

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-2.160>

УДК 641.841.332:542.424

ОЦЕНКА ОГНЕСТОЙКОСТИ КАРКАСНО-ОБШИВНЫХ ПЕРЕГОРОДОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫМ СПОСОБОМ В КАМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Ботян С.С.

Цель. На основе экспериментальных исследований и теоретических данных разработать методику оценки огнестойкости широкого класса перегородок на стальном каркасе с применением обшивных листов из цементно-армированных плит и заполнением минераловатным утеплителем с использованием теплофизических характеристик, полученных экспериментально-расчетным способом в камерной электропечи.

Методы. Используются методы конечных элементов, параметрической оптимизации, экспериментальные исследования.

Результаты. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования по прогреву строительных материалов в стационарном и нестационарном тепловых режимах. Определены теплофизические характеристики цементно-армированной и минераловатных плит при повышенных температурах для решения задач огнестойкости. Выполнены экспериментальные исследования по оценке огнестойкости фрагмента конструкции каркасной перегородки с применением обшивных листов из цементных армированных плит. Разработана расчетная конечно-элементная модель с учетом теплофизических характеристик составляющих материалов и получены зависимости прогрева широкого класса перегородок. Разработана инженерная методика оценки огнестойкости ненесущих перегородок с учетом переменной высоты поперечного сечения стоечного профиля, толщины и плотности внутреннего заполнителя.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы при разработке огнестойких решений конструктивных элементов зданий, а также для оценки предела огнестойкости каркасных перегородок при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Ключевые слова: перегородка, огнестойкость, теплофизические характеристики, экспериментальные исследования, расчетная модель, метод конечных элементов, параметрическая оптимизация, стандартный температурный режим.

(Поступила в редакцию 30 апреля 2020 г.)

Введение

В настоящее время для внутреннего деления зданий широко используются ненесущие каркасно-обшивные перегородки (далее – перегородки) с применением листовых материалов и внутреннего заполнителя на деревянном либо стальном каркасе. Рассматриваемый вид перегородок имеет ряд преимуществ по таким показателям, как технологичность монтажа, масса, теплозвукоизоляция в сравнении с перегородками, выполненными из каменных материалов и (или) бетона. Такие конструкции часто должны соответствовать требованиям, предъявляемым к противопожарным преградам для выделения пожарных секций, помещений с различной взрывопожарной и пожарной опасностью и конструкциям с нормируемым пределом огнестойкости для выделения общих путей эвакуации. Суть указанных требований выражается в способности перегородок сохранять ограждающую способность в условиях пожара и не допускать его распространения в соседние помещения. Ограждающая способность при огневом воздействии считается исчерпанной при прогреве обратной стороны конструкции до температур воспламенения материалов отделки и интерьера соседних помещений (теплоизолирующая способность) и (или) при образовании трещин и (или) сквозных отверстий, через которые могут проникать продукты горения в соседние помещения (целостность).

Состояние проблемы на современном этапе. Каркасные перегородки с применением листовых материалов представляют собой многослойную сочлененную конструкцию на деревянном либо металлическом¹ каркасе, включающую помимо каркаса облицовку с двух сторон обшивными листами и внутренний наполнитель (рис. 1).

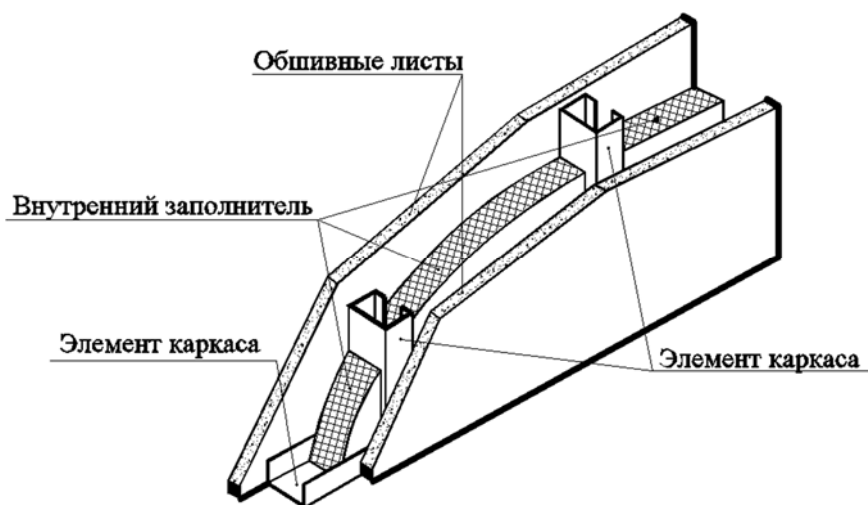


Рисунок 1. – Схема устройства каркасно-обшивной перегородки

Тип обшивных листов играет немаловажную роль в огнестойкости каркасных перегородок, поскольку одна из сторон подвергается непосредственно огневому воздействию, от чего зависит динамика прогрева составных элементов и перегородки в целом, как следствие, достижению предельных состояний по огнестойкости. В качестве обшивных листов в перегородках широко применяются обшивные листы на гипсовом и цементном вяжущем, одно- либо многослойные.

В отличие от плит на цементном вяжущем огнестойкость перегородок, выполненных с применением гипсовых плит, достаточно широко изучена². Особенность поведения гипсовых плит при огневом воздействии заключается в способности сдерживать температуру на уровне 100 °С в течение 10...20 мин в зависимости от толщины. Это обусловлено содержанием физически и химически связанной воды в составе гипса и существенно повышает огнестойкость. Однако после дегидратации воды гипсовые плиты быстро теряют прочность и целостность, а торцующий картон прогорает, что способствует в дальнейшем ускоренному прогреву конструкции. Плиты на цементном вяжущем в сочетании с армированием стеклосеткой не способны длительно удерживать температуру на уровне 100 °С, но более устойчивы к растрескиванию и разрушению после дегидратации [1; 2].

Указанные отличия не позволяют в полной мере использовать данные об огнестойкости перегородок с облицовкой на гипсовом вяжущем для конструкций с применением цементно-армированных плит без проведения соответствующих исследований. При этом поведение каркаса и внутреннего наполнителя при схожих температурах предполагается идентичным.

Известно, что огнестойкость перегородок на деревянном каркасе, как правило, выше, чем на металлическом. Деревянный каркас перегородок в отличие от металлического горючий и начинает обугливаться при температуре 300 °С со скоростью 0,6...0,8 м/мин^{2,3}.

¹ Далее по тексту под понятием «металлический каркас» следует понимать стальной каркас с цинковым антикоррозионным покрытием.

² Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости. – Взамен П1-02 к СНБ 2.02.01-98: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Введ. 12.06.08. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2008. – 126 с.

³ ТКП EN 1995-1-2-2009 Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости [Электронный ресурс] // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ». – Режим доступа: <https://normy.by/ips.php>. – Дата доступа: 01.04.2020.

В качестве металлического каркаса, как правило, используют тонкостенные П-образные профили, для которых характерна деформация поперечных сечений в условиях неравномерного нагрева и теплового расширения при температуре, превышающей 350 °С. Кроме того, стальной профиль является своеобразным тепловым мостом в силу высокой теплопроводности стали, что приводит к неравномерному прогреву конструкции.

В качестве внутреннего заполнителя, как правило, используют минераловатные плиты на основе каменных пород и стекловаты. При этом минеральная вата, полученная на основе каменных (базальтовых) пород, является более устойчивой к высоким температурам по сравнению со стекловатой [2; 3]. Более плотные сорта минеральной ваты, как правило, хуже проводят тепло при высоких температурах и являются более огнестойкими по сравнению с менее плотными [4].

Известна также расчетная методика оценки огнестойкости для перегородок с применением гипсовых и древесных облицовок (плит) на деревянном каркасе³. Суть расчетной методики заключается в определении огнестойкости перегородки как суммы вкладов каждого слоя в зависимости от их расположения относительно пожара, времени деструкции, а также конструктивного исполнения стыков. Ограждающая способность при огневом воздействии конструкции определяется по формуле:

$$t_{ins} = \sum t_{ins,0,i} k_{pos} k_j, \quad (1)$$

где $t_{ins,0,i}$ – основное значение i -го слоя изоляции, мин; k_{pos} – коэффициент расположения обшивок; k_j – коэффициент соединения стыков.

Как правило, вклад каждого слоя в огнестойкость цельной конструкции определяется функцией его температуры. Однако теплофизические характеристики материалов, используемые в уравнениях аналитической теории теплопроводности, как правило, определены в условиях нормальных температур либо не выше 100...200 °С, не учитывают физико-химические превращения (фазовые переходы, пиролиз, деструкцию, спекание и т. п.) поэтому могут вносить значительные погрешности при оценке температуры и в целом огнестойкости. Это обуславливает необходимость экспериментальной оценки теплофизических характеристик материалов облицовки и заполнителя в условиях, соответствующих температурам и динамике стандартного пожара [5].

Таким образом, для оценки огнестойкости широкого класса перегородок с обшивными листами на цементном вяжущем необходимо провести экспериментальные исследования перегородки в целом (для наиболее уязвимых перегородок с использованием металлического каркаса) и материалов облицовки (заполнителя) в частности, разработать расчетную модель на уровне моделирования теплопроводности с учетом теплофизических характеристик составляющих материалов и разработать инженерную методику с учетом вклада каждого слоя в огнестойкость цельной конструкции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику и выполнить экспериментальные исследования в камерной электропечи для оценки теплофизических характеристик цементно-армированных и минераловатных плит с использованием конечно-элементного анализа и параметрической оптимизации.

2. Дополнить методику⁴ экспериментальной оценки огнестойкости несущих перегородок схемой регистрации температуры по толщине перегородки и выполнить экспериментальные исследования огнестойкости фрагмента перегородки.

3. Разработать расчетную модель на уровне моделирования теплопроводности с учетом теплофизических характеристик составляющих материалов и получить зависимости

³ ГОСТ 30247.1-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции [Электронный ресурс] // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ». – Режим доступа: <https://normy.by/ips.php>. – Дата доступа: 19.11.2018.

прогрева (и соответственно, огнестойкости) широкого класса перегородок с фиксированной толщиной облицовки цементно-армированными плитами, переменной высотой поперечного сечения стоечного профиля, толщиной и плотностью внутреннего заполнителя.

4. Разработать инженерную методику оценки огнестойкости ненесущих перегородок с облицовкой цементно-армированными плитами с учетом переменных параметров основной расчетной модели.

Основная часть

Задача 1. Для проведения экспериментальных исследований по прогреву строительных материалов использована лабораторная муфельная электропечь ЭКПС-10/1300 с открытыми нагревательными элементами, позволяющая создавать тепловой режим в диапазоне температур от 20 до 1300 °С. Описание образцов, методика выполнения экспериментальных исследований подробно изложены в работе [5]. В ходе выполнения исследований регистрировали температуру на обогреваемой и необогреваемой стороне образца, внутри печи, а также на наружной стороне теплоизоляции дверцы печи. Экспериментальные исследования по прогреву образцов проводили в два этапа:

1) в стационарном тепловом режиме при температурах 275, 550, 770 и 1150 °С – для исследования плотности и коэффициента теплопроводности материала;

2) нестационарном тепловом режиме при температурах от 20 до 1000 °С – для исследования удельной теплоемкости материала.

В таблицах 1, 2 представлены результаты экспериментальных исследований по прогреву образцов в условиях стационарного теплового режима. Исследования проводили для двух образцов материала в стационарном (для каждого режима) и нестационарном условиях нагрева.

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

Температура в печи в условиях стационарного теплового режима, °С	Температура на необогреваемой поверхности (прогрева) образца, °С			
	Цементно-армированная плита АКВАПАНЕЛЬ плотностью 1100 кг/м ³ и толщиной 12,5 мм	Минераловатная плита Технориф ПРОФ плотностью 160 кг/м ³ и толщиной 25 мм	Минераловатная плита ROCKWOLL типа ЛАЙТ БАТТС плотностью 37 кг/м ³ и толщиной 25 мм	Теплоизоляция дверцы печи из мулитокремнеземистого 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 °С для прямых измерений температуры⁵.

Таблица 2. – Результаты изменения плотности образцов в условиях стационарного теплового режима

Температура в печи в условиях стационарного теплового режима, °С	Плотность образца (по отношению к начальной), %		
	Цементно-армированная плита АКВАПАНЕЛЬ плотностью 1100 кг/м ³ и толщиной 12,5 мм	Минераловатная плита Технориф ПРОФ плотностью 160 кг/м ³ и толщиной 25 мм	Минераловатная плита ROCKWOLL типа ЛАЙТ БАТТС плотностью 37 кг/м ³ и толщиной 25 мм
275 ± 7	96,7 ± 0,2	96,4 ± 0,8	98,1 ± 3,7
550 ± 6	93,7 ± 0,2	93,1 ± 0,9	95,4 ± 3,8
770 ± 8	88,1 ± 0,3	92,4 ± 1,0	93,6 ± 4,1
1150 ± 11	77,2 ± 0,3	84,2 ± 1,2	85,1 ± 4,8

Примечание. Указан доверительный интервал в % для косвенных измерений при расчете плотности.

⁵ ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений. – Введ. 01.01.77. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 7 с.

Результаты изменения температуры греющей среды T_n в камере печи, температуры на обогреваемой и необогреваемых сторонах образцов испытаний цементно-армированных и минераловатных плит при нестационарных условиях теплообмена представлены на рисунке 2.

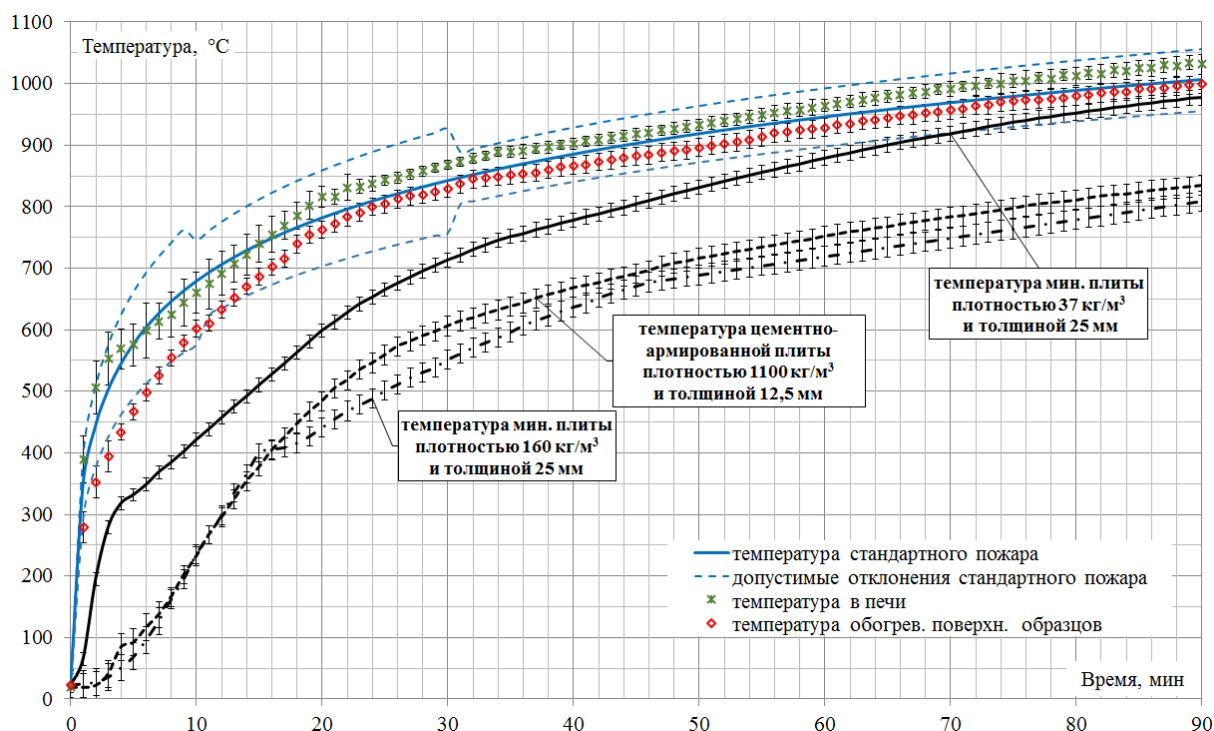


Рисунок 2. – График изменения температуры образцов при проведении экспериментальных исследований в нестационарных условиях

Из рисунка 2 следует, что динамика температуры в камерной печи соответствует стандартному температурному режиму пожара с учетом допустимых отклонений. Линии температуры со стороны необогреваемой поверхности образцов характеризуются точками излома (в области 100 °C для образцов цементно-армированных плит; 300 и 400 °C для минераловатных плит) что объясняется физико-химическими превращениями (для цементно-армированных плит – испарением структурно-связанной воды, для минераловатных плит – выгоранием органических связующих). Полученные экспериментальные данные по прогреву материалов используются в расчетной конечно-элементной модели при определении теплофизических характеристик.

Для определения зависимостей коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры разработаны компьютерные расчетные модели в системе конечно-элементного анализа ANSYS/Thermal⁶, с применением метода параметрической оптимизации относительно искомого теплофизического параметра (коэффициента теплопроводности либо удельной теплоемкости). Описание расчетной модели с указанием начальных и граничных условий подробно описаны в работе [5].

В качестве входных параметров для стационарного теплообмена принимали коэффициент теплопроводности, для нестационарного – удельную теплоемкость. В качестве переменных состояний в модели параметризации использованы результаты экспериментальных исследований – значения температуры необогреваемой поверхности (согласно измеряемым точкам) образца в заданный момент времени.

Зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры для исследуемых образцов представлены на рисунке 3.

⁶ ANSYS DesignXplorer User's Guide, Release 2020 R1, January 2020.

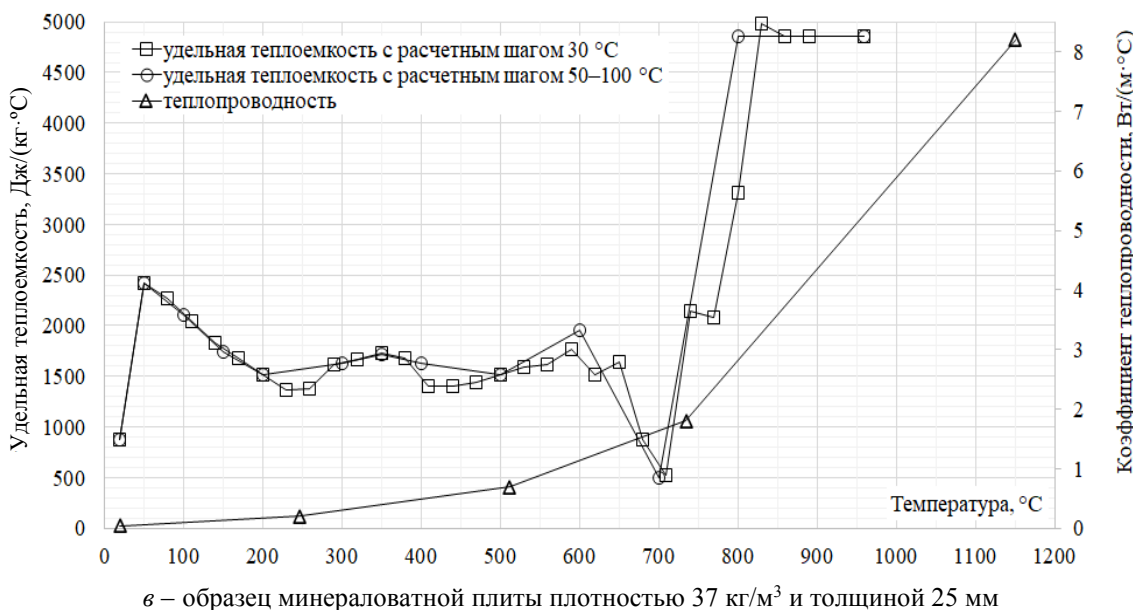
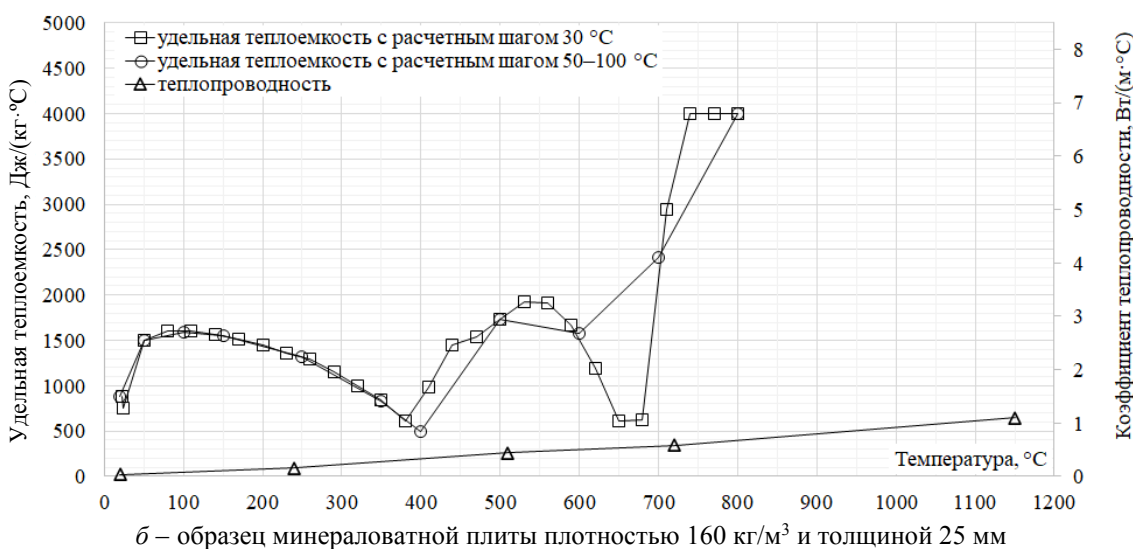
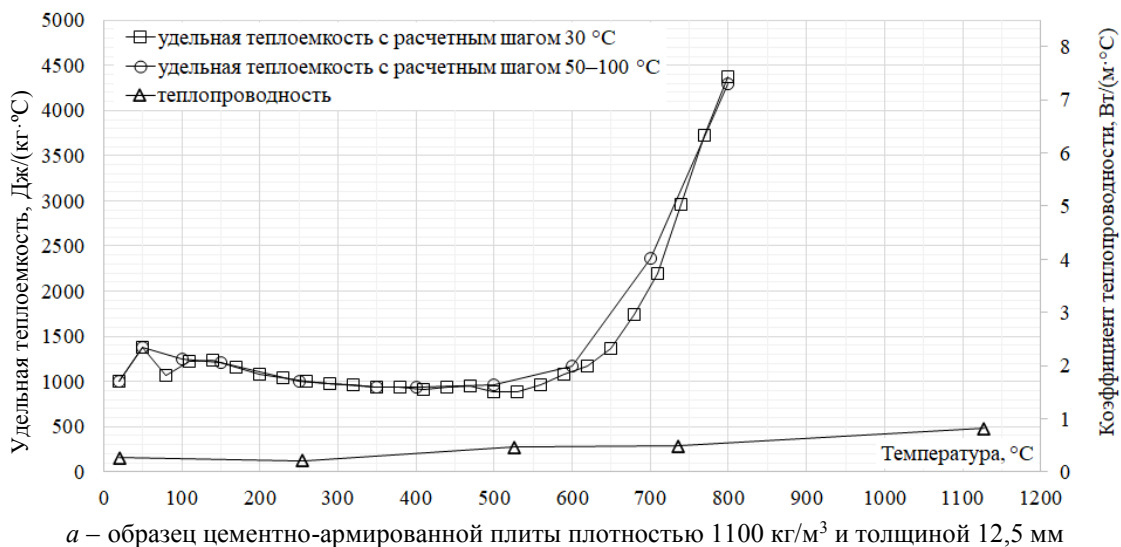


Рисунок 3. – Зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры для исследуемых образцов

250 °С с последующим ростом значения с изменением угла наклона кривых. Изменение теплопроводности для минераловатных плит плотностью 160 кг/м³ (рис. 3б) имеет линейный характер, для минераловатных плит плотностью 37 кг/м³ (рис. 3в) – экспоненциальный рост.

Зависимости удельной теплоемкости характеризуются скачкообразным изменением, что связано с физико-химическими превращениями в материалах, некоторые видны на перегибах кривых прогрева материалов (рис. 2), а также дифференциального термического анализа [2; 3; 6; 7]. Для уточнения тепловых пиков в модели параметрической оптимизации удельная теплоемкость определялась для двух целевых функций с шагом 30 °С для первой и шагом, принимающим значение 50 °С на участке с пиками и 100 °С на участке без них, для второй. Из графиков следует, что при уменьшении расчетного шага увеличивается количество пиков, но в целом графики характеризуются схожей интегральной кривой.

Задача 2. Экспериментальные исследования по оценке огнестойкости перегородок выполняются в соответствии с методикой в странах СНГ⁷, в странах Европейского союза⁸. В ходе проведения испытаний образец перегородки (размером 3000×3000 мм, обусловленным габаритами печи), смонтированный в вертикальную огневую печь, подвергается воздействию стандартного температурного режима⁹. В процессе опыта регистрируется температура в огневой камере печи и на необогреваемой поверхности перегородки, время появления и характер трещин, отверстий и отслоений.

С целью более детального изучения прогрева и поведения конструкции при огневом воздействии методика⁷ проведения экспериментальных исследований была дополнена схемой расстановки термоэлектрических преобразователей (с указанием мест расположения дополнительных термоэлектрических преобразователей по толщине перегородки) (табл. 3).

Таблица 3. – Места установки термоэлектрических преобразователей

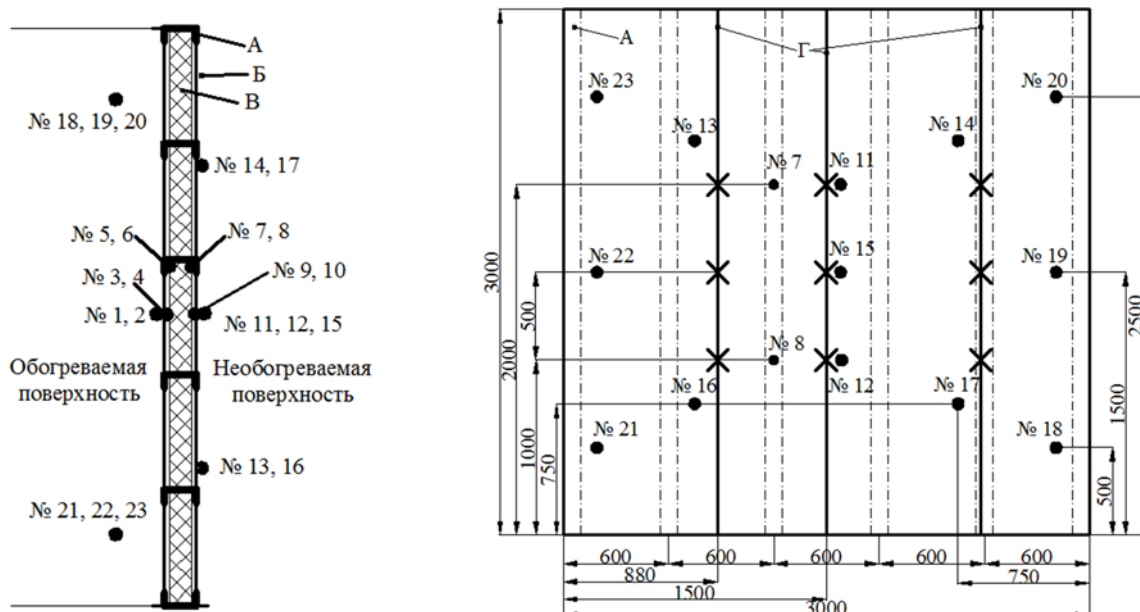
№	Место установки преобразователя	Номер термоэлектрического преобразователя (рис. 4)
1	В огневой печи	18–23
2	На обшивном листе (со стороны обогреваемой поверхности)	1, 2
3	За обшивным листом (со стороны обогреваемой поверхности)	3, 4
4	На внутренних поверхностях полок стоечного профиля	5–8
5	За обшивным листом (со стороны необогреваемой поверхности)	9, 10
6	На необогреваемой поверхности перегородки	11–17

В качестве исследуемой конструкции принят фрагмент каркасно-обшивной перегородки размером 3000×3000×100 мм (испытания проведены для двух однотипных образцов). Каркас перегородки выполнен из стоечного профиля ПС 75×50×0,6 с шагом 600 мм, элементы соединены методом «просечки с отгибом» (рис. 5а). Внутренние полости конструкции заполнены минераловатными плитами толщиной 50 мм и плотностью 37 кг/м³ (ROCKWOLL типа ЛАЙТ БАТТС) (рис. 5б). Каркас перегородки с двух сторон обшивается цементными армированными плитами толщиной 12,5 мм, с помощью винтов самонарезающих размером 4,2×25 мм с шагом 250 мм (рис. 5в). Стыки листов цементных армированных плит расположены вразбежку, торцы между плитами проклеены клеем для швов (тип Joint Adhesive PU) и дополнительно зашпатлеваны цементной штукатурно-клеевой смесью (тип «Севенер»). Подробное описание фрагмента образца, методики выполнения экспериментальных исследований изложены в работе [8].

⁷ См. сноску 4.

⁸ ISO 834-8:2002/Cor.1:2009 Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 8: Specific requirements for non-loadbearing vertical separating elements.

⁹ ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования [Электронный ресурс] // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ». – Режим доступа: <http://www.normy.by/doc2.php?type=-1&id=365>. – Дата доступа: 13.07.2018.



a – продольный разрез перегородки

б – общий вид перегородки

A – стоечный профиль; *B* – обшивные цементно-армированные плиты; *B* – теплоизоляционные плиты;

Г – пластины для измерения перемещений перегородки; ● – точка установки термоэлектрических преобразователей; × – отметка для измерения перемещений перегородки

Рисунок 4. – Схема размещения термоэлектрических преобразователей и точек измерения перемещения перегородки



a – вид металлического каркаса перегородки



б – заполнение полости минерватным утеплителем



в – фрагмент перегородки с обработкой стыков

Рисунок 5. – Технология монтажа фрагмента исследуемой конструкции (размер 3×3 м)

На рисунке 6 представлены данные изменения температур при проведении экспериментальных исследований образцов в контрольных точках перегородки в соответствии с разработанной схемой (рис. 6а, б).

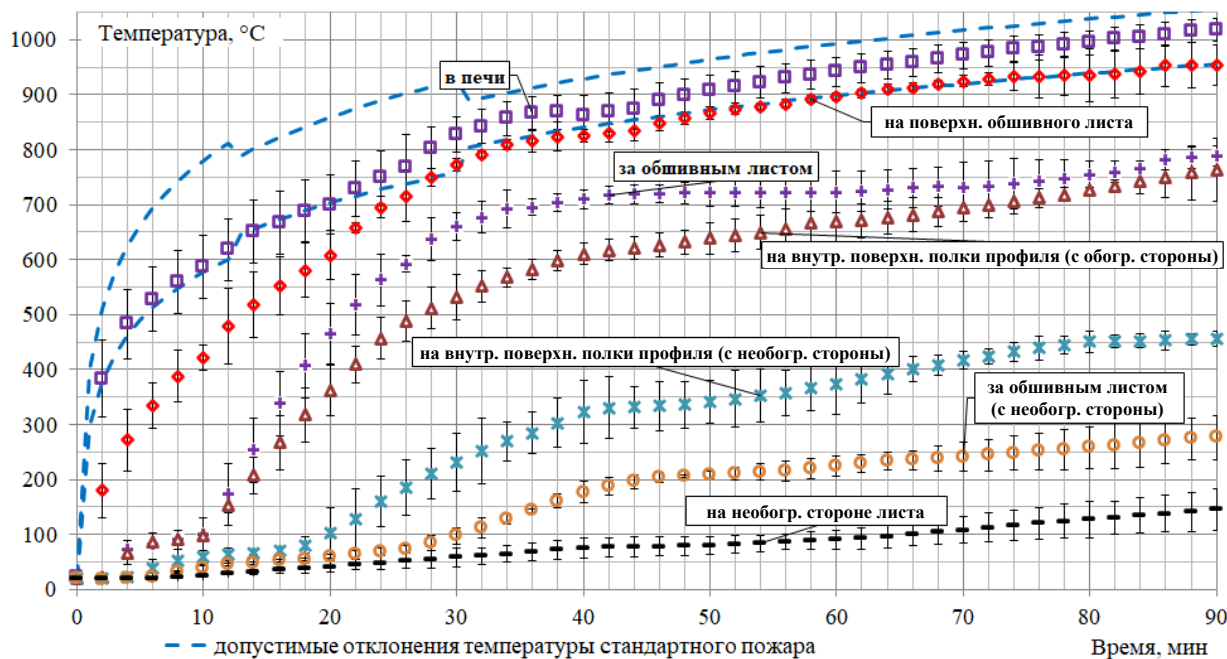


Рисунок 6. – График изменения средней температуры в ходе проведения экспериментальных исследований

Из графика (рис. 6) видно, что изменение температуры на обогреваемой поверхности перегородки подобна стандартной температурной кривой пожара. Изменение температуры за обшивным листом (со стороны обогреваемой поверхности) характеризуется замедленным ростом в интервалах температур от 80 до 120 °C на 5 мин испытаний и в интервале более 710 °C на 30 мин. Указанные факты связаны с процессами дегидратации химически связанной воды в цементной армированной плите при 100 °C, а также физико-химическими превращениями при температуре 700 °C (диссоциация углекислого кальция в известняке, плавление армирующей сетки). Прогрев противоположных граней (внутренних поверхностей полок) стоечного профиля, характеризуется заметной разницей температур, что объясняется заполнением внутренних пустот минераловатным наполнителем с низким коэффициентом теплопроводности и малой толщиной стенки металлического профиля (0,6 мм).

Также в ходе исследований установлено, что температура на обогреваемой поверхности перегородки по высоте (на отметках 1 и 2 м) распределяется несимметрично и на 20-й мин разность температур составляет 260 °C, на 40-й – 140 °C, на 60-й – 120 °C, на 90-й – 60 °C. 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 (газовая среда за счет теплообмена конвекцией поднимается вверх под действием разности температур в поле гравитации). В последующем во внутреннем объеме печи возрастает теплообмен излучением, в сравнении с конвективным теплообменом, при этом тепловое поле по высоте печи становится более равномерным.

Несимметричное тепловое поле поверхности конструкции способствует неравномерному прогреву конструкции по высоте.

Задача 3. Для получения расчетных данных по прогреву перегородки с учетом полученных теплофизических характеристик построена расчетная конечно-элементная модель конструкции. Модель перегородки состоит из обшивных листов, внутреннего наполнителя и стоечного стального профиля. В силу симметричного исполнения конструкции по длине и высоте расчетная модель упрощена по длине величиной 0,9 м и высоте 0,1 м (рис. 7).

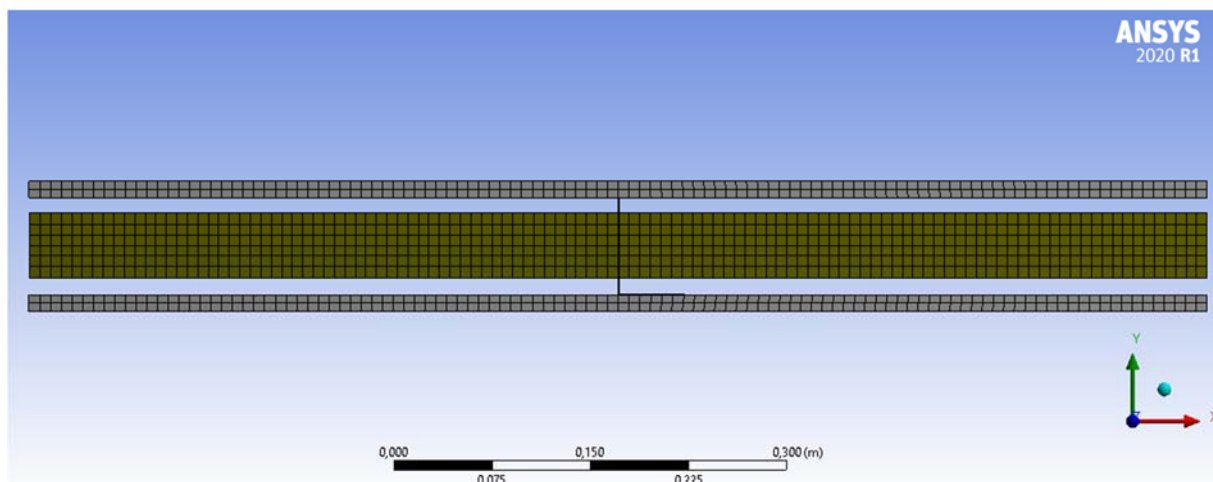


Рисунок 7. – Расчетная конечно-элементная модель перегородки

В качестве начальных условий в расчетной модели принято, что температура во всех точках образца одинакова и равна температуре окружающей среды во время испытаний.

При определении граничных условий модели были учтены две схемы прогрева:

- 1) обшивной лист – воздушное пространство – минераловатный утеплитель – воздушное пространство – обшивной лист;
- 2) обшивной лист – стоечный профиль – минераловатный утеплитель – стоечный профиль – обшивной лист (рис. 8).

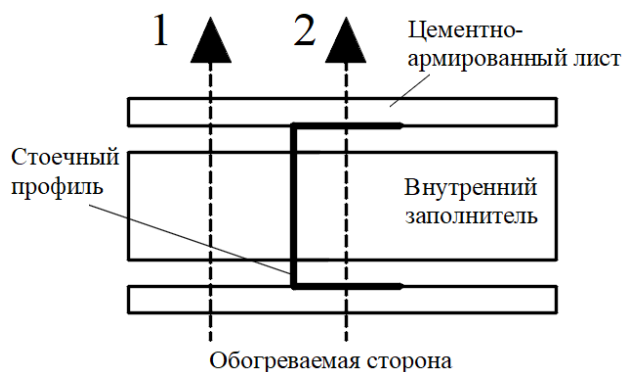


Рисунок 8. – Расчетная схема прогрева перегородки

В качестве граничных условий в расчетной модели были приняты граничные условия 3-го и 4-го рода. Граничные условия 3-го рода в качестве радиационно-конвективного теплообмена приняты на обогреваемой и необогреваемой поверхностях перегородки. Теплообмен за счет излучения по схеме 1 (рис. 8) определялся между поверхностями обшивных листов и внутренним наполнителем. По схеме 2 поверхность обшивного листа имела контактное соединение с полкой стоечного профиля, а излучение учитывалось между профилем и внутренним наполнителем.

Поскольку предел огнестойкости конструкции определяется температурой на необогреваемой поверхности конструкции, сопоставление расчетных и экспериментальных данных осуществляли на ней. При этом, поскольку в ходе экспериментальных исследований установлена неравномерность прогрева перегородки по высоте печи [8], моделирование расчетной модели перегородки и последующее сравнение осуществляли по следующим зонам (рис. 8):

- 1) прогрев в верхней зоне перегородки по схеме 1;
- 2) прогрев в верхней зоне перегородки по схеме 2;
- 3) прогрев в нижней зоне перегородки по схеме 1.

Результаты расчетных и экспериментальных данных прогрева необогреваемой поверхности перегородки представлены на графике (рис. 9).

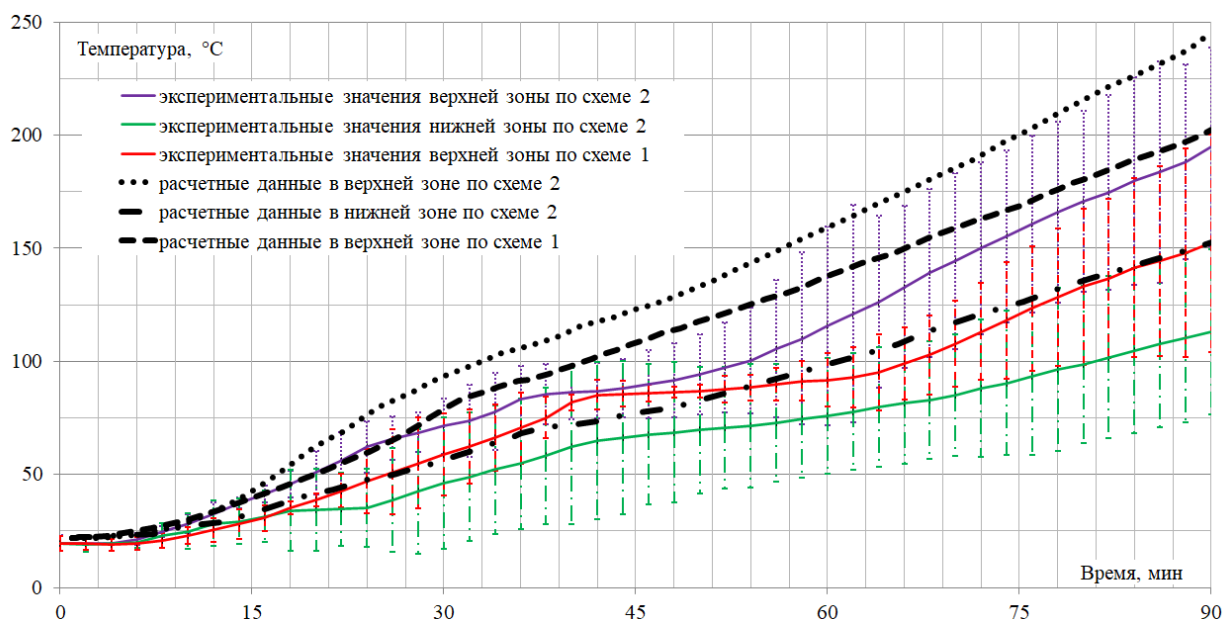


Рисунок 9. – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных на необогреваемой поверхности конструкции

Как видно из графика, верхняя зона перегородки прогревается интенсивнее в сравнении с нижней зоной, что связано с неравномерным прогревом печи по высоте. Прогрев по схеме 2 в верхней зоне (рис. 9) характеризуется максимальным значением температуры, что связано с высокой теплопроводностью стального каркаса. Результаты по прогреву расчетной модели в верхней зоне по схеме прогрева 2 (рис. 9) показывают безопасный прогрев с точки зрения достижения предельных состояний по теплоизолирующей способности и в последующем использовались для оценки огнестойкости конструкций.

Впоследствии в расчетной модели с использованием теплофизических характеристик, полученных экспериментально-расчетным путем в камерной электропечи, определен фактический предел огнестойкости для перегородок с применением различного каркаса и внутреннего заполнителя (табл. 4).

Таблица 4. – Результаты расчетов по прогреву перегородок с различным конструктивным исполнением

№	Конструктивное исполнение перегородки		Фактический показатель по пределу огнестойкости*, мин			Предел огнестойкости по стандартному ряду**
	Параметры стоечного профиля	Плотность заполнителя	Толщина заполнителя, мм			
			30	50	70	
1	50×50×0,6	Без заполнителя	32,1			EI 30
2		37 кг/м ³	49,6	–	–	EI 45
3		160 кг/м ³	58,4	–	–	EI 45
4	75×50×0,6	Без заполнителя	33,4			EI 30
5		37 кг/м ³	56,8	61,7	66,2	30 мм – EI 45 50, 70 мм – EI 60
6		160 кг/м ³	68,7	83,8	99,6	30, 50 мм – EI 60 70 мм – EI 90
7	100×50×0,6	Без заполнителя	34,2			EI 30
8		37 кг/м ³	58,6	63,9	69,1	30 мм – EI 45 50, 70 мм – EI 60
9		160 кг/м ³	71,6	88,2	106,3	30, 50 мм – EI 60 70 мм – EI 90

Примечание.

* В качестве достижения предельного состояния по огнестойкости принимается потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до 140 °С в среднем или до 180 °С в любой точке этой поверхности (с учетом начальной температуры конструкции).

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

Задача 4. Обработка полученных расчетных данных (табл. 4) с последующим преобразованием с учетом требуемой точности и удобства применения позволила получить следующую зависимость для оценки огнестойкости перегородок с облицовкой из цементно-армированных плит на стальном каркасе:

$$t_{по} = 30k_{лр} + \delta \cdot k_3(\rho, \delta), \quad (2)$$

где $k_{лр}$ – коэффициент влияния параметров профиля (определяется по табл. 5); k_3 – коэффициент, учитывающий плотность ρ (кг/м³) и толщину δ (мм) заполнителя (определяется по табл. 6).

Указанная формула может быть применена для перегородок на стальном каркасе, с применением в качестве обшивных листов цементно-армированных плит толщиной не менее 12,5 мм с симметричным расположением внутреннего заполнителя и наличием воздушного пространства между листами и внутренним заполнителем. Торцевые соединения между обшивными листами должны быть проклеены клеем для швов и дополнительно зашпатлеваны цементной штукатурно-клеевой смесью.

Таблица 5. – Коэффициент влияния параметров профиля

№	Параметры стоечного профиля		
	ПС 50	ПС 75	ПС 100
Значение $k_{лр}$	1,07	1,11	1,14

Таблица 6. – Коэффициент, учитывающий плотность и толщину заполнителя

№	Тип стоечного профиля	Толщина заполнителя, мм	Значение $k_3(\rho, \delta)$	
			Плотность 37 кг/м ³	Плотность 160 кг/м ³
1	ПС 50	30	0,54	0,87
2	ПС 75	30	0,78	1,18
		50	0,56	1,01
		70	0,47	0,94
3	ПС 100	30	0,81	1,24
		50	0,59	1,08
		70	0,49	1,03

Примечание. Допускается интерполяция по толщине заполнителя.

Заключение

1. Разработана методика и выполнены экспериментальные исследования по прогреву цементно-армированных и минераловатных плит в стационарном и нестационарном тепловых режимах. Методом параметрической оптимизации в расчетной модели конечно-элементного анализа определены зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры для цементно-армированных и минераловатных плит.

2. Усовершенствована методика экспериментальной оценки огнестойкости ненесущих перегородок путем внесения дополнительных точек регистрации температур по толщине перегородки, а также выполнены экспериментальные исследования по оценке огнестойкости фрагмента перегородки на стальном каркасе с применением обшивных листов из цементных армированных плит и заполнением минераловатным утеплителем.

3. Разработана расчетная модель оценки огнестойкости ненесущих перегородок с учетом полученных теплофизических характеристик составляющих материалов. Полученные расчетные значения показывают безопасный прогрев с точки зрения достижения предельного состояния по теплоизолирующей способности перегородки. Определены фактические пределы огнестойкости широкого класса перегородок с учетом переменной высоты поперечного сечения стоечного профиля, толщины и плотности внутреннего заполнителя.

4. Разработана инженерная методика оценки огнестойкости ненесущих перегородок с учетом переменных параметров основной расчетной модели.

ЛИТЕРАТУРА

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 // Вестник Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 139–152. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.139.
2. Schleifer, V. Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall: dissertation ETH Nr. 18156 / Vanessa Schleifer. – Zürich, 2009. – 147 s. DOI: 10.3929/ethz-a-005771863.
3. Just, A. Structural fire design of timber frame assemblies insulated by glass wool and covered by gypsum plasterboards: PhD engineering sci. diss / Alar Just. – Tallinn, 2010. – 160 p.
4. Кудряшов, В.А. Огнестойкость узлов сопряжений монолитных железобетонных плит перекрытия с балконными плитами с использованием изделий закладных комплексных типа «Консоль-Термо» / В.А. Кудряшов [и др.] // Сб. науч. трудов «Проблемы современного бетона и железобетона» – 2017. – Вып. 9. – С. 295–315.
5. Ботян, С.С. Экспериментально-расчетная методика оценки теплофизических характеристик строительных материалов с использованием камерной электропечи для решения задач огнестойкости / С.С. Ботян [и др.] // Вестник Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 5–19. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.5.
6. Кудряшов, В.А. Теплофизические характеристики цементных армированных плит для решения задач нестационарного высокотемпературного нагрева / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестник Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 327–334. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.327.
7. Litovsky, E. Measurement of thermophysical properties of fire-resistive and reactive materials. Urgent problems and solutions / E. Litovsky, V. Issouпов, J.I. Kleiman // Fire and materials. – 2016. – Vol. 41, Iss. 2. – Pp. 154–168. DOI: 10.1002/fam.2373.
8. 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 (44). – С. 88–102.

**Оценка огнестойкости каркасно-обшивных перегородок с использованием
теплофизических характеристик, полученных экспериментально-расчетным
способом в камерной электропечи**

**Assessment of fire resistance of frame-sheathing partitions using thermophysical
characteristics obtained experimentally by calculation in a chamber electric furnace**

Ботян Сергей Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Sergey S. Botyan

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Senior lecturer

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-2.160>

ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FRAME-SHEATHING PARTITIONS USING THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OBTAINED EXPERIMENTALLY BY CALCULATION IN A CHAMBER ELECTRIC FURNACE

Botyan S.S.

Purpose. Based on experimental studies and theoretical data, to develop a methodology for assessing the fire resistance of a wide class of partitions on a steel frame using sheathing sheets of cement-reinforced plates and filling with mineral wool insulation using thermophysical characteristics obtained experimentally by calculation in a chamber electric furnace.

Methods. The methods of finite elements, parametric optimization, and experimental studies are used.

Findings. A methodology has been developed and experimental studies have been carried out on the heating of building materials in stationary and non-stationary thermal conditions. The thermophysical characteristics of cement-reinforced and mineral wool slabs at elevated temperatures for solving fire resistance problems are determined. Experimental studies have been performed to evaluate the fire resistance of a fragment of the frame partition structure using sheathing sheets of reinforced cement slabs. A calculated finite element model was developed taking into account the thermophysical characteristics of the constituent materials and the dependences of heating a wide class of partitions were obtained. An engineering methodology has been developed for assessing the fire resistance of curtain walls, taking into account the variable cross-sectional height of the rack profile, the thickness and density of the internal filler.

Application field of research. The results can be used in the development of fire-resistant solutions for structural elements of buildings, as well as for assessing the fire resistance of frame partitions in the design and construction of buildings and structures.

Keywords: partition, fire resistance, thermophysical characteristics, experimental studies, calculation model, finite element method, parametric optimization, standard temperature curve.

(The date of submitting: April 30, 2020)

REFERENCES

1. Kudryashov V.A., Botyan S.S. Teploprovodnost' tsementnykh armirovannykh plit pri nestatsionarnom teplovom rezhime na osnove dannykh eksperimental'nykh issledovaniy i chislennogo modelirovaniya [Cement boards thermal conductivity based on experimental research and numerical simulation data in relation to nonstationary heat flows]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 2. Pp. 139–152. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.139.
2. Schleifer V. *Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall* [For the behaviour of room-closing multi-layer wood components in case of fire]: Dissertation ETH Nr. 18156. Zürich, 2009. 147 s. (deu). DOI: 10.3929/ethz-a-005771863.
3. Just Alar *Structural fire design of timber frame assemblies insulated by glass wool and covered by gypsum plasterboards*: PhD engineering sci. diss. Tallinn University of Technology, 2010. 160 p.
4. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Botyan S.S., Lupandin A.S. Ognestoykost' uzlov sopryazheniy monolitnykh zhelezobetonnykh plit perekrytiya s balkonnymi plitami s ispol'zovaniem izdelyiy zakladnykh kompleksnykh tipa «Konsol'-Termo» [Fire resistance of interfaces of monolithic reinforced concrete floor slabs with balcony slabs using integrated embedded products of the type «Console-Thermo»]. *Collection of scientific works «Problemy sovremennogo betona i zhelezobeta»*, 2017. No. 9. Pp. 295–315. (rus)
5. Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Nguyen T.K. Eksperimental'no-raschetnaya metoda otsenki teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materi-alov s ispol'zovaniem kamernoy elektropечи dlya resheniya zadach ognestoykosti [Experimental-computing technique of evaluating thermophysical properties of building materials with a muffle electric furnace for solving fire resistance problems]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 1. Pp. 5–19. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.5.
6. Kudryashov V.A., Botyan S.S., Danilova-Tret'yak S.M., Nikolaeva K.V. Teplofizicheskie kharakteristiki tsementnykh armirovannykh plit dlya resheniya zadach nestatsionarnogo vysokotemperaturnogo nagreva [Cement boards thermophysical characteristics for solving the tasks of nonstationary high-

- temperature heating]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 3. Pp. 327–334. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.327.
7. Litovsky E., Issoufov V., Kleiman J.I. Measurement of thermophysical properties of fire-resistant and reactive materials. Urgent problems and solutions. *Fire and materials*, 2016. Vol. 41, Iss. 2. Pp. 154–168. DOI: 10.1002/fam.2373.
 8. Kudryashov V.A., Botyan S.S., Zhamoydik S.M. Ognestoykost' peregorodok na metallicheskom karkase s primeneniem obshivnykh listov iz tsement-nykh armirovannykh плит i zapolneniem mineralovatnym uteplytelem pri standartnom ognevom rezhime pozhara [Fire resistance of partitions on a metal frame with the use of sheathing sheets made of reinforced cement slabs and filling with mineral wool insulation under standard fire conditions]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2018. No. 2 (44). Pp. 88–102. (rus)