

В. И. ГОЛОВАНОВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: pavelgol1@yandex.ru)

В. В. ПАВЛОВ, начальник сектора, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: vv.pavlov@mail.ru)

А. В. ПЕХОТИКОВ, канд. техн. наук, начальник отдела ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: andrey.p71@bk.ru)

УДК 614.841.332:624.012.4

ОГНЕЗАЩИТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЛИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ PYRO-SAFE AESTUVER T

Рассмотрен конструктивный метод огнезащиты стальных несущих конструкций плитами PYRO-SAFE AESTUVER T и особенности расчета предела огнестойкости стальных стержневых элементов с целью обеспечения нормативных требований по огнестойкости. Получены расчетные теплофизические характеристики материалов, на основании которых рассчитаны номограммы огнестойкости стальных конструкций с данными облицовками. Показано, что эти номограммы в сочетании с представленным ниже расчетным методом можно использовать для оценки огнестойкости стальных конструкций любой конфигурации при различных толщинах облицовки из плит PYRO-SAFE AESTUVER T; для решения обратных задач — поиска минимальной толщины плит PYRO-SAFE AESTUVER T для обеспечения заданного предела огнестойкости и поиска минимальной приведенной толщины металла конструкции для обеспечения заданного предела огнестойкости; для проектирования пассивных противопожарных систем на строительных объектах. Отмечено, что в сочетании с расчетным методом использование этих номограмм позволит сократить расходы огнезащитного материала при устройстве облицовки и тем самым повысить экономическую эффективность огнезащиты данного типа.

Ключевые слова: огнезащитное покрытие; стальные конструкции; огнестойкость; потеря несущей способности; конструктивная огнезащита; огнезащитная эффективность; стандартный температурный режим.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16

Согласно требованиям “Технического регламента о требованиях пожарной безопасности” (Федеральный закон № 123-ФЗ (в ред. от 10.07.2012)) оценка огнестойкости строительных конструкций проводится двумя способами — испытанием и расчетом. Однако установление предела огнестойкости расчетным методом должно основываться на результатах, полученных при огневых испытаниях других аналогичных конструкций.

Экспериментальные методы определения огнестойкости стальных конструкций [1–4] позволяют определить фактическую огнестойкость образца, которая чаще всего равна времени сохранения несущей способности конструкции. Вместе с тем данные методы имеют некоторые недостатки:

- размер опытных образцов ограничен габаритом печей;
- при испытании на огнестойкость получают данные только о поведении конкретного опытного образца, которые трудно или невозможно использовать в других случаях;
- большая стоимость испытаний и их трудоемкость.

Представленный в настоящей статье расчетный метод позволяет частично или полностью исключить эти недостатки. Исследования проводились на плитном огнезащитном материале PYRO-SAFE AESTUVER T, в состав которого в качестве заполнителя входит перлит, стекловолокно, а в качестве вяжущего — цемент.

В ФГБУ ВНИИПО разработана Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными бескаркасными облицовками, выполненными из плит PYRO-SAFE AESTUVER T.

Расчет пределов огнестойкости стальных конструкций производится по признаку потери несущей способности в нагретом состоянии R по классификации ГОСТ 30247.0–94.

Сущность метода [5–13] заключается в определении:

- критической температуры стальной конструкции, при достижении которой наступает предел огнестойкости конструкции (*статический расчет*);

- времени с момента начала теплового воздействия до достижения критической температуры (*теплотехнический расчет*).

Статический расчет конструкции производится по формулам (1)–(4), приведенным в упомянутой выше Инструкции, теплотехнический расчет — с помощью номограмм огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами PYRO-SAFE AESTUVER T.

Статический расчет

Предел огнестойкости стальных конструкций наступает в результате прогрева их сечения или отдельных его частей до критической температуры. Критическая температура стальных конструкций, находящихся под действием статической нагрузки, рассчитывается в зависимости от вида конструкции, схемы ее опирания, марки металла и величины нагрузки.

Центрально-нагруженные стержни

Предел огнестойкости центрально-нагруженных стержней наступает в результате прогрева их сечения до критической температуры. Критическая температура центрально-сжатых стержней определяется как наименьшее из двух найденных по табл. 1 значений в зависимости от коэффициентов γ_T и γ_e .

Коэффициенты γ_T и γ_e вычисляются по формулам:

$$\gamma_T = N_H / (FR_H); \quad (1)$$

$$\gamma_e = N_H l_0^2 / (\pi^2 E_H J_{\min}), \quad (2)$$

где N_H — нормативная нагрузка, кН;

F — площадь поперечного сечения стержня, мм²;

Таблица 1. Значения коэффициентов γ_T и γ_e , учитывающих изменения нормативного сопротивления R_H и модуля упругости E стали в зависимости от температуры

Температура, °С	γ_T	γ_e
20	1,0	1,0
100	0,99	0,96
150	0,93	0,95
200	0,85	0,94
250	0,81	0,92
300	0,77	0,90
350	0,74	0,88
400	0,70	0,86
450	0,65	0,84
500	0,58	0,80
550	0,45	0,77
600	0,34	0,72
650	0,22	0,68
20700	0,11	0,59

R_H — начальное нормативное сопротивление металла, МПа;

l_0 — расчетная длина стержня, мм;

E_H — начальный модуль упругости металла, МПа;

J_{\min} — наименьший момент инерции сечения стержня, мм⁴.

Расчетная длина l_0 стержня принимается равной:

- при шарнирном опирании по концам — l (где l — длина стержня, мм);
- при защемлении по концам — $0,5l$;
- когда один конец защемлен, а другой свободен — $2l$;
- когда один конец защемлен, а другой шарнирно оперт — $0,7l$.

Критическая температура центрально-растянутых стержней определяется по табл. 1 в зависимости от коэффициента γ_T , вычисленного по формуле (1).

Изгибаемые и внецентренно нагруженные элементы

Предел огнестойкости изгибаемых и внецентренно нагруженных элементов наступает в результате повышения температуры их наиболее напряженной грани до критической величины.

Для незащищенных элементов и защищенных элементов сплошного сечения температура наиболее напряженной грани принимается равной температуре всего сечения. Для элементов, изготовленных из прокатных профилей, температура наиболее напряженной грани принимается равной температуре соответствующей полки (стенки) поперечного сечения.

Критическая температура изгибаемых элементов определяется по табл. 1 в зависимости от коэффициента γ_T , вычисляемого по формуле

$$\gamma_T = M_H / (WR_H), \quad (3)$$

где M_H — максимальный изгибающий момент от действия нормативных нагрузок, кН·мм;

W — момент сопротивления сечения, мм³.

Критическая температура внецентренно сжатых стержней определяется как наименьшее из двух найденных по табл. 1 значений в зависимости от коэффициентов γ_T и γ_e .

Коэффициент γ_T в этом случае вычисляется по формуле

$$\gamma_T = \frac{N_H}{R_H} \left(\frac{e}{W} + \frac{1}{F} \right), \quad (4)$$

где e — эксцентриситет приложения нормативной нагрузки N_H , мм.

Коэффициент γ_e находится по формуле (2).

Критическая температура внецентренно растянутых стержней определяется по табл. 1 в зависимости от коэффициента γ_T , вычисляемого по формуле (4).

Фермы

Предел огнестойкости металлических ферм наступает в результате потери несущей способности наиболее слабого с точки зрения огнестойкости элемента. Для выявления такого элемента устанавливаются пределы огнестойкости всех нагруженных стоек, раскосов и поясов фермы. Критическая температура этих элементов находится по формулам (1)–(4).

Теплотехнический расчет

Для построения номограмм огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами PYRO-SAFE AESTUVER T были использованы результаты огневых испытаний, проведенных во ВНИИПО.

Результаты испытаний обобщены в ряде отчетов института, в которых дано подробное описание конструкций, их геометрических размеров, условий, при которых изучается поведение конструкций во время испытаний, а также представлены температурные кривые прогрева в различных точках при воздействии стандартного температурного режима.

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ Р 53295–2009 (с изм. № 1).

В качестве опытных образцов, на которые устанавливали плиты PYRO-SAFE AESTUVER T, были использованы шесть стальных колонн двутаврового профиля высотой (1700±10) мм, с разной приведенной толщиной металла.

Конструкции облицовок опытных образцов представляли собой однослойные обшивки коробчатого сечения, выполненные из плит PYRO-SAFE AESTUVER T различной толщины (15; 20; 25; 35; 40 и 50 мм), с плотностью по данным изготовителя $650 \text{ кг/м}^3 \pm 10 \%$, которые были предварительно раскроены по размерам колонны. Крепеж плит осуществлялся в торец при помощи самонарезающих шурупов по ГОСТ 1145–80, устанавливаемых с шагом (200±10) мм.

Пример конструктивной схемы облицовки плитами толщиной 40 мм стальных колонн, выполняемой согласно “Инструкции по монтажу огнезащитных плит PYRO-SAFE AESTUVER T на стальные конструкции” (№ ПР-4.00/1-14) (разработчик — ООО “ИЦ ПРОЗАСК”), представлен на рис. 1.

Для построения номограмм были использованы температурные кривые прогрева стальных колонн, облицованных плитами PYRO-SAFE AESTUVER T различной толщины. Результаты прогрева представлены в табл. 2.

Испытания колонн с облицовкой по определению огнезащитной эффективности плит проводились при четырехстороннем тепловом воздействии по стандартному температурному режиму согласно ГОСТ 30247.0–94.

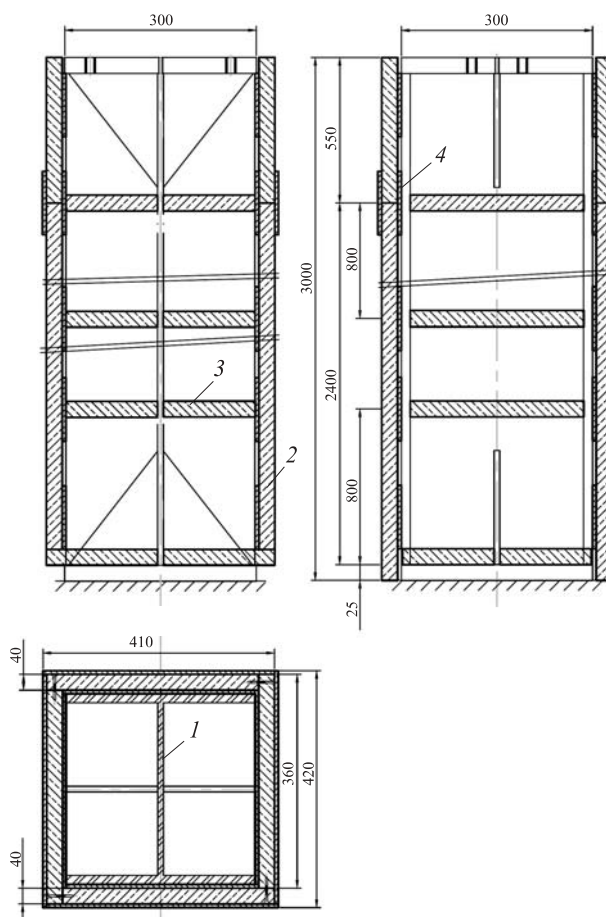


Рис. 1. Пример конструктивной схемы огнезащитной облицовки из плит PYRO-SAFE AESTUVER T плотностью $650 \text{ кг/м}^3 \pm 10 \%$: 1 — двутавровая балка; 2 — огнезащитные плиты PYRO-SAFE AESTUVER T толщиной 40 мм; 3 — ребра жесткости из плит толщиной 40 мм, с выступом на 10 мм от полок двутавра; 4 — пояса шириной (100±10) мм из плит PYRO-SAFE AESTUVER T толщиной 10 мм

Таблица 2. Результаты огневых испытаний стальных колонн с огнезащитой

№ п/п	Профиль	Приведенная толщина металла, мм, при облицовке по контуру/с коробчатым сечением	Толщина огнезащиты, мм	Время достижения критической температуры 500 °С, мин
1	№ 20 (ГОСТ 8239–89)	3,4/4,5	20	65
2	№ 20 (ГОСТ 8239–89)	3,4/4,5	35	112
3	№ 20 (ГОСТ 8239–89)	3,4/4,5	50	151
4	№ 30Б2 (АСЧМ 20–93)	3,9/5,2	40	Более 160
5	№ 40К2 (ГОСТ 26020–93)	8,9/13,2	25	135
6	№ 60Б1 (АСЧМ 20–93)	6,1/7,6	20	91

Результаты испытаний стальных конструкций с огнезащитной облицовкой, выполненной из плит PYRO-SAFE AESTUVER T различной толщины, были проанализированы и обобщены.

С целью упрощения расчетов прогрева стальных стержней с различными формами поперечного сечения используется приведенная толщина металла $\delta_{пр}$, которая представляет собой толщину стальной неограниченной пластины, одна поверхность которой имеет идеальную теплоизоляцию и прогрев которой аналогичен прогреву сечения стержня:

$$\delta_{пр} = F/\Pi, \quad (5)$$

где F — площадь поперечного сечения металлической конструкции, мм²;

Π — обогреваемая часть периметра конструкции (табл. 3), мм.

В настоящей работе был использован расчетный метод определения прогрева стальных конструкций с огнезащитой, описанный в работах [1, 3, 13].

Общие положения
теплотехнического расчета

1. Расчет производится при условии изменения температуры нагревающей среды во времени по кривой “стандартного пожара” (ГОСТ 30247.0–94), уравнение для которой имеет вид:

$$t_{в,\tau} = 345 \lg(0,133\tau + 1) + t_n, \quad (6)$$

где $t_{в,\tau}$ — температура нагревающей среды в моменты времени τ , К;

τ — время, с;

t_n — начальная температура нагревающей среды, К.

2. Коэффициент передачи тепла α (Вт/(м²·К)) от нагревающей среды с температурой $t_{в,\tau}$ к поверхности конструкции с температурой t_0 вычисляется по формуле

$$\alpha = 29 + 5,77s_{пр} \frac{(t_{в,\tau}/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_{в,\tau} - t_0}, \quad (7)$$

где $s_{пр}$ — приведенная степень черноты системы *нагревающая среда – поверхность конструкции*;

Таблица 3. Формулы для определения обогреваемого периметра стержней различного поперечного сечения с огнезащитой

Профиль	Обогреваемый периметр Π , мм, при облицовке			
	по контуру		в виде короба	
	Обогрев			
	с 4-х сторон	с 3-х сторон	с 4-х сторон	с 3-х сторон
	 $2B + 2D + 2(B - t) = 4B + 2D - 2t$	 $B + 2D + 2(B - t) = 3B + 2D - 2t$	 $2B + 2D$	 $B + 2D$
	 $2B + 2D$	 $B + 2D$	 $2B + 2D$	 $B + 2D$
	 $2B + 2D + 2(B - t) = 4B + 2D - 2t$	 $B + 2D + 2(B - t) = 3B + 2D - 2t$	 $2B + 2D$	 $B + 2D$
	 $2B + 2D$	 $B + 2D$	 $2B + 2D$	 $B + 2D$
	 πD	 $B + 2D$	 πD	 $B + 2D$

$$s_{\text{пр}} = \frac{1}{1/s + 1/s_0 - 1}; \quad (8)$$

s — степень черноты огневой камеры печи;
 $s = 0,85$;
 s_0 — степень черноты обогреваемой поверхности конструкции.

3. Расчет температуры металлического стержня конструкций с конструктивной огнезащитой производится с помощью ЭВМ по программе, алгоритм которой представляет собой ряд формул, полученных на основе решения краевой задачи теплопроводности методом элементарных балансов (конечно-разностный метод решения уравнения теплопроводности Фурье при внешней и внутренней нелинейности и наличии отрицательных источников тепла). Отрицательные источники тепла обусловлены испарением свободной воды в порах облицовки и нагревом металла стержня. По этим формулам температура стержня вычисляется последовательно через расчетные интервалы времени $\Delta\tau$ до достижения заданного критического значения.

4. Начальные условия для расчета — начальная температура во всех точках по сечению конструкции до пожара и температура окружающей среды вне зоны пожара одинаковы и равны 293 К.

5. Расчетный интервал времени $\Delta\tau$ выбирается таким, чтобы он целое число раз укладывался в интервале машинной записи результатов расчета. При этом выбранное значение $\Delta\tau$ не должно превышать максимального расчетного интервала времени $\Delta\tau_{\text{max}}$.

6. Алгоритмом для машинного расчета температуры незащищенных металлических пластин является вычисление по формуле

$$t_{\text{ст}, \Delta\tau} = \frac{\Delta\tau}{\gamma_{\text{ст}} \delta_{\text{пр}} (C_{\text{ст}} + D_{\text{ст}} t_{\text{ст}})} \alpha (t_{\text{в}, \tau} - t_0) + t_n, \quad (9)$$

где $t_{\text{ст}, \Delta\tau}$ — температура стержня через расчетный интервал времени $\Delta\tau$, К;

$\gamma_{\text{ст}}$ — плотность металла, кг/м³;

$\delta_{\text{пр}}$ — приведенная толщина металла, м;

$C_{\text{ст}}$ — начальный коэффициент теплоемкости металла, Дж/(кг·К);

$D_{\text{ст}}$ — коэффициент изменения теплоемкости металла при нагреве, Дж/(кг·К²);

$t_{\text{ст}}$ — температура стержня в данный момент времени τ , К;

α — коэффициент передачи тепла от нагревающей среды к поверхности конструкции, Вт/(м²·К).

7. Максимальный расчетный интервал времени $\Delta\tau_{\text{max}}$ вычисляется по формуле

$$\Delta\tau_{\text{max}} = \frac{\gamma_{\text{ст}} \delta_{\text{пр}} (C + D_{\text{ст}} t_{\text{ст}})}{\alpha}. \quad (10)$$

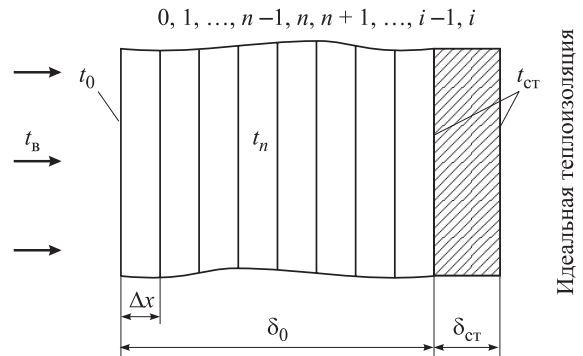


Рис. 2. Схема для расчета на ЭВМ прогрева стальной пластины с огнезащитной облицовкой

При расчете по формуле (10) принимаются максимальные значения α и $t_{\text{ст}}$.

8. Для плоских конструкций, имеющих огнезащитную облицовку, с одномерным потоком тепла по толщине алгоритм машинного расчета составляется на основании схемы, представленной на рис. 2. Огнезащитная облицовка толщиной δ_0 разбивается на n -е число слоев Δx .

9. Температура на стальной пластине $t_{\text{ст}, \Delta\tau}$ через расчетный интервал времени $\Delta\tau$ вычисляется по формулам:

- на обогреваемой поверхности облицовки:

$$t_{0, \Delta\tau} = 2\Delta\tau [A(t_1 - t_0) + 0,5B(t_1^2 - t_0^2)] + \alpha(t_{\text{в}, \tau} - t_0)\Delta x [\gamma_0 \Delta x^2 (C + Dt_0)]^{-1} + t_0 - t_\phi; \quad (12)$$

- во внутренних слоях облицовки:

$$t_{n, \Delta\tau} = \Delta\tau [A(t_{n-1} - 2t_n + t_{n+1}) + 0,5B(t_{n-1}^2 - 2t_n^2 + t_{n+1}^2)] \times [\gamma_0 \Delta x^2 (C + Dt_n)]^{-1} + t_n - t_\phi; \quad (13)$$

- на стальной пластине:

$$t_{\text{ст}, \Delta\tau} = 2\Delta\tau [A(t_n - t_{\text{ст}}) + 0,5B(t_n^2 - t_{\text{ст}}^2)] \times \{\Delta x [\gamma_0 \Delta x (C + Dt_{\text{ст}}) + 2\gamma_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}} (C_{\text{ст}} + D_{\text{ст}} t_{\text{ст}})]\}^{-1} + t_{\text{ст}} - t_\phi, \quad (14)$$

где A — начальный коэффициент теплопроводности облицовки, Вт/(м·К);

t_0, t_1, \dots, t_n — температура на границах слоев Δx , К;

B — коэффициент изменения теплопроводности облицовки при нагреве, Вт/(м·К²);

γ_0 — плотность облицовки, кг/м³;

C — начальный коэффициент теплоемкости облицовки, Дж/(кг·К);

D — коэффициент изменения теплоемкости облицовки при нагреве, Дж/(кг·К²);

t_ϕ — фиктивная температура;

$$t_\phi = \frac{P_{\text{в}} r}{100 \left[(C + Dt_{\text{ст}}) + \frac{2\gamma_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}} (C_{\text{ст}} + D_{\text{ст}} t_{\text{ст}})}{\gamma_0 \Delta x} \right]}; \quad (15)$$

p_v — начальная весовая влажность облицовки, %;
 r — скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг.

В теплотехническом расчете используются данные по характеристикам теплопереноса — коэффициенту теплопроводности λ_t и теплоемкости C_t . Зависимости этих характеристик от температуры представляют в линейном виде для удобства использования при расчетах:

$$\lambda_t = A \pm B(T - 273); C_t = C + D(T - 273).$$

Исследования огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций позволили установить зависимости изменения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости огнезащитного материала при огневом воздействии. Для получения этих зависимостей проводились огневые испытания стальных облицованных конструкций. Такие параметры облицовки, как плотность, влажность, степень черноты, коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоемкости при нормальных условиях, принимались из справочной литературы.

При наличии экспериментальных данных путем решения обратной задачи теплопроводности с помощью ЭВМ по разработанной программе были определены теплофизические характеристики (коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) материала при повышенных температурах.

Теплофизические характеристики облицовки, полученные в результате анализа данных по испытаниям, были использованы для построения зависимостей (номограмм) огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами PYRO-SAFE AESTUVER T различной толщины.

За предел огнестойкости конструкции принималось время нагревания, по истечении которого средняя температура стальной конструкции достигала критического значения. В качестве критической температуры принимались значения 450, 500 (по ГОСТ Р 53295–2009), 550 и 600 °С.

В результате расчетов был получен ряд значений пределов огнестойкости конструкций при различных значениях $t_{кр}$ в зависимости от толщины облицовки и приведенной толщины металла $\delta_{пр}$. Все эти данные сведены в таблицы пределов огнестойкости конструкций для четырех значений критической температуры, по которым были построены соответствующие номограммы (рис. 3–6).

Расчет огнестойкости производился с учетом результатов испытаний стальных конструкций, проведенных по ГОСТ 30247.1–94 (отчеты ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России № 13224 и 13225 от 16.02.2016) при условии создания в расчетных сечениях образцов напряжений, соответствующих нормативным нагрузкам.

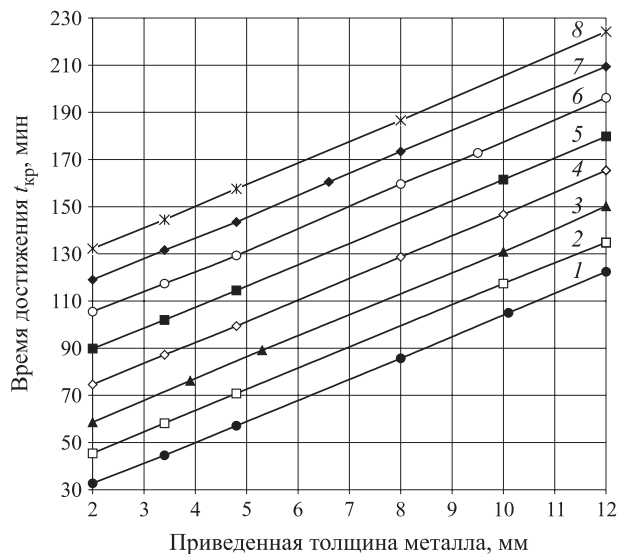


Рис. 3. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит PYRO-SAFE AESTUVER T при $t_{кр} = 450$ °С при их толщине: 1 — 15 мм; 2 — 20 мм; 3 — 25 мм; 4 — 30 мм; 5 — 35 мм; 6 — 40 мм; 7 — 45 мм; 8 — 50 мм

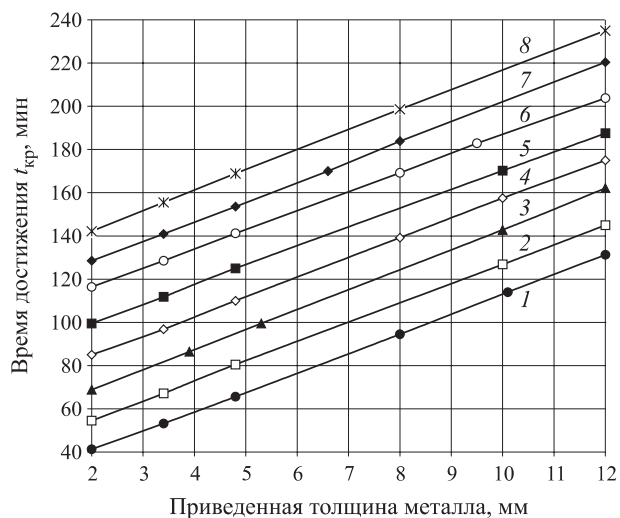


Рис. 4. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит PYRO-SAFE AESTUVER T при $t_{кр} = 500$ °С при их толщине: 1 — 15 мм; 2 — 20 мм; 3 — 25 мм; 4 — 30 мм; 5 — 35 мм; 6 — 40 мм; 7 — 45 мм; 8 — 50 мм

Номограммы огнестойкости стальных конструкций с огнезащитной облицовкой, выполненной из плит PYRO-SAFE AESTUVER T, предназначены для установления пределов огнестойкости стальных конструкций при критических температурах стали 450, 500, 550 и 600 °С (см. рис. 3–6). Каждая точка номограммы соответствует пределу огнестойкости стальной конструкции с определенной приведенной толщиной металла и толщиной плит PYRO-SAFE AESTUVER T. Точки номограммы, соответствующие конструкциям с одной и той же толщиной плит, соединены линиями и соответствуют толщине облицовки. Для поиска промежуточных значений при-

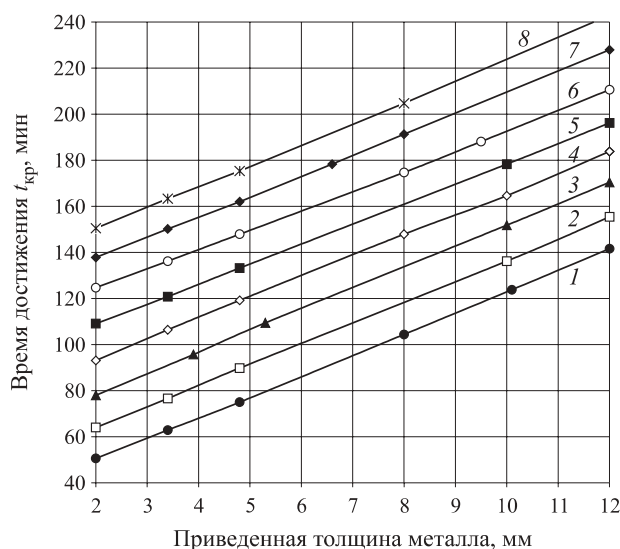


Рис. 5. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит PYRO-SAFE AESTUVER T при $t_{кр} = 550$ °C при их толщине: 1 — 15 мм; 2 — 20 мм; 3 — 25 мм; 4 — 30 мм; 5 — 35 мм; 6 — 40 мм; 7 — 45 мм; 8 — 50 мм

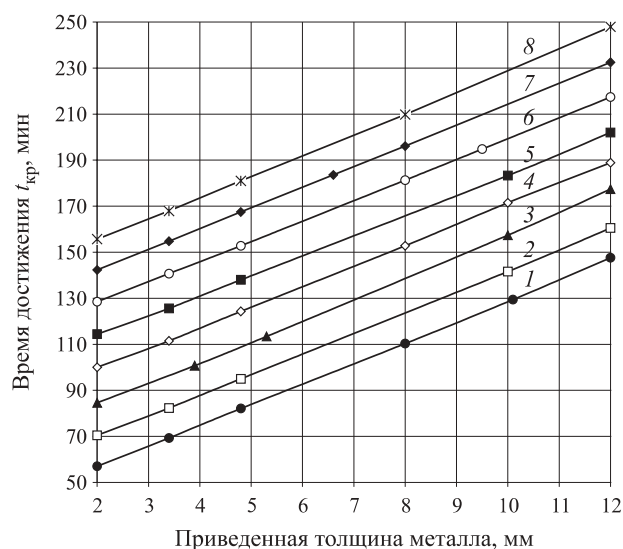


Рис. 6. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит PYRO-SAFE AESTUVER T при $t_{кр} = 600$ °C при их толщине: 1 — 15 мм; 2 — 20 мм; 3 — 25 мм; 4 — 30 мм; 5 — 35 мм; 6 — 40 мм; 7 — 45 мм; 8 — 50 мм

веденной толщины металла и толщины облицовки следует использовать линейную интерполяцию.

Для установления предела огнестойкости конструкции необходимо предварительно провести расчет по формулам (1)–(4) с целью определения критической температуры стали исследуемой конструкции и принять либо ближайшее значение $t_{кр}$ из приведенного выше ряда, либо нормативное значение $t_{кр}$. Далее следует определить приведенную толщину металла конструкции по формуле (5).

После определения критической температуры и выбора соответствующей номограммы по графику, соответствующему заданной толщине плит PYRO-SAFE AESTUVER T, устанавливается предел огнестойкости стальной конструкции с огнезащитой рассматриваемого вида.

Аналогичным образом данные номограммы могут использоваться для решения обратных задач — поиска минимальной толщины плит PYRO-SAFE AESTUVER T для обеспечения заданного предела огнестойкости и поиска минимальной приведенной толщины металла конструкции для обеспечения заданного предела огнестойкости.

Таким образом, полученные номограммы огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами PYRO-SAFE AESTUVER T могут быть использованы для проектирования пассивных противопожарных систем на строительных объектах. В сочетании с расчетным методом эти номограммы позволяют сократить расходы огнезащитного материала при устройстве облицовки и тем самым повысить экономическую эффективность огнезащиты данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. — М. : Стройиздат, 1988. — 143 с.
2. Хасанов И. Р., Гравит М. В., Косачев А. А., Пехотиков А. В., Павлов В. В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 49–57.
3. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций / Пер. с франц. — М. : Стройиздат, 1985. — 215 с.
4. Собурь С. В. Огнезащита материалов и конструкций. — М. : ПожКнига, 2008. — 200 с.
5. Голованов В. И., Пехотиков А. В., Павлов В. В. Расчет огнестойкости конструкций из стали с повышенными показателями огнестойкости для объектов нефтегазовой промышленности // Территория Нефтегаз. — 2007. — № 4. — С. 72–77.
6. Moore D. B., Lennon T. Fire engineering design of steel structures // Progress in Structural Engineering and Materials. — 1997. — Vol. 1, No. 1. — P. 4–9. DOI: 10.1002/pse.2260010104.
7. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, No. 8. — P. 631–636. DOI: 10.1002/best.200608186.

8. *Ройтман В. М., Голованов В. И.* Необходимость технического регулирования огнестойкости зданий с учетом возможности комбинированных особых воздействий с участием пожара // Пожарная безопасность. — 2014. — № 1. — С. 86–93.
9. *Леннон Т., Мур Д. Б., Ван Ю. К., Бейли К. Г.* Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 и 1994-1-2. Справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с Еврокодами. — М. : МГСУ, 2012. — 196 с.
10. *Kordina K.* Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // Bautechnik. — 2003. — Vol. 80, No. 5. — P. 327–338. DOI: 10.1002/bate.200302620.
11. *Schneider U.* Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton unter stationärer und instationärer temperaturbeanspruchung // Bautechnik. — 1977. — No. 4. — P. 123–132.
12. *Wu B., Yuan J., Wang G.* Experimental Study on the mechanical properties of HSC after high temperature // *Chinese Journal of Civil Engineering*. — 2000. — Vol. 33(2). — P. 8–15.
13. *Голованов В. И., Кузнецова Е. В.* Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. — 2015. — № 9. — С. 82–90.

Материал поступил в редакцию 28 июня 2016 г.

Для цитирования: Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотиков А. В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 11. — С. 8–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.

English

FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES WITH SLAB MATERIAL PYRO-SAFE AESTUVER T

GOLOVANOV V. I., Doctor of Technical Sciences, Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail address: pavelgol1@yandex.ru)

PAVLOV V. V., Head of Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail address: vv.pavlov@mail.ru)

PEKHOTIKOV A. V., Candidate of Technical Sciences, Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail address: andrey.p71@bk.ru)

ABSTRACT

Providing required (statutory) parameters of fire resistance of R 60–R 180 steel beam structures involved in ensuring the overall sustainability of buildings and structures is not possible without the use of structural fire protection. Widespread method of structural fire protection involves the use of plate materials. The use of this type of fire protection allows for the production of works without the use of “wet processes”, which is very important for the Far North with a short period of time of positive temperatures. Fire-retardant treatment of steel structures with plate materials may also be carried out without stopping the production process in the reconstruction of buildings and structures. One of the members of the group of fire retardant materials are slabs PYRO-SAFE AESTUVER T, whose composition as a filler includes perlite, glass fiber, and as a binder — cement.

The article describes current research aimed at obtaining baseline data to determine fire retardant efficiency of slabs PYRO-SAFE AESTUVER T and features of the calculation of fire resistance of coated steel rod elements in order to ensure regulatory requirements for fire resistance.

The studies of fire resistance performance of coatings for steel structures allowed us to obtain the variation of thermal conductivity and heat capacity of fire retardant material, when impacted by fire. To obtain these dependencies, fire tests of steel-lined columns were conducted on the bench equipment for fire tests of building structures on the experimental base of VNIPO of Emercom of Russia (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters). Parameters of cladding,

such as density, humidity, emissivity, thermal conductivity and thermal capacity under normal conditions were taken from reference literature. Then, in the presence of experimental data, thermo-physical characteristics (thermal conductivity and heat capacity) of the material at elevated temperatures were calculated with a computer program by solving the inverse heat conduction problem. The obtained parameters of the thermal characteristics for a given flame retardants, allowed to construct warm-up nomograms of unlimited steel plates, depending on the thickness of the steel and the thickness of cladding with PYRO-SAFE AESTUVER T slabs.

As a result of the research, the obtained nomograms of fire resistance of steel structures with PYRO-SAFE AESTUVER T fire protection plates may be used for the design of passive fire protection systems at construction sites. In combination with the calculation method, these nomograms allow to reduce the usage of fire-retardant material in cladding thereby increasing the economic efficiency of fire protection of this type.

In Federal State Budgetary Establishment VNIPO the “Instruction on the calculation of the actual limit of fire resistance of steel structures with fire-retardant frameless facings made of PYRO-SAFE AESTUVER T slabs” was developed.

Keywords: fire protection coating; steel structures; fire resistance; loss of the bearing capacity; structural fire protection; fire-retardant efficiency; standard temperature range.

REFERENCES

1. Yakovlev A. I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 143 p. (in Russian).
2. Khasanov I. R., Gravit M. V., Kosachev A. A., Pekhotikov A. V., Pavlov V. V. Harmonization of European and Russian regulatory documents establishing general requirements for fire-resistance test methods of building constructions and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 49–57 (in Russian).
3. Barthelemy B., Kruppa J. *Resistance au feu des structures beton-acier-bois*. Paris, Editions Eyrolles, 1978. 216 p. (in French) (Russ. ed.: Barthelemy B., Kruppa Zh. *Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 215 p.).
4. Sobur S. V. *Fire resistance of building structures*. Moscow, PozhKniga Publ., 2008. 200 p. (in Russian).
5. Golovanov V. I., Pekhotikov A. V., Pavlov V. V. Calculation of fire resistance of structural steel operations with elevated rates of fire for the objects of oil and gas industry. *Territoriya Neftegaz (Oil and Gas Territory)*, 2007, no. 4, pp. 72–77 (in Russian).
6. Moore D. B., Lennon T. Fire engineering design of steel structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1997, vol. 1, no. 1, pp. 4–9. DOI: 10.1002/pse.2260010104.
7. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, no. 8, pp. 631–636. DOI: 10.1002/best.200608186.
8. Roytman V. M., Golovanov V. I. Need for technical regulation of the buildings fire resistance taking into account the possible combined hazardous fire exposure. *Pozharnaya bezopasnost (Fire Safety)*, 2014, no. 1, pp. 86–93 (in Russian).
9. Lennon T., Moore D. B., Wang Y. C., Bailey C. G. *Designers' Guide to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2. Handbook for the fire design of steel, composite and concrete structures to the Eurocodes*. Moscow, MGSU Publ., 2012. 196 p. (in Russian).
10. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*, 2003, vol. 80, no. 5, pp. 327–338. DOI: 10.1002/bate.200302620.
11. Schneider U. Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton unter stationärer und instationärer Temperaturbeanspruchung. *Bautechnik*, 1977, no. 4, pp. 123–132.
12. Wu B., Yuan J., Wang G. Experimental study on the mechanical properties of HSC after high temperature. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2000, vol. 33(2), pp. 8–15.
13. Golovanov V. I., Kuznetsova E. V. Effective means of fire protection for steel and concrete structures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo (Industrial and Civil Engineering)*, 2015, no. 9, pp. 82–90 (in Russian).

For citation: Golovanov V. I., Pavlov V. V., Pekhotikov A. V. Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 11, pp. 8–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.