

**Прочностные (статические) и теплотехнические расчеты  
с нанесенными огнезащитными покрытиями**

## Прочностной расчет

Учитывая особенность металлических конструкций (распределение температуры по их сечению принимается равномерным), для них можно, не определяя кривую снижения несущей способности, сразу вычислить критическую температуру в сечении, вызывающую потерю несущей способности.

Критическая температура определяется в зависимости от коэффициентов  $\gamma_T$  и  $\gamma_e$ , учитывающих изменения нормативного сопротивления и модуля упругости стали в зависимости от температуры (приведены в таблице):

- для изгибаемых и внецентренно-нагруженных конструкций;
- для центрально-нагруженных конструкций;
- пространственные конструкции (фермы).

**Значение коэффициентов  $\gamma_T$  и  $\gamma_e$ , учитывающих изменения нормативного сопротивления  $R_{up}$  и модуля упругости  $E$  стали, в зависимости от температуры**

Температура, $^{\circ}C$	$\gamma_T$	$\gamma_e$
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

При известных значениях коэффициента  $\gamma_{tem}$  можно определить значения критической температуры нагрева стали  $t_{cr}$  для предельного состояния конструкции, находящейся в условиях пожара:

$$\begin{aligned} &\text{при } \gamma_{tem} < 0,6 \\ &t_{cr} = 750 - 440\gamma_{tem}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{при } \gamma_{tem} \geq 0,6 \\ &t_{cr} = 1330(1 - \gamma_{tem}), \end{aligned}$$

## Центрально-нагруженные и центрально-растянутые конструкции

Центрально-нагруженные элементы утрачивают несущую способность в результате потери прочности или за счет потери устойчивости. Предел огнестойкости центрально-нагруженных элементов наступает в результате

прогрева их сечения до критической температуры. Критическая температура таких стержней определяется как наименьшая величина из двух найденных по таблице значений в зависимости от коэффициентов  $\gamma_T$  и  $\gamma_e$ , определяемых по формулам:

$$\gamma_T = \frac{N_n}{AR_{yn}},$$

$$\gamma_e = \frac{N_n}{\pi^2} \cdot \frac{l_0^2}{E_n J_{min}},$$

где:

$N_n$  – нормативная нагрузка, кН;

$A$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$R_{yn}$  – начальное нормативное сопротивление стали, МПа;

$E_n$  – начальный модуль упругости стали,  $E_n = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;

$l_0$  – расчетная длина стержня, м;

$J_{min}$  – наименьший момент инерции сечения стержня, м<sup>4</sup>.

Центрально-сжатые и внецентренно-сжатые стальные элементы могут потерять несущую способность при нагреве в результате потери их устойчивости. Потеря устойчивости наступает за счет снижения модуля упругости, роста деформаций температурной ползучести металла и его температурного расширения.

Для таких стержней критическая температура  $t_{cr}$  определяется по критическим деформациям  $\varepsilon_n$  в зависимости от значения коэффициента  $\gamma_T$ .

Значение  $\varepsilon_n$  для центрально-сжатых стержней определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_n = \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 - \frac{\sigma_n}{E},$$

где:  $\pi$  – число, равное 3,14;

$\lambda$  – максимальная гибкость элемента:

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{min}};$$

$l_0$  – расчетная длина элемента:

$$l_0 = \mu l;$$

$\mu$  – коэффициент, учитывающий характер закрепления опор сжатого элемента (например, при шарнирном опирании сжатого элемента  $\mu = 1$ ; при жестком опирании  $\mu = 0,5$ ; при жестком опирании одной опоры и шарнирном опирании другой  $\mu = 0,7$ ; для консоли  $\mu = 2$ );

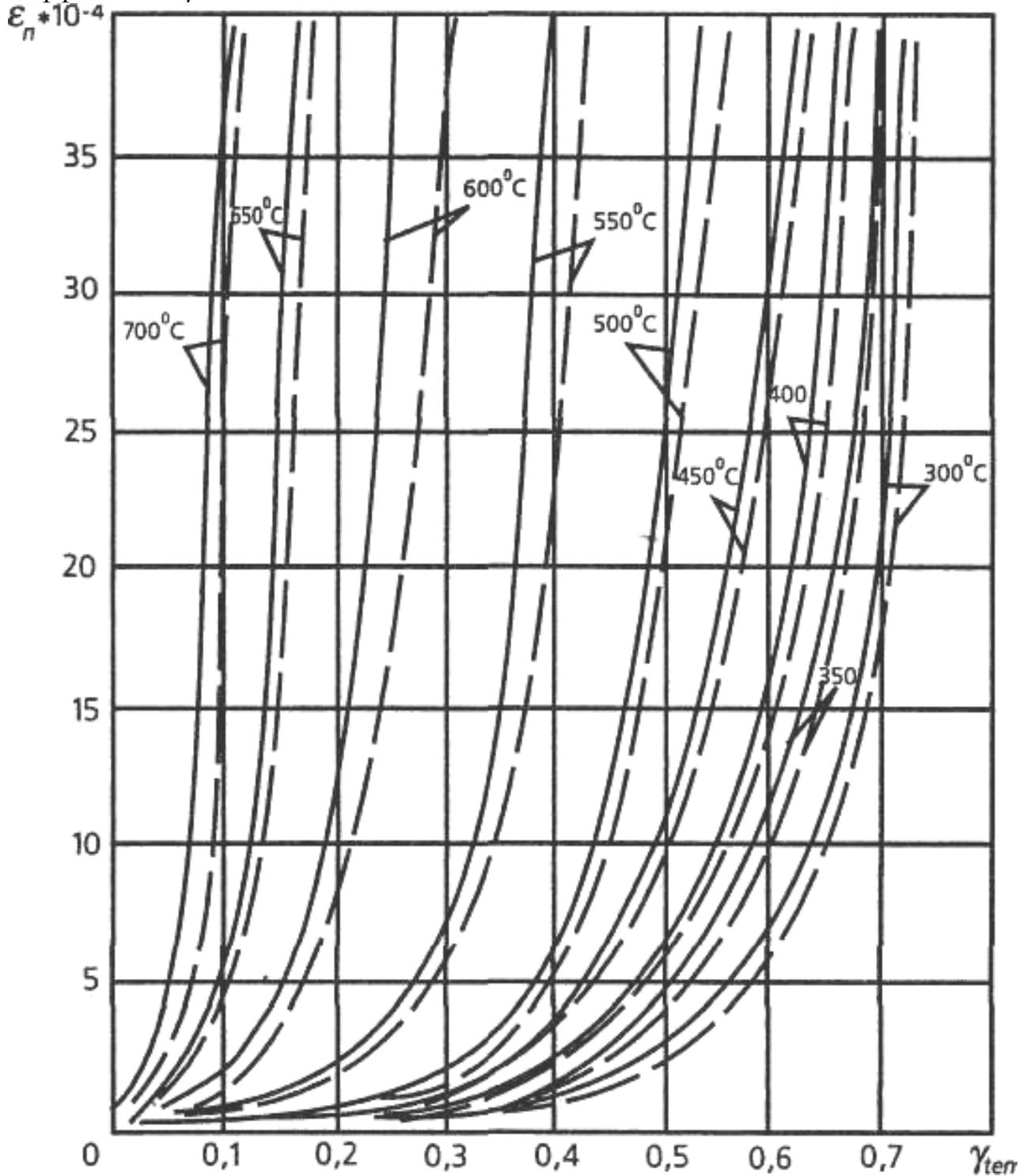
$l$  – геометрическая длина сжатого элемента.

$\sigma_n$  – напряжение в сечении от действия нормативной нагрузки:

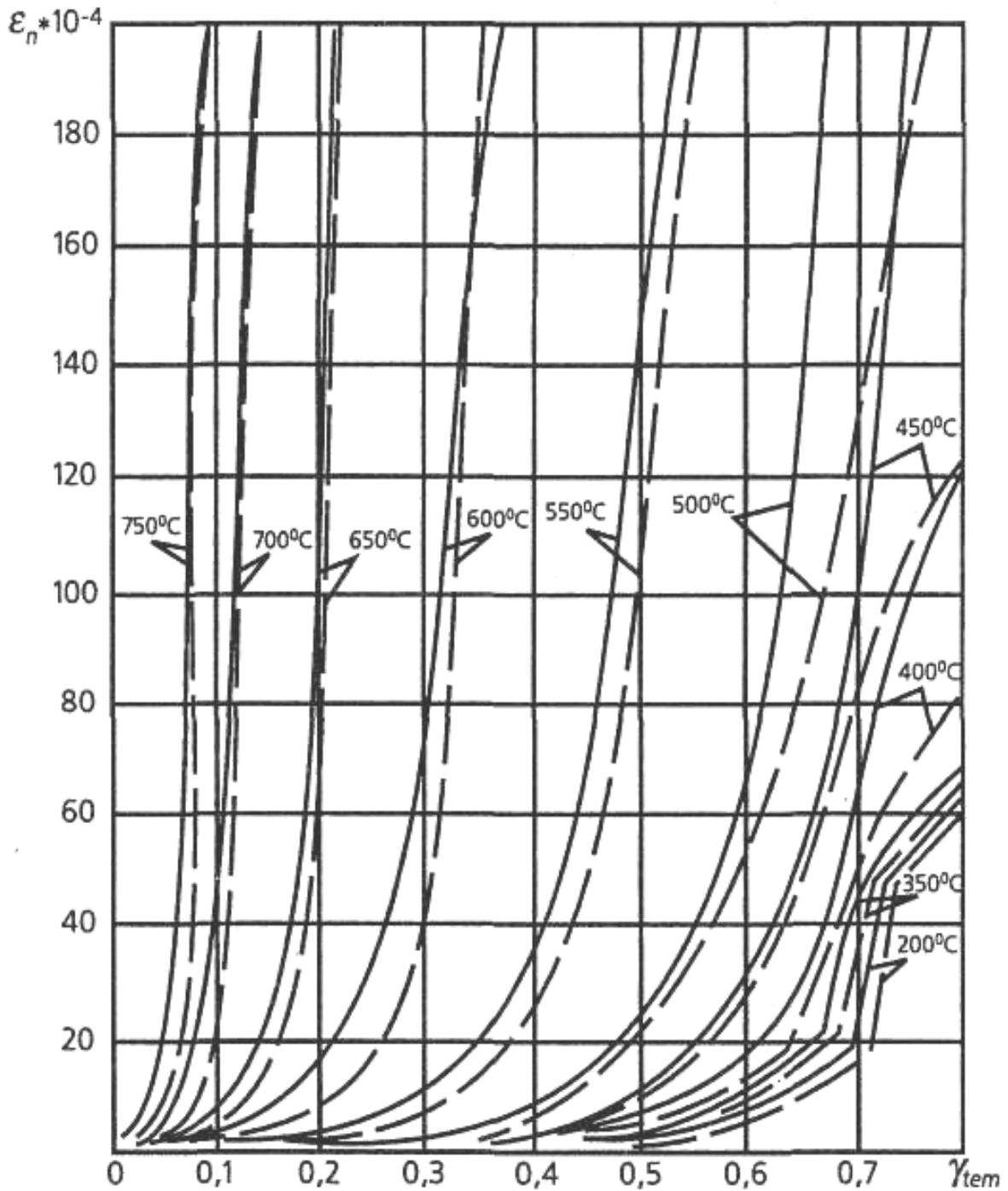
$$\sigma_n = \frac{N_n}{A};$$

$\sigma_n = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  – модуль упругости стали при температуре 20 °С.

Критическая температура  $t_{cr}$  для центрально-сжатых элементов из условия потери несущей способности в результате потери их устойчивости определяется с использованием кривых деформаций ползучести  $\varepsilon_n$  в зависимости от значения коэффициента  $\gamma_T$ .



Кривые деформации сталей при:  $\varepsilon_n < 0,005$ , температуре  $t$  °С и степени нагружения  $\gamma_T$  при  $R_{yn} < 290 \text{ МПа}$  — ;  $R_{yn} \geq 290 \text{ МПа}$  ---



Кривые деформации сталей при:  $\epsilon_{II} < 0,02$ , температуре  $t$  °С и степени нагружения  $\gamma_T$  при  $R_{yn} < 290$  МПа; -----  $R_{yn} \geq 290$  МПа

Критическая температура центрально-растянутых конструкций определяется по таблице в зависимости от коэффициента  $\gamma_T$ .

## Изгибаемые и внецентренно-нагруженные конструкции

Предел огнестойкости изгибаемых и внецентренно-нагруженных элементов наступает в результате увеличения температуры их наиболее напряженной грани до критической величины. Для элементов без огнезащиты и элементов сплошного сечения (с огнезащитой) температура наиболее напряженной грани принимается равной температуре всего сечения. Для элементов из прокатных профилей температура наиболее напряженной грани принимается равной температуре соответствующей полки или стенки поперечного сечения.

Критическая температура изгибаемых элементов определяется по таблице в зависимости от коэффициента  $\gamma_T$ , вычисляемого по формуле:

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W_{pl} R_{yn}},$$

где:

$M_n$  – изгибающий момент от нормативной нагрузки,  $H \cdot м$ ;

$W_{pl}$  – пластический момент сопротивления сечения,  $м^3$ .

$W_{pl} = c W_n$ , где  $c$  – коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций (для двутавра и швеллера – 1,12; для трубы – 1,26; для таврового сечения – 1,6; для квадратного сечения – 1,5).

Критическая температура внецентренно-сжатых стержней определяется как наименьшая величина из двух найденных по таблице 1 значений в зависимости от коэффициентов  $\gamma_T$  и  $\gamma_e$ . Коэффициент  $\gamma_T$  вычисляют по формуле:

$$\gamma_T = \frac{N_n}{R_{yn}} \left( \frac{e}{W_n} + \frac{1}{A} \right),$$

где:

$e$  – эксцентриситет приложения нормативной нагрузки,  $м$ .

Коэффициент  $\gamma_e$  вычисляют по формуле приведенной ранее.

Критическая температура внецентренно-растянутых элементов определяется по таблице в зависимости от коэффициента  $\gamma_T$ , вычисляемого по ранее приведенной формуле.

Описанная методика прочностного расчета, соответствующие характеристики и необходимые коэффициенты реализованы в форме электронной таблицы Microsoft Excel 2013.

## Теплотехнические расчеты

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

$$T = T_0 + 345 \log\left(\frac{8}{60}\tau + 1\right),$$

где  $T_0$  – начальная температура, °С;  $\tau$  – время от начала испытаний, с.

Граничные условия задачи описываются лучистым и конвективным теплообменом поверхности конструкции с окружающей средой:

$$-\lambda \text{grad}T = \alpha_k(T - T_s) + \varepsilon_{\text{пр}}\sigma(T^4 - T_s^4),$$

где  $\alpha_k = 29 \text{ Вт/м}^2$  – коэффициент конвективного теплообмена для обогреваемой поверхности<sup>1</sup>;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы «обогревающая среда – поверхность конструкции»;

$\sigma$  – постоянная Стефана - Больцмана;

$T, T_s$  – температуры газовой фазы и поверхности конструкции, К.

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

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{эф}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{пов}}} - 1},$$

где  $\varepsilon_{\text{эф}}$  – эффективная степень черноты продуктов горения;  $\varepsilon_{\text{пов}}$  – степень черноты поверхности конструкции.

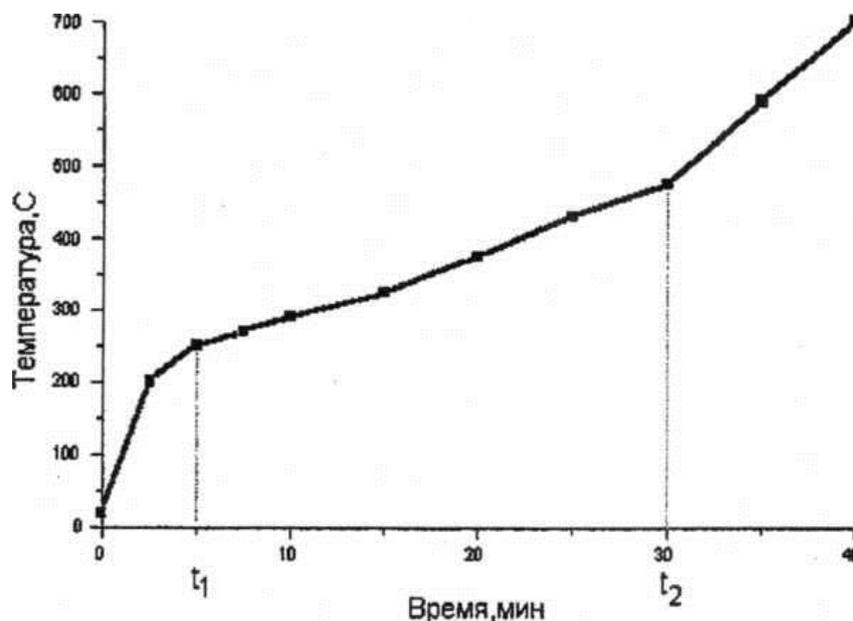
При огнезащите конструкции вспучивающимися составами скорость нагрева стальной конструкции оценивается при пренебрежении теплоёмкостью огнезащитного покрытия, зависимостью теплофизических свойств покрытия от координаты и в приближении усредненного по толщине покрытия градиента температур следующим уравнением:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda(T - T_s)}{d\rho_s c_s \delta_{\text{пр}}},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности покрытия, Вт/(м·К);  $d$  – толщина покрытия в исходном состоянии, м;  $\rho_s$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;  $c_s$  – средняя удельная теплоёмкость стали, Дж/(кг·К);  $T$  – температура в печи, К;  $T_s$  – температура конструкции, К;  $\delta_{\text{пр}}$  – приведенная толщина металла, м.

На рисунке ниже приведена характерная зависимость от времени температуры стальной конструкции, защищённой слоем ОВП, на которой видны две точки перегиба, соответствующие вспучиванию 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 ( $t > t_2$ ).

<sup>1</sup> Расчетно-экспериментальный метод определения предела огнестойкости несущих металлических конструкций с тонкослойными огнезащитными покрытиями: Методика. – ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2013.



Очевидно, что использование среднего коэффициента теплопроводности не позволяет учесть отсутствие защитного слоя до вспучивания покрытия и изменение скорости нагрева конструкции после начала выгорания покрытия.

Для учёта перечисленных эффектов используется следующая математическая модель:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\alpha_k(T - T_s)}{\rho_s c_s \delta_{пр}} + \frac{\varepsilon_{пр} \sigma (T^4 - T_s^4)}{\rho_s c_s \delta_{пр}}, \text{ при } T_s < T_{всп};$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_1 (T - T_s)}{d \rho_s c_s \delta_{пр}}, \text{ при } T_{всп} < T_s < T_{нв};$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_2 (T - T_s)}{d \rho_s c_s \delta_{пр}}, \text{ при } T_s > T_{нв},$$

где  $T_{всп}$  – температура начала вспучивания покрытия;  $T_{нв}$  – температура начала выгорания покрытия.

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

Тепловые свойства материалов, применяемые в расчете<sup>2</sup>.

Свойства стали: плотность 7850 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность 58 Вт/(м·К), теплоемкость 482 кДж/(кг·К).

Свойства состава «.....».

Плотность невспученного состава – 1000 кг/м<sup>3</sup>. Плотность вспученного состава (с учетом потерь) – 25 кг/м<sup>3</sup>.

Теплопроводность вспученного состава 0,042 Вт/(м·К).

Температура начала вспучивания – 200 °С.

Температура начала выгорания – 700 °С.

Теплоемкость – 1100 Дж/(кг·К).

<sup>2</sup> По данным, представленным Заказчиком

### Свойства воздуха в пустотах:

T, °C	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)
20	1,205	0,967	1,005
30	1,165	0,997	1,005
40	1,128	1,03	1,005
50	1,093	1,056	1,005
60	1,060	1,072	1,005
70	1,029	1,096	1,009
80	1,000	1,121	1,009
90	0,972	1,156	1,009
100	0,946	1,198	1,009
120	0,898	1,247	1,009
140	0,854	1,303	1,013
160	0,815	1,359	1,017
180	0,779	1,411	1,022
200	0,746	1,467	1,026
250	0,674	1,594	1,038
300	0,615	1,717	1,047
350	0,566	1,833	1,059
400	0,524	1,945	1,068
500	0,456	2,142	1,093
600	0,404	2,321	1,114
700	0,362	2,504	1,135
800	0,329	2,680	1,156
900	0,301	2,848	1,172
1000	0,277	3,012	1,185
1100	0,257	3,172	1,197
1200	0,239	3,415	1,210

Описанная модель теплообмена и характеристики материалов реализованы в программном комплексе ANSYS Mechanical Academic 18.2.

Графики повышения температуры стали в рассматриваемых конструкциях приведены на рис. 1–2.

Распределение полей температур в сечении конструкций представлено на рис. 3–4.

## Графики изменения температуры стали в рассматриваемых конструкциях

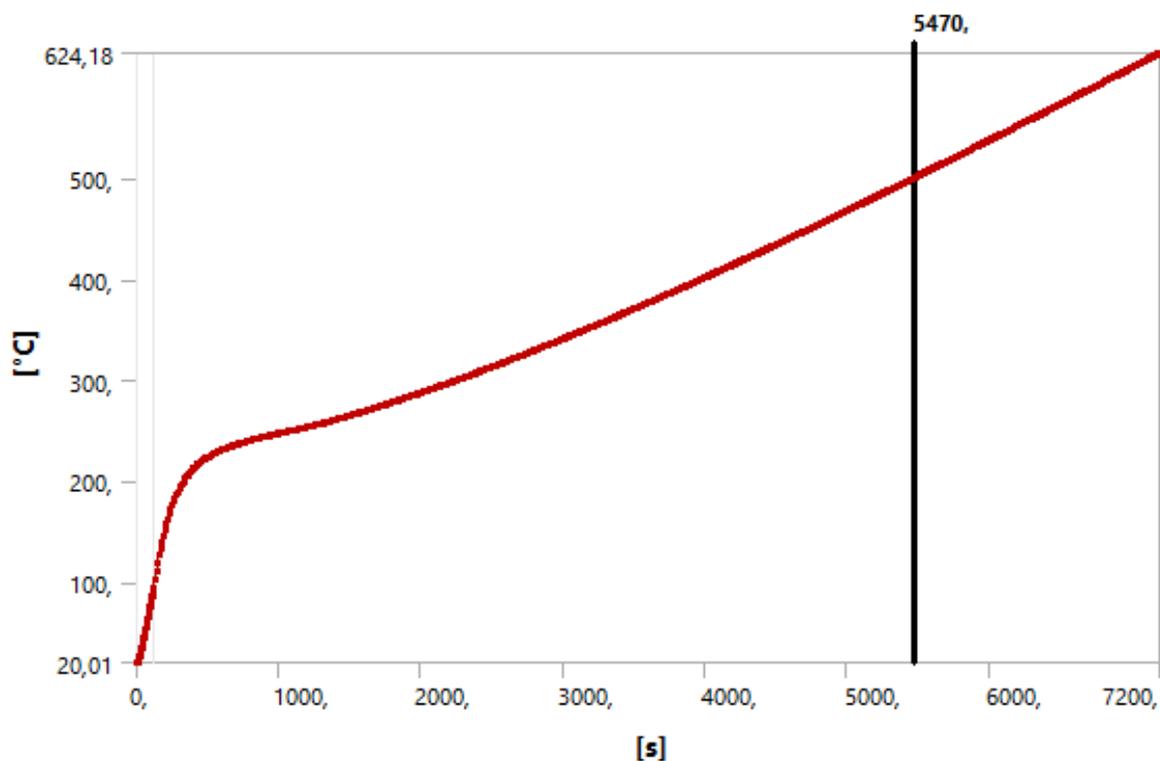


Рис. 1. ГС1 (труба 100×4), t = 1,5 мм

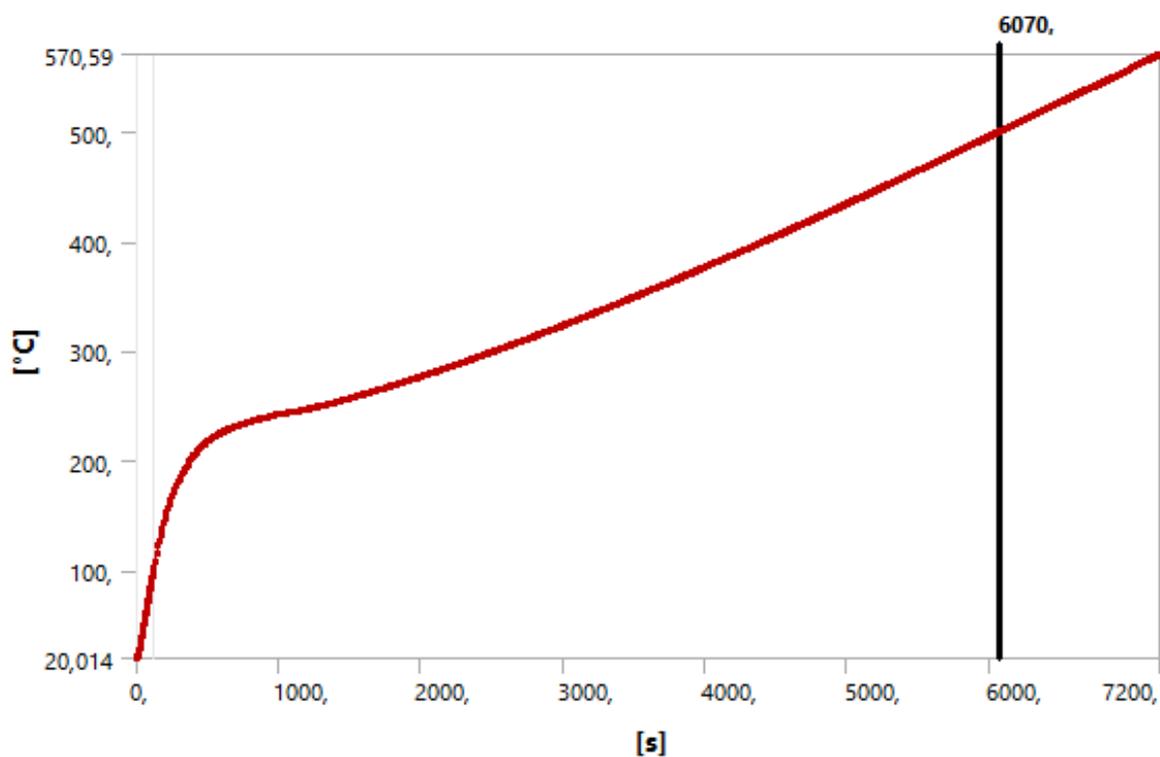


Рис. 2. ПР1 (двугавр 30Б1), t = 1,5 мм

## Характерное распределение полей температур в сечении конструкций

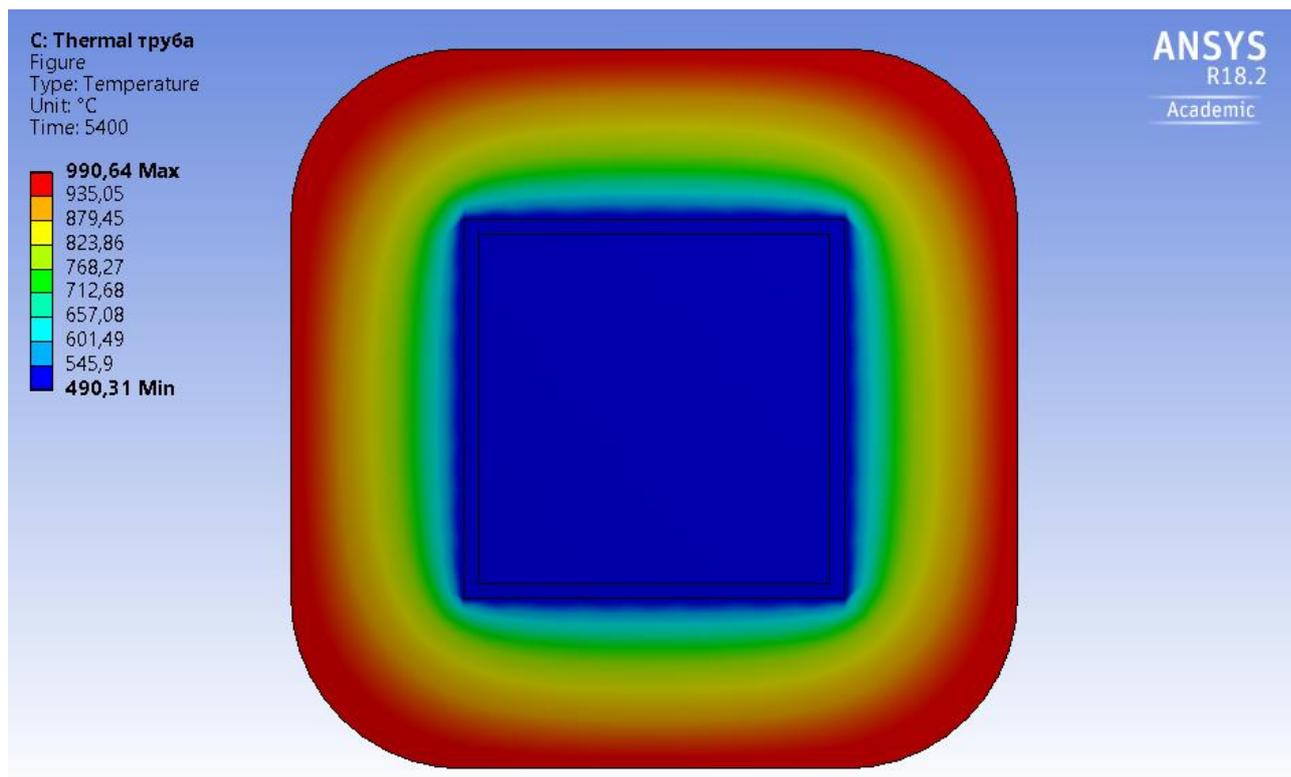


Рис. 3. Труба

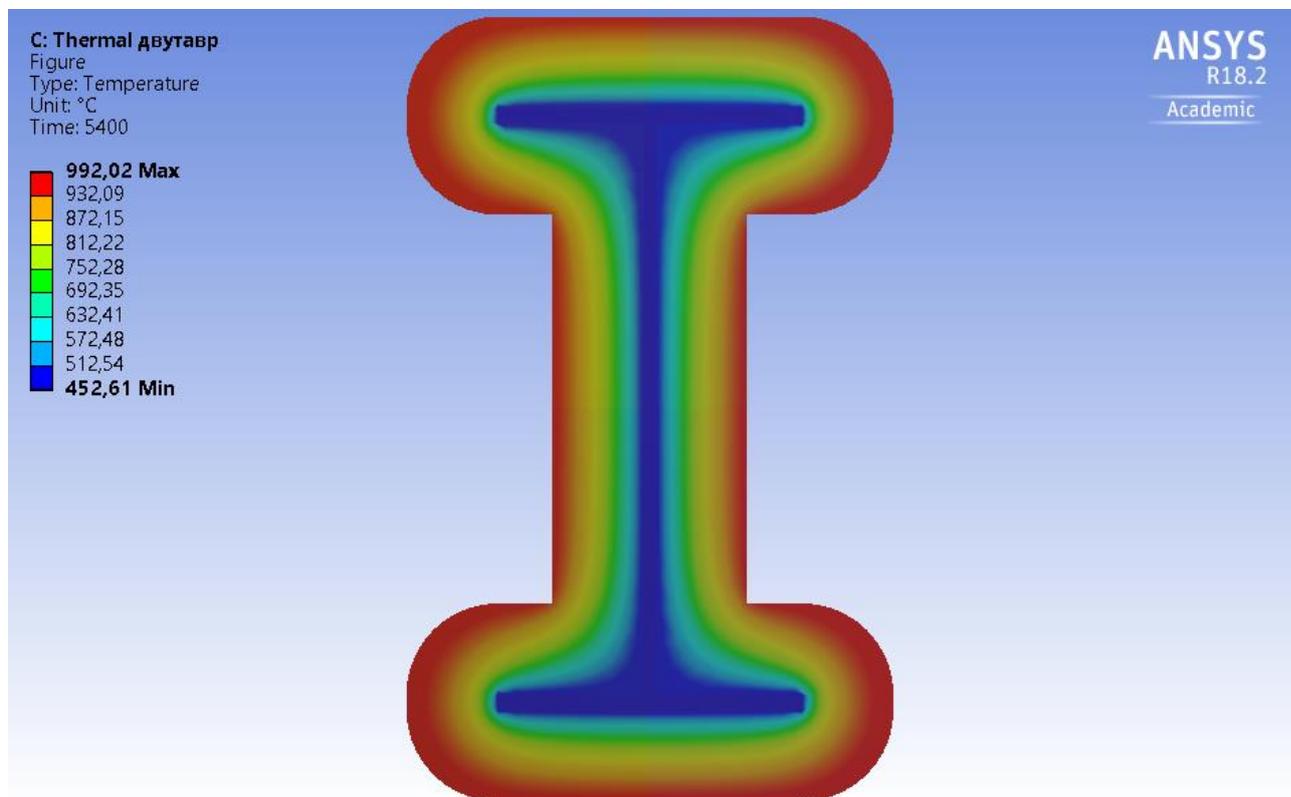


Рис. 4. Двугавр

## Вывод

Результаты прочностных (статических) и теплотехнических расчетов приведены в таблице:

№	Наименование	Профиль	Толщина огнезащитного покрытия, мм <sup>3</sup>	Критическая температура, °С <sup>4</sup>	График температуры	Огнестойкость элемента, мин. <sup>5</sup>
1.	ГС1	Труба 100x4	1,5	500	Рис. 1	91,2
2.	ПР1	Двутавр 30Б1	1,5	500	Рис. 2	101,1

---

<sup>3</sup> Теплотехнический расчет

<sup>4</sup> Прочностной (статический) расчет

<sup>5</sup> Теплотехнический расчет