

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

УДК 614.841.332:693.972(043.3)

**БОТЯН**  
Сергей Сергеевич

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕГОРОДОК  
НА СТАЛЬНОМ КАРКАСЕ С ОБЛИЦОВКОЙ ИЗ ЦЕМЕНТНЫХ  
ПЛИТ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОСЕТКОЙ**

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

по специальности 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность  
(горение, тепломассоперенос)

Минск, 2021

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

Научный руководитель: **Кудряшов Вадим Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент, начальник  
отдела научной и инновационной деятельности  
государственного учреждения образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь».

Официальные оппоненты: **Батяновский Эдуард Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Строительные  
материалы и технология строительства»  
Белорусского национального технического  
университета.

**Дударев Владимир Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры энергосбережения, гидравлики  
и теплотехники учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический  
университет».

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение «Институт  
тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова  
Национальной академии наук Беларуси».

Защита состоится 18 июня 2021 г. в 13<sup>30</sup> 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) 340-24-50,  
e-mail: K11.01.01@ucrp.by.

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

Автореферат разослан 14 мая 2021 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент

А.В. Грачулин

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие пожара в здании характеризуется быстрым распространением пламени и продуктов сгорания в объеме помещений. Если не ограничить этот процесс, эвакуация людей и аварийно-спасательные мероприятия будут затруднены, что может привести к увеличению ущерба в результате пожара. Для ограничения распространения пожара в пределах этажа используют стены и перегородки с нормируемым пределом огнестойкости. Такие конструкции способны сохранять ограждающую способность в условиях пожара в течение времени, необходимого для эвакуации людей и проведения аварийно-спасательных мероприятий.

Ненесущие каркасные перегородки (далее – перегородки) являются одними из наиболее эффективных конструкций, позволяющих предотвратить распространение пожара и его опасных факторов при наименьших затратах. Указанные конструкции в сравнении с перегородками, выполненными из каменных материалов, имеют ряд преимуществ по технологичности монтажа, массе, тепло- и звукоизоляции.

Предел огнестойкости конструкций определяют путем проведения огневых испытаний либо расчетными методами. Общемировая тенденция в развитии теории огнестойкости свидетельствует о том, что разработка новых расчетных и инженерных методов позволит расширить применение конструкций в строительстве.

Широкое распространение среди облицовочных плитных материалов перегородок получили цементные плиты, армированные стеклосеткой (далее – цементные плиты), как альтернатива гипсовым плитам. Они имеют такие преимущества, как повышенная гибкость, влагостойкость, прочность, стойкость к агрессивным и атмосферным средам, негорючесть. Однако для перегородок с облицовкой из цементных плит отсутствуют экспериментальные данные как по огнестойкости, так и по эффективным теплофизическим характеристикам (далее – ТФХ) при повышенных температурах, а существующие расчетные способы оценки огнестойкости применимы только для перегородок на деревянном каркасе с облицовкой из гипсовых и древесных плит. Для решения поставленной проблемы необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований и численного моделирования в среде конечно-элементного анализа огнестойкости перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит.

Настоящая работа посвящена оценке огнестойкости и определению вариантов конструктивного исполнения строительных перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин) на основе экспериментальных исследований в огневой и камерной электропечи, а также результатов численного моделирования.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Исследования, составившие основу диссертационной работы, выполнялись в рамках следующих научно-исследовательских работ:

– «Оценка изменений физико-механических свойств современных строительных материалов в условиях пожара с использованием методов компьютерного моделирования» в рамках совместного гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий № Ф18В-006 (№ госрегистрации 20180294);

– «Огнестойкость узлов сопряжений монолитных железобетонных плит перекрытия с балконными плитами с использованием изделий закладных комплексных типа «Консоль-термо» по заказу ПТУП «МОНТАЖСТРОЙКОМПЛЕКТ-ПРОФИЛЬ» (№ госрегистрации 20170032);

– «Огнестойкость конструкций покрытия на основе профилированных листов с трапециевидными гофрами и стоек крепления сэндвич-панелей в деформированной стадии для железобетонного каркаса многоэтажного здания с шагом колонн 9,0...12,0 м и высотой этажа до 5,0 м» по заказу ООО «Тринити Инвест» (№ госрегистрации 20171760);

– «Огнестойкость и класс пожарной опасности конструкций бесчердачных покрытий на основе профилированных листов (с шагом прогонов 3 м) с применением горючих и (или) негорючих утеплителей, горючих кровельных покрытий и пароизоляции, производимых под торговым знаком ТехноНИКОЛЬ» по заказу ИООО «Кровельный завод ТехноНИКОЛЬ» (№ госрегистрации 20180515).

**Цель исследования** – определить варианты конструктивного исполнения строительных перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин) (позволяющие обеспечить ограничение распространения пожара в зданиях) на основе огневых экспериментальных исследований и численного моделирования с учетом ТФХ материалов, полученных экспериментально-расчетным методом с использованием камерной электропечи.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработать методику и провести экспериментальные исследования образцов цементных и минераловатных плит в условиях стационарного и нестационарного теплового режима в камерной электропечи в диапазоне стандартной температурно-временной зависимости развития пожара (далее – стандартный режим пожара), получить зависимости их нагрева и плотности от температуры в печи.

2. Определить ТФХ материалов в диапазоне температур стандартного режима пожара путем численного конечно-элементного моделирования на основе экспериментальных данных, полученных в камерной электропечи.

3. Разработать методику измерений температуры и перемещений экспериментальной конструкции перегородки на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит, а также провести испытания при стандартном огневом режиме пожара, получить зависимости нагрева и перемещений от времени, определить огнестойкость экспериментальной конструкции.

4. Разработать расчетную модель нагрева экспериментальной конструкции перегородки, провести численное моделирование в среде конечно-элементного анализа с учетом полученных ТФХ цементных и минераловатных плит, выполнить сравнительный анализ результатов моделирования с результатами огневых испытаний.

5. Провести численное моделирование конструкций перегородок толщиной 75...125 мм с фиксированной толщиной облицовки из цементных плит 12,5 мм и высотой поперечного сечения стоечного профиля 50...100 мм, толщиной внутреннего заполнителя из минераловатных плит 30...70 мм и плотностью 37...160 кг/м<sup>3</sup>, получить массив данных их нагрева и огнестойкости. Определить варианты конструктивного исполнения строительных перегородок, а также инженерную методику оценки огнестойкости перегородок с учетом переменных параметров расчетной модели.

**Объект исследования** – строительные ненесущие перегородки на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит, армированных стеклосеткой.

**Предмет исследования** – огнестойкость строительных перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит, а также ТФХ составляющих материалов в диапазоне стандартного режима пожара.

#### **Научная новизна:**

Получены новые экспериментальные данные по изменению температуры на обогреваемой и необогреваемой сторонах и плотности цементных и минераловатных плит при стационарном и нестационарном тепловом воздействии до 1150 °С. На основании полученных экспериментальных данных в расчетной конечно-элементной модели определены зависимости ТФХ материалов от температуры при стандартном режиме пожара.

В ходе проведения огневых испытаний экспериментальной конструкции перегородки на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит при стандартном режиме пожара, получены новые зависимости нагрева и перемещений конструкций от времени в контрольных точках. На основании результатов численного моделирования нагрева перегородки методом конечных элементов, с учетом результатов огневых испытаний и ТФХ материалов, полученных экспериментально-расчетным методом с использованием камерной электропечи,

определены варианты конструктивного исполнения строительных перегородок с огнестойкостью в практически значимом диапазоне EI30...EI90 (мин) и разработана инженерная методика оценки огнестойкости конструкций перегородок, учитывающая суммарный вклад высоты профиля, а также толщины и плотности минераловатного заполнителя.

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

1. Экспериментально-расчетный метод оценки изменения эффективного коэффициента теплопроводности в стационарных условиях нагрева, эффективной удельной теплоемкости в нестационарных условиях нагрева с использованием экспериментальных данных, полученных в камерной электропечи, и применения численного моделирования в системе конечно-элементного анализа, – позволяет в отличие от существующих методов получить нелинейные зависимости ТФХ от температуры для плитных строительных материалов толщиной 10...40 мм в диапазоне температур стандартного режима пожара; а также полученные с использованием указанного метода оригинальные зависимости ТФХ от температуры цементных плит (плотностью 1100 кг/м<sup>3</sup>) и минераловатных плит (плотностью 37 кг/м<sup>3</sup> и 160 кг/м<sup>3</sup>), – учитывают процессы тепловой деструкции материалов и согласуются с экспериментальными данными.

2. Огнестойкость EI 60 (мин) и новые зависимости нагрева и перемещений строительной перегородки от времени, полученные в результате огневых экспериментальных исследований конструкции перегородки толщиной 100 мм, включающей: стальной тонкостенный каркас (75 мм), облицовку цементными плитами (12,5 мм) с двух сторон, внутреннее заполнение из минераловатных плит (50 мм) плотностью 37 кг/м<sup>3</sup>, – позволяют разработать расчетную модель конструкции и верифицировать полученные зависимости ТФХ от температуры цементных и минераловатных плит.

3. Расчетная модель и результаты численного моделирования в системе конечно-элементного анализа нагрева массива конструкций перегородок толщиной 75...125 мм с фиксированной толщиной облицовки из цементных плит 12,5 мм, высотой поперечного сечения стоечного профиля 50...100 мм, толщиной внутреннего заполнителя из минераловатных плит 30...70 мм и плотностью 37...160 кг/м<sup>3</sup>, установленные с использованием полученных зависимостей ТФХ от температуры цементных и минераловатных плит, – позволяют определить варианты конструктивного исполнения перегородок с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин), а также разработать инженерную методику оценки огнестойкости указанных перегородок с учетом переменных параметров расчетной модели.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты и положения, выносимые на защиту, приведенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Цель и задачи исследования сформулированы совместно с научным руководителем канд. техн. наук, доцентом В.А. Кудряшовым.

Соискателем лично проведены экспериментальные исследования в камерной и огневой печах, проведена статистическая обработка и анализ результатов экспериментальных исследований, определены ТФХ строительных материалов, разработана расчетная модель нагрева перегородки для оценки огнестойкости и инженерная методика оценки огнестойкости перегородок с облицовкой из цементных плит на стальном каркасе. Совместно с работниками ИООО «Кнауф Маркетинг» возведены и испытаны фрагменты конструкций перегородок с облицовкой из цементных плит на стальном каркасе. На базе лаборатории теплофизических измерений Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси проведен комплекс термических исследований цементных плит для решения задач нестационарного высокотемпературного нагрева (исследования проводили С.М. Данилова-Третьяк, Л.Е. Евсеева, А.А. Хорт, К.В. Николаева). Соискатель выражает благодарность за консультационную помощь – С.М. Жамойдику, А.С. Платонову, С.М. Пастухову, В.А. Осяеву, А.С. Дробышу, Т.К. Нгуену.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.**

Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: XI-XIV Междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (г. Минск, 18-19 мая 2017 г.), (4-5 апреля 2018 г.), (2-3 апреля 2019 г.), (8-9 апреля 2020 г.); Республиканской науч.-практ. конф. «Обеспечение пожарной безопасности в строительстве» (г. Минск, 25 января 2018 г.); Междунар. науч.-практ. конф. «Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019-2030 годы» (г. Минск, 27 сентября 2018 г.); VII, VIII Междунар. науч. семинар в режиме видеоконференцсвязи «Пожарная безопасность объектов хозяйствования» (г. Минск, 30 мая 2018 г.), (г. Минск, 17 мая 2019 г.).

За разработку метода оценки ТФХ современных строительных материалов при повышенных температурах, а также разработку с его использованием экономичных конструкций энергоэффективных термоконсольных балконных плит и несущих каркасно-обшивных перегородок, обладающих повышенной огнестойкостью, соискателю назначена стипендия Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым на 2021 год (распоряжение Президента Республики Беларусь от 24.12.2020 № 253рп).

Материалы диссертации использованы в производство организаций (акты внедрения в ПТУП «МОНТАЖСТРОЙКОМПЛЕКТ – ПРОФИЛЬ», ИООО «Кнауф Маркетинг»), а также в практическую деятельность проектных организаций (акты внедрения в ОАО «Белгорхимпром», ООО «Симатек Энерго», УП «Белпромпроект», ООО «ИнжСпецСтройПроект»).

**Опубликование результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах, в том числе: 5 статей, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 5,46 авторских листа (из них без соавторов – 1 статья), 2 статьи и 10 тезисов докладов в сборниках трудов и материалах международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка литературы из 112 наименований, 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 135 страниц, включая 37 рисунков и 13 таблиц на 27 страницах.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** посвящена особенностям устройства строительных перегородок, назначению, а также их поведению в условиях пожара. Рассмотрены существующие экспериментальные и расчетные способы оценки огнестойкости строительных перегородок. Выполнен анализ основных методов определения ТФХ строительных материалов. Сформулированы цель и задачи диссертационных исследований.

В Республике Беларусь и за рубежом решением проблемы обеспечения огнестойкости несущих перегородок занимались такие исследователи как: Е.В. Круглов, Е.В. Качкар, В.А. Кудряшов, В.Ю. Шимко, V. Schleifer, A. Just, O. Azree и др.

В настоящее время каркасно-обшивные перегородки широко применяются для деления пространства этажа на помещения. Указанные перегородки представляют собой многослойную сочлененную конструкцию, включающую помимо каркаса облицовку с двух сторон обшивными листами и внутренний наполнитель. В зависимости от эксплуатационных требований они могут иметь широкий спектр конструктивного исполнения, а именно: каркас (деревянный или металлический) с переменным сечением, различное количество обшивных слоев перегородки, толщина и характеристики облицовочных материалов и внутреннего наполнителя.

Для экспериментальной оценки огнестойкости перегородок проводят испытания фрагмента размером 3×3 м в вертикальной огневой печи в соответствии с методикой ГОСТ 30247.1. Для определения величины предела огнестойкости перегородок в ходе проведения испытаний регистрируют температуру на необогреваемой поверхности, а также факты образования сквозных трещин и отверстий. В отличие от перегородок с облицовкой из гипсовых плит, огнестойкость перегородок выполненных с применением плит на цементном вяжущем, экспериментально изучена достаточно слабо.

Существующие расчетные методы оценки огнестойкости перегородок, указанные, например, в ТКП EN 1995-1-2, применимы для перегородок на деревянном каркасе с облицовкой из гипсовых и древесных плит. Данный метод основан на суммарном вкладе в огнестойкость составных компонентов перегородки в зависимости от их толщины и плотности. Значительные отличия в свойствах облицовочных гипсовых и цементных плит, а также в поведении деревянного и стального каркаса при воздействии высоких температур не позволяют в полной мере использовать существующие расчетные методы для оценки огнестойкости перегородок на стальном каркасе с применением цементных плит.

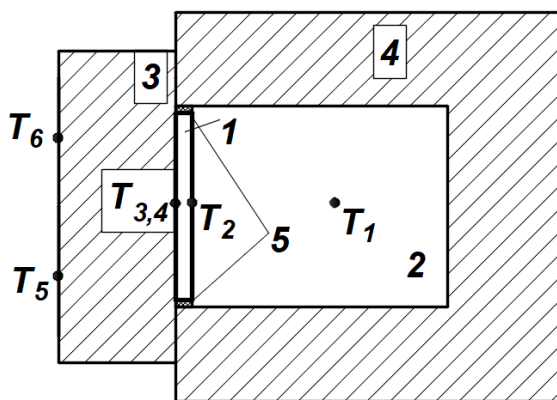
Обзор литературных источников и технических нормативных правовых актов показал, что существующие экспериментальные и теоретические данные не позволяют оценить огнестойкость строительных перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит. Для оценки огнестойкости рассматриваемых конструкций перегородок и определения вариантов конструктивного исполнения с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин) необходимо проведение комплекса огневых и модельных испытаний, определение ТФХ материалов и численного моделирования в среде конечно-элементного анализа.

**Во второй главе** изложен экспериментально-расчетный метод оценки ТФХ строительных материалов в условиях высокотемпературного воздействия. Суть метода заключается в определении эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной удельной теплоемкости отдельных материалов перегородки путем численного моделирования, основанного на результатах экспериментальных данных в камерной электропечи.

Исследования выполняли в камерной электропечи марки ЭКПС-10/1300 на плоских образцах размерами 150×100 мм, прикрепленных к дверце электропечи посредством стальной шпильки с пластиной. Экспериментальные исследования проводили в два этапа:

1. В стационарном тепловом режиме при температурах 275, 550, 770 и 1150 °С – для исследования плотности и эффективного коэффициента теплопроводности материала;
2. В нестационарном тепловом режиме при температурах от 20 до 1000 °С – для исследования эффективной удельной теплоемкости материала.

В ходе выполнения экспериментальных исследований регистрировали температуру на обогреваемой и необогреваемой поверхностях исследуемого образца, внутри печи, а также на наружной стороне теплоизоляции дверцы печи в соответствии с измерительной схемой, представленной на рисунке 1.



1 – исследуемый образец; 2 – рабочая камера электропечи; 3 – теплоизоляция дверцы печи; 4 – теплоизоляция рабочей камеры электропечи; 5 – уплотнение из огнеупорного материала

**Рисунок 1. – Схема расположения термоэлектрических преобразователей в электропечи**

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований по нагреву исследуемых образцов в условиях стационарного теплового режима.

Таблица 1. – Результаты экспериментальных исследований по нагреву образцов в условиях стационарного теплового режима

Температура в печи в условиях стационарного теплового режима, °C	Температура на необогреваемой поверхности образца, °C			
	цементная плита плотностью 1100 кг/м <sup>3</sup> и толщиной 12,5 мм	минераловатная плита плотностью 160 кг/м <sup>3</sup> и толщиной 25 мм	минераловатная плита плотностью 37 кг/м <sup>3</sup> и толщиной 25 мм	теплоизоляция дверцы печи из муллитокремнеземистого огнеупорного рулонного волокна толщиной 135 мм
275 ± 7	234 ± 13	212 ± 11	219 ± 13	30 ± 5
550 ± 6	503 ± 19	468 ± 13	481 ± 13	38 ± 5
770 ± 8	699 ± 20	682 ± 15	701 ± 14	47 ± 5
1150 ± 11	1105 ± 21	1150 ± 20	1150 ± 15	102 ± 5

Примечание – Указан доверительный интервал в °C для прямых измерений температуры.

Результаты исследований при нестационарных условиях теплообмена представлены на рисунке 2.

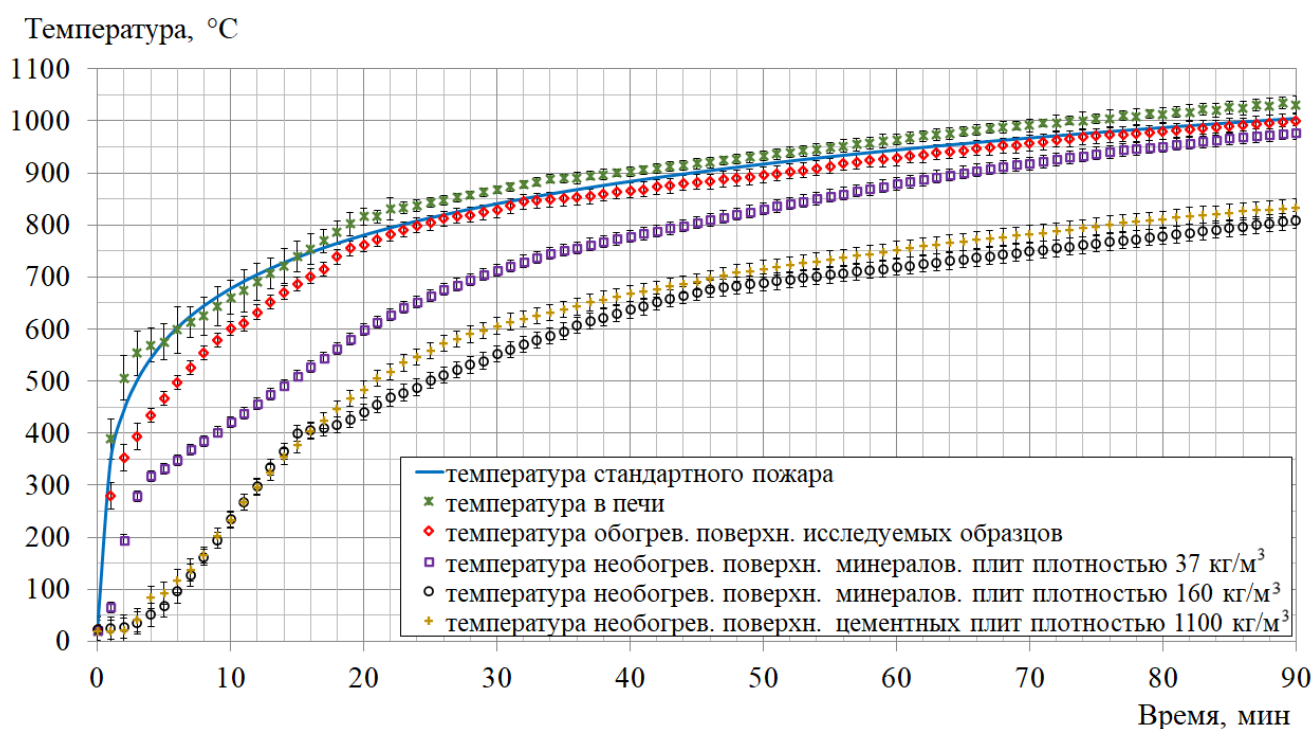


Рисунок 2. – Зависимости температуры от времени в нестационарных условиях нагрева

Для зависимостей температуры от времени на необогреваемой поверхности образцов (рисунок 2) характерны области изменений скорости роста температуры (вблизи 100 °C для образцов цементных плит; 300 и 400 °C для минераловатных плит плотностью 37 и 160 кг/м<sup>3</sup> соответственно), которые объясняются процессами физико-химических превращений (для цементных плит – испарение структурно-

связанной воды, для минераловатных плит – выгорание органических связующих) в этой области температур.

Для определения зависимостей ТФХ от температуры путем численного моделирования, разработаны расчетные модели в системе конечно-элементного анализа ANSYS/Thermal, назначены краевые условия. На рисунке 3 представлены полученные зависимости ТФХ от температуры образца цементной плиты плотностью  $1100 \text{ кг/м}^3$ . Зависимости ТФХ от температуры для минераловатных плит плотностью  $37 \text{ кг/м}^3$  и  $160 \text{ кг/м}^3$  приведены в тексте диссертации.

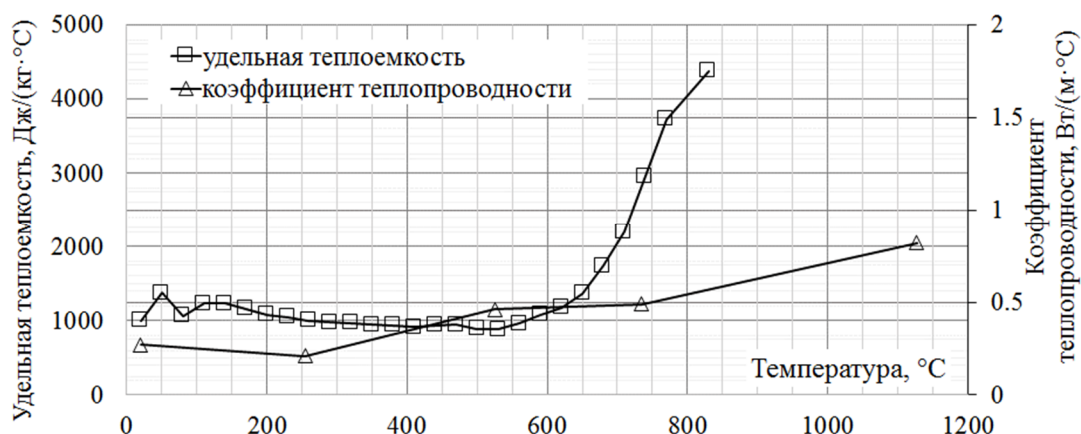


Рисунок 3. – Зависимости ТФХ от температуры образца цементной плиты

Как следует из графика (рисунок 3), изменение коэффициента теплопроводности при повышении температуры для образца цементной плиты характеризуется участком падения до  $250^\circ\text{C}$  с последующим линейным ростом значения. Зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется скачкообразным изменением до  $100^\circ\text{C}$ , линейным снижением до  $550^\circ\text{C}$  и ростом при более высоких температурах, что связано с физико-химическими превращениями в материале. Термические эффекты также зафиксированы в ходе дифференциально-термического анализа материала (рисунок 4).

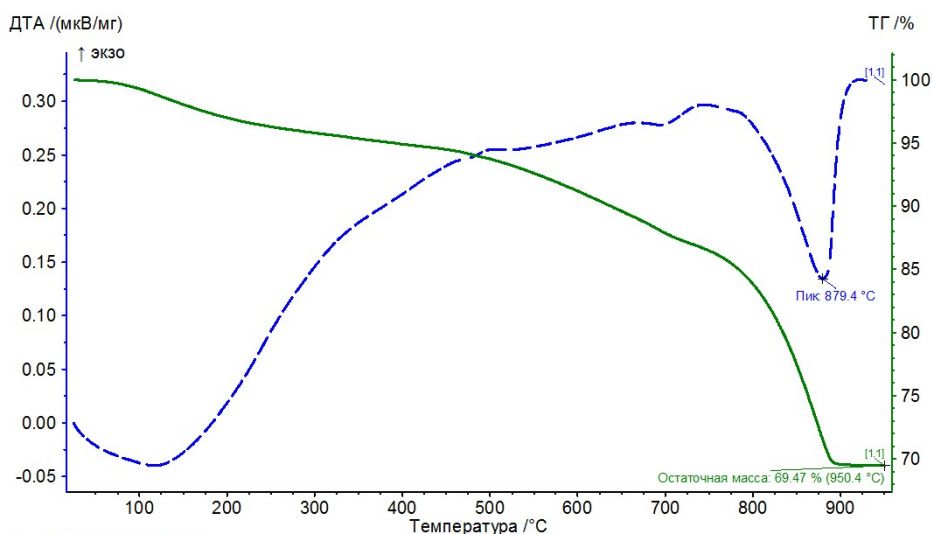


Рисунок 4. – Термогравиметрический (сплошная кривая) и дифференциально-термический анализ (штриховая кривая) образца цементной плиты

Дифференциально-термический анализ свидетельствует о наличии эндотермических эффектов с пиками при температурах 125 и 880 °С. Первый эффект связан с испарением структурно-связанной воды, удерживаемой за счет капиллярных сил. Второй эффект, вероятнее всего, связан с декарбонизацией известняка ( $\text{CaCO}_3$ ), занимающим свыше 40 % состава исследуемого образца, на  $\text{CaO}$  (оксид кальция) и  $\text{CO}_2$ .

Результаты численного моделирования с использованием полученных ТФХ материалов показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными в камерной печи с отклонением не более 3 %.

**В третьей главе** представлены результаты огневых испытаний экспериментальной конструкции перегородки.

Для исследований разработаны и возведены экспериментальные конструкции перегородки размером 3000×3000×100 мм на стальном каркасе из стоечного профиля 75×50×0,6 мм (рисунок 5а), заполнением минераловатными плитами толщиной 50 мм и плотностью 37 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 5б) с облицовкой цементными плитами толщиной 12,5 мм с каждой стороны (рисунок 5в).



а – вид стального каркаса перегородки



б – заполнение полости минераловатными плитами

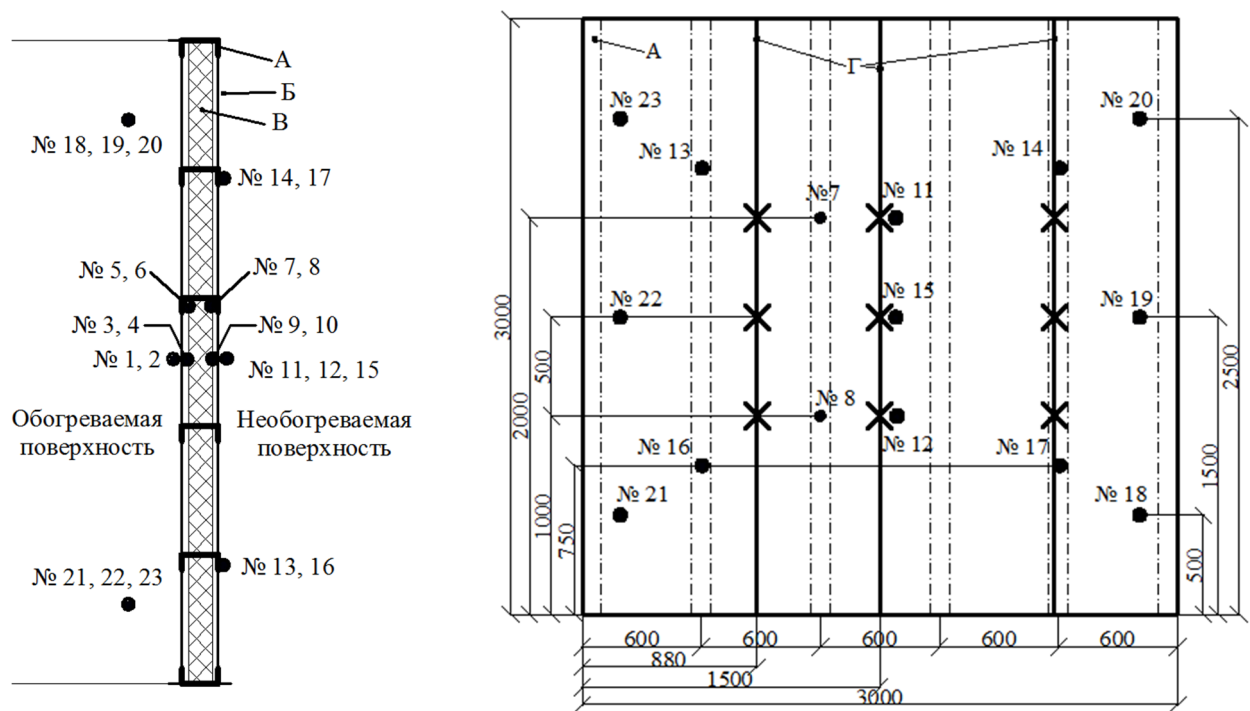


в – фрагмент перегородки с обработкой стыков

**Рисунок 5. – Внешний вид фрагмента экспериментальной конструкции перегородки**

Схема расстановки термоэлектрических преобразователей и точек измерения перемещений перегородки при проведении испытаний представлены на рисунке 6.

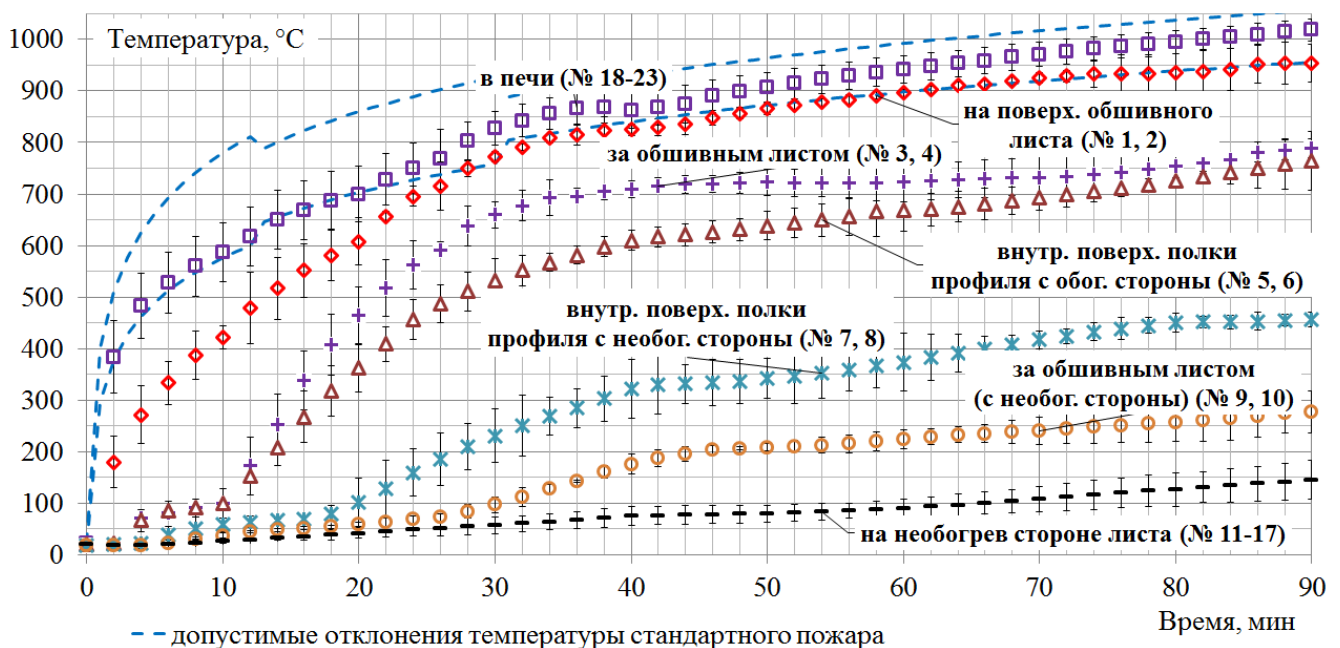




а) продольный разрез перегородки  
 б) схема перегородки  
 (А – стоечный профиль; В – обшивные цементные плиты; В – минераловатные плиты; Г – пластины для измерения перемещений перегородки; • – точка установки термоэлектрических преобразователей; × – точка измерения перемещений перегородки)

**Рисунок 6. – Схема размещения термоэлектрических преобразователей и точек измерения перемещений перегородки**

На рисунке 7 представлены данные измерения температур в контрольных точках при проведении огневых экспериментальных исследований конструкций перегородок в соответствии с разработанной схемой (рисунок 6).



**Рисунок 7. – Зависимости средней температуры от времени в контрольных точках при проведении экспериментальных исследований**

Из рисунка 7 видно, что изменение температуры за обшивным листом (со стороны обогреваемой поверхности) характеризуется замедленным ростом в интервалах температур от 80 до 120 °С на 5 мин испытаний и в интервале более 710 °С на 30 мин. Указанные эффекты отмечены в ходе дифференциально-термического анализа образцов и связаны с физико-химическими превращениями в материале (рисунок 4). Заметная разница нагрева противоположных граней (полок) стоечного профиля объясняется заполнением внутренних пустот минераловатными плитами.

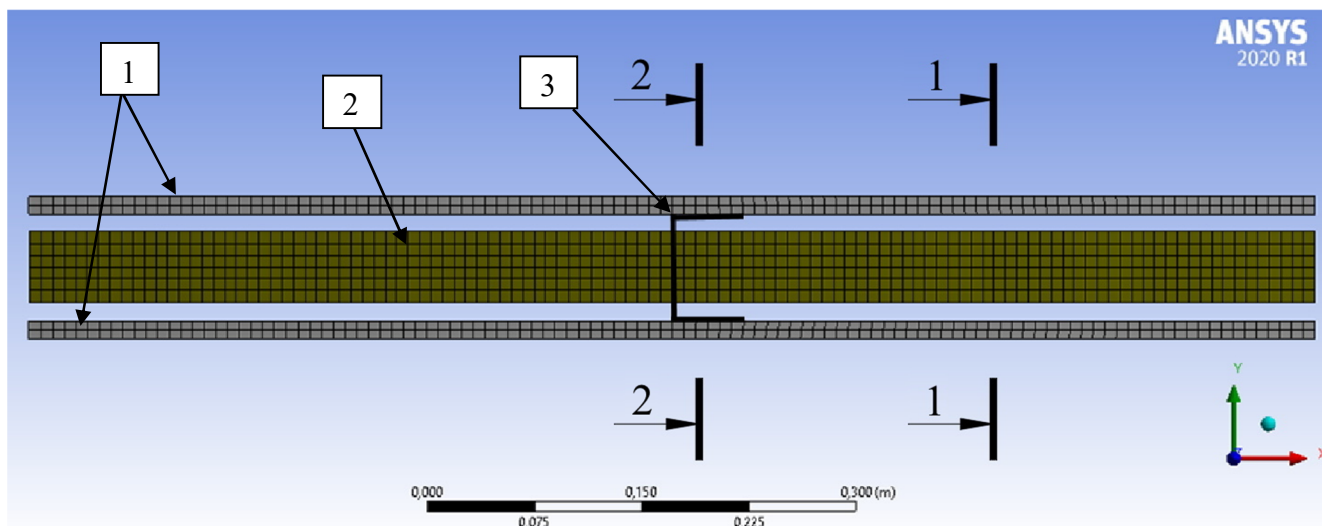
В процессе исследований установлено, что температура на обогреваемой поверхности перегородки по высоте (на отметках 1 м и 2 м) распределяется неодинаково и на 20-й мин разность температур составляет 260 °С, на 40-й – 140 °С, на 60-й – 120 °С, на 90-й – 60 °С. Данный факт обусловлен тем, что в начале испытаний преобладающее количество теплоты передается за счет конвективного теплообмена, при этом теплоноситель распределяется неравномерно по высоте испытательной печи. Изменение теплового поля по высоте обогреваемой поверхности конструкции способствует неравномерному нагреву конструкции по высоте, при этом разность температур с необогреваемой стороны между верхней и нижней частью перегородки составила до 123 °С к окончанию испытаний.

Установлена разница нагрева перегородки в месте установки стального профиля и стыкового соединения обшивных листов и в глухой части перегородки. Разность температуры на необогреваемой стороне в области стального профиля на 90 мин испытаний составила в среднем 50 °С по сравнению с глухой частью перегородки, что обусловлено высокой температуропроводностью стального стоечного профиля, а также образованием трещин в месте заполнения стыков.

Предел огнестойкости первого образца составил 76 мин по критерию достижения максимальной температуры в локальной точке 200 °С, второго образца – 81 мин, по критерию достижения максимальной средней температуры 160 °С – что соответствует огнестойкости EI 60 (мин), приведенной к стандартному ряду.

**Четвертая глава.** Для определения вариантов конструктивного исполнения строительных перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин) на основании огневых экспериментальных исследований конструкций, разработана расчетная модель нагрева перегородки и выполнено численное моделирование с учетом ТФХ материалов, полученных экспериментально-расчетным методом в камерной электропечи с последующим сравнением расчетных и экспериментальных данных. Разработана инженерная методика оценки огнестойкости рассматриваемых перегородок, учитывающая суммарный вклад высоты профиля, а также толщины и плотности минераловатного заполнителя.

Элементы расчетной конечно-элементной модели включают в себя обшивные листы, внутренний заполнитель и стальной профиль (рисунок 8).



1 – обшивной лист; 2 – внутренний наполнитель; 3 – стоечный профиль

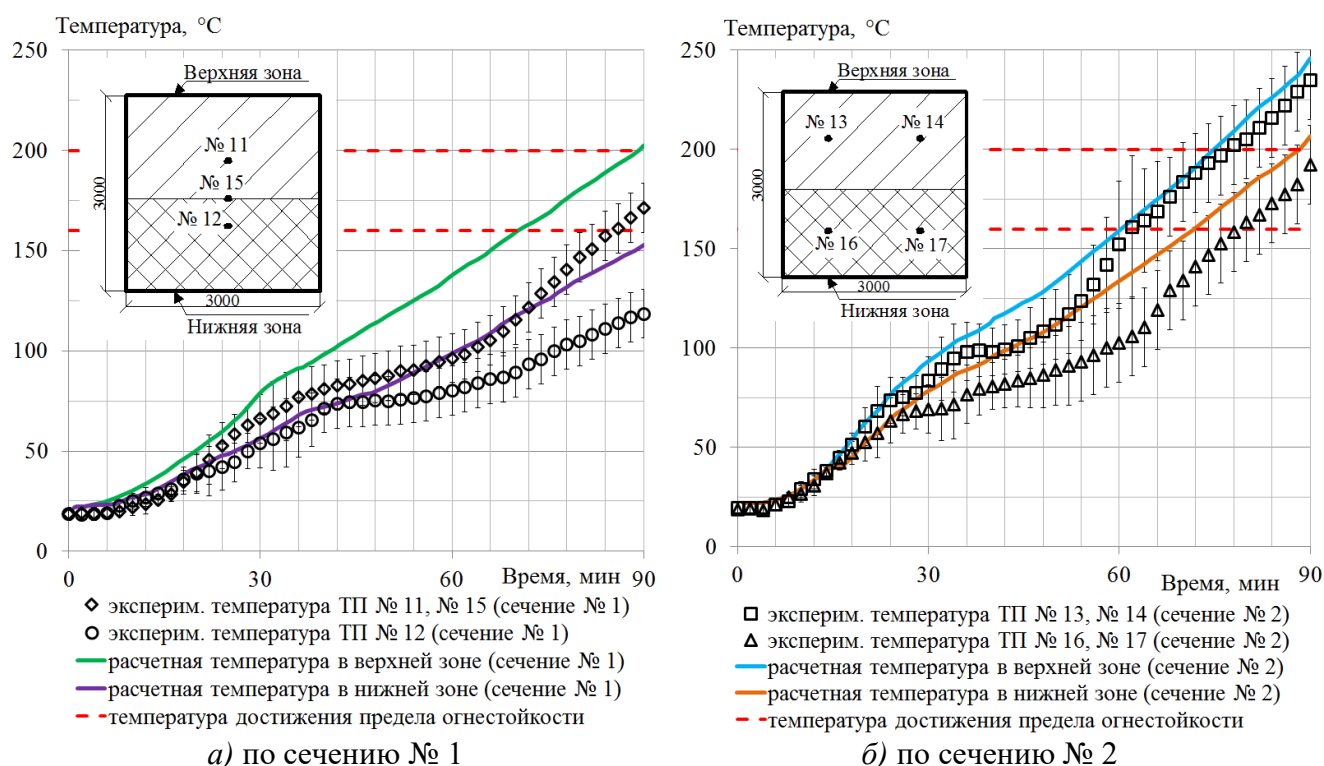
**Рисунок 8. – Общий вид расчётной конечно-элементной модели перегородки**

На обогреваемой и необогреваемой поверхностях перегородки приняты граничные условия 3-го рода в виде конвективного и лучистого теплообмена. Внутри перегородки граничные условия назначались по двум сечениям, при этом теплообмен за счет излучения по сечению № 1 (рисунок 8) определялся между поверхностями обшивных листов и внутренним наполнителем. По сечению № 2 (рисунок 8) поверхность обшивного листа имела контактное соединение с полкой стоечного профиля, а излучение учитывалось между профилем и внутренним наполнителем.

Поскольку в ходе экспериментальных исследований установлена неравномерность нагрева перегородки по высоте печи и сечениям, численное моделирование перегородки и последующее сравнение осуществляли по сечениям № 1 и № 2 в верхней и нижней половинах перегородки. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных нагрева необогреваемой поверхности перегородки представлены на графиках (рисунок 9).

Как видно из графиков (рисунок 9), расчетные температуры по двум сечениям показывают безопасный нагрев при оценке достижения предельного состояния огнестойкости по теплоизолирующей способности с учетом значений средней температуры по сечениям, так и в локальных точках перегородки. Отклонение нагрева необогреваемой стороны перегородки составляет: по сечению № 1 – в среднем 18 % (в верхней половине) и 13 % (в нижней половине); по сечению № 2 – в среднем 6 % (в верхней половине) и 9 % (в нижней половине).





**Рисунок 9. – Сравнение экспериментальной и расчётной температуры на необогреваемой поверхности конструкции**

Для определения вариантов конструктивного исполнения строительных перегородок с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин) выполнено численное моделирование конструкций с различной высотой поперечного сечения стоечного профиля (50, 75, 100 мм), наличием/отсутствием внутреннего заполнителя толщиной (30, 50, 70 мм) и плотностью (37 и 160 кг/м<sup>3</sup>), с использованием ТФХ материалов, полученных экспериментально-расчетным методом в камерной электропечи. Результаты представлены в таблице 2.

**Таблица 2. – Варианты конструктивного исполнения строительных перегородок с пределом огнестойкости по результатам численного моделирования**

Конструктивное исполнение перегородки		Фактический показатель по пределу огнестойкости, мин			Предел огнестойкости по стандартному ряду, мин*
параметры стоечного профиля, мм	наличие и плотность заполнителя, кг/м³	толщина заполнителя, мм			
		30	50	70	
1	2	3	4	5	6
50×50×0,6	без заполнителя	32,1			EI 30
	37	49,6	—	—	EI 45
	160	58,4	—	—	EI 45
75×50×0,6	без заполнителя	33,4			EI 30
	37	56,8	61,7	66,2	30 мм – EI 45 50, 70 мм – EI 60
	160	68,7	83,8	99,6	30, 50 мм – EI 60 70 мм – EI 90

Продолжение 2

1	2	3	4	5	6
100×50×0,6	без заполнителя	34,2			EI 30
	37	58,6	63,9	69,1	30 мм – EI 45 50, 70 мм – EI 60
	160	71,6	88,2	106,3	30, 50 мм – EI 60 70 мм – EI 90

\* – Предел огнестойкости по потере целостности считается обеспеченным, если обеспечивается предел огнестойкости по потере теплоизолирующей способности.

Обработка полученных расчетных данных (таблица 2) с последующим преобразованием с учетом требуемой точности и удобства применения позволила получить следующую зависимость для оценки огнестойкости перегородок с облицовкой из цементных плит на стальном каркасе:

$$\tau_{\text{по}} = 30k_{\text{пр}} + \delta \cdot k_3(\rho, \delta), \quad (1)$$

где 30 – постоянный числовой коэффициент, мин;  $k_{\text{пр}}$  – коэффициент влияния параметров профиля (определяется по таблице 3);  $\delta$  – толщина внутреннего заполнителя, мм;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий плотность  $\rho$  (кг/м³) и толщину  $\delta$  (мм) заполнителя (определяется по таблице 4), мин/мм.

Таблица 3. – Коэффициент влияния параметров профиля

Значение $k_{\text{пр}}$	Параметры стоечного профиля, мм		
	50×50×0,6	75×50×0,6	100×50×0,6
$k_{\text{пр}}$	1,07	1,11	1,14

Таблица 4. – Коэффициент, учитывающий плотность и толщину заполнителя

Параметры стоечного профиля, мм	Толщина заполнителя, мм	Значение $k_3(\rho, \delta)$ , мин/мм	
		плотность 37 кг/м³	плотность 160 кг/м³
50×50×0,6	30	0,54	0,87
75×50×0,6	30	0,78	1,18
	50	0,56	1,01
	70	0,47	0,94
100×50×0,6	30	0,81	1,24
	50	0,59	1,08
	70	0,49	1,03

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации:

1. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования образцов цементных плит (плотностью  $1100 \text{ кг/м}^3$ ), минераловатных плит (плотностью  $37 \text{ кг/м}^3$  и  $160 \text{ кг/м}^3$ ) в условиях стационарного и нестационарного теплового режима с использованием камерной электропечи. Перепад температур по толщине образцов цементных плит составил: 41, 47, 71 и  $45^\circ\text{C}$  соответственно для 275, 550, 770 и  $1150^\circ\text{C}$  в камерной электропечи в условиях стационарного теплового режима;  $375\dots 165^\circ\text{C}$  – для 5-ой и 90 мин соответственно в условиях нестационарного теплового режима. Аналогичным путем были получены зависимости температуры для образцов минераловатных плит [1, 4, 6, 7].

2. Разработана численная конечно-элементная модель нагрева образцов материалов в камерной электропечи и на основе полученного перепада температур при стационарном тепловом режиме определены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности от температуры образцов, а на основе полученного перепада температур при нестационарном тепловом режиме – зависимости эффективной удельной теплоемкости от температуры образцов цементных и минераловатных плит. Значения эффективного коэффициента теплопроводности для образцов цементных плит составили 0,21, 0,46, 0,49 и  $0,82 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  соответственно для средней температуры образцов 255, 525, 735 и  $1127^\circ\text{C}$ , а значения эффективной удельной теплоемкости – нелинейная зависимость в диапазоне  $1000\dots 4374 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$  для температуры от 20 до  $830^\circ\text{C}$  в условиях нестационарного теплового режима. Аналогичным путем были получены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной удельной теплоемкости для минераловатных плит [2, 4, 9 – 11, 13, 15 – 17].

3. Разработана методика измерений температуры и перемещений, проведены испытания экспериментальной конструкции перегородки на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит и заполнением минераловатными плитами при стандартном огневом воздействии пожара. Получены новые экспериментальные зависимости распределения температуры и перемещений от времени в сечениях перегородки. Установлена более высокая температура нагрева необогреваемой стороны перегородки в области стального профиля и стыкового соединения обшивных листов (сечение № 2), по сравнению с сечениями в глухой части перегородки (сечение № 1), – разность температуры на 90 мин испытаний составила в среднем  $50^\circ\text{C}$ . Предел огнестойкости по критериям достижения максимальной температуры на необогреваемой стороне составил: для первого образца – EI 76 (мин) (в локальной точке  $200^\circ\text{C}$ ); для второго образца – EI 81 (мин) (в среднем по поверхности  $160^\circ\text{C}$ ), – что соответствует огнестойкости EI 60 (мин), приведенной к стандартному ряду [3, 8, 12, 14].

4. Разработана расчетная модель нагрева экспериментальной конструкции перегородки и проведено численное моделирование в среде конечно-элементного анализа с учетом полученных ТФХ цементных и минераловатных плит. Сравнительный анализ результатов моделирования с результатами огневых испытаний перегородки показал отклонение нагрева необогреваемой стороны: в сечении № 1 – в среднем на 18 % (в верхней половине) и на 13 % (в нижней половине); в сечении № 2 – в среднем на 6 % (в верхней половине) и на 9 % (в нижней половине) [5].

5. По результатам численного моделирования массива конструкций перегородок толщиной 75...125 мм с фиксированной толщиной облицовки из цементных плит 12,5 мм и высотой поперечного сечения стоечного профиля 50...100 мм, толщиной внутреннего заполнителя из минераловатных плит 30...70 мм и плотностью 37...160 кг/м<sup>3</sup> определены варианты конструктивного исполнения перегородок с огнестойкостью: EI30...EI45 (мин) – для стоечного профиля 50×50×0,6 мм; EI30...EI90 (мин) – для стоечных профилей 75×50×0,6 мм и 100×50×0,6 мм [5].

6. Численная обработка результатов моделирования массива конструкций перегородок позволила разработать инженерную методику оценки огнестойкости рассматриваемых перегородок, учитывающая суммарный вклад высоты профиля, толщины и плотности минераловатного заполнителя в огнестойкость [5].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанный экспериментально-расчетный метод оценки ТФХ может быть использован для иных строительных материалов (пористых, минераловатных, вспучивающихся, дегидратирующих и пр.). Метод внедрен в производство организаций ПТУП «МОНТАЖСТРОЙКОМПЛЕКТ – ПРОФИЛЬ», ИООО «Кнауф Маркетинг», УП «Белпромпроект» при проектировании и строительстве зданий.

2. Расчетная модель, инженерная методика оценки огнестойкости могут быть использованы в проектных, научных и иных организациях Республики Беларусь для разработки эффективных и экономичных конструкций с повышенной огнестойкостью. Методика оценки огнестойкости перегородок внедрена в практическую деятельность проектных организаций ОАО «Белгорхимпром», ООО «Симатек Энерго», ООО «ИнжСпецСтройПроект».

3. Результаты исследований могут быть использованы в учреждениях образования. Материалы диссертации внедрены в образовательный процесс государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» при преподавании дисциплин «Безопасность объектов, зданий и сооружений», «Теоретические основы обеспечения безопасности строительных конструкций, зданий и сооружений».

# СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

## Статьи в научно-технических журналах

1. Кудряшов, В. А. Теплопроводность цементных армированных плит при нестационарном тепловом режиме на основе данных экспериментальных исследований и численного моделирования / В. А. Кудряшов, С. С. Ботян // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 139–152. – DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.139.
2. Кудряшов, В. А. Теплофизические характеристики цементных армированных плит для решения задач нестационарного высокотемпературного нагрева / В. А. Кудряшов, С. С. Ботян, С. М. Данилова-Третьяк, К. В. Николаева // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 327–334. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.327.
3. Кудряшов, В. А. Огнестойкость перегородок на металлическом каркасе с применением обшивных листов из цементных армированных плит и заполнением минераловатным утеплителем при стандартном огневом режиме пожара / В. А. Кудряшов, С. С. Ботян, С. М. Жамойдик // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 2. – С. 88–102.
4. Ботян, С. С. Экспериментально-расчетная методика оценки теплофизических характеристик строительных материалов с использованием камерной электропечи для решения задач огнестойкости / С. С. Ботян, С. М. Жамойдик, В. А. Кудряшов, Т. К. Нгуен // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 5–19. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.5.
5. Ботян, С. С. Оценка огнестойкости каркасно-обшивных перегородок с использованием теплофизических характеристик, полученных экспериментально-расчетным способом в камерной электропечи / С. С. Ботян // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 160–176. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.160.

## Статьи в сборниках и материалах конференций

6. Ботян, С. С. Теплопроводность цементных армированных плит на основе данных экспериментальных исследований и численного моделирования / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов, С. М. Жамойдик // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям. – Минск: НИИ ПБиПЧС МЧС РБ, 2019. – С. 345–353.

7. Ботян, С. С. Методика оценки эффективных значений коэффициента теплопроводности при огневом воздействии для цементных армированных стекловолокном плит / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году гражд. обороны, Иваново, 20-21 сент. 2017 г. – Иваново: Иванов. пожар.-спасат. акад. ГПС МЧС России, 2017. – С. 77–82.

### **Материалы конференций**

8. Ботян, С. С. Огнестойкость каркасных перегородок с применением листовых материалов на цементном вяжущем / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), 18-19 мая 2017 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси; редкол.: И. И. Полевода [и др.]. – Минск: УГЗ, 2017. – С. 24.

9. Ботян, С. С. Методы определения коэффициента теплопроводности строительных материалов для оценки огнестойкости / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – М.: ВНИИПО, 2017. – Ч. 2 : Горение и проблемы тушения пожаров. – С. 246–249.

10. Ботян, С. С. Оценка изменений физико-механических свойств современных строительных материалов в условиях пожара с использованием методов компьютерного моделирования / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов, С. М. Жамойдик // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тез. докл. XXX Междунар. науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2018. – С. 482–485.

11. Ботян, С. С. Методы определения теплофизических характеристик строительных материалов для оценки огнестойкости / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, 4-5 апр. 2018 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси; редкол.: И. И. Полевода [и др.]. – Минск: УГЗ, 2018. – С. 24.

12. Ботян, С. С. Огнестойкость перегородок на металлическом каркасе с применением обшивных листов и заполнением минераловатным утеплителем при стандартном огневом режиме пожара / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тез. докл. XXX Междунар. науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2018. – С. 448–450.

13. Ботян, С. С. Методика оценки эффективных значений коэффициента теплопроводности при огневом воздействии для цементных армированных стекловолокном плит / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов // Пожарная безопасность

объектов хозяйствования: материалы VII Междунар. науч. семинара в режиме видеоконференцсвязи. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2018. – С. 36–39.

14. Ботян, С. С. Экспериментальная оценка огнестойкости несущих перегородок при стандартном огневом режиме пожара / С. С. Ботян, С. М. Жамойдик, В. А. Кудряшов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, 2-3 апр. 2019 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси; редкол.: И. И. Полевода [и др.]. – Минск: УГЗ, 2019. – С. 47–48.

15. Ботян, С. С. Оценка эффективного коэффициента теплопроводности цементных армированных стекловолокном плит до 1200 °С в условиях пожара / С. С. Ботян, В. А. Кудряшов, С. М. Жамойдик // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: Е. Ю. Сушкина [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2019. – С. 51–55.

16. Ботян, С. С. Оценка эффективного коэффициента теплопроводности цементных армированных стекловолокном плит / С. С. Ботян, С. М. Жамойдик, Л. А. Креер, В. А. Кудряшов // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: материалы VI Междунар. заоч. науч.-практ. конф., 31 дек. 2019 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси; редкол.: И. И. Полевода [и др.]. – Минск: УГЗ, 2020. – С. 43–46.

17. Ботян, С. С. Экспериментально-расчетная методика оценки теплофизических характеристик строительных материалов с использованием камерной электропечи для решения задач огнестойкости / С. С. Ботян, С. М. Жамойдик, В. А. Кудряшов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей), 8-9 апр. 2020 г. : в 2 т. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси; редкол.: И. И. Полевода [и др.]. – Минск: УГЗ, 2020. – Т. 1. – С. 25–26.

## РЕЗЮМЕ

**Ботян Сергей Сергеевич**

Огнестойкость строительных перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит, армированных стеклосеткой

**Ключевые слова:** огнестойкость, строительная перегородка, цементные плиты армированные стеклосеткой, минераловатные плиты, теплофизические характеристики, расчетная конечно-элементная модель, инженерная методика.

**Цель исследования** – определить варианты конструктивного исполнения строительных перегородок на стальном каркасе с облицовкой из цементных плит с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин) (позволяющие обеспечить ограничение распространения пожара в зданиях) на основе огневых экспериментальных исследований и численного моделирования с учетом ТФХ материалов, полученных экспериментально-расчетным методом с использованием камерной электропечи.

**Методы исследования и использованная аппаратура.** Общая методология работы предусматривала сочетание экспериментальных исследований в камерной электропечи модельных образцов, в огневой печи – фрагментов перегородки, с численным моделированием. Для измерения температуры использовались: термоэлектрические преобразователи ТХА и ТХК класса точности 2; измерители-регуляторы «Сосна 004»; дальномер DLE 40; секундомер интеграл С-01; фотокамеры. Для обработки результатов измерений применяли статистические методы.

**Полученные результаты и их новизна.** Получены новые экспериментальные данные по изменению температуры на обогреваемой и необогреваемой поверхностях, а также плотности цементных и минераловатных плит, определены зависимости ТФХ материалов от температуры. Выполнены огневые испытания экспериментальной конструкции перегородки при стандартном режиме пожара, получены зависимости нагрева и перемещений перегородки в заданных точках от времени. На основании результатов численного моделирования нагрева перегородки, с учетом результатов огневых исследований и полученных ТФХ материалов, определены варианты конструктивного исполнения строительных перегородок с огнестойкостью от EI30 до EI90 (мин), а также разработана инженерная методика оценки огнестойкости перегородок.

**Рекомендации по использованию.** Результаты исследований могут быть использованы организациями при проектировании зданий, разработке огнестойких конструкций, а также подразделениями МЧС, Госстройэкспертизы при проверке проектной документации и осуществлении экспертной деятельности.

**Область применения.** Проектно-конструкторские организации, подразделения МЧС, предприятия госстройэкспертизы, высшие учебные заведения.



## РЭЗЮМЭ

**Бацян Сяргей Сяргеевіч**

Вогнеўстойлівасць будаўнічых перагародак на сталёвым каркасе з абліцоўваннем з цэментавых пліт, армаваных стеклосеткой

**Ключавыя словы:** вогнеўстойлівасць, будаўнічая перагародка, цэментавыя пліты армаваныя стеклосеткой, мінералаватных пліты, цеплафізічнымі характарыстыкі, разліковая вядома-элементная мадэль, інжынерная метадыка.

Мэта даследавання – вызначыць варыянты канструктыўнага выканання будаўнічых перагародак на сталёвым каркасе з абліцоўваннем з цэментавых пліт з вогнеўстойлівасцю ад EI30 да EI90 (хвілін) (якія дазваляюць забяспечыць абмежаванне распаўсюджвання пажару ў будынках) на аснове агнявых эксперыментальных даследаванняў і колькаснага мадэлявання з улікам ТФХ матэрыялаў, атрыманых эксперыментальна-разліковым спосабам з выкарыстаннем камернай электрапечкі.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура.** Агульная метадалогія працы прадугледжвала спалучэнне эксперыментальных даследаванняў у камернай электрапечкі мадэльных узораў, у агнявой печы - фрагментаў перагародкі, з лікавым мадэляваннем. Для вымярэння тэмпературы выкарыстоўваліся: тэрмаэлектрычныя пераўтваральнікі Тха і ТХК класа дакладнасці 2; вымяральнікі-рэгулятары «Сосна 004»; далямер DLE 40; секундамер інтэграл С-01; фотакамеры. Для апрацоўкі вынікаў вымярэнняў ўжывалі статыстычныя метады.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Атрыманы новыя эксперыментальныя дадзеныя па змене тэмпературы на абагрэваемай і абагрэваемай паверхнях, а таксама шчыльнасці цэментных і мінералаватных пліт, вызначаны залежнасці ТФХ матэрыялаў ад тэмпературы. Выкананы агнявыя выпрабаванні эксперыментальнай канструкцыі перагародкі пры стандартным пажары, атрыманы залежнасці нагрэву і перасоўванняў перагародкі ў зададзеных кропках ад часу. На падставе вынікаў колькаснага мадэлявання нагрэву перагародкі, з улікам вынікаў агнявых даследаванняў і атрыманых ТФХ матэрыялаў, вызначаны варыянты канструктыўнага выканання будаўнічых перагародак з вогнеўстойлівасцю ад EI30 да EI90 (хвілін), а таксама распрацавана інжынерная метадыка ацэнкі вогнеўстойлівасці перагародак.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны арганізацыямі пры праектаванні будынкаў, распрацоўцы вогнеўстойлівых канструкцый, а таксама падраздзяленнямі МНС, Дзяржбудэкспертыза пры праверцы праектнай дакументацыі і ажыццяўленні экспертнай дзейнасці.

**Вобласць прымянення.** Праектна-канструктарскія арганізацыі, падраздзялення МНС, прадпрыемствы Дзяржбудэкспертыза, вышэйшыя навучальныя ўстановы.

## SUMMARY

**Siarhei Batyan**

Fire resistance of building partitions on a steel frame  
encased with fiberglass reinforced cement boards

**Keywords:** fire resistance, building partition, fiberglass reinforced cement boards, mineral wool, thermal properties, computational finite-element model, engineering technique.

**The aim of the research:** to develop structural design options for building partitions on a steel frame encased with fiberglass reinforced cement boards with fire resistance rating from EI30 to EI90 (allowing to limit the buildings' fire spreading) based on experimental fire research and numerical modeling, considering the materials thermal properties obtained by the experimental technique with an electric furnace.

**Research methods and equipment used.** The general methodology of the work included experimental studies combination with the numerical modeling of the samples in an electric furnace and the experimental partition in a fired furnace. To measure the temperature, the following equipment were used: type K thermocouples with 2% accuracy; measuring regulators "Sosna 004"; rangefinder DLE 40; stopwatch S-01; cameras. To process the measurement data, the statistical methods were used.

**The results obtained and their novelty.** New experimental data have been obtained on the temperature change at heated and unheated surfaces of cement boards and mineral wool samples, as well as its temperature-depended thermal properties. The fire tests of the experimental partition were carried out under standard fire curve; the time-depended experimental data of temperatures and displacements were obtained. Based on the results of partition heating numerical modeling, using the fire testing experimental results and obtained thermal properties, the structural design options for building partitions with fire resistance rating from EI30 to EI90 (min) have been determined, as well as the fire resistance rating engineering technique.

**The practical importance of the research and the sphere of application.** The research results can be used by organizations at buildings design, at the development of fire-resistant structures, as well as at expert activities by the Ministry of Emergency Situations departments and State Building Expert departments.

**Field of application.** Design and engineering organizations, the Ministry of Emergency Situations departments, expert organizations, higher educational institutions.

Научное издание

**Ботян Сергей Сергеевич**

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕГОРОДОК НА  
СТАЛЬНОМ КАРКАСЕ С ОБЛИЦОВКОЙ ИЗ ЦЕМЕНТНЫХ  
ПЛИТ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОСЕТКОЙ**

Автореферат

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

Подписано в печать 12.05.2021.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5.  
Тираж 60. Заказ 041-2021.

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.