены на рисунках 3.19–3.21.

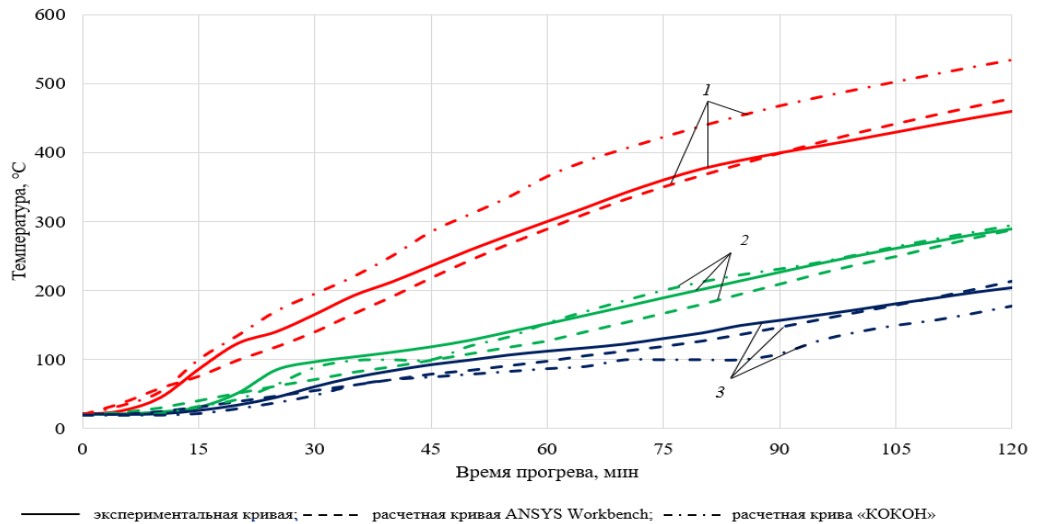


Рисунок 3.19 – Экспериментальные и расчётные кривые плиты без добавки фибры: 1 – измерение температуры прогрева в точке ТП1; 2 – измерение температуры в точке ТП2; 3 – измерение температуры в точке ТП3

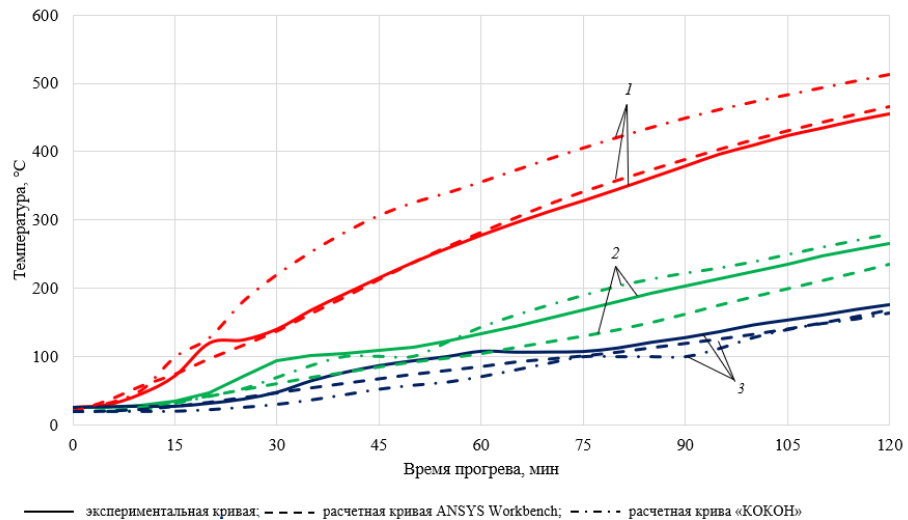


Рисунок 3.20 – Экспериментальные и расчётные кривые плиты с ProZASK IGS 6 мм: 1 – измерение температуры прогрева в точке ТП1; 2 – измерение температуры в точке ТП2; 3 – измерение температуры в точке ТП3

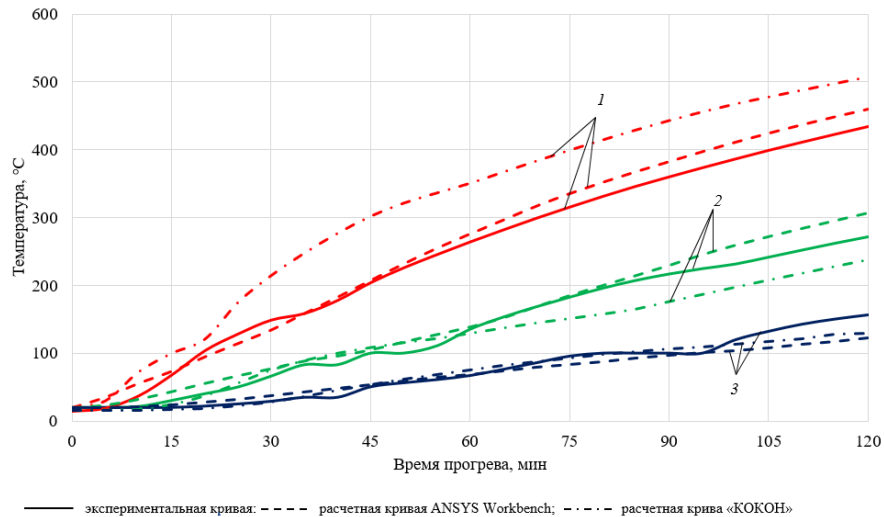


Рисунок 3.21 – Экспериментальные и расчётные кривые плиты с добавкой ProZASK IGS 12 мм:

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

В результате проведенных расчётов получены следующие зависимости для различных бетонов:

– для бетонной плиты без добавки фибры:

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0005t, \quad (3.11)$$

$$c_t = 481 + 0,9t;$$

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

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0006t, \quad (3.12)$$

$$c_t = 481 + 0,92t.$$

При сравнении экспериментальных данных с расчётными кривыми, полученными при вычислении в двух программных комплексах, выявлено, что расхождение между расчётом в программном комплексе *KOKON* и экспериментальными кривыми составил примерно 18 %. Расхождение между расчётом и экспериментом в программном комплексе *ANSYS* составило примерно 12 %. Исходя из этого можно сделать вывод, что расчёт в программном комплексе *ANSYS* является более точным, поэтому для решения теплотехнической задачи

по расчёту огнестойкости железобетонных тубингов будем производить в данном комплексе.

Стоит отметить, что, исходя из экспериментальных и расчётных данных при добавке ППФ коэффициент теплопроводности снижается, что снижает температуру прогрева. Это в свою очередь увеличивает время прогрева.

3.6. Выводы по главе

Выполнены экспериментальные исследования теплофизических характеристик бетона с добавкой и без добавки ППФ при воздействии стандартного температурного режима. В результате получены кривые прогрева, с помощью которых определялись коэффициенты теплоёмкости и теплопроводности.

Получены аналитические зависимости для определения теплотехнических характеристик бетона без добавки фибры $\lambda_t = 1,3 - 0,0005t$, $c_t = 481 + 0,9t$; бетонов с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 16мм $\lambda_t = 1,3 - 0,0006t$. Данные зависимости будут использоваться при расчёте огнестойкости конструкций на основе этих материалов.

Проведена верификация программных комплексов *KOKON* и *ANSYS*, в результате получено, что расхождение между экспериментальными и расчётными кривыми для *KOKON* составило 18 %, а для *ANSYS* – 12 %.

Экспериментально определено, что при добавлении ППФ в объеме 1 кг/м³ наблюдается уменьшение коэффициента теплопроводности, что влияет на увеличение времени прогрева бетона и снижение интенсивности прогрева.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТЮБИНГОВ С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ

В настоящее время оценить огнестойкость железобетонных тубингов расчётно-аналитическим методом не представляется возможным в связи отсутствием методов расчёта в современной нормативной базе по пожарной безопасности. Перечислим основные задачи настоящей главы:

- 1) провести натурные крупномасштабные испытания для определения фактического предела огнестойкости железобетонных тубингов с добавкой импортной ППФ и определить эффективность метода защиты бетона от взрывообразного разрушения;
- 2) с учетом вида нагружения и условий эксплуатации адаптировать существующие расчётно-аналитические методы оценки огнестойкости строительных конструкций и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными.

При этом расчёт огнестойкости необходимо провести с использованием определенных данных по прочностным и теплотехническим характеристикам бетонов с добавкой и без добавки ППФ, полученным в ходе исследования.

4.1. Методика проведения исследований огнестойкости железобетонных тубингов с полипропиленовой фиброй

Основные положения методики испытаний конструкций на огнестойкость описаны в главе 3, за исключением некоторых пунктов, которые не учитываются при проведении исследований теплофизических характеристик бетона.

В случае с испытаниями огнестойкости строительных конструкций на образец воздействует нагрузка на протяжении всего испытания. Во время эксплуатации на железобетонные тубинги, в отличие от колонн, балок и т.д., воздействуют несколько нагрузок (вертикальная и горизонтальная). Исходя из этого,

необходимо усовершенствовать систему опирания и нагружения на новой установке для испытаний на огнестойкость перекрытий, покрытий и балок.

Дополнительно к оборудованию, описанному в главе 3, добавились:

- установка для испытаний на огнестойкость перекрытий, покрытий и балок с системой опирания и нагружения для испытаний железобетонных тубингов (рисунки 4.1–4.5);
- датчик измерения прогиба конструкций.

Основной вид и разрезы крупномасштабной установки указаны на рисунках 4.1–4.5.

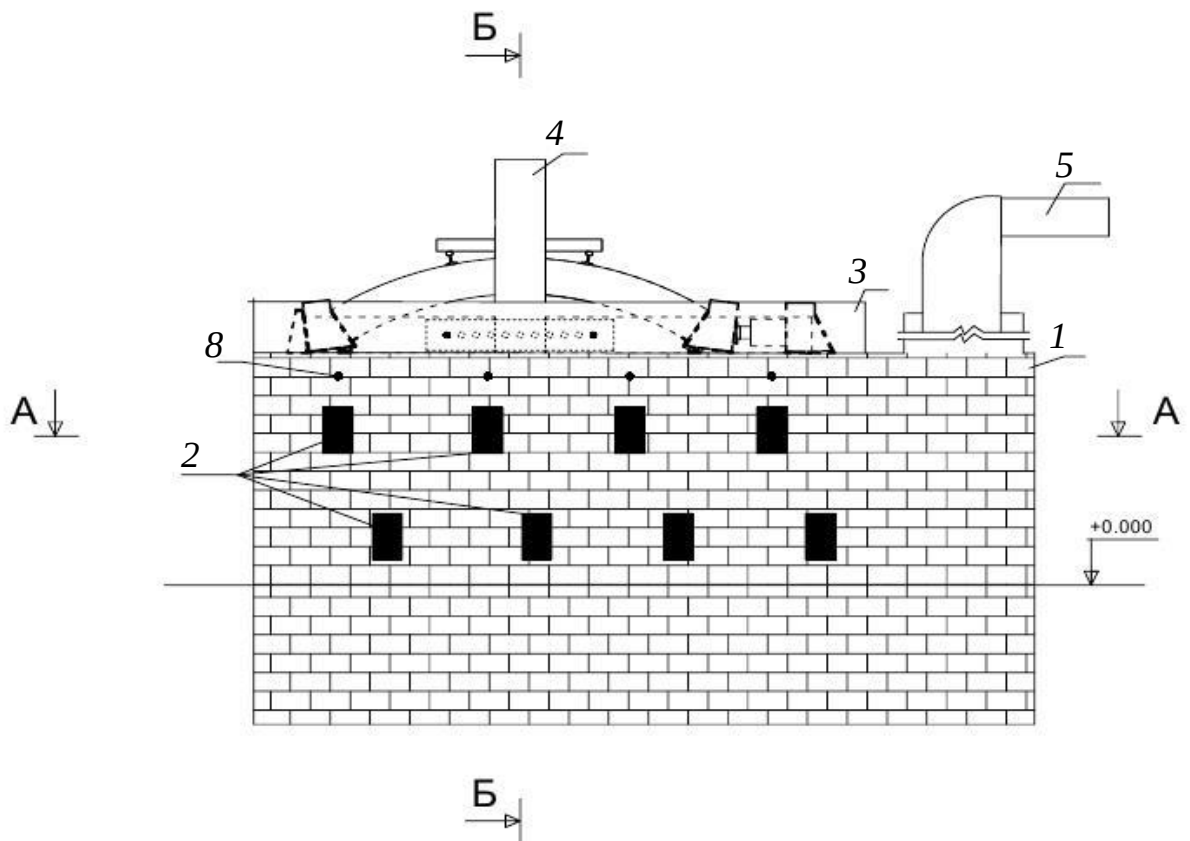


Рисунок 4.1 – Основной вид крупномасштабной горизонтальной
огневой печи: 1 – огневая печь; 2 – форсунки; 3 – дувтавры;
4 – вертикальная рама; 5 – канал удаления дымовых газов

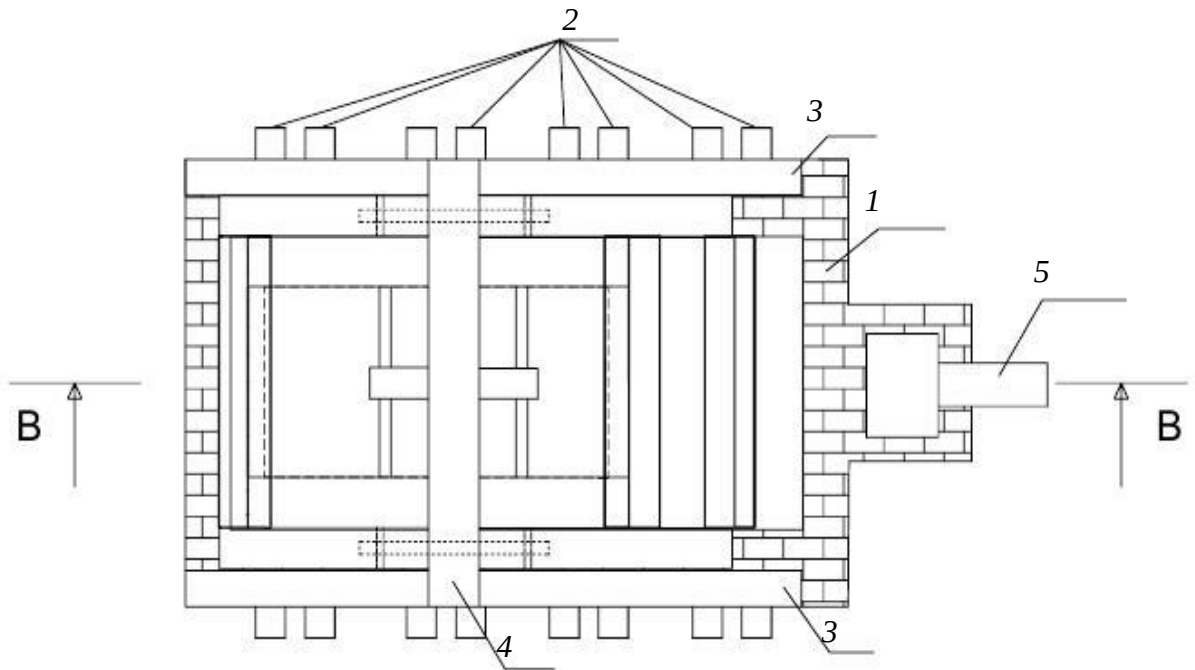


Рисунок 4.2 – Вид сверху: 1 – огневая печь; 2 – форсунки; 3 – двутавры; 4 – вертикальная рама; 5 – канал удаления дымовых газов

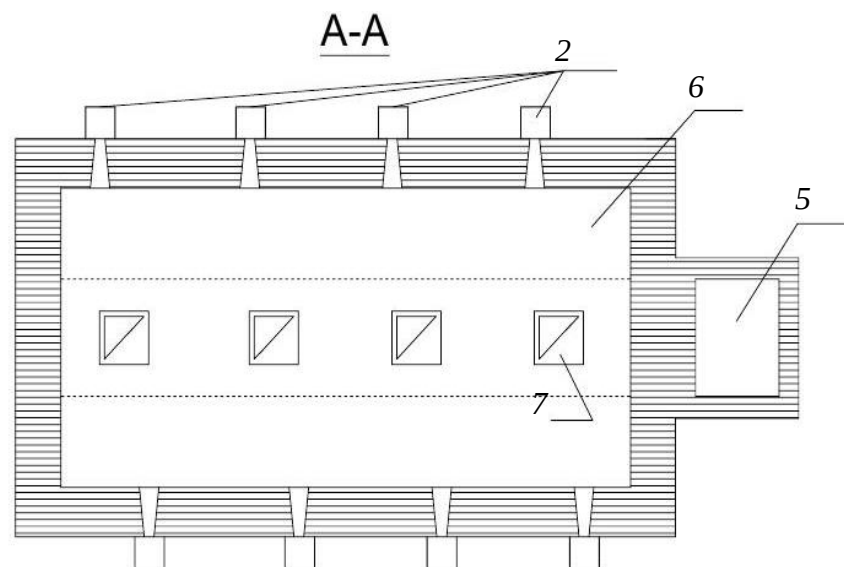


Рисунок 4.3 – Разрез установки А-А:
2 – форсунки; 5 – канал удаления дымовых газов;
6 – камера сгорания; 7 – проемы для удаления дымовых газов

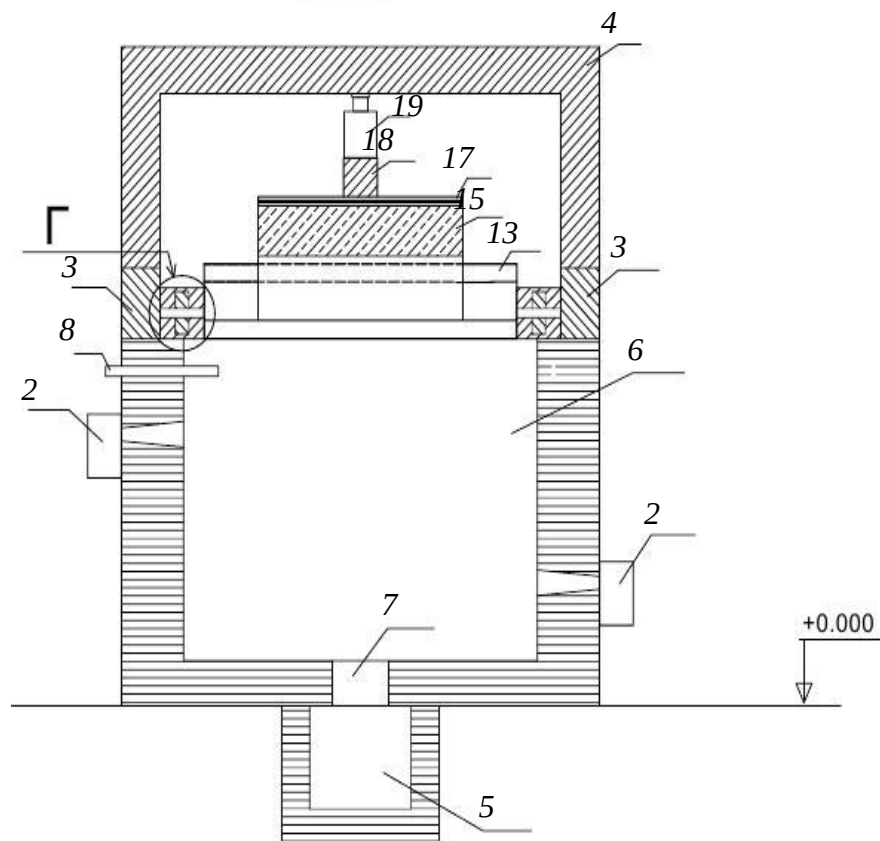
Б-Б

Рисунок 4.4 – Разрез Б-Б: 2 – форсунки; 3 – двутавры;
 4 – вертикальная рама; 5 – канал удаления дымовых газов;
 6 – камера сгорания; 7 – проемы для удаления дымовых газов;
 8 – печные термопреобразователи; 13 – подвижная опора;
 15 – испытуемый образец; 17 – поперечные балки;
 18 – траверса; 19 – гидравлический домкрат

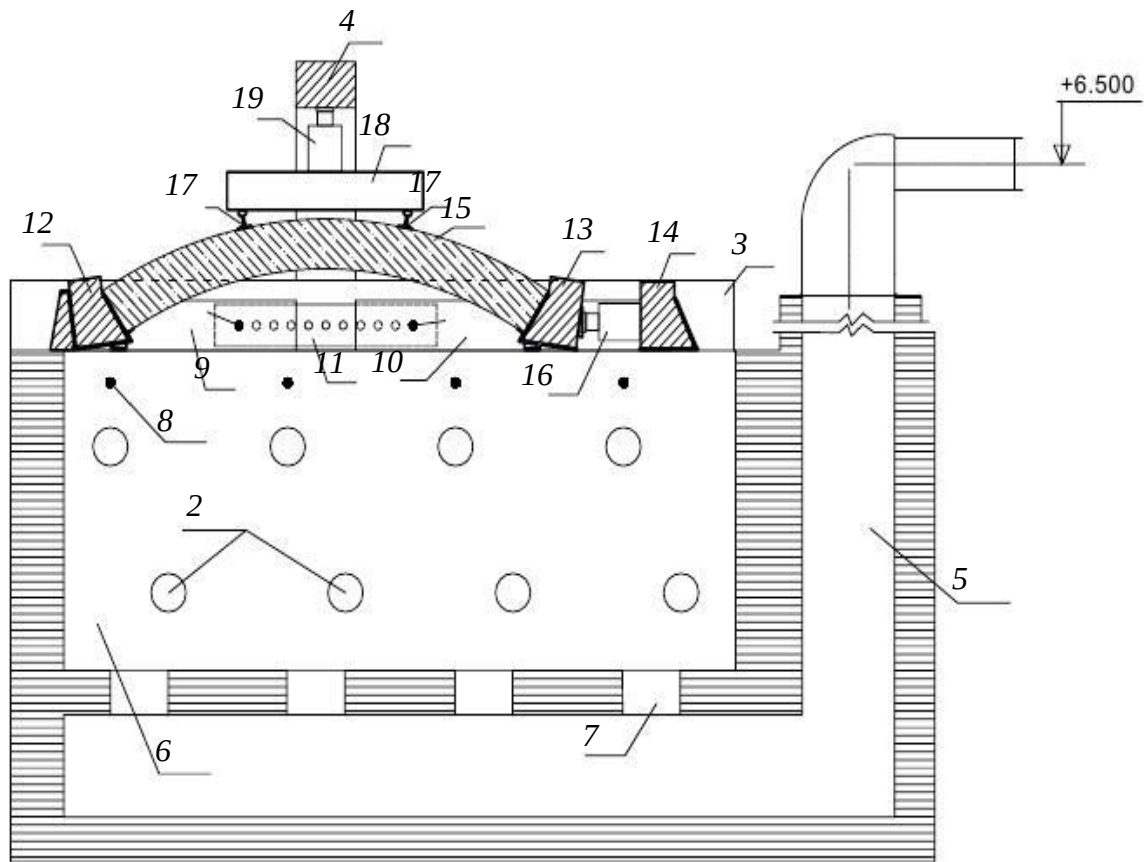
B-B

Рисунок 4.5 – Разрез В-В: 2 – форсунки; 3 – двухавры; 4 – вертикальная рама; 5 – канал удаления дымовых газов; 6 – камера сгорания; 7 – проемы для удаления дымовых газов; 8 – печные термопреобразователи; 9 – левая часть корпуса системы нагружения; 10 – правая часть системы нагружения; 11 – соединительная балка; 12 – неподвижная опора; 13 – подвижная опора; 14 – неподвижная опора домкрата; 15 – испытуемый образец; 16 – гидравлический домкрат для горизонтальной нагрузки; 17 – поперечные балки; 18 – траверса; 19 – гидравлический домкрат для вертикальной нагрузки

Крупномасштабная установка состоит из печи 1 в виде кладки огнеупорного кирпича; форсунок 2, обеспечивающих заданный температурный режим; двухавров 3, расположенных по двум сторонам печи, к которым крепится вертикальная рама 4; канала удаления дымовых газов 5; печных термопар 8, с помощью которых осуществляется контроль температурного режима; камеры сгорания 6; проемов 7 для удаления дымовых газов из камеры сгорания 6; двух частей корпуса 9, 10 системы нагружения тубингов; соединительной балки 11,

которая служит для соединения двух частей корпуса 9, 10 и более детально представлена на рисунке 4.6. На части корпуса 9 жестко закреплена неподвижная опора 12, на части корпуса 10 подвижная опора 13 и неподвижная опора 14. Подвижная опора 13 служит для создания горизонтальной нагрузки, а неподвижная опора 14 предназначена для упора гидравлического домкрата 16, который обеспечивает нагружение конструкции в горизонтальной плоскости. Неподвижная опора 12 и подвижная опора 13 являются держателем испытуемого образца 15. Сверху испытуемого образца установлены поперечные балки 17, сверху на поперечные балки 17 установлена траверса 18. На траверсу ставится гидравлический домкрат 19, который упирается в вертикальную раму 4 и служит для создания вертикальной нагрузки.

На рисунке 4.6 представлен разрез соединения двух частей корпуса 9, 10. Две части корпуса 9, 10 состоят из двух швеллеров 20, которые сварены между собой металлическими пластинами 21. Соединительная балка 11, служащая для соединения двух частей корпуса 9, 10, выполнена из металла и соединяется с помощью шпильки 22 с болтовыми соединениями с обоих концов.

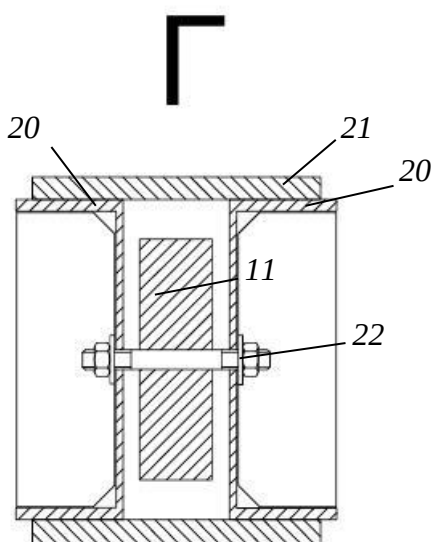


Рисунок 4.6 – Разрез Г, соединение двух частей корпуса системы нагружения:
 11 – соединительная балка; 20 – швеллер корпуса системы нагружения;
 21 – металлические пластины; 22 – соединительная шпилька

Общий вид установки для испытаний на огнестойкость перекрытий, покрытий и балок с системой опирания и нагружения для испытаний железобетонных тубингов представлены на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Крупномасштабная горизонтальная огневая печь с системой нагружения тубингов

Для создания в огневой камере стандартного температурного режима используются форсунки фирмы «CIB UNIGAS TECNOPRESS PG 60» (рисунки 4.8–4.9). Преимущество данного оборудования заключается в том, что на нем возможно создавать температурные режимы отличные от стандартного, описанные в [138].

Для форсунок данного типа имеется много модификаций (маркировок), которые могут работать на различных видах топлива, иметь различные мощности и конструктивные исполнения. В нашем случае использованы форсунки модели PG 60 K-PR.S.RU.Y, где

PG – тип форсунки;

K – тип топлива (керосин);

PR – тип регулировки форсунки (прогрессивное регулирование);

S – тип сопла (стандартное);

RU – страна назначения (Россия);

Y – спецзаказ.

Основные технические характеристики форсунок:

- минимальная мощность, кВт.....151;
- максимальная мощность, кВт.....791;
- электропитание, В.....230/400;
- двигатель вентилятора, кВт.....1,1;
- двигатель насоса.....встроенный.

Конструктивное исполнение форсунок «CIB UNIGAS TECNOPRESS PG 60 K-PR.S.RU.Y» представлено на рисунке 4.8.

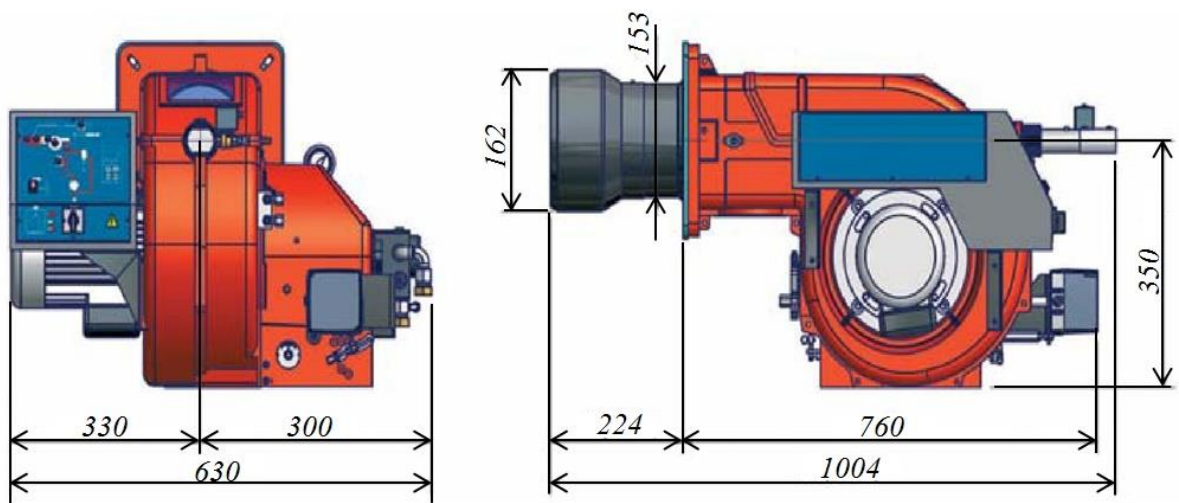


Рисунок 4.8 – Габаритные размеры форсунки
«CIB UNIGAS TECNOPRESS PG 60 K-PR.S.RU.Y»

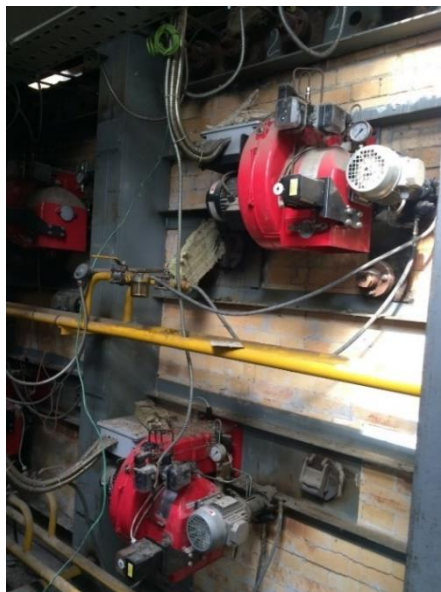


Рисунок 4.9 – Общий вид расположения форсунок
«CIB UNIGAS TECNOPRESS PG 60 K-PR.S.RU.Y»

При исследовании огнестойкости также использовалось вспомогательное оборудование:

- термоэлектрические преобразователи ТПК 125-0314-1600;
- прогибомер МП-3;
- манометры технические МТИ;
- гидравлические домкраты.

Технические характеристики и конструктивное исполнение термоэлектрических преобразователей, предназначенных для контроля температурного режима и измерения температуры на необогреваемой поверхности, описаны в главах 2, 3 настоящей работы.

Так как по методике [145] предельное состояние по несущей способности наступает не только вследствие обрушения конструкции, но и вследствие возникновения предельной деформации (прогиба), для измерения прогиба целесообразно использовать прибор «Прогибомер МП-3».

Для создания эксплуатационных нагрузок конструкции использовали гидравлические домкраты и манометры МТИ для контроля усилий, создаваемых в ходе испытаний (рисунки 4.10–4.13).

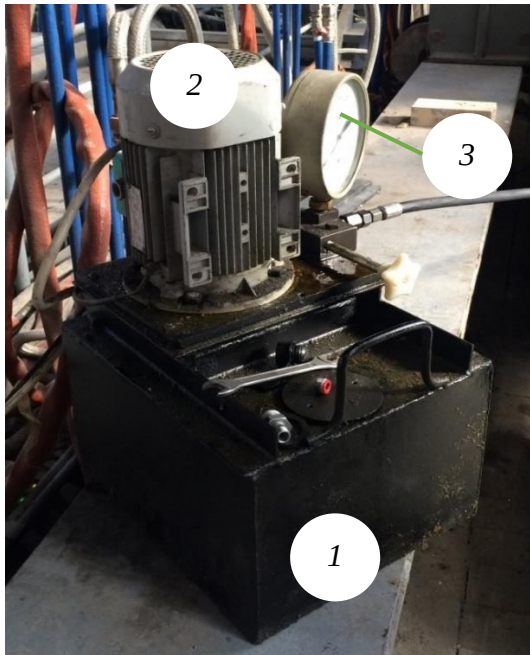


Рисунок 4.10 – Электрическое устройство для создания вертикальной нагрузки: 1 – емкость для гидравлического масла; 2 – электромотор; 3 – манометр



Рисунок 4.11 – Гидравлический домкрат для создания вертикальной нагрузки

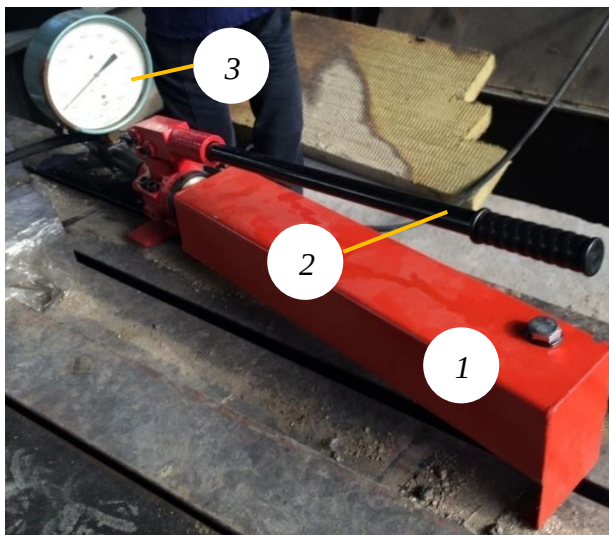


Рисунок 4.12 – Ручной механизм для создания горизонтальной нагрузки: 1 – емкость для гидравлического масла; 2 – ручка для подкачки и с устройством создания нагрузки; 3 – манометр



Рисунок 4.13 – Гидравлический домкрат для создания горизонтальной нагрузки

Температурный режим контролируется со специально оборудованного помещения, в котором расположены приборы, управляющие расходом керосина на форсунках, а также ЭВМ с установленным программным обеспечением. Данное оборудование представлено на рисунках 4.14–4.16.

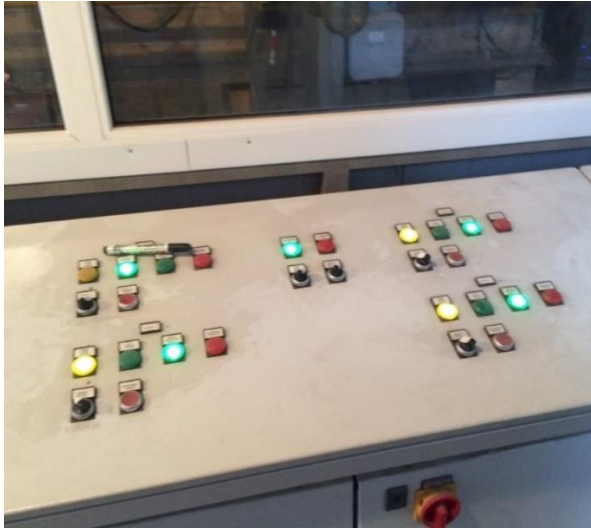


Рисунок 4.14 – Панель контроля включения/выключения и расхода форсунок



Рисунок 4.15 – Шкафы контроля температурного режима в печи для каждой форсунки, участвующей в испытании

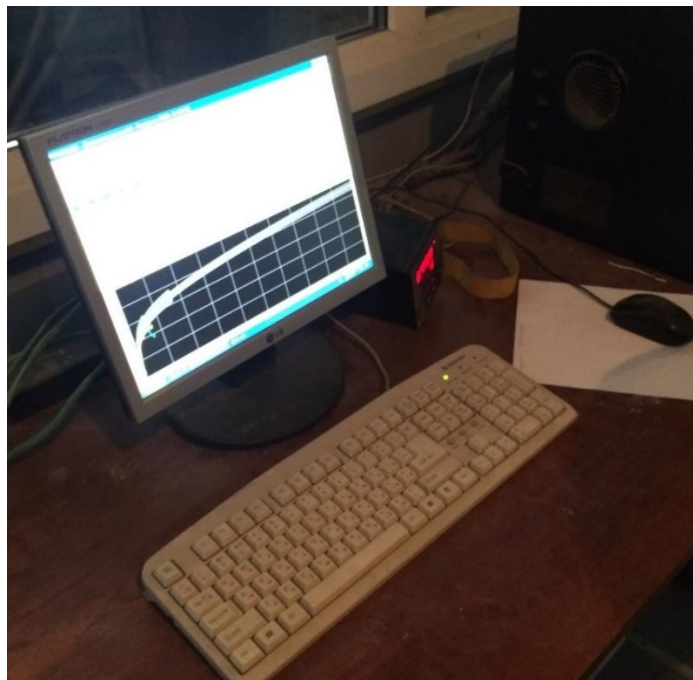


Рисунок 4.16 – ЭВМ с контролем и отображением температурного режима

За 30 минут до начала испытания конструкции нагружались до эксплуатационных нагрузок, после чего образцы подвергались воздействию температурного режима стандартного пожара. Испытания прекращались по достижении нормированного предела огнестойкости или при наступлении одного из предельных состояний.

4.2. Описание испытываемых образцов железобетонных тубингов с полипропиленовой фиброй

Образцы железобетонных тубингов, предназначенных для проведения эксперимента, изготавливались из тяжелого бетона на заводе ОАО «Моспром-железобетон». Состав бетона: портландцемент ПЦ I-500-Н, мелкий заполнитель – кварцевый песок, крупный заполнитель – гранитный щебень (фракция 5–15 мм) и пластификатор – Glenium 51. Размеры каждого тубинга составляли 2984×1400×300. В состав железобетонных тубингов вводилась полипропиленовая фибра ProZASK IGS с длиной волокон 6 мм, диаметром 18 мкм, в количестве 1 кг/м³.

Схема армирования железобетонных тубингов с добавкой ППФ представлена на рисунке 4.17.

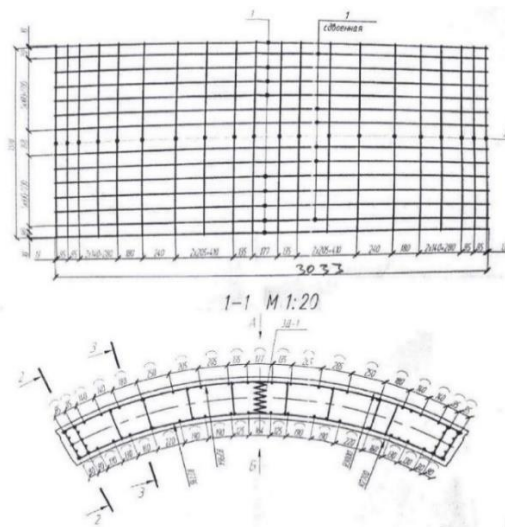


Рисунок 4.17 – Схема армирования железобетонной обделки (тубинга)

Железобетонный тьюбинг армировался металлической арматурой 28 Ø12 мм, марка стали В500С. Арматурные каркасы изготавливались с помощью точечной сварки. Толщина защитного слоя от обогреваемой поверхности до края арматуры составила 34 мм. Общий вид образцов представлен на рисунке 4.18.



Рисунок 4.18 – Общий вид образцов железобетонного тьюбинга с металлической арматурой

Данные образцы подвергались испытаниям на огнестойкость по стандартному температурному режиму пожара. Порядок проведения испытаний и результаты представлены в следующем разделе настоящей главы.

4.3. Проведение испытаний на огнестойкость железобетонных тьюбингов с полипропиленовой фиброй и результаты этих испытаний

Целью данного исследования являлось установление предела огнестойкости железобетонных тьюбингов для автомобильных тоннелей и метрополитена. Кроме того, планировалось экспериментально рассмотреть процесс взрывообразного разрушения.

Перед началом проведения эксперимента рассчитывался максимальный прогиб, который составил 99,5 мм, и предельная скорость деформации – 0,33 см/мин, превышение которых характеризует наступление предельного состояния по несущей способности. В ходе проведения эксперимента прогиб фиксировался с помощью прибора «Прогибомер МП-3». Также для определения пре-

дельного состояния по теплоизолирующей способности на необогреваемой поверхности устанавливались термопреобразователи для измерения температур.

За 30 минут до начала огневых испытаний конструкция нагружалась расчетной нагрузкой, которая составила: вертикальная – 50 т (490,5 кН), горизонтальная – 30 т (294,3 кН). После чего испытуемый образец тубинга подвергался воздействию температурного режима стандартного пожара.

Испытание начиналось с момента запуска температурного режима и завершалось по достижении нормируемого предела огнестойкости или одного из предельных состояний.

По результатам проведенных экспериментальных исследований строились графики изменения температуры в огневой камере, прогиба, температуры на необогреваемой поверхности, которые представлены на рисунках 4.19–4.20.

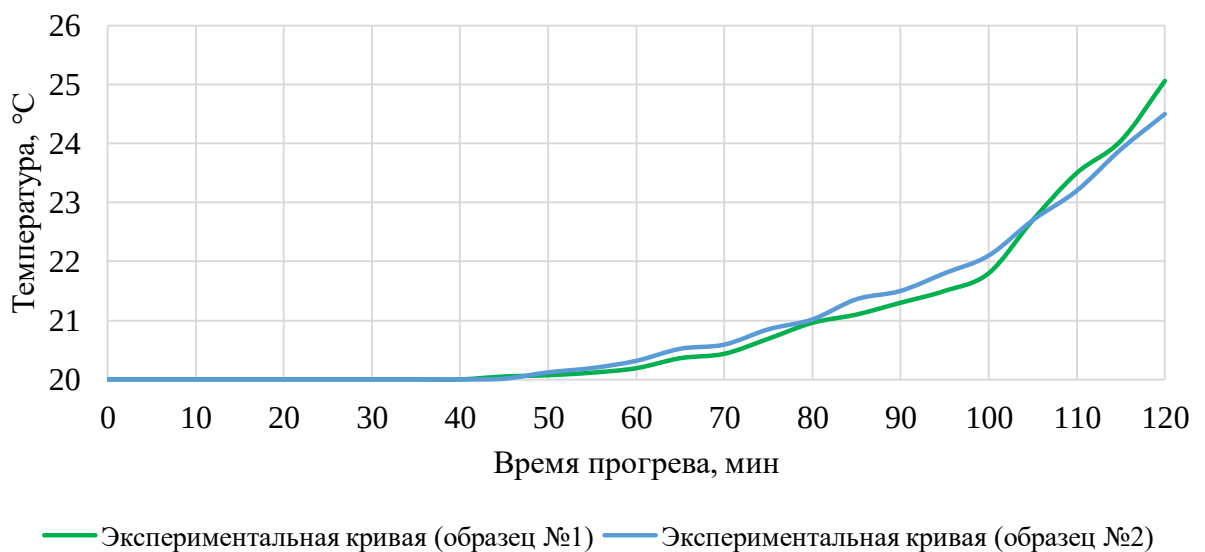


Рисунок 4.19 —Изменение температуры на необогреваемой поверхности тубинга при огневых испытаниях для двух образцов

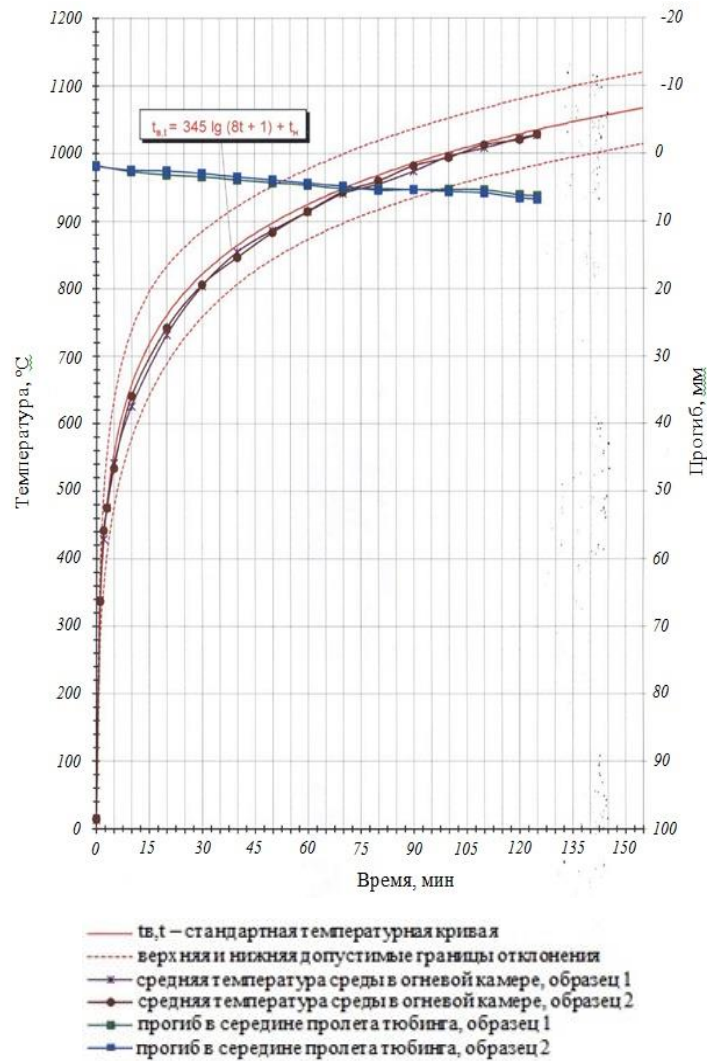


Рисунок 4.20 – Результаты испытаний на огнестойкость железобетонного тубинга с металлической арматурой и полипропиленовой фиброй

Предельная деформация в ходе испытаний составила менее 10 мм (рисунок 4.20), что не превышает предельно допустимого прогиба (99,5 мм). Средняя температура по пяти термопарам в интервале 0–120 минут составила 25,1 °C (рисунок 4.19), что значительно меньше допустимой температуры 160 °C.

В ходе испытаний визуально определено, что выпаривание влаги на необогреваемой поверхности образцов происходило на 30–37 минуте и продолжалось до момента завершения испытаний (рисунок 4.21). При этом стоит отметить, что на протяжении всего испытания выделяемая из структуры бетона влага имела коричневатый окрас (рисунки 4.22–4.23). При воздействии высокой температуры на полипропилен материал плавится, приобретая при этом процессе коричневый цвет. Исходя из этого можно предположить, что при нагреве

конструкции и продвижении зоны испарения вглубь образца происходит процесс плавления фибры и образование каналов, по которым нагретая влага выходит совместно с расплавленным полипропиленом.



Рисунок 4.21 – Выпаривание влаги на 40 минуте при испытаниях на огнестойкость



Рисунок 4.22 – Выпаривание влаги на 100 минуте при испытаниях на огнестойкость



Рисунок 4.23 – Выпаривание влаги на 100 минуте при испытаниях на огнестойкость в месте воздействия вертикальной нагрузки

После окончания испытаний и демонтажа образцов на обогреваемой стороне обнаружены две поперечные трещины шириной 1–3 мм и глубиной 20–30 мм и многочисленные нитевидные трещины (рисунок 4.24).



Рисунок 4.24 – Железобетонный тубинг после испытаний. Поперечные, нитевидные трещинообразования с обогреваемой стороны

Также на обогреваемой поверхности обнаружены незначительные отколы защитного слоя бетона, образовавшиеся в результате демонтажа образца с опор установки. Это свидетельствует о том, что взрывообразного разрушения бетона не происходило.

В результате проведенных экспериментальных исследований огнестойкости железобетонных тубингов с добавкой импортной ППФ, установлено, что предел огнестойкости тубингов составил REI 120. Эксперимент был прекращен на 125 минуте, т.к. был достигнут нормируемый предел огнестойкости.

4.4. Адаптация и апробация аналитической модели расчета огнестойкости железобетонных тубингов

На основании проведенных исследований и полученных экспериментальных данных адаптировалась и апробировалась аналитическая модель расчёта огнестойкости железобетонных тубингов. При этом рассчитывалась огнестойкость тубингов из бетона без добавки и с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм.

Для решения задачи огнестойкости и определения пределов огнестойкости расчётными методами необходимо решить две задачи: теплотехническую и статическую (прочностную).

Перед началом оценки огнестойкости необходимо определить сечения, в которых создается максимальный момент, то есть те, в которых может образоваться пластический шарнир, и определиться со свойствами материала, которые будут изменяться в ходе прогрева конструкции. Для определения моментов и сжимающих усилий использовался программный комплекс «Z_Soil». В результате численного эксперимента получены максимальные моменты и сжимающие усилия от сочетания внешних нагрузок, образующиеся в наиболее нагруженном сечении (рисунки 4.25–4.26).

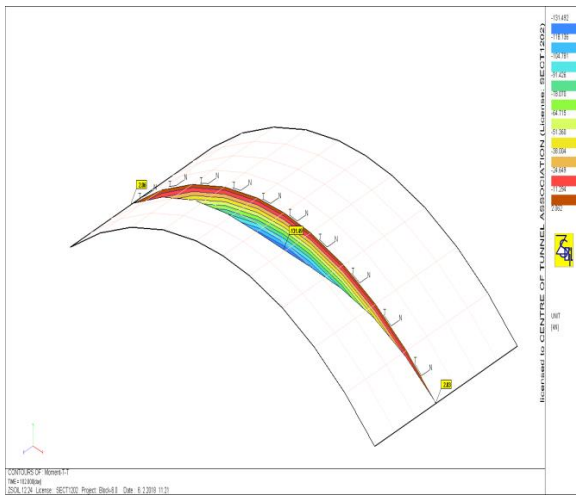


Рисунок 4.25 – Расчёт изгибающего момента железобетонных тубингов в программном комплексе «Z_Soil»

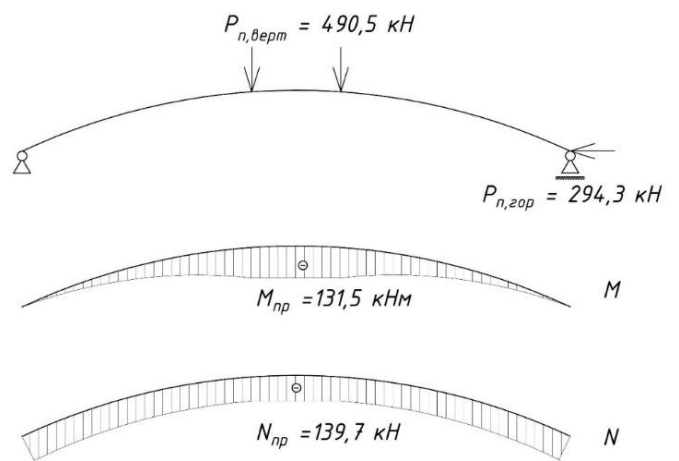


Рисунок 4.26 – Расчётная схема, эпюры моментов и сжимающих усилий железобетонных тубингов

По проведенному численному эксперименту можно сделать вывод, что наиболее нагруженное сечение будет являться пролетным. Исходя из этого сжатая зона данной конструкции будет образовываться в верхней части расчётного сечения. В качестве допущения принято, что бетон в сжатой зоне не прогревается, поэтому его прочность будет неизменной и согласно данным, указанным в главе 2 настоящей работы, составит 32 МПа.

Основываясь на вышеизложенном, необходимо определить изменение нормативного сопротивления арматуры в зависимости от прогрева и толщину несущего слоя бетона, образующийся со стороны воздействия температурного режима. Для расчёта огнестойкости использовались прочностные и теплофизические характеристики бетонов, полученные в главах 2, 3.

4.4.1. Моделирование теплотехнической задачи в программном комплексе ANSYS

Согласно достаточно хорошей сходимости экспериментальных и расчётных зависимостей, описанных в 3 главе, для расчёта теплотехнической задачи использовался программный комплекс ANSYS. В ANSYS согласно размерам и схеме армирования моделировалась геометрия железобетонного тубинга, представленная на рисунке 4.27.

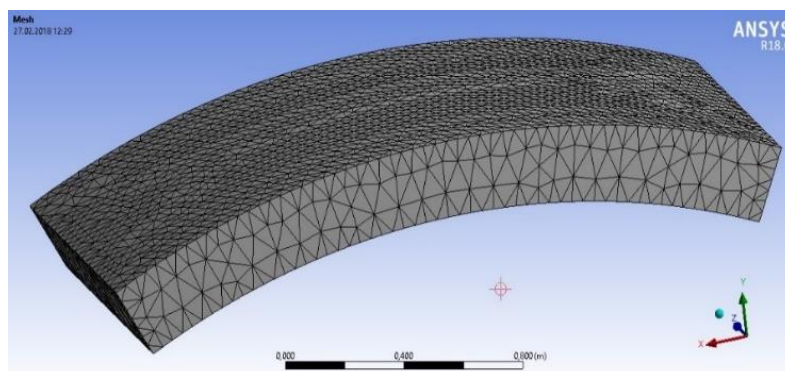


Рисунок 4.27 – Моделирование железобетонного тунинга в программном комплексе ANSYS

Начальные и граничные условия задавались таким же образом, как описано в главе 3. Однако при расчёте железобетонных конструкций следует учитывать наличие арматуры, так как данный элемент значительно влияет на несущую способность. Поэтому в [146–156] для моделирования железобетонного тунинга использовался твердотельный объемный конечный элемент SOLID 70, для арматуры, расположенной в объеме модели – линейный объемный конечный элемент LINK 33. Для арматуры, так же как и для бетона, задавались начальные условия, описанные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Свойства арматуры

Характеристика	Значение
Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/м·К	78–0,048t
Коэффициент теплоёмкости, c , Дж/кг К	310+0,48t
Плотность арматурной стали, кг/м ³	7800

В связи с высокой вероятностью возникновения пожаров нефтепродуктов в подземных сооружениях, расчет температурных полей прогрева тунингов производился как по «стандартному температурному режиму пожара», так и по «углеводородному температурному режиму пожара», в течение 120 минут.

После проведения моделирования в ANSYS железобетонного тунинга с добавкой импортной ППФ по стандартному пожару, расчётные и экспериментальные зависимости сравнивались на момент достоверности полученных результатов (рисунок 4.28).

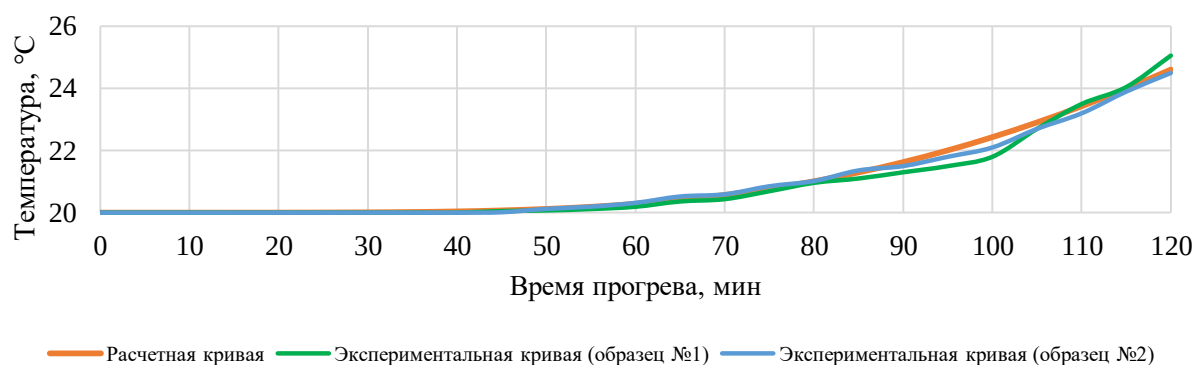


Рисунок 4.28 – Экспериментальная и расчётная зависимости прогрева необогреваемой поверхности конструкции

В результате проведенных расчётов выявлена незначительная погрешность, составившая не более 10 %. Исходя из этого, программный комплекс ANSYS использовался далее для расчёта теплотехнической задачи железобетонных туннелей без добавки и с добавкой ППФ по двум режимам пожара.

По результатам моделирования теплотехнической задачи в ANSYS по двум режимам пожара были получены температурные поля (изотермы) и графики зависимости температуры от времени для бетона и арматуры (рисунки 4.29–4.31).

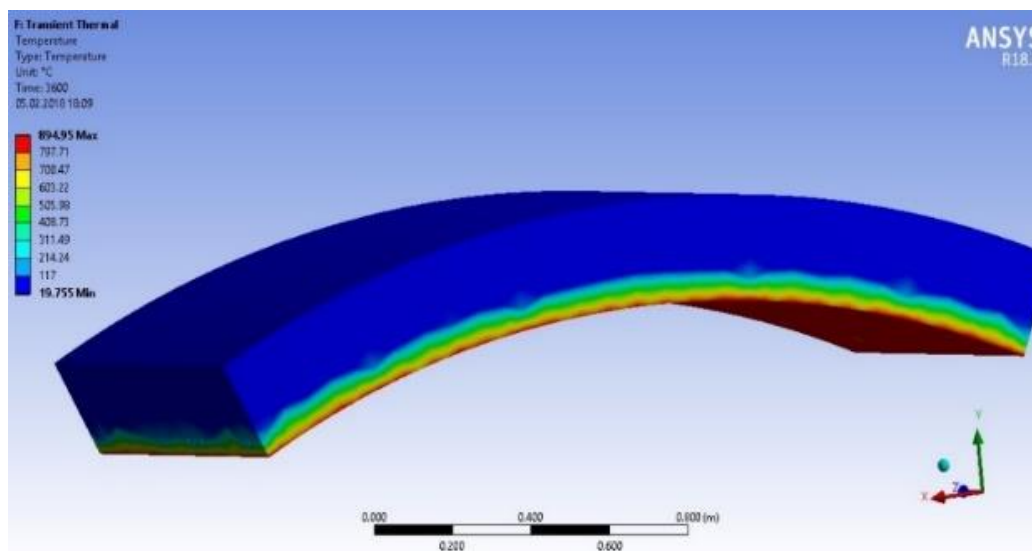
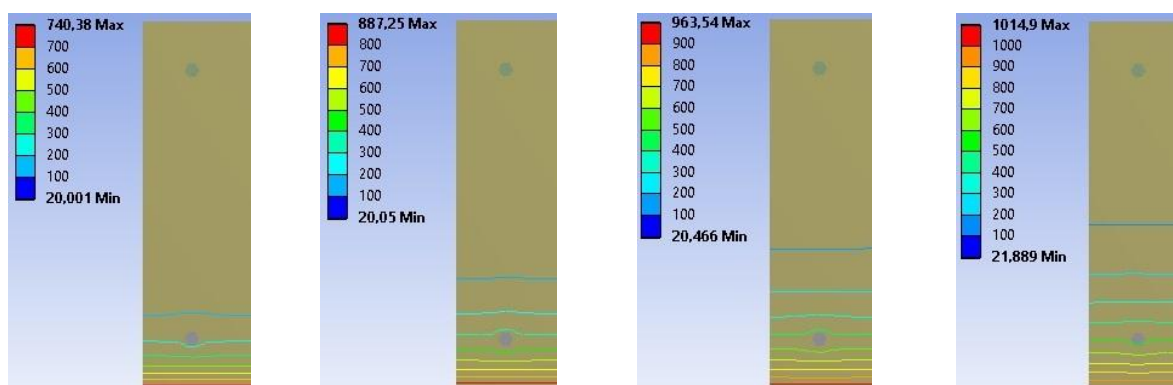


Рисунок 4.29 – Результат расчёта температурных полей для железобетонного туннеля в программном комплексе ANSYS

а) 30 минут 60 минут 90 минут 120 минут

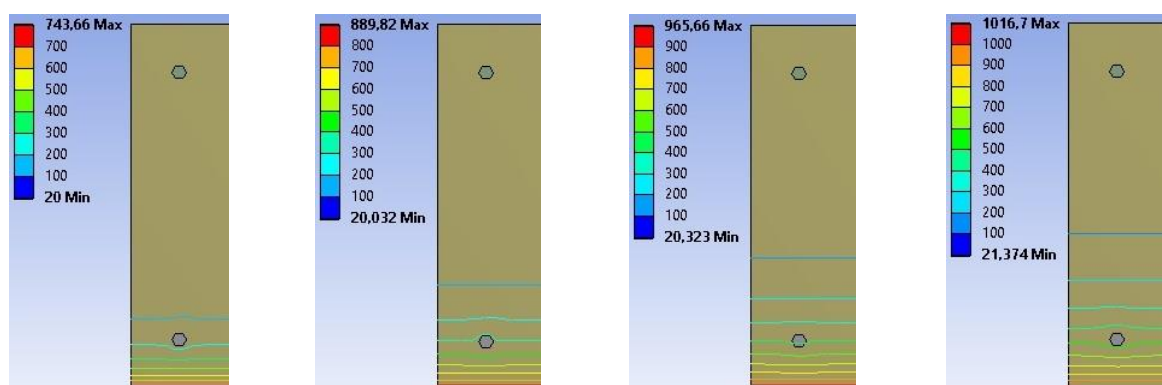


б) 30 минут

60 минут

90 минут

120 минут



в) 30 минут

60 минут

90 минут

120 минут

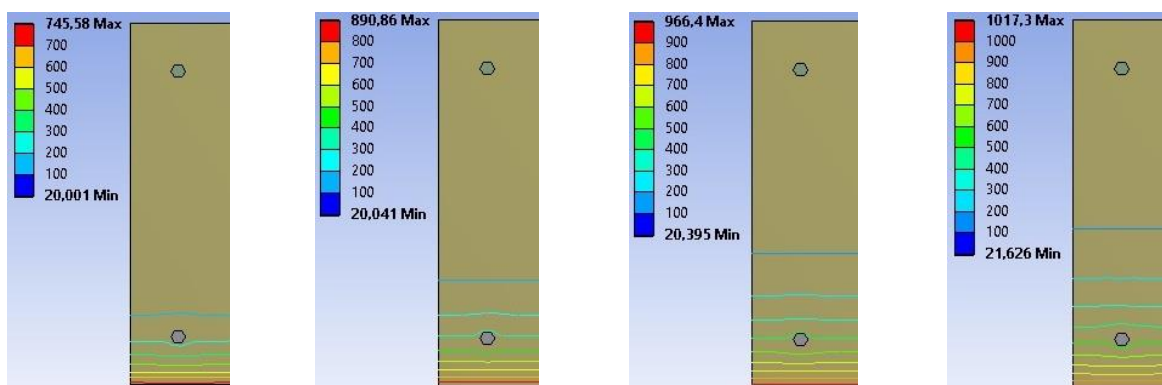


Рисунок 4.30 – Изотермы прогрева для железобетонных тубингов по стандартному режиму: а – без добавки фибры; б – с добавкой ProZASK IGS 12 мм; в – с добавкой ProZASK IGS 6 мм

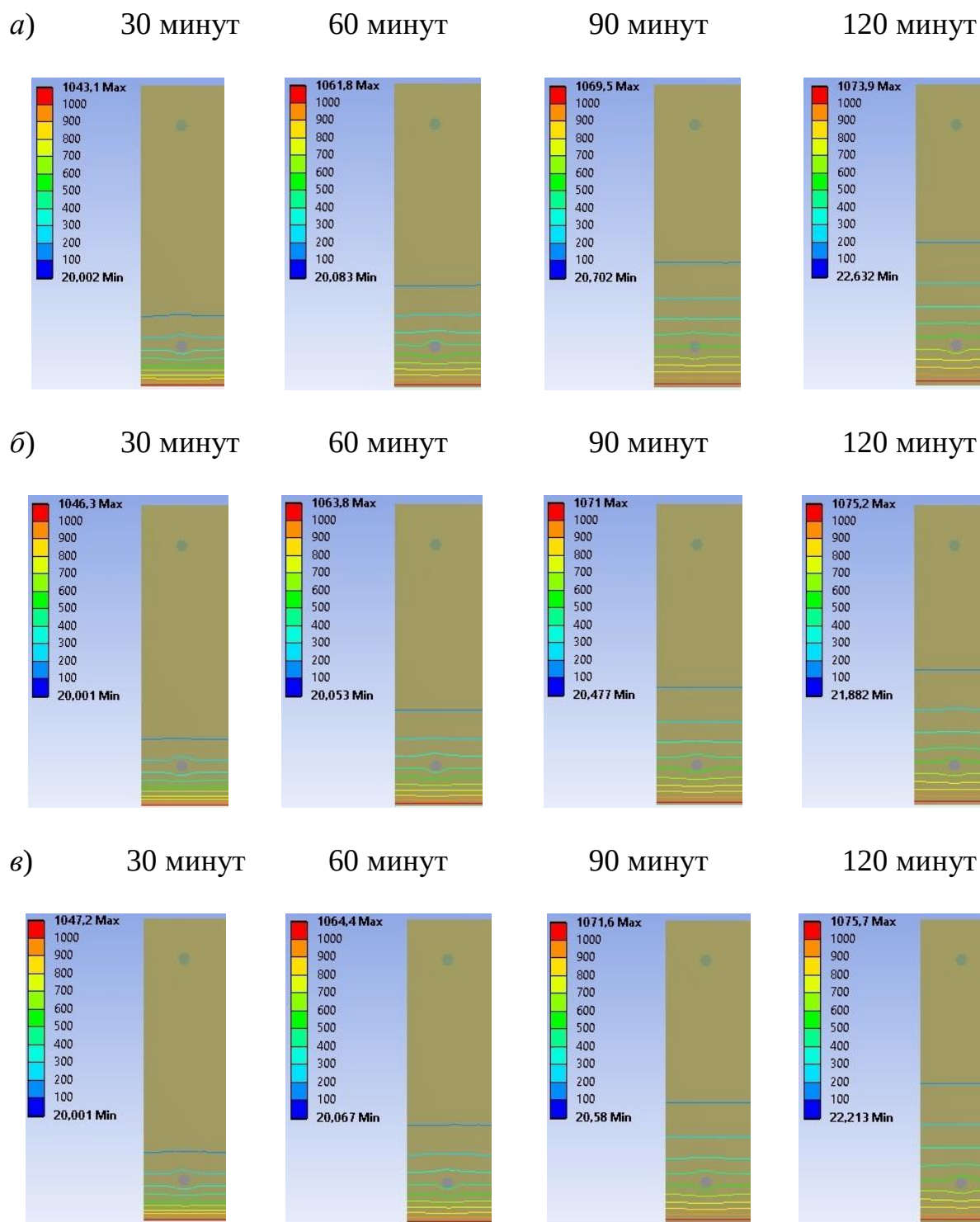


Рисунок 4.31 – Изотермы прогрева для железобетонных тубингов по углеводородному режиму: а – без добавки фибры; б – с добавкой ProZASK IGS 12 мм; в – с добавкой ProZASK IGS 6 мм

Так как конструкция подвергается температурному воздействию, то и прочностные свойства всех ее компонентов будут изменяться. Для определения изменения прочностных свойств арматуры при прогреве используется формула:

$$R_{su} = R_{sn} \gamma_{s,tem} , \quad (4.1)$$

где R_{sn} – нормативное сопротивление арматурной стали растяжению, МПа; R_{su} – сопротивление арматурной стали растяжению при рассчитанной температуре, МПа; $\gamma_{s,tem}$ – коэффициент снижения сопротивления арматурной стали.

Приведенный выше коэффициент $\gamma_{s,tem}$ учитывает изменения прочностных свойств арматуры (изменение нормативного сопротивления стали). В качестве продольной (несущей) арматуры в опытных образцах тюбингов использована арматура класса В500С. Так как данные о приведенном выше коэффициенте и нормативном сопротивлении стали отсутствуют в действующих нормативных документах, то использовались данные для арматуры А500 согласно СТО.

Важно учитывать также толщину не несущего слоя бетона. Для бетона на гранитном щебне при достижении температуры в 500 °С образуется слой, прочность которого равна нулю, поэтому считается, что данный материал полностью утрачивает свои прочностные характеристики, что уменьшает сечение конструкции.

По определенным температурным зависимостям получено нормативное сопротивление арматурной стали в зависимости от времени прогрева по формуле (4.2), которое представлено для стандартного и углеводородного температурных режимов пожара на рисунках 4.32, 4.33.

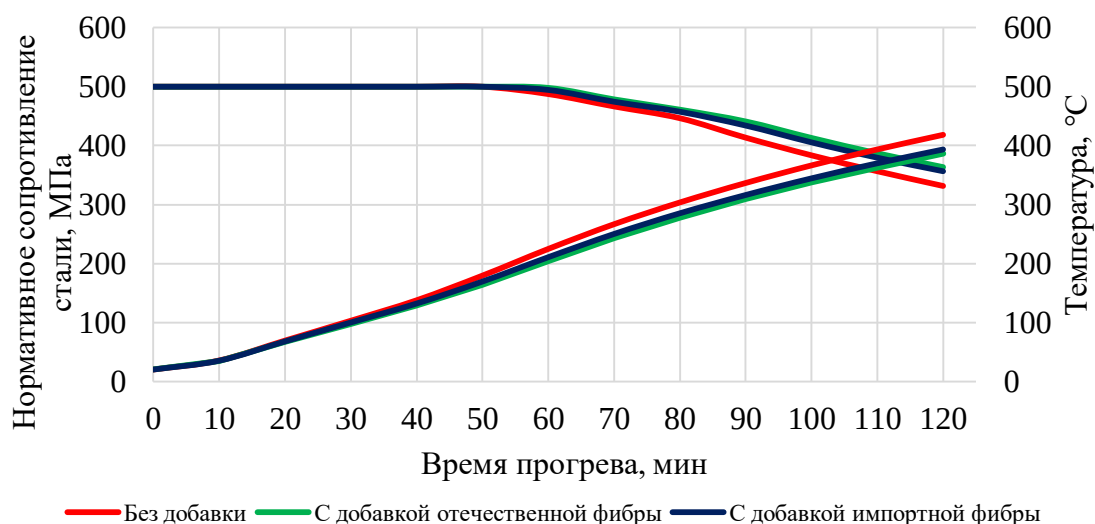


Рисунок 4.32 – Изменение нормативного сопротивления стали и температуры по стандартному температурному режиму пожара

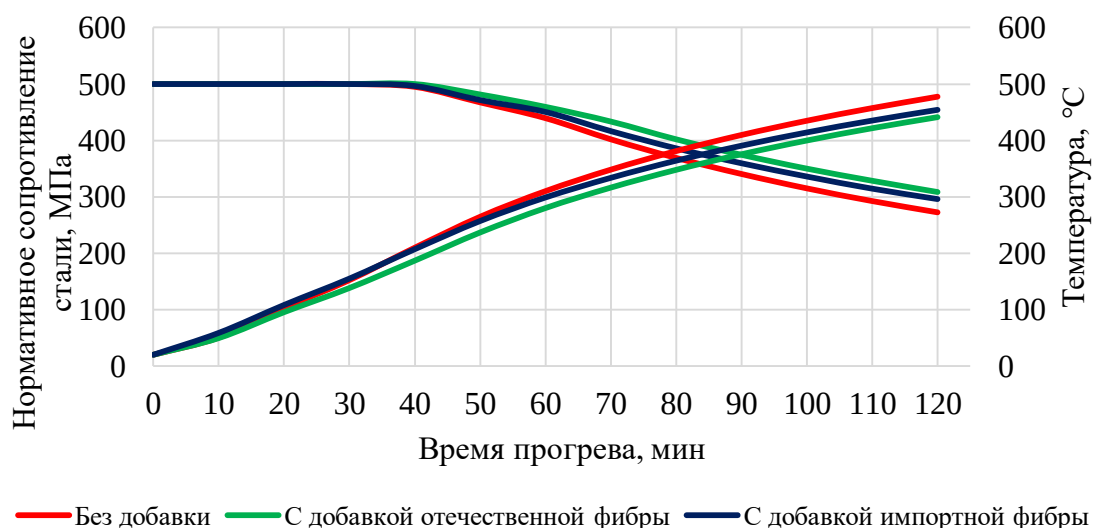


Рисунок 4.33 – Изменение нормативного сопротивления стали и температуры по углеводородному температурному режиму пожара

Также по результатам расчета были построены номограммы прогрева бетона для всех видов железобетонных тубингов в зависимости от температуры (рисунки 4.34–4.39).

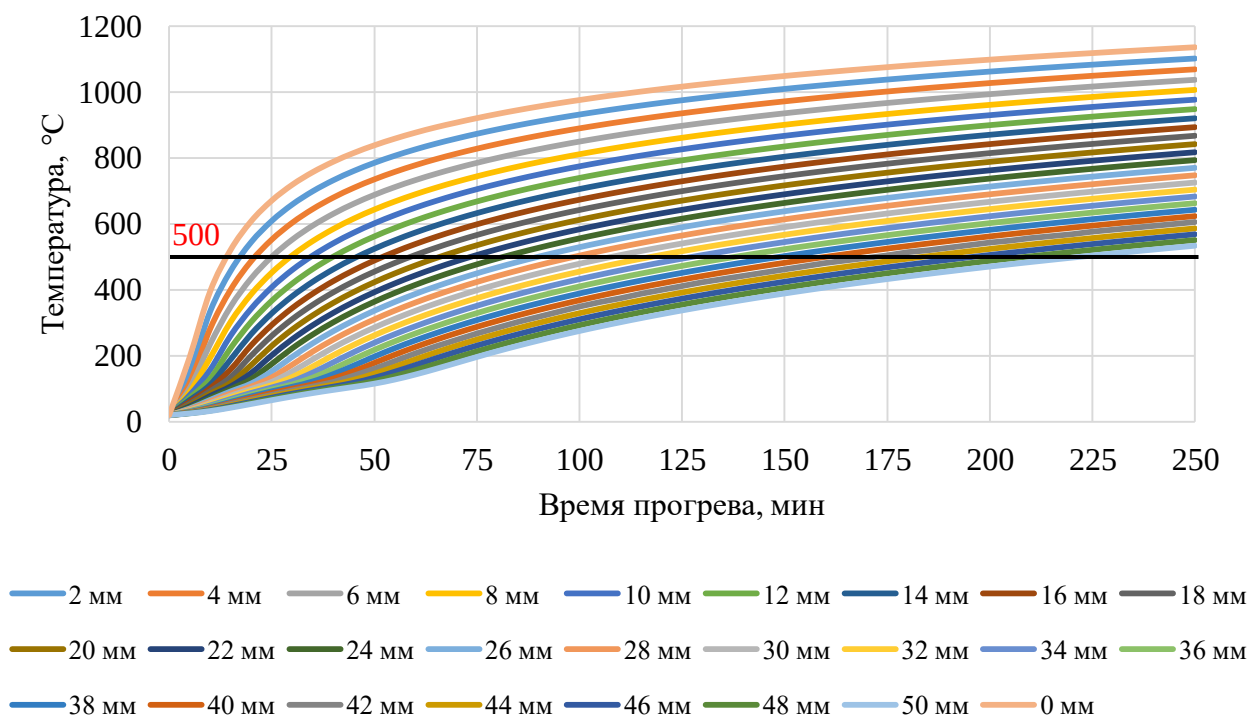


Рисунок 4.34 – Прогрев слоев бетона железобетонного тубинга без добавки фибры в зависимости от времени при стандартном режиме пожара

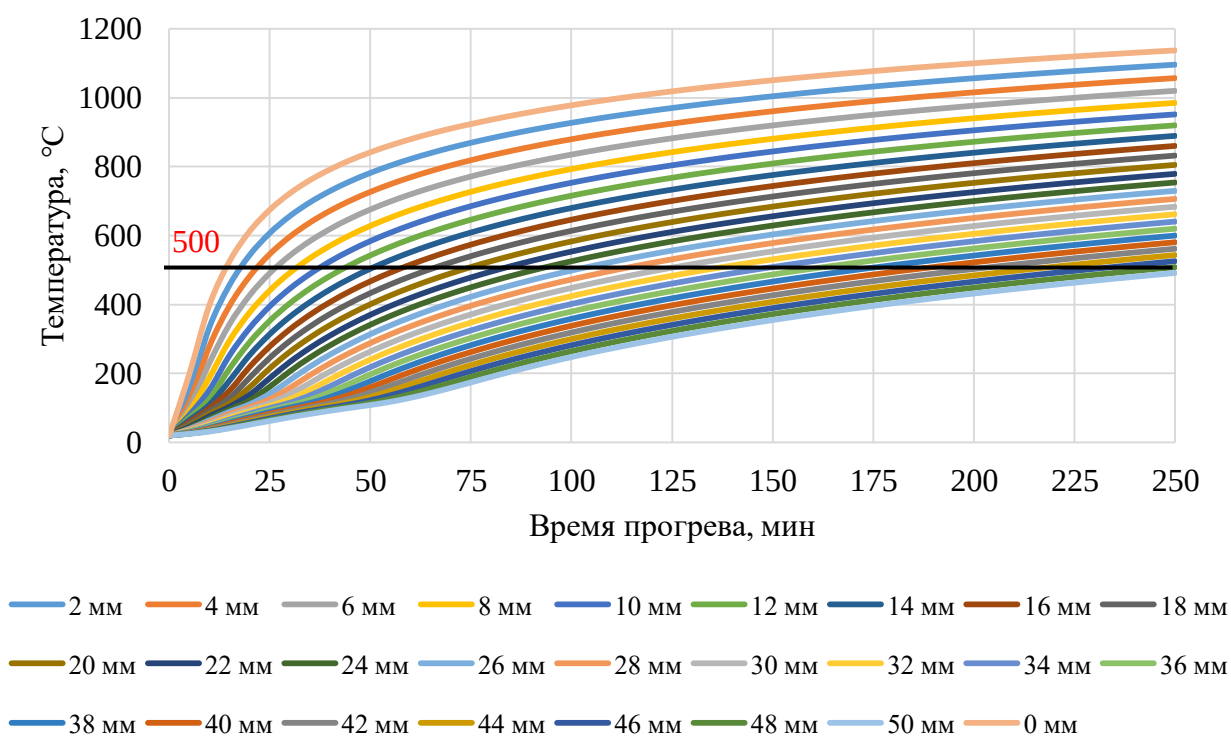


Рисунок 4.35 – Прогрев слоев бетона железобетонного тубинга с добавкой ProZASK IGS 12 мм в зависимости от времени при стандартном режиме пожара

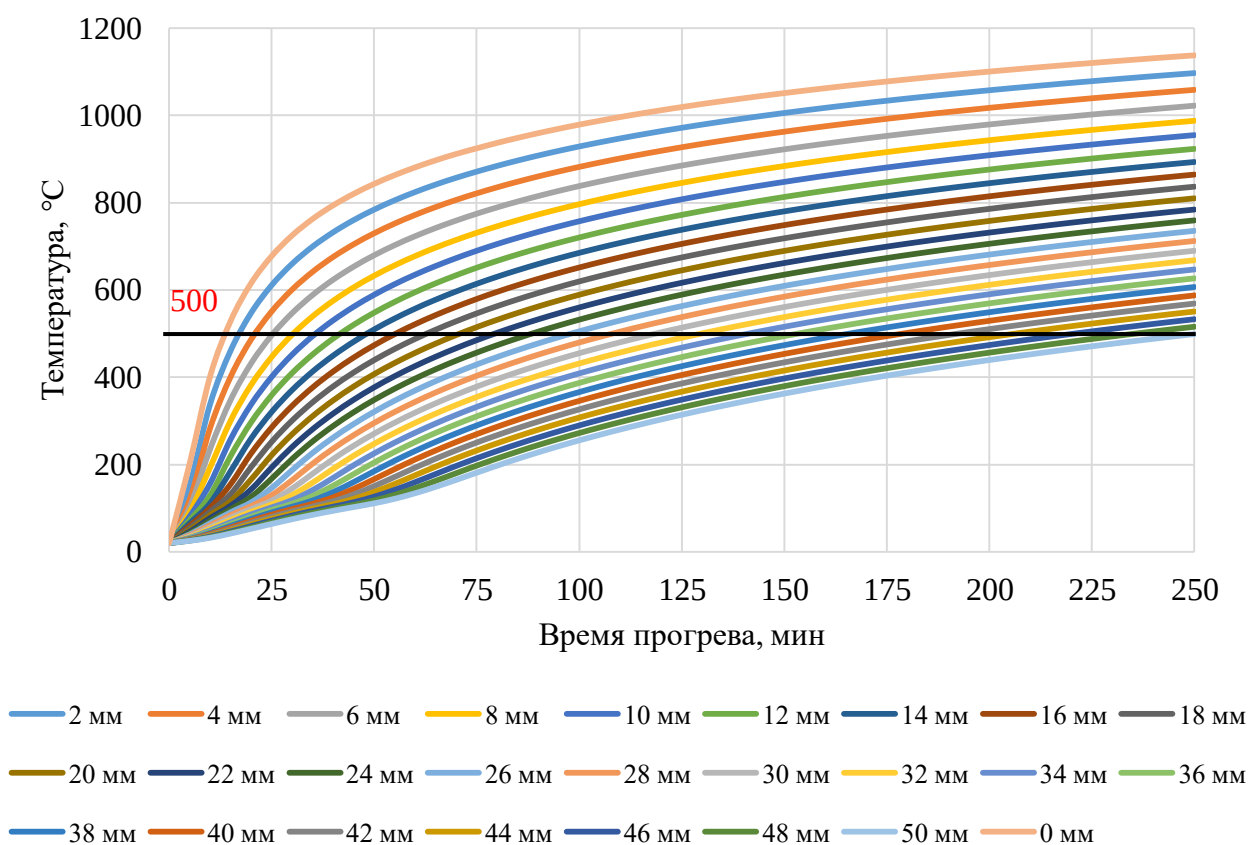


Рисунок 4.36 – Прогрев слоев бетона железобетонного тубинга с добавкой ProZASK IGS 6 мм в зависимости от времени при стандартном режиме пожара

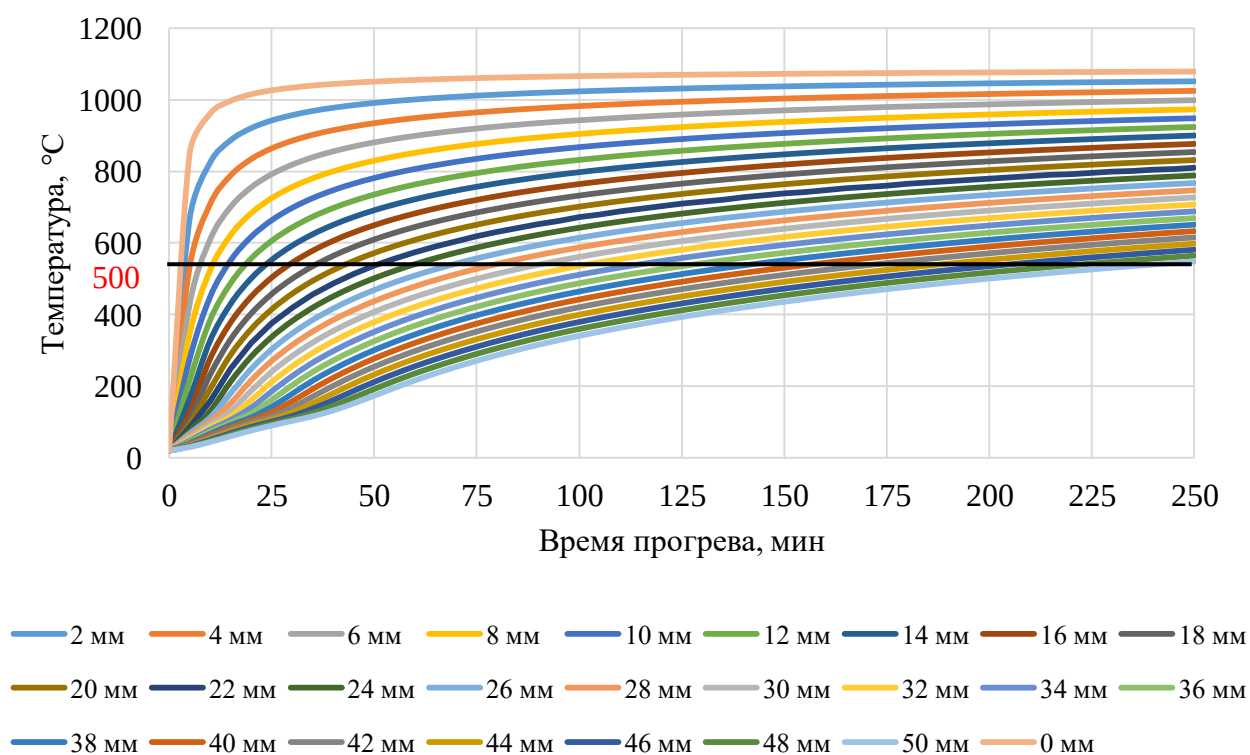


Рисунок 4.37 – Прогрев слоев бетона железобетонного тубинга без добавки фибры в зависимости от времени при углеводородном режиме пожара

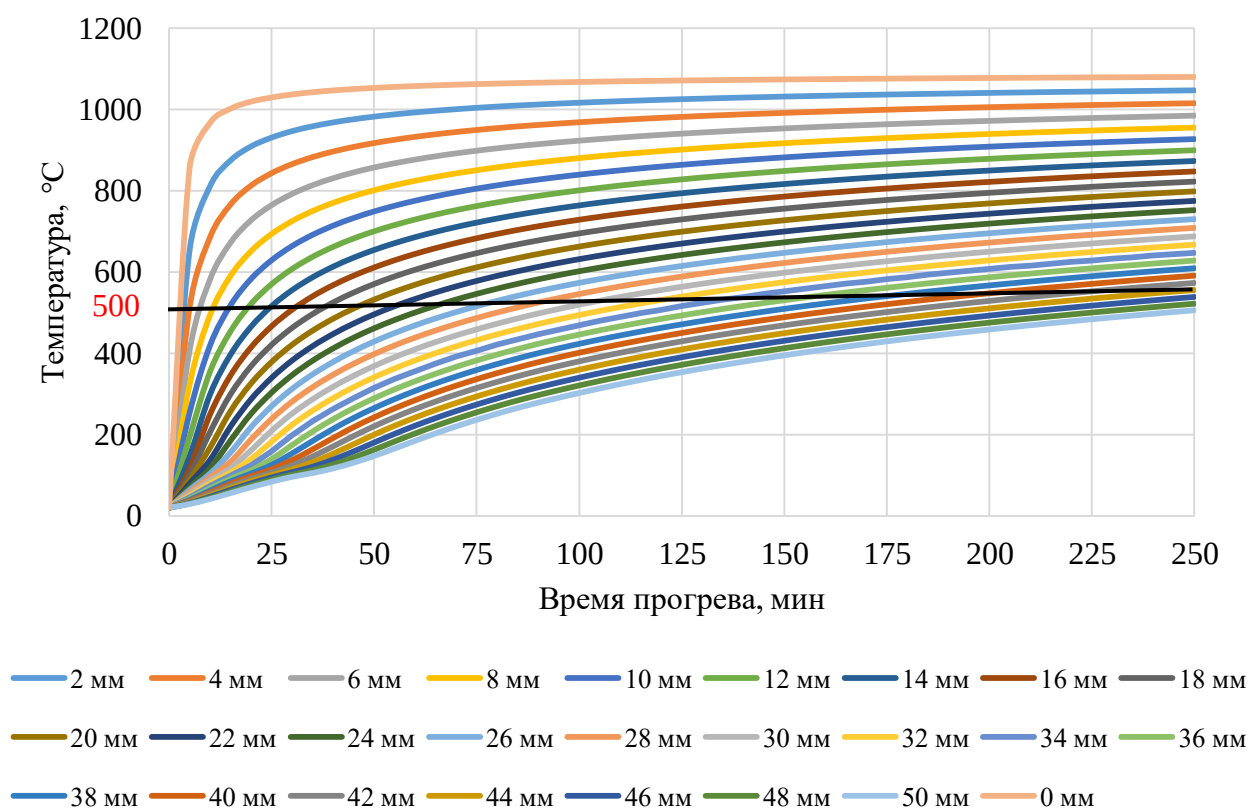


Рисунок 4.38 – Прогрев слоев бетона железобетонного тубинга с добавкой ProZASK IGS 12 мм в зависимости от времени при углеводородном режиме пожара

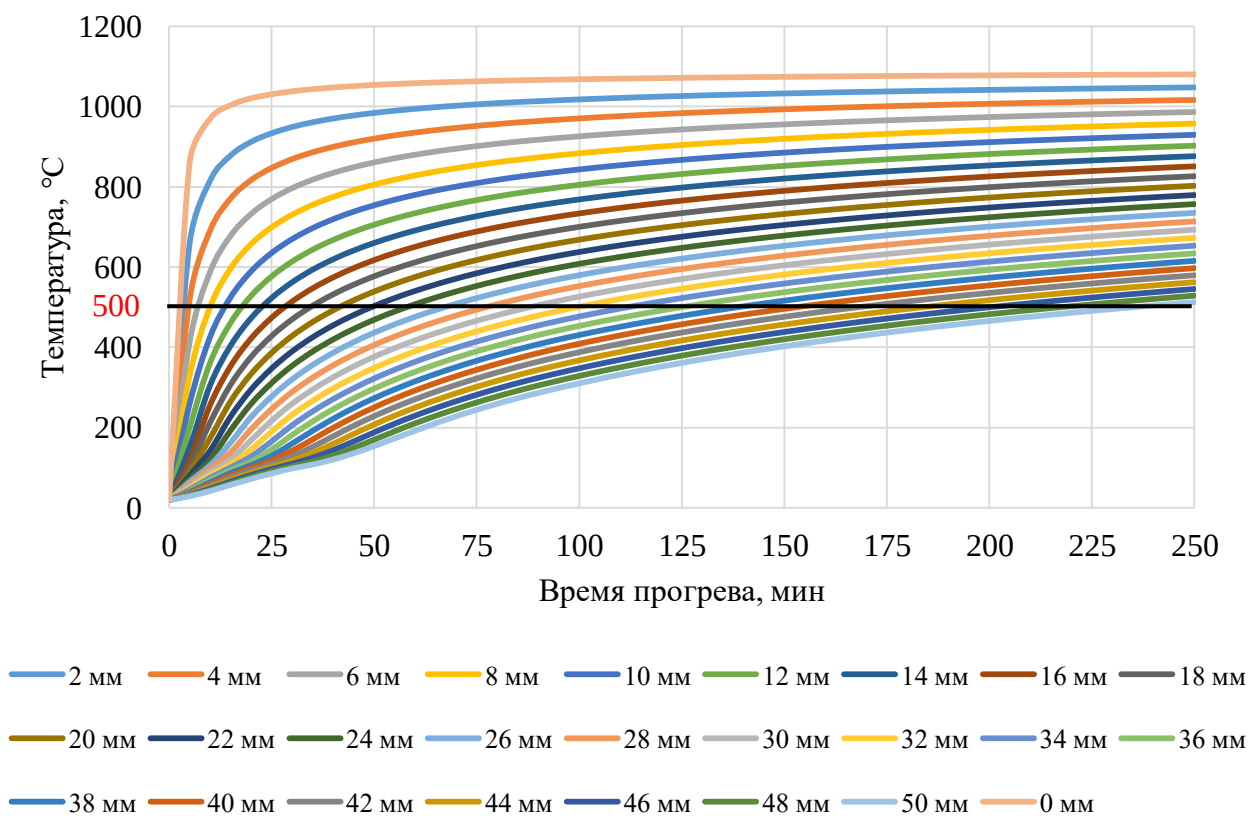


Рисунок 4.39 – Прогрев слоев бетона железобетонного тубинга с добавкой ProZASK IGS 6 мм в зависимости от времени при углеводородном режиме пожара

По зависимостям, проиллюстрированным на рисунках 4.34–4.39, определялась толщина несущего слоя по стандартному и углеводородному режимам пожара. Определялись они следующим образом: при шаге в 10 мин. и пересечении линии в 500 °С путем линейной интерполяции рассчитывалось значение толщины. В результате расчета строились зависимости толщины несущего слоя от времени прогрева (рисунок 4.40).

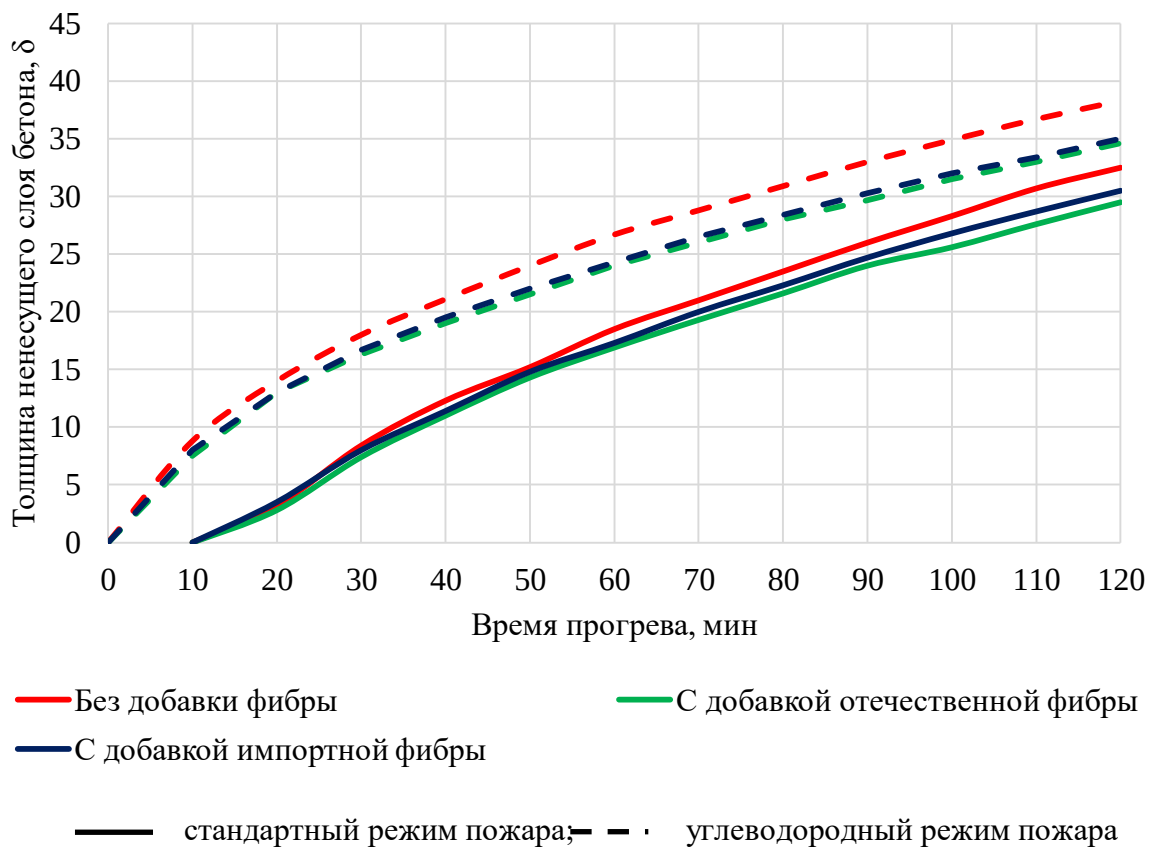


Рисунок 4.40 – Толщина несущего слоя железобетонных тубингов в зависимости от времени при стандартном и углеводородном режимах пожара

При воздействии стандартного режима пожара несущий слой бетона начинает появляться только с 10 минуты огневого воздействия, для углеводородного режима данный слой появляется с первых минут огневого воздействия. Связано это с резким нарастанием температуры среды при углеводородном режиме (резкий скачок температур на первых минутах воздействия с 20 до 1080 °С).

В расчёте огнестойкости также учитывается температурное расширение бетона в сжатой зоне и арматурной стали в растянутой зоне, которые влияют на прогиб конструкции. Учитывая, в качестве допущения, что бетон в сжатой зоне не прогревается, тогда коэффициент температурного расширения не изменяется в зависимости от температуры. В свою очередь, арматура подвержена прогреву, поэтому коэффициент ее температурного расширения будет изменяться в зависимости от роста температуры (рисунок 4.41).

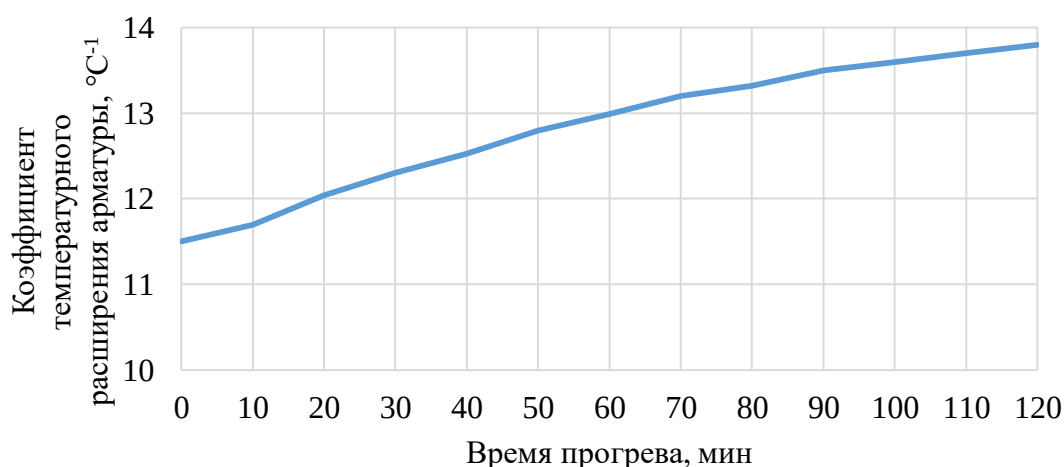


Рисунок 4.41 – Изменение коэффициента температурного расширения в зависимости от времени воздействия стандартного пожара

Далее по полученным характеристикам бетона и арматуры решалась статическая (прочностная) задача для определения несущей способности и предела огнестойкости железобетонных тубингов без добавки и с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм.

4.4.2. Решение статической (прочностной) задачи по стандартному температурному режиму пожара

После определения основных прочностных показателей арматуры и бетона, зависящих от прогрева, производился расчет прочностной задачи. Цель данного расчета – определение несущей способности и пределов огнестойкости

железобетонной конструкции с учетом изменения свойств бетона и арматуры в зависимости от прогрева.

Для оценки несущей способности и определения фактических пределов огнестойкости помимо прочностных показателей бетона и арматуры определялись исходные данные, которые представлены ниже (рисунок 4.42):

- расчетная длина $l_0 = 2,984$ м;
- высота сечения $h = 0,3$ м;
- ширина сечения $b = 1,4$ м;
- защитный слой арматуры $a_1 = a_2 = 0,04$ м;
- прочность бетона на осевое сжатие $R_{bn} = 32$ МПа;
- модуль упругости бетона $E_b = 37000$ МПа;
- временное сопротивление арматурной стали $R_{su} = 500$ МПа;
- модуль упругости арматурной стали $E_s = 200000$ МПа;
- вертикальная нагрузка $P_{n, \text{верт}} = 490,5$ кН;
- горизонтальная нагрузка $P_{n, \text{гор}} = 294,3$ кН.

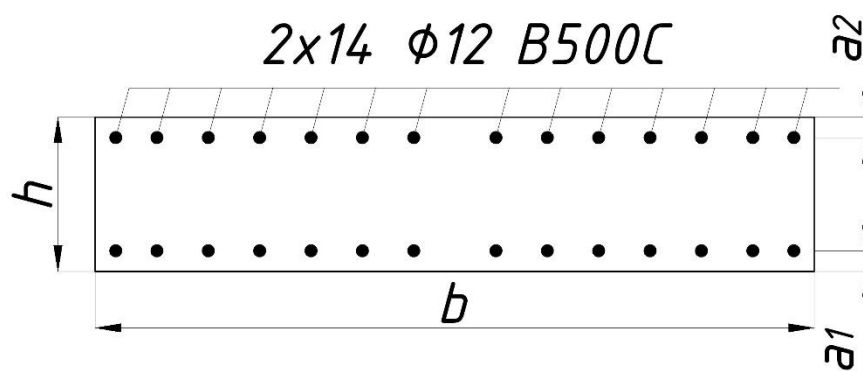


Рисунок 4.42 – Схема сечения железобетонной обделки (тюбинга)

Так как ранее было установлено что элемент обделки является сжато-изгибаемым элементом, тогда характер работы будет зависеть от эксцентриситета e_0 продольной силы N и изгибающего момента M [155–156]. При этом для расчета адаптировалась методика, указанная в [124]. Эксцентриситет рассчитывается по формуле:

$$e_0 = \frac{M}{N}, \quad (4.2)$$

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{131,5}{139,7} = 0,941 \text{ м.}$$

Также в расчете учитывается случайный эксцентриситет $e_a = h/30 = 10 \text{ мм}$; $e_a = l/600 = 5 \text{ мм}$, который суммируется с эксцентриситетом, зависящим от изгибающего момента и продольной сжимающей силы. Следовательно, из рассчитанных случайных эксцентриситетов выбираем наибольшее значение и суммируем с эксцентриситетом e_0 . Принимаем $e_0 = 0,951 \text{ м}$. При расчете необходимо определить случай эксцентриситета, который описывается исходя из условий:

при $e_0 \leq \frac{h}{2} - a$ – случай малых эксцентриситетов;

при $e_0 > \frac{h}{2} - a$ – случай больших эксцентриситетов.

$$e_0 = 0,941 \text{ м} > \frac{h}{2} - a = 0,085 \text{ м.}$$

Исходя из полученного условия принимается случай большого эксцентриситета. В случае с большим эксцентриситетом принимаем, что растянутая арматура находится в предельном состоянии, т.е. $\sigma_s A_{s,i} = R_{su} A_{s,i}$.

Определяем рабочую высоту сечения железобетонного тюбинга:

$$h_0 = h - a. \quad (4.3)$$

Увеличение прогиба при нагреве тюбинга приводит к увеличению величины начального эксцентриситета. Учитывается это увеличение коэффициентом η :

$$\eta = \frac{I}{I - \frac{N}{N_{cr}}}, \quad (4.4)$$

где N – действующая продольная сила, Н; N_{cr} – условная критическая продольная сила, Н.

Условная критическая продольная сила железобетонного элемента определяется:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}, \quad (4.5)$$

где l_0 – расчетная длина элемента, м; D – жесткость железобетонного элемента в предельном по прочности состоянии.

Жесткость железобетонного элемента в предельном по прочности состоянии для прямоугольного сечения определяется по:

$$D = E_b b h_t^3 \left[\frac{0,0125}{\varphi_l (0,3 + \delta_e)} + 0,175 \mu \alpha \left(\frac{h_0 - a'}{h_t} \right) \right], \quad (4.6)$$

где E_b – модуль упругости бетона, МПа; I – момент инерции бетонного сечения; φ_l – коэффициент, учитывающий влияние длительного действия нагрузки на прогиб элемента (принимается равным 1); δ_e – коэффициент, принимаемый равным e_0/h , но не менее 0,15; E_s, E'_s – модуль упругости растянутой и сжатой арматуры соответственно, МПа; I_s, I'_s – момент инерции сечения арматуры в растянутой и сжатой зоне относительно центра тяжести бетонного сечения, м⁴; h_t – изменение высоты рабочей зоны сечения при прогреве, м; a' – толщина защитного слоя арматуры в сжатой зоне, м.

Изменение высоты рабочего сечения железобетонного тубинга зависит от изменения толщины несущего слоя бетона:

$$h_t = h_0 - \delta.$$

Определяется расстояние от точки приложения продольной силы до центра тяжести растянутой арматуры:

$$e = e_0 \eta + \frac{h_0 - a'}{2} + e_t, \quad (4.7)$$

где e_t – температурный прогиб конструкции, м.

Так как железобетонный тубинг является криволинейным элементом, то необходима корректировка формулы определения температурного прогиба. В соответствии с [48] определялся прогиб железобетонного тубинга. Для этого необходимо определить изогнутую ось элемента.

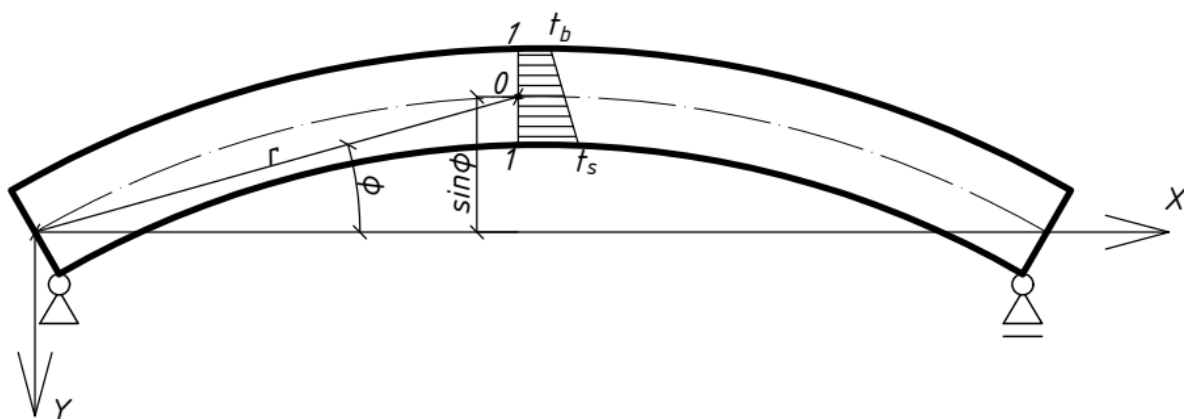


Рисунок 4.43 - Железобетонный тубинг с линейным характером изменения температуры по высоте сечения.

Дифференциальное уравнение изогнутой оси элемента:

$$y'' = -\left(\frac{1}{r}\right)_t, \quad (4.8)$$

где $\left(\frac{1}{r}\right)_t$ – кривизна оси элемента от температуры

Для определения прогиба необходимо произвести интегрирование данного уравнения. Первое интегрирование:

$$y' = -\left(\frac{1}{r}\right)_t x + C_1, \quad (4.9)$$

Так как конструкция криволинейна, то при $x = r \sin \varphi$, $y' = 0$ (рисунок 4.43). Исходя из выражаем C_1 из формулы (4.9):

$$C_1 = \left(\frac{1}{r}\right)_t r \sin \varphi, \quad (4.10)$$

Далее проводилось второе интегрирование выражения (4.9):

$$y = -\left(\frac{1}{r}\right)_t \frac{x^2}{2} + \left(\frac{1}{r}\right)_t r \sin \varphi x + C_2, \quad (4.11)$$

При $x = 0$, $y = 0$, следовательно, $C_2 = 0$. Исходя из этого преобразуем выражение (4.11):

$$y = -\left(\frac{1}{r}\right)_t \frac{x^2}{2} + \left(\frac{1}{r}\right)_t r \sin \varphi x, \quad (4.12)$$

Так как максимальный прогиб будет образовываться в середине пролета железобетонного тьюбинга, то расчет прогиба производится при $x = r \sin \varphi$.

$$y = -\left(\frac{1}{r}\right)_t \frac{(r \sin \varphi)^2}{2} + \left(\frac{1}{r}\right)_t r \sin \varphi \cdot r \sin \varphi, \quad (4.13)$$

Температурная кривизна определяется по:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_t = \frac{(\alpha_{st} t_s - \alpha_{bt} t_b)}{h_0}, \quad (4.14)$$

где α_{st} , α_{bt} – коэффициент температурного расширения арматуры и бетона; t_s , t_b – температура арматуры и бетона соответственно;

Преобразовывая выражение (4.13) и подставляя (4.14) получаем:

$$e_t = \frac{3(\alpha_{st} t_s - \alpha_{bt} t_b) r^2 \sin^2 \varphi}{2h_0}, \quad (4.15)$$

При этом по результатам расчёта расчётный температурный прогиб сравнивался с экспериментальным. Зависимость прогибов от температуры представлен на рисунке 4.44.

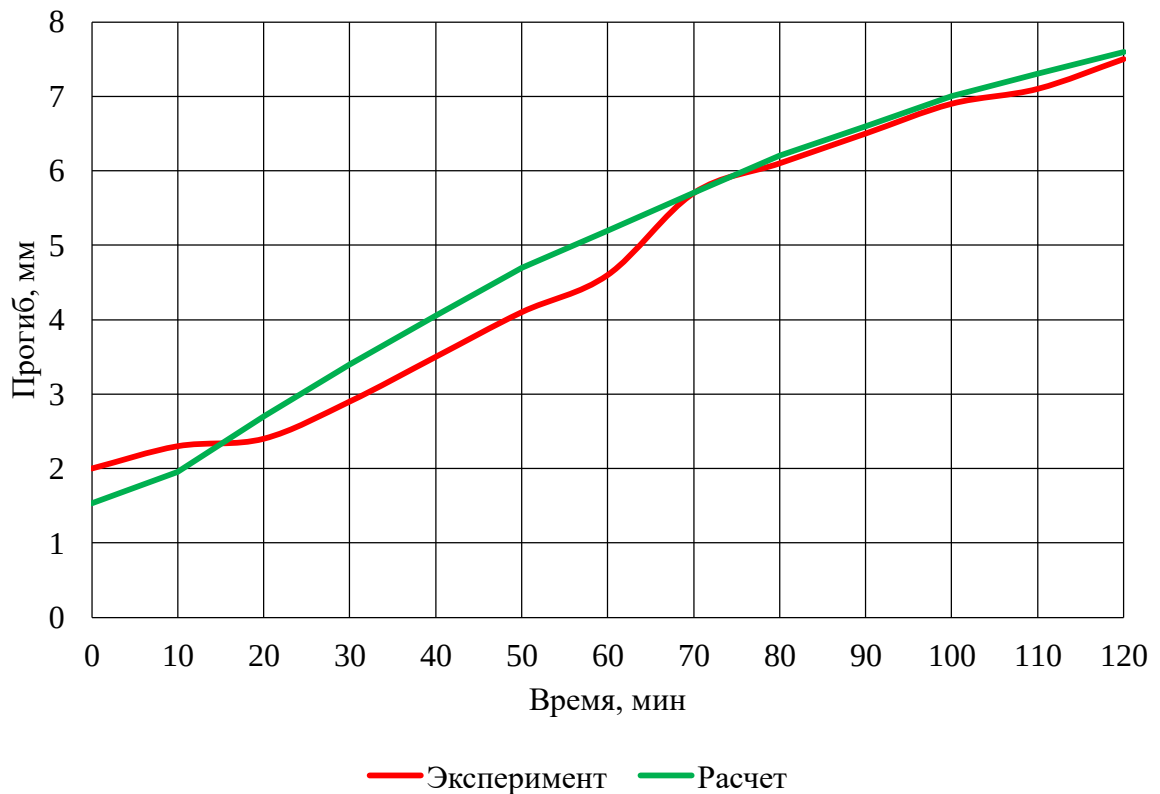


Рисунок 4.44 – Зависимость прогиба железобетонного тьюбинга от времени воздействия стандартного температурного режима пожара.

В результате сравнения расчётного и экспериментального температурного прогиба получено расхождение 12%.

Определив дополнительный эксцентриситет рассчитывают изгибающий момент с учетом дополнительного прогиба:

$$M_n = Ne.$$

При прогреве железобетонных конструкций возможны несколько характеров разрушения. Из работы Яковлева А.И. [48] следует, что возможны три случая разрушения конструкций:

- образование пластического шарнира в результате нагрева растянутой арматуры и снижения предела текучести до рабочих напряжений, вследствие чего уменьшается сжатая зона и происходит обрушение;
- разрушение по сжатой зоне бетона, то есть в результате достижения предельных значений прочности, раньше начала текучести растянутой арматуры;
- граничный случай, когда предел текучести рабочей арматуры снижается до рабочих напряжений и в сжатой зоне бетон достигает предельных значений прочности.

Для определения характера разрушения следует определить такие параметры, как относительная высота сжатой зоны ζ и граничная относительная высота сжатой зоны ζ_R , то есть если $\zeta < \zeta_R$, то разрушение будет происходить по первому случаю, если $\zeta > \zeta_R$, то – по второму. Для третьего случая должно выполняться следующее условие $\zeta = \zeta_R$.

Граничная высота сжатой зоны определяется по формуле:

$$\zeta_R = \frac{\omega}{1 + \frac{R_s \gamma_{s,tem} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)}{0,002 E_s \beta_s}}, \quad (4.16)$$

где ω – характеристика сжатой зоны.

Характеристика сжатой зоны определяется из выражения:

$$\omega = \alpha - 8R_b 10^{-9}, \quad (4.17)$$

где α – коэффициент, принимаемый для тяжелого бетона равным 0,85.

Относительная высота сжатой зоны определяется в зависимости прогрева сечения и высоты сжатой зоны.

Схема определения высоты сжатой зоны для сечения с максимальным изгибающим моментом представлена на рисунке 4.45.

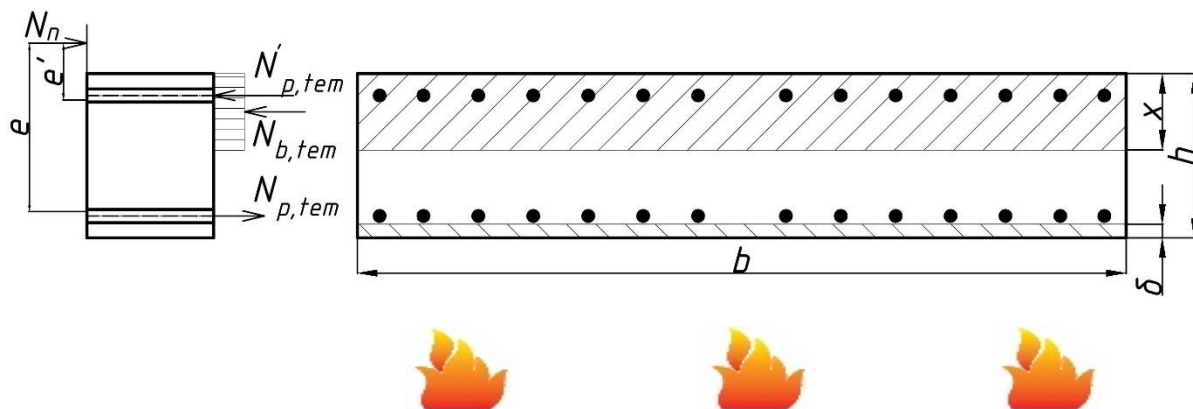


Рисунок 4.45 – Расчетная схема и эпюра напряжений для сечения с максимальным отрицательным моментом железобетонного тубинга

Определяем высоту сжатой зоны бетона x :

$$x = \frac{N_n + R_{su}A_{s,i} - R'_{su}A'_{s,i}}{R_{bn}b}, \quad (4.18)$$

где N_n – продольная сжимающая сила, Н; R_{su} , R'_{su} – сопротивления арматуры растяжению в растянутой и сжатой зоне, МПа; $A_{s,i}$, $A'_{s,i}$ – суммарная площадь сечения арматуры в растянутой и сжатой зоне, МПа; R_{bn} – сопротивление бетона сжатию, МПа.

Если высота сжатой зоны меньше защитного слоя арматуры $x < a$, то значения высоты сжатой зоны пересчитываем при условии, что арматура в сжатой зоне не воспринимает усилия $R'_{su}A'_{s,i} = 0$. Учитывая условие $R'_{su}A'_{s,i} = 0$, тогда:

$$x = \frac{N_n + R_{su}A_{s,i}}{R_{bn}b}. \quad (4.19)$$

Определяем относительную высоту сжатой зоны:

$$\zeta = \frac{x}{h_0}. \quad (4.20)$$

После определения относительной высоты сжатой зоны она сравнивается с граничной относительной высотой сжатой зоны. Таким образом, при сравнении этих показателей определяется характер разрушения тюбинга. В данном расчете выявлено, что разрушение железобетонного тюбинга будет происходить по первому случаю разрушения, т.е. образование пластического шарнира в результате прогрева рабочей арматуры до критических температур.

Исходя из полученных значений рассчитывают несущую способность сечения, при этом уравнение составляется относительно растянутой арматуры:

$$M_{p,tem} = R_{bnt}bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + R'_s A'_{s,i} (h_0 - a'), \quad (4.21)$$

где h_0 – рабочая высота сечения, м; a – расстояние от края конструкции до арматуры в растянутой зоне, м; a' – расстояние от края конструкции до арматуры в сжатой зоне, м.

После подстановки исходных данных и расчета несущей способности строился график зависимости несущей способности от времени прогрева для всех видов железобетонной обделки тоннелей для стандартного температурного режима пожара (рисунок 4.44).

По построенным зависимостям определялись пределы огнестойкости железобетонной обделки, исходя из условия соответствия:

$$M_n \leq M_{p,tem}. \quad (4.22)$$

Условие соответствия описывается следующим образом: изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки должен быть меньше или равен несущей способности железобетонной конструкции. В этом случае конструкция не теряет своей несущей способности. Если изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки становится больше, то считается, что конструкция потеряла свою несущую способность. Определив точку, при которой неравенство не выполняется, с помощью графика по шкале времени прогрева определяется предел огнестойкости конструкции.

Требование безопасности железобетонных тюбингов будет считаться выполненным в том случае, если будет соблюдаться условие:

$$P_{\phi} \geq P_{mp}.$$

То есть фактический предел огнестойкости должен быть больше или равен требуемому пределу огнестойкости (нормируемый предел огнестойкости, отраженный в нормативных документах по пожарной безопасности).

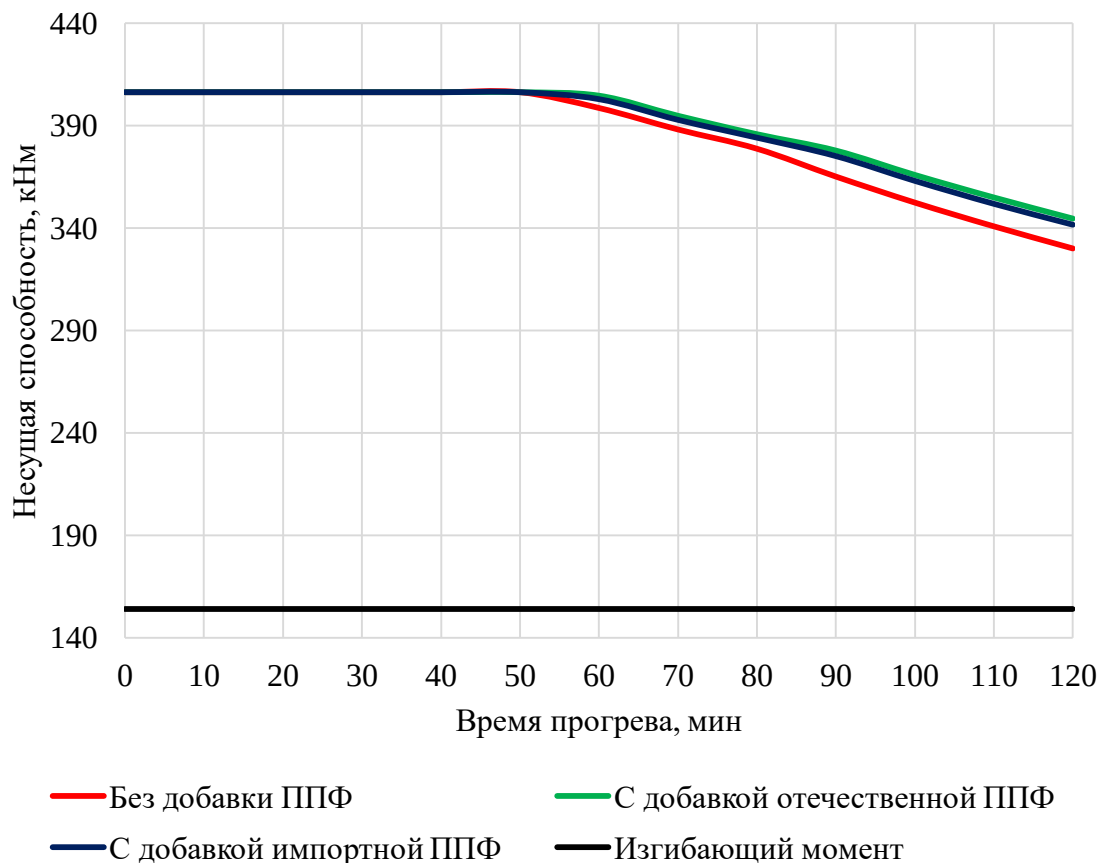


Рисунок 4.46 – Зависимость несущей способности конструкций от времени пожара по стандартному режиму пожара

Исходя из рисунка 4.46 делаем вывод, что несущая способность наиболее нагруженного сечения блоков без добавки и с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм при воздействии стандартного температурного режима пожара при значении максимального изгибающего момента в 154 кНм для всех образцов не утрачивается, предел огнестойкости составляет не менее 120 минут. Так как в ходе проведения численного эксперимента потери несущей способности по теплоизолирующей способности не достигнуто, тогда согласно ГОСТ 30247.0 конструкция соответствует пределу огнестойкости REI120, полученному в ходе эксперимента.

При сравнении показателей несущей способности, полученных по стандартному режиму пожара для железобетонных тюбингов с добавкой фибры, выявлено, что несущая способность незначительно ниже (на 4 кНм). Сравнивая же блоки с добавкой и без добавки фибры на 120 минуте, получили, что несущая способность для блока без добавки ниже на 13 кНм, чем с добавкой ППФ. Связано это, как и описывалось выше, с низким коэффициентом теплопроводности для железобетонных тюбингов с добавкой фибры. Так как коэффициент теплопроводности ниже, то и температуры, получаемые в ходе расчета теплотехнической задачи, ниже. Из этого следует, что и арматура прогревается менее интенсивно, чем в железобетонном тюбинге без добавки фибры. Отсюда можно сделать вывод, что добавка ППФ в состав бетона позволяет увеличить предел огнестойкости конструкции, следовательно, в ходе проведения исследования поставленная цель достигнута.

Одной из основных функций тоннельных сооружений является перевозка различных грузов. Как отмечалось выше, в числе таких грузов находятся нефтепродукты (бензин, дизельное топливо и т.д.). Следовательно, для оценки огнестойкости для сценария разлива и пожара нефтепродуктов необходимо провести расчёт огнестойкости железобетонных тюбингов при углеводородном режиме пожара. Исходя из этого по адаптированной методике производился расчёт огнестойкости железобетонных тюбингов при углеводородном режиме пожара и представлен на рисунке 4.47.

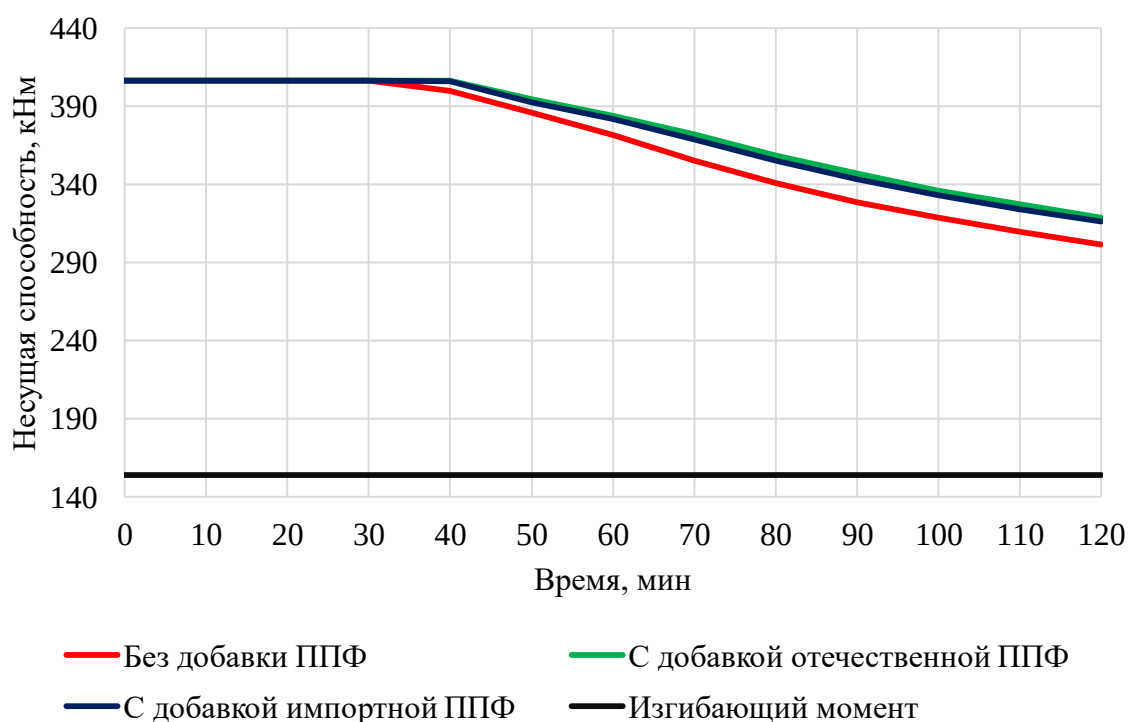


Рисунок 4.47 – Зависимость несущей способности конструкций от времени пожара по углеводородному режиму пожара

Исходя из рисунка 4.47 несущая способность наиболее нагруженного сечения блоков без добавки и с добавкой ProZASK IGS 12 мм и ProZASK IGS 6 мм при воздействии углеводородного температурного режима пожара при значении максимального изгибающего момента в 154 кНм для всех образцов не утрачивается, предел огнестойкости составляет не менее 120 минут. Так как в ходе проведения численного эксперимента потери несущей способности по теплоизолирующей способности не достигнуто, тогда согласно ГОСТ 30247.0 конструкция соответствует пределу огнестойкости REI120.

4.5. Выводы по главе

Исходя из проведённой эмпирической работы и численных экспериментов сделаны следующие выводы:

- в результате огневых испытаний железобетонных тюбингов с ППФ в размере 1 кг/м^3 взрывообразного разрушения бетона не происходило, что подтверждает положительное влияние добавки ППФ в бетонную смесь;
- крупномасштабные испытания на огнестойкость железобетонных тюбингов позволили установить, что предел огнестойкости данных конструкций составляет более REI 120 (эксперимент был прекращен, т.к. был достигнут нормируемый предел огнестойкости);
- в ходе эксперимента установлено, что значения допустимого максимального прогиба (99,5 мм) и температуры на необогреваемой поверхности конструкции (160 °C) не достигнуто, исходя из чего можно сделать вывод, что предельных состояний по потере несущей и теплоизолирующей способности не наступило;
- решена теплотехническая задача по стандартному и углеводородному режимам пожара в программном комплексе *ANSYS*, в результате которой получены температуры прогрева арматуры и бетона;
- сравнены экспериментальная и расчетная кривые прогрева необогреваемой поверхности железобетонного тюбинга с добавкой импортной фибры, расхождение которых составило не более 10 %, что говорит о достоверности численного эксперимента. Получены зависимости сопротивления арматурной стали и толщина ненесущего слоя бетона в зависимости от времени прогрева по двум режимам пожара, необходимые для расчёта огнестойкости;
- обоснована формула по определению температурного прогиба для железобетонных тюбингов. По результатам сравнения расчётного и экспериментального температурного прогиба определена погрешность которая не превышает 12 %, что согласуется с экспериментом;

- разработана математическая модель оценки огнестойкости железобетонных тюбингов с ППФ и определен фактический предел огнестойкости данных конструкций;

- по результатам расчёта выявлено, что предел огнестойкости по стандартному температурному режиму пожара всех образцов составил REI 120, что говорит о достоверности расчётной методики. При сравнении несущей способности тюбингов без добавки и с добавкой фибры определено, что несущая способность для тюбинга без добавки ниже. Связано это с низким коэффициентом теплопроводности для тюбингов с добавкой фибры;

- при определении фактического предела огнестойкости для углеводородного режима пожара выявлено, что предел огнестойкости составил более REI 120.

РЕКОМЕНДАЦИИ К ДАЛЬНЕЙШИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

В настоящем исследовании представлены впервые полученные результаты, которые дают представление о поведении бетонов с добавкой ППФ, и которые очень важны при проектировании зданий и сооружений. Данные актуальны не только для подземных объектов, но и для объектов, где бетон имеет достаточно высокую влажность. Следует отметить, что в процессе исследования выявлены новые направления для дальнейшей работы, обозначенные ниже.

В связи со снижением предела прочности бетона с добавкой ППФ необходимо проделать следующие эксперименты

Разработать такой состав бетона с добавкой ППФ, чтобы в лучшем случае повысить предел прочности, а в худшем – обеспечить его неизменность по сравнению с бетоном без добавки. Добиться этого возможно следующими компенсирующими материалами. Первое – добавка пластификатора для повышения прочности бетона, для чего следует произвести подбор пластификатора (выявить оптимальное количество). Второе заключается в комбинировании ППФ с другими фибрами.

По результатам подбора произвести эксперименты по определению призмочной прочности подобранного состава при прогреве. При этом необходимо провести ряд экспериментов: определение пределов прочности образцов в охлажденном состоянии (коэффициенты снижения предела прочности для определения огнесохранности), определение пределов прочности в нагретом состоянии (коэффициенты снижения предела прочности для определения огнестойкости).

Ввиду кинематического подхода поведения бетона и конструкций на его основе необходимо провести эксперименты по определению предела прочности бетонов в нагруженном состоянии и высокотемпературного прогрева. Для этого необходимо с помощью разработанной А.И. Яковлевым установки усовершенствовать метод по определению пределов прочности бетона в нагруженном состоянии и при воздействии высокотемпературного режима, провести экспери-

мент, результаты которого возможно будут использоваться для моделирования огнестойкости в расчётных программах.

Провести исследования по определению коэффициентов теплопроводности и теплоемкости бетонов с добавками фибры, в том числе и полипропиленовой, по методам определения стационарной теплопроводности для выявления нелинейного характера зависимости коэффициентов от температуры для учёта в программах по расчёту огнестойкости.

Произвести верификацию комплексов по расчёту пределов огнестойкости для использования в практической деятельности с учётом вышеизложенных показателей пределов прочности и теплофизических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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 тунбінгов.

3. По результатам проведенной серии экспериментов огнестойкости железобетонных тунбінгов 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, эмпирические зависимости $R_b = f(T)$ и коэффициенты снижения предела прочности бетона γ_{bt} , которые рекомендованы для оценки огнестойкости железобетонных конструкций расчётными методами и численного моделирования, в том числе, при строительстве автодорожных тоннелей и метрополитена. При анализе полученных данных установлено, что при добавке ППФ в бетон в размере 1 кг/м^3 наблюдается снижение прочности примерно на 16 %.

5. В результате проведённых 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 реко-

мендованы для оценки огнестойкости железобетонных конструкций расчётными методами и численного моделирования, в том числе, при строительстве автодорожных тоннелей и метрополитена. Установлено снижение коэффициента теплопроводности и повышение удельной теплоёмкости 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 тубингов, обоснована формула определения температурного прогиба с учётом геометрической нелинейности железобетонных тубингов, при этом получена удовлетворительная сходимость расчётного температурного прогиба с экспериментальным (максимальное расхождение величин не превышает 12 %).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dehn, F. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig / F. Dehn, N. Werther, J. Knitl // Beton- und Stahlbetonbau. – 2006. – Nr. 101. – Heft 8. – Pp. 631–635. DOI: 10.1002/best 200608186.
2. Kordina, K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen / K. Kordina // Bautechnik. – 2003. – Nr. 80. – Heft 5. – Pp. 327–338. DOI: 10.1002/bate.200302620
3. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций [Текст] / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
4. Маковский, Л.В. Аварийные ситуации при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов [Текст] / В.Е. Маковский, В.Е. Меркин. – 2-е изд., доп. – М.: ТИМП, 2000. – 196 с.
5. Moore, D. B. Fire engineering design of steel structures / D. B. Moore, T. Lennon // Progress in Structural Engineering and Materials. – 1997. – Vol. 1, No. 1. – Pp. 4–9. DOI: 10.1002/pse2260010104
6. Maraveas, C. Design of Concrete Tunnel Linings for Fire Safety / C. Maraveas, A. Apostolos // Structural Engineering International 2014, No. 3. – Pp. 1–14. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
7. Bartthelemi, B. Resistace au feu des structurs beton-acier-bois / B. Bartthelemi, J. Kryuppa. – Paris: Editions Eyrolles, 1978. – 216 p.
8. Ройтман, В.М. Оценка огнестойкости строительных конструкций на основе кинетических представлений о поведении материалов в условиях пожара [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Ройтман Владимир Миронович. – М., 1985. – 412 с.
9. Мешалкин, Е.А. Исследование процесса разрушения бетонных изделий при пожаре с учетом их взрывообразной потери целостности [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Мешалкин Евгений Александрович. – М., 1979. – 21 с.

10. Фёдоров, В.С. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций [Текст] / В.С. Фёдоров, В.Е. Левинский, И.С. Молчадский, А.В. Александров. – М.: АСВ, 2009. – 408 с.
11. Lennon, T. Designers' Guide to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2 / T. Lennon, D. B. Moore, Yu. C K. Wang, C K. G. Bailey. – London: Thomas Telford Ltd, 2007. – 144 p.
12. Lennon, T. Designers' Guide to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2: Handbook for the fire design of steel, composite and concrete structures to the Eurocodes / T. Lennon, D. B. Moore, Yu. C K. Wang, C K. G. Bailey. – London : Thomas Telford Ltd, 2007. – 144 p.
13. Голованов, В.И. Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций [Текст] / В.И. Голованов, Е.В. Кузнецова // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 9. – С. 82–90.
14. Габдулин, Р.Ш. Тонкослойная огнезащита железобетона [Текст] / Р.Ш. Габдулин, Ю.В. Кривцов, О.Б. Ламкин, В.В. Рубцов // Противопожарные и аварийно-спасательные средства. – 2006. – № 1. – С. 22–24.
15. Габдулин, Р.Ш. Тонкослойные покрытия для железобетона [Текст] / Р.Ш. Габдулин, Ю.В. Кривцов, О.Б. Ламкин, В.В. Рубцов // Вестник Академии Государственной противопожарной службы. – 2006. – № 5. – С. 70–76.
16. Габдулин, Р.Ш. Огнезащита железобетонных несущих конструкций тонкослойными покрытиями [Текст] / Р.Ш. Габдулин, Ю.В. Кривцов, О.Б. Ламкин, В.В. Рубцов, // Мир и безопасность. – 2006. – № 5. – С. 23.
17. Werther N. Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den M30-Nordtunnel in Madrid / N. Werther // Beton und Stahlbetonbau. – 2006. – Vol. 101, Issue 9. – Pp. 729–731. DOI: 10.1002/best.200608187
18. Некрасов, В.П. Новые приемы и задачи железобетонной техники [Текст] / В. П. Некрасов // Зодчий. – 1908. – № 25. – С. 223–225.
19. Некрасов, В.П. Новые приемы и задачи железобетонной техники [Текст] / В. П. Некрасов // Зодчий. – 1908. – № 26. – С. 230–236.

20. Некрасов, В.П. Новые приемы и задачи железобетонной техники [Текст] / В. П. Некрасов // Зодчий. – 1908. – № 27. – С. 243–250.
21. Некрасов, В.П. Новые приемы и задачи железобетонной техники [Текст] / В. П. Некрасов // Зодчий. – 1908. – № 28. – С. 255–259.
22. Некрасов, В.П. Новые приемы и задачи железобетонной техники [Текст] / В. П. Некрасов // Зодчий. – 1908. – № 29. – С. 264–267.
23. Волков, И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве [Текст] / И.В. Волков // Строительные материалы. – 2004. – № 6. – С. 12–13.
24. Курбатов, Л.Г. Трещиностойкость и раскрытие трещин в изгибаемых сталефибробетонных элементах [Текст] / Л.Г. Курбатов, В.И. Попов // Пространственные конструкции в гражданском строительстве. – 1982. – С. 33–42.
25. Лобанов, И.А. Технологические приемы улучшения прочностных характеристик [Текст] / И.А. Лобанов, А.В. Копацкий, К.В. Талантова // Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них: докл республ. совещ., ЛатИНТИ, Рига. – 1975. – С. 19–25.
26. Коротышевский, О.В. Расчет сталефибробетона по прочности на осевое растяжение и на растяжение при изгибе [Текст] / О.В. Коротышевский // Строительные материалы. – 2003. – № 8. – С. 31–33.
27. Пухаренко, Ю.В. Принцип формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов [Текст] / Ю.В. Пухаренко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – № 10. – С. 47–50.
28. Рабинович, Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны [Текст] / Ф.Н. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1989. – 174 с.
29. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологи, конструкции [Текст] / Ф.Н. Рабинович. – М.: Издательство АВС, 2004. – 560 с.
30. Талантова, К.В. Основы создания сталефибробетонных конструкций с заданными свойствами [Текст] / К.В. Талантова // Бетон и железобетон. – 2003. – № 5. – С. 4–8.

31. Талантова, К.В. Создание элементов конструкций с заданными свойствами на основе сталефибробетона [Текст] / К.В. Талантова // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 10. – С. 4–9.

32. Ройтман, В.М. Оценка огнестойкости строительных конструкций на основе кинетических представлений о поведении материалов в условиях пожара [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Ройтман Владимир Миронович. – М., 1985. – 412 с.

33. Мешалкин, Е.А. Исследование процесса разрушения бетонных изделий при пожаре с учетом их взрывообразной потери целостности [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Мешалкин Евгений Александрович. – М., 1979. – 21 с.

34. Яковлев, А.И. Исследование теплофизических характеристик бетонов путем решения обратной задачи теплопроводности с помощью ЭВМ [Текст] / А.И. Яковлев, Л.В. Шейнина, А.Н. Сорокин // Огнестойкость строительных конструкций. – 1975. – № 3. – С. 3–11.

35. Савкин, Н.П. Напыляемые покрытия на основе минеральных волокон для огнезащиты стальных конструкций [Текст] / Н.П. Савкин, В.И. Голованов // Огнестойкость строительных конструкций. – 1980. – № 8. – С. 70–73.

36. Яковлев, А.И. Устойчивость центрально-сжатых стержней при огневом воздействии / А.И. Яковлев, В.И. Голованов // Огнестойкость строительных конструкций. – 1983. – № 5. – С. 5–11.

37. Яковлев, А.И. Расчет критической температуры при определении предела огнестойкости сжатых стальных конструкций / А.И. Яковлев, В.И. Голованов // Огнестойкость строительных конструкций. – 1984. – № 5. – С. 5–12.

38. Сорокин, А.Н. Расчет огнестойкости железобетонных конструкций с учетом полных деформаций бетона [Текст] / А.Н. Сорокин // Огнестойкость строительных конструкций. – 1980. – № 8. – С. 28–33.

39. Олимпиев, В.Г. О методике исследования прочности и деформативности бетона при высоких температурах в условиях пожара [Текст] / В.Г. Олимпиев // Огнестойкости строительных конструкций. – 1973. – № 1. – С. 44–64.

40. Савкин, Н.П. Новая методика исследования прочности и деформативности арматурных сталей при высоких температурах / Н.П. Савкин, Н.И. Зенков // Огнестойкости строительных конструкций. – 1973. – № 1. – С. 65–85.

41. Яковлев, А.И. Исследование прогрева плоских конструкций [Текст] / А.И. Яковлев, Л.В. Шейнина // Огнестойкости строительных конструкций. – 1976. – № 4. – С. 16–22.

42. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости железобетонных стен [Текст] / А.И. Яковлев, В.П. Бушев // Огнестойкости строительных конструкций. – 1972. – № 7. – С. 94–99.

43. Яковлев, А.И. Основные принципы расчета пределов огнестойкости строительных конструкций [Текст] / А.И. Яковлев // Огнестойкости строительных конструкций. – 1980. – № 8. – С. 3–14.

44. Яковлев, А.И. О расчете огнестойкости стальных конструкций на основе применения ЭВМ [Текст] / А.И. Яковлев // Огнестойкости строительных конструкций. – 1973. – № 1. – С. 3–18.

45. Гвоздев, А.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций [Текст] / А.А. Гвоздев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

46. Яковлев, А.И. Огнестойкости железобетонных колонн [Текст] / А.И. Яковлев // Пожарная профилактика и тушение пожаров. – 1970. – № 5. – С. 3–11.

47. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости железобетонных стен (статическая задача) [Текст] / А.И. Яковлев, В.П. Бушев // Огнестойкости строительных конструкций. – 1970. – № 7. – С. 12–28.

48. Яковлев, А.И. Основы расчета огнестойкости железобетонных конструкций [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / Яковлев Анатолий Иванович. – М., 1966. – 167 с.

49. Кузнецова, И.С. Диаграммы состояния бетона и арматуры после пожара [Текст] / И.С. Кузнецова // Тез. докл. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: Стройиздат, 1998. – С. 186–192.

50. Милованов, А.Ф. Исследование работы железобетонных конструкций при воздействии повышенных и высоких температур [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / Анатолий Федорович Милованов. – М., 1969. – 281 с.

51. Милованов, А.Ф. Расчет железобетонных конструкций на воздействие температуры [Текст] / А.Ф. Милованов. – Ташкент: УКИМИВЧИ, 1994. – 360 с.

52. Милованов, А.Ф. Расчет железобетонных подземных сооружений, поврежденных пожаром [Текст] / А.Ф. Милованов // Подземное пространство мира. Альманах № 1. – 1999. – С. 49–52.

53. Милованов, А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций [Текст] / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1986. – 225 с.

54. Милованов, А.Ф. Расчет изгибаемых железобетонных элементов на поперечную силу в условиях воздействия высоких температур [Текст] / А.Ф. Милованов, В.М. Прядко. – М.: Стройиздат, 1965. – 136 с.

55. Милованов, А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре [Текст] / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1998. – 296 с.

56. Мурашев, В.И. Оценка огнестойкости железобетонных конструкций [Текст] / В.И. Мурашев // Пожарное дело. – 1956. – № 7. – С. – 4 – 15.

57. Ройтман, В.М. Исследование влияния температуры на теплофизические характеристики строительных материалов для целей расчета огнестойкости [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 / Владимир Миронович Ройтман. – М., 1966. – 138 с.

58. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве [Текст] / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.

59. Федоров, В.С. Основы теории расчета огнестойкости химически стойких конструкций на основе полимербетонов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Федоров Виктор Сергеевич. – М., 1990. – 288 с.

60. Федоров, В.С., Петухов, А.В. Пути повышения огнестойкости конструкций на основе полимербетонов [Текст] / В.С. Федоров, А.В. Петухов // Промышленное строительство. – 1989. – № 10. – С. 39–50.

61. Brandt, A.M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance / A.M. Brandt – CRC Press, 2009. – 544 p.

62. Fernandes, G. R. La influencia de algunas caracteristicas de las aridas finos (arenas) en la propiedades des hormogon de cemento Portland / G. R. Fernandes // Cemento e Hormigon. – 1976. – No. 506. – Pp. 415–428.

63. Herr, O. Les materiaux autocompactants essorables de structure (MACES). Etude de faisabilite d'une nouvelle gamme de materiaux hydrauliques pour les assises de chaussées / Herr O. Les // Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussees. – 2001. – No. 232. – Pp. 99–103.

64. James J. Beaudoin. Handbook of Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications / James J. Beaudoin, Jeffrey M. Lemm/ USA: William Andrew Publishing, 1990. – 194 p.

65. Maidl, B. Steel Fibre Reinforced Concrete / B. Maidl. – GB: Ernst & Sohn; 1 edition, 1995. – 292 p.

66. Piasta, J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate / J. Piasta // Cement and Concrete Research. – 1985. – No. 2. – Pp. 253–260.

67. Steopoe, A. Sur la structure des suspensions aqueuses des ciments purs ou mlanges et sur les propriestes techniques de ces suspensions durcies / A. Steopoe // Revue des Materiaux de constructions. – 1981. – No. 508. – Pp. 1–9.

68. Takemura, K. Some Properties of Concrete Using Crushed Stone Pust as Fine Aggregate / K. Takemura // The Cement Association of Japan. 13-th General Meeting Technical Session. – 1976. – Pp. 95–97.

69. Маковский В.Л. Тоннели: Проектирование и строительство [Текст] / В.Л. Маковский. – М.: Изд. Академии Архитектуры СССР, 1947. – 763 с.

70. Голованов, В. И. Экспериментальные и аналитические исследования огнестойкости сплошной бетонной плиты со стальной и композитной арматурой [Текст] / В. И. Голованов, В. В. Павлов, А. В. Пехотиков // Пожарная безопасность. – 2013. – № 2. – С. 44–51.

71. Белоусов, И.В. Применение фибробетонов в железобетонных конструкциях [Электронный ресурс]/ И.В. Белоусов, А.В. Шилов, З.А. Меретуков,

Л.Д. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4 (2017). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4421.pdf> (дата обращения 05.12.2018)

72. Мишина, А.В. Физико технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона [Текст] / А.В. Мишина, И.А. Чилин, А.А. Андрианов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 159–165.

73. Русанов, В.Е. Определение прочностных и деформативных свойств сталефибробетона для расчета тоннельных обделок [Текст] / В.Е. Русанов // Вестник МГСУ. – 2010. – № 2. – С. 189–197.

74. Русанов, В.Е. Опыт проектирования сборных обделок из сталефибробетона [Текст] / В.Е. Русанов / под. общ. ред. В.Е. Меркина. – М.: ОАО ЦНИИС, 2008. – 232 с.

75. Рабанович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография [Текст] / Ф.Н. Рабанович. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 560 с.

76. Будницкий, Г.И. Перспективы стандартизации дисперсного армирования бетона в тоннелестроении [Текст] / Г. И. Будницкий, С. В. Мазеин // Метро и тоннели. – 2012. – № 5. – С. 34–35.

77. Кудяков, А.И. Управление процессами получения бетона повышенного качества [Текст] / А.И. Кудяков, Д.И. Дубосаров, К.Л. Кудяков, А.В., Невский, А.С. Ушакова // Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. – Братск: ГОУ ВПО БРГУ. – 2013. – С. 58–61.

78. Перепечко, С.А. Фибробетон и его использование в северных районах [Текст] / С.А. Перепечко // Молодой ученый. – 2017. – № 2 (136). – С. 185–186.

79. Shugurova, A.V., Éclair, N.A. Possibility of application fiber concrete for construction in the repablic of Khakassia [Текст] / A.V. Shugurova, N.A. Éclair // Сборник материалов Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный – 2016», Строительные конструкции и управляемые системы – Красноярск, 2016. – С. 4–6.

80. Эклер, Н.А. К вопросу о применении фибробетона в гидротехническом строительстве [Текст] / Н.А. Эклер, А.В. Шугурова // Наука в современном информационном обществе. – North Charleston, SC, USA, 2015. – С. 135–139.

81. Эклер, Н.А. Перспективы применения фибробетона для строительства жилых зданий в условиях Республики Хакасия [Текст] / Н.А. Эклер, А.В. Шугурова // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: Мат-лы VII Междунар. науч.-практ. конф. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – С. 553–556.

82. Ибе, Е.Е. Перспективы применения фибробетона при строительстве гидротехнических сооружений [Электронный ресурс] / Е.Е. Ибе // Наукосведение: интернет-журнал. – 2017. – Том 9. – № 1. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/61TVN117.pdf> (дата обращения 05.12.2018).

83. Окольников, Г.Э. Анализ свойств различных видов фибробетонов [Текст] / Г.Э. Окольников, А.П. Белов, Е.В. Слинькова // Системные технологии. – 2018. – № 26. – С. 206–210.

84. Ключев, А.В. Отходы горнодобывающих предприятий как сырье для производства мелкозернистого бетона, армированного фибрами [Текст] / А.В. Ключев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 4. – С. 81–84.

85. Ключев, А.В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства [Текст] / А.В. Ключев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 60–63.

86. Ключев, А.В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна [Текст] / А.В. Ключев, Р.В. Лесовик // Бетон и железобетон. – 2011. – № 3. – С. 7–9.

87. Ключев, С. В. Дисперсно-армированный стекловолокном мелкозернистый бетон [Текст] / С. В. Ключев, Р. В. Лесовик // Бетон и железобетон. – 2011. – № 6. – С. 4–6.

88. Кондрашев, Г.М. Базальтофибробетон – технология будущего [Текст] / Г.М. Кондрашев, Б.М. Гольдштейн // Техничко-технологические инновации. – 2012. – № 7. – С. 91–92.

89. Горынин, Г.Л. Математическое моделирование теплофизических свойств бетона с дисперсным наполнителем [Текст] / Г.Л. Горынин, И.М. Галиев // Вестник СурГУ. – 2014. – № 4 (6). – С. 44–47.

90. Перфилов, В.А. Способ приготовления модифицированной бетонной смеси для изготовления блоков ограждающих конструкций [Текст] / В.А. Перфилов, В.И. Лепилов, М.О. Зубова, Д.Л. Неизвестный, У.В. Алаторцева // Вестник ВолгГАСУ. – 2011. – № 22 (41). – С. 59–64.

91. Перфилов, В. А. Ограждающие элементы с повышенными теплозащитными свойствами в конструкциях жилого модуля морских нефтегазовых платформ [Текст] / В. А. Перфилов, В. И. Лепилов, У. В. Канавец, М. О. Зубова, И. Г. Лукина // Вестник ВолгГАСУ. – 2013. – №2(27).– С. 1–4.

92. Кудяков, К.Л. Влияние дисперсного армирования углеводородными волокнами на прочностные свойства бетона [Текст] / К.Л. Кудяков, А.В. Невский, А.С. Ушакова // Перспективы развития фундаментальных наук: XI Междунар. конф. студентов и молодых ученых: Сб. тр. – Томск, 2014. – С. 799–802.

93. Лесовик, Р.В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций [Текст] / Р.В. Лесовик, С.В. Ключев // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 3. – С. 41–47.

94. Ключев, С.В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций с различными видами фибр [Текст] / С.В. Ключев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 2-1 (33). – С. 39–44.

95. ГОСТ 10180–2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2013. – 31 с.

96. Лесовик, Р.В. К проблеме использования техногенных песков Курской магнитной аномалии для производства мелкозернистого фибробетона и изделий на его основе [Текст] / Р.В. Лесовик, С.В. Ключев, А.В. Ключев, А.В. Нетребенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 1–2. – С. 45–48.

97. Юрьев, А.Г. Экспериментальные исследования деформирования стеклофибробетонных элементов конструкций [Текст] / А.Г. Юрьев, Л.А. Панченко // Бетон и железобетон – пути развития: II Всероссийская (Международная) конф.: сб. тр. – Москва, 2005. – С. 266–269.

98. Перфилов, В.А. Применение модифицирующих нано добавок для повышения прочности фибробетонов [Текст] / В.А. Перфилов, У.В. Алаторцева, М.И. Дмитрук, И.Л. Жога // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 8. – С. 17–20.

99. Каприелов, С.С. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций [Текст] / С.С. Каприелов, И.А. Чилин // Строительные материалы. – 2013. – № 7. – С. 28–31.

100. Ключев, С.В. Высокопрочный мелкозернистый фибробетон на техногенном сырье и композиционных вяжущих [Текст] / С.В. Ключев // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 14–16.

101. Дорф, В.А. Прочность сталефибробетонов с цементно-песчаной матрицей на растяжение при изгибе [Текст] / В.А. Дорф, Р.О. Красновский, Д.Е. Капустин, И.А. Горбунов // Бетон и железобетон. – 2014. – № 2. – С. 2–5.

102. Ключев, А.В. Фибробетон на техногенном песке и композиционных вяжущих с использованием нано-дисперсного порошка [Текст] / А.В. Ключев // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 12. – С. 49–51.

103. Королев, К.М. Фибробетон [Текст] / К.М. Королев, Л.А. Малинина, Г.Н. Платонова // Мелкозернистые бетоны и конструкции из них: сб. науч. тр./ под ред. И.М. Красного. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – С. 19–22.

104. Francisco J. De Caso y Basalo, Fabio Matta, Antonio Nanni. Fiber reinforced cement-based composite system for concrete confinement / Francisco J. De Caso y Basalo, Fabio Matta, Antonio Nanni // Construction and Building Materials. - 2012. – No. 32. – Pp. 55–65.

105. Wasim Khaliq, Venkatesh Kodur. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated tempera-

tures / Wasim Khaliq, Venkatesh Kodur // Cement and Concrete Research. – 2011. – No. 41. – Pp. 1112–1122.

106. Яковлев, А.И. Огнестойкость сталефибробетонных предварительно напряженных плит перекрытий [Текст] / А.И. Яковлев, Л.В. Шейнина, В.В. Жуков, Г.А. Григорян // Поведение строительных конструкций в условиях пожара: сб. науч. тр. – 1987. – С. 17–23.

107. Ислагилов, Ю.С. Поведение колонн из сталефибробетона при температурных режимах пожара, учитывающих стадию затухания [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Ислагилов Юнас Сахабетдинович. – М., 1988. – 126 с.

108. Васильченко, А.В. Повышение огнестойкости железобетонной колонны при ее усилении обоймой из фиброжелезобетона [Текст] / А.В. Васильченко, И.М. Хмыров, С.С. Кучер // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – 2013. – № 34. – С. 40–44.

109. Васильченко, А.В. Оценка огнестойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных фиброматериалами [Текст] / А.В. Васильченко // V Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций»: сб. мат-лов. – Астана, 2014. – С. 91–93.

110. Вахмистов, А.И. Эффективные фиброармированные материалы и изделия для строительства [Текст] / А.И. Вахмистов, В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко, А.Н. Дмитриев, У.Х. Магдеев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 10. – С. 43–44.

111. Наймарк, Э.М. Применение сталефибробетона в современном тоннелестроении в Великобритании и во всем мире / Э.М. Наймарк, Г.А. Денисов // БИНТИ – 2011. – № 4. – С. 22–23.

112. Конюхов, Д.С. Технологические аспекты комплексного освоения подземного пространства Москвы [Текст] / Д.С. Конюхов // Инженерные сооружения. – 2014. – № 3(5). – С. 91–93.

113. Строкова, В.В. Принципы получения ячеистых фибробетонов с применением наноструктурированного вяжущего [Текст] / В.В. Строкова, М.Н. Капуста // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 114–117.

114. Ключев, С.В. К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно-армированных бетонов [Текст] / С.В. Ключев, В.С. Лесовик, С.В. Ключев, Д.О. Бондаренко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 81–83.

115. Парфенов, А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Парфенов Александр Владимирович. – Уфа, 2004. – 20 с.

116. Зерцалов, М.Г. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона [Текст] / М.Г. Зерцалов, Е.А. Хотеев // Вестник МГСУ. – 2014. – № 5. – С. 91–99.

117. Ключев, С.В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций с различными видами фибр [Текст] / С.В. Ключев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 2 (33). – С. 40–43.

118. Богданова, Е.Р. Экспериментальные исследования бетона, дисперсно-армированного синтетической полипропиленовой фиброй [Текст] / Е.Р. Богданова // Известия ПГУПС. – 2015. – № 2 (43). – С. 91–98.

119. Кузнецова, А.С. Оценка прочности фиброармированного песка по результатам испытаний на трехосное сжатие [Текст] / А.С. Кузнецова, В.Г. Офрихтер // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2012. – № 2. – С. 37–44.

120. Ерошкина, Н.А. Влияния полимерной фибры на механические свойства геополимерного раствора [Электронный ресурс] / Н.А. Ерошкина, С.М. Саденко, М.Ю. Чамурлиев, М.О. Коровкин // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1. – Режим доступа: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_112_eroshkina.pdf_cd878c4144.pdf (дата обращения 24.11.2018)

121. Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire / Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han // Cement and Concrete Research. – 2010. – No. 40. – Pp. 1547–1554.

122. Руссо, В.Л. Взрывообразное разрушение мелкозернистого силикатного бетона [Текст] / В.Л. Руссо, В.Н. Морозов, Л.В. Павлова // Огнестойкость строительных конструкций: сб. тр. – 1980. – № 8. – С. 74–83.

123. Гельмиза, В.И. Оценка взрывообразного разрушения бетона [Текст] / В.И. Гельмиза // Огнестойкость строительных конструкций: сб. тр. – 1980. – № 8. – С. 84–89.

124. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2006. – 79 с.

125. Савельев, А.А. Волокнисто-бетонные конструкции повышенной огнестойкости [Текст] / А.А. Савельев // Технологии бетонов. – 2012. – № 7–8. – С. 16–17.

126. Khoury, G.A. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relieve / G.A. Khoury // Magazine of Concrete Research. – 2007. – No. 60 (3). – Pp. 189–204.

127. Jogo Paulo C. Rodrigues, Luis Lanm, Antynio Moura Correia. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire / Jogo Paulo C. Rodrigues, Luis Lanm, Antynio Moura Correia // Composite Structures. – 2010. – No. 92. – Pp. 1263-1268.

128. Новиков, Н.С. Огнестойкость и прочность конструкций из фибробетона [Электронный ресурс] / Н.С. Новиков // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – 2016. – № 3 (67). – Режим доступа: <http://agrs-2006.narod.ru/ttb/2016-3/14-03-16.ttb.pdf> (дата обращения 15.11.2018)

129. Коротких, А.Г. Теплопроводность материалов [Текст] / А.Г. Коротких. – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.

130. Швырков, С.А. Теплотехнические свойства бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного пожара [Текст] / С.А. Швырков, А.П. Петров, В.П. Назаров, Я.И. Юрьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – № 12. – С. 5–10.

131. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федеральный закон от 22 июля 2018 № 123-ФЗ (ред. от

03 июля 2016 № 301-ФЗ) // Гарант: инф.-прав. об-ние. – Эл. дан. – М., 2017. – Доступ из лок-ной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 05.12.2018).

132. Каледин, В.О. Численное моделирование термомеханического поведения железобетонных рамных конструкций при нестационарных тепловых воздействиях [Текст] / В.О. Каледин, В.Л. Страхов // Неделя горняка – 2007: сб. науч. тр. по материалам симпозиума. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007. – № ОВ14. – С. 311–330.

133. Страхов, В.Л. Математическое моделирование высокотемпературного тепломассопереноса в бетонных конструкциях [Текст] / В.Л. Страхов, А.С. Мельников, В. О. Каледин // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – № 6. – С. 31–39.

134. Страхов, В.Л. Математическое моделирование процесса работы теплоогнезащиты из водосодержащих материалов [Текст] / В.Л. Страхов, А.Н. Гаращенко, В. П. Рудзинский // Вопросы оборонной техники. – 1998. – № 2 (119). – С. 6–12.

135. Страхов, В. Л. Разработка, численная реализация и апробирование математических моделей работы теплоогнезащиты с учетом процессов термического разложения, испарения – конденсации и вспучивания – усадки [Текст] / В.Л. Страхов, А.Н. Гаращенко, В.П. Рудзинский [и др.] // Вопросы оборонной техники. – 1999. – № 1 (122). – С. 17–21.

136. Гаращенко, А.Н. Расчет огнезащиты из материалов на основе минеральных вяжущих (на примере покрытия СОТЕРМ-1М) [Текст] / А.Н. Гаращенко, В.Л. Страхов, В.П. Рудзинский, М.М. Казиев // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – № 4. – С. 17–22.

137. Страхов, В.Л. Математическое моделирование работы водосодержащих вспучивающихся огнезащитных покрытий [Текст] / В.Л. Страхов, А.Н. Гаращенко, В.П. Рудзинский, В.А. Олейник // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 1. – С. 39–46.

138. ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014 Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы. – М.: Стандартиформ, 2015. – 10 с.

139. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: учебник [Текст] / Е.С. Вентцель – М.: Издательство КноРус, 2010. – 655 с.

140. Кузнецова И.С. Полипропиленовая фибра – эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре [Текст] / И.С. Кузнецова, В.Г. Рябченкова, М.П. Корнюшина, И.П. Саврасова, М.С. Востров // Строительные материалы. – 2018. – № 11. – С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20>.

141. Бацков, В.Н. Железобетонные конструкции: учебник для вузов [Текст] / В.Н. Бацков, Э.Е. Сигалов. – 4-е изд., перераб. – М.: Стройиздат, 1985. – 728 с.

142. Некрасов, К.Д. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур / К.Д. Некрасов, В.В. Жуков, В.Ф. Гуляева. – М.: Стройиздат, 1972 г.

143. Краснощеков, Ю.В. Системная модель коэффициентов призмной прочности бетона [Текст] / Ю.В. Краснощеков // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 3 (49). – С. 63–67.

144. ГОСТ 12730.2–78 Бетоны. Метод определения влажности. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартиформ, 2007. – 4 с.

145. ГОСТ 30247.0–94 Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования. Межгосударственный стандарт. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 11 с.

146. Басов, К.А. ANSYS. Справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

147. Огородникова, О.М. Конструкционный анализ в среде ANSYS: учебное пособие [Текст] / О.М. Огородникова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. – 68 с.

148. Конюхов, А.В. Основы анализа конструкций в ANSYS: учебное пособие [Текст] / А.В. Конюхов. – Казань: КГУ ММФ, 2001. – 102 с.

149. Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах [Текст] / К.А. Басов. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
150. Басов, К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.
151. Чигарев, А.В. ANSYS в руках инженера: справочное пособие [Текст] / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение 1, 2004. – 512 с.
152. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство [Текст] / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Ольферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
153. Шалумов, А.С. Введение в ANSYS: прочностной и тепловой анализ: учебное пособие [Текст] / А.С. Шалумов, А.С. Ваченко, О.А. Фадеев, Д.В. Багаев. – Ковров: КГТА, 2002. – 33 с.
154. Красновский, Е.Е. Решение прикладных задач термомеханики с применением программного комплекса ANSYS: методические указания [Текст] / Е.Е. Красновский. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 88 с.
155. Тимошенко, С., Юнг, А. Инженерная механика [Текст] / С. Тимошенко, А. Юнг. – М.: Машгиз, 1960. – 508 с.
156. Войтов, М.Д. Расчет плоских железобетонных тубингов для вертикальных подземных бункеров [Текст] / М.Д. Войтов, П.М. Будников // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2003. – № 5. – С. 34–37.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ОБЩЕРОССИЙСКАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ТОННЕЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ РОССИИ

107078, Москва, Новорязанская ул. 16/11, оф. 80

Тел.: (495) 608-8032; (495)608-8034

Факс: (495) 607-32-76

E-Mail: info@rus-tar.ru

www.rus-tar.ru

ИНН/КПП 7708024555/770801001 ПАО "МИНБАНК" г. Москва
БИК 044525600 ОКВЭД 91.12р/сч.: 4070381000030000224
ОКПО 00043920к/сч.: 30101810300000000600
ОГРН 1037739099166

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель Исполнительной дирекции
Тоннельной ассоциации России

А.Б. Лебедевков

«11» июня 2018 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта факультета подготовки научно-педагогических кадров Академии ГПС МЧС России, старшего лейтенанта внутренней службы Новикова Николая Сергеевича на тему:
«Огнестойкость железобетонных тубингов из фибробетона для автомобильных тоннелей и метрополитена»

Комиссия в составе:

- от Тоннельной ассоциации России - зам. руководителя Исполнительной дирекции, доктор технических наук Мазеин Сергей Валерьевич (председатель);
- от ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» - зам. Генерального директора по науке, кандидат технических наук Русанов Владимир Евгеньевич; главный инженер, кандидат технических наук Хохлов Иван Николаевич и ведущие специалисты Романчев Александр Юрьевич и Симонов Юрий Федорович,

подтверждает:

в ходе диссертационного исследования Новикова Н.С. внедрены результаты крупномасштабных испытаний огнестойкости шестиметровых железобетонных тубингов, предназначенных для строительства тоннелей метрополитена, с добавкой полипропиленовой фибры. Эта добавка обеспечивает защиту бетона от мгновенного (взрывообразного) разрушения и преждевременного обрушения конструкций при воздействии пожара.

При разработке нормативно-методических документов по транспортному тоннелестроению нашли применение также научные результаты работы соискателя для оценки огнестойкости железобетонных тубингов: методика расчетного определения пределов прочности и теплотехнические характеристики бетонов с добавкой полипропиленовой фибры.

Председатель комиссии: С.В. Мазеин

Члены комиссии:

В.Е. Русанов

И.Н. Хохлов

А.Ю. Романчев

Ю.Ф. Симонов

«11» июня 2018 г.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель начальника
ФГБУ ВНИИПО МЧС России



Е.В. Павлов

«23» _____ 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта факультета подготовки научно-педагогических кадров Академии ГПС МЧС России, старшего лейтенанта внутренней службы Новикова Николая Сергеевича на тему:
«Огнестойкость железобетонных тубингов из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена» в нормативный документ по пожарной безопасности

Комиссия в составе: начальник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, кандидат технических наук Пехотиков Андрей Владимирович (председатель), начальник сектора огнестойкости металлических и железобетонных конструкций Павлов Владимир Валерьевич подтверждают, что при разработке

«Концепции обеспечения пожарной безопасности двухпутных тоннелей в Московском метрополитене»;

проекта ГОСТ «Средства огнезащиты железобетонных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности»

использованы результаты диссертационной работы Новикова Н.С. в части, касающейся расчета огнестойкости ж/б тубингов автодорожных тоннелей и метрополитена.

Результаты работы также внедрены при модернизации крупномасштабной горизонтальной огневой печи для испытания балок, перекрытий и покрытий, в части усовершенствования системы опирания и нагружения железобетонных тубингов для испытаний на огнестойкость.

Председатель комиссии:

Начальник отдела 3.2

ФГБУ ВНИИПО МЧС России

«23» _____ 2018 г.

А.В. Пехотиков

Члены комиссии:

Начальник сектора отдела 3.2

ФГБУ ВНИИПО МЧС России

«23» _____ 2018 г.

В.В. Павлов

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ООО
«ИЦ ПРОЗАСК»


С.П. Антонов
«30» мая 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта факультета подготовки научно-педагогических кадров Академии ГПС МЧС России, старшего лейтенанта внутренней службы Новикова Николая Сергеевича на тему:
«Огнестойкость железобетонных тубингов из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена»

Комиссия в составе: заместитель генерального директора ООО «ИЦ ПРОЗАСК» Кислов А.Ф. (председатель), технический директор ООО «ИЦ ПРОЗАСК» Герасимец А.П. подтверждает, что при разработке рекомендации по применению полипропиленовой фибры для защиты бетона от взрывообразного (хрупкого) разрушения использованы результаты, полученные в ходе проведения диссертационного исследования Новикова Н.С., а именно научно обоснованные физико-механические и теплотехнические показатели бетона без добавки и бетона с добавкой импортной и отечественной полипропиленовой фибры, а также инженерная методика расчета огнестойкости железобетонных тубингов с использованием бетона с добавкой полипропиленовой фибры.

Заместитель генерального директора
ООО «ИЦ ПРОЗАСК»

«28» мая 2018 г.



А.Ф. Кислов

Технический директор
ООО «ИЦ ПРОЗАСК»

«28» мая 2018 г.



А.П. Герасимец

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКТОР»

Н.Ю. Кузнецов

«13» июль 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта факультета подготовки научно-педагогических кадров Академии ГПС МЧС России, старшего лейтенанта внутренней службы Новикова Николая Сергеевича на тему:
«Огнестойкость железобетонных туннелей из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена»

Комиссия в составе: главный инженер проекта, Глатков Сергей Михайлович (председатель), инженер пожарной безопасности, Артеменко Илья Станиславович подтверждает, что ходе диссертационного исследования Новикова Н.С. внедрены результаты изменения пределов прочности и теплотехнические характеристики в зависимости от температуры бетонов с добавкой полипропиленовой фибры, которая позволяет защитить бетон от взрывообразного разрушения, для использования при оценке огнестойкости железобетонных конструкций повышенной влажности.

Председатель комиссии:
Главный инженер проекта
ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКТОР»

С.М. Глатков

«13» июль 2018 г.

Члены комиссии:
Инженер пожарной безопасности
ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКТОР»

И.С. Артеменко

«13» июль 2018 г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе
кандидат военных наук

М.В. Бедило

« 29 » 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Новикова Н.С.
на тему: «Огнестойкость железобетонных тубингов из фибробетона для
автодорожных тоннелей и метрополитена»
в учебном процессе Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе: начальника учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве Серкова Б.Б., начальника учебно-методического центра Шныпко В.С., заместителя начальника учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве Злобнова П.В., подтверждает, что результаты диссертационного исследования Новикова Николая Сергеевича внедрены в учебный процесс кафедры пожарной безопасности в строительстве, а именно:

1. Использованы при разработке учебника по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре». Учебник используется для изучения курса дисциплины слушателями высших учебных заведений пожарно-технического профиля МЧС России – раздел 8.5 «Прочностная задача расчета огнестойкости железобетонных конструкций (железобетонные тубинги)» и подраздел 4.2.1 «Особенности поведения каменных материалов в условиях пожара (поведения фибробетона с полипропиленовой фиброй в условиях пожара)».

2. Использованы при разработке курса лекций по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре».

Комиссия:

Начальник УНЦ ППБС
доктор технических наук, профессор

Б.Б. Серков

Начальник учебно-методического центр

В.С. Шныпко

Заместитель начальника УНЦ ППБС

П.В. Злобнов

Приложение Б

(обязательное)



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОБОРОНЫ
(ФГБУ ВНИПО)

Испытательная лаборатория
научно-испытательного центра пожарной безопасности
ФГБУ ВНИПО МЧС России
ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИПО МЧС России



Аттестат аккредитации № ТРПБ.RU.ИНО2 от 02.06.2015 г.



Certificate/Membership №: 45
Действительно до: 31.12.2019 г.



Признана Российским Морским регистром судоходства
Свидетельство о признании № 15.01170.381
Действительно до: 01.07.2020 г.



Признана Российским Речным регистром
Свидетельство о признании № 09723
Действительно до: 05.08.2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ИЛ НИЦ ПБ
ФГБУ ВНИПО МЧС России



Д.М. Гордиенко

2016 г.

Огнестойкость железобетонного блока
тоннельной обделки

№
13304

ОТЧЁТ

ОБ ИСПЫТАНИЯХ

НА ПОЖАРНУЮ

ОПАСНОСТЬ



Всего листов 13. Лист № 1.



СОДЕРЖАНИЕ

- Наименование и адрес заказчика
- Характеристика объекта испытаний
- Характеристика заказываемой услуги
 - Методы испытаний
 - Процедура испытаний
- Испытательное оборудование
 - Средства измерений
- Процедура отбора образцов
- Результаты испытаний
 - Вывод
- Исполнители
- Дополнительная информация
 - Приложение

1. Наименование и адрес заказчика

ООО "ИЦ ПРОЗАСК". Адрес: 107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, д. 42, стр. 1., ОГРН 1087746804617.

2. Характеристика объекта испытаний

Опытные образцы сборного железобетонного блока высокоточной тоннельной обделки, армированные пространственными стальными каркасами, с добавлением в бетонную смесь полипропиленовой фибры "PROZASK IGS" ТУ 2272-004-87550640-2015 в количестве 0,8 кг/м³ и стеклопластиковой фибры "PROZASK PF" ТУ 2296-005-87550640-2016 в количестве 0,4 кг/м³ (далее по тексту – опытные образцы железобетонного блока тоннельной обделки).

3. Характеристика заказываемой услуги

Испытания опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки проводились с целью определения предела огнестойкости представленных образцов по ГОСТ 30247.0-94 "Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования" и ГОСТ 30247.1-94 "Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции".

Работа выполнялась на основании договора № 909/КИ-3.2 от 28.09.2015 г.

4. Метод испытаний

Испытания проводились согласно ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94.

5. Процедура испытаний

Идентификация образцов

На испытания были представлены 2 образца железобетонного блока тоннельной обделки размерами 2984(по оси)×1400×300 мм каждый (д×ш×т), изготовленные из тяжелого бетона марки В45F300W12 с добавлением полипропиленовой фибры "PROZASK IGS" ТУ 2272-004-87550640-2015 длиной 6 мм в количестве 0,8 кг/м³ и стеклопластиковой фибры "PROZASK PF" ТУ 2296-005-87550640-2016 длиной 40 мм в количестве 0,4 кг/м³.

Принципиальная схема армирования опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки, представлена на рис. 1 и в приложении А.



Всего листов 13. Лист № 3.

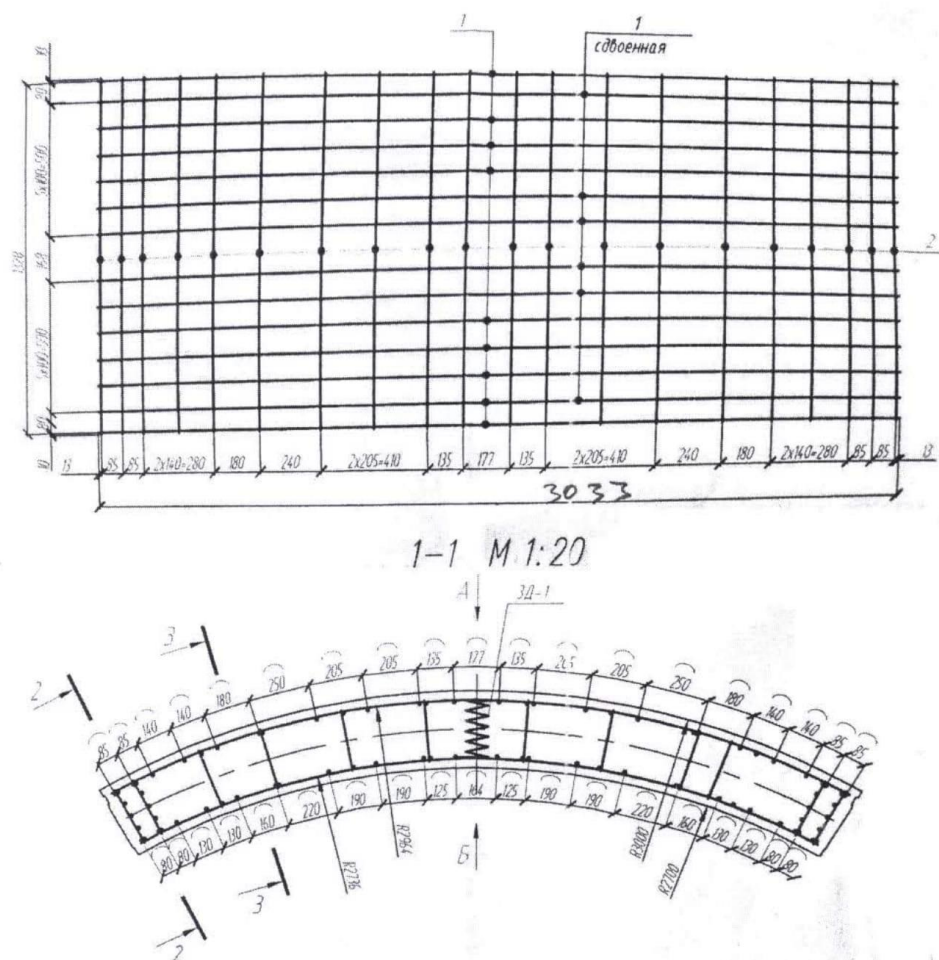


Рис. 1. Схема армирования опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки

Армирование опытных образцов блока тоннельной обделки осуществлялось пространственными каркасами, выполняемыми из арматуры $\varnothing 8$ и 12 мм по ГОСТ Р 52544-2006. Арматурные каркасы изготавливались с помощью контактной точечной сварки в соответствии с требованиями ГОСТ 14098-91.

Толщина защитного слоя бетона до центра тяжести продольной рабочей арматуры с нижней стороны блока составляла не менее 25 мм.

Влажность бетона опытных образцов блока тоннельной обделки соответствовала требованиям, изложенным в п. 7.3 ГОСТ 30247.0.

На рис. 2 представлен подготовленный к испытаниям опытный образец железобетонного блока тоннельной обделки с приложенной статической нагрузкой в соответствии с проектно-расчетной схемой.



Рис. 2. Опытный образец железобетонного блока тоннельной обделки, установленный на огневую камеру испытательной установки с приложенной статической нагрузкой в соответствии с проектно-расчетной схемой. На фотографии представлена система распределения нагрузки, гидравлический домкрат системы нагружения и стальная рама для восприятия нагружающего усилия.

Порядок проведения испытаний

Испытания опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки проводились 14.03.2016 г. и 23.03.2016 г. при следующих условиях: - температура окружающей среды – 14-16 °С; - относительная влажность воздуха – 48-50 %; - скорость движения воздуха – не более 0,5 м/сек.



Всего листов 13. Лист № 5.

Опытные образцы железобетонного блока тоннельной обделки устанавливались на огневую камеру испытательной установки, и подвергались одностороннему тепловому воздействию по стандартному температурному режиму согласно ГОСТ 30247.0.

Испытания опытных образцов на огнестойкость проводились под действием постоянной статической нагрузки, передаваемой через систему её распределения на две точки рабочего пролета блока, с обеспечением приложения дополнительного продольного нагружающего усилия, в соответствии с проектно-расчетной схемой, определяемой техническим заданием заказчика и представленной на рис. 3.

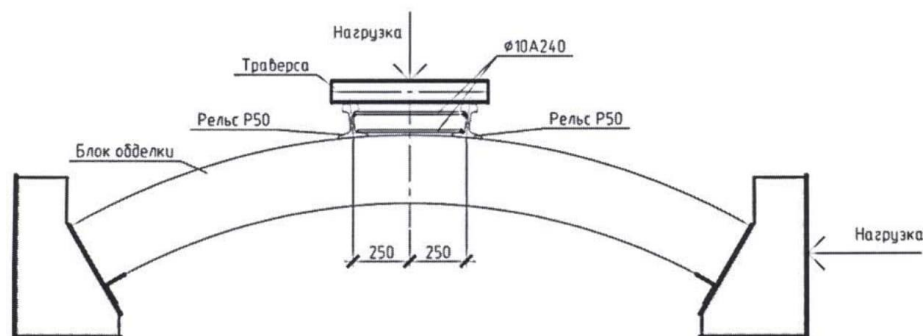


Рис. 3. Схема приложения нагружающих усилий к опытным образцам железобетонного блока тоннельной обделки

Рабочий пролет опытного образца блока тоннельной обделки принимался равным длине блока по оси и составлял 2984 мм.

Передача нагрузки на опытный образец осуществлялась при помощи системы нагружения, имеющей в своем составе гидравлические домкраты мощностью 100 и 200 тс, приспособление для приложения нагрузки к опытному образцу, а также стальную раму для восприятия нагружающего усилия (см. рис. 2).

Величина нагрузки определялась в соответствии с техническим заданием заказчика и составляла: вертикальная нагрузка – 490,5 кН (50 тс); продольная нагрузка – 294,3 кН (30 тс).

Испытательная нагрузка на опытные образцы устанавливалась за 60 мин до начала испытаний и поддерживалась постоянной (с точностью не менее $\pm 5\%$) в течение всего времени их проведения.

Прогибы опытных образцов в середине пролета, в ходе нагружения и в процессе проведения испытаний измеряли прогибомером МП-3. На момент начала огневого воздействия прогиб опытного образца блока тоннельной обделки № 1 составил 1,3 мм, образца № 2 – 1,2 мм.

Температура в огневой камере печи измерялась печными термомпарами типа ТПК, равномерно распределенными по длине образца в четырех местах.



Всего листов 13. Лист № 6.

Предельное состояние образцов

Для блоков тоннельных обделок предельное состояние принималось по потере несущей способности конструкции (R) в следствие её обрушения или возникновению предельных деформаций, согласно приложению А к ГОСТ 30247.1 (предельный прогиб в середине пролета блока рассчитывался как для плоской конструкции из расчета длины пролета 2984 мм и составлял для данной конструкции – 99,5 мм, скорость нарастания деформации более 0,33 см/мин).

6. Испытательное оборудование

Комплексная установка для проведения испытаний на огнестойкость панелей, настилов, плит перекрытий, покрытий, подвесных потолков, несущих стен, колонн, балок и ферм по различным температурным режимам. Протокол периодической аттестации № 65.03.16. Срок действия до 21.03.2017 г.

7. Средства измерений

Прибор А650М-002-04 № 31008274. Диапазон измерений от 0 °С до 1300 °С. Кл. точности 0,5. Очередной срок поверки 16.12.2016 г.

Термоэлектрические преобразователи ТПК 125-0314-1600 № 149, 151, 152, 336. Кл. точности 2. Очередной срок поверки 16.12.2016 г.

Штангенциркуль ШЦ-I-150-0,1-2 № 40200665; диапазон измерений от 0 мм до 150 мм; цена деления - 0,1 мм. Очередной срок поверки - 01.11.2016 г.

Линейка металлическая № 2; диапазон измерений от 0 мм до 1000 мм; цена деления – 1 мм. Очередной срок поверки – 01.11.2016 г.

Анемометр цифровой АМ-4202 № L798764 Очередной срок поверки 10.2016 г.

Прогибомер МП-3 № 3827; цена деления - 0,01 мм. Очередной срок поверки 14.11.2016 г.

Манометры технические МТИ, класс 1, № 1008, 1023, диапазон измерений от 0-1000 кгс/см². Очередной срок поверки – 22.11.2016 г.

8. Процедура отбора образцов

Опытные образцы железобетонного блока тоннельной обделки были доставлены представителем заказчика на испытательную базу ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России и переданы сотруднику отдела Павлову В.В.



Всего листов 13. Лист № 7.

9. Основные результаты испытаний

Средняя температура в огневой камере не превышала допустимых отклонений по ГОСТ 30247.0.

Кривые изменения температур в огневой камере печи и прогибов, опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки представлены на рис. 4.

Характерные особенности поведения опытных образцов в процессе проведения испытаний, а также результаты визуального осмотра

За время проведения испытаний зафиксированы следующие характерные особенности поведения опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки: 35-40 мин – наблюдается начало выпаривания влаги на необогреваемой поверхности опытных образцов, которое продолжалось до конца экспериментов. Далее видимых изменений, за исключением незначительного роста прогиба, в состоянии опытных образцов зафиксировано не было (см. рис. 5).

По согласованию с заказчиком 1-й и 2-й опыты были прекращены через 125 мин огневого воздействия, за время проведения которых, хрупкого разрушения бетона опытных образцов не зафиксировано.

Визуальные осмотры опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки проводились после их снятия с испытательной установки, по результатам которых установлено:

- деформация опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки практически отсутствует;
- на нижней (обогреваемой) поверхности опытных образцов отмечено наличие поперечных нитевидных трещин;
- разрушения защитного слоя бетона с нижней (обогреваемой) стороны опытных образцов не зафиксировано (см. рис. 6).

Результаты обработки экспериментальных данных

На момент окончания огневого воздействия (125 мин) обрушения опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки не произошло.

Прогиб опытных образцов не достиг предельного значения (см. п. 5 данного отчета) и составил на момент окончания испытаний 5,7 и 6,1 мм для 1-го и 2-го образца соответственно.



Всего листов 13. Лист № 8.

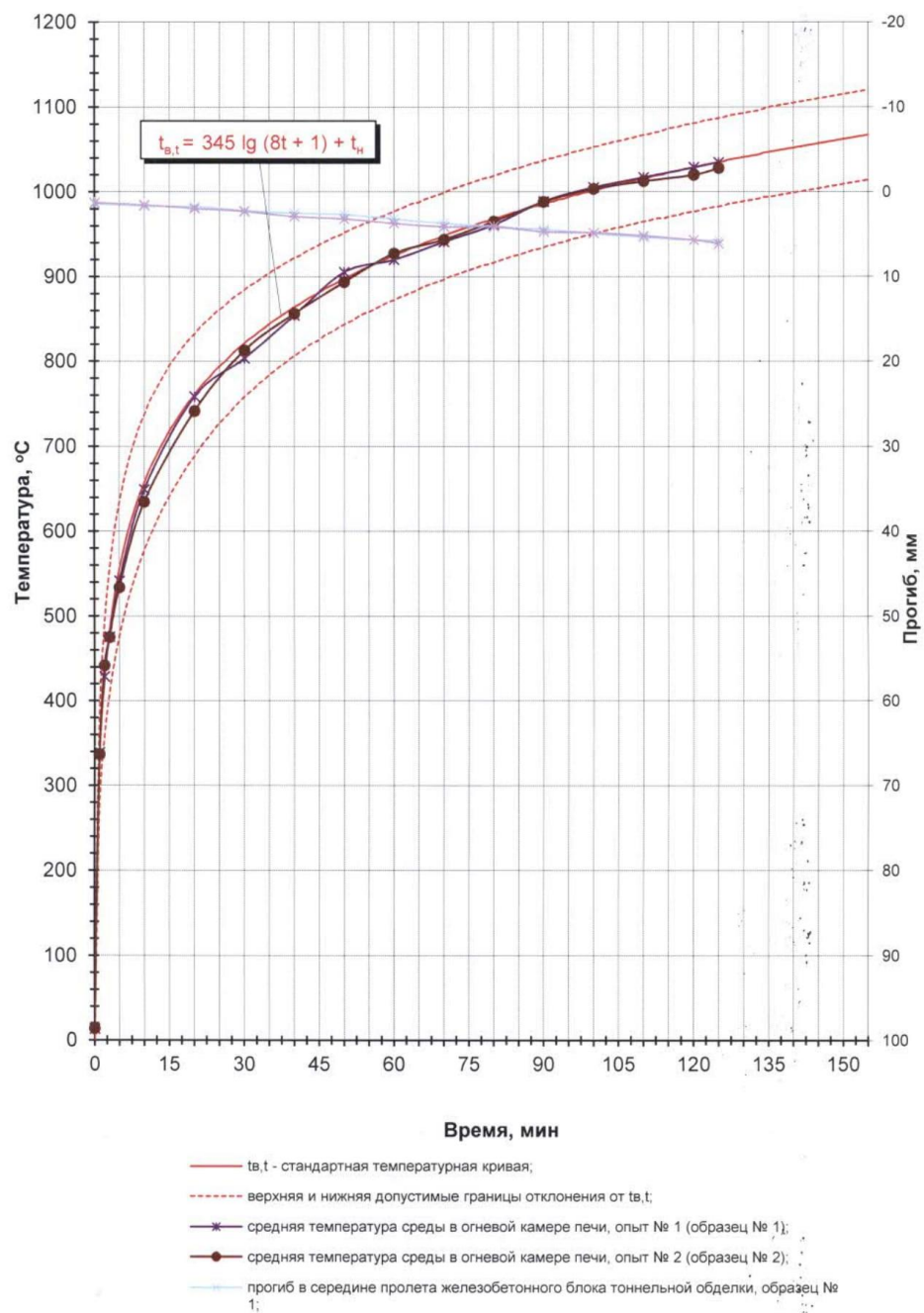


Рис. 4. Кривые изменения температур в огневой камере печи и прогибов, опытных образцов железобетонного блока тоннельной обделки

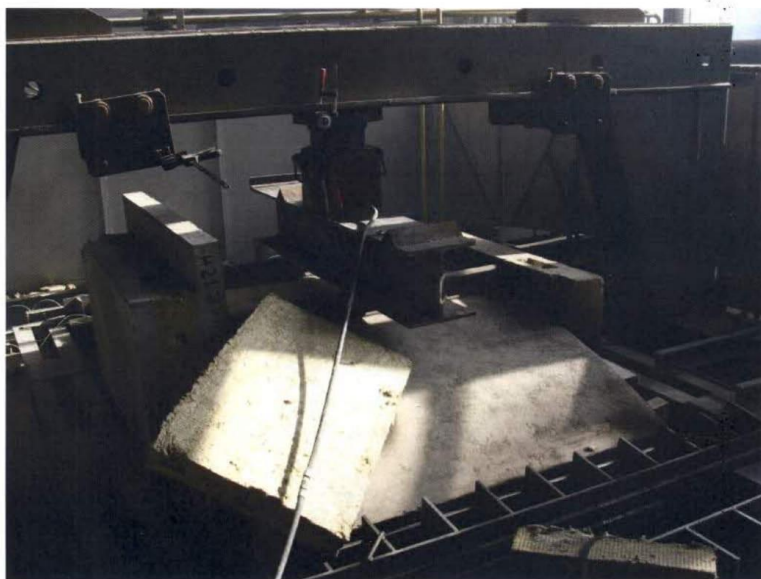


Рис. 5. 125-я мин испытания, окончание огневого воздействия (опытный образец № 1)



Рис. 6. Опытный образец № 2 после огневого воздействия, вид на обогреваемую сторону, повреждений защитного слоя бетона не зафиксировано



Всего листов 13. Лист № 10.

10. ВЫВОД

Предел огнестойкости по ГОСТ 30247.1 сборного железобетонного блока высоко-точной тоннельной обделки, армированного пространственными стальными каркасами, с добавлением в бетонную смесь полипропиленовой фибры "PROZASK IGS" ТУ 2272-004-87550640-2015 в количестве 0,8 кг/м³ и стеклопластиковой фибры "PROZASK PF" ТУ 2296-005-87550640-2016 в количестве 0,4 кг/м³ (описание см. в п. 5 данного отчета и в приложении А), испытанного под воздействием постоянной статической нагрузки равной 490,5 кН (50 тс), распределенной по двум точкам рабочего пролета блока, и продольной нагрузки равной 294,3 кН (30 тс), составляет не менее 125 мин, что соответствует классификации R 120 по ГОСТ 30247.0.

ИСПОЛНИТЕЛИ

Начальник отдела
кандидат технических наук



А.В. Пехотиков

Начальник сектора



В.В. Павлов

11. Дополнительная информация

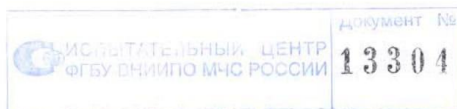
1. Если специально не оговорено, настоящий отчет предназначен только для использования Заказчиком.
2. Страницы с изложением результатов испытаний не могут быть использованы отдельно без полного отчета об испытаниях.
3. Срок действия отчета об испытаниях 3 (три) года.
4. Информация, содержащаяся в отчете об испытаниях, не может быть использована в целях рекламы среди общественности или каким-либо другим путем без письменного разрешения ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Кроме случаев предоставления информации для органов экспертизы, контролирующих и проверяющих организаций и в соответствии с ФЗ № 2300-1 от 07.02.1992 г. "О защите прав потребителей".



Всего листов 13. Лист № 11.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Принципиальная схема армирования опытных образцов железобетонного блока
тоннельной обделки, на 1-м листе



Всего листов 13. Лист № 12.

