

**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**

**УТВЕРЖДАЮ
Начальник
ФГБУ ВНИИПО МЧС России**

В.И. Климкин



**СРЕДСТВА ОГНЕЗАЩИТЫ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.
РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСУЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ С ТОНКОСЛОЙНЫМИ ОГНЕЗАЩИТНЫМИ
ПОКРЫТИЯМИ**

МЕТОДИКА

Санкт-Петербург 2013

Выполнено по заданию Департамента надзорной деятельности МЧС
России.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Общие положения	3
2 Статический расчёт	4
2.1. Центрально-нагруженные стержни	4
2.2. Изгибающие и внецентренно-нагруженные элементы	6
2.3. Фермы	7
3. Теплотехнический расчёт	7
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Пример расчёта огнестойкости	12
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	16

Методика предназначена для специалистов по разработке проектов огнезащиты, инженеров ИПЛ МЧС России, экспертов в области пожарной безопасности и может быть использована при разработке и экспертизе проектов огнезащиты металлических конструкций.

Работа выполнена на основании п. 3.3-1/Б Плана научно-технической деятельности в МЧС России на 2011-2013 гг., утверждённым приказом МЧС России от 05.03.2011 № 107.

1. Общие положения.

1.1. Расчет пределов огнестойкости стальных конструкций производится по признаку потери несущей способности (R) в нагретом состоянии в результате ее снижения до уровня нормативной нагрузки.

1.2. Расчет предела огнестойкости стальной конструкции по потере несущей способности состоит из теплотехнической и статической частей. Сущность методики заключается в определении критической температуры стали исследуемой конструкции, при которой наступает её предел огнестойкости проведением статического расчета и определении времени от начала теплового воздействия до достижения критической температуры проведением теплотехнического расчета на основании экспериментальных данных.

1.3. Статический расчет конструкции производится в соответствии с п. 2 настоящей методики.

1.4. Теплотехнический расчет производится с помощью номограмм, полученных по результатам огневых испытаний (по ГОСТ Р 53295 или ГОСТ 30247.1) стальных конструкций с тонкослойным огнезащитным покрытием, в соответствии с п. 3 настоящей методики.

2. Статический расчёт.

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.

2.1. Центрально-нагруженные стержни.

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

Критическая температура центрально-нагруженных 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'' и модуля упругости Е стали в зависимости от температуры.

Температура, °C	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_c вычисляются по формулам:

$$\gamma_t = \frac{N_H}{FR^H} \quad (1)$$

$$\gamma_c = \frac{N_H}{\pi^2} \frac{l_0^2}{E_H J_{min}} \quad (2)$$

где:

N_H - нормативная нагрузка, кг;

F - площадь поперечного сечения стержня, см²;

R_H - начальное нормативное сопротивление металла, кг/см²
(по справочным данным);

E_n - начальный модуль упругости металла, кг/см², для сталей - $E = 2100000$ 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 - $0,5l$;

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

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

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

2.2 Изгибающие и внецентренно-нагруженные элементы.

Предел огнестойкости изгибающих 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:

$$\gamma_t = \frac{M_H}{WR^H}, \quad (3)$$

где:

M_H - 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:

$$\gamma_t = \frac{N_H}{R^H} \left(\frac{e}{W} + \frac{1}{F} \right), \quad (4)$$

где:

e - эксцентрикситет приложения нормативной нагрузки - N_H , 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).

2.3. 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. Теплотехнический расчёт.

Испытания на огнестойкость (или огнезащитную эффективность) образцов строительных конструкций проводятся при воздействии на их поверхность стандартного температурного режима пожара, определяемого в виде следующей зависимости:

$$T = T_0 + 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60}\tau + 1\right), \quad (5)$$

где

T_0 - начальная температура;

τ - время от начала испытаний, сек.

Скорость нагрева стальной конструкции оценивается при пренебрежении теплоёмкостью огнезащитного покрытия, зависимостью теплофизических свойств покрытия от координаты и в приближении усредненного по толщине покрытия градиента температур следующим уравнением:

$$\frac{dT_S}{dt} = \frac{\lambda \cdot (T - T_S)}{d \cdot \rho_S \cdot c_S \cdot \delta_{np}}, \quad (6)$$

где:

λ - коэффициент теплопроводности покрытия, Вт/(м·К);

d – толщина покрытия в исходном состоянии, м;

ρ_S - плотность стали, кг/м³;

c_S – средняя удельная теплоёмкость стали, Дж/(кг·К);

T – температура в печи, К;

T_s – температура конструкции, К;

t – время, с; δ_{np} – приведенная толщина металла, м:

$$\delta_{np} = \frac{F}{\Pi}, \quad (7)$$

где:

F - площадь поперечного сечения стержня, м²;

Π - обогреваемый периметр сечения стержня, м.

Если суммарная теплоёмкость покрытия сопоставима с теплоёмкостью конструкции, то к теплоёмкости стали добавляется поправка:

$$\Delta c_s = \frac{c_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot m_{\Pi}}{m_s}, \quad (8)$$

Границные условия задачи описывались лучистым и конвективным теплообменом поверхности конструкции с окружающей средой:

$$-\lambda gradT = \alpha_k (T_g - T_{\Pi}) + \varepsilon_{np} \cdot \sigma ((T_g + 273)^4 - (T_{\Pi} + 273)^4), \quad (9)$$

где:

$\alpha_k = 29$ Вт/м² - коэффициент конвективного теплообмена для обогреваемой поверхности,

ε_{np} - приведенная степень черноты системы «обогревающая среда - поверхность конструкции»,

σ - постоянная Стефана – Больцмана;

T_{Π}, T_g - температуры поверхности конструкции и газовой фазы, °С.

Приведенная степень черноты системы «среда - поверхность конструкции» рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пп}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{эфф}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{пов}}} - 1}, \quad (10)$$

где:

$\varepsilon_{\text{эфф}} = 0,85$ - эффективная степень черноты продуктов горения;

$\varepsilon_{\text{пов}}$ - степень черноты поверхности конструкции.

Величина коэффициента теплопроводности λ может зависеть от температуры, толщины d и приведенной толщины конструкции $\delta_{\text{пп}}$. Зависимость λ от времени определяются из термограмм по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{d \cdot \rho \cdot c}{(T - Ts)} \delta_{\text{пп}} \cdot \frac{dT_s}{dt} \quad (11)$$

Зависимости коэффициентов теплопроводности покрытия от температуры нагрева определяются для каждого проведённого эксперимента.

На рисунке 1 приведена характерная зависимость от времени температуры стальной конструкции, защищённой слоем ОВП, на которой видны две точки перегиба, соответствующие вслучиванию покрытия и началу его выгорания. Температурная зависимость разбивается на три участка: нагрев конструкции через невспученное покрытие ($0 < t < t_1$), полностью вспученное ($t_1 < t < t_2$) и выгорающее ($t_2 < t$). Очевидно, что использование среднего коэффициента теплопроводности не позволяет учесть отсутствие защитного слоя до вслучивания покрытия и изменение скорости нагрева конструкции после начала выгорания покрытия. Коэффициент теплопроводности огнезащитного покрытия можно считать постоянным внутри выделенных областей. На границах между областями значения коэффициента теплопроводности изменяются скачком.

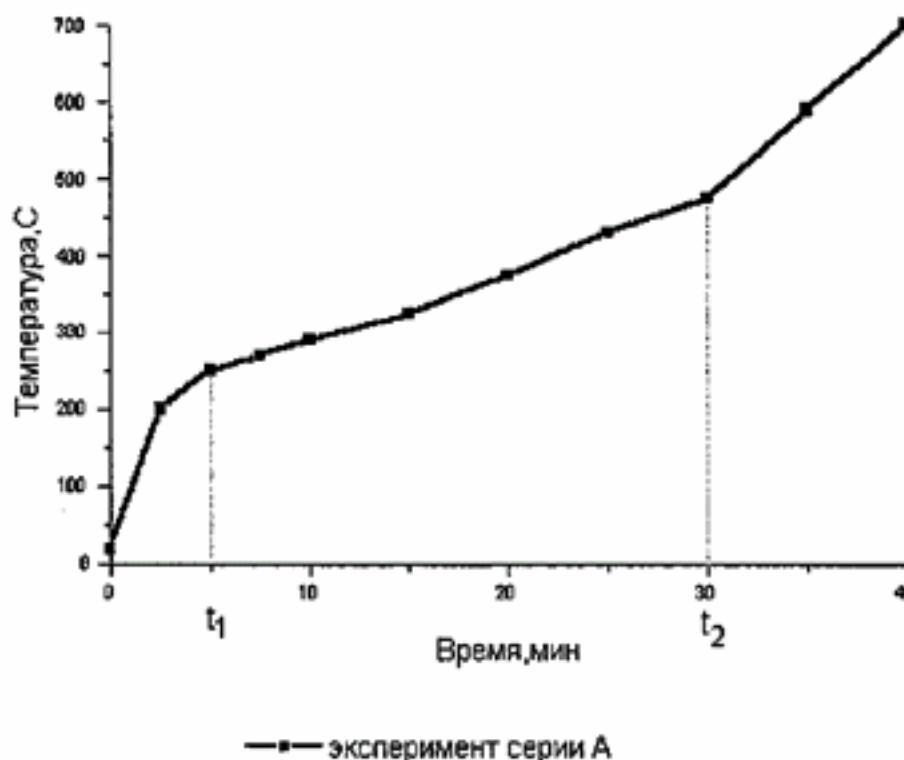


Рисунок 1. Характерная зависимость от времени температуры стальной конструкции, защищённой слоем ОВП

Для учёта перечисленных эффектов используется следующая математическая модель:

$$\begin{aligned}
 & \text{при } 0 < T_s < t_1 \quad \frac{dT_S}{dt} = \frac{\alpha \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{\rho \cdot c} + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{np} \cdot (T^4 - T_s^4) \cdot (F/A)}{\rho \cdot c}; \\
 & \text{при } t_1 < T_s < t_2 \quad \frac{dT_S}{dt} = \frac{\lambda_1 \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{d \cdot \rho \cdot c}; \\
 & \text{при } t_2 < T_s \quad \frac{dT_S}{dt} = \frac{\lambda_2 \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{d \cdot \rho \cdot c}, \tag{12}
 \end{aligned}$$

где:

$\alpha = 29$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, $\text{вт}/\text{м}^2\text{К}$;

ε_{np} – приведенная степень черноты покрытия;

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана - Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^4)$;

$T_{\text{ВСП}}$ - температура вспучивания покрытия;

$T_{\text{НВ}}$ - температура начала выгорания покрытия.

По указанной модели определяются значения λ_{1i} и λ_{2i} для каждого эксперимента и их средние значения $\bar{\lambda}_1$ и $\bar{\lambda}_2$ по группе экспериментов.

После определения зависимости коэффициента теплопроводности вспучивающегося покрытия от температуры расчёт времени прогрева стальной основы конструкции до критической температуры производится по формулам 5 и 6. Предел огнестойкости конструкции определяется округлением в меньшую сторону до ближайшего значения из чисел следующего ряда: 15, 30, 45, 60, 90, 180, 240, 360.

Примечание:

1. Коэффициент теплопроводности слоя тонкослойного вспучивающегося огнезащитного покрытия в общем случае может зависеть от условий обогрева конструкций (горизонтально установленные балки, вертикально установленные колонны).

2. Для получения исходных данных к расчетной методике необходимо проведение не менее трех испытаний конструкций одного типа (с конкретным огнезащитным покрытием, конкретной приведённой толщины, конкретного вида профиля). В случае получения существенно различающихся (более чем на 10 % от большего значения) зависимостей коэффициентов теплопроводности огнезащитного покрытия для разных испытаний, необходимо проведение дополнительных испытаний. Экспериментальные данные, допускается распространять на аналогичные типы конструкций с большей приведённой толщиной металла.

3. Результаты, полученные за пределами области экспериментальных данных, являются прогнозными.

ПРИМЕР РАСЧЁТА ОГНЕСТОЙКОСТИ

Задача – определить предел огнестойкости стальной конструкции с приведенной толщиной 4 мм и толщиной огнезащитного вспучивающегося покрытия (ОВП) 600 мкм.

Данные о массивности конструкций и толщинах защитного слоя опытных образцов приведены в таблице 2, температурные зависимости, полученные при испытаниях – на рисунке 2. Определение значений коэффициентов теплопроводности слоя ОВП производилось по формуле (11).

Таблица 2.- Проведённые эксперименты

Эксперимент	Толщина покрытия, мкм	Массивность	Марка профиля
1	577	291	IPE140
2	585	291	IPE140
3	251	200	I180
4	490	200	I180
5	487	291	IPE140
6	787	291	IPE140

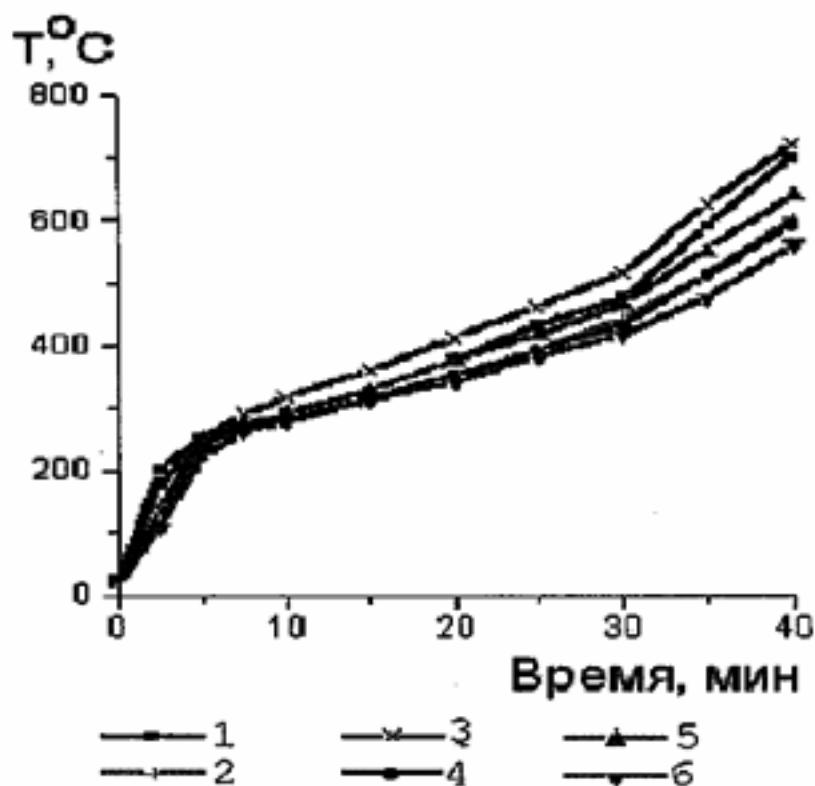


Рис. 2. Экспериментальные зависимости температуры конструкций от времени при воздействии стандартного температурного режима пожара (по ГОСТ Р 53295)

Зависимости коэффициентов теплопроводности слоёв ОВП от времени приведены на рисунке 3. На основании зависимостей температуры конструкции (рис. 2) и коэффициентов теплопроводности слоёв ОВП от времени (рис. 3), на рис. 4 построены зависимости коэффициента теплопроводности λ ОВП от температуры конструкции. Как и на рис. 1, зависимость λ ОВП разбивается на три участка: невспученное покрытие ($0 < T_s < 250$), полностью вспученное ($250 < T_s < 450$) и выгорающее ($450 < T_s$). Величина λ в диапазоне температур конструкции $250 - 450 {}^{\circ}\text{C}$ постоянна и не зависит от толщины защитного слоя и приведённой толщины конструкции.

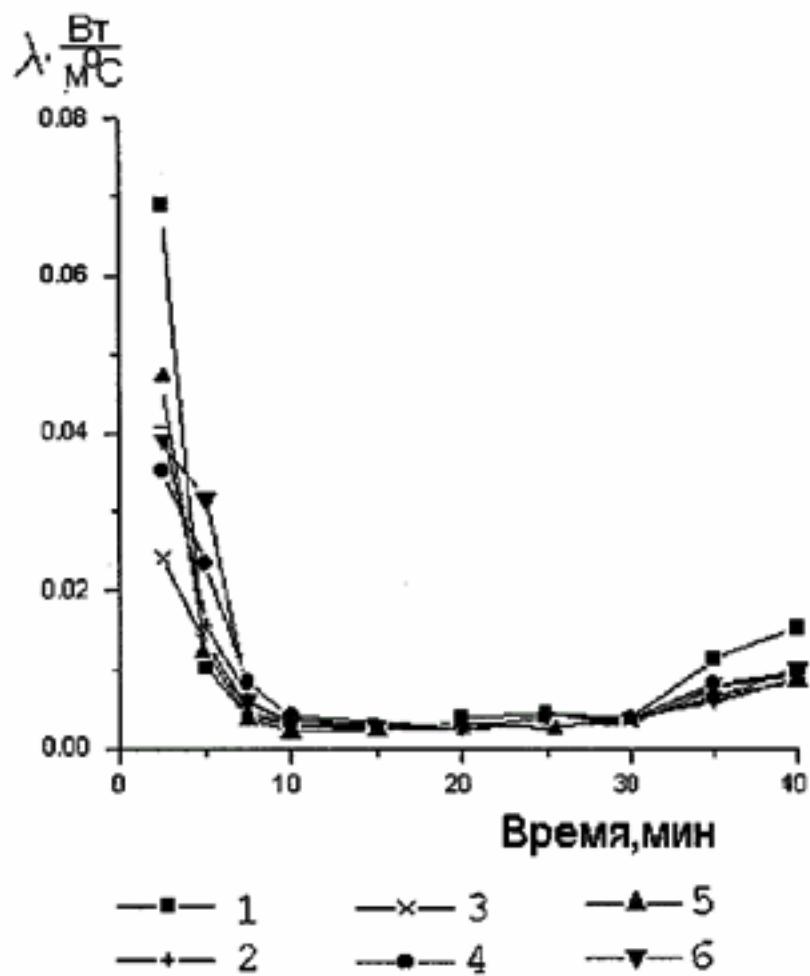


Рис. 3. Зависимость коэффициентов теплопроводности от времени при воздействии стандартного температурного режима пожара

Для учёта перечисленных эффектов используются следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 &\text{при } 0 < T_s < 250 \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\alpha \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{\rho \cdot c} + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{np} \cdot (T^4 - T_s^4) \cdot (F/A)}{\rho \cdot c}; \\
 &\text{при } 250 < T_s < 450 \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_1 \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{d \cdot \rho \cdot c}; \\
 &\text{при } 450 < T_s \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_2 \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{d \cdot \rho \cdot c}, \tag{9}
 \end{aligned}$$

где $\alpha = 29$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, $\text{вт}/\text{м}^2\text{К}$; $\varepsilon_{np} = 0.59$ – приведенная степень черноты; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана – Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^4)$.

По указанной модели определены значения λ_1 и λ_2 для каждого эксперимента и их средние значения $\bar{\lambda}_1$ и $\bar{\lambda}_2$.

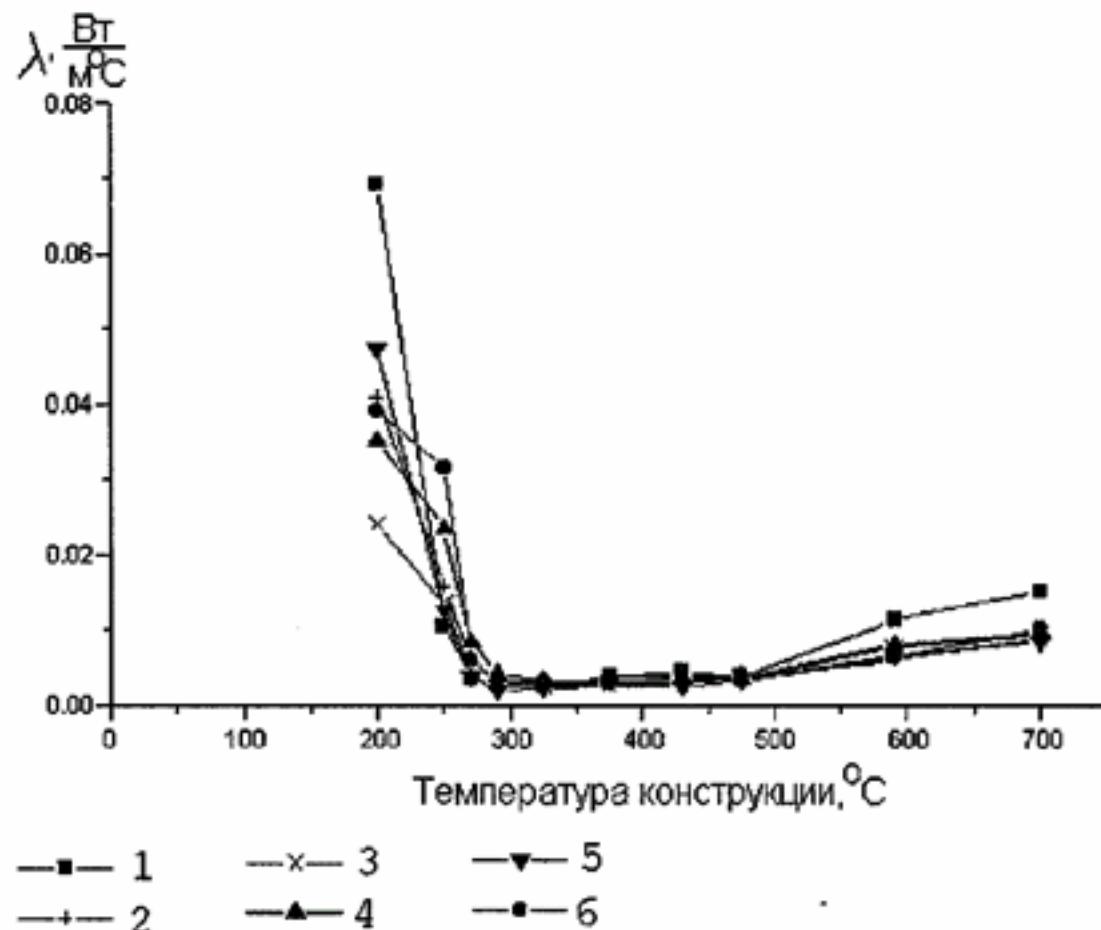


Рис. 4. Зависимость коэффициентов теплопроводности ОВП от температуры конструкции

При оценке огнестойкости стальных конструкций с критической температурой 500 °С предел огнестойкости стальной конструкции с приведенной толщиной металла 4 мм и толщиной огнезащитного покрытия 600 мкм составляет 39 минут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 2.13130.2012 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты».
2. ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования».
3. ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции»
4. ГОСТ Р 53295-2009 «Средства огнезащиты стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности».