

## Расчет пределов огнестойкости металлических конструкций с конструктивной и неконструктивной огнезащитой

## Оглавление

1. Аннотация .....	3
2. Цели и задачи .....	3
3. Общие положения .....	3
4. Описание моделей рассматриваемых конструкций .....	3
4.1. Колонны .....	3
4.2. Ригели .....	5
4.3. Балки .....	5
4.4. Связи .....	6
5. Прочностные (статические) расчеты .....	7
6. Теплотехнические расчеты.....	10
7. Вывод.....	13

## 1. Аннотация

В работе приведены прочностной (статический) и теплотехнические расчеты металлических конструкций каркаса с нанесенными огнезащитными покрытиями.

## 2. Цели и задачи

Цель работы – поведение прочностного (статического) и теплотехнического расчета (на основе результатов компьютерного моделирования) металлических конструкций каркаса с нанесенными огнезащитными покрытиями.

Задачи:

- описание расчетной модели;
- прочностной (статический) расчет (определение критической температуры стали исследуемых конструкций);
- теплотехнический расчет (построение компьютерных моделей конструкций, моделирование прогрева конструкций при тепловом воздействии стандартного режима пожара, определение времени достижения критической температуры стали конструкций).

## 3. Общие положения

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

Расчет предела огнестойкости стальной конструкции по потере несущей способности состоит из теплотехнической и прочностной (статической) частей.

Сущность расчета 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.

Статический расчет конструкции производится в соответствии "Расчетно-экспериментальный метод определения предела огнестойкости несущих металлических конструкций с тонкослойными огнезащитными покрытиями: Методика. – ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2013".

Моделирование прогрева конструкций при тепловом воздействии стандартного режима пожара (теплотехнический расчет) выполнено в программном комплексе ANSYS Mechanical 14.0.

Прочностной (статический) и теплотехнический расчет производился для наиболее нагруженных элементов металлического каркаса здания<sup>1</sup>.

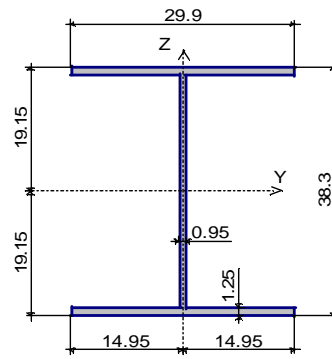
## 4. Описание моделей рассматриваемых конструкций

### 4.1. Колонны

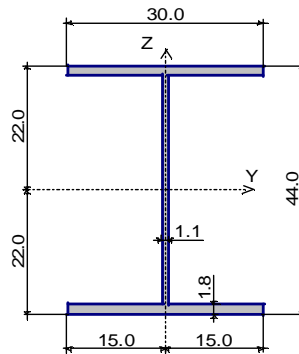
Сечение: Двутавр широкополочный по СТО АСЧМ 20-93 40Ш1 в осях 1, 2

<sup>1</sup> 4377.4.Р.03.КС.7.18.КМ.000., 4377.3.Р.03.КС.3.18.АС.000.РР КС-3.

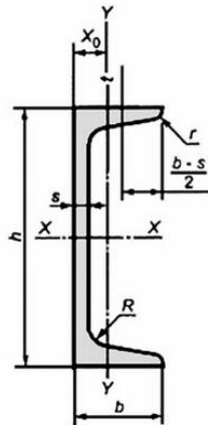
– 2 по рядам Б и Г, огнезащитной покрытие ГВЛ 2 слоя (25 мм)<sup>2</sup>.



Сечение: Двутавр широкополочный по СТО АСЧМ 20-93 45Ш1 в осях 5 – 16 (по рядам Б и Г), в осях 17, 19, 21 (по рядам А – Г), огнезащитное покрытие 3 слоя ГВЛ (37,5 мм)<sup>3</sup>.



Сечение: Швеллер широкополочный по ГОСТ 8240-97 20У в осях 17, 21 (по рядам Б – Г), огнезащитное покрытие СОШ1 (25 мм)<sup>4</sup>.



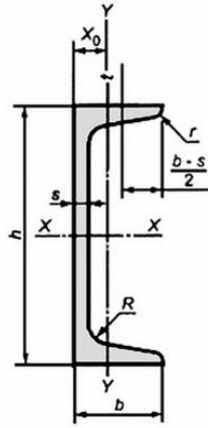
Сечение: Швеллер широкополочный по ГОСТ 8240-97 20У в осях 5, огнезащитное покрытие 2 слоя ГВЛ (25 мм)<sup>5</sup>.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Там же.

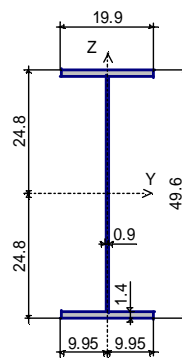
<sup>4</sup> Там же.

<sup>5</sup> Там же.

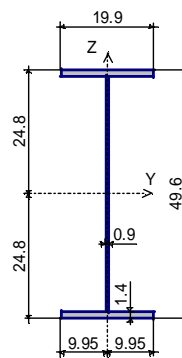


## 4.2. Ригели

Сечение: Двутавр нормальный (Б) по СТО АСЧМ 20-93 50Б2 в осях 1 – 4 (по рядам Б – Г), огнезащитное покрытие 2 слоя ГВЛ (25 мм)<sup>6</sup>.



Сечение: Двутавр нормальный (Б) по СТО АСЧМ 20-93 50Б2 в осях 17 – 18, 20, 21 (по рядам А – Г), огнезащитное покрытие 3 слоя ГВЛ (37,5 мм)<sup>7</sup>.



Сечение: Двутавр нормальный (Б) по СТО АСЧМ 20-93 55Б2 в осях 5 – 16 (по рядам Б – Г)<sup>8</sup>.

## 4.3. Балки

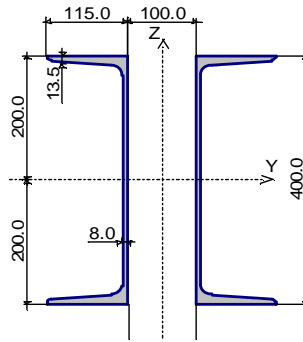
Сечение: Швеллер с уклоном полок по ГОСТ 8240-89 40 в осях 17 – 21 (по рядам А – Д)<sup>9</sup>.

<sup>6</sup> Там же.

<sup>7</sup> Там же.

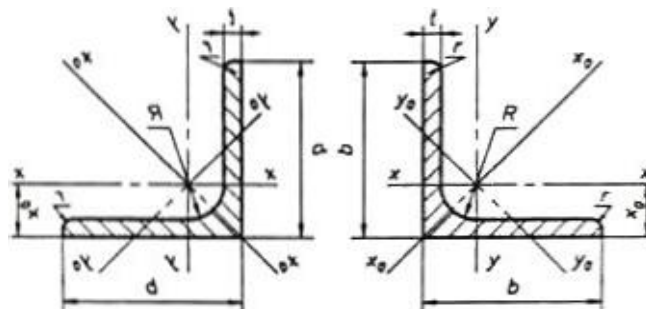
<sup>8</sup> Там же.

<sup>9</sup> Там же.

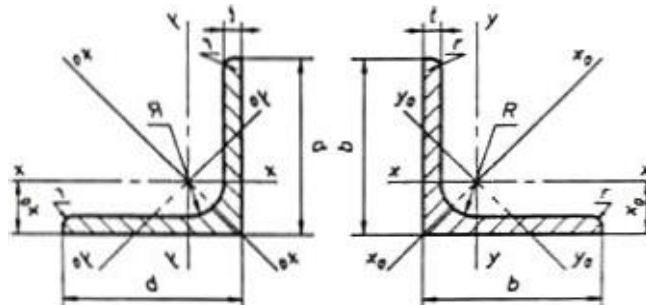


#### 4.4. Связи

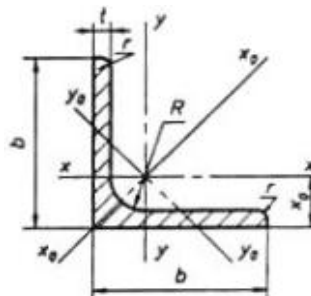
Сечение: ВС1-6 спаренный уголок 90x90x7 в осях 2 – 3 (по рядам Б, Г), огнезащитное покрытие СГК (1,78 мм)<sup>10</sup>.



Сечение: ВС1-6 спаренный уголок 90x90x7 в осях 9 – 10 (по рядам Б, Г) огнезащитное покрытие СГК (5,58)<sup>11</sup>.



Сечение: ГС1-8 уголок 90x90x7 в осях 1 – 4 (по рядам Б, Г) огнезащитное покрытие СГК (1,78)<sup>12</sup>.

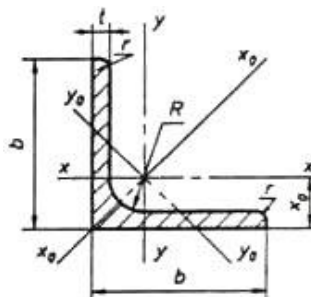


<sup>10</sup> Там же.

<sup>11</sup> Там же.

<sup>12</sup> Там же.

Сечение: ГС1-8 уголок 90x90x7в осях 5 – 6, 15 – 16 (по рядам Б,Г), в осях 17 – 21 (по рядам А, Б, Г, Д) огнезащитное покрытие СГК (5,58)<sup>13</sup>.



## 5. Прочностные (статические) расчеты

Расчет наиболее нагруженной колонны по оси 2<sup>14</sup>

Сечение: Двутавр широкополочный по СТО АСЧМ 20-93 40Ш1

Из условия прочности<sup>15</sup>

$$\gamma_{tem} = \frac{N}{AR_{yn}} = \frac{175,6 \cdot 10^3}{112,9 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,05$$

$$t_{cr} = 750 - 440\gamma_{tem} = 750 - 440 \cdot \gamma_{tem} = 730,2^0 C$$

Из условия устойчивости<sup>16</sup>

$$\gamma_{tem} = \frac{N}{AR_{yn}} = \frac{175,6 \cdot 10^3}{112,9 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,05$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{min}} = 53,8^{17}$$

$$\sigma_n = \frac{N}{A} = \frac{175,6 \cdot 10^3}{112,91 \cdot 10^{-4}} = 15,6 \text{ МПа}$$

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{\pi^2}{\lambda^2} - \frac{\sigma_n}{E} = \frac{3,14^2}{53,8^2} - \frac{15,6 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^5} = 26,6 \cdot 10^{-4}$$

$$t_{cr} = 700^0 C^{18}$$

Расчет наиболее нагруженной колонны по оси 16<sup>19</sup>

Сечение: Двутавр широкополочный по СТО АСЧМ 20-93 45Ш1

<sup>13</sup> Там же.

<sup>14</sup> 4377.3.Р.03.КС.3.18.АС.000.РР КС-3.

<sup>15</sup> Средства огнезащиты для стальных конструкций. Расчетно-экспериментальный метод определения предела огнестойкости несущих металлических конструкций с тонкослойными огнезащитными покрытиями : Методика - СПб.: ВНИИПО МЧС России, 2013.-16с.

<sup>16</sup> Там же.

<sup>17</sup> 4377.3.Р.03.КС.3.18.АС.000.РР КС-3.

<sup>18</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре : Учебник – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.-656с.

<sup>19</sup> 4377.3.Р.03.КС.3.18.АС.000.РР КС-3.

Из условия прочности<sup>20</sup>

$$\gamma_{tem} = \frac{N}{AR_{yn}} = \frac{368,7 \cdot 10^3}{157,99 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,07$$

$$t_{cr} = 750 - 440\gamma_{tem} = 750 - 440 \cdot \gamma_{tem} = 719,2^0 C$$

Из условия устойчивости<sup>21</sup>

$$\gamma_{tem} = \frac{N}{AR_{yn}} = \frac{368,7 \cdot 10^3}{157,99 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,07$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{min}} = 46,9^{22}$$

$$\sigma_n = \frac{N}{A} = \frac{368,7 \cdot 10^3}{157,99 \cdot 10^{-4}} = 23,3 \text{ МПа}$$

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{\pi^2}{\lambda^2} \frac{\sigma_n}{E} = \frac{3,14^2}{46,9^2} \frac{23,3 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^5} = 34 \cdot 10^{-4}$$

$$t_{cr} = 700^0 C^{23}$$

Расчет наиболее нагруженной колонны по оси 17

Сечение: Швеллер широкополочный по ГОСТ 8240-97 20У<sup>24</sup>

Из условия прочности<sup>25</sup>

$$\gamma_{tem} = \frac{N}{AR_{yn}} = \frac{78 \cdot 10^3}{23,4 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,1$$

$$t_{cr} = 750 - 440\gamma_{tem} = 750 - 440 \cdot \gamma_{tem} = 706^0 C$$

Из условия устойчивости<sup>26</sup>

$$\gamma_{tem} = \frac{N}{AR_{yn}} = \frac{78 \cdot 10^3}{23,4 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,1$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{min}} = \frac{4470}{80,7} = 55,4$$

<sup>20</sup> Средства огнезащиты для стальных конструкций. Расчетно-экспериментальный метод определения предела огнестойкости несущих металлических конструкций с тонкослойными огнезащитными покрытиями : Методика - СПб.: ВНИИПО МЧС России, 2013.-16с.

<sup>21</sup> Там же.

<sup>22</sup> 4377.3.Р.03.КС.3.18.АС.000.РР КС-3.

<sup>23</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре : Учебник – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.-656с.

<sup>24</sup> 4377.4.Р.03.КС.7.18.КМ.000.

<sup>25</sup> Средства огнезащиты для стальных конструкций. Расчетно-экспериментальный метод определения предела огнестойкости несущих металлических конструкций с тонкослойными огнезащитными покрытиями : Методика - СПб.: ВНИИПО МЧС России, 2013.-16с.

<sup>26</sup> Там же.



$$\sigma_n = \frac{N}{A} = \frac{78 \cdot 10^3}{23,4 \cdot 10^{-4}} = 33,3 \text{ МПа}$$

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot \frac{\sigma_n}{E} = \frac{3,14^2}{55,4^2} \cdot \frac{33,3 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^5} = 16,2 \cdot 10^{-4}$$

$$t_{cr} = 700^0 \text{ C}^{27}$$

Расчет наиболее нагруженных ригелей<sup>28</sup>

Сечение: Двутавр нормальный (Б) по СТО АСЧМ 20-93 50Б2

$$M_n = \frac{Nl}{4} = \frac{82,4 \cdot 10^3 \cdot 1,5}{4} = 30,9 \text{ кНм}$$

$$\gamma_{tem} = \frac{M_n}{C_1 W_{nx} R_{yn}} = \frac{30,9 \cdot 10^3}{1,17 \cdot 16,88 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,05$$

$$t_{cr} = 750 - 440 \gamma_{tem} = 750 - 440 \cdot 0,05 = 728^0 \text{ C}$$

Сечение: Двутавр нормальный (Б) по СТО АСЧМ 20-93 55Б2<sup>29</sup>

$$M_n = \frac{Nl}{4} = \frac{165,4 \cdot 10^3 \cdot 1,5}{4} = 62 \text{ кНм}$$

$$\gamma_{tem} = \frac{M_n}{C_1 W_{nx} R_{yn}} = \frac{62 \cdot 10^3}{1,17 \cdot 22,95 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,06$$

$$t_{cr} = 750 - 440 \gamma_{tem} = 750 - 440 \cdot 0,06 = 723,6^0 \text{ C}$$

Расчет наиболее нагруженной балки перекрытия на отм. +3,300, по оси Б<sup>30</sup>

Сечение: Швеллер с уклоном полок по ГОСТ 8240-89 40

$$M_n = \frac{Nl}{4} = \frac{65,7 \cdot 10^3 \cdot 5,3}{4} = 87,1 \text{ кНм}$$

$$\gamma_{tem} = \frac{M_n}{C_1 W_{nx} R_{yn}} = \frac{87,1 \cdot 10^3}{1,17 \cdot 7,61 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^6} = 0,3$$

$$t_{cr} = 750 - 440 \gamma_{tem} = 750 - 440 \cdot 0,3 = 618^0 \text{ C}$$

<sup>27</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре : Учебник – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.-656с.

<sup>28</sup> 4377.3.Р.03.КС.3.18.АС.000.РР КС-3.

<sup>29</sup> Там же.

<sup>30</sup> Там же.

## 6. 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>31</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.

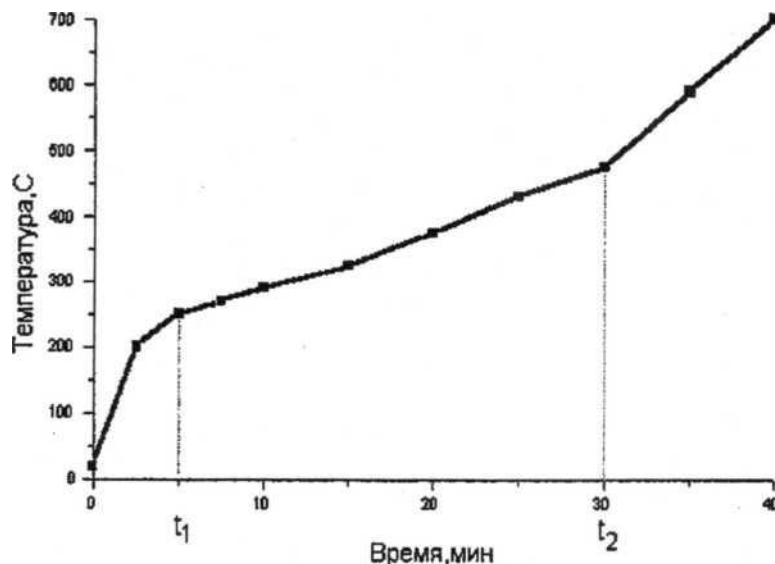
При огнезащите конструкции вспучивающимися составами скорость нагрева стальной конструкции оценивается при пренебрежении теплоёмкостью огнезащитного покрытия, зависимостью теплофизических свойств покрытия от координаты и в приближении усредненного по толщине покрытия градиента температур следующим уравнением:

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

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>31</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>32</sup>:

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)
Сталь С345	7850	58	482
СОШ-1	450	0,07	1130
ГВЛ	1080	от 0,22 при 20 °С до 0,36 при 1200 °С	840

Свойства состава СГК-2.

Плотность невспученного состава – 1500 кг/м<sup>3</sup>. При вспучивании увеличивается в объеме в 40 раз. Плотность вспученного состава (с учетом потерь) – 30 кг/м<sup>3</sup>.

<sup>32</sup> По данным, представленным Заказчиком

Теплопроводность вспученного состава 0,07 Вт/(м·К).

Температура начала вспучивания – 250 °С.


Температура начала выгорания – 800 °С.

Теплоемкость – 750 Дж/(кг·К).

Описанная модель теплообмена и характеристики материалов реализованы в программном комплексе ANSYS Mechanical 14.0.

## 7. Вывод

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

Конструкции <sup>33</sup>	Профиль <sup>34</sup>	Огнезащитное покрытие <sup>35</sup>	Толщина огнезащитного покрытия <sup>36</sup>	Критическая температура, °C <sup>37</sup>	Время достижения критической температуры (предел огнестойкости фактический), мин <sup>38</sup>
Колонны	двутавр h=364 s = 12 b=400 t=18 δ <sub>пр</sub> = 12 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	680	> 120
Колонны	двутавр h=372 s = 10 b=300 t=14 δ <sub>пр</sub> = 8,8 мм	CONLIT (45 мин)	25 мм	520	119
Колонны	два швеллера 30У δ <sub>пр</sub> = 6,5 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	520	73,7
Колонны	два швеллера 30У δ <sub>пр</sub> = 6,5 мм	CONLIT (45 мин)	25 мм	520	105
Колонны	швеллер 24У	цементно-песчаный раствор	30 мм	500	51
Ригели	 уголки сварные 90x7 по листу 60x60x10 δ <sub>пр</sub> = 3,3 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	500	61,5

<sup>33</sup> 4377.3.Р.03.КС.3.18.АС.000.РР КС-3.


<sup>34</sup> Там же.

<sup>35</sup> 4377.4.Р.03.КС.7.18.КМ.000.

<sup>36</sup> Там же.

<sup>37</sup> Прочностной (статический) расчет.

<sup>38</sup> Теплотехнический расчет.

Конструкции <sup>33</sup>	Профиль <sup>34</sup>	Огнезащитное покрытие <sup>35</sup>	Толщина огнезащитного покрытия <sup>36</sup>	Критическая температура, °C <sup>37</sup>	Время достижения критической температуры (предел огнестойкости фактический), мин <sup>38</sup>
Балки	двутавр h=376 s = 8 b=200 t=12 δ <sub>пр</sub> = 6,6 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	574	90,7
Балки перекрытий	двутавр h=376 s = 8 b=200 t=12 δ <sub>пр</sub> = 5,7 мм	«УНИПОЛ» (45 мин.)	1,8 мм	500	73,5
Связи	уголок 90×7 δ <sub>пр</sub> = 3,4 мм	«УНИПОЛ» (45 мин.)	1,8 мм	500	50,5
Связи	 уголки 90×7 по листу 120×60×10 δ <sub>пр</sub> = 4,3 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	500	59
Косоуры лестничных маршей	швеллер 18У δ <sub>пр</sub> = 4,9 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	500	57,2
Косоуры лестничных маршей	швеллер 16У δ <sub>пр</sub> = 4,6 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	500	55
Площадки	швеллер 24У δ <sub>пр</sub> = 4,7 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	500	60,2
Площадки	швеллер 16У δ <sub>пр</sub> = 4,6 мм	«Кнауф» (45 мин.)	12,5 мм	500	55

## *Приложение*

# **Исходные данные и результаты теплотехнической части расчета ANSYS Mechanical**