

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-3.268>

УДК 614.841.332:624.074.5:[624.014.2+624.012.45]

ОГНЕЗАЩИТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИПСОВЫХ ПЛИТ KNAUF FIREBOARD ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО СОРТАМЕНТА

Басакович И.А., Ботян С.С., Жамойдик С.М.,
Кудряшов В.А., Осяев В.А., Полевода И.И.

Цель. Установить зависимости огнезащитной эффективности – времени достижения критической температуры 500 °С при стандартном огневом воздействии – от геометрических размеров и формы поперечного сечения и толщины огнезащиты из гипсовых плит Knauf Fireboard для вертикальных двутавров и труб стальных горячекатаных.

Методы. Использование расчетных компьютерных моделей, взаимоувязанных с результатами огневых испытаний огнезащитной эффективности гипсовых плит Knauf Fireboard для вертикальных стальных профилей различного сортамента.

Результаты. Разработаны трехмерные расчетные компьютерные модели для моделирования теплообмена с газовой средой пожара для поперечных сечений вертикальных стальных профилей, защищенных огнестойкими гипсовыми плитами Knauf Fireboard. Установлены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard от их толщины и температуры. Установлены зависимости огнезащитной эффективности – времени достижения критической температуры 500 °С при стандартном огневом воздействии – от геометрических размеров и формы поперечного сечения и толщины огнезащиты из гипсовых плит Knauf Fireboard для вертикальных двутавров и труб стальных горячекатаных. Установлено, что время прогрева стальных профилей с огнезащитой из гипсовых плит Knauf Fireboard зависит не только от приведенной толщины металла (коэффициента сечения), но и геометрических размеров и формы поперечного сечения.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы для оценки огнестойкости стальных конструкций с конструктивной огнезащитой из гипсовых плит Knauf Fireboard.

Ключевые слова: огнестойкие гипсовые плиты, конструктивная огнезащита, стандартный пожар, эффективный коэффициент теплопроводности, компьютерное моделирование, теплообмен.

(Поступила в редакцию 19 июля 2019 г.)

Введение. Огнестойкость конструкций является одним из показателей, определяющих область их применения в строительстве. Для стальных конструкций с огнезащитой заданной толщины, как правило, огнестойкость оценивают на основании результатов испытаний по определению огнезащитной эффективности средства по металлу (далее – огнезащитная эффективность). Время прогрева стандартного образца (двутавр № 20 по ГОСТ 8239¹) до критической температуры 500 °С принимают в качестве предела огнестойкости любого сортамента. Однако скорость нагрева стальных профилей при пожаре зависит не только от толщины огнезащиты, но и от геометрических размеров и формы поперечного сечения стальной конструкции. Поэтому в ряде стандартов^{2, 3, 4, 5, 6} при определении прогре-

¹ Межгосуда Двутавры стальные горячекатаные: ГОСТ 8239. – Введ. 27.09.1989. – Минск: ИПК издательство стандартов, 1989. – 12 с.

² Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen: ENV 13381-4:2002. Teil 4. Brandschutzmaßnahmen für Stahlbauteile Deutsche Fassung.

³ Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members: ENV 13381-2:2002. – Part 2: Vertical protective membranes.

⁴ Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1–2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1993-1-2:2009 [Электронный ресурс] // Полнотекстовая информационно-поисковая система «Строй-ДОКУМЕНТ». – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск: НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ва стальных конструкций с огнезащитой принято использовать физически упрощенную величину – «приведенная толщина металла»^{7, 8}, либо обратный ей (возведенный в –1 степень) параметр – «коэффициент сечения»⁹. Таким образом, вид сортамента стальной конструкции учитывается косвенно, при этом не принимается во внимание коэффициент облученности элементов стального сечения, разноудаленных от внутренней поверхности огнезащиты, хотя вклад лучистого теплообмена является существенным для прогрева стальных конструкций до критической температуры.

Одним из наиболее объективных способов расчетной оценки прогрева стальных конструкций согласно^{10, 11} является моделирование процесса теплообмена между газовой средой пожара и рассчитываемой конструкцией. Такой подход позволяет учесть влияние геометрических размеров и формы сечения стальных конструкций (сортамента) и коэффициента облученности элементов стального сечения на скорость их прогрева до критической температуры. Однако для качественного моделирования теплообмена и прогрева стальных конструкций с огнезащитой при пожаре необходимы значения эффективных теплофизических характеристик в широком диапазоне температур от 20 вплоть до 1200 °С.

В настоящей статье рассмотрены стальные конструкции, защищенные огнестойкими гипсовыми плитами производства Knauf Fireboard. Для получения эффективных теплофизических характеристик рассматриваемой огнезащиты использованы результаты огневых испытаний – как собственных, так и проведенных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России.

Экспериментальные данные. В 2008–2009 гг. РУП «Институт НИПТИС им. Атаева С.С.» в рамках Государственной научно-технической программы «Строительные материалы и технологии» проводились исследования конструктивной огнезащиты с применением огнестойких гипсовых плит типа Knauf Fireboard [1]. В них принимали участие специалисты Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. Часть результатов исследований опубликована [2–4].

В рамках научно-исследовательской работы проведены огневые испытания следующих типов конструктивной огнезащиты из гипсовых огнестойких плит: однослойных, толщиной 15 и 25 мм; двухслойных, толщиной 40 (20 + 20) и 50 (25 + 25) мм.

Огневые испытания по определению огнезащитной эффективности образцов стальных колонн проводили по методике, изложенной в ГОСТ 30247.0¹² и НПБ 12¹³, что в настоящее время соответствует СТБ 11.03.02¹⁴ и ГОСТ Р 53295¹⁵.

⁵ Инструкция по определению необходимой толщины огнезащитной системы «ЕТ Металл», выполненной из плит минераловатных теплоизоляционных огнезащитных EURO-ЛИТ плотностью 150 кг/м³ ТУ 5762-011-08621635-2009 с изм. 1 и огнезащитного состава «Плазас» ТУ 5765-013-70794668-2006 в зависимости от приведенной толщины металла, критической температуры стальной строительной конструкции и требуемого предела огнестойкости: утв. нач. ФГБОУ ВПО Уральский ин-т ГПС МЧС России 26.09.2014. – Екатеринбург: ФГБОУ ВПО Уральский ин-т ГПС МЧС России, 2014. – 31 с.

⁶ Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными облицовками, выполненных из плит Кнауф-Файерборд ТУ 5742-006-01250242-2009 по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей ТУ 1121-012-04001508-2011. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – 40 с.

⁷ См. сн. 5 и 6.

⁸ Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Взамен П1-02 к СНБ 2.02.01-98; – введ. 12.06.2008 г. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2008. – 126 с.

⁹ См. сн. 2–4.

¹⁰ См. сн. 4.

¹¹ Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Ч. 1–2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250). – Введ. 10.12.2009. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 48 с.

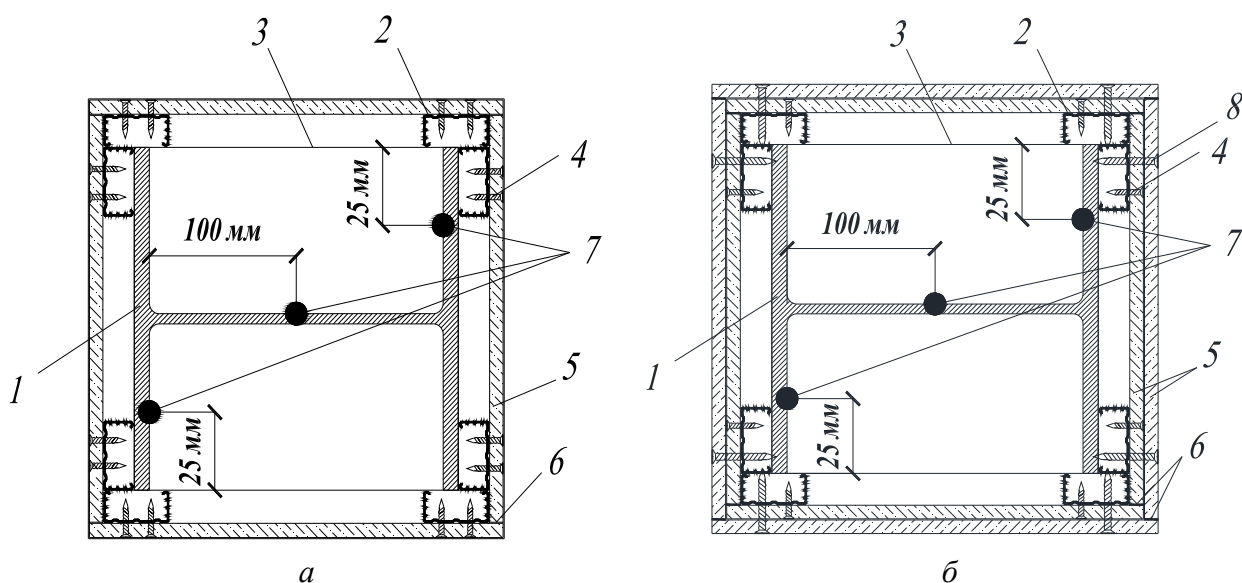
¹² Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.10.1998. – Взамен СТ СЭВ 1000-78. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 16 с.

¹³ Нормы пожарной безопасности Республики Беларусь. Огнезащитные средства для стальных конструкций. Общие требования. Методы определения огнезащитной эффективности: НПБ 12-2000. – Введ. 01.03.2000. – Отменены 01.01.2011 при введ. СТБ 11.03.02-2010. – Минск: НИИ ПБиЧС, 2001. – 9 с.

¹⁴ Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02-2010. – Введ. 20.10.2010. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2010. – 40 с.

Для модельных экспериментальных конструкций использовали двутавры стальные горячекатаные № 20 по ГОСТ 8239¹⁶ в виде консольных колонн высотой 1700 мм.

Огнезащиту модельных экспериментальных конструкций осуществляли следующим образом (рис. 1). По периметру вплотную к стальной колонне устраивали обрешетку из оцинкованных профилей, изготовленных из тонколистовой стали марки 08пс толщиной 0,5 мм. Обрешетка была образована четырьмя спаренными направляющими профилями ППН 27×28 (ППН 27/28) (всего – 8 отрезков профилей), расположенными в углах и соединенными между собой (в местах горизонтального стыка гипсовых плит) стоечными профилями ПП 27×60 (ПП 27/60) по три на каждую сторону (всего – 12 отрезков профилей). К профилям при помощи саморезов TN 25 длиной 35 (75) мм с шагом 250 мм крепили гипсовые огнестойкие армированные стекловолокном плиты Knauf Fireboard. Все межлистовые швы и метизы были зачеканены гипсовой шпатлевкой Knauf Fireboard-Spachtel. Минимальное расстояние (воздушное пространство) между внутренней поверхностью гипсовых плит и поверхностью двутавра составляло 27 мм.



1 – двутавр; 2 – направляющие профили ППН 27×28 (ППН 27/28); 3 – стоечные профили ПП 27×60 (ПП 27/60); 4 – стальные саморезы TN 25; 5 – огнестойкие гипсовые плиты; 6 – шпатлевка; 7 – термодатчики; 8 – стальные саморезы TN 25

**Рисунок 1. – Схема конструктивной огнезащиты стальных колонн:
а – с одним листом; б – с двумя листами**

Общую оценку температуры сечения стальных опытных образцов производили путем арифметического усреднения (в каждый момент времени испытаний) показаний трех термоэлектрических преобразователей (термопар), установленных в среднем поперечном сечении (относительно высоты стальной конструкции): на стенке и на внутренней поверхности каждой полки. Термопары были защищены от теплового излучения стальными уголками длиной не менее 850 мм, приваренными кромками к стальной конструкции. Схема расстановки термопар представлена на рисунке 1.

В качестве времени наступления предельного состояния стальных опытных образцов принимали момент достижения усредненной температуры значения 500 °С. Изменения усредненной температуры модельных экспериментальных конструкций представлены на рисунке 2.

¹⁵ Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности: ГОСТ Р 53295-2009. – Введ. 01.01.2010. – М.: Стандартинформ, 2009. – 22 с.

¹⁶ См. сн. 1.

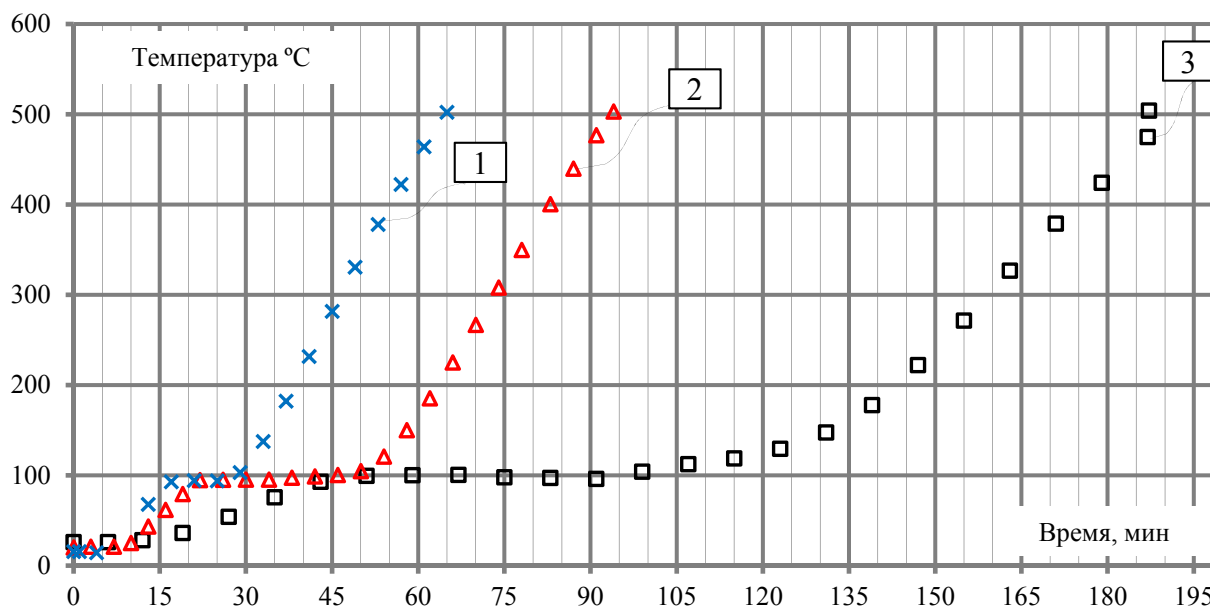


Рисунок 2. – Зависимость усредненной температуры стальных опытных образцов от времени стандартного огневого воздействия и толщины огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard: 1 – 15 мм; 2 – 25 мм; 3 – 50 мм.

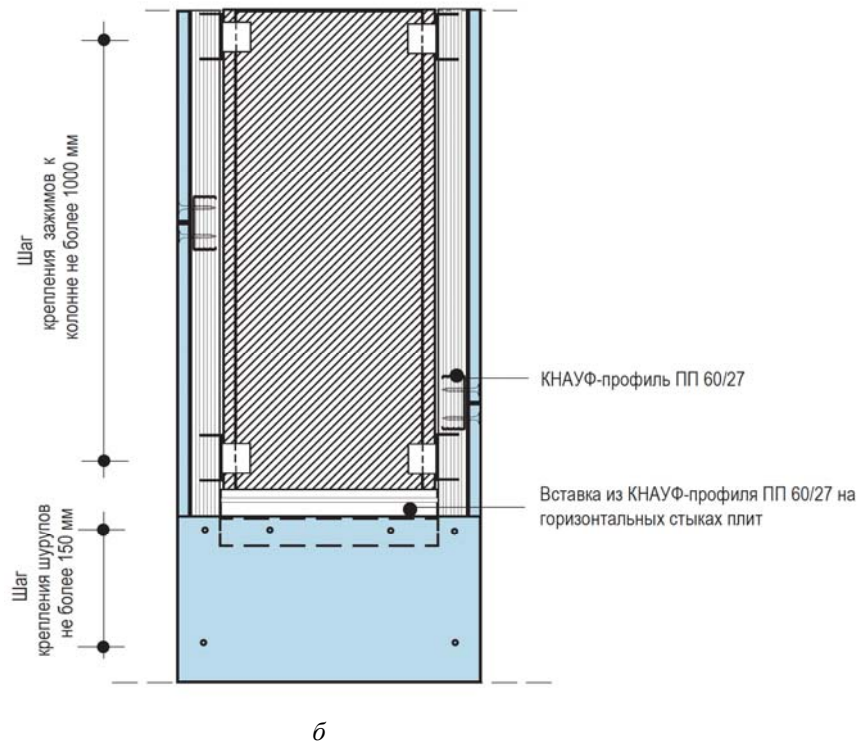
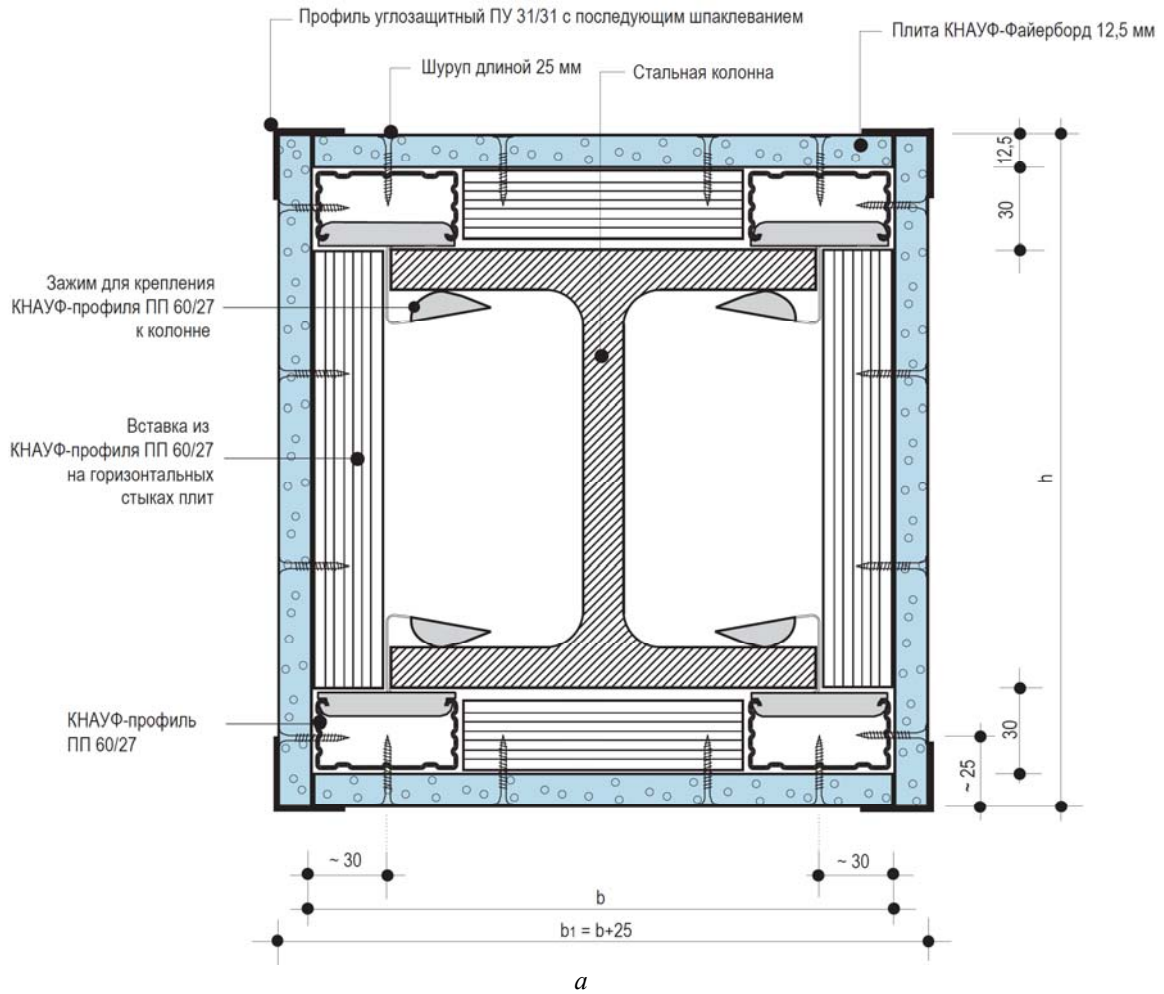
На рисунке 2 заметно замедление прогрева на уровне 90...100 °C, что обусловлено испарением физически и химически связанной воды составляющих гипсовой огнезащиты. После испарения влаги прогрев огнезащиты характеризуется постоянной скоростью увеличения температуры [2].

Время огнезащитной эффективности для образцов стальных колонн, защищенных гипсовыми огнестойкими плитами с толщиной огнезащиты 15, 25 и 50 мм, составляет соответственно 65, 94 и 188 мин [2].

Конструкция экспериментальных образцов, испытанных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России, была во многом аналогична приведенным в работе [1]. В качестве облицовочного материала стальных конструкций при проведении огневых испытаний использовали аналогичные негорючие гипсовые плиты Knauf Fireboard, выпускаемые в соответствии с ТУ-5742-006-01250242-2009.

Для устройства стального каркаса применяли тонкостенные оцинкованные КНАУФ-профили ПП 60/27, выпускаемые в соответствии с ТУ 1121-004-04001508-2003. Для защиты углов облицовки применяли КНАУФ-профиль углозащитный ПУ 31/31 по ТУ 1121-004-04001508-2003. При необходимости соединения КНАУФ-профилей ПП 60/27 по длине применяли удлинитель ПП-профилей (рис. 3).

Для заделки стыков крепления углозащитного профиля, а также поверхностного шпаклевания при необходимости применяли шпатлевочные смеси Knauf Fireboard-Spachtel или Knauf Uniflott. Для заделки горизонтальных стыков применяли стекловолоконную армирующую ленту для стыков плит Knauf Fireboard, используемую вместе со шпатлевочной смесью.



а – поперечное сечение конструкции; б – вид сбоку
Рисунок 3. – Схема каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит Knauf Fireboard толщиной 12,5 мм

Огневые испытания были проведены для следующих вариантов огнезащитной облицовки: однослойная обшивка из плит Knauf Fireboard толщиной 12,5 или 20 мм; двухслойная обшивка толщиной 40 (20 + 20); 25 (12,5 + 12,5) и 32,5 (20 + 12,5) мм; трехслойная обшивка толщиной 45 (20 + 12,5 + 12,5) и 52,5 (20 + 20 + 12,5) мм, закрепленные с помощью шурупов на стальном каркасе из КНАУФ-профилей ПП 60/27. Крепление КНАУФ-профилей ПП 60/27 к вертикальным профилям осуществляли с помощью специальных зажимов.

Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 30247.0¹⁷ и ГОСТ Р 53295¹⁸ без нагрузки. В таблице 1 представлены результаты испытаний, приведенные в Инструкции по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными облицовками, выполненных из плит Knauf Fireboard¹⁹.

Таблица 1. – Результаты испытаний по определению огнезащитной эффективности огнестойких гипсовых плит, проведенные в ФГБУ ВНИИПО МЧС России

№ стального профиля, ГОСТ	Приведенная толщина металла, мм (контур/короб)	Толщина огнезащиты, мм	Время достижения критической температуры 500 °С
№ 20 ГОСТ 8239	3,4/4,5	12,5	50
№ 20 ГОСТ 8239	3,4/4,5	20	78
№ 20Б1 АСЧМ 20	3,4/4,5	32,5 (20+12,5)	114
№ 20 ГОСТ 8239	3,4/4,5	40 (20+20)	140
№ 20Б1 АСЧМ 20	3,4/4,5	45 (20+12,5+12,5)	171
№ 20 ГОСТ 8239	3,4/4,5	52,5 (20+20+12,5)	>180 (344 °С)
№ 30Б2 АСЧМ 20	3,9/5,2	25 (12,5+12,5)	87
№ 40Б2 АСЧМ 20	5,3/7,0	12,5	68
№ 40Б2 АСЧМ 20	5,3/7,0	25 (12,5+12,5)	110
№ 40К2 АСЧМ 20	9,2/13,7	12,5	95

Определение теплофизических характеристик огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard. На основании экспериментальных данных в программном комплексе ANSYS разработана трехмерная расчетная модель теплообмена с газовой средой пожара для поперечных сечений вертикальных стальных профилей для получения эффективных теплофизических характеристик огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard толщиной 15...50 мм.

В качестве основы для моделирования был принят отрезок двутавра стального горячекатаного № 20 по ГОСТ 8239²⁰ с толщиной огнезащиты в виде гипсовых плит Knauf Fireboard толщиной 15...50 мм. Во всех случаях расстояние между внутренней поверхностью конструктивной огнезащиты и стенками двутавра составляло 27 мм, что соответствует использованию несущего каркаса для огнезащиты из тонкостенного профиля минимальной толщины – направляющих профилей ППН 27×60 (ППН 27/60) либо стоечных профилей ПП 27×28 (ПП 27/28) (рис. 1). При этом тонкостенный стальной каркас не включали в расчетную модель, принимая в запас нагрев профиля.

Общий вид модели представлен на рисунке 4. В ходе моделирования для получения результатов расчета достаточной точности модель сечения стальной стержневой конструкции и конструктивной огнезащиты были разбиты на конечные элементы преимущественно квадратной формы в поперечнике. При этом конструктивная огнезащита была разбита на более мелкие конечные элементы – с максимальным размером грани 3 мм. Такой подход обусловлен большим перепадом температуры по толщине огнезащиты при огневом воздействии. Модель стального сечения была поделена на более крупные элементы – с максимальным размером грани преимущественно 5 мм. Расчетная модель принята трехмерной,

¹⁷ См. сн. 12.

¹⁸ См. сн. 16.

¹⁹ См. сн. 6.

²⁰ См. сн. 1.

при этом для ускорения процесса расчета толщина модели принята равной 50 мм без деления на конечные элементы по толщине, модель во всех случаях была толщиной в один конечный элемент. Таким образом, конечные элементы представляли собой преимущественно параллелепипеды размерами 3,0×3,0×50 и 5,0×5,0×50 мм.

Для расчетной модели были заданы начальные и граничные условия согласно ТКП EN 1991-1-2²¹.

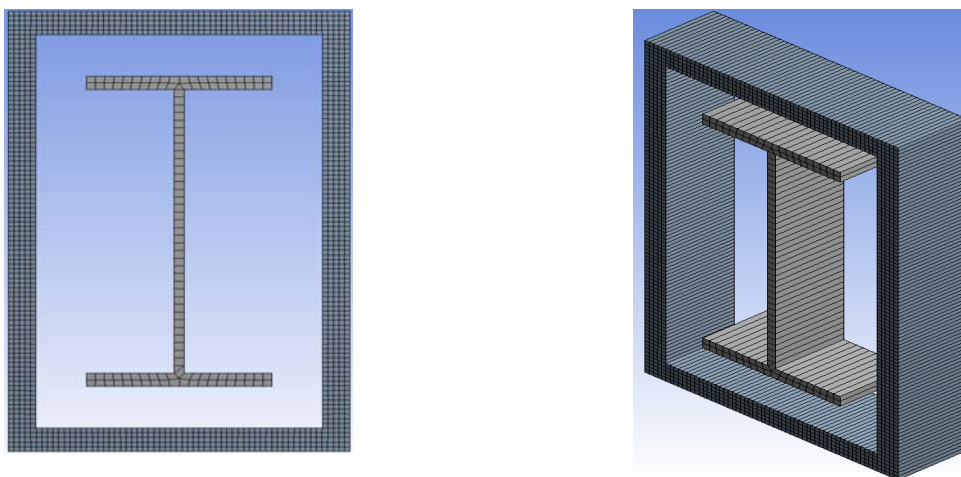


Рисунок 4. – Модель вертикальной стальной конструкции, защищенной огнестойкими гипсовыми плитами Knauf Fireboard

Начальные условия: температура в расчетном сечении конструкции и огнезащиты одинакова и равна температуре окружающей среды (22 °С).

Граничные условия:

1. Изменение температуры газовой среды происходит по режиму стандартного пожара (при наличии экспериментальных данных – с учетом реальных значений среднеобъемных температур) по формуле

$$T_{f(\tau)} = 345 \cdot \lg(8\tau + 1) + T_0, \quad (1)$$

где τ – длительность пожара, мин; 8 – эмпирический коэффициент, мин⁻¹; 345 – эмпирический коэффициент, °С; T_0 – температура окружающего воздуха в начальный момент пожара, °С.

2. Коэффициент теплоотдачи конвекцией α на внешней поверхности огнезащиты принимали равным 25 Вт · м⁻² · °С⁻¹ на всем протяжении огневого воздействия²².

3. Степень черноты поверхности огнестойких гипсовых плит принимали равной 0,8; степень черноты пожара – 1,0; степень черноты стальной поверхности – 0,7²³.

4. Теплообмен между поверхностью стальной колонны и огнестойкими гипсовыми плитами происходит исключительно посредством излучения.

5. Тепловой поток, перпендикулярный торцам модели, считали равными нулю, принимая во внимание длину конструкций. Таким образом, в моделируемой конструкции рассматривался только тепловой поток, параллельный плоскости поперечного сечения.

На основании работы [4] и по результатам моделирования было установлено, что для сходимости в указанном диапазоне расчетных и экспериментальных данных прогрева испытанных конструкций необходимо использовать теплофизические характеристики огнестойких гипсовых плит, изменяющиеся не только от температуры, но и от их толщины.

Для определения эффективных теплофизических характеристик в программной системе конечно-элементного анализа использовалась модель параметрической оптимизации

²¹ См. сн. 11.

²² См. сн. 11.

²³ См. сн. 4, 11.

[7–9]. В качестве параметрического показателя (входной параметр) был принят коэффициент теплопроводности материала. В качестве известных переменных параметров модели использовались величины температур исследуемых строительных материалов в определенный интервал времени (известные экспериментальные данные). В поверхности отклика задавался диапазон изменения переменных проекта, вид определения оптимальных значений и вариативность расчетов. В оптимизационной модели задана возможная величина отклика переменных состояний (границы отклонений расчетных и экспериментальных значений либо точное значение). Программное средство выполняло серию итераций, в течение каждой итерации выполнялся расчет начального проекта, оценивалось соответствие результатов расчета определенным критериям поиска, и при необходимости осуществлялось изменение проекта. Этот процесс продолжался до тех пор, пока не были выполнены заданные условия.

Значение полученного эффективного коэффициента теплопроводности огнестойких гипсовых плит в зависимости от их толщины и температуры, а также значение объемной теплоемкости приведены в таблице 2.

В таблице 3 представлены результаты расчета с использованием полученных эффективных теплофизических характеристик в сопоставлении с имеющимися экспериментальными данными. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 5 % для исходных экспериментальных данных, полученных в Республике Беларусь, и 15 % – для экспериментальных данных ФГУ ВНИИПО МЧС России.

Таблица 2. – Эффективные теплофизические характеристики огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard

Температура, °С	Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м×°С) при толщине плит, мм			Температура, °С	Эффективная объемная теплоемкость, 10 ³ Дж/(кг×°С)
	12,5–20	25–30	32,5–50		
0	0,2000	0,2000	0,2000	0	1000
130	1,8000	1,8000	1,8000	70	1000
140	0,3000	0,3375	0,3750	100	14000
310	0,1250	0,1406	0,1563	150	15500
700	0,1600	0,1800	0,2000	160	1000
800	0,3200	0,3600	0,4000	1200	1000
1200	0,4500	0,5063	0,5625		

Таблица 3. – Результаты расчетных и экспериментальных данных по определению огнезащитной эффективности огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard

Профиль	Приведенная толщина металла, мм	Толщина огнезащиты, мм	Время достижения критической температуры 500 °С на поверхности стального сечения, мин		
			Эксперимент	Расчет	Δ, %
№ 20 ГОСТ 8239	4,5	12,5	50	52	–3,85
40Б2 АСЧМ 20	7,0	12,5	68	65	4,62
40К2 АСЧМ 20	13,7	12,5	95	93	2,15
№ 20 ГОСТ 8239	4,5	15	65	64	1,56
№ 20 ГОСТ 8239	4,5	20	78	77	1,30
№ 20 ГОСТ 8239	4,5	25	94	94	0,00
40Б2 АСЧМ 20	7,0	25	110	99	11,11
№ 20Б1 АСЧМ 20	4,5	32,5	114	110	3,64
№ 20 ГОСТ 8239	4,5	40	140	140	0,00
№ 20Б1 АСЧМ 20	4,5	45	171	159	7,54
№ 20 ГОСТ 8239	4,5	50	187	183	2,19
№ 20 ГОСТ 8239	4,5	52,5	>180 (344 °С)	167 (344 °С)	7,78

Примечание. Приведенная толщина металла рассчитана для коробчатого сечения²⁴.

²⁴ См. сн. 6.

Влияние сортамента стальных конструкций на их прогрев. Для получения закономерности прогрева массива стальных сечений различной конфигурации до критической температуры в зависимости от толщины конструктивной огнезащиты использован подход на основе физически упрощенной величины – «приведенной толщины металла» («коэффициента сечения»).

Коэффициент сечения (m^{-1}) согласно п. 4.2.5.2(1) ТКП EN 1993-1-2²⁵ определяется по формуле:

$$\text{Коэффициент сечения} = A_p / V, \quad (2)$$

где A_p – площадь обогреваемой поверхности стальной конструкции, m^2 либо на единицу длины – m^2/m ; V – объем обогреваемой поверхности стальной конструкции, m^3 либо на единицу длины – m^3/m .

Приведенная толщина металла (m) (на практике принято выражать в mm), согласно данным А.И. Яковлева [5] и п. 7.11 Приложения Л ТКП 45-2.02-110²⁶ определяется по формуле

$$\text{Приведенная толщина металла} = V / A_p. \quad (3)$$

Для конструктивной огнезащиты, предполагающей образование внутренних воздушных пустот, площадь обогреваемой поверхности A_p (либо периметр обогреваемого сечения P) в соответствии с положениями²⁷ [6] определяют по так называемому «коробчатому сечению».

Исходная расчетная модель, использованная для определения теплофизических характеристик огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard, была преобразована в массив расчетных моделей для различных видов стальных профилей:

– двутавров стальных горячекатаных, соответствующих ГОСТ 8239²⁸, ГОСТ 26020²⁹ и СТО АСЧМ 20-93³⁰;

– труб стальных квадратных, прямоугольных и круглых (горячекатаных), соответствующих ГОСТ 8639³¹, ГОСТ 8645³², ГОСТ 30245³³, ГОСТ 10704³⁴, ГОСТ 25577³⁵, ГОСТ Р 54157³⁶, ГОСТ 8732³⁷.

²⁵ См. сн. 4.

²⁶ См. сн. 8.

²⁷ См. сн. 4 и 6.

²⁸ См. сн. 1.

²⁹ Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент: ГОСТ 26020-83. – Введ. 01.01.1986. – Минск: ИПК издательство стандартов, 1986. – 5 с.

³⁰ Стандарт ассоциации предприятий и организаций по стандартизации продукции черной металлургии. Прокат стальной сортовой фасонного профиля. Двутавры горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия: СТО АСЧМ 20-93. – Введ. 01.01.1994. – Минск: Ассоциация Черметстандарт, 1994. – 9 с.

³¹ Трубы стальные квадратные. Сортамент: ГОСТ 8639-82. – Введ. 01.01.1983. – Минск: ИПК изд. стандартов, 1983. – 5 с.

³² Трубы стальные прямоугольные. Сортамент: ГОСТ 8645-69. – Введ. 01.01.1969. – Минск: ИПК изд. стандартов, 1969. – 14 с.

³³ Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций: ГОСТ 30245-2003. – Введ. 01.10.2003. – М.: Межгос. науч.-тех. комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2001. – 8 с.

³⁴ Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент: ГОСТ 10704-91. – Введ. 01.01.1993. – М.: Стандартиформ, 2007. – 7 с.

³⁵ Профили стальные гнутые замкнутые квадратные и прямоугольные. Технические условия: ГОСТ 25577-83. – Введ. 01.01.1984. – Минск: ИПК издательство стандартов, 1984. – 5 с.

³⁶ Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия: ГОСТ Р 54157-2010. – Введ. 01.08.2011. – М.: Стандартиформ, 2011. – 74 с.

³⁷ Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент: ГОСТ 8732-78. – Введ. 01.01.1979. – М.: Стандартиформ, 2007. – 9 с.

Часть результатов расчета, выраженных в виде зависимости времени достижения критической температуры 500 °С от коэффициента сечения (m^{-1}), толщины огнезащиты (мм) и вида вертикальных стальных профилей, представлена на рисунке 5.

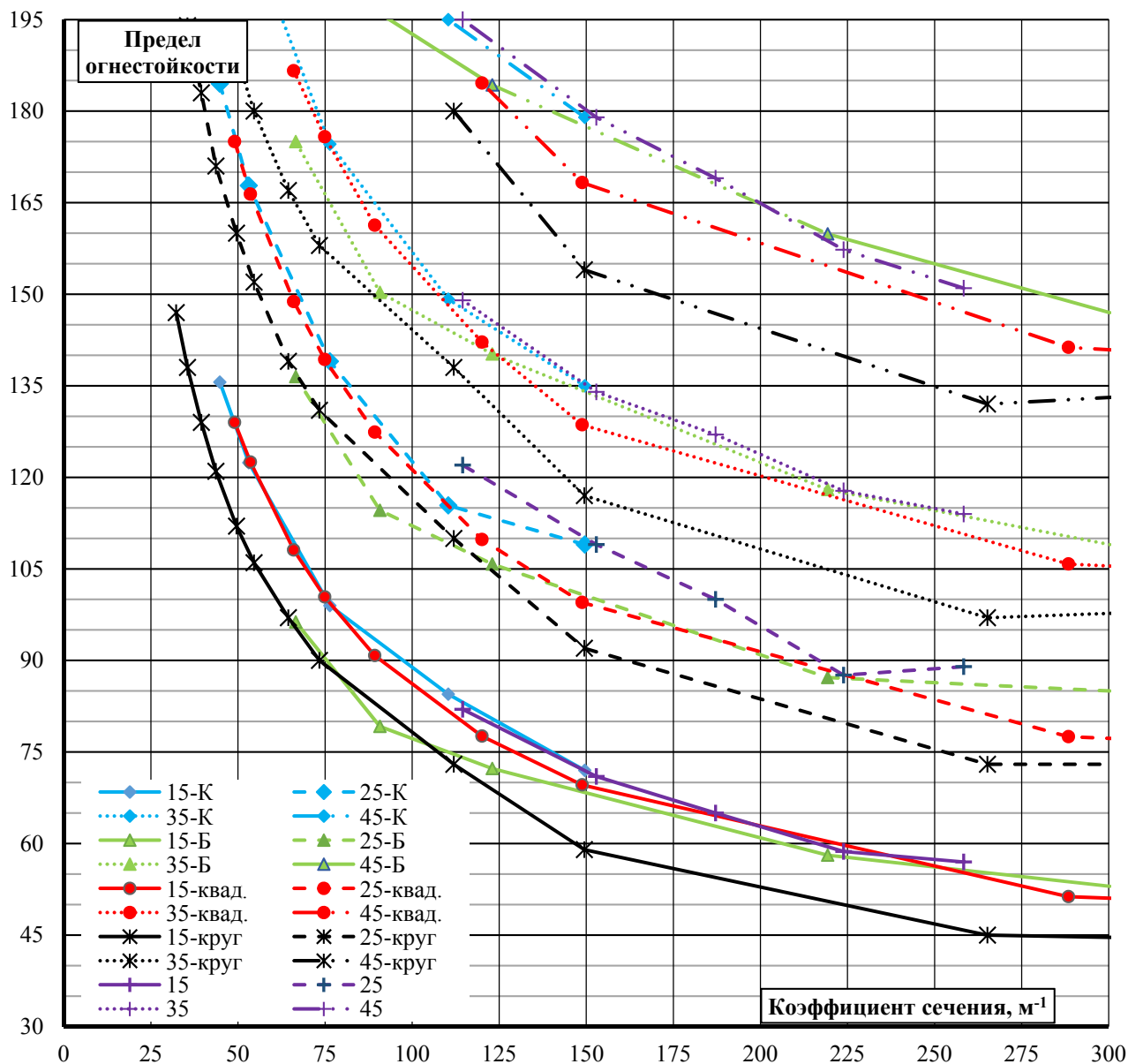


Рисунок 5. – Зависимость времени достижения критической температуры 500 °С от коэффициента сечения (m^{-1}) и толщины огнезащиты из гипсовых плит Knauf Fireboard (мм) вертикальных стальных профилей

На рисунке 5 в легенде применена следующая структура обозначений:

- численное обозначение в начале – толщина огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard в мм;
- К – двутавры стальные горячекатаные колонные, соответствующие ГОСТ 26020 и СТО АСЧМ 20-93³⁸;
- Б – двутавры стальные горячекатаные балочные, соответствующие ГОСТ 26020 и СТО АСЧМ 20-93³⁹;

³⁸ См. сн. 29 и 30.

³⁹ См. сн. 29 и 30.

– квад. – трубы стальные квадратные и прямоугольные (горячекатаные), соответствующие ГОСТ 8639, ГОСТ 8645, ГОСТ 30245, ГОСТ 10704, ГОСТ 25577, ГОСТ Р 54157⁴⁰;

– круг. – трубы круглые (горячекатаные), соответствующие ГОСТ 10704, ГОСТ Р 54157, ГОСТ 8732⁴¹;

– без буквенного обозначения – двутавры стальные горячекатаные, соответствующие ГОСТ 8239⁴².

Каждый маркер, указанный на рисунке 5, соответствует расчетному либо (при наличии такового) экспериментальному значению времени достижения критической температуры стальной конструкции, равной 500 °С. Точки, соответствующие конструкциям с одной и той же толщиной огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard, соединены линиями одного цвета и вида. Линии указаны в легенде в виде значений толщины огнестойких гипсовых плит в мм.

Как следует из рисунка 5, время прогрева до критической температуры 500 °С вертикальных стальных профилей зависит не только от коэффициента сечения и толщины огнестойких гипсовых плит, но и от вида сортамента – от геометрической формы поперечного сечения. Это обусловлено разбросом коэффициента облученности для элементов стального сечения, разноудаленных от внутренней поверхности огнезащиты. Поэтому для более точного расчета целесообразно учитывать также вид профиля: двутавры балочные либо колонные, трубы прямоугольные либо круглые.

Заключение. С использованием экспериментальных данных разработаны трехмерные расчетные компьютерные модели для моделирования теплообмена с газовой средой пожара для поперечных сечений вертикальных стальных профилей, защищенных огнестойкими гипсовыми плитами Knauf Fireboard толщиной 15...50 мм. Установлены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости огнестойких гипсовых плит Knauf Fireboard от их толщины и температуры. Установлены зависимости огнезащитной эффективности – времени достижения критической температуры 500 °С при стандартном огневом воздействии – от геометрических размеров и формы поперечного сечения и толщины огнезащиты из гипсовых плит Knauf Fireboard для вертикальных двутавров и труб стальных горячекатаных.

На основании данных моделирования установлено, что время прогрева до критической температуры 500 °С вертикальных стальных профилей зависит не только от коэффициента сечения и толщины огнестойких гипсовых плит, но и от вида сортамента – от геометрической формы поперечного сечения. Это обусловлено разбросом коэффициента облученности для элементов стального сечения, разноудаленных от внутренней поверхности огнезащиты. Поэтому для более точного расчета целесообразно учитывать также вид профиля: двутавры балочные либо колонные, трубы прямоугольные либо круглые.

В настоящей работе использованы алгоритмы определения теплофизических характеристик плитных материалов, разработанные при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору № Ф18В-006 от 25.01.2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Провести исследования, разработать и внедрить материалы и технические решения конструктивной огнезащиты стальных несущих элементов зданий с повышением предела огнестойкости перекрытий до 90 минут, каркасов до 120 минут, разработать рекомендации по расчёту и проектированию огнезащиты стальных конструкций [Электронный ресурс]: отчёт о НИР (заключ.) / Государственное предприятие «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С.»; рук. – В.М. Пилипенко; исполн.: Р.В. Кузьмичев, А.П. Пашков [и др.]. – Минск, 2010. – 75 с. – № ГР 20081155.

⁴⁰ См. сн. 31–36.

⁴¹ См. сн. 34 и 36–37.

⁴² См. сн. 1.

2. Полевода, И.И. Моделирование огнестойкости стальных элементов с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, А.Г. Иваницкий, С.М. Жамойдик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2010. – № 2 (12). – С. 39–46.
3. Жамойдик, С.М. Методология оценки огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой, расположенных по периметру помещения / С.М. Жамойдик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 2 (24). – С. 39–51.
4. Жамойдик, С.М. Огнестойкость стальных колонн с конструктивной огнезащитой: дис. канд. тех. наук: 05.26.03 / С.М. Жамойдик. – Минск, 2017. – 129 л.
5. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
6. Fire protection for structural steel in buildings / Association for Specialist Fire Protection in conjunction with Fire Test Study Group; com. B. Robinson. – Aldershot, 2004. – 162 p.
7. 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 // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 327–334. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.327.
8. 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 Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 139–152. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.139.
9. Полевода, И.И. Экспериментальные исследования огнестойкости стальных каркасных конструкций с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, В.А. Кудряшов, С.М. Жамойдик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 13–27.

Огнезащитная эффективность гипсовых плит Knauf Fireboard для вертикальных стальных профилей различного сортамента

Knauf Fireboard fire protection efficiency for vertical steel profiles of various cross section shapes

Басакович Иван Андреевич

Дзержинский районный отдел по чрезвычайным ситуациям Минского областного управления Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, инспекция надзора и профилактики, инспектор

Адрес: 222720, Беларусь, Минская обл., Дзержинск, ул. Протасова, 9
e-mail: basakovich00@mail.ru

Ivan A. Basakovich

Dzerzhinsk District Department for Emergencies of the Minsk Regional Department of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Inspection of Supervision and Prevention, Inspector

Address: 222720, Belarus, Minsk region, Dzerzhinsk, st. Protasov, 9
e-mail: basakovich00@mail.ru

Ботян Сергей Сергеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», кафедра пожарной безопасности, старший преподаватель

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: aseckis@mail.ru

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: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: aseckis@mail.ru

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», кафедра пожарной безопасности, доцент

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

Sergey M. Zhamoydik

PhD in Technical Sciences

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

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», отдел научной и инновационной деятельности, начальник отдела

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: vadkud@gmail.com

Vadim A. Kudryashov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Department of Scientific and Innovation Activity, Head of Department

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: vadkud@gmail.com

Осяев Владимир Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», кафедра пожарной безопасности, доцент

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: vladimir_osyaev@mail.ru

Vladimir A. Osyayev

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

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

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: vladimir_osyaev@mail.ru

Полевода Иван Иванович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», начальник университета

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: ip@ucp.by

Ivan I. Polevoda

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Head of University

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: ip@ucp.by

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-3.268>

KNAUF FIREBOARD FIRE PROTECTION EFFICIENCY FOR VERTICAL STEEL PROFILES OF VARIOUS CROSS SECTION SHAPES

**Basakovich I.A., Botyan S.S., Zhamoydik S.M.,
Kudryashov V.A., Osyaev V.A. Polevoda I.I.**

Purpose. To establish the dependences of the fire protection efficiency – the time to reach a critical temperature of 500 °C under standard fire curve – on the geometric dimensions and cross-section shapes and Knauf Fireboard fire protection thickness for vertical hot-rolled I-beams and steel pipes.

Methods. Computational models were applied interconnected with the results of Knauf Fireboard fire protection efficiency tests for vertical steel profiles of various cross-section shapes.

Results. Three-dimensional computational models have been developed for simulating heat exchange with a fire gas environment for vertical steel profiles cross sections protected by Knauf Fireboard. The dependences of the Knauf Fireboard effective thermal conductivity coefficient and the volumetric heat capacity on its thickness and temperature were established. The dependences of the fire protection efficiency – the time to reach a critical temperature of 500 °C under standard fire curve – were established on the geometric dimensions and cross-section shapes and Knauf Fireboard fire protection thickness for vertical hot-rolled I-beams and steel pipes. It has been found that the warming time of steel profiles with Knauf Fireboard fire protection depends not only on the reduced to plate metal thickness (section factor), but also on the geometric dimensions and cross-section shapes.

Application field of research. The research results can be used to assess the fire resistance of steel structures with structural Knauf Fireboard fire protection.

Keywords: fire protection gypsum boards, structural fire protection, standard fire curve, effective thermal conductivity, computer modeling, heat transfer.

(The date of submitin July 19, 2019)

REFERENCES

1. Pilipenko V.M., Kuz'michev R.V., Pashkov A.P. et al. *Provesti issledovaniya, razrabotat' i vnedrit' materialy i tekhnicheskie resheniya konstruksionnoy ognezashchity stal'nykh nesushchikh elementov zdaniy s povysheniem predela ognestoykosti perekrytiy do 90 minut, karkasov do 120 minut, razrabotat' rekomendatsii po raschetu i proektirovaniyu ognezashchity stal'nykh konstruksiy* [Conduct research, develop and implement materials and technical solutions for structural fire protection of steel bearing elements of buildings with increasing the fire resistance of floors up to 90 minutes, frames up to 120 minutes, to develop recommendations for the design and calculation of fire protection of steel structures]: report (final). State Enterprise «Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S.S.». Minsk, 2010. 75 p. State registration No. 20081155.
2. Polevoda I.I., Ivanitskiy A.G., Zhamoydik S.M. Modelirovanie ognestoykosti stal'nykh elementov s konstruktivnoy ognezashchitoy [Simulation of fire resistance of steel elements with structural fire protection]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2010. No. 2 (12). Pp. 39–46. (rus)
3. Zhamoydik S.M. Metodologiya otsenki ognestoykosti stal'nykh kolonn s konstruktivnoy ognezashchitoy, raspolo-zhennykh po perimetru pomeshcheniya [Methodology of fire resistance evaluation of steel columns with fire structural protection, located on the perimeter of the premises]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 2 (24). Pp. 39–51. (rus)
4. Zhamoydik S.M. Ognestoykost' stal'nykh kollon s konstruktivnoy ognezashchitoy [Fire resistance of steel columns with constructive fire protection]. PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Minsk, 2017. 129 p. (rus)
5. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy* [Design of fire resistance of building constructions]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus).
6. *Fire protection for structural steel in buildings*. Association for Specialist Fire Protection in conjunction with Fire Test Study Group; com. B. Robinson. Aldershot, 2004. 162 p.
7. Kudryashov V.A., Botyan S.S., Danilova-Tret'yak S.M., Nikolayeva K.V. Teplofizicheskiye 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.
8. 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.
 9. Polevoda I.I., Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M. Eksperimental'nyye issledovaniya ognestoykosti stal'nykh karkasnykh konstruksiy s konstruktivnoy ognezashchitoy [Experimental study of steel frame structures fire resistance with structural fire protection] // *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MCHS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 13-27 (rus)