

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И
ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский
институт противопожарной обороны» (ФГБУ ВНИИПО МЧС России)**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника
ФГБУ ВНИИПО МЧС России
доктор технических наук

 **И.Р. Хасанов**

" 19 " 03 2012 г.

ИНСТРУКЦИЯ

**по расчету фактических пределов огнестойкости стальных
конструкций с огнезащитными облицовками, выполненными
из плит КНАУФ-Файерборд ТУ 5742-006-01250242-2009 по стальному
каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей
ТУ 1121-012-04001508-2011
(договор № 6833/Н-3.2 от 08.11.2011г.)**

Зам. начальника НИЦ ПП и ПЧСП
ФГБУ ВНИИПО МЧС России
кандидат технических наук



А.А. Косачев

МОСКВА 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Общие положения.....	5
2. Статический расчет	5
2.1. Общие положения	5
2.2. Центрально-нагруженные стержни	5
2.3. Изгибаемые и внецентренно-нагруженные стержни.....	7
2.4. Фермы.....	8
3. Номограммы огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными облицовками, выполненными из плит КНАУФ-Файерборд по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей	9
3.1. Результаты экспериментальных исследований	9
3.2. Приведенная толщина металла конструкций	20
3.3. Построение номограмм с использованием расчетного метода ..	24
3.4. Использование номограмм	30
4. Пример расчета предела огнестойкости стальной колонны с огнезащитной облицовкой, выполненной из плит КНАУФ-Файерборд по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей	32
Приложение "Общие положения теплотехнического расчета стальных конструкций с огнезащитой"	34

ВВЕДЕНИЕ

Работа выполнена на основании договора № 6833/Н-3.2 от 08.11.2011 г., заказчик: ООО «КНАУФ ГИПС НОВОМОСКОВСК». 301661, Тульская область, г. Новомосковск, ул. Гражданская, 14.

В работе использованы положения следующих нормативных документов:

- ГОСТ 30247.0-94 "Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования";
- ГОСТ Р 53295-2009 "Средства огнезащиты стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности".

Для выполнения работы, была рассмотрена следующая техническая документация:

- "Технологический регламент каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 12,5 мм. КС 18.07/2011";
- "Технологический регламент каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 20 мм. КС 10.07/2010";
- "Технологический регламент каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 25 мм. КС 11.01/2012";
- "Технологический регламент каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 32,5 мм. КС 12.01/2012";
- "Технологический регламент каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 40 мм. КС 11.07/2010";
- "Технологический регламент каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 45 мм. КС 13.01/2012";
- "Технологический регламент каркасной огнезащитной облицовки колонн из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 52,5 мм. КС 19.07/2011";

- ТУ 5742-006-01250242-2009 “Плиты негорючие КНАУФ-Файерборд”;

- ТУ 1121-012-04001508-2011 “КНАУФ-профили стальные, оцинкованные, тонкостенные”.

В результате проведенной на испытательной базе ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России серии экспериментальных исследований по определению огнезащитной эффективности облицовок выполненных из плит КНАУФ-Файерборд различной толщины, смонтированных по дополнительному стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей, получены расчетные теплофизические характеристики материалов, на основании которых были построены номограммы огнестойкости стальных конструкций с данной облицовкой.

Расчет производился при помощи комплекса вычислительных программ для расчета теплового состояния конструкций.

Полученные номограммы, в сочетании с представленным ниже расчетным методом, позволяют производить оценку огнестойкости стальных конструкций любой конфигурации, при различных толщинах облицовок из плит КНАУФ-Файерборд, выполняемых по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей, а также решение обратных задач.

1 Общие положения

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

1.2 Сущность метода заключается в определении критической температуры стали исследуемой конструкции, в результате которой наступает ее предел огнестойкости – *статический расчет* и определении времени от начала теплового воздействия до достижения критической температуры – *теплотехнический расчет*.

1.3 Статический расчет конструкции производится по формулам п. 2 настоящей инструкции.

1.4 Теплотехнический расчет производится с помощью номограмм огнестойкости стальных конструкций с огнезащитной облицовкой, выполненной из плит КНАУФ-Файерборд по п. 3 настоящей инструкции.

2 Статический расчет

2.1 Общие положения

Предел огнестойкости стальных конструкций наступает в результате прогрева их сечения или отдельных его частей до критической температуры.

Критическая температура стальных конструкций, находящихся под действием нагрузки, рассчитывается в зависимости от вида конструкции, схемы ее опирания, марки металла и величины нагрузки.

2.2 Центрально-нагруженные стержни

Предел огнестойкости центрально-нагруженных стержней наступает в результате прогрева их сечения до критической температуры.

Критическая температура центрально-сжатых стержней определяется как наименьшая величина из двух найденных по таблице 1 значений в зависимости от коэффициентов γ_T и γ_e .

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 в °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
700	0,11	0,59

Коэффициенты γ_T и γ_e вычисляются по формулам:

$$\gamma_T = \frac{N_n}{F R^H} \quad (1)$$

$$\gamma_e = \frac{N_n l_0^2}{\pi^2 E_n J_{\min}} \quad (2)$$

где:

N_n - нормативная нагрузка, кг;

F - площадь поперечного сечения стержня, см²;

R^H - начальное нормативное сопротивление металла, кг/см²;

E_n - начальный модуль упругости металла, кг/см²,

для сталей - $E_n = 2100000$ кг/см²;

l_0 - расчетная длина стержня, см;

J_{\min} - наименьший момент инерции сечения стержня, см⁴.

Расчетная длина - l_0 стержня принимается равной:

- шарнирное опирание по концам - l ;

где l - длина стержня, см;

- защемление по концам - $0,5 l$;

- один конец защемлен другой свободен - $2 l$;

- один конец защемлен, другой шарнирно оперт - $0,7 l$.

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

2.3 Изгибаемые и внецентренно-нагруженные стержни

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

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

Критическая температура изгибаемых элементов определяется по таблице 1 в зависимости от коэффициента γ_T , вычисляемого по формуле:

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W R_n} \quad (3)$$

где:

M_n - максимальный изгибающий момент от действия нормативных нагрузок, кг см.

W - момент сопротивления сечения, см³.

Критическая температура внецентренно-сжатых стержней определяется как наименьшая величина из двух найденных по таблице 1 значений в зависимости от коэффициентов γ_T и γ_e .

Коэффициент γ_T вычисляется по формуле:

$$\gamma_T = \frac{N_n}{R_n} \left(\frac{e}{W} + \frac{1}{F} \right) \quad (4)$$

где:

e - эксцентриситет приложения нормативной нагрузки - N_n , см.

Коэффициент γ_e находится по формуле (2).

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

2.4 Фермы

Предел огнестойкости металлических ферм наступает в результате потери несущей способности наиболее слабого, с точки зрения огнестойкости элемента.

Для выявления такого элемента определяются пределы огнестойкости всех нагруженных стоек, раскосов и поясов фермы. Критическая температура этих элементов находится в соответствии с п.п. 2.1÷2.3.

3 Номограммы огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными облицовками, выполненными из плит КНАУФ-Файерборд по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей

3.1 Результаты экспериментальных исследований

Для построения номограмм были обобщены результаты огневых испытаний стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит КНАУФ-Файерборд, проведенные во ВНИИПО (отчеты №№ 11109, 11110, 11111, 11112 от 17.11.2011 г. и №№ 11292, 11293, 11294, 11295, 11296, 11297 от 05.03.2012 г.), с подробным описанием конструкций, их геометрических размеров, условий проведения испытаний, поведения конструкций во время испытаний, а также температурные кривые прогрева в различных точках конструкций при воздействии температурного режима "стандартного пожара".

Испытания проводились в соответствии со следующими нормативными документами:

- ГОСТ 30247.0-94 "Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования";
- ГОСТ Р 53295-2009 "Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности"

В качестве опытных образцов, на которых производился монтаж огнезащитной облицовки, использовались стальные колонны двутаврового сечения следующего сортамента:

- двутавры № 20 и № 20Б1 по ГОСТ 8339-89 и АСЧМ 20-93 соответственно, с приведенной толщиной металла 3,4 мм, без учета облицовки коробчатого сечения;

- двутавр № 30Б2 по АСЧМ 20-93 с приведенной толщиной металла 3,9 мм, без учета облицовки коробчатого сечения;

- двутавр № 40Б2 по АСЧМ 20-93 с приведенной толщиной металла 5,3 мм, без учета облицовки коробчатого сечения;

- двутавр № 40К2 по АСЧМ 20-93 с приведенной толщиной металла 9,2 мм, без учета облицовки коробчатого сечения;

Технология монтажа плит КНАУФ-Файерборд была в целом аналогична для всех опытных образцов, и осуществлялась в соответствии с требованиями технологических регламентов, указанных во введении к настоящей инструкции.

Конструкции облицовок опытных образцов представляли собой одно-, двух и трехслойные обшивки, выполняемые из плит КНАУФ-Файерборд различной толщины, закрепляемых к дополнительному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей ПП 60/27 ТУ 1121-012-04001508-2011. Крепление тонколистовых оцинкованных профилей к колонне осуществлялось при помощи специальных зажимов, устанавливаемых с шагом не более 1000 мм.

Для облицовки опытных образцов использовались плиты толщиной 12,5 и 20 мм, из которых собиралась облицовка необходимой толщины.

Для крепления первого слоя плит КНАУФ-Файерборд к стальному каркасу использовались самонарезающие шурупы 3,5×25 или 3,5×35 мм (в зависимости от толщины плит), устанавливаемые с шагом не более 150 мм. Плиты второго слоя крепились к профилям ПП 60/27 через плиты первого слоя при помощи самонарезающих шурупов 3,5×35 или 3,5×45 мм (в зависимости от толщины плит), устанавливаемых с аналогичным шагом. Плиты третьего слоя крепились к профилям ПП 60/27 через плиты первого и второго слоя при помощи самонарезающих шурупов 3,5×55 или 3,5×65 мм (в зависимости от толщины плит), устанавливаемых с указанным выше шагом.

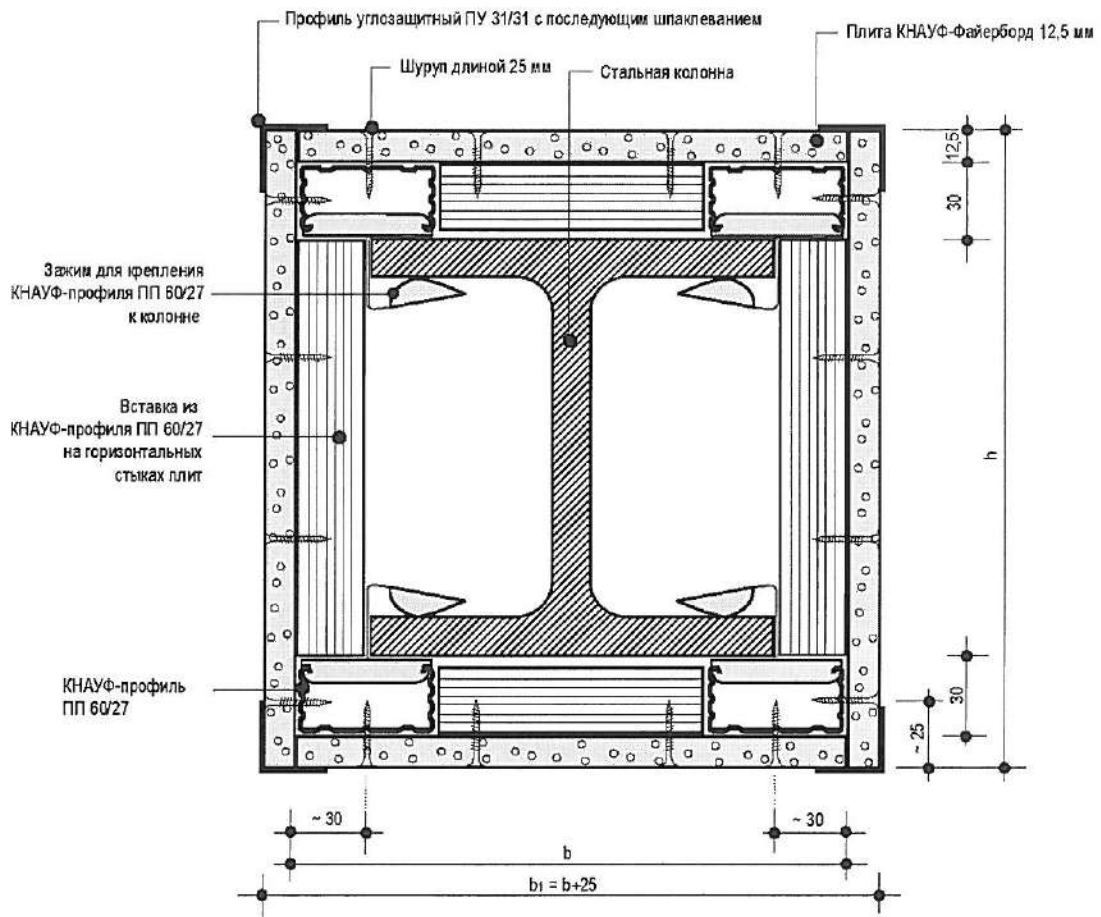
После сборки панелей, на углах облицовки опытного образца крепился углозащитный профиль ПУ 31/31 ТУ 1121-012-04001508-2011. В

соответствии с технологией монтажа, профиль вдавливался в предварительно нанесенную на угол шпаклевочную смесь и выравнивался по вертикали. После этого наносился финишный слой шпаклевки.

При монтаже облицовки на опытном образце для заделки стыков, а также для крепления углозащитного профиля использовалась шпаклевочная смесь Knauf Fireboard-Spachtel или КНАУФ-Унифлот. Для заделки горизонтальных стыков облицовок использовалась армирующая лента, после чего на них наносилась шпаклевочная смесь.

Конструктивные схемы облицовок опытных образцов стальных колонн представлены на рис. 1-7.

Горизонтальный разрез



Вертикальный разрез

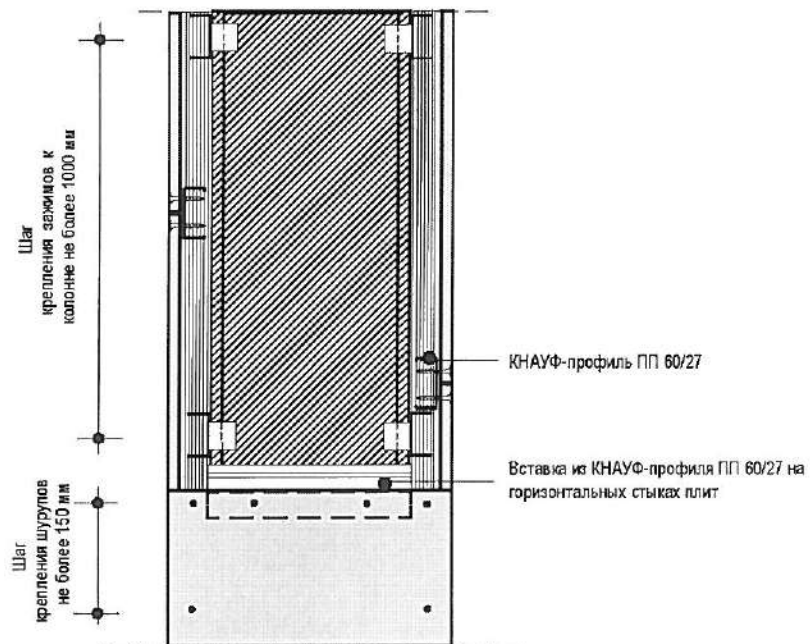
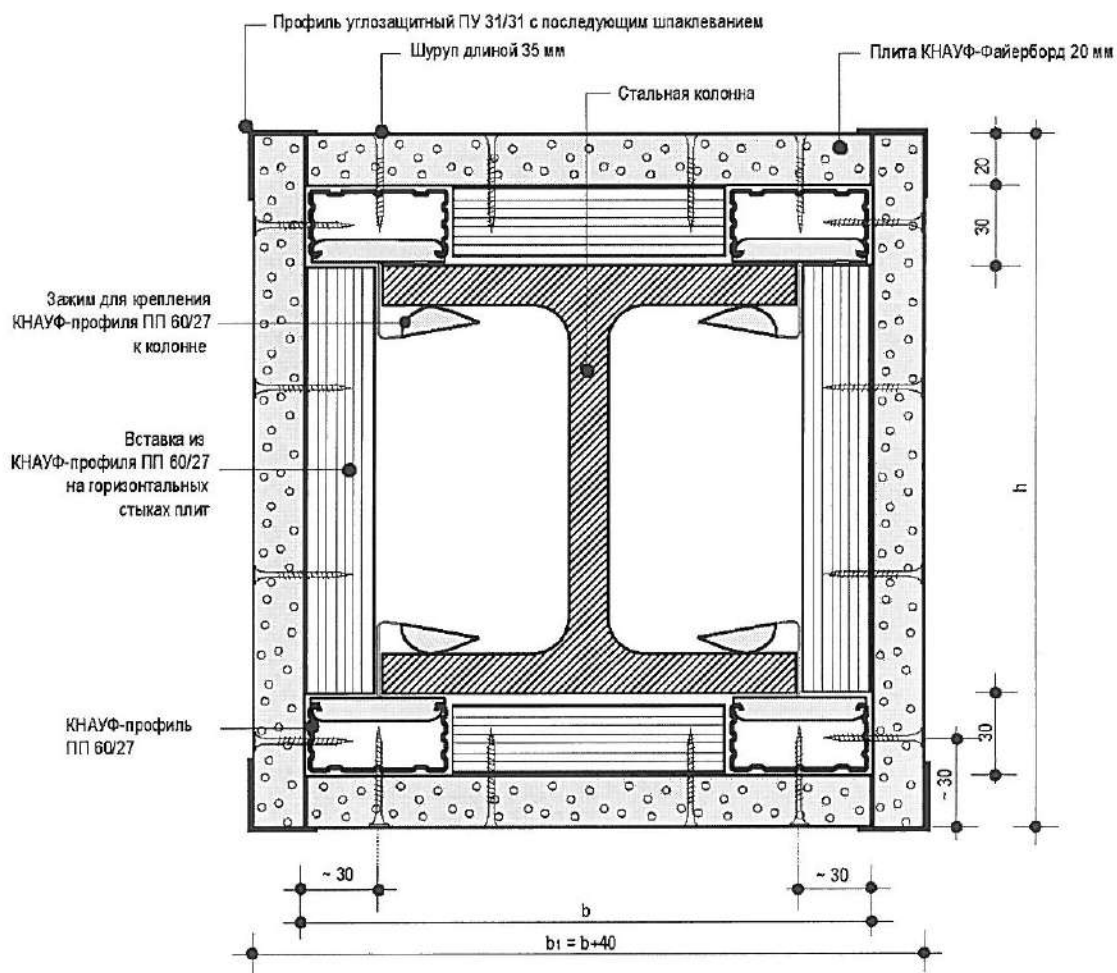


Рис. 1. Конструктивная схема однослойной облицовки плитами КНАУФ-Файерборд толщиной 12,5 мм.

Горизонтальный разрез



Вертикальный разрез

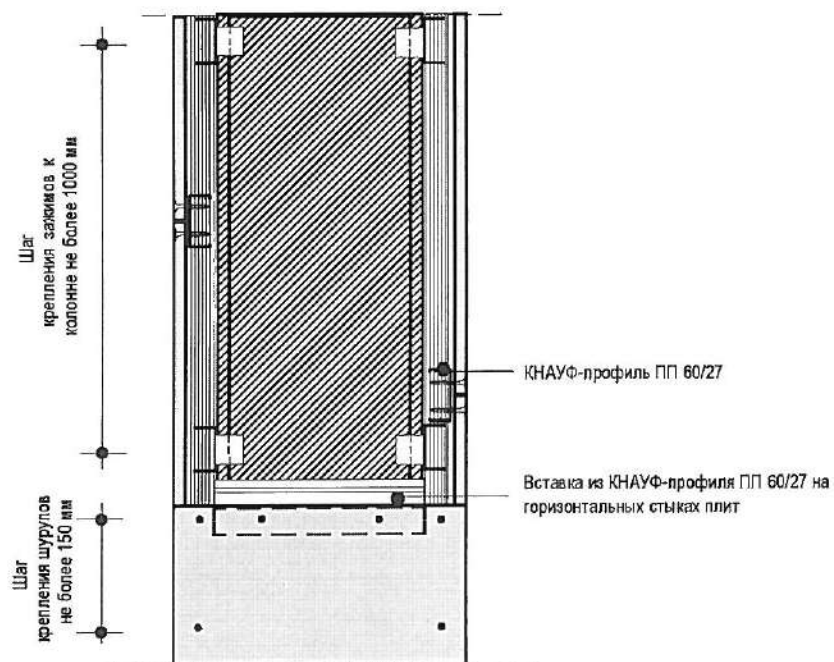
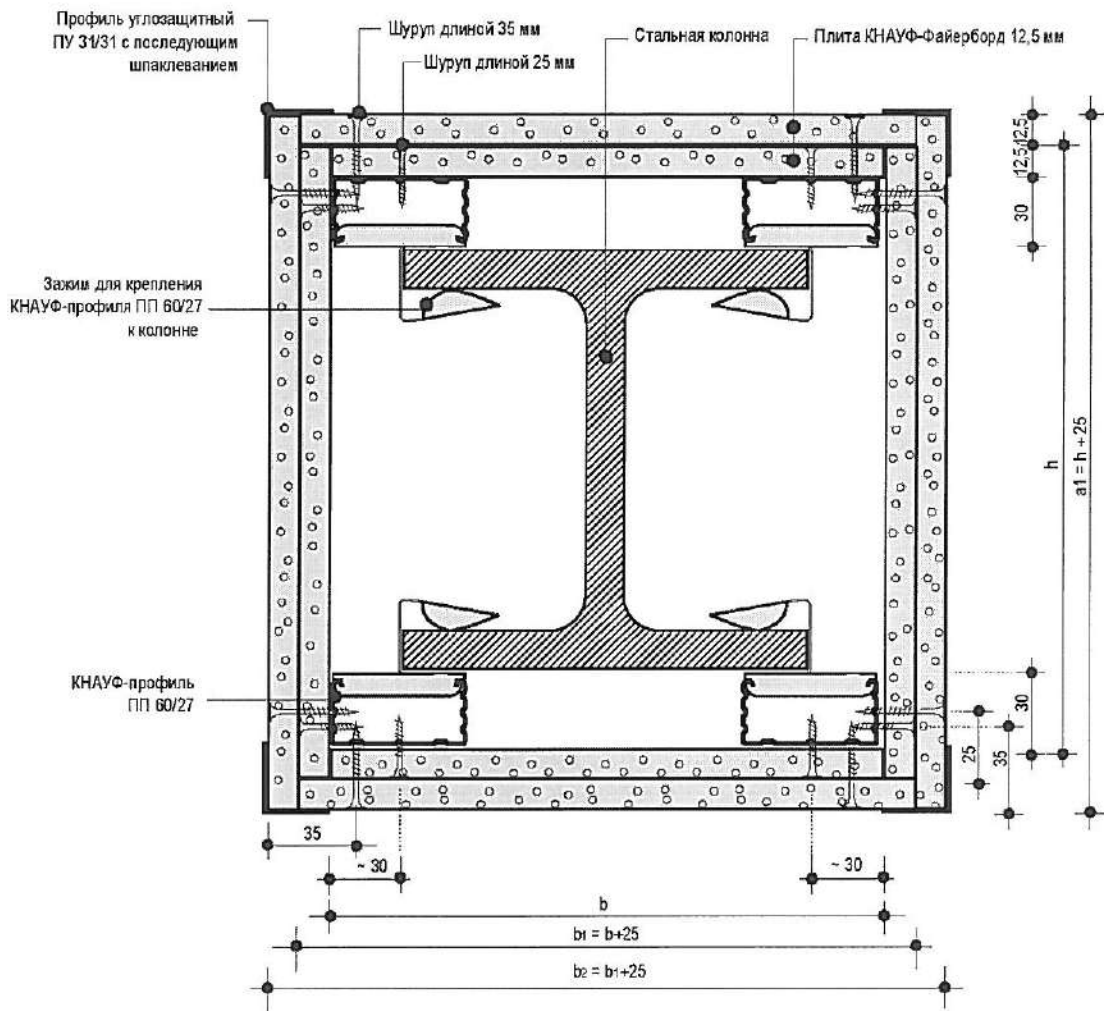


Рис. 2. Конструктивная схема однослойной облицовки плитами КНАУФ-Файерборд толщиной 20 мм.

Горизонтальный разрез



Вертикальный разрез

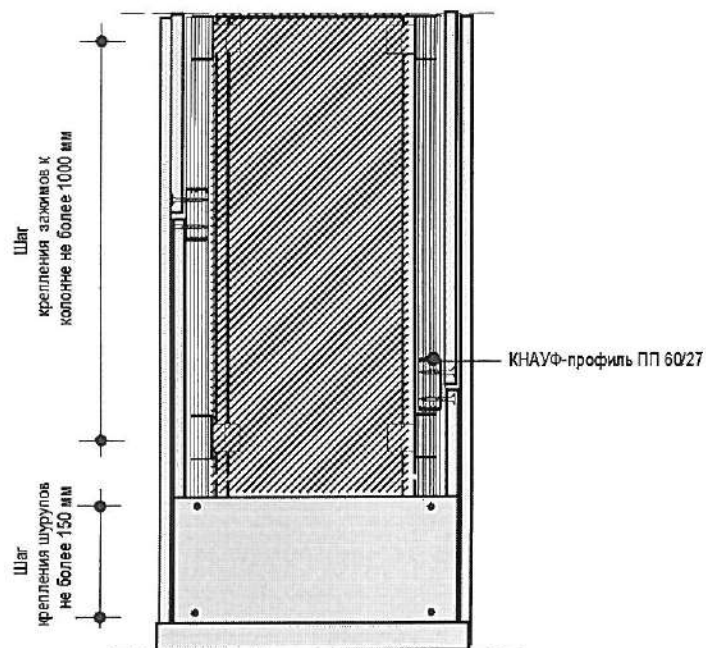


Рис. 3. Конструктивная схема двухслойной облицовки плитами КНАУФ-Файерборд толщиной 12,5 мм (12,5+12,5=25 мм).

Горизонтальный разрез

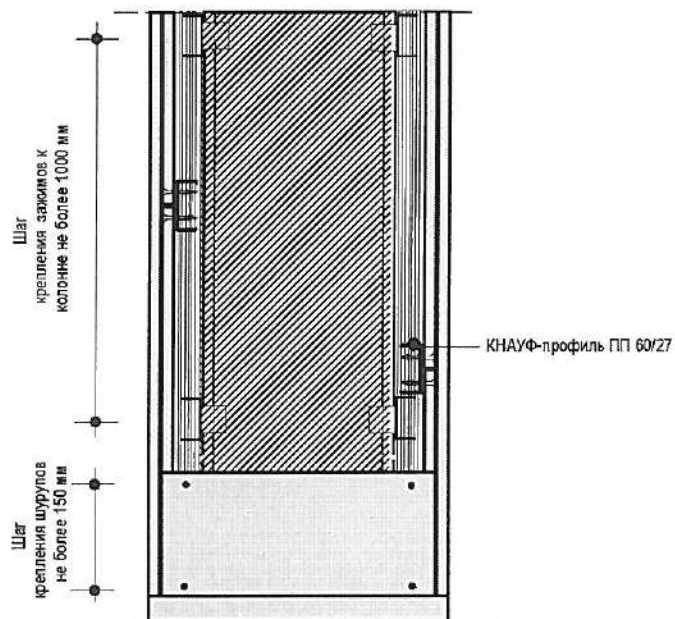
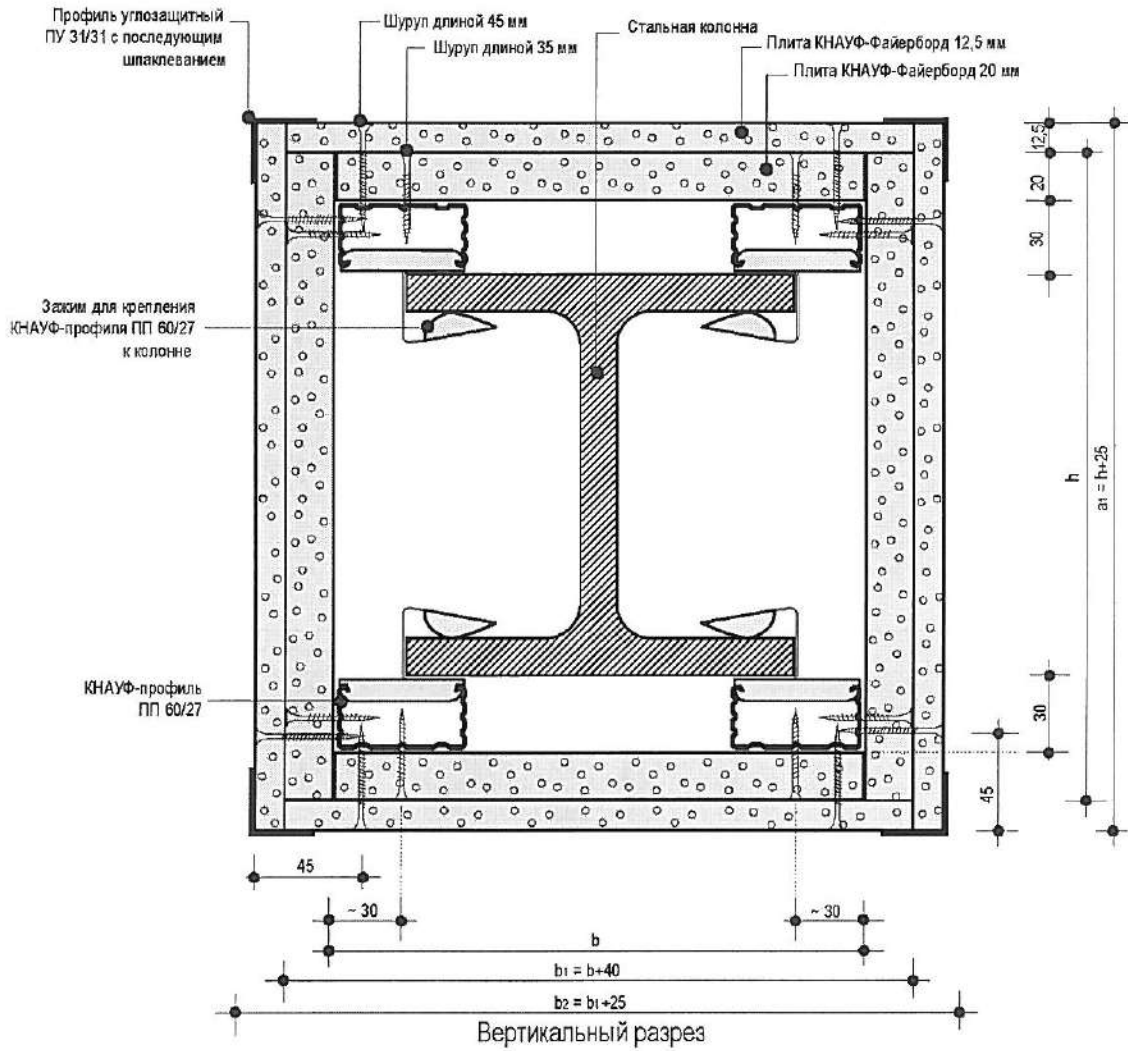
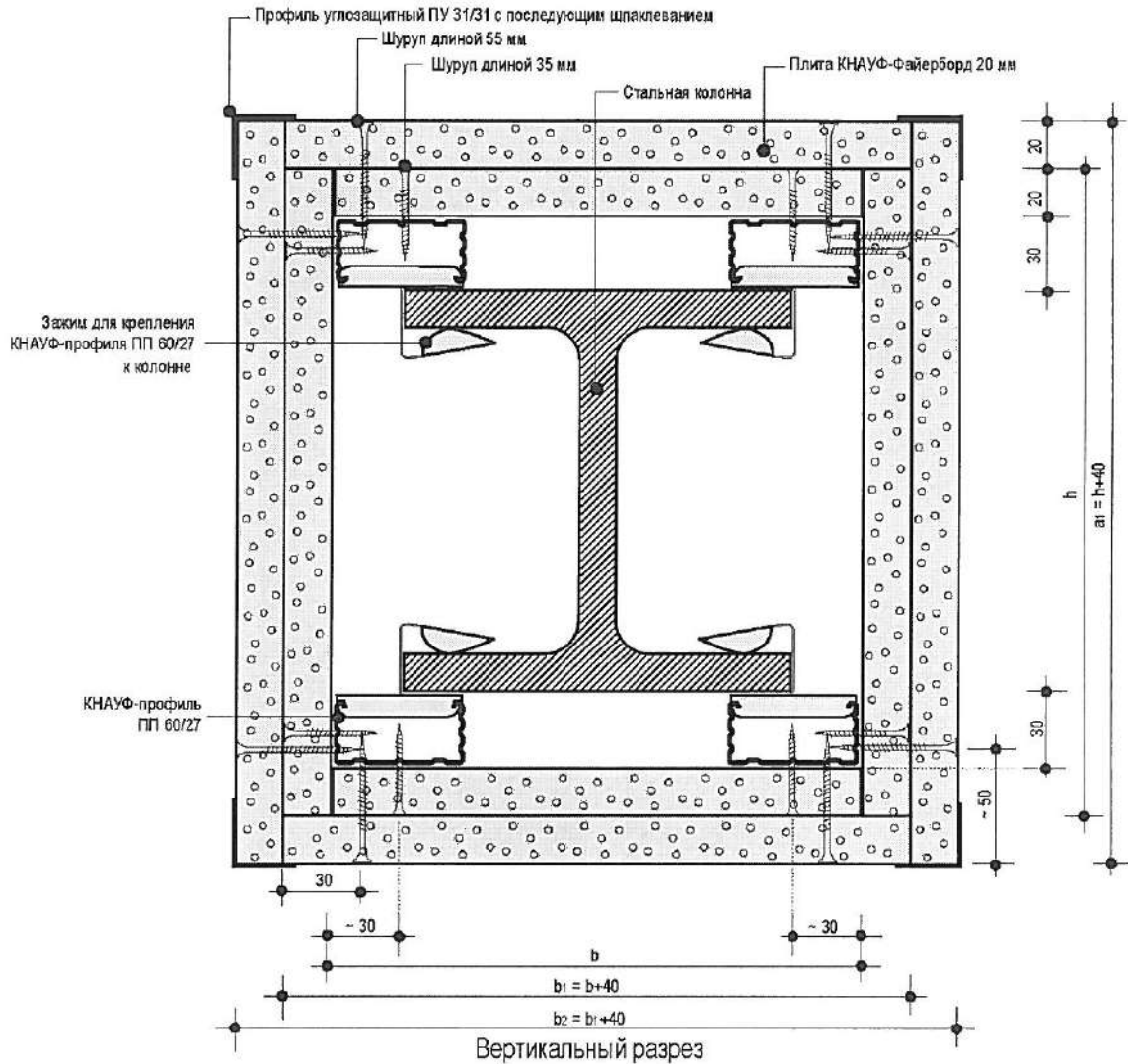


Рис. 4. Конструктивная схема двухслойной облицовки плитами КНАУФ-Файерборд толщиной 12,5 и 20 мм (12,5+20=32,5 мм).

Горизонтальный разрез



Вертикальный разрез

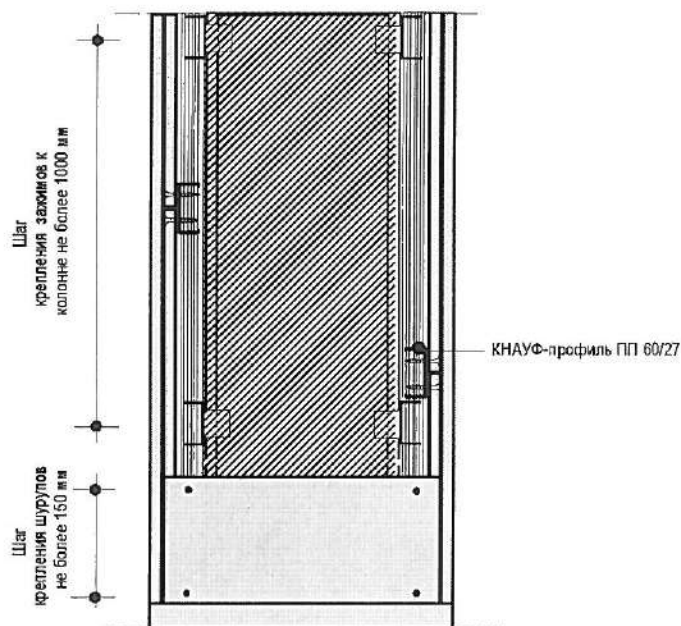


Рис. 5. Конструктивная схема двухслойной облицовки плитами КНАУФ-Файерборд толщиной 20 мм (20+20=40 мм).

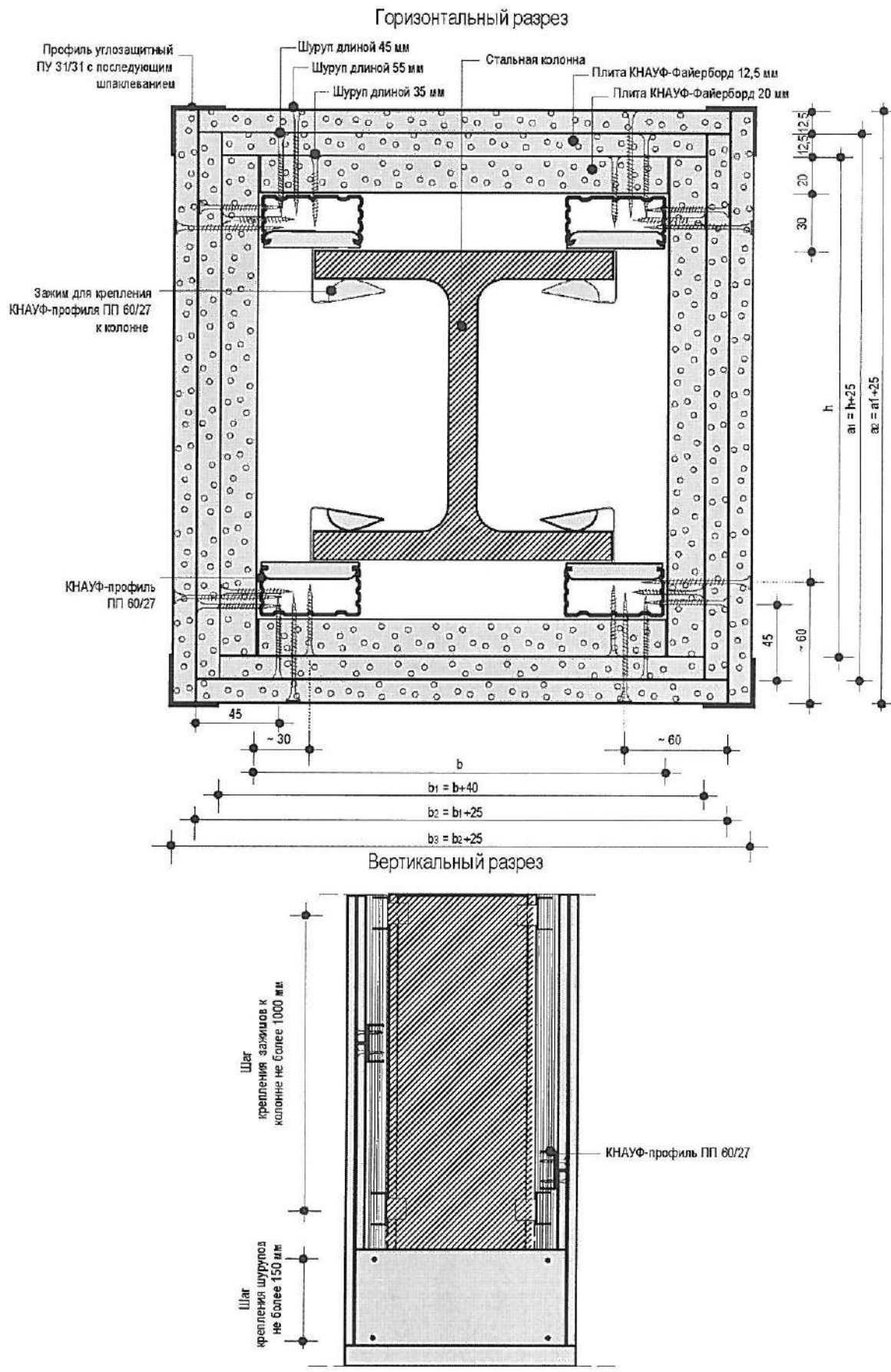


Рис. 6. Конструктивная схема трехслойной облицовки плитами КНАУФ-Файерборд толщиной 12,5 и 20 мм ($2 \times 12,5 + 20 = 45$ мм).

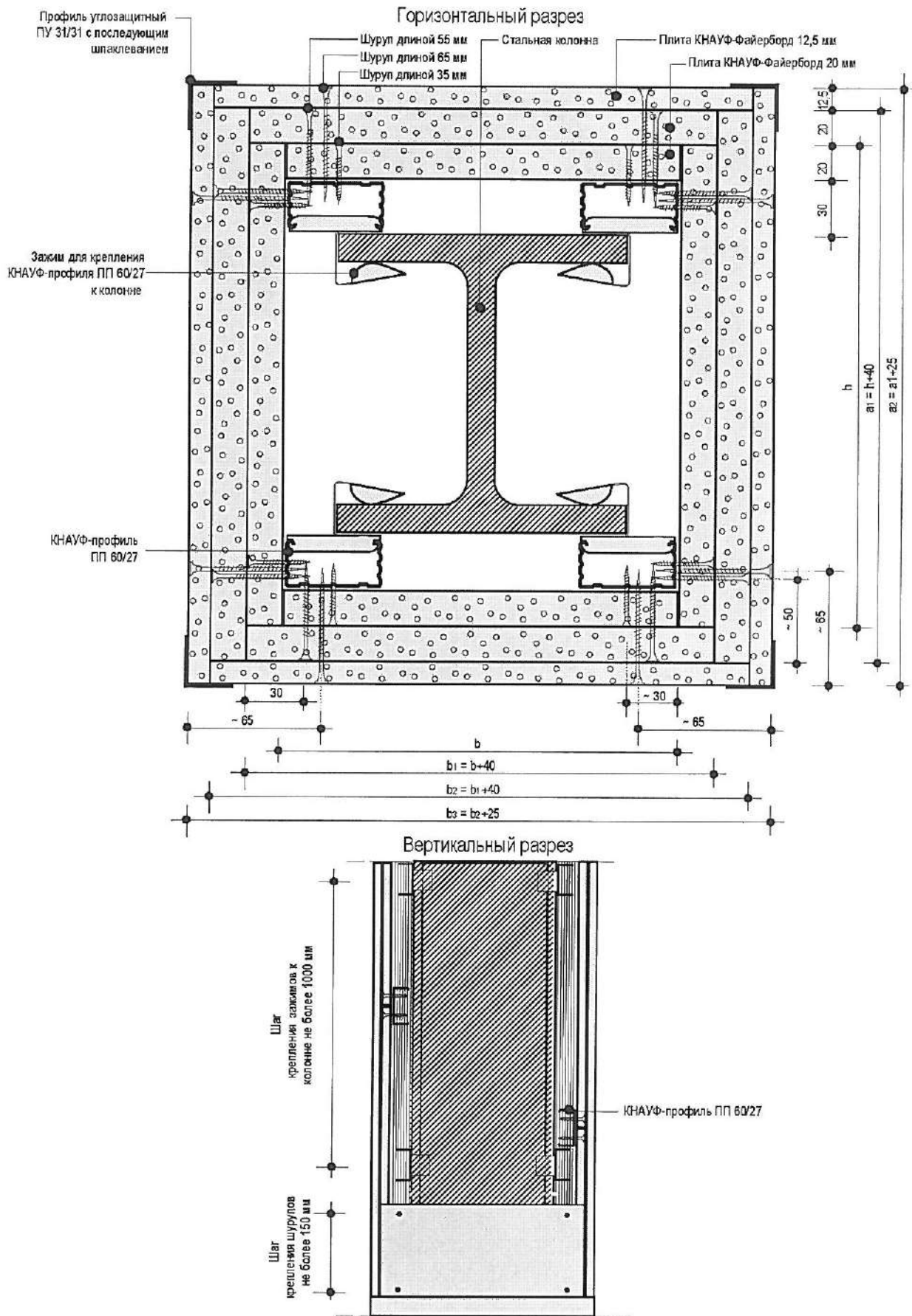


Рис. 7. Конструктивная схема трехслойной облицовки плитами КНАУФ-Файерборд толщиной 12,5 и 20 мм (12,5+2×20=52,5 мм).

Для построения номограмм были использованы температурные кривые прогрева колонн, облицованных плитами КНАУФ-Файерборд, с параметрами, представленными в таблице 2.

Параметры облицовки стальных колонн

Таблица 2

№ п/п	№ профиля, ГОСТ	Приведенная толщина металла, мм (обогрев по контуру/коробчатое сечение)	Толщина огнезащиты, мм	Время достижения критической температуры 500 °С, мин
1*	№ 20 ГОСТ 8239-89	3,4/4,5	12,5	50
2*	№ 20 ГОСТ 8239-89	3,4/4,5	20	78
3	№ 20Б1 АСЧМ 20-93	3,4/4,5	32,5 (20+12,5)	114
4*	№ 20 ГОСТ 8239-89	3,4/4,5	40 (20+20)	140
5	№ 20Б1 АСЧМ 20-93	3,4/4,5	45 (20+2×12,5)	171
6*	№ 20 ГОСТ 8239-89	3,4/4,5	52,5 (2×20+12,5)	более 180 (ср. температура через 180 мин. огневого воздействия составила 344 °С)
7	№ 30Б2 АСЧМ 20-93	3,9/5,2	25 (2×12,5)	87
8	№ 40Б2 АСЧМ 20-93	5,3/7,01	12,5	68
9	№ 40Б2 АСЧМ 20-93	5,3/7,01	25 (2×12,5)	110
10	№ 40К2 АСЧМ 20-93	9,2/13,7	12,5	95

*¹) приведены результаты сертификационных испытаний.

Испытания колонн проводились при четырехстороннем тепловом воздействии по стандартному температурному режиму согласно ГОСТ 30247.0. Порядок проведения испытаний и испытательное оборудование представлены в вышеуказанных отчетах.

Результаты испытаний стальных конструкций с огнезащитными облицовками, выполненными из плит КНАУФ-Файерборд по стальному кар-

касу из тонколистовых оцинкованных профилей, были проанализированы и обобщены.

3.2 Приведенная толщина металла конструкций

Для приближенного расчета приведенной толщины металла $\delta_{пр}$, стальных конструкций с огнезащитой и без нее следует использовать формулу ¹:

$$\delta_{пр} = \frac{F}{P} \quad (5)$$

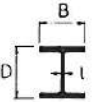



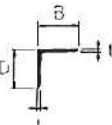


где:

F – площадь поперечного сечения конструкции, мм² – определяется из справочных данных (сортамент);

P – обогреваемый периметр сечения конструкции, мм – см. таблицу 3.

Примечание: Обогреваемый периметр незащищенных стальных конструкций вычисляется по таблице 3, как для конструкций облицованных по контуру.

Таблица 3

Профиль	Обогреваемый периметр P при различных условиях обогрева			
	Облицовка по контуру		Облицовка в виде короба	
	с 4-х сторон	с 3-х сторон	с 4-х сторон	с 3-х сторон
	 $2B+2D+2(B-t) = 4B+2D-2t$	 $B+2D+2(B-t) = 3B+2D-2t$	 $2B+2D$	 $B+2D$
	 $2B+2D$	 $B+2D$	 $2B+2D$	 $B+2D$

Профиль	Обогреваемый периметр П при различных условиях обогрева			
	Облицовка по контуру		Облицовка в виде короба	
	с 4-х сторон	с 3-х сторон	с 4-х сторон	с 3-х сторон
	 $2B + 2D + 2(B-t)$ $= 4B + 2D - 2t$	 $B + 2D + 2(B-t)$ $= 3B + 2D - 2t$	 $2B + 2D$	 $B + 2D$
	 $2B + 2D$	 $B + 2D$	 $2B + 2D$	 $B + 2D$
	 πD	- // -	 πD	- // -

¹ Значения приведенной толщины металла в данной таблице действительны при толщине облицовки не более 20 мм. В противном случае, для вычислений следует пользоваться формулами (6)÷(11).

Для определения приведенной толщины металла конструкций облицованных штукатурками и плитными материалами используют формулы (6)÷(11).

▪ коробчатое сечение (рис. 8.):

$$\delta_{np} = \frac{(\delta_{np,x} b + \delta_{np,y} a)}{a + b} \quad (6)$$

где:

a и b – размеры сечения, м;

$\delta_{np,x}$ и $\delta_{np,y}$ – приведенные толщины пластин по осям x и y :

$$\delta_{np,x} = \delta_x \frac{b - \delta_y}{b + \delta_0} - 0,25 \frac{C\gamma_0}{C_{cm}\gamma_{cm}} \frac{\delta_0^2}{b + \delta_0} \quad (7)$$

$$\delta_{np,y} = \delta_y \frac{a - \delta_x}{a + \delta_0} - 0,25 \frac{C\gamma_0}{C_{cm}\gamma_{cm}} \frac{\delta_0^2}{a + \delta_0} \quad (8)$$

где:

δ_x и δ_y – толщины стенок сечения пластин по осям x и y ;

δ_0 – толщина облицовки, м;

$C\gamma_0$ и $C_{cm}\gamma_{cm}$ – объемные начальные теплоемкости облицовки и металла, Дж/(кгК).

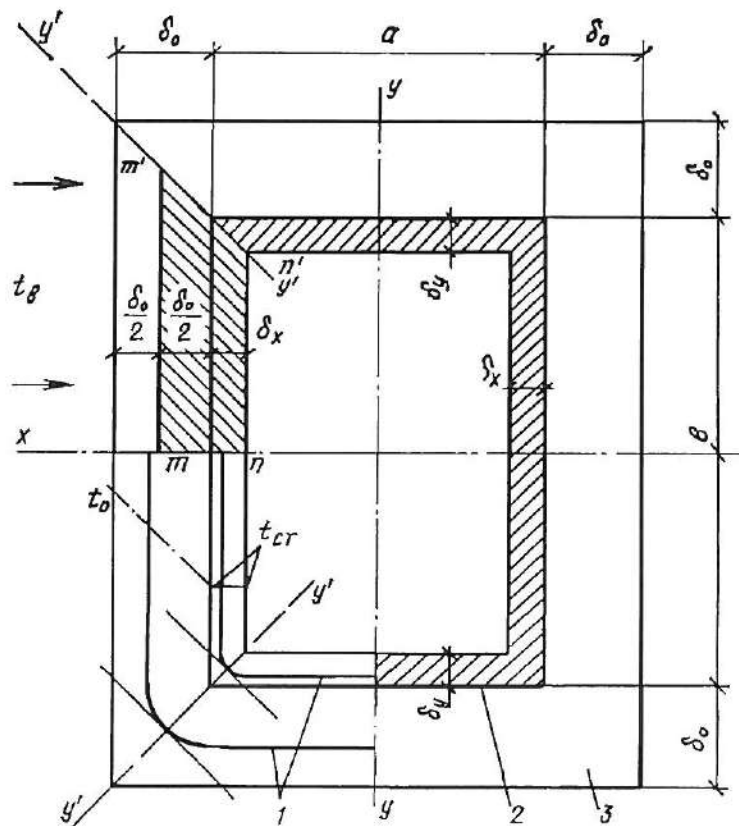


Рис. 8. Схема коробчатого сечения с облицовкой.

- круглое сечение:

$$\delta_{np} = \delta_{cm} \frac{d_n - \delta_{cm}}{d_n + \delta_0} - 0,25 \frac{C\gamma_0}{C_{cm}\gamma_{cm}} \frac{\delta_0^2}{d_n + \delta_0} \quad (9)$$

где:

d_n – наружный диаметр сечения металла, м;

δ_{cm} – толщина стенки сечения, м.

- двутавровое сечение (в случае облицовки по контуру):

для полок –

$$\delta_{np} = \frac{t}{2} \quad (10)$$

где:

t – толщина полки, м;

для стенки –

$$\delta_{np} = 0,5d \frac{h - 1,5t}{h - 2t - \delta_0} - 0,25 \frac{C\gamma_0}{C_{cm}\gamma_{cm}} \frac{\delta_0^2}{h - 2t - \delta_0} \quad (11)$$

где:

d – толщина стенки, м;

h – высота сечения, м.

- двутавровое сечение (в случае облицовки с воздушным зазором между стенкой и облицовкой): по формуле (6), принимая:

$$\delta_x = d/2; \delta_y = t.$$

3.3 Построение номограмм с использованием расчетного метода

В данной работе был использован расчетный метод определения прогрева стальных конструкций с огнезащитой, общие положения которого представлены в приложении.

В результате сравнительного анализа данных по испытаниям были получены теплофизические характеристики материала облицовки из плит КНАУФ-Файерборд: плотность, влажность, степень черноты, коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоемкости, - при нормальных условиях, а также при воздействии температурного режима.

Для этого на ЭВМ было построено несколько моделей испытанных ранее конструкций и проведен ряд теплотехнических расчетов с использованием подобранных свойств материала плит КНАУФ-Файерборд. Сравнительные расчеты проводились до достижения среднего расхождения между результатами расчетов и испытаний не более 20 %.

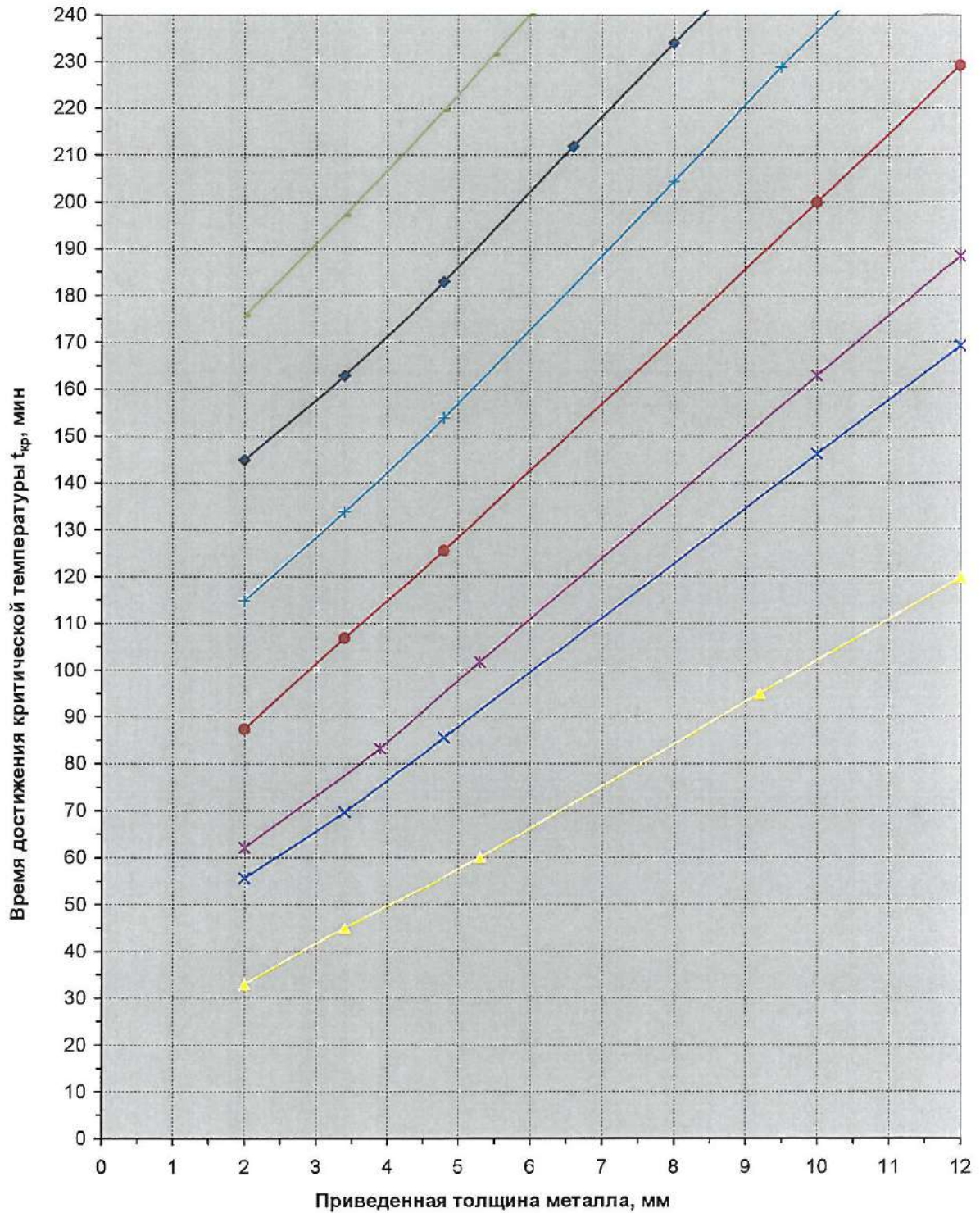
Теплофизические характеристики облицовки, полученные в результате анализа данных по испытаниям, далее были использованы для построения зависимостей (номограмм) огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из плит КНАУФ-Файерборд при различных толщинах облицовки.

Для расчетов были построены модели стальных конструкций с огнезащитой из плит КНАУФ-Файерборд с разными значениями толщин облицовки и приведенной толщины металла.

Далее были проведены теплотехнические расчеты данных конструкций при воздействии температурного режима "стандартного пожара" и с использованием полученных свойств материала.

За предел огнестойкости конструкции принималось время нагревания, по истечении которого средняя температура стальной конструкции достигала критической величины. Критическая температура $t_{кр}$ принималась для значений: 450, 500 (по ГОСТ Р 53295), 550 и 600 °С.

В результате расчетов был получен ряд значений пределов огнестойкости конструкций при различных критических температурах $t_{кр}$. Все эти данные были сведены в таблицы пределов огнестойкости конструкций для 4-х значений критических температур, по которым были построены номограммы огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из плит КНАУФ-Файерборд, см. рис. 9-12.



Толщина огнезащитной облицовки из плит КНАУФ-Файерборд:

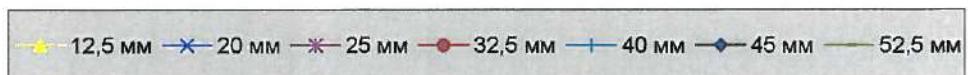
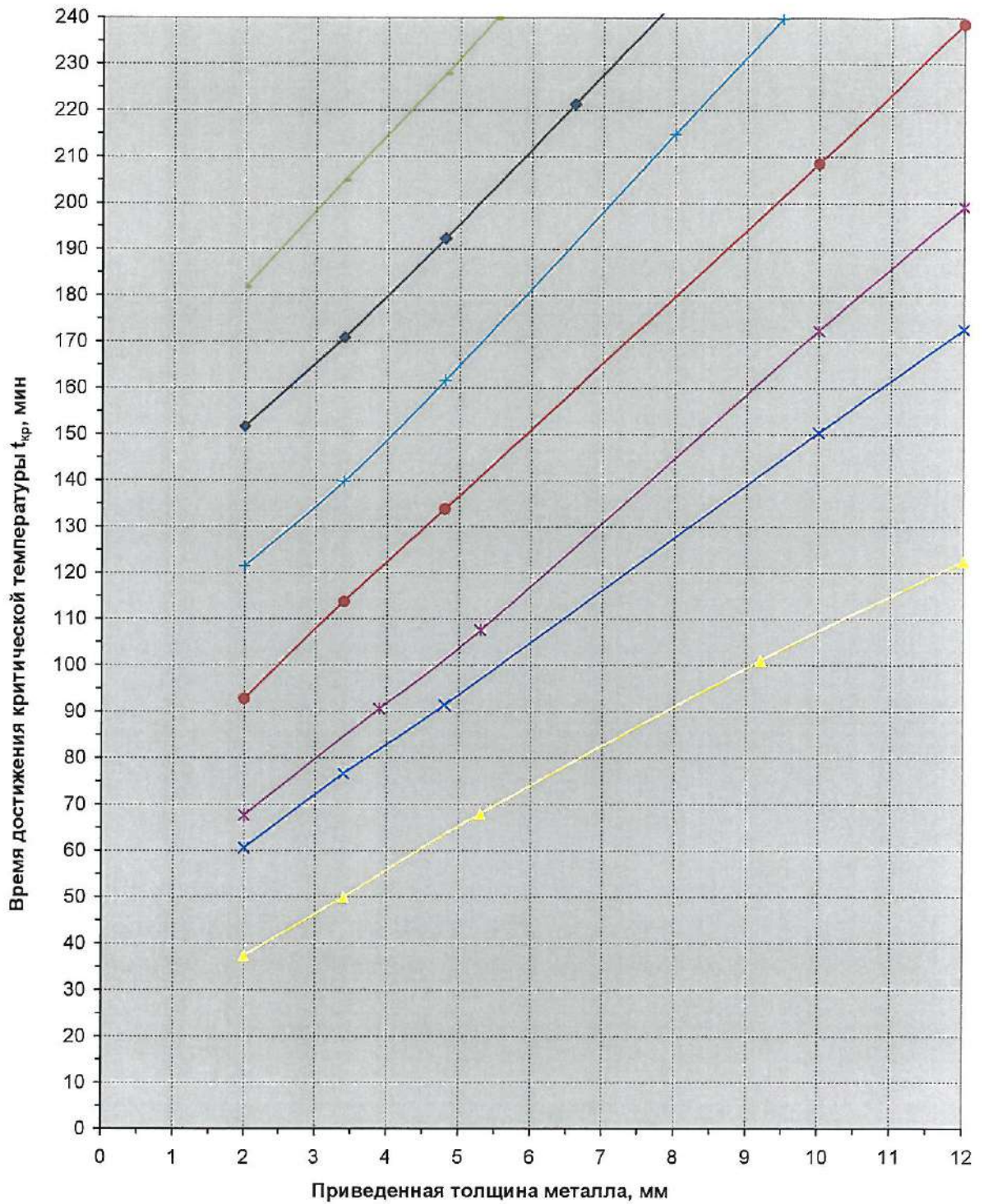


Рис. 9. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит КНАУФ-Файерборд при $t_{кр} = 450$ °С.



Толщина огнезащитной облицовки из плит КНАУФ-Файерборд:

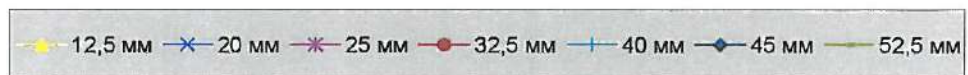
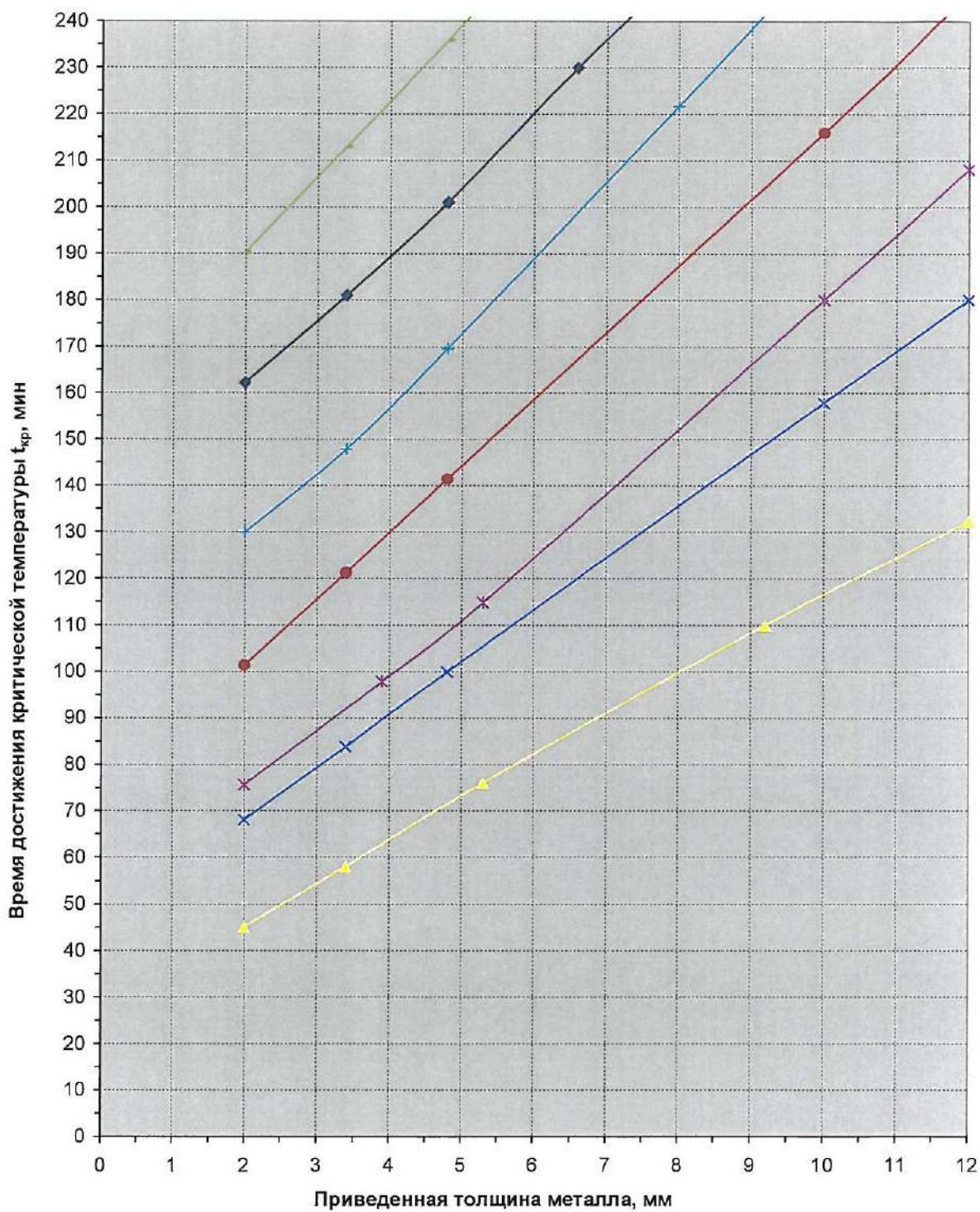


Рис. 10. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит КНАУФ-Файерборд при $t_{кр} = 500$ °С.



Толщина огнезащитной облицовки из плит КНАУФ-Файерборд:

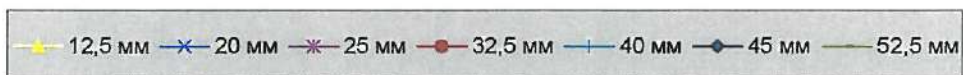
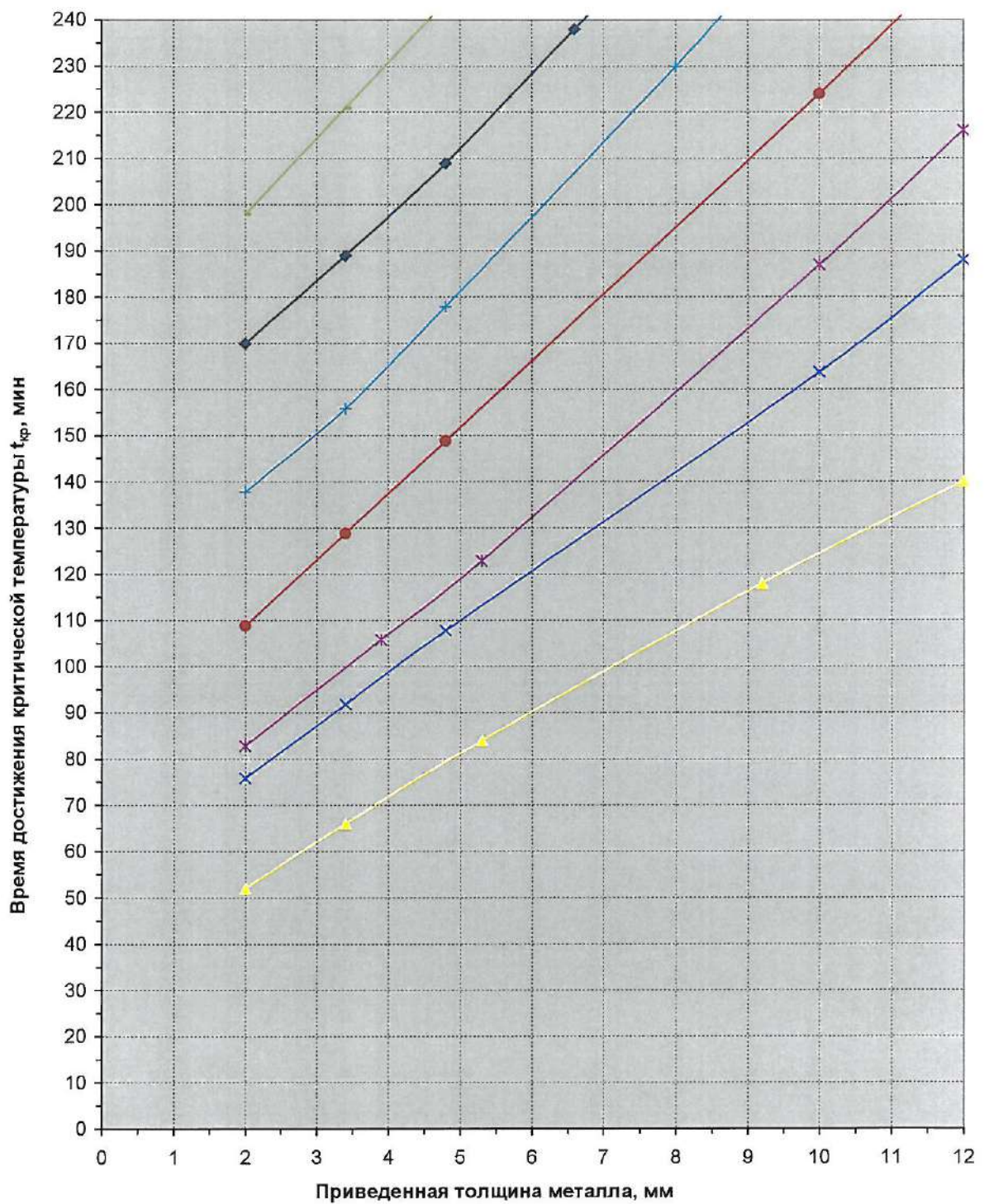


Рис. 11. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит КНАУФ-Файерборд при $t_{кр} = 550$ °С.



Толщина огнезащитной облицовки из плит КНАУФ-Файерборд:

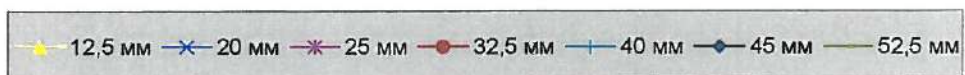


Рис. 12. Огнестойкость стальных конструкций с огнезащитной облицовкой из плит КНАУФ-Файерборд при $t_{кр} = 600$ °С.

3.4 Использование номограмм

Номограммы огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из плит КНАУФ-Файерборд предназначены для определения пределов огнестойкости стальных конструкций при критических температурах стали: $t_{кр} = 450, 500, 550$ и 600 °С, см. рис. 9-12 соответственно.

Номограммы построены в координатах: "Приведенная толщина металла, мм" - "Время, мин", где "Время" - время достижения предела огнестойкости конструкции. Каждая точка номограммы соответствует пределу огнестойкости стальной конструкции с определенной приведенной толщиной металла и толщиной облицовки из плит КНАУФ-Файерборд. Точки номограммы, соответствующие конструкциям с одной и той же толщиной плит КНАУФ-Файерборд, соединены линиями одного цвета и обозначены в легенде в виде значений толщины облицовки (мм). Для поиска промежуточных значений приведенной толщины металла и толщины облицовки следует использовать интерполяцию графиков номограммы.

Для определения предела огнестойкости конструкции необходимо предварительно произвести статический расчет по п. 2 для определения критической температуры стали исследуемой конструкции и принять ближайшее значение $t_{кр}$ из приведенного выше ряда, либо принять нормативное значение $t_{кр}$. Далее следует определить приведенную толщину металла конструкции по формуле (5).

Определив критическую температуру и выбрав соответствующую ей номограмму, на поле номограммы находится график, соответствующий заданной толщине облицовки из плит КНАУФ-Файерборд, см. легенду. Выбранный график является функцией зависимости времени предела огнестойкости конструкции от приведенной толщины металла и используется для определения предела огнестойкости стальной конструкции с огнезащитной облицовкой из плит КНАУФ-Файерборд выполненной по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей.

Аналогичным образом данные номограммы могут использоваться для решения обратных задач: поиска минимальной толщины плит КНА-УФ-Файерборд, для обеспечения заданного предела огнестойкости, и поиска минимальной приведенной толщины металла конструкции для обеспечения заданного предела огнестойкости.

4 Пример расчета предела огнестойкости стальной колонны с огнезащитной облицовкой, выполненной из плит КНАУФ-Файерборд по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей

Исходные данные:

Дана стальная колонна, выполненная из двутавра № 20 по ГОСТ 8239-89, длиной 3,0 м, с шарнирным опиранием по концам, нагруженной центрально приложенной нагрузкой $N_n=40$ т. Колонна имеет огнезащиту из плит КНАУФ-Файерборд толщиной 20 мм. Определить предел огнестойкости колонны при условии 4-х стороннего обогрева.

Расчет:

1. Согласно п. 2.2. вычисляем критическую температуру:

По формулам (1) и (2) вычисляем коэффициенты γ_T и γ_e при следующих параметрах:

$$N_n = 40000 \text{ кг};$$

$$F = 26,8 \text{ см}^2 - \text{ взято из справочника конструктора};$$

$$R^n = 2800 \text{ кг/см}^2 - \text{ для стали Ст5 по ГОСТ 380-71};$$

$$E_n = 2100000 \text{ кг/см}^2;$$

$$l_0 = 300 \text{ см} - \text{ для случая шарнирного опирания обоих концов};$$

$$J_{min} = 1840 \text{ см}^4 - \text{ взято из справочника конструктора.}$$

$$\gamma_T = 0,53$$

$$\gamma_e = 0,09,$$

Для полученных коэффициентов γ_T и γ_e по таблице 1 находим значения температур и наименьшую принимаем за критическую температуру:

$$t_{кр} = 519 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. По формуле (5) вычисляем приведенную толщину металла конструкции. Геометрические размеры и площадь сечения колонны берутся из ГОСТ 8239-89 для двутавра № 20.

$$l = 789,6 \text{ мм} - \text{ для случая 4-х стороннего обогрева колонны};$$

$$F = 2680 \text{ мм}^2.$$

$\delta_{np} = 3,4/4,5$ мм (обогрев по контуру/коробчатое сечение).

3. Определив критическую температуру конструкции $t_{кр} = 519$ °С выбираем номограммы с ближайшими значениями $t_{кр} = 500$ °С и $t_{кр} = 550$ °С. Для заданной толщины плит КНАУФ-Файерборд $\delta_o = 20$ мм (см. легенду) и для найденной приведенной толщины металла $\delta_{np} = 3,4$ (4,5) мм находим два значения предела огнестойкости конструкции при $t_{кр} = 500$ °С и $t_{кр} = 550$ °С:

$\tau_1 = 77$ мин, $\tau_2 = 84$ мин.

Интерполируя данный отрезок получаем значение предела огнестойкости при $t_{кр} = 519$ °С:

$\tau = 80$ мин.

Приложение: Общие положения теплотехнического расчета стальных конструкций с огнезащитой.

Заместитель начальника отдела
кандидат технических наук



А.В. Пехотиков

Главный специалист

В.В. Павлов

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОГНЕЗАЩИТОЙ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

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

$$t_{в,\tau} = 3451g(0,133\tau + 1) + t_n \quad (12)$$

где:

$t_{в,\tau}$ - температура нагревающей среды, °К;

τ - время в секундах;

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:

$$\alpha = 29 + 5,77s_{np} \frac{(t_{в,\tau}/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_{в,\tau} - t_0} \quad (13)$$

где s_{np} - приведенная степень черноты системы: “нагревающая среда - поверхность конструкции”:

$$s_{np} = \frac{1}{(1/s) + (1/s_0) - 1} \quad (14)$$

где s - степень черноты огневой камеры печи. $s = 0,85$;

s_0 - степень черноты обогреваемой поверхности конструкции.

3. Расчет температуры металлического стержня конструкций производится с помощью ЭВМ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа для расчета составляется по алгоритму, который 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: испарение воды в облицовке и нагрев металла стержня). По этим формулам температура стержня вычисляется последовательно через расчетные интервалы времени - Δt до заданного критического значения.

4. Начальные условия для расчета принимаются следующими:

Начальная температура во всех точках по сечению конструкции до пожара и температура окружающей среды вне зоны пожара одинакова и равна $t_n = 293$ °К.

5. Величина расчетного интервала времени - Δt (шаг программы) выбирается такой, чтобы она целое число раз укладывалась в интервале машинной записи результатов расчета. При этом выбранная величина Δt не должна превышать значения, которое вычисляется по формуле (17).

6. Незащищенные металлические конструкции

Алгоритмом для машинного расчета незащищенных металлических конструкций является формула, имеющая вид:

$$t_{cm,\Delta\tau} = \frac{\Delta\tau}{\gamma_{cm} \delta_{np} (C_{cm} + D_{cm} t_{cm})} \alpha (t_{u,x} - t_0) + t_n \quad (15)$$

где $t_{cm,\Delta\tau}$ - температура стержня через расчетный интервал времени - $\Delta\tau$, °К;

t_{cm} - температура стержня в данный момент времени - τ , °К;

ПРИЛОЖЕНИЕ А

$t_{в, \tau}$ - температура нагревающей среды в данный момент времени- τ , °К;

α - коэффициент передачи тепла от нагревающей среды к поверхности конструкции, Вт/(м² град);

$C_{ст}$ - начальный коэффициент теплоемкости металла, Дж/(кг град);

$D_{ст}$ - коэффициент изменения теплоемкости металла при нагреве, Дж/(кг град²);

$\gamma_{ст}$ - удельный вес металла, кг/м³;

$\delta_{пр}$ - приведенная толщина металла, м:

$$\delta_{пр} = \frac{F}{\Pi} \quad (16)$$

где F - площадь поперечного сечения стержня, м²;

Π - обогреваемый периметр сечения стержня, м.

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

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{\gamma_{ст} \delta_{пр} (C + D_{ст} t_{ст})}{\alpha} \quad (17)$$

где α и $t_{ст}$ - максимально возможные значения в расчете.

8. Конструкции с огнезащитными облицовками

Для плоских конструкций с одномерным потоком тепла по толщине алгоритм машинного расчета составляется на основании схемы, изображенной на рис. 13. Огнезащитная облицовка толщиной δ_0 разбивается на n -ое число слоев Δx .

ПРИЛОЖЕНИЕ А

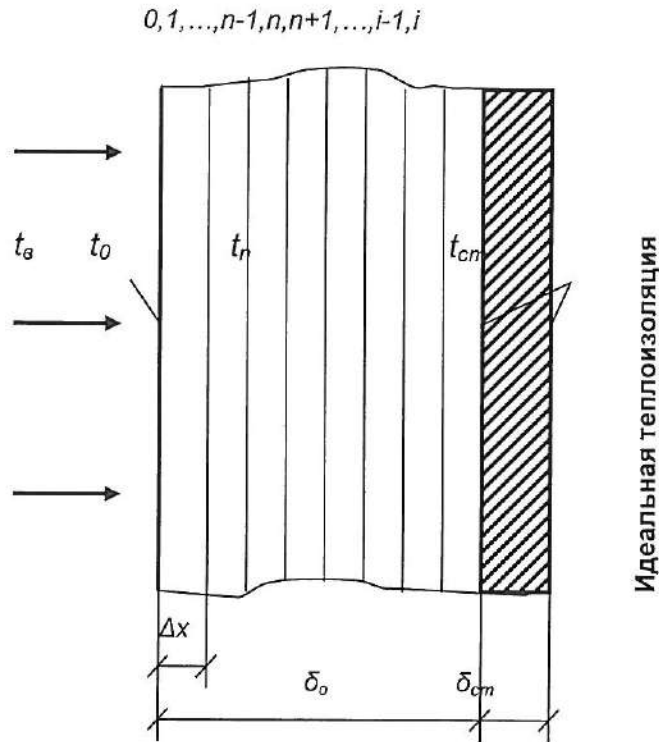


Рис. 13. Схема к расчету на ЭВМ прогрева стальной пластины с огнезащитной облицовкой.

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

- температура на обогреваемой поверхности облицовки:

$$t_{0, \Delta\tau} = \frac{2\Delta\tau [A(t_g - t_0) + 0,5B(t_g^2 - t_0^2) + \alpha(t_g - t_0)\Delta x]}{\gamma_0 \Delta x^2 (C + Dt_0)} + t_0 - t_\phi \quad (18)$$

- температура во внутренних слоях облицовки:

$$t_{n, \Delta\tau} = \frac{\Delta\tau [A(t_{n-1} - 2t_n + t_{n+1}) + 0,5B(t_{n-1}^2 - 2t_n^2 + t_{n+1}^2)]}{\gamma_0 \Delta x^2 (C + Dt_n)} + t_n - t_\phi \quad (19)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ А

- температура на стальной пластине:

$$t_{cm,\Delta\tau} = \frac{2\Delta\tau [A(t_n - t_{cm}) + 0,5B(t_n^2 - t_{cm}^2)]}{\Delta x [\gamma_0 \Delta x (C + Dt_{cm}) + 2\gamma_{cm} \delta_{cm} (C_{cm} + D_{cm} t_{cm})]} + t_{cm} - t_{\phi} \quad (20)$$

где A - начальный коэффициент теплопроводности облицовки, Вт/(м град);

B - коэффициент изменения теплопроводности облицовки при нагреве, Вт/(м град²);

C - начальный коэффициент теплоемкости облицовки, Дж/(кг град);

D - коэффициент изменения теплоемкости облицовки при нагреве, Дж/(кг град²);

$$t_{\phi} = \frac{p_v r}{100 \left[(C + Dt_{cm}) + \frac{2\gamma_{cm} \delta_{cm} (C_{cm} + D_{cm} t_{cm})}{\gamma_0 \Delta x} \right]}$$

- фиктивная температура.

где p_v - начальная весовая влажность облицовки, %;

r - скрытая теплота парообразования воды, $r=2260 \cdot 10^3$ Дж/кг.

