

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ МИНИСТЕРСТВА
ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

УДК 614.841.332:691.328.2

ЗАЙНУДИНОВА
Наталья Владимировна

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ПЛИТ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ
АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность
(по отраслям)

Минск, 2020

Научная работа выполнена в государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

- Научный руководитель: **Полевода Иван Иванович**,
кандидат технических наук, доцент, начальник государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».
- Официальные оппоненты: **Тур Виктор Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов учреждения образования «Брестский государственный технический университет».
- Пицуха Евгений Александрович**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории дисперсных систем государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси.
- Оппонирующая организация: Учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Защита состоится 03 апреля 2020 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 11.01.01 при государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» по адресу: 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, аудитория АВ 102 (конференц-зал). Ученый секретарь: телефон +375 (17) 341-32-99, e-mail k11.01.01@ucsp.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Автореферат разослан 02 марта 2020 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

В.А. Кудряшов

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве для увеличения пролетов все чаще находят применение системы предварительного натяжения арматуры на бетон в построечных условиях. Это объяснимо рядом существенных достоинств: натяжение производится непосредственно на бетон, без устройства стенов и упоров, также происходит уменьшение толщины и веса конструкции за счет усилий, созданных до приложения эксплуатационной нагрузки. Такие конструкции при их применении в гражданском и промышленном строительстве должны соответствовать всем требованиям технических нормативных правовых актов (далее ТНПА). Однако на текущий момент не все аспекты, связанные с их использованием, достаточно изучены и регламентированы.

Одной из основных классификационных характеристик, определяющих область применения строительных конструкций, является предел огнестойкости. В общем объеме ТНПА по оценке огнестойкости не в полном объеме учитываются особенности конструктивного исполнения данных конструкций. В общем случае для определения предела огнестойкости необходимы: минимальная толщина конструкции и расстояние от нагреваемой поверхности до оси арматуры. Однако корректность применения существующих значений упрощенных параметров для оценки огнестойкости изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит требует уточнения. Отсутствие исследований в данной области может привести к переоценке огнестойкости и, как следствие, к преждевременному разрушению таких конструкций при пожаре. Таким образом, расчетные и экспериментальные исследования теплотехнических и прочностных характеристик элементов железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в условиях пожара актуальны и позволяют повысить безопасность зданий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585, п. 10.11), на 2016–2020 годы (Постановление Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015 г. № 190, п. 8 и 13), а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г. № 166, п. 3.10 и 9.2).

Исследования, составившие основу диссертационной работы, выполнялись в ГУО «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» в рамках:

– гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований «Разработка методов измерений величины и направления изгибов и напряжений инженерных объектов и сооружений на основе векторных волоконно-оптических датчиков интерферометрического типа и их реализация» (№ госрегистрации 20151199 от 14.07.2015, 2015 – 2017);

– научно-исследовательской работы «Огнестойкость узлов сопряжений монолитных железобетонных плит перекрытия с балконными плитами с использованием изделий закладных комплексных типа «Консоль-термо» (№ госрегистрации 20170032 от 12.01.2017, 2016-2017).

Цель исследования – определение на основании экспериментальных и расчетных исследований предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном.

Для достижения цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

– разработать конструкцию экспериментальных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном и провести испытания по определению их пределов огнестойкости;

– определить схему разрушения и влияние конструктивных решений на предел огнестойкости плит;

– установить возможность хрупкого разрушения конструкции с учетом весовой влажности, критерия хрупкого разрушения, а также при наличии сжимающих напряжений в конструкции, вызванных обжатием бетона арматурой;

– провести теплотехнический и прочностной расчеты огнестойкости элементов железобетонных конструкций методом конечных элементов (далее – МКЭ);

– определить критическую температуру для напрягаемой канатной арматуры, применяемой в изгибаемых железобетонных конструкциях без сцепления с бетоном.

Объектом исследования являются железобетонные предварительно напряженные плиты без сцепления арматуры с бетоном, **предметом исследования** – огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, а также их теплотехнические и прочностные характеристики при пожаре.

Научная новизна:

Экспериментальным путем установлено, что наступление предельного состояния по огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном при огневом воздействии сопровождается сильным хрупким разрушением в сжатой зоне и наступает значительно раньше,

чем при определении предела огнестойкости данных конструкций аналитическим и табличным методами.

Проведены испытания по определению огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, в результате которых получены зависимости температуры на необогреваемой поверхности конструкций, температуры канатной арматуры, а также прогиба конструкций от времени огневого воздействия.

На основании полученных экспериментальных данных и численного расчета оценки огнестойкости методом конечных элементов в программно-вычислительном комплексе ANSYS Workbench определена критическая температура канатной арматуры в пластиковой оболочке, составляющая $230\pm 5^\circ\text{C}$. Скорректирована методика по определению предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты огневых испытаний железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, включающие зависимости температуры на необогреваемой поверхности конструкций и температуры канатной арматуры, а также величины прогиба конструкций от времени огневого воздействия, полученные впервые для указанных плит и позволяющие определять предел их огнестойкости.

2. Методика расчета предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, включающая значение критической температуры канатной арматуры $230\pm 5^\circ\text{C}$, отличающееся в 1,5-1,8 раза от значений, приведенных в действующих стандартах, и учитывающая, что взрывное разрушение защитного слоя бетона происходит независимо от значения весовой влажности и критерия хрупкого разрушения.

3. Результаты численного моделирования методом конечных элементов поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном при огневом воздействии, содержащие теплотехнические и прочностные свойства материала арматуры и бетона, отличающиеся учетом модели трещинообразования в бетоне, подтвержденные экспериментальными данными и позволяющие прогнозировать предел огнестойкости данных конструкций, наряду с натурными огневыми испытаниями.

Личный вклад соискателя. Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Определение цели и постановка задач исследования, интерпретация теоретических и экспериментальных результатов проводилась совместно с научным руководителем – кандидатом технических наук, доцентом И.И. Полеводой. Н.И. Чайциц, Г.Н. Зинкевич, Д.М. Сороко принимали участие в изготовлении экспериментальных образцов плит, а также участвовали в проведении испытаний по определению огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном на уровне технического ассистирования. Научный руководитель, а также соавторы совместных публикаций кандидат физико-математических наук, доцент А.Н. Камлюк, кандидат физико-математических наук А.В. Ширко принимали участие в обсуждении результатов моделирования методом конечных элементов теплотехнического и прочностного поведения железобетонных плит при пожаре.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты диссертационных исследований представлялись на: V, VI, VIII, X, XI и XII Международных научно-практических конференциях молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» – г. Минск 2011 г., 2012 г., 2014 г., 2016 г, 2017 г, 2018 г; Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: теория и практика» – г. Гомель, 2011 г.

Материалы диссертации внедрены в образовательный процесс филиала «Институт переподготовки и повышения квалификации» Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь при преподавании дисциплины «Нормативно-техническая работа», а также в ООО «Инжиниринг систем безопасности» при расчете пределов огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном.

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе: 9 статей, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 4,27 авторского листа (из них без соавторов 1 статья), 7 тезисов докладов в сборниках трудов международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка из 117 наименований, включая 16 собственных публикаций соискателя, 5 приложений, 52 рисунков и 17 таблиц. Полный объем диссертации составляет 113 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору применения системы преднапряжения арматуры без сцепления с бетоном. Выполнен обзор литературных источников, посвященных развитию нормирования огнестойкости железобетонных предварительно напряженных конструкций. Рассмотрены основные тенденции в строительной индустрии Республики Беларусь в части применения системы предварительного натяжения арматуры на бетон в построечных условиях. Проанализированы основные подходы к расчетному и экспериментальному определению пределов огнестойкости предварительно напряженных плит.

В Республике Беларусь и за рубежом решением проблемы проектирования и обеспечения огнестойкости железобетонных предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном занимались такие исследователи как: С.А. Зенин, С.Б. Крылов, О.В. Кудинов, В.С. Кузнецов, С.А. Мадатян, Б.С. Соколов, В.В. Тур, Е.А. Чистяков, Р.Ш. Шарипов, О. Aalami, Dr. Vijan, L. Bisby, J. Gales, K. Hartin, P. Marti и др. В России в настоящее время систему натяжения на бетон применяют ряд строительных организаций, в том числе «DSI-PSK», ЗАО «СТЭФС», ООО «СТС» и др. В Москве, Екатеринбурге, Воронеже построен ряд объектов с применением этих систем для большепролетных перекрытий автостоянок, гаражей и общественных зданий. Но в целом, преднапряженный железобетон пока не нашел широкого применения. Отчасти это связано с отсутствием норм и рекомендаций по расчету и проектированию данных конструкций. СНиП 2.03.01-89* «Бетонные и железобетонные конструкции» и пособия к нему содержат общие сведения о предварительном напряжении с натяжением на бетон. В ТКП 45-5.03-135-2009 «Железобетонные предварительно напряженные конструкции без сцепления арматуры с бетоном. Правила проектирования» рассматривается технология натяжения арматуры на упоры и расчет, конструирование сборных железобетонных конструкций.

Предел огнестойкости является одним из основных классификационных параметров, определяющих область применения строительных конструкций. В настоящее время для определения пределов огнестойкости используются как расчетные методы, так и испытания. В ТКП 45-2.02-110-2008 «Строительные конструкции. Порядок расчета пределов» представлен расчет огнестойкости строительных конструкций, но не отражается специфика поведения железобетонных конструкций без сцепления канатной арматуры с бетоном при пожаре, отсутствуют рекомендации и указания по защите данных конструкций. Применение испытаний не всегда допустимо ввиду ограниченных возможностей методов определения огнестойкости и испытательных установок. Таким образом, анализ литературных источников и ТНПА показал, что для оценки огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с

бетоном необходимо проведение огневых испытаний, а также, с учетом их анализа, адаптация существующей методики оценки огнестойкости железобетонных конструкций.

Во второй главе обоснована конструкция экспериментальных плит, методика и ход проведения испытания, а также контролируемые параметры.

Эксперимент организован по методике ГОСТ 30247.0, ГОСТ 30247.1 и проведен на установке, используемой Научно-исследовательским институтом пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Беларуси для сертификационных испытаний на огнестойкость. В качестве стендового оборудования использована испытательная печь для горизонтальных строительных конструкций.

На ОАО «Минскжелезобетон» из бетона марки $C^{25}/_{30}$ (B30) изготовлены плиты специальной конструкции на основе типовых плит серии Б1.041.1-3.08 (рисунок 1).

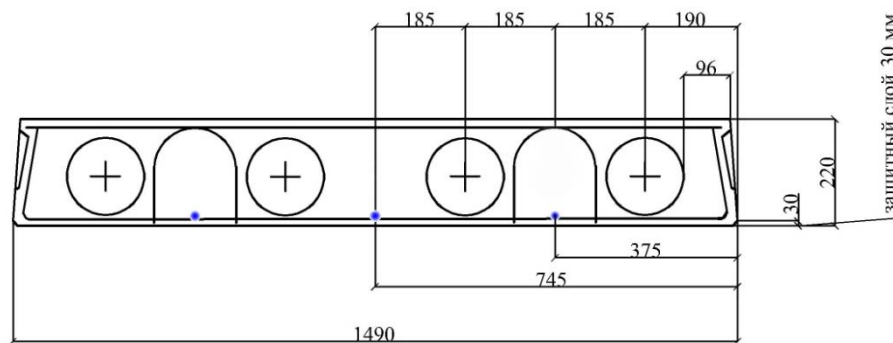


Рисунок 1. – Конструкция экспериментальных плит

Конструктивные параметры определены исходя из параметров огневой печи: длина 5 980 мм, ширина 1490 мм, высота 220 мм. Предусмотрены четыре круглые пустоты диаметром 159 мм. В конструкциях плит, вместо рабочих стержней арматуры S800, применен арматурный семипроволочный спиральный канат класса К-7 (S1400) диаметром 15,7 мм, заключенный в заводских условиях в пластиковую оболочку с прослойкой смазочного состава и зафиксированный по торцам анкерами.

Расстояние между поверхностью пластиковой оболочки канатов и ближайшей поверхностью бетона принято минимально возможным и выдержано в пределах 30 ± 5 мм. При достижении 80 % прочности твердения бетонной смеси выполнено преднапряжение канатной арматуры с помощью гидравлического домкрата и насосной станции. Трещин, отколов и других разрушений плит не наблюдалось (рисунок 2).



Рисунок 2. – Преднапряжение канатной арматуры экспериментальных плит

Огневые испытания проводились в закрытом помещении при температуре окружающей среды 16 °С, давлении 99,4 кПа и относительной влажности 62%. Влажность испытательных образцов находилась в пределах 0,9-1,1 %. Плиты размещались на печи плотно одна рядом с другой. Стыки между ними, а также по торцам, заделывались минеральной ватой. Открытых проемов по бокам не было. К одному из испытательных образцов за 3 часа до начала проведения огневого испытания установлена постоянная равномерно приложенная нагрузка 600 кг/м², что составило 50% от расчетной, другой образец испытывался под собственным весом без нагрузки. Боковые края плит не ограничивались (рисунок 3).



1 – равномерно приложенная нагрузка; 2 – железобетонная плита, испытываемая под нагрузкой; 3 – железобетонная плита, испытываемая под собственным весом без нагрузки

Рисунок 3. – Железобетонные плиты до проведения огневых испытаний

В процессе испытания регистрировались: время наступления предельных состояний и их вид; температуры в печи, на необогреваемой поверхности конструкции, а также на канатной арматуре; деформации несущих конструкций;

время появления и характер трещин, отверстий, отслоений, а также другие явления (нарушение условий опирания, появление дыма).

Для замера температуры арматуры и бетона применялись преобразователи термоэлектрические ТХА(К), размещенные по схеме, представленной на рисунке 4. На необогреваемой поверхности конструкции установлено 5 преобразователей (Т'1-Т'5), на канатной арматуре – 11 преобразователей (Т1-Т11).

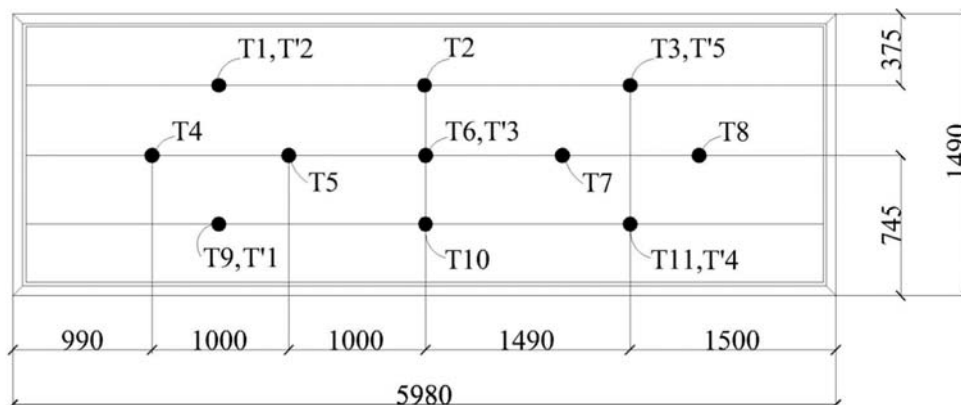


Рисунок 4. – Схема расстановки преобразователей термоэлектрических на необогреваемой поверхности плиты (Т'1-Т'5) и канатной арматуре (Т1-Т11)

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном.

При проведении испытаний температура в печи изменялась по зависимости, характерной для стандартного пожара и находилась в пределах допустимых отклонений (рисунок 5).

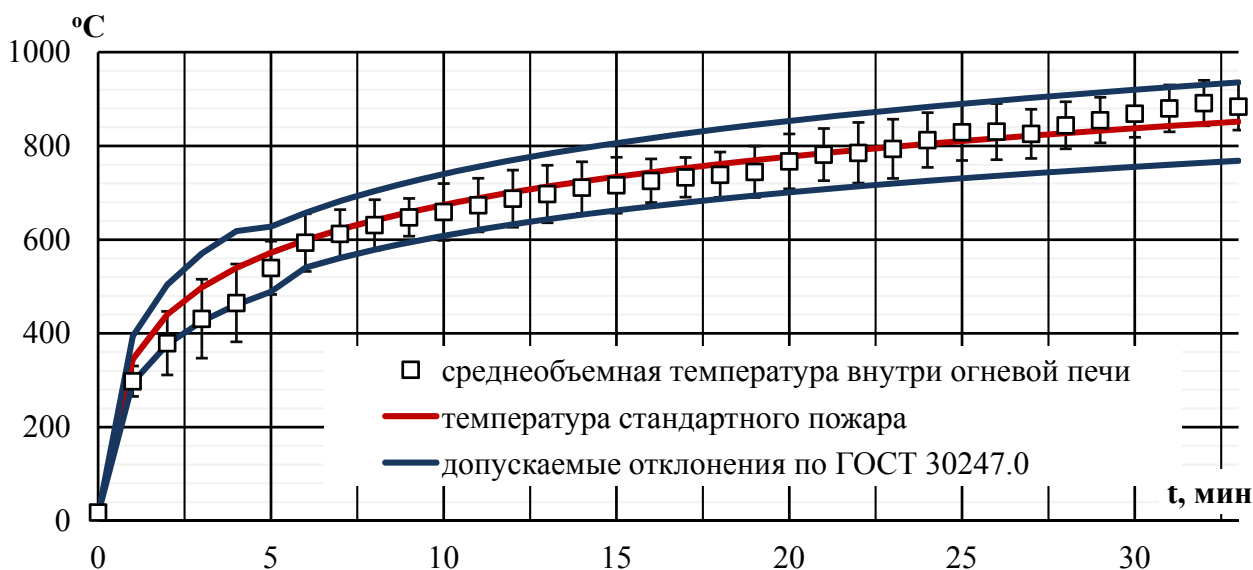


Рисунок 5. – График изменения температуры в печи во время огневого воздействия

На 8 минуте огневого воздействия зафиксировано начало взрывообразной деструкции бетона, на 15 минуте – увеличение ее интенсивности. В ходе испытания хрупкое разрушение привело к уменьшению защитного слоя бетона, оголились участки арматуры, оплавилась пластиковая оболочка каната. Разрушения достигли пустот (рисунок 6).



Рисунок 6. – Разрушение защитного слоя бетона экспериментальных образцов

На 33 минуте огневое воздействие прекращено в связи с наступлением предела огнестойкости по несущей способности, выразившимся в достижении предельных деформаций с последующим разрушением конструкций (рисунок 7).



Рисунок 7. – Железобетонные плиты после проведения огневых испытаний

Разрушение плит произошло в середине пролета по схеме, представленной на рисунке 8. Характер разрушения соответствует схеме разрушения железобетонных плит со сцеплением арматуры с бетоном, опертых по двум противоположным сторонам при одностороннем нагреве (рисунок 9).

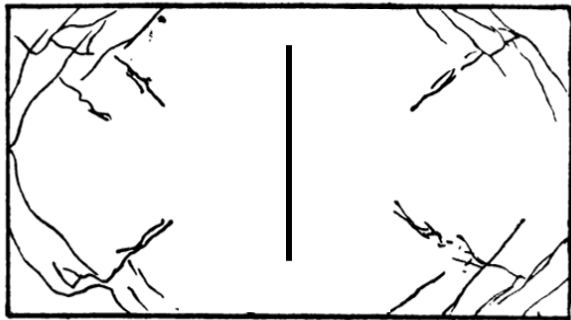


Рисунок 8. – Схема излома плиты, испытываемой под нагрузкой



Рисунок 9. – Фото разрушения железобетонных плит

Температура на необогреваемой поверхности плит на момент окончания огневого воздействия не превышала 90 °С, средняя температура составила 49 °С. Предел огнестойкости по теплоизолирующей способности не достигнут. График зависимости температуры на необогреваемой поверхности от времени представлен на рисунке 10.

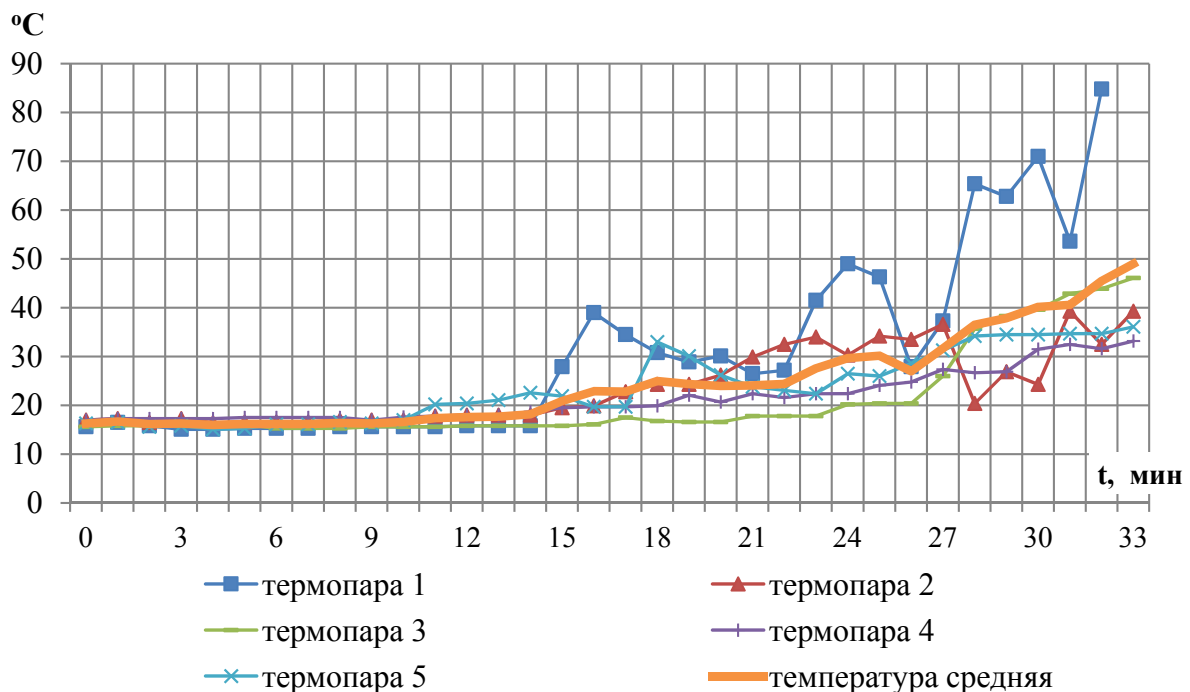


Рисунок 10. – График зависимости температуры на необогреваемой поверхности плиты от времени огневого воздействия

Температура арматуры канатов в момент, предшествующий разрушению конструкций составила 132 °С, 332 °С, 210 °С. График зависимости температуры от времени представлен на графике 11.

Температура, °С

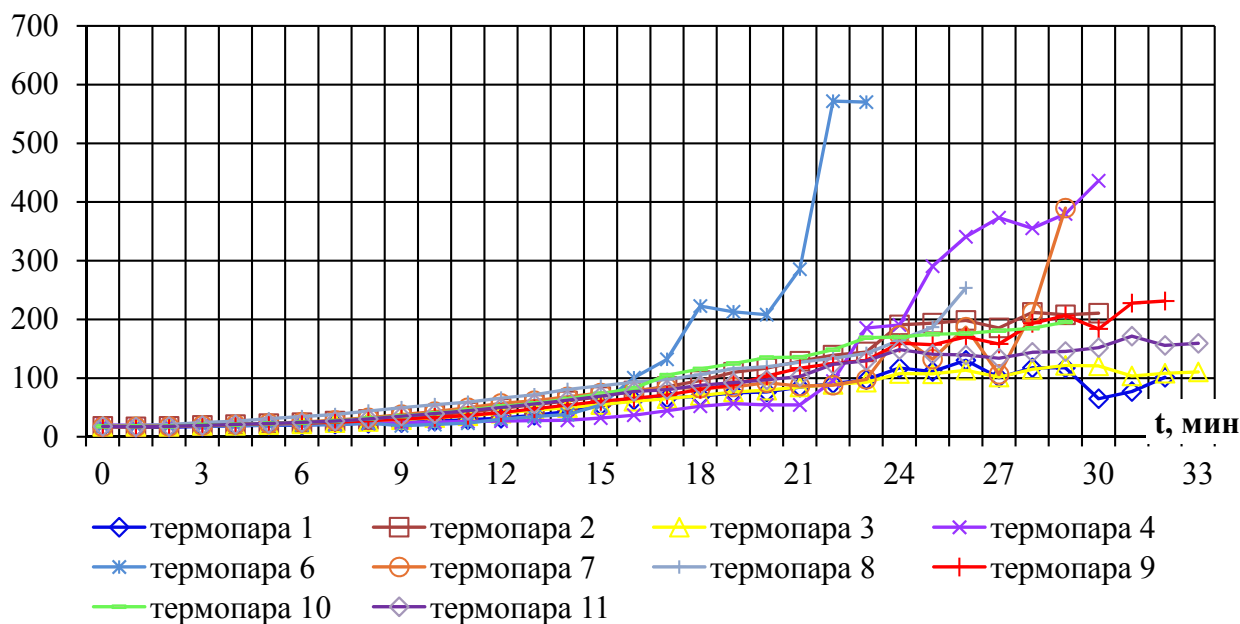


Рисунок 11. – График зависимости температуры на канатной арматуре от времени огневого воздействия

Среднее арифметическое значение температуры для канатов в момент разрушения конструкции, определенное экспериментальным методом, составило 224 ± 2 °С.

В ходе испытания до 33 минуты наблюдалось плавное увеличение прогиба. Графики зависимости прогибов от времени представлены на рисунке 12, скорости нарастания деформаций на рисунке 13.

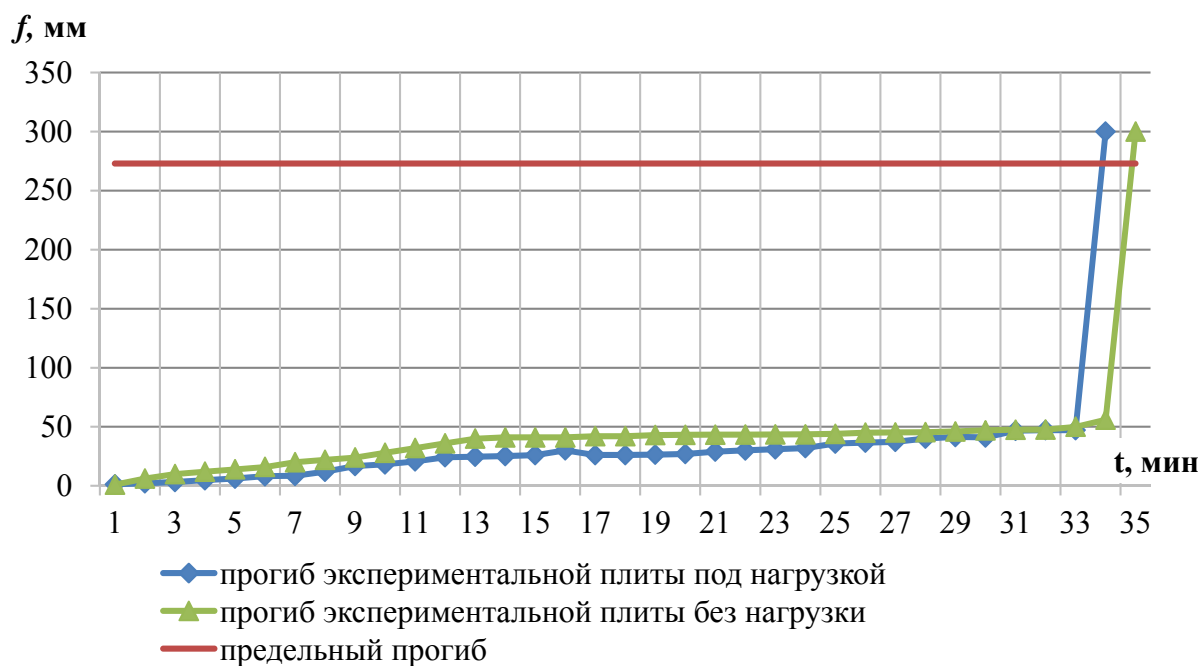


Рисунок 12. – График зависимости прогиба экспериментальных плит от времени огневого воздействия

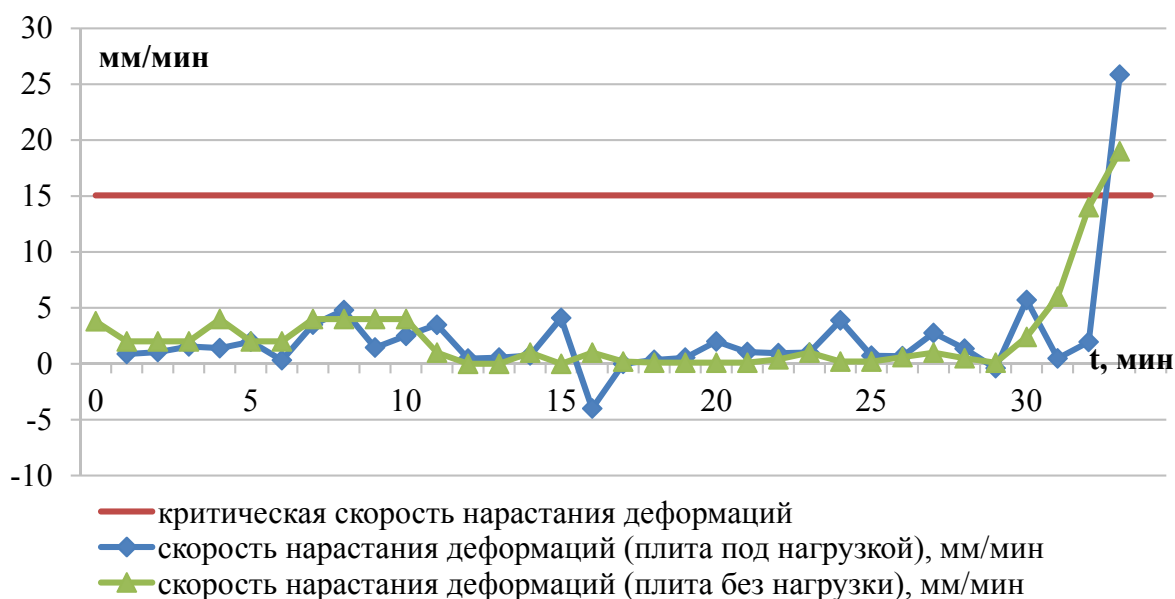


Рисунок 13. – График зависимости скорости нарастания деформаций экспериментальных плит от времени огневого испытания

Для изгибаемых элементов нормативная величина предельного прогиба составляет $L/20 = 5460/20 = 273$ мм, а предельная скорость его нарастания $L^2/(9000 \cdot h) = 5460^2/(9000 \cdot 220) = 15,06$ мм/мин, где L – пролет, мм; h – расчетная высота сечения конструкции, мм. Время разрушения конструкций составило 33 минуты, что соответствует пределу огнестойкости REI 30.

В четвертой главе приведены модельные исследования по оценке огнестойкости железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном. Исследования выполнены в 2 этапа. На первом проведен теплотехнический расчет конструкции. На втором этапе с целью определения деформаций исследуемых конструкций проведен статический расчет с учетом изменения свойств материалов при нагреве, что позволяет описать их поведение при пожаре.

Теплотехнический расчет заключается в оценке температуры бетона и арматуры в любой точке поперечного сечения железобетонной плиты путем решения задачи нестационарной теплопроводности МКЭ и реализацией ее в программно-вычислительном комплексе ANSYS Workbench.

Начальные условия: температура в расчетном сечении конструкции одинакова и равна температуре окружающей среды. Граничные условия:

1. Распределение температуры на обогреваемой поверхности конструкции для каждого момента времени соответствует режиму стандартного пожара ($\theta(\tau) = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) + \theta_0$, где $\theta(\tau)$ – температура среды вблизи конструкций, °С; θ_0 – температура окружающей среды, °С; τ – время, мин, 8 – эмпирический коэффициент, мин⁻¹; 345 – эмпирический коэффициент, °С).

2. Теплодача с необогреваемой поверхности осуществляется за счет конвективного теплообмена и теплового излучения.

Приведенный коэффициент температуропроводности бетона определяется по известной формуле $a_{red} = 3,6\lambda_k / ((C + 0,05W_c) \cdot \rho_0)$, где ρ_0 – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м³; W_c – весовая влажность бетона, %; C – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°C); λ_k – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·°C); 3,6 – коэффициент; 0,05 – коэффициент, кДж/(кг·°C·%).

Результаты моделирования в отдельный момент времени представлены на рисунке 14.

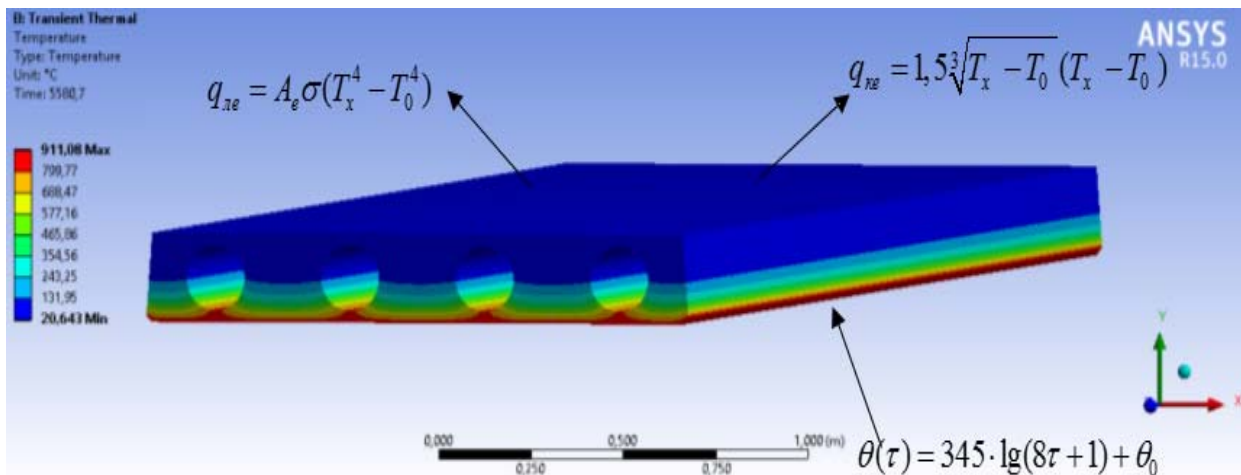


Рисунок 14. – Результаты моделирования нагрева железобетонной плиты
 ($q_{ке}$ – тепловой поток за счет конвективного теплообмена, $q_{ле}$ – тепловой поток за счет излучения; T_x – температура среды пожара, T_0 – температура необогреваемой поверхности плиты; A_e – степень черноты поверхности плиты; σ – постоянная Стефана-Больцмана)

При моделировании получены температурные поля в плите, позволяющие определить распределение температур в теле конструкции. Температурные поля при теплотехническом расчете сопоставимы с результатами огневых испытаний. Результаты огневых испытаний показывают, что для железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, влажность которых составила 0,9–1,1 %, характерно сильное хрупкое разрушение защитного слоя конструкции. Для опытных конструкций критерий хрупкого разрушения F составил 5,1, то есть попадает в потенциально опасный интервал. Расчет выполнен для двух вариантов образца под нагрузкой: без изменения целостности конструкции и с учетом разрушения защитного слоя конструкции. Сравнение расчетных данных по температуре на поверхности плиты и на арматуре с экспериментальными данными приведено на рисунках 15-16. В предварительно напряженных плитах без сцепления арматуры с бетоном для защиты от хрупкого разрушения бетона следует применять известные способы армирования, при отсутствии конструктивной защиты обогреваемой поверхности следует принимать значение критической температуры ниже (получено $230 \pm 5^\circ\text{C}$).

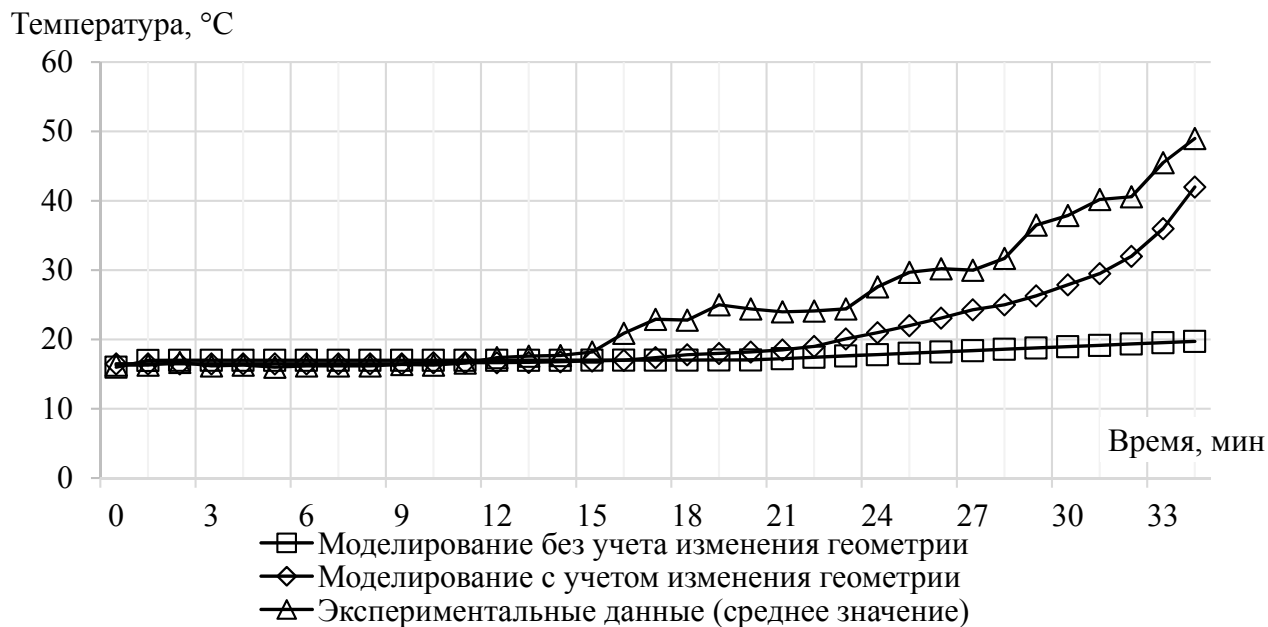


Рисунок 15. – График зависимости температуры на необогреваемой поверхности плиты от времени при моделировании и эксперименте

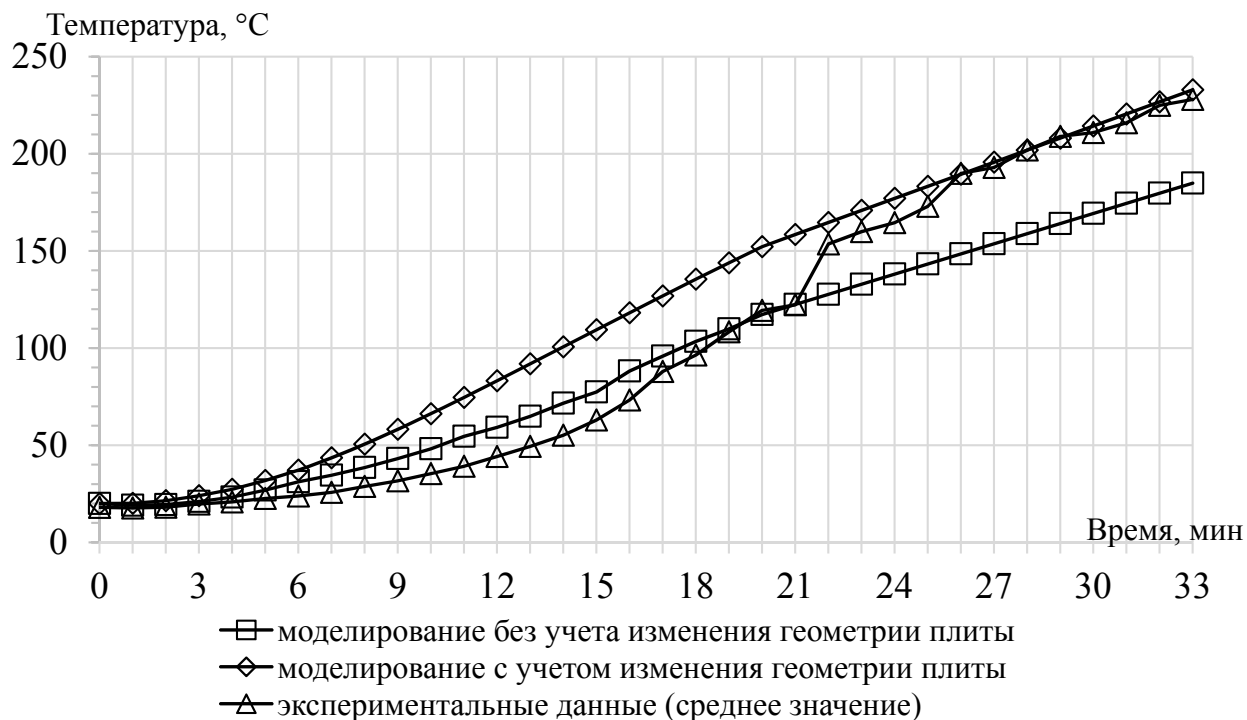


Рисунок 16. – График зависимости температуры арматуры от времени при моделировании и эксперименте

При применении компьютерного моделирования установлено, что критическая температура арматуры канатов без сцепления железобетонных плит составляет 232 °C, на момент времени 33 минуты.

Полученные в теплотехническом расчете температурные поля импортировались в прочностной модуль, и производился расчет напряженно-деформированного состояния с учетом изменения свойств бетона и арматуры за весь временной интервал нагрева элементов железобетонных конструкций. Поскольку схема разрушения экспериментальных образцов соответствует стандартной схеме разрушения железобетонных плит, предел огнестойкости определялся по достижению значения предельного прогиба и (или) скорости его нарастания. График зависимости максимального прогиба плиты от времени нагрева в сопоставлении с экспериментальными данными приведен на рисунке 17.

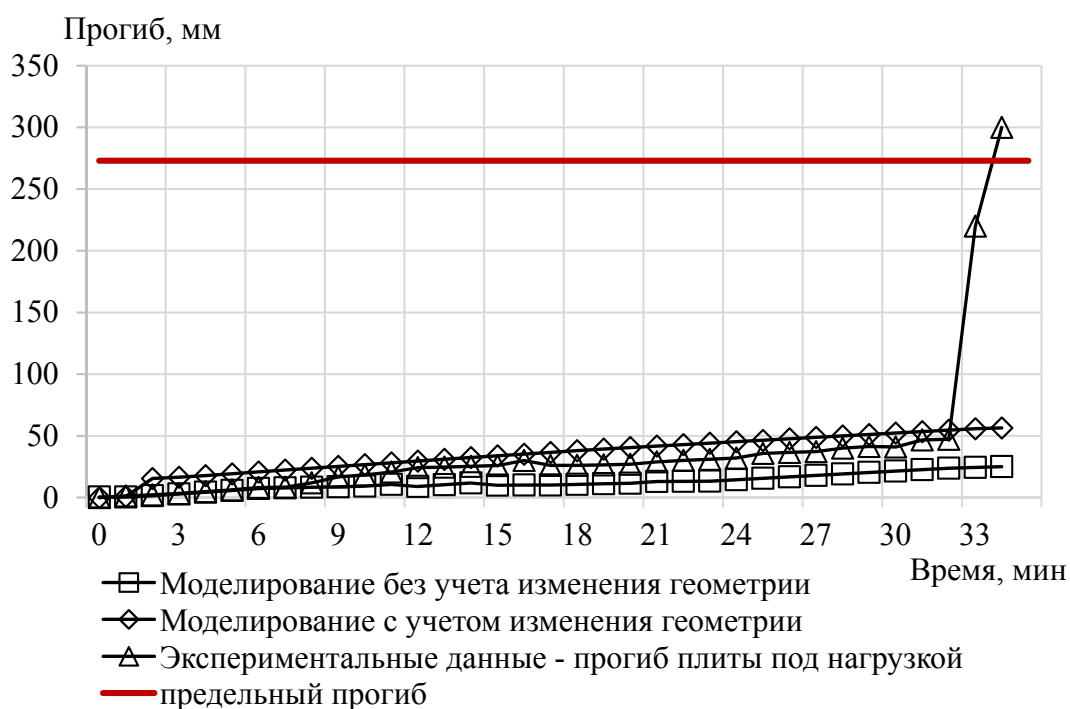


Рисунок 17. – График зависимости прогиба плит от времени при моделировании и эксперименте

Исходя из расчета методом предельного равновесия, предел огнестойкости по потере несущей способности составил R60. При проведении огневых испытаний предел огнестойкости по потере несущей способности рассматриваемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном составил R30 (фактическое время разрушения плит 33 минуты). В ходе выполнения теоретического расчета, исходя из предела огнестойкости по несущей способности R30, критическая температура для канатов составила 230 ± 5 °С, что значительно ниже критической температуры, предлагаемой ТНПА.

По результатам моделирования и экспериментальным данным стандартная методика определения предела огнестойкости адаптирована для железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном (рисунок 18).



Рисунок 18. – Методика расчета предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном

С учетом полученного значения критической температуры произведен перерасчет нормативных значений пределов огнестойкости. В результате численных исследований ряда железобетонных предварительно напряженных плит без сцеплений арматуры с бетоном получены пределы огнестойкости свободно опертых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном для упрощенного метода. Предел огнестойкости следует выполнять по таблице 1 в зависимости от расстояния до оси арматуры s от обогреваемой поверхности.

Таблица 1 – Предел огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном

Предел огнестойкости	Расстояние до оси арматуры s , мм, при армировании в одном направлении	
	при отсутствии защиты обогреваемой поверхности	при наличии защиты обогреваемой поверхности
REI 30	35	25
REI 60	55	25
REI 90	60	30

Полученные результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными и могут быть использованы при проведении расчетов огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально установлено, что схема разрушения экспериментальных образцов соответствует стандартной схеме разрушения предварительно напряженных железобетонных плит со сцеплением арматуры с бетоном, поэтому расчет предела огнестойкости конструкций допускается выполнять на сопротивление изгибающему моменту от внешней нагрузки только для среднего расчетного сечения. На основании огневых испытаний получены зависимости температуры на необогреваемой поверхности конструкций, температуры канатной арматуры, а также прогиба конструкций от времени огневого воздействия [1, 5, 8].

2. Установлено, что для железобетонных плит с предварительно напряженной арматурой без сцепления с бетоном характерно сильное хрупкое разрушение в сжатой зоне. Хрупкое разрушение сопровождается внезапным высвобождением энергии и сильным разрушением защитного слоя бетона, что способствует увеличению скорости прогрева конструкции, в том числе и канатной арматуры. В предварительно напряженных конструкциях следует предусматривать дополнительное конструктивное армирование [1, 5, 8, 9].

3. Выявлена экспериментально и подтверждена численно критическая температура канатной арматуры для железобетонных предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном. Значение критической температуры составило $230 \pm 5^\circ\text{C}$ [2, 3, 4, 5, 6, 7].

4. Проведен теплотехнический и прочностной расчет железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном с

применением МКЭ в программно-вычислительном комплексе ANSYS Workbench, учитывающий трехлинейные температурозависимые диаграммы деформирования и теплофизические свойства материалов, начальные и граничные условия нагружения и теплообмена и позволяющий определить время достижения предельных значений прогиба, прочности, деформаций при стандартном огневом воздействии [2, 3, 4, 6, 7].

5. В результате численного моделирования поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном при огневом воздействии с учетом скорректированной критической температуры, получены пределы огнестойкости свободно опертых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном для упрощенного расчета в зависимости от расстояния до оси арматуры s от обогреваемой поверхности [1, 6, 8].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные экспериментальные данные температуры канатной арматуры при стандартном огневом воздействии в изгибаемых железобетонных предварительно напряженных конструкциях без сцепления арматуры, могут быть применены для корректировки методики оценки огнестойкости по ТКП 45-2.02.-110.

2. Результаты исследований могут быть использованы в проектных организациях при расчете пределов огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном и при обосновании принятой критической температуры для канатной арматуры. Материалы диссертации внедрены в ООО «Инжиниринг систем безопасности».

3. Результаты исследований могут быть использованы в учреждениях образования. Материалы диссертации внедрены в образовательный процесс филиала «Институт переподготовки и повышения квалификации» Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь при преподавании дисциплины «Нормативно-техническая работа».

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научно-технических журналах

1. Полевада, И.И. Результаты огневого испытания железобетонных конструкций на огнестойкость с использованием стержневых волоконно-оптических датчиков деформации / И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова // Вестн. Ком.-инж. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2011. – № 2(14) – С. 4–8.
2. Ширко, А.В. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием программной среды ANSYS / А.В. Ширко, А.Н. Камлюк, И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова // Вестн. Ком.-инж. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2013. – № 2(18). – С. 260–269.
3. Ширко, А.В. Прочностной расчет железобетонных плит при пожаре с использованием программной среды ANSYS / А.В. Ширко, А.Н. Камлюк, И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова // Вестн. Ком.-инж. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2014. – № 1(19). – С. 48–58.
4. Полевада, И.И. Моделирование поведения бетона при теплотехническом нагружении с учетом трещинообразования методом конечных элементов на примере российского стандарта / И.И. Полевада, А.Н. Камлюк, А.В. Ширко, Н.В. Зайнудинова // Вестн. Кокшетаун. техн. ин-та. МЧС Респ. Казахстан. – 2014. – № 2(14). – С. 3–14.
5. Полевада, И.И. Результаты испытания на огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова, Н.И. Чайчиц // Вестн. Ком.-инж. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2016. – № 1(23). – С. 37–44.
6. Полевада, И.И. Определение предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова // Вестн. Ком.-инж. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2016. – № 2(24). – С. 32–37.
7. Полевада, И.И. Моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в программном комплексе ANSYS / И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова // Вестн. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Ч. 1. – № 4. – С. 385–391.
8. Полевада, И.И. Огнестойкость изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова // Вестн. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 161–167.
9. Зайнудинова, Н.В. Хрупкое разрушение защитного слоя изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном при огневом воздействии / Н.В. Зайнудинова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 1 (43). – С. 83-89.

Статьи в сборниках научных трудов, материалов конференций

10. Зайнудинова, Н.В. Диагностика строительных конструкций в строительстве / Н.В.Зайнудинова // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. тез. докл. V Междунар. научн.-практ. конф., Минск 25–27 мая, 2011 г. / Ч.1. – Минск, 2011. – С. 26–28.

11. Полевода, И.И. Мониторинг строительных конструкций в гражданском строительстве / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Чрезвычайные ситуации: теория и практика: сб. тез. докл. Междунар. научн.-практ. конф., Гомель, 2011 г. / Ч.1. – Гомель, 2011. – С. 66–68.

12. Зайнудинова, Н.В. Применение систем мониторинга в строительстве и при эксплуатации высотных зданий / Н.В. Зайнудинова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. VI Междунар. научн.-практ. конф., Минск 8–9 июня 2011 г. / Т. 2, редкол.: А.Ю. Лупей [и др.]. – Минск, 2011. – С. 279–280.

13. Зайнудинова, Н.В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции / Н.В. Зайнудинова // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы VI Междунар. науч. конф., Минск, 5–7 апр. 2012 г. / Командно-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь; орг. ком. И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2012. – Ч. 1. – С. 63–65.

14. Зайнудинова, Н.В. Оценка огнестойкости железобетонных плит с использованием программной среды ANSYS / Н.В. Зайнудинова, И.И. Полевода // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 3–4 апр. 2014 г. / Командно-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь; орг. ком. И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 41–42.

15. Зайнудинова, Н.В. Оценка огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / Н.В. Зайнудинова // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы X Междунар. научн.-практ. конф., Минск, 7–8 апр. 2016 г. / Ком.-инж. ин-т МЧС Респ. Беларусь; орг. ком. И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2012. – Ч. 1. – С. 63–65.

16. Zainudzinava, N. Fire resistance of prestressed concrete slabs without bond between reinforcement and concrete / Н.В. Зайнудинова // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XII Междунар. научн.-практ. конф. Молодых ученых, Минск, 4–5 апр. 2018 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Респ. Беларусь; орг. ком. И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 430–431.

РЭЗІЮМЭ

Зайнудзінава Наталля Уладзіміраўна

Вогнеўстойлівасць выгінальных жалезабетонных папярэдне напружаных пліт без счাপлення арматуры з бетоном

Ключавыя словы: вогнеўстойлівасць, мяжа вогнеўстойлівасці, стандартны тэмпературны рэжым пажару, жалезабетонныя папярэдне напружаныя пліты без счাপлення арматуры з бетоном, крохкае разбурэнне, вагавая вільготнасць.

Мэта работы – вызначэнне на аснове эксперыментальных і разліковых даследаванняў мяжы вогнеўстойлівасці жалезабетонных папярэдне напружаных пліт без счাপлення арматуры з бетоном.

Метады даследавання і апаратура. Агульная метадалогія працы прадугледжвала спалучэнне разліковых і эксперыментальных даследаванняў вогнеўстойлівасці жалезабетонных папярэдне напружаных пліт без счاپлення арматуры з бетоном. Для вызначэння межаў вогнеўстойлівасці пліт ужыты стандартны метады па ДАСТ 30247.1. Для кантролю параметраў і апрацоўкі вынікаў выкарыстоўваліся: тэрмаэлектрычныя пераўтваральнікі ТХА і ТХК класа дакладнасці 2; вымяральнікі-рэгулятары «Сасна 002», секундамер інтэграл С-01; прагінамер 6ПАО; відэакамеры; фотакамеры. Для апрацоўкі вынікаў вымярэнняў выкарыстоўвалі статыстычныя метады з выкарыстаннем персанальнага камп'ютэра.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Праведзены агнявыя выпрабаванні эксперыментальных узораў жалезабетонных пліт без счاپлення арматуры з бетоном. Атрыманы значэнні мяжы вогнеўстойлівасці і крытычнай тэмпературы ліннай арматуры. Устаноўлена, што для папярэдне напружаных жалезабетонных пліт без счاپлення арматуры з бетоном пры агнявым уздзеянні характэрна моцнае крохкае разбурэнне ў сціснутай зоне канструкцыі. Прапанаваны канструктыўныя рашэнні па змяншэнні крохкага разбурэння ахоўнага пласта канструкцыі. Усталявана крытычная тэмпература для ліннай арматуры ў канструкцыях без яе счاپлення з бетоном. Прапанаваны метады разліку вогнеўстойлівасці жалезабетонных папярэдне напружаных пліт без счاپлення арматуры з бетоном з выкарыстаннем камп'ютэрных тэхналогій.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны праектнымі арганізацыямі пры распрацоўцы архітэктурных і будаўнічых праектаў, а таксама органамі і падраздзяленнямі МНС пры праверцы праектнай дакументацыі і ажыццяўленні экспертнай дзейнасці.

Галіна выкарыстання. Праектна-канструктарскія арганізацыі, органы і падраздзяленні па надзвычайных сітуацыях, вышэйшыя навучальныя ўстановы.

РЕЗЮМЕ

Зайнудинова Наталья Владимировна

Огнестойкость изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном

Ключевые слова: огнестойкость, предел огнестойкости, стандартный температурный режим пожара, железобетонные предварительно напряженные плиты без сцепления арматуры с бетоном, хрупкое разрушение, весовая влажность.

Цель работы – определение на основании экспериментальных и расчетных исследований предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном.

Методы исследования и аппаратура. Общая методология работы предусматривала сочетание расчетных и экспериментальных исследований огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном. Для определения пределов огнестойкости плит применен стандартный метод по ГОСТ 30247.1. Для контроля параметров и обработки результатов использовались: термоэлектрические преобразователи ТХА и ТХК класса точности 2; измерители-регуляторы «Сосна 002», секундомер интеграл С-01; прогибомер 6ПАО; видеокамеры; фотокамеры. Для обработки результатов измерений применяли статистические методы с использованием персонального компьютера.

Полученные результаты и их новизна. Произведены огневые испытания экспериментальных образцов железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном. Получены значения предела огнестойкости и критической температуры канатной арматуры. Установлено, что для предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном при огневом воздействии характерно сильное хрупкое разрушение в сжатой зоне конструкции. Предложены конструктивные решения по уменьшению хрупкого разрушения защитного слоя конструкции. Установлена критическая температура для канатной арматуры в конструкциях без ее сцепления с бетоном. Предложен метод расчета огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном с использованием компьютерных технологий.

Рекомендации по использованию. Результаты исследований могут быть использованы проектными организациями при разработке архитектурных и строительных проектов, а также органами и подразделениями МЧС при проверке проектной документации и осуществлении экспертной деятельности.

Область применения. Проектно-конструкторские организации, органы и подразделения по чрезвычайным ситуациям, высшие учебные заведения.

SUMMARY

Zainudzinava Natallia

THE FIRE RESISTANCE OF PRESTRESSED CONCRETE BENT SLAB WITH UNBONDED REINFORCEMENT

Key words: fire resistance, fire resistance limits, temperature regime, prestressed concrete slab with unbonded reinforcement, brittle failure, humidity.

The aim of the dissertation: To determine the limit of fire resistance of reinforced concrete prestressed slabs with unbonded reinforcement on the basis of experimental and design studies.

The methods of analysis and equipment. The general methodology of the work included a combination of design and experimental studies of the fire resistance of prestressed concrete bent slab with unbonded reinforcement. To determine the fire resistance of slabs, the standard method is used in accordance with GOST 30247.1. Thermoelectric converters TXA and TXC of accuracy class 2, measuring instruments-regulators «Sosna 002», stopwatch integral S-01, 6PAO puncture meter, video cameras, and cameras were used to monitor the parameters and process the results. Statistical methods were used to process measurement results using a personal computer.

The results obtained and their novelty. The fire testing of experimental samples of reinforced concrete bent slabs with unbonded reinforcement was carried out. The fire resistance and critical temperature values of the cable rope are obtained. It has been established that prestressed concrete bent slabs with unbonded reinforcement are characterized by strong brittle fracture in the compressed zone of the structure under fire action. Design solutions are proposed to reduce the brittle fracture of the protective layer of the structure. The critical temperature for rope reinforcement in structures without its adhesion to concrete has been established. A method is proposed for calculating the fire resistance of reinforced concrete prestressed bent slabs with unbonded reinforcement using computer technology.

The practical importance of the research and the sphere of application. The results of the dissertation research can be used by design organizations in the development of architectural and building projects. The obtained results can also be used by the bodies and departments of the Ministry for emergency situations in the inspection of design documentation and expert activity.

The field of application. Design organizations, bodies and departments of the Ministry for emergency situations, higher education establishments.

Научное издание

Зайнудинова Наталья Владимировна

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ПЛИТ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ
АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность
(по отраслям)

Подписано в печать 28.02.2020.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,53.
Тираж 60. Заказ 009-2020.

Полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь»
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/259 от 14.10.2016.
ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск.