



Ассоциация развития
стального строительства

СТО АРСС 11251254.001-018-03. Приложение.

Методическое пособие
по расчету собственного
(фактического) предела огнестойкости
незащищенных стальных конструкций
по методике СТО АРСС 11251254.001-
018-03

Москва 2023

Авторский коллектив:

Д.Г. Пронин, к.т.н. (ФГБУ ЦНИИП Минстрой России),
А.Ю. Журавлёв (ООО «ПОЖАРНЫЙ ИНЖЕНЕР»),
Р.К. Ибатулин, к.т.н. (ООО «ПОЖАРНЫЙ ИНЖЕНЕР»).

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО РАСЧЕТУ СОБСТВЕННОГО (ФАКТИЧЕСКОГО) ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕЗАЩИЩЕННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО МЕТОДИКЕ СТО АРСС 11251254.001-018-03

Рецензенты:

Ю.В. Веселов (ПАО «Северсталь»),
К.Ю. Шлейкин, к.т.н. (ПАО «НЛМК»),
А.Д. Яковлев (ООО «ЕВРАЗ»),
С.В. Стукалин (АО «ОМК»).

Методическое пособие по расчету собственного (фактического) предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций по методике СТО АРСС 11251254.001-018-03/Ассоциация развития стального строительства; Д.Г. Пронин, А.Ю. Журавлёв, Р.К. Ибатулин. Москва. 2023. – 104 с.

Методическое пособие разработано в качестве приложения к Стандарту организации АРСС 11251254.001-018-03 (ВНПБ 73-18) «Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок».

В методическом пособии рассматриваются вопросы, связанные с определением огнестойкости незащищенных несущих стальных конструкций по СТО АРСС 11251254.001-018-03, а также представлены примеры задач с целью приведения к единому стандарту расчетов по определению собственного (фактического) предела огнестойкости для различных элементов стальных конструкций.

Методическое пособие разработано для специалистов в области пожарной и механической безопасности.

© Ассоциация развития стального строительства (АРСС), 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	7
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	8
ГЛАВА 1. РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННОГО (ФАКТИЧЕСКОГО) ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	9
1.1. Прочностной (статический) расчет элементов конструкции.....	9
1.1.1. Центрально-растянутые (сжатые) элементы.....	10
1.1.2. Внецентренно-растянутые (сжатые) элементы.....	11
1.1.3. Изгибаемые элементы.....	12
1.1.4. Сжато-изгибаемые элементы.....	15
1.1.5. Растянуто-изгибаемые элементы.....	15
1.1.6. Определение критической температуры.....	15
1.2. Теплотехнический расчет.....	16
1.2.1. Определение приведенной толщины металла.....	17
1.2.2. Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме.....	20
1.2.3. Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом.....	21
1.2.4. Верификация и валидация расчетного метода.....	23
ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОГО (ФАКТИЧЕСКОГО) ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	30
2.1. Пример I. Центрально-сжатая конструкция.....	30
2.1.1. Исходные данные.....	30
2.1.2. Прочностной расчет.....	32
2.1.3. Теплотехнический расчет.....	34
2.2. Пример II. Центрально-растянутая конструкция.....	38
2.2.1. Исходные данные.....	38
2.2.2. Прочностной расчет.....	39
2.2.3. Теплотехнический расчет.....	40
2.3. Пример III. Внецентренно-сжатая конструкция.....	43
2.3.1. Исходные данные.....	43
2.3.2. Прочностной расчет.....	44
2.3.3. Теплотехнический расчет.....	46
2.4. Пример IV. Центрально-сжатая конструкция из стали С245 и С345 для сравнения параметров огнестойкости.....	49

2.4.1. Исходные данные.....	49
2.4.2. Прочностной расчет.....	50
2.4.3. Теплотехнический расчет.....	52
2.5. Пример V. Балка с заземлением по двум концам.....	55
2.5.1. Исходные данные.....	55
2.5.2. Прочностной расчет.....	56
2.5.3. Теплотехнический расчет.....	57
2.6. Пример VI. Балка с заземлением с одного конца. Распределенная нагрузка.....	60
2.6.1. Исходные данные.....	60
2.6.2. Прочностной расчет.....	60
2.6.3. Теплотехнический расчет.....	61
2.7. Пример VII. Консольная балка с заземлением с одного конца. Сосредоточенная сила.....	64
2.7.1. Исходные данные.....	64
2.7.2. Прочностной расчет.....	65
2.7.3. Теплотехнический расчет.....	65
2.8. Пример VIII. Сжатие с изгибом. Сосредоточенная нагрузка.....	68
2.8.1. Исходные данные.....	68
2.8.2. Прочностной расчет.....	69
2.8.3. Теплотехнический расчет.....	71
2.9. Пример IX. Сжатие с изгибом. Распределенная нагрузка.....	75
2.9.1. Исходные данные.....	75
2.9.2. Прочностной расчет.....	76
2.9.3. Теплотехнический расчет.....	78
2.10. Пример X. Растяжение с изгибом. Сосредоточенная нагрузка.....	81
2.10.1. Исходные данные.....	81
2.10.2. Прочностной расчет.....	82
2.10.3. Теплотехнический расчет.....	85
2.11. Пример XI. Растяжение с изгибом. Распределенная нагрузка.....	89
2.11.1. Исходные данные.....	89
2.11.2. Прочностной расчет.....	90
2.11.3. Теплотехнический расчет.....	92
2.12. Пример XII. Балка без заземления. Распределенная нагрузка.....	95
2.12.1. Исходные данные.....	95
2.12.2. Прочностной расчет.....	96
2.12.3. Теплотехнический расчет.....	97
БИБЛИОГРАФИЯ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	102

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методическое пособие содержит примеры расчетов собственных (фактических) пределов огнестойкости стальных конструкций по методике СТО АРСС 11251254.001-018-03 (ВНПБ 73-18) «Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок».

В методическом пособии используются формулы для расчета критических температур при различных закреплениях и нагружениях конструкций, а также способы определения предела огнестойкости по номограмме прогрева незащищенных стальных конструкций и расчетным методом.

Расчеты пределов огнестойкости стальных конструкций выполнены по признаку потери несущей способности R .

Необходимо внимательно относиться к обозначениям и справочным значениям характеристик металлопроката, так как они могут быть указаны в разных единицах измерения, особенно, если в качестве справочной информации используется иностранный сортамент и литература.

Кроме того, при использовании расчетного метода, все вычисления следует проводить в градусах Кельвина, а итоговые значения переводить в градусы Цельсия для дальнейшего анализа.

В проектах, реализуемых в практической деятельности, все усилия и напряженные состояния металлоконструкций рассчитываются на основании исходных данных, содержащихся в конструкторской документации.

Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций выполняется в соответствии со сводами правил, СТО АРСС 11251254.001-018-03 [19] и СТО АРСС 11251254.001-022-1 [20].

ВВЕДЕНИЕ

В современной практике строительства стальные конструкции находят широкое применение. Это объясняется тем, что сталь благодаря высокой прочности, надежности работы при различных видах напряженного состояния и долговечности способен воспринимать значительные нагрузки [21]. Однако, применение стали в строительстве ограничивается необходимостью наличия доказательной базы о безопасности применения строительных конструкций с точки зрения огнестойкости [22].

В случае принятия решения по проектированию стальных несущих конструкций проектные решения по их огнезащите также можно оптимизировать, используя расчетно-аналитический метод, включающий совместное решение прочностной задачи, с учетом заданных условий нагружения и опирания конструкции, и теплотехнической задачи с использованием экспериментальных данных по огнезащитной эффективности средства огнезащиты [23]. Методики, изложенные в СТО АРСС 11251254.001-018-03, позволяют уменьшить (или даже исключить) расходы огнезащитных средств и, как следствие, стоимость работ по огнезащите металлических конструкций. Эффективность применения расчетных методов обоснования огнестойкости стальных строительных конструкций при снижении капитальных затрат на строительство зданий и сооружений может быть весьма существенной: по некоторым оценкам, расчет критических температур под нагрузкой уже позволяет экономить до 10% на средствах огнезащиты, так как значения критических температур большинства конструкций выше значения 500°C , а с применением специальных марок сталей экономия на средствах огнезащиты может вырасти до 35% в сравнении с стандартным расчетом огнезащиты без учета нагрузки и критических температур, даже без учёта снижения трудозатрат за счет снижения количества наносимых слоев огнезащитных покрытий [24].

Однако, расчет по критическим температурам требует высокой ответственности и квалификации от проектировщиков огнезащиты, что

увеличивает требования к подготовке кадров, больших затрат времени на разработку рабочих проектов огнезащиты.

Целью разработки настоящего пособия является дать проектировщикам наглядные примеры по расчётам огнестойкости.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Предел огнестойкости	– промежуток времени от начала огневого воздействия в условиях стандартных испытаний до наступления предельного состояния по потере несущей способности стальной строительной конструкции [2].
Стандартные условия испытания	– условия испытаний, при которых создается огневое воздействие на образец конструкции, по стандартному температурному режиму в соответствии с ГОСТ 30247.0 [6].
Критическая температура	– средняя температура сечения стальной конструкции, при которой наступает предельное состояние по потере несущей способности [2].
Предельное состояние конструкции	– состояние конструкции, при котором она утрачивает способность сохранять заданные функции [6].
Собственный предел огнестойкости	– предел огнестойкости, который обеспечивается за счет параметров сечения конструкции и свойств стали без применения средств огнезащиты [2].
Фактический предел огнестойкости	– предел огнестойкости, стальной строительной конструкции, определённый по результатам испытаний или расчётов, в том числе с огнезащитой при её применении [2].
Приведенная толщина металла	– отношение площади поперечного сечения металлической конструкции к периметру ее обогреваемой поверхности [8].
Прочность	– способность конструкции и ее элементов сопротивляться разрушению под действием внешних нагрузок [23].
Теплоотдача	– процесс переноса теплоты (теплопроводностью и конвекцией) между поверхностью твердого тела и жидкой (газообразной) средой [24].
Коэффициент теплоотдачи	– характеризует интенсивность теплообмена и определяется как количество теплоты, отдаваемое в единицу времени единицей поверхности при разности температур между поверхностью твердого тела и жидкостью (газом), равной одному градусу [24].

Верификация

– процесс определения того, что реализация метода расчета точно отражает выполненное разработчиком концептуальное описание метода расчета и решение метода расчета [9].

Валидация

– процесс определения степени, в которой метод расчета является точным отражением реальности с точки зрения предполагаемого использования метода расчета [9].

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

a, b	– расстояние от точки приложения нагрузки до точек опор, м
$C_{ст}$	– начальный коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·град)
$D_{ст}$	– коэффициент изменения теплоемкости при нагреве, Дж/(кг·град ²)
E_n	– начальный модуль упругости металла, кг/см ² (1 кг/см ² = 98066.5 Па)
e	– эксцентриситет (смещение) приложения нагрузки N_n , см
k	– центр давления
F	– площадь поперечного сечения, см ²
J_{min}	– наименьший момент инерции сечения элемента I_x или I_y , см ⁴
l	– геометрическая длина элемента, см
μ	– коэффициент приведения длины элемента
l_{ef}	– расчетная эффективная длина элемента, см
N_n	¹ – нагрузка, приложенная в i -точке, на расстояниях a и/или b , кгс (1 кгс = 9.80665 Н)
q	– распределенное усилие нагрузки, кг
$R_{ун}$	² – нормативное сопротивление металла, кгс/см ² (1 кгс/см ² = 98066.5 Па)
S_0	– степень черноты обогреваемой поверхности конструкции
$S_{пр}$	– приведенная степень черноты
S_B	– степень черноты огневой камеры печи
T_0	– температура в печи до начала теплового воздействия, К
τ	– время, с
$\Delta\tau$	– расчетный интервал времени, с
$T_{ст,\tau}$	– температура элемента в момент времени τ , К
$T_{в,\tau}$	– температура нагревающей среды в момент времени τ , К
$t_{в,\tau}$	– температура нагревающей среды в момент времени τ , °С
$t_{кр}$	– критическая температура элемента, °С
$T_{кр}$	– критическая температура элемента, К
W_x или y	– момент сопротивления сечения относительно оси x или y , см ³
α_τ	– коэффициент теплоотдачи в момент времени τ , Вт/(м ² ·К)
$\alpha_{к,\tau}$	– коэффициент конвективной теплоотдачи в момент времени τ , Вт/(м ² ·К)
$\alpha_{л,\tau}$	– коэффициент лучистой теплоотдачи в момент времени τ , Вт/(м ² ·К)
$\rho_{ст}$	– плотность стали, кг/м ³
σ_T	– предел текучести, МПа
σ_e	– предел прочности, МПа
γ_T	– температурный коэффициент снижения предела текучести
γ_e	– температурный коэффициент снижения модуля упругости
Π	– периметр обогрева, мм
$\delta_{пр}$	– приведенная толщина металла (ПТМ), мм
M_n	– максимальный изгибающий момент от действия нормативных нагрузок, кг·см
Π_ϕ	– собственный (фактический) предел огнестойкости, мин
$\Pi_{тр}$	– требуемый предел огнестойкости, мин
- 273	– коэффициент перевода единиц измерения температуры из градусов К в °С
k	– центр давления

¹ В литературе по механике (сопротивление материалов и т.п.) принято обозначать данную нагрузку буквой P .

² Наименьшее значение предела текучести стали.

ГЛАВА 1. РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННОГО (ФАКТИЧЕСКОГО) ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Расчет пределов огнестойкости стальных конструкций проводится по признаку потери несущей способности в нагретом состоянии - R по классификации ГОСТ 30247.0 [6].

При определении собственного (фактического) предела огнестойкости несущих стальных конструкций по потере несущей способности проводятся прочностной (статический) и теплотехнический расчеты.

Прочностной (статический) расчет проводится для определения критической температуры стальной несущей конструкции, при которой прочностные характеристики стали (предел текучести, модуль упругости), снижающиеся по мере нагрева конструкции, достигают значений, при которых наступает предельное состояние по несущей способности.

В результате решения теплотехнической задачи определяется время нагрева металла от начала огневого воздействия до достижения в расчетном сечении критической температуры, т.е. решение этой задачи позволяет определить собственный (фактический) предел огнестойкости P_f конструкции.

1.1. Прочностной (статический) расчет элементов конструкций

При решении прочностной (статической) задачи определяется величина напряжений от нормативной нагрузки в наиболее нагруженном сечении конструкции. При равенстве этих напряжений нормативному сопротивлению металла считается, что сечение конструкции утратит способность сопротивляться действию нормативной нагрузки. Поскольку нормативное сопротивление металла снижается при увеличении температуры, то это равенство будет определять критическую температуру конструкции, т.е. температуру, до которой можно нагреть конструкцию при данной величине напряжений в сечении конструкции.

При прочностном расчете стальных конструкций не учитываются температурный режим пожара и фактор времени нахождения конструкции под высокотемпературным воздействием и влияние температурного расширения стальных конструкций.

В зависимости от вида нагружения и способа закрепления конструкции используют соответствующие формулы, рассмотренные далее.

1.1.1. Центральнo-растянутые (сжатые) элементы

Потеря несущей способности стальных сжатых конструкций наступает при нагреве до критической температуры в результате потери прочности (снижение предела текучести стали до рабочих напряжений в сечении конструкции) или в результате потери устойчивости (при снижении модуля упругости до критического значения).

Растянутые стальные конструкции теряют несущую способность при нагреве до критической температуры в результате потери прочности (снижение предела текучести стали до рабочих напряжений в сечении конструкции).

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при растяжении (сжатии) определяется по формуле:

$$\gamma_T = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} \quad (1)$$

где N_n – усилие от нормативной нагрузки, кг;

R_{yn} – нормативное сопротивление металла, кг/см²;

F – площадь поперечного сечения элемента, см².

Температурный коэффициент снижения модуля упругости стали при сжатии определяется по формуле:

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

где $l_{ef} = \mu \cdot l$ – расчетная эффективная длина элемента, см;

E_n – начальный модуль упругости металла, кг/см²;

J_{min} – наименьший момент инерции сечения элемента, см⁴;

μ – коэффициент приведения длины элемента;

l – геометрическая длина элемента, см.

Расчетная эффективная длина элемента l_{ef} , определяется в зависимости от способа закрепления элемента (рис.1.1) [25].

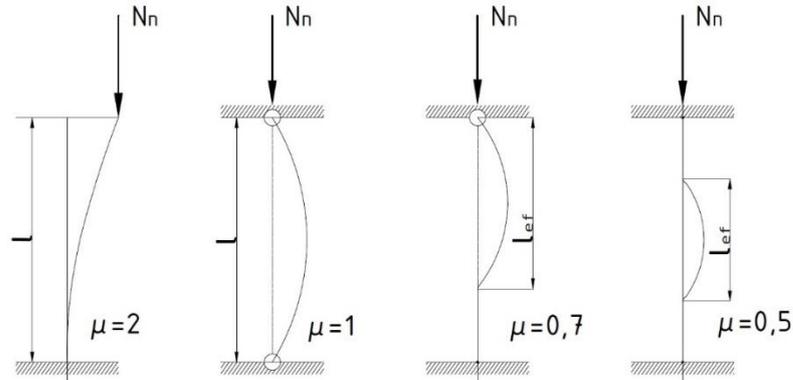


Рис. 1.1. К определению расчетной эффективной длины центрально-сжатого элемента:
 $l_{ef} = 2 \cdot l$ – если элемент зашцеилен с одного конца, с другого конца свободен (консоль);
 $l_{ef} = l$ – если элемент имеет шарнирное опирание по обоим концам;
 $l_{ef} = 0,7 \cdot l$ – если элемент зашцеилен с одного конца, с другого шарнирно оперт;
 $l_{ef} = 0,5 \cdot l$ – если рассматриваемый элемент зашцеилен по обоим концам.

1.1.2. Внецентренно-растянутые (сжатые) элементы

Внецентренное растяжение (сжатие) представляет собой частный случай изгиба с растяжением (сжатием), при котором элемент растягивается (сжимается) силами, параллельными оси элемента, так, что их равнодействующая не совпадает с осью элемента, а проходит через точку k , называемую центром давления [25].

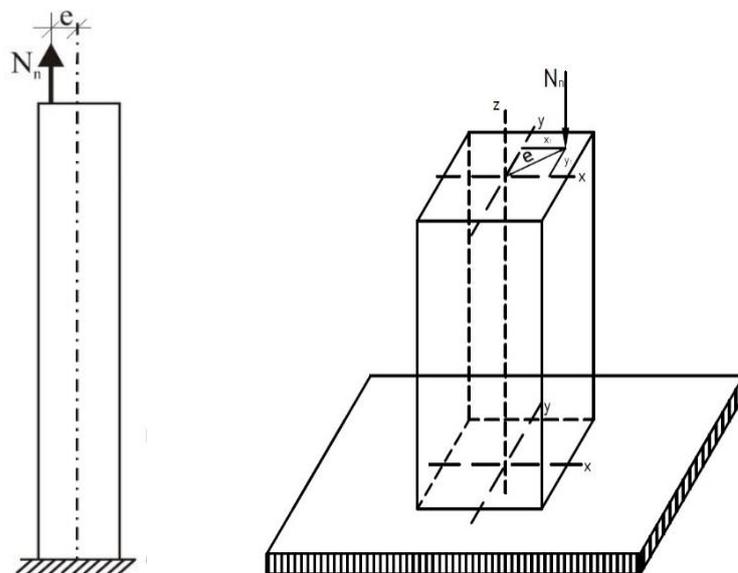


Рис. 1.2. Схема нагружения элемента при внецентренном растяжении (сжатии)

Например, если на элемент произвольного сечения действует одна сила N_n , параллельная оси элемента, и приложена в точке k (рис. 1.2). Координаты этой точки в системе главных центральных осей сечения обозначив x_1 и y_1 , то расстояние от этой точки до оси z будет являться эксцентриситетом, – e :

$$e = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при внецентренном растяжении (сжатии) определяется по формуле:

$$\gamma_T = \frac{N_n}{R_{yn}} \cdot \left(\frac{e}{W} + \frac{1}{F} \right) \quad (3)$$

где e – эксцентриситет приложения нормативной нагрузки, см;

W – момент сопротивления сечения, см³.

Температурный коэффициент снижения модуля упругости стали γ_e , при внецентренном сжатии определяется по формуле (2).

1.1.3. Изгибаемые элементы

Изгибаемые стальные конструкции теряют несущую способность при нагреве до критической температуры в результате потери прочности (снижение предела текучести стали до рабочих напряжений в сечении конструкции).

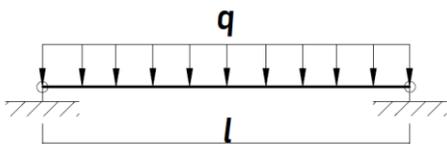
Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе определяется по формуле:

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{yп}} \quad (4)$$

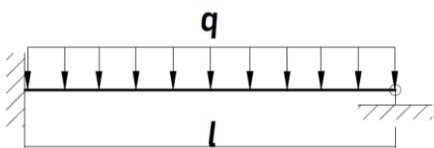
где M_n – максимальный изгибающий момент от действия нормативных нагрузок, кг·см.

Максимальный изгибающий момент от действия нормативных нагрузок M_n , в зависимости от способа приложения нагрузки, опирания и защемления конструкции определяется по следующим формулам [23]:

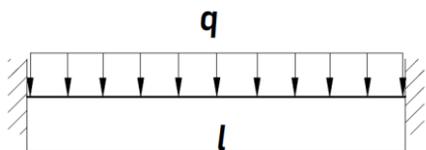
- при равномерно распределенной нагрузке:



$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{8} \quad (5)$$

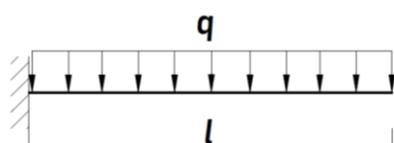


– для балок с шарнирным опиранием по обоим концам и балок с заделкой с одного конца и шарнирным опиранием с другого;



$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{12} \quad (6)$$

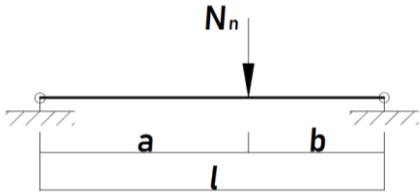
– для балок с заделкой по обоим концам;



$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{2} \quad (7)$$

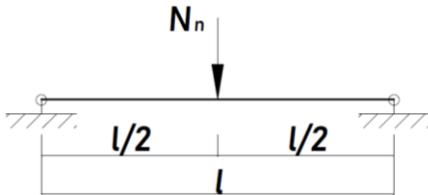
– для консольных балок с заделкой с одного конца без опирания с другого.

- при сосредоточенной нагрузке:



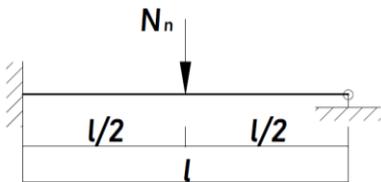
$$M_n = \frac{N_n \cdot a \cdot b}{l} \quad (8)$$

– для балок с шарнирным опиранием по обоим концам, когда сила N_n приложена на расстоянии a от одной точки опоры, на расстоянии b от другой точки опоры;



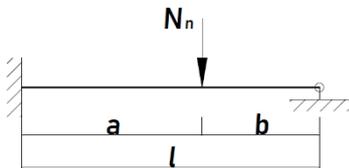
$$M_n = \frac{N_n \cdot l}{4} \quad (9)$$

– для балок с шарнирным опиранием по обоим концам и сосредоточенной силе N_n посередине;



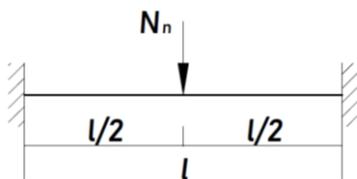
$$M_n = \frac{3 \cdot N_n \cdot l}{16} \quad (10)$$

– для балок с заделкой с одной стороны и шарнирным опиранием с другой стороны, и сосредоточенной силе N_n посередине;



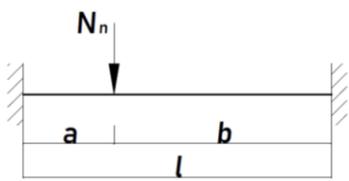
$$M_n = \frac{N_n \cdot a \cdot b}{2 \cdot l^2} \cdot (l + b) \quad (11)$$

– для балок с заделкой с одной стороны и шарнирным опиранием с другой, когда сила N_n приложена на расстоянии a от одной точки опоры с заделкой, на расстоянии b от другой точки опоры с шарниром;



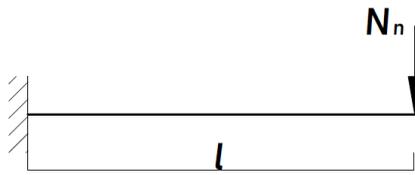
$$M_n = \frac{N_n \cdot l}{8} \quad (12)$$

– для балок с заделкой с обоих концов и сосредоточенной силе N_n посередине;



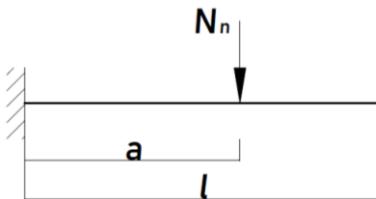
$$M_n = \frac{N_n \cdot a \cdot b^2}{l^2} \quad (13)$$

– для балок с заделкой с обоих концов и сосредоточенной силе N_n на расстоянии a от одной точки опоры, и на расстоянии b от другой точки опоры, где b – наибольшее расстояние от точки приложения силы N_n ;



$$M_n = N_n \cdot l \quad (14)$$

– для балок с заделкой с одного конца, второй свободен, где сила N_n давит на свободный конец;



$$M_n = N_n \cdot a \quad (15)$$

– для балок с заделкой с одного конца, второй свободен, где сила N_n давит на расстоянии a от заделки.

1.1.4. Сжато-изгибаемые элементы

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали γ_T определяется как сумма значений температурных коэффициентов, полученных по формулам (1) и (4) для сжато-изгибаемой конструкции, а также (3) и (4) для внецентренно-сжатой (сжато-изгибаемой) конструкции. Расчет температурного коэффициента снижения модуля упругости γ_e не проводится.

1.1.5. Растянуто-изгибаемые элементы

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали γ_T определяется как сумма значений температурных коэффициентов, полученных по формулам (1) и (4) для сжато-изгибаемой конструкции, а также (3) и (4) для внецентренно-растянутой (растянуто-изгибаемой) конструкции. Расчет температурного коэффициента снижения модуля упругости γ_e не проводится.

1.1.6. Определение критической температуры

Порядок определения критической температуры для стального элемента конструкции состоит в том, чтобы для известных значений температурных коэффициентов снижения предела текучести и/или модуля упругости подобрать соответствующее значение температуры.

При определении критической температуры для рассматриваемых сталей необходимо воспользоваться таблицей А.1 приложения А.

Пример 1.1.

Для стального элемента, выполненного из стали С255, при центральном сжатии, заземлённого с двух сторон примем значение $\gamma_T = 0,296$ и $\gamma_e = 0,068$. В соответствии с таблицей А.1 приложения А, значения $\gamma_T = 0,296$ находится в диапазоне, указанном в таблице, между 0,20 и 0,34. Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции:

$$t_{кр} = 700 - ((700 - 650) \cdot (0,296 - 0,200)) / (0,340 - 0,200) = 665,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Если для коэффициента снижения модуля упругости γ_e нижний предел в таблице А.1 составляет 0,43, то для искомого значения следует принять температуру, равную 700 °С (973,0 К).

Таблица П1.1. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
650	0,520	650	0,340
700	0,430	665,7	0,296
700	0,068	700	0,200

Критическая температура для рассматриваемого элемента конструкции, принимается равной $t_{кр} = 665,7$ °С (938,7 К).

1.2. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется для определения времени прогрева конструкции до критической температуры.

Обеспечение соответствия собственного (фактического) предела ($P_{ф}$) огнестойкости стальных конструкций требуемому ($P_{тр}$) достигается параметрами сечения конструкции и свойств стали без применения огнезащиты или проектными решениями по способам и средствам огнезащиты.

Обоснование параметров сечения конструкции и свойств стали без применения огнезащиты или проектных решений по способам и средствам огнезащиты может быть выполнено теплотехническим расчетом или огневыми испытаниями.

При применении огнезащиты испытания проводятся в соответствии с ГОСТ Р 53295 [8] по результатам которых определяется фактический предел огнестойкости конструкции (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Схема выбора способа обеспечения собственного (фактического) предела огнестойкости (P_f) требуемому ($P_{тр}$)

При выполнении теплотехнического расчета температура стальных конструкций при воздействии пожара принимается равномерно распределенной по сечению. Время прогрева стальной конструкции до критической температуры является ее пределом огнестойкости.

В данном методическом пособии расчет времени прогрева незащищенных стальных конструкции до критической температуры выполняется в соответствии с СТО АРСС 11251254.001-018-03 [19].

1.2.1. Определение приведенной толщины металла

Температура незащищенных металлических конструкций в процессе нагрева зависит только от одного геометрического параметра – приведенной толщины металла (ПТМ) [26].

Понятие приведенной толщины металла позволяет привести элементы, имеющие любую конфигурацию поперечного сечения, к простой пластине, которая определяется по формуле:

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{\Pi} \quad (18)$$

где $\delta_{\text{пр}}$ – приведенная толщина металла, мм;

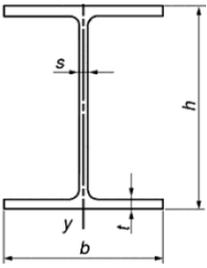
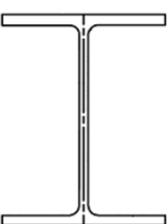
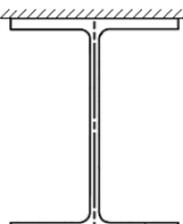
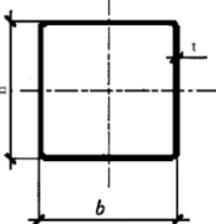
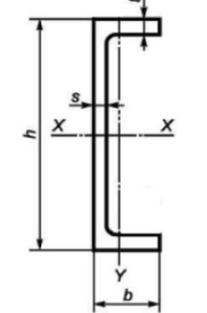
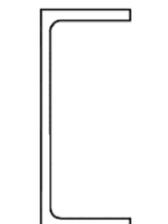
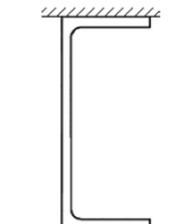
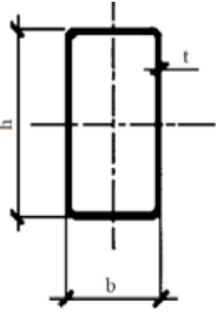
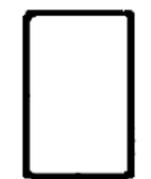
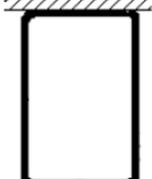
F – площадь поперечного сечения элемента, мм²;

Π – обогреваемый периметр сечения элемента, мм.

Периметр обогрева элемента конструкции рассчитывается исходя из геометрических характеристик элемента с учетом примыкания его к соседним конструкциям.

Формулы для расчета периметра обогрева для типовых стальных конструкций, применяемых в строительстве в зависимости от их примыкания к соседней конструкции представлены в таблице 1.1. Более широкий перечень формул для расчета периметра обогрева конструкций приведен в таблице 1 [20], а также в таблице 3 [22].

Таблица 1.1. Значения обогреваемого периметра для незащищенных стальных конструкций, применяемых в строительстве в зависимости от их примыкания к соседней конструкции

Профиль	Обогреваемый периметр		Профиль	Обогреваемый периметр	
	4-х сторонний обогрев	3-х сторонний обогрев		4-х сторонний обогрев	3-х сторонний обогрев
	 $\Pi=2 \cdot h+4 \cdot b-2 \cdot s$	 $\Pi=2 \cdot h+3 \cdot b-2 \cdot s$		 $\Pi=4 \cdot b$	 $\Pi=3 \cdot b$
	 $\Pi=2 \cdot h+4 \cdot b-2 \cdot s$	 $\Pi=2 \cdot h+3 \cdot b-2 \cdot s$		 $\Pi=2 \cdot h+2 \cdot b$	 $\Pi=2 \cdot h+b$

Пример 1.2.

Колонна, не примыкающая к какой-либо ограждающей конструкции или к другим конструкциям, исключаящих обогрев одной или нескольких сторон в случае пожара. Требуется определить приведённую толщину металла колонны двутаврового сечения 30К10 при 4-х стороннем обогреве.

Исходные данные:

Данные о номинальных размерах приняты по ГОСТ Р 57837 [10]:

$h = 328,0$ мм – высота двутавра;

$h_w = 270,0$ мм – высота стенки двутавра (в свету между полками);

$b = 359,0$ мм – ширина полки;

$b_w = 170,5$ мм – свес полки;

$t = 29$ мм – толщина полки;

$s = 18$ мм – толщина стенки;

$F = F_n = 259,60 \text{ см}^2 = 25\,960,0 \text{ мм}^2 = 0,02596 \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения.

Решение:

Периметр обогрева определяется по формулам, в том числе представленным в табл. 1.1:

$$\Pi = 2 \cdot h + 4 \cdot b - 2 \cdot s = 2 \cdot 328 + 4 \cdot 359 - 2 \cdot 18 = 2056 \text{ мм} = 2,056 \text{ м}$$

$$\Pi = 2 \cdot b + 4 \cdot t + 2 \cdot h_w + 4 \cdot b_w = 2 \cdot 359 + 4 \cdot 29 + 2 \cdot 270 + 4 \cdot 170,5 = 2056 \text{ мм} = 2,056 \text{ м}$$

Приведенная толщина металла определяется по формуле (18).

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{0,02596}{2,056} = 0,0126 \text{ м} = 12,6 \text{ мм}$$

Пример 1.3.

Опертая на ограждающие конструкции балка с настилом, исключаящим обогрев одной стороны в случае пожара. Требуется определить приведённую толщину металла балки двутаврового сечения 20Б1 при 3-х стороннем обогреве.

Исходные данные:

Данные о номинальных размерах приняты по ГОСТ Р 57837 [10]:

$h = 200,0$ мм – высота двутавра;

$h_w = 184,0$ мм – высота стенки двутавра (в свету между полками);

$b = 100,0$ мм – ширина полки;

$b_w = 47,25$ мм – свес полки;

$t = 8,0$ мм – толщина полки;

$s = 5,5$ мм – толщина стенки;

$F = F_n = 27,16 \text{ см}^2 = 2\,716,0 \text{ мм}^2 = 0,002716 \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения.

Решение:

Периметр обогрева определяется по формулам:

$$\Pi = 2 \cdot h + 3 \cdot b - 2 \cdot s = 2 \cdot 200,0 + 3 \cdot 100,0 - 2 \cdot 5,5 = 689 \text{ мм} = 0,689 \text{ м}$$

$$\Pi = 1 \cdot b + 4 \cdot t + 2 \cdot h_w + 4 \cdot b_w = 1 \cdot 100,0 + 4 \cdot 8,0 + 2 \cdot 184,0 + 4 \cdot 47,25 = 689,0 \text{ мм} = 0,689 \text{ м}$$

Приведенная толщина металла определяется по формуле (18).

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{0,002716}{0,689} = 0,00394 \text{ м} = 3,9 \text{ мм}$$

1.2.2. Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости конструкции для различной приведенной толщины металла при стандартном температурном режиме пожара осуществляется по номограмме прогрева незащищенных стальных конструкций, представленной на рисунке Б.1 приложения Б.

Допускается определять промежуточные значения методом линейной интерполяции.

Пример 1.4.

По номограмме, необходимо определить собственный (фактический) предел огнестойкости для колонны из стали С255, рассмотренной в примере 1.2 до достижения критической температуры, полученной в примере 1.1, равной 665,7 °С.

Исходные данные:

Колонна двутаврового сечения 30К10;

Количество сторон обогрева – 4;

ПТМ – 12,6 мм;

Тип стали – С255;

Критическая температура – 665,7 °С.

Решение:

Используя номограмму прогрева незащищенных стальных конструкций, представленную на рисунке Б.1 приложения Б, определяется время прогрева конструкции до критической температуры и для соответствующей приведенной толщины металла.

Значение ПТМ в примере 1.2 равен 12,6 мм и находится между значениями 10 и 15 мм на номограмме. Используя метод линейной интерполяции

вычисляется значение времени прогрева до 665,7 °С для конструкций с ПТМ 10 и 15 мм, и затем опять же используя линейную интерполяцию находим значение, соответствующее ПТМ 12,6 мм.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице П1.4.

Таблица П1.4. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 10,0 мм	ПТМ 12,6 мм	ПТМ 15,0 мм
700,0	23,1	25,7	28,1
665,7	22,2	23,6	27,0
600,0	17,5	19,6	21,5

Исходя из полученных значений - собственный (фактический) предел огнестойкости колонны двутаврового сечения 30К10 при 4-х стороннем обогреве с $\delta_{пр} = 12,6$ мм составит $P_{ф} = 23,6$ мин для критической температуры стали 665,7 °С (938,7 К).

1.2.3. Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Расчетный метод определения собственного (фактического) предела огнестойкости незащищенной стальной конструкции представляет собой последовательное вычисление температуры элемента через расчетный интервал времени $\Delta\tau$ до достижения критического значения.

В данном разделе расчет рассматривается при условии изменения температуры нагревающей среды во времени по кривой «стандартного пожара» [6]. Время от начала огневого воздействия τ позволяет определить температуру нагревающей среды в данный момент времени.

$$T_{в,\tau} = 345 \cdot \log_{10}\left(\frac{8}{60} \cdot \tau + 1\right) + T_0 \quad (19)$$

где $T_{в,\tau}$ – температура нагревающей среды, в момент времени τ , К;

τ – время от начала огневого воздействия, с;

T_0 – начальная температура среды, К.

Коэффициент теплоотдачи от нагревающей среды к поверхности конструкции вычисляется по формуле:

$$\alpha_{\tau} = \alpha_{к,\tau} + \alpha_{л,\tau} = 29 + 5,77 \cdot S_{пр} \cdot \frac{(T_{в,\tau}/100)^4 - (T_{ст,\tau-\Delta\tau}/100)^4}{(T_{в,\tau} - T_{ст,\tau-\Delta\tau})} \quad (20)$$

где α_{τ} – коэффициент теплоотдачи в момент времени τ , Вт/(м²·К);

$\alpha_{к,\tau}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи в момент времени τ , Вт/(м²·К);

$\alpha_{л,\tau}$ – коэффициент лучистой теплоотдачи в момент времени τ , Вт/(м²·К);

$S_{пр}$ – приведенная степень черноты;

$T_{в,\tau}$ – температура нагревающей среды в момент времени τ , К;

$T_{ст,\tau}$ – температура элемента в момент времени τ , К;

$T_{ст,\tau-\Delta\tau}$ – температура элемента в момент времени $\tau-\Delta\tau$, К;

$\Delta\tau$ – расчетный интервал времени, с.

Примечание: В формуле (20) дельта тау ($\Delta\tau$) является шагом по времени для расчёта температуры элемента. $T_{ст,\tau-\Delta\tau}$ означает, что температура элемента равна значению полученной на предыдущем шаге по времени.

$$S_{пр} = \frac{1}{(1/S_{в}) + (1/S_{0}) - 1} \quad (21)$$

где $S_{в}$ – степень черноты огневой камеры печи;

S_{0} – степень черноты обогреваемой поверхности конструкции.

Температура незащищенной металлической конструкции вычисляется по формуле:

$$T_{ст,\tau} = \frac{\Delta\tau}{\rho_{ст} \cdot \delta_{пр} \cdot (C_{ст} + D_{ст} \cdot T_{ст,\tau-\Delta\tau})} \cdot \alpha_{\tau-\Delta\tau} \cdot (T_{в,\tau} - T_{ст,\tau-\Delta\tau}) + T_{ст,\tau-\Delta\tau} \quad (22)$$

где $\rho_{ст}$ – плотность стали, кг/м³;

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

$D_{ст}$ – коэффициент изменения теплоемкости при нагреве, Дж/(кг·град²).

Максимальное значение расчетного интервала времени вычисляется по формуле:

$$\Delta\tau_{max} = \frac{\rho_{ст} \cdot \delta_{пр} \cdot (C_{ст} + D_{ст} \cdot T_{ст,\tau-\Delta\tau})}{\alpha_{\tau}} \quad (23)$$

где $\Delta\tau_{max}$ – максимальное значение расчетного интервала времени, с.

1.2.4. Верификация и валидация расчетного метода

В данном разделе проведена верификация и валидация расчетного метода (не более 90 мин прогрева для ПТМ 3, 5, 10, 15, 20 мм) при свойствах стали, представленных в таблице 1.3, и его применения в рассматриваемых задачах. Температура по сечению конструкции $T_{ст,0}$ и температура в печи T_0 в начальный момент времени приняты в 293 К. Значения температуры элемента конструкции, полученные по номограмме прогрева незащищенных стальных конструкций, в различные моменты времени сведены в таблицу 1.2. Для валидации расчетного метода при ПТМ отличных от 3, 5, 10, 15, 20 мм требуется проведение экспериментов. Расчеты по методу, описанному в разделе 1.2.3 настоящего пособия, выполнены в программе *Microsoft Excel*.

Таблица 1.2. Температура незащищенной стальной конструкции в соответствии с номограммой прогрева незащищенных стальных конструкций (рис.Б.1 прил. Б)

Время прогрева, мин	Температура конструкции (°С) в различные моменты времени в зависимости от ПТМ (мм)				
	3,0	5,0	10,0	15,0	20,0
5,0	388,0	280,0	176,0	132,0	108,0
10,0	600,0	524,0	372,0	280,0	228,0
15,0	696,0	652,0	516,0	416,0	378,0
20,0	748,0	728,0	644,0	556,0	476,0
25,0	-	-	720,0	652,0	552,0
30,0	-	-	772,0	722,0	660,0
35,0	-	-	-	-	720,0
40,0	-	-	-	-	772,0

Учитывая, что степень черноты для незащищенного металла и степень черноты в камере испытательной печи постоянные, то значение приведенной степени черноты, полученное по формуле (21) принято постоянным для расчетов, выполненных в данном пособии.

$$S_{пр} = \frac{1}{(1/S_B) + (1/S_0) - 1} = \frac{1}{(1/0,85) + (1/0,625) - 1} = 0,563$$

Таблица 1.3. Характеристики стали и некоторые константы принятые в соответствии с [19]

Параметр	Значение	Размерность	Параметр	Значение	Размерность
$C_{ст}$	310	Дж/(кг·град)	α_k	29	Вт/(м ² ·К)
$D_{ст}$	0,48	Дж/(кг·град ²)	s_0	0,625	
E_n	2 100 000	кг/см ²	s	0,85	
$\rho_{ст}$	7 800	кг/м ³			

Примечание к таблице 1.3: в проекте СП «Конструкции стальные строительные. Правила обеспечения огнестойкости» [2] указаны иные значения характеристик сталей, используемые для расчета огнестойкости в качестве исходных данных. Перед выполнением расчетов необходимо уточнить их актуальность, т.к. могут быть изменения в связи с результатами проводимых научно-исследовательских работ и дополнениями справочных материалов. Для точных расчетов рекомендуется уточнять характеристики сталей из справочных материалов.

В пособии [26] предложен критерий выбора $\Delta\tau_{max}$, в соответствии с которым вычисляют значение $\Delta\tau_{max}$ для начальной и максимально возможной температуры в системе, и из найденных значений в расчет вводят наименьшую величину. Расчетные значения $\Delta\tau_{max}$ представлены в табл. 1.4 и 1.5.

Таблица 1.4. Значения расчетного интервала времени $\Delta\tau_{max}$ при расчете в градусах Цельсия

Температура среды, °С	Время, с	ПТМ, мм				
		3,0	5,0	10,0	15,0	20,0
20,0	0,0	61,4	102,7	207,2	315,0	429,9
1 006,0	5400,0	125,8	210,3	424,4	645,2	880,6

Таблица 1.5. Значения расчетного интервала времени $\Delta\tau_{max}$ при расчете в градусах Кельвина

Температура среды, К	Время, с	ПТМ, мм				
		3,0	5,0	10,0	15,0	20,0
293,0	0,0	42,1	70,3	141,1	212,6	285,1
1 279,0	5400,0	76,3	127,3	255,8	385,4	516,7

Графики прогрева незащищенных стальных конструкций при различных значениях расчетного интервала времени $\Delta\tau$ и ПТМ представлены на рис. 1.4 при расчете в градусах Цельсия и на рис. 1.5 при расчете в градусах Кельвина.

Сравнительный анализ температуры нагрева незащищенных стальных конструкций, полученных графическим методом по номограмме (табл. 1.2) и расчетным методом для свойств стали, представленных в таблице 1.3 в соответствии с разделом 1.2.3 настоящего пособия, показывает, что максимальное (абсолютное) относительное отклонение значений температуры при выполнении расчетов в градусах Цельсия (табл. 1.6) при $\Delta\tau = 1$ с и $\Delta\tau = 60$ с составляет 22,2% и 83,3% соответственно, и в градусах Кельвина (табл. 1.7) при $\Delta\tau = 1$ с и $\Delta\tau = 60$ с составляет 4,7% и 58,5% соответственно.

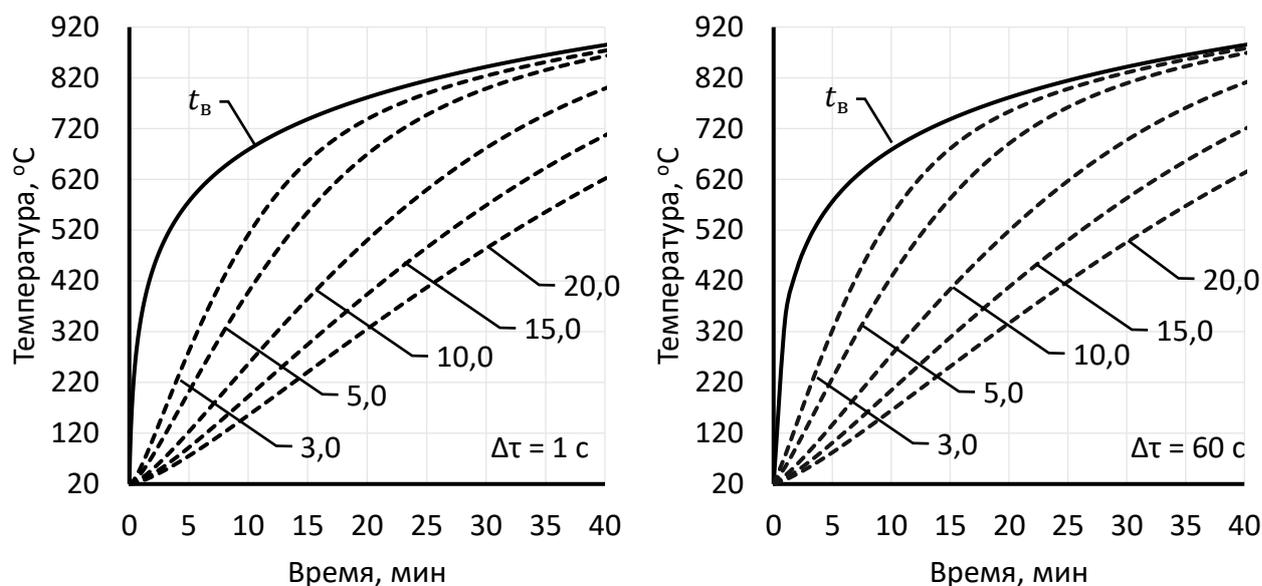


Рис. 1.4. График прогрева незащищенных стальных конструкций при расчетном интервале $\Delta\tau = 1$ с и $\Delta\tau = 60$ с. Цифры у кривых соответствуют приведенной толщине металла $\delta_{пр}$, мм

Таблица 1.6. Сравнительный анализ температуры нагрева незащищенных стальных конструкций при расчете в градусах Цельсия

$\delta_{пр}$, мм	Способ определения	Температура незащищенной стальной конструкции (°C) в различные моменты времени (мин) и относительное отклонение (%) от данных, полученных по номограмме							
		5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0
3,0	Номограмма	388,0	600,0	696,0	748,0	-	-	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	281,4	511,0	655,6	738,7	789,1	824,0	851,1	873,6
		15,9%	8,0%	3,0%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5,0	Номограмма	280,0	524,0	652,0	728,0	-	-	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	201,4	398,0	555,4	669,4	746,8	798,9	835,4	862,8
		16,3%	13,7%	8,0%	4,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10,0	Номограмма	176,0	372,0	516,0	644,0	720,0	772,0	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	122,9	256,5	384,8	500,2	599,5	681,7	747,6	799,1
		17,8%	18,4%	14,6%	12,6%	9,1%	6,2%	0,0%	0,0%
15,0	Номограмма	132,0	280,0	416,0	556,0	652,0	722,0	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	91,8	192,1	294,9	393,7	485,5	568,8	642,7	706,6
		18,0%	18,6%	17,0%	17,1%	14,6%	11,9%	0,0%	0,0%
20,0	Номограмма	108,0	228,0	378,0	476,0	552,0	660,0	720,0	772,0
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	75,2	155,4	240,6	325,3	407,0	484,1	555,8	621,4
		17,9%	18,9%	22,2%	18,8%	15,1%	15,4%	12,9%	10,8%
3,0	Номограмма	1186,0	1290,0	1350,8	1393,9	1427,3	1454,6	1477,7	1497,8
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1185,5	1289,8	1350,7	1393,8	1427,3	1454,6	1477,7	1497,7
		-50,7%	-36,5%	-32,0%	-30,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5,0	Номограмма	1185,5	1289,8	1350,7	1393,8	1427,3	1454,6	1477,7	1497,7
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1184,2	1289,3	1350,3	1393,6	1427,1	1454,5	1477,6	1497,6
		-61,8%	-42,2%	-34,9%	-31,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10,0	Номограмма	1184,2	1289,3	1350,3	1393,6	1427,1	1454,5	1477,6	1497,6
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1184,2	1289,3	1350,3	1393,6	1427,1	1454,5	1477,6	1497,6
		-74,1%	-55,2%	-44,7%	-36,8%	-32,9%	-30,7%	0,0%	0,0%
15,0	Номограмма	1182,9	1288,7	1350,0	1393,4	1426,9	1454,3	1477,5	1497,5
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1182,9	1288,7	1350,0	1393,4	1426,9	1454,3	1477,5	1497,5
		-79,9%	-64,3%	-52,9%	-43,0%	-37,3%	-33,6%	0,0%	0,0%
20,0	Номограмма	1181,6	1288,2	1349,7	1393,1	1426,8	1454,2	1477,4	1497,4
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1181,6	1288,2	1349,7	1393,1	1426,8	1454,2	1477,4	1497,4
		-83,3%	-69,9%	-56,2%	-49,1%	-44,2%	-37,6%	-34,5%	-32,0%

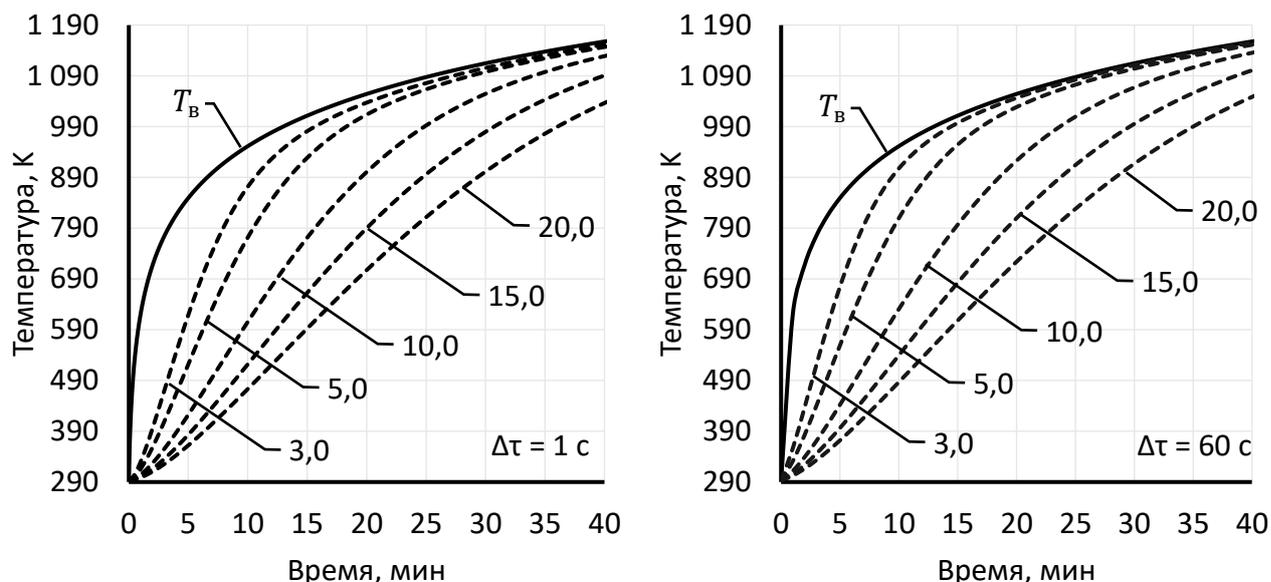


Рис. 1.5. График прогрева незащищенных стальных конструкций при расчетном интервале $\Delta\tau = 1$ с и $\Delta\tau = 60$ с. Цифры у кривых соответствуют приведенной толщине металла $\delta_{пр}$, мм

Таблица 1.7. Сравнительный анализ температуры нагрева незащищенных стальных конструкций при расчете в градусах Кельвина

$\delta_{пр}$, мм	Способ определения	Температура незащищенной стальной конструкции (К) в различные моменты времени (мин) и относительное отклонение (%) от данных, полученных по номограмме							
		5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0
3,0	Номограмма	661,0	873,0	969,0	1 021,0	-	-	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	619,0 3,3%	871,4 0,1%	981,0 -0,6%	1 037,3 -0,8%	1 075,7 0,0%	1 105,7 0,0%	1 130,4 0,0%	1 151,6 0,0%
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1 459,3 -37,6%	1 563,1 -28,3%	1 623,8 -25,3%	1 666,9 -24,0%	1 700,4 0,0%	1 727,7 0,0%	1 750,8 0,0%	1 770,8 0,0%
5,0	Номограмма	553,0	797,0	925,0	1 001,0	-	-	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	521,7 2,9%	771,5 1,6%	928,6 -0,2%	1 013,7 -0,6%	1 063,5 0,0%	1 097,8 0,0%	1 124,6 0,0%	1 147,0 0,0%
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1 458,9 -45,0%	1 563,0 -32,5%	1 623,8 -27,4%	1 666,9 -25,0%	1 700,3 0,0%	1 727,6 0,0%	1 750,7 0,0%	1 770,7 0,0%
10,0	Номограмма	449,0	645,0	789,0	917,0	993,0	1 045,0	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	422,5 3,0%	605,3 3,2%	771,3 1,1%	900,6 0,9%	992,3 0,0%	1 054,7 -0,5%	1 097,7 0,0%	1 128,9 0,0%
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1 458,1 -52,9%	1 562,6 -41,6%	1 623,5 -34,6%	1 666,7 -29,0%	1 700,2 -26,3%	1 727,5 -24,6%	1 750,7 0,0%	1 770,7 0,0%
15,0	Номограмма	405,0	553,0	689,0	829,0	925,0	995,0	-	-
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	383,2 2,8%	521,8 2,9%	662,8 1,9%	790,0 2,4%	896,2 1,6%	979,8 0,8%	1 043,2 0,0%	1 090,7 0,0%
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1 457,3 -56,5%	1 562,3 -47,7%	1 623,3 -40,4%	1 666,6 -33,6%	1 700,1 -29,5%	1 727,5 -26,9%	1 750,6 0,0%	1 770,6 0,0%
20,0	Номограмма	381,0	501,0	651,0	749,0	825,0	933,0	993,0	1 045,0
	Расчет при $\Delta\tau = 1$ с	362,2 2,5%	473,1 2,9%	592,4 4,7%	707,4 2,9%	811,6 0,8%	901,5 1,7%	976,2 0,9%	1 036,5 0,4%
	Расчет при $\Delta\tau = 60$ с	1 456,5 -58,5%	1 561,9 -51,4%	1 623,1 -42,7%	1 666,4 -38,0%	1 700,0 -34,7%	1 727,4 -29,9%	1 750,5 -27,6%	1 770,6 -25,8%

Расчеты, выполненные в соответствии с разделом 1.2.3 настоящего пособия, следует проводить в градусах Кельвина и полученные значения переводить в градусы Цельсия для дальнейшего анализа.

Пример 1.5.

Расчетным методом необходимо определить собственный (фактический) предел огнестойкости для колонны из стали С255, рассмотренной в примере 1.2 до достижения критической температуры, полученной в примере 1.1, равной 665,7 °С.

Исходные данные:

Колонна двутаврового сечения 30К10;

Количество сторон обогрева – 4;

ПТМ – 12,6 мм;

Тип стали – С255;

Критическая температура – 665,7 °С.

Расчетный интервал времени – $\Delta\tau = 1$ с.

Решение:

Используя расчетный метод, описанный в разделе 1.2.3, определяется время прогрева элемента незащищенной стальной конструкции.

Расчет выполняется для значения $\delta_{пр} = 12,6$ мм, данных, представленных в таблице 1.3, и расчетного интервала $\Delta\tau = 1$ с.

Начальная температура нагревающей среды +20 °С = 293 К, такая же начальная температура у условного образца.

Для примера посчитаем температуру в камере печи в условиях стандартного пожара на 5, 10, 15, 20 минутах (300 сек, 600 сек, 900 сек, 1200 сек):

$$t_{5\text{мин}} = 345 \cdot \log\left(\frac{8}{60} \cdot 300 + 1\right) + 293 = 345 \cdot \lg(41) + 293 = 556,41 + 293 = 849,41 \text{ К}$$

$$t_{10\text{мин}} = 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60} \cdot 600 + 1\right) + 293 = 345 \cdot \lg(81) + 293 = 658,43 + 293 = 951,43 \text{ К}$$

$$t_{15\text{мин}} = 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60} \cdot 900 + 1\right) + 293 = 345 \cdot \lg(121) + 293 = 718,56 + 293 = 1011,56 \text{ К}$$

$$t_{20\text{мин}} = 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60} \cdot 1200 + 1\right) + 293 = 345 \cdot \lg(161) + 293 = 761,35 + 293 = 1054,35 \text{ К}$$

т.е. $t_{5\text{мин}} = 576,41 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{10\text{мин}} = 678,43 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{15\text{мин}} = 738,56 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{20\text{мин}} = 781,35 \text{ }^\circ\text{C}$.

$S_{\text{пр}} = 0,563$ (в соответствии с ранее рассчитанным в п. 1.2.4);

Вычислим коэффициент передачи тепла по формуле (20) с шагом 1 сек:

В соответствии с (19) $t_{1\text{сек}}=311,75 \text{ К}$, $t_{2\text{сек}}=328,42 \text{ К}$, $t_{3\text{сек}}=343,41 \text{ К}$, $t_{4\text{сек}}=357,04^\circ\text{К}$, $t_{5\text{сек}}=369,54 \text{ К}$ и т.д.

$$\alpha_{1\text{й сек}} = 29 + 5,77 \cdot 0,563 \cdot \frac{(311,75/100)^4 - (293/100)^4}{311,75 - 293} = 29 + 3,24851 \cdot \frac{20,7547}{18,75} = 29 + 3,60 = 32,60 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

Рассчитаем температуру условного образца с ПТМ 12,6 мм через 1 сек по формуле (22):

$$t_{1\text{й сек}} = \frac{1}{7800 \cdot (12,6 \cdot 0,001) \cdot (310 + 0,48 \cdot 293)} \cdot 32,60 \cdot (311,75 - 293) + 293 = \frac{1}{44288,8992} \cdot 611,17 + 293 = 0,0138 + 293 = 293,01 \text{ К}$$

По подобию строим дальнейшую «матрицу» значений, опираясь на предыдущие значения температуры нагрева условного образца с ПТМ 12,6 мм

$$\alpha_{2\text{й сек}} = 29 + 5,77 \cdot 0,563 \cdot \frac{(328,42/100)^4 - (293,01/100)^4}{328,42 - 293,01} = 29 + 3,24851 \cdot$$

$$\frac{42,6227}{35,41} = 29 + 3,91 = 32,91 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$t_{2\text{й сек}} = \frac{1}{7800 \cdot (12,6 \cdot 0,001) \cdot (310 + 0,48 \cdot 293,01)} \cdot 32,91 \cdot (328,42 - 293,01) + 293,01 = \frac{1}{44289,5502} \cdot 1165,24 + 293,01 = 0,026 + 293,01 = 293,04 \text{ К}$$

$$\alpha_{3\text{й сек}} = 29 + 3,24851 \cdot \frac{139,07586 - 73,74087}{50,370} = 29 + 4,21 = 33,21 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$t_{3\text{й сек}} = \frac{1}{44290,79135} \cdot 33,21 \cdot (343,41 - 293,04) + 293,04 = \frac{1}{44290,79135} \cdot 1672,97 + 293,04 = 0,0378 + 293,04 = 293,08 \text{ К}$$

$$\alpha_{4\text{й сек}} = 29 + 3,24851 \cdot \frac{162,5053 - 73,7789}{63,96} = 29 + 4,51 = 33,51 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$t_{4\text{й сек}} = \frac{1}{44292,57324} \cdot 33,51 \cdot (63,96) + 293,08 = \frac{1}{44292,57324} \cdot 2143,13 + 293,08 = 0,0484 + 293,08 = 293,13 \text{ К}$$

$$\alpha_{5\text{й сек}} = 33,79 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$t_{5\text{й сек}} = 293,18 \text{ К}$$

Построив матрицу значений с шагом 1 сек., получаем время достижения критической температуры 938,7 К (665,7 °С) условным образцом с ПТМ 12,6 мм:

$$t_{1388\text{я сек}} = 938,62 \text{ К}$$

$$t_{1389\text{я сек}} = 938,92 \text{ К}$$

Соответственно время достижения наиболее близкой критической температуры (938,62 К) в минутах составляет 23,1 мин или 23 мин 6 сек.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены на рис. П1.5.

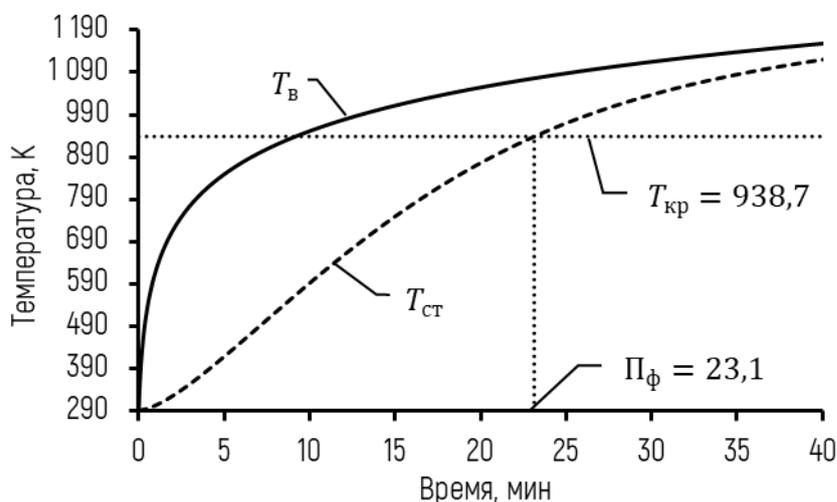


Рис. П1.5. График прогрева элемента незащищенной стальной конструкции ($T_{\text{ст}}$) для $\delta_{\text{пр}} = 12,6$ мм и расчетном интервале $\Delta\tau = 1$ с

Относительное отклонение собственного (фактического) предела огнестойкости, полученных в примере 1.4 ($\Pi_{\text{ф}} = 23,8$ мин) и 1.5 ($\Pi_{\text{ф}} = 23,1$ мин) составляет 4,0%.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОГО (ФАКТИЧЕСКОГО) ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. Пример I. Центральнo-сжатая конструкция

Колонна, воспринимающая нагрузку от лежащих на ней конструкций перекрытия в здании по всему сечению, не примыкает к какой-либо ограждающей конструкции и является заземленной с обеих сторон.

2.1.1. Исходные данные

Длина колонны $l = 3\ 200\ \text{мм} = 320\ \text{см} = 3,2\ \text{м}$.

$N_n = 155\ \text{тс} = 155\ 000\ \text{кгс}$.

$E_n = 2\ 100\ 000\ \text{кг/см}^2$.

Так как колонна не примыкает к какой-либо ограждающей конструкции с собственным (фактическим) пределом огнестойкости или к другим конструкциям, исключающих обогрев одной или нескольких сторон в случае пожара, то периметр обогрева конструкции принимается со всех сторон. Обогрев конструкции – 4-х сторонний.

Для колонны двутаврового сечения:

Колонна стандартного прокатного сечения 40К2 (рис. 2.1) и характеристики, принятые по ГОСТ 57837 [10], представлены в таблице 2.1.

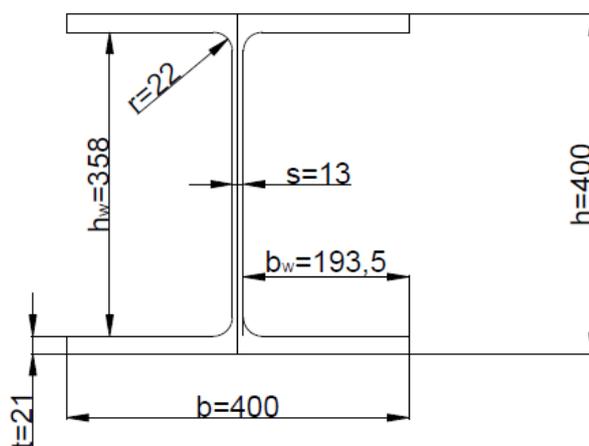


Рис. 2.1. Поперечное сечение двутавра 40К2:

h - высота двутавра; h_w - высота стенки двутавра (в свету между полками); b - ширина полки; b_w - свес полки; t - толщина полки; s - толщина стенки; r - радиус сопряжения

Таблица 2.1. Характеристики колонного двутавра 40К2, указанные в ГОСТ Р 57837 [10]

Номинальные размеры, мм				Номинальная площадь поперечного, сечения F_H , см ²	Справочные значения величин для осей	
h	b	s	t		I_x , см ⁴	I_y , см ⁴
400,0	400,0	13,0	21,0	218,69	66621,41	22412,67

Толщина полки двутаврового проката из стали С235 составляет $t = 21$ мм, в соответствии с ГОСТ 27772 [11] предел текучести составляет $R_{yn} = 235$ МПа = $2\,396,33$ кг/см².

$l_{ef} = 0,5 \cdot l = 0,5 \cdot 3\,200 = 1\,600$ мм = 160 см = 1,6 м - колонна является защемленным с обеих сторон элементом - колонна не может вращаться в каком-нибудь направлении и не может перемещаться ни с одного из концов.

$$J_{min} = \min [I_x; I_y] = 22\,412,67 \text{ см}^4.$$

$$F = F_H = 218,69 \text{ см}^2 = 21\,869 \text{ мм}^2.$$

Для колонны круглого сечения:

Колонна из трубы круглого сечения (рис. 2.2) по ГОСТ 33228 [18], внешний диаметр 406,4 мм. Толщина стенки трубы составляет $t = 15$ мм, в соответствии с таблицей 3 ГОСТ 27772 [11] предел текучести составляет $R_{yn} = 245$ МПа = $2\,498,30$ кг/см².

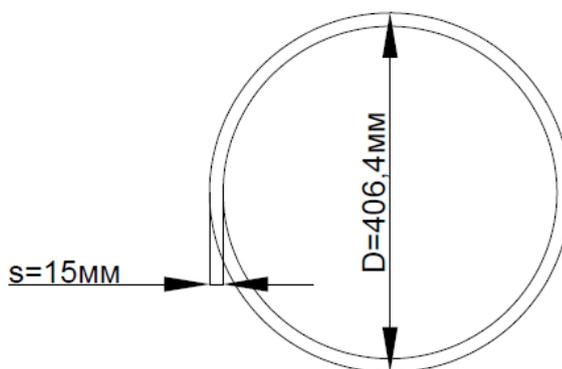


Рис. 2.2. Поперечное сечение трубы Ø406,4x15мм:
 D – диаметр трубы; s - толщина стенки

Расчет механических свойств круглого сечения выполняется в соответствии с курсом сопротивления материалов, значения W , I , влияющие на прочностные характеристики, рассчитываются по формулам [25]:

$$W_x = W_y = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{D-s \cdot 2}{D}\right)^4\right) = 1\,739,83 \text{ см}^3$$

$$J_{min} = \min [I_x; I_y] = I_x = I_y = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \cdot \left(1 - \left(\frac{D-s \cdot 2}{D}\right)^4\right) = 35\,353,37 \text{ см}^4$$

Площадь поперечного сечения трубы круглого сечения рассчитывается как разница площадей круга внешнего диаметра и круга внутреннего диаметра:

$$F_{сеч.} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot (D-2 \cdot s)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,4064^2}{4} - \frac{3,14 \cdot (0,4064 - 2 \cdot 0,015)^2}{4} = 0,01844 \text{ м}^2 = 184,40 \text{ см}^2$$

2.1.2. Прочностной расчет

Центрально-сжатая конструкция теряет несущую способность при достижении критической температуры в результате потери прочности или устойчивости.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Определение критической температуры нагруженной конструкции выполняется через коэффициенты снижения предела текучести γ_T и модуля упругости γ_e стали в соответствии с разделом 1.1.

Для колонны двутаврового сечения:

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали для центрально-сжатой конструкции колонны определяется по формуле (1):

$$\gamma_T = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} = \frac{155\,000}{218,69 \cdot 2\,396,33} = 0,296$$

Температурный коэффициент снижения модуля упругости стали для центрально-сжатой конструкции колонны определяется по формуле (2):

$$\gamma_e = \frac{N_n \cdot l_{ef}^2}{\pi^2 \cdot E_n \cdot J_{min}} = \frac{155\,000 \cdot 160^2}{3,14159^2 \cdot 2\,100\,000 \cdot 22\,412,67} = 0,008$$

Для колонны круглого сечения:

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали для центрально-сжатой конструкции колонны определяется по формуле (1):

$$\gamma_T = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} = \frac{155\,000}{184,40 \cdot 2\,498,30} = 0,337$$

Температурный коэффициент снижения модуля упругости стали для центрально-сжатой конструкции колонны определяется по формуле (2):

$$\gamma_e = \frac{N_n \cdot l_{ef}^2}{\pi^2 \cdot E_n \cdot J_{min}} = \frac{155\,000 \cdot 160^2}{3,14159^2 \cdot 2\,100\,000 \cdot 35\,353,37} = 0,005$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяют температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С235, С245 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Для колонны двутаврового сечения:

Значение γ_e в таблице отсутствует, самое низкое значение коэффициента снижения модуля упругости составляет 0,43 и установлено для температуры 700 °С. Значения ниже или выше указанных в таблице не вычисляются, используя только диапазон значений из таблицы. Соответственно расчетную критическую температуру по модулю упругости устанавливаем как 700 °С (973,0 К).

Таблица 2.2. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
650	0,520	650,0	0,340
700	0,430	665,8	0,296
700	0,008	700,0	0,200

Критическая температура для колонны двутаврового сечения составит $t_{кр} = 665,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (938,8 К).

Для колонны круглого сечения:

Значение γ_e в таблице отсутствует, самое низкое значение коэффициента снижения модуля упругости составляет 0,43 и установлено для температуры 700 $^\circ\text{C}$. Значения ниже или выше указанных в таблице не вычисляется, используя только диапазон значений из таблицы. Соответственно расчетную критическую температуру по модулю упругости устанавливаем как 700 $^\circ\text{C}$ (973,0 К).

Таблица 2.3. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, $^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, $^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
650	0,520	650,0	0,340
700	0,430	651,2	0,337
700	0,005	700,0	0,200

Критическая температура для колонны круглого сечения составит $t_{кр} = 651,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (924,2 К).

2.1.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Для колонны двутаврового сечения:

Периметр обогрева конструкции двутаврового сечения определяется по формулам, представленные в таблице 1.1:

$$P = 2 \cdot b + 2 \cdot h + 2 \cdot (b - s) = 2 \cdot 400 + 2 \cdot 400 + 2 \cdot (400 - 13) = 2\,374 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{пр} = \frac{F}{P} = \frac{21\,869}{2\,374} = 9,2 \text{ мм}$$

Для колонны круглого сечения:

Периметр обогрева конструкции круглого сечения определяется по формулам, представленным в [22]:

$$\Pi = \pi \cdot D = 3,14 \cdot 406,4 = 1\,276,74 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{18\,440}{1\,276,74} = 14,4 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Для колонны двутаврового сечения:

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 5,0 мм	ПТМ 9,2 мм	ПТМ 10,0 мм
700,0	17,9	22,6	23,5
665,8	16,1	20,7	21,6
600,0	12,5	17,1	18,0

Собственный (фактический) предел огнестойкости колонны 40К2 с $\delta_{\text{пр}} = 9,2$ мм для $t_{\text{кр}} = 665,8$ °С (938,8 К) составит $\Pi_{\text{ф}} = 20,7$ мин.

Для колонны круглого сечения:

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 10,0 мм	ПТМ 14,4 мм	ПТМ 15,0 мм
700,0	23,5	27,8	28,3
651,2	20,8	24,9	25,4
600,0	18,0	21,8	22,3

Собственный (фактический) предел огнестойкости колонны круглого сечения с $\delta_{пр} = 14,4$ мм для $t_{кр} = 651,2$ °С (924,2 К) составит $P_{\phi} = 23,8$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис.2.4 и рис. 2.5 для колонны двутаврового и круглого сечения соответственно:

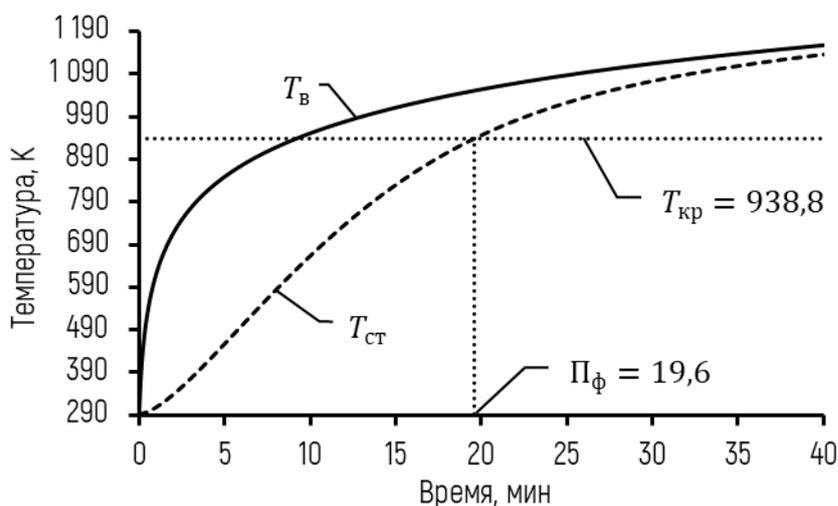


Рис. 2.4. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 9,2$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 938,8$ К (665,8 °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 9,2$ мм составляет $P_{\phi} = 19,6$ мин.

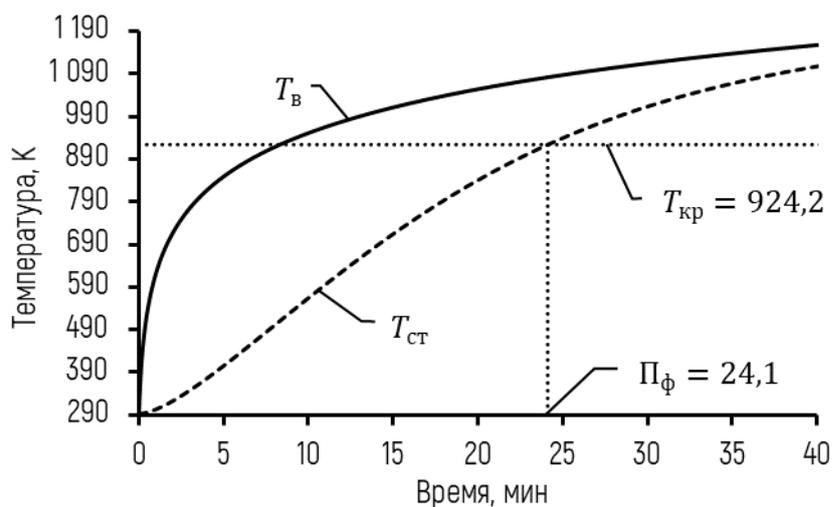


Рис. 2.5. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 14,4$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 924,2$ К ($651,2$ °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 14,4$ мм составляет $P_{ф} = 24,1$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет не более 5,5 % (не более 69 с) для двутаврового сечения и не более 3,0 % (не более 45 с) для круглого сечения.

Для рассматриваемого элемента конструкции двутаврового (40К2) и круглого сечения, защемленного с обеих сторон, с нагрузкой $N_n = 155$ т при 4-х стороннем обогреве предел огнестойкости составляет R20 и R26. Результаты расчетов представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Колонна двутаврового сечения (40К2)	9,2	665,8	R19	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1
Колонна круглого сечения	14,4	651,2	R23		

Толщина стенки трубного квадратного проката из стали С235 составляет $t = 6$ мм, в соответствии с таблицей 3 ГОСТ 27772 [11] предел текучести составляет $R_{yn} = 235$ МПа = 2 396,33 кг/см².

Длина раскоса $l = 2\,370$ мм = 237 см = 2,37 м.

$N_n = 31$ т. = 31 000 кг.

$F = 30,31$ см² = 3 031 мм².

2.2.2. Прочностной расчет

Определение критической (фактической) температуры растянутой конструкции выполняется через коэффициент снижения предела текучести γ_T стали в соответствии с разделом 1.1.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Для центрально-растянутой конструкции раскоса расчет выполняется только по формуле (1):

$$\gamma_T = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} = \frac{31\,000}{30,31 \cdot 2\,396,33} = 0,427$$

Используя таблицу А.1 температурных коэффициентов снижения механических свойств строительных сталей для стали С235 устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам. Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции:

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С235 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.8. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для центрально-растянутого элемента не определяется	600	0,450
650		610,5	0,427
700		650	0,340

Критическая температура элемента конструкции из сварной замкнутой трубы размерами 140x140x6 мм, составит $t_{кр} = 610,5$ °С (883,5 К).

2.2.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Периметр обогрева конструкции квадратного сечения определяется по формуле, представленной в таблице 1.1:

$$\Pi = 4 \cdot b = 4 \cdot 140 = 560 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла определяется по формуле (18):

$$\delta_{пр} = \frac{F}{\Pi} = \frac{3\ 031}{560} = 5,4 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщиной металла. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 5,0 мм	ПТМ 5,4 мм	ПТМ 10,0 мм
700,0	17,9	18,3	23,5
610,5	13,0	13,5	18,6
600,0	12,5	12,9	18,0

Собственный (фактический) предел огнестойкости элемента конструкции из сварной замкнутой трубы размерами 140x140x6 мм с $\delta_{пр} = 5,4$ мм для $t_{кр} = 610,5$ °C (883,5 К) составит $P_{\phi} = 13,5$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис.2.8.

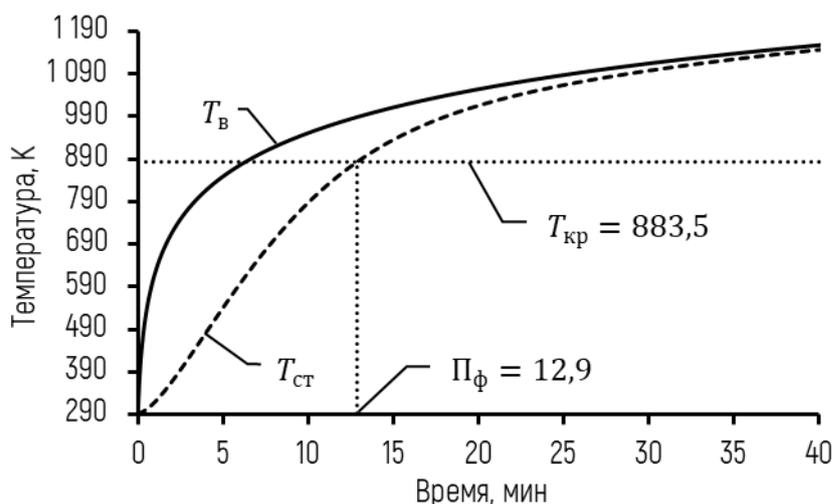


Рис. 2.8. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 5,4$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 883,5$ К (610,5 °C) условным образцом с $\delta_{пр} = 5,4$ мм составляет $P_{\phi} = 12,9$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчетный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет не более 4,5 % (не более 35 с).

Предел огнестойкости рассматриваемого элемента конструкции (трубы квадратного сечения размерами 140x140x6 мм, заземленной с обеих сторон с нагрузкой $N_n = 31$ т при 4-х стороннем обогреве) составляет R13. Результаты расчетов представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.10. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Труба 140x140x6	5,4	610.5	R13	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1

2.3. Пример III. Внецентренно-сжатая конструкция

Конструкция одной из колонн сварного сечения из основного сортамента (два швеллера приваренных друг к другу по всей длине со стороны стенки швеллера) воспринимает нагрузки от платформы площадки лестницы (рис. 2.9).

Колонна не примыкает к какой-либо ограждающей конструкции.

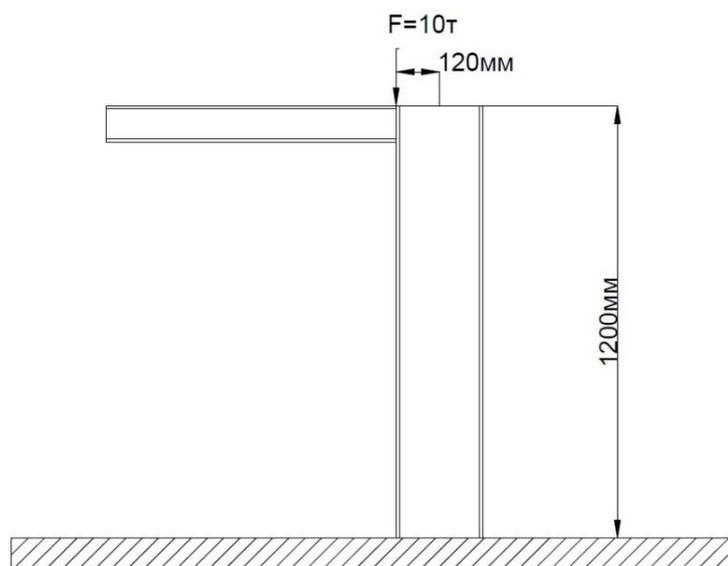


Рис. 2.9. Конструкция и точки приложения усилия от нагрузки

2.3.1. Исходные данные

Колонна состоит из 2-х швеллеров стандартного прокатного сечения 24П (рис. 2.10 и 2.11), характеристики, принятые в соответствии с ГОСТ 8240 [13], представлены в таблице 2.11.

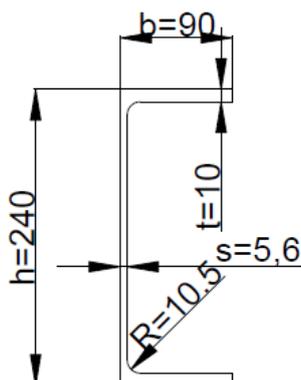


Рис. 2.10.

Поперечное сечение швеллера 24П:
 h - высота швеллера; b - ширина полки;
 t - толщина полки; s - толщина стенки;
 R - радиус внутреннего закругления.

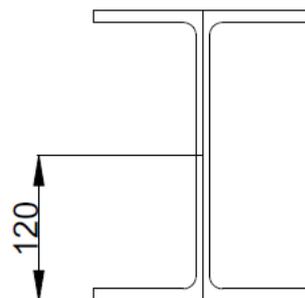


Рис. 2.11.

Сварное сечение двутавра
 из 2-х швеллеров 24П
 с отображением эксцентриситета
 приложения силы сжатия по сечению

Таблица 2.11. Характеристики швеллера 24П, указанные в ГОСТ 8240 [13]

Номинальные размеры, мм						Площадь поперечного сечения F , см ²	Справочные значения величин для осей			
h	b	s	t	R	r		I_x , см ⁴	W_x , см ³	I_y , см ⁴	W_y , см ³
240,0	90,0	5,6	10,0	10,5	6,0	30,60	2910,00	243,0	248,00	39,50
не более										

Так как колонна не примыкает к какой-либо ограждающей конструкции, препятствующей обогреву одной или нескольких сторон в случае пожара, то периметр обогрева конструкции принимается со всех сторон. Обогрев конструкции – 4-х сторонний.

Толщина полки швеллера из стали С235 составляет $t = 10$ мм, в соответствии с ГОСТ 27772 [11] предел текучести составляет $R_{yn} = 235$ МПа = 2 396,33 кг/см².

Длина колонны $l = 1200$ мм = 120 см = 1,2 м.

$l_{ef} = 2 \cdot l = 2 \cdot 1200 = 2400$ мм = 240 см = 2,4 м - колонна является защемленной с одного конца, с другого конца свободна (консоль) (рис. 1.1).

$$N_n = 10 \text{ т} = 10\,000 \text{ кг.}$$

$$E_n = 2\,100\,000 \text{ кг/см}^2.$$

$$J_{min} = \min [I_x; I_y] = 248,00 \text{ см}^4.$$

$$F = 218,69 \text{ см}^2 = 21\,869 \text{ мм}^2.$$

$$e = 120 \text{ мм} = 12 \text{ см.}$$

2.3.2. Прочностной расчет

Определение критической (фактической) температуры растянутой конструкции выполняется через коэффициент снижения предела текучести γ_T стали в соответствии с разделом 1.1.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Учитывая, что прочность конструкции колонны обеспечивается сечением двух швеллеров 24П, то площади поперечного сечения F суммируются, а значения J_{min} , W , влияющие на прочностные характеристики, рассчитываются по формулам из сопротивления материалов для разных сечений и составляют $J_{min} = 951,22 \text{ см}^4$ и $W = 39,50 \text{ см}^3$.

Для внецентренно-сжатой конструкции колонны расчет коэффициента снижения предела текучести γ_T выполняется по формуле (3):

$$\gamma_T = \frac{N_n}{R_{уп}} \cdot \left(\frac{e}{W} + \frac{1}{F} \right) = \frac{10\,000}{2\,396,33} \cdot \left(\frac{12}{105,69} + \frac{1}{30,60 \cdot 2} \right) = 0,542$$

Расчёт коэффициента снижения модуля упругости стали выполняется по формуле (2).

$$\gamma_e = \frac{N_n \cdot l_{ef}^2}{\pi^2 \cdot E_n \cdot J_{min}} = \frac{10\,000 \cdot 240^2}{3,14159^2 \cdot 2\,100\,000 \cdot 951,22} = 0,029$$

Определение критической температуры

Критическая температура нагрева сечения конструкции, для марки стали С235, определяется по таблице А.1 приложения А в зависимости от вычисленных температурных коэффициентов снижения механических свойств строительной стали.

Для получения промежуточных значений коэффициентов используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1 или по наименьшей величине коэффициента γ_e

Значение γ_e в таблице отсутствует, наименьшее значение коэффициента снижения модуля упругости составляет 0,43 и установлен для температуры 700 °С. Значения ниже или выше указанных в таблице не вычисляются, используя только диапазон значений из таблицы. Соответственно расчетную критическую температуру по модулю упругости устанавливаем как 700 °С (973,0 К).

Таблица 2.12. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
650	0,600	500	0,610
700	0,430	548,6	0,542
700	0,029	550	0,540

Критическая температура элемента конструкции сварного двутавра, образующегося двумя швеллерами 24П, составит $t_{кр} = 548,6$ °С (821,6 К).

2.3.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Конструкция колонны состоит из 2-х сваренных друг к другу швеллеров со стороны стенки, при расчете периметра исключаем эту сторону из периметра обогрева у обоих швеллеров.

Периметр обогрева конструкции квадратного сечения определяется по формуле, представленной в таблице 1.1:

$$\Pi = 2 \cdot (2 \cdot b + h + 2 \cdot (b - s)) = 2 \cdot (2 \cdot 90 + 240 + 2 \cdot (90 - 5,6)) = 1\,177,6 \text{ мм}$$

Рассчитаем ПТМ по формуле (18), учитывая, что конструкция сечения состоит из 2-х швеллеров, т.е. площадь поперечного сечения конструкции в таком случае считается как F+F или 2F соответственно:

$$\delta_{пр} = \frac{2 \cdot F}{\Pi} = \frac{2 \cdot 3060}{1\,177,6} = 5,2 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 5,0 мм	ПТМ 5,2 мм	ПТМ 10,0 мм
600,0	12,5	12,7	18,0
548,6	11,0	11,2	16,1
500,0	9,5	9,7	14,3

Собственный (фактический) предел огнестойкости элемента конструкции сварного двутавра, образующегося двумя швеллерами 24П, с $\delta_{пр} = 5,2$ мм для $t_{кр} = 548,6$ °С (821,6 К) составит $P_{ф} = 11,2$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис. 2.12.

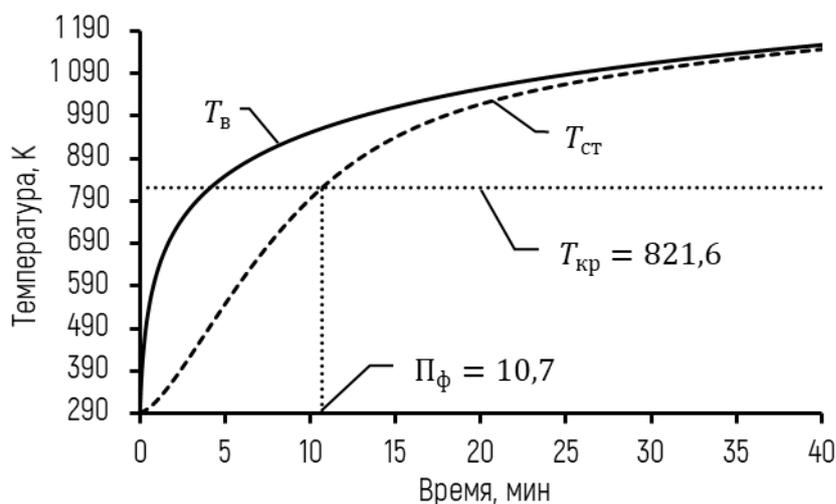


Рис. 2.12. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 5,2$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 821,6$ K ($548,6$ °C) условным образцом с $\delta_{пр} = 5,2$ мм составляет $P_{ф} = 10,7$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет не более 4,3 % (не более 29 с).

Для рассматриваемого элемента конструкции - двутаврового сечения, образующегося двумя швеллерами, заземленного с одной из сторон с нагрузкой $N_n = 10$ т при 4-х стороннем обогреве, предел огнестойкости составляет R11. Результаты расчетов представлены в табл. 2.14

Таблица 2.14. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °C	Предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Колонна 2x24П	5,2	547,7	R10	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1

2.4. Пример IV. Центрально-сжатая конструкция из стали С245 и С345 для сравнения параметров огнестойкости

Одна из колонн высотного здания, воспринимающая нагрузку вышележащих этажей в здании по всему сечению. Колонна примыкает одной из сторон к ограждающим конструкциям здания и частично погружена в неё (рис. 2.13).

2.4.1. Исходные данные

Колонна стандартного прокатного двутаврового сечения 35Ш2 в соответствии с ГОСТ Р 57837-2017 [10] (рис. 2.13, 2.14), характеристики, принятые по ГОСТ Р 57837-2017 [10], представлены в таблице 2.15.

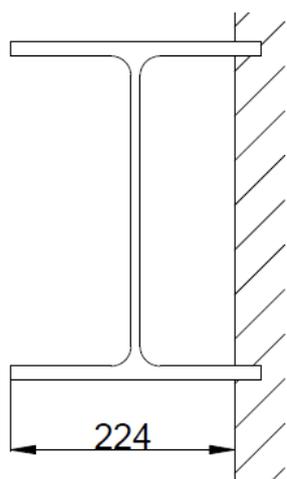


Рис. 2.13. Взаимное расположение колонны относительно примыкающей конструкции

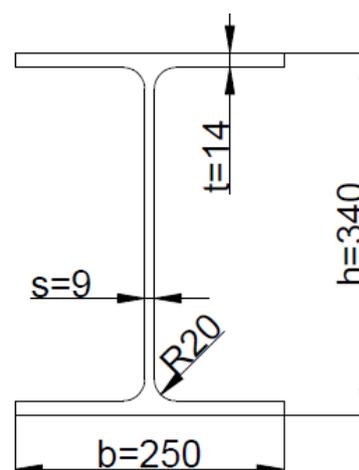


Рис. 2.14. Поперечное сечение двутавра 35Ш2: h - высота двутавра; b - ширина полки; t - толщина полки; s - толщина стенки; R - радиус сопряжения

Таблица 2.15. Характеристики колонного двутавра, указанные в ГОСТ Р 57837-2017 [10]

Номер профиля	Размеры профиля, мм					Площадь поперечного, сечения F , см ²	Справочные значения величин для осей			
	h	b	s	t	R		I_x , см ⁴	W_x , см ³	I_y , см ⁴	W_y , см ³
35Ш2	340	250	9	14	20	101,51	21678	1275,2	3650,5	292

Сталь С245 по ГОСТ 27772 [11], для сравнения также принято такое же сечение сортамента, но с использование стали С345 по ГОСТ 27772 [11].

Так как колонна примыкает одной из сторон к ограждающим конструкциям здания, то периметр обогрева конструкции принимается с 3-х сторон. Толщина полки двутаврового проката составляет $t = 14$ мм, в соответствии с ГОСТ 27772 [11] предел текучести составляет $R_{yn} = 245$ МПа = 2 498,30 кг/см² для стали С245 и $R_{yn} = 345$ МПа = 3 518,02 кг/см² для стали С345.

Длина колонны $l = 5\,000$ мм = 500 см = 5,0 м.

$l_{ef} = 0,5 \cdot l = 0,5 \cdot 5\,000 = 2\,500$ мм = 250 см = 2,5 м - колонна является защемленным с обеих сторон элементом - колонна не может вращаться в каком-нибудь направлении и не может перемещаться ни с одного из концов.

$$N_n = 130 \text{ т} = 130\,000 \text{ кг.}$$

$$E_n = 2\,100\,000 \text{ кг/см}^2.$$

$$J_{min} = \min [I_x; I_y] = 3\,650,50 \text{ см}^4.$$

2.4.2. Прочностной расчет

Определение критической (фактической) температуры сжатой конструкции выполняется через коэффициент снижения предела текучести γ_T и модуля упругости γ_e стали в соответствии с разделом 1.1.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Для центрально-сжатой конструкции расчет выполняется только по формуле (1) для разных марок сталей:

$$\gamma_{TC245} = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} = \frac{130\,000}{101,51 \cdot 2\,496,30} = 0,513$$

$$\gamma_{TC345} = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} = \frac{130\,000}{101,51 \cdot 3\,518,02} = 0,364$$

Температурный коэффициент снижения модуля упругости стали при сжатии определяется по формуле (2) для разных марок сталей:

$$\gamma_{eC245} = \frac{N_n \cdot l_{ef}^2}{\pi^2 \cdot E_n \cdot J_{min}} = \frac{130\,000 \cdot 250^2}{3,14159^2 \cdot 2\,100\,000 \cdot 3\,650,50} = 0,107$$

$$\gamma_{eC345} = \frac{N_n \cdot l_{ef}^2}{\pi^2 \cdot E_n \cdot J_{min}} = \frac{130\,000 \cdot 250^2}{3,14159^2 \cdot 2\,100\,000 \cdot 3\,650,50} = 0,107$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей из СТО АРСС 11251254.001-022-1 [20] для стали С245 и С345 устанавливают критическую температуру по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Значение γ_e в таблице отсутствует, самое низкое значение коэффициента снижения модуля упругости составляет 0,43 и 0,35 для сталей С235 и С345 соответственно и равняется температуре 700 °С. Значения ниже или выше указанных в таблице не вычисляется, используется только диапазон значений из таблицы. Соответственно расчетная критическая температура по модулю упругости устанавливается в 700 °С для рассматриваемых видов сталей.

Таблица 2.16. Результаты расчета критической температуры стали С245

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
650	0,520	550	0,540
700	0,430	565,0	0,513
700	0,107	600	0,450

Таблица 2.17. Результаты расчета критической температуры стали С345

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
650	0,530	600	0,460
700	0,350	640,0	0,364
700	0,107	650	0,340

Критическая температура элемента конструкции двутаврового сечения 35Ш2 составит $t_{кр} = 565,0$ °С (838,0 К) из стали С245 и $t_{кр} = 640,0$ °С (913,0 К) из стали С345.

2.4.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Так как колонна примыкает с одной стороны к ограждающей конструкции, исключаяющей обогрев одной из сторон в случае пожара, то периметр обогрева конструкции считается с трех сторон (3х сторонний обогрев), с учётом частичного погружения колонны в примыкающую конструкцию (рис. 2.13). Ширина не погружённой обогреваемой части полки $b_{\text{обогр}} = 224$ мм.

Периметр обогрева конструкции квадратного сечения определяется по формуле, представленной в таблице 1.1:

$$\Pi = 2 \cdot b_{\text{обогр}} + h + (b - s) = 2 \cdot 224 + 340 + (250 - 9) = 1029 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла определяется по формуле (18):

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{10\,151}{1\,029} = 9,9 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.18 и 2.19.

Таблица 2.18. Результаты расчета времени прогрева конструкции из стали С245 до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 5,0 мм	ПТМ 9,9 мм	ПТМ 10,0 мм
600,0	12,5	17,9	18,0
565,0	11,4	16,6	16,7
500,0	9,5	14,2	14,3

Таблица 2.19. Результаты расчета времени прогрева конструкции из стали С345 до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 5,0 мм	ПТМ 9,9 мм	ПТМ 10,0 мм
700,0	17,9	23,4	23,5
640,0	14,7	20,1	20,2
600,0	12,5	17,9	18,0

Собственный (фактический) предел огнестойкости двутаврового сечения с $\delta_{пр} = 9,9$ мм из стали С245 при $t_{кр} = 565,0$ °С (838,0 К) и из стали С345 при $t_{кр} = 640,0$ °С (913,0 К) составит $P_{\phi} = 16,6$ мин и $P_{\phi} = 20,1$ мин соответственно.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис.2.15.

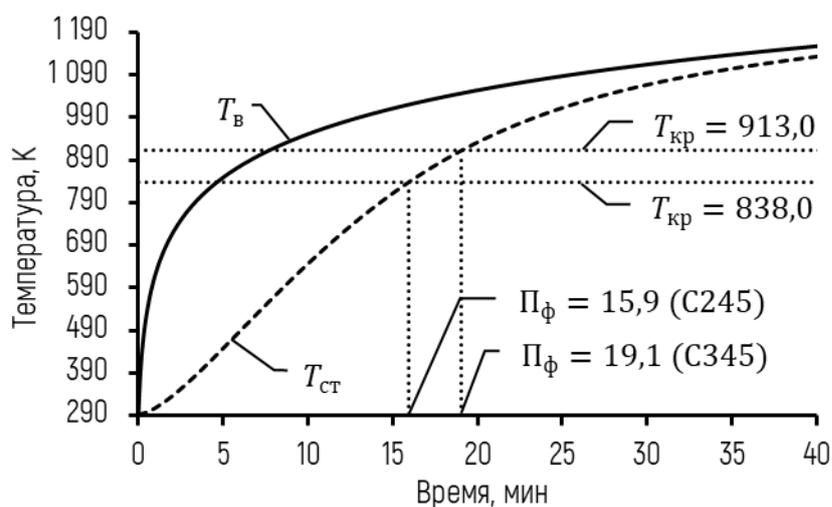


Рис. 2.15. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 9,9$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 838,0$ К (565,0 °С) и $T_{кр} = 913,0$ К (640,0 °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 9,9$ мм составляет $P_{\phi} = 15,9$ мин и $P_{\phi} = 19,1$ мин соответственно.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет для стали С245 не более 4,1 % (не более 41 с) и для стали С345 не более 5,2 % (не более 62 с).

Для рассматриваемого элемента конструкции - двутаврового сечения с нагрузкой $N_n = 130$ т, при 3-х стороннем обогреве, предел огнестойкости составляет R16 из стали С245 и R20 из стали С345. Результаты расчетов представлены в таблице 2.20.

Учитывая начальные условия задачи, что данная колонна является несущим элементом высотного здания, то у нее будут повышенные значения требуемого предела огнестойкости, принятого согласно СП 477.1325800 [4] и СП 267.1325800 [5]. Все эти здания относятся к зданиям I степени огнестойкости. Для обеспечения требуемых пределов огнестойкости в соответствии с п. 5.3.5. СП 2.13130 [3] не допускается применять вспучивающиеся огнезащитные покрытия.

Таблица 2.20. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Собственный предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Колонна 35Ш2 (С245)	9,9	565,0	R15	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1
Колонна 35Ш2 (С345)		640,0	R19		

2.5. Пример V. Балка с защемлением по двум концам

Балка перекрытия, являющейся опорой для плиты перекрытия, воспринимает распределённую нагрузку от плиты перекрытия, лежащей на самой балке. Балка опирается в заделки кирпичных стен, которые заполнены раствором, препятствующим перемещению балки в заделках (рис. 2.16).

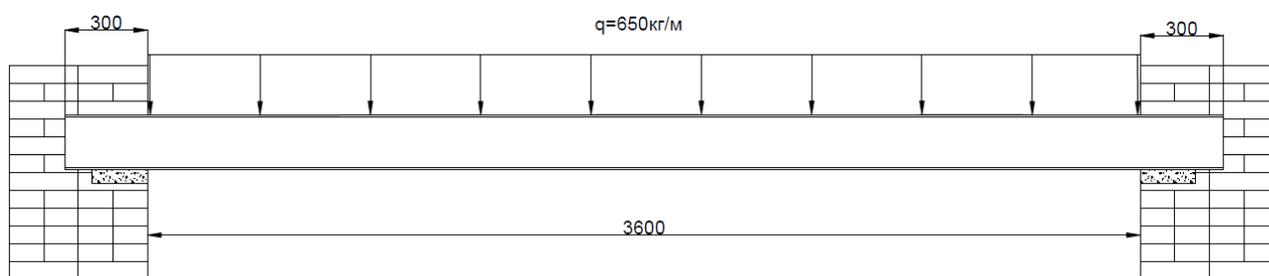


Рис. 2.16. Балка двутаврового сечения в перекрытии с воздействующей на нее нагрузкой

2.5.1. Исходные данные

Балка стандартного прокатного двутаврового сечения 20Б1, характеристики, принятые в соответствии с ГОСТ 57837 [10], представлены в таблице 2.21.

Таблица 2.21. Характеристики двутавра, указанные в ГОСТ Р 57837 [10]

Номинальные размеры, мм					Номинальная площадь поперечного, сечения $F_n, \text{см}^2$	Справочные значения величин для осей			
h	b	s	t	r		$I_x, \text{см}^4$	$W_x, \text{см}^3$	$I_y, \text{см}^4$	$W_y, \text{см}^3$
200	100	5,5	8,0	11	27,16	1844,26	184,4	133,91	26,78

Общая длина балки 4 200 мм, при этом часть балки погружена в заделки по обеим сторонам, защемляя её и ограничивая какое-либо перемещение или вращение относительно точек опоры. В расчете используется длина участка между опорами без участков заделок.

Длина нагруженной части балки $l = 4\ 200 - 300 \cdot 2 = 3\ 600 \text{ мм} = 360 \text{ см}$.

Усилие распределенной нагрузки $q = 650 \text{ кг/м} = 6,5 \text{ кг/см}$.

$W = 184,4 \text{ см}^3$

Толщина полки двутаврового проката из стали С235 составляет $t = 8 \text{ мм}$, в соответствии с ГОСТ 27772 [11] предел текучести составляет $R_{yn} = 235 \text{ МПа} = 2\ 396,33 \text{ кг/см}^2$.

2.5.2. Прочностной расчет

Балка перекрытия, являющаяся опорой для плиты перекрытия представляет собой изгибаемую стальную конструкцию, которая теряет несущую способность при нагреве в результате снижения предела текучести стали до рабочих напряжений в сечении конструкции.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

С учетом заземления балки перекрытия с 2-х сторон расчет максимального момента выполняется по формуле (6):

$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{12} = \frac{6,5 \cdot 360^2}{12} = 70\,200 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Для изгибаемой конструкции температурный коэффициент снижения предела текучести стали определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{yT}} = \frac{70\,200}{184,4 \cdot 2\,396,33} = 0,159$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей в СТО АРСС 11251254.001-022-1 [20] из стали С235 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.22. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	650	0,340
650		700	0,200
700		700	0,159

Критическая температура элемента конструкции двутаврового сечения 20Б1 составит $t_{кр} = 700,0 \text{ °С}$ ($973,0 \text{ К}$).

2.5.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Так как сверху на балку уложена плита перекрытия и примыкает она к балке по всей плоскости, исключая тем самым обогрев по верхней полке в случае пожара, то периметр обогрева конструкции принимается с трех сторон (3-х сторонний обогрев).

Используя данные о номинальных размерах (табл. 2.19) периметр обогрева конструкции определяется по формуле, представленной в таблице 1.1:

$$\Pi = 3 \cdot b + 2 \cdot h + 2 \cdot s = 3 \cdot 100 + 2 \cdot 200 + 2 \cdot 5,5 = 689 \text{ мм}$$

Приведённая толщина металла определяется по формуле (18):

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{2\,716}{689} = 3,9 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщиной металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.23.

Таблица 2.23. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 3,9 мм	ПТМ 5,0 мм
730	17,7	18,7	20,0
700,0	15,7	16,8	18,1
630	11,1	12,3	13,7

Собственный (фактический) предел огнестойкости элемента конструкции двутаврового сечения с $\delta_{пр} = 3,9$ мм для $t_{кр} = 700,0$ °С (973,0 К) составит $P_{ф} = 16,8$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис. 2.17.

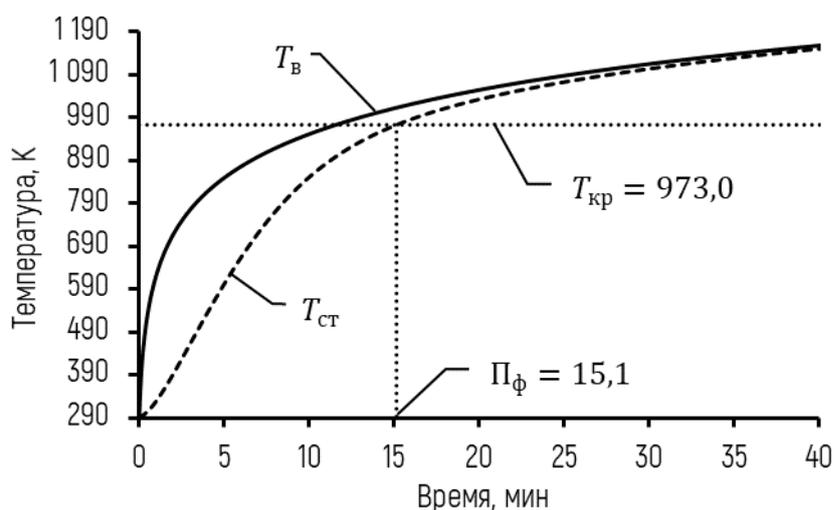


Рис. 2.17. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 3,9$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры 973,0 К (700,0 °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 3,9$ мм составляет $P_{ф} = 15,1$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет не более 9,8 % (менее 99 с).

Для рассматриваемого элемента конструкции - двутаврового сечения, заземленного с двух сторон, с распределенной нагрузкой $q = 650$ кг/м при 3-х стороннем обогреве, предел огнестойкости составляет R15. Результаты расчетов представлены в таблице 2.24.

Таблица 2.24. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Балка 20Б1	3,9	700,0	R15	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1

2.6. Пример VI. Балка с защемлением с одного конца.

Распределенная нагрузка

Балка, являющаяся опорой для настила перекрытия антресоли, лежащего на ней. Воспринимает расчетную распределенную нагрузку (q) конструкции, включающую в себя конструкцию перекрытия и полезную нагрузку. Балка закреплена через закладную деталь в стене, исключая перемещение или вращение балки в какой-либо плоскости (рис. 2.18).

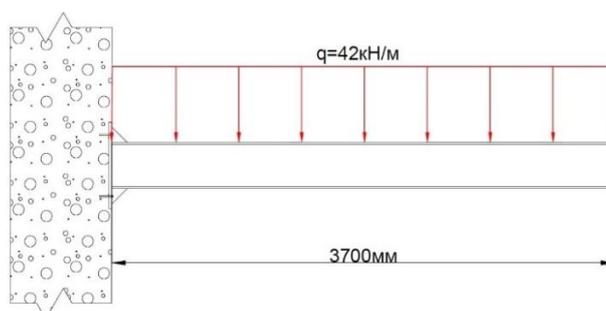


Рис. 2.18. Балка антресоли под расчетной нагрузкой

2.6.1. Исходные данные

Балка стандартного сварного двутаврового сечения 35Ш2С по ГОСТ Р 58966 [17]. Толщина полки двутаврового сечения из стали С375 составляет $t = 14$ мм предел текучести составляет $R_{yn} = 355$ МПа = 3 619,99 кг/см². Длина балки $l = 3\ 700$ мм. Усилие расчетной распределенной нагрузки $q = 42$ кН/м.

Таблица 2.25. Характеристики двутавра, указанные в ГОСТ Р 58966 [17]

Номинальные размеры, мм				Номинальная площадь поперечного, сечения F_n , см ²	Справочные значения величин для осей	
h	b	s	t		W_x , см ³	W_y , см ³
340	250	10	14	101,20	1243,57	291,87

2.6.2. Прочностной расчет

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Максимальный изгибающий момент от равномерно распределённой нагрузки для консольной балки с защемлением с одной стороны находится по формуле (7):

$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{2} = \frac{420 \cdot 370^2}{2} = 28\,749\,000 \text{ Н} \cdot \text{см} = 2\,931\,582,14 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{уп}} = \frac{2\,931\,582,14}{1\,243,57 \cdot 3\,619,99} = 0,651$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С375 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.26. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	400,0	0,700
650		448,8	0,651
700		450,0	0,650

Критическая температура балки стандартного сварного двутаврового сечения 35Ш2С составит $t_{кр} = 448,8 \text{ °С}$ (721,8 К).

2.6.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

На рисунке 2.15 не отображена конструкция перекрытия антресоли, установленного по верхней грани двутавра, в данном расчете примем его как негорючую конструкцию, исключаящую обогрев балки со стороны примыкания.

Периметр обогрева конструкции двутаврового сечения определяется по формулам, представленные в таблице 1.1:

$$P = 3 \cdot b + 2 \cdot h + 2 \cdot s = 3 \cdot 250 + 2 \cdot 340 + 2 \cdot 10 = 1\,450,0 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла, вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{P} = \frac{10\,120}{1\,450} = 7,0 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщиной металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.27.

Таблица 2.27. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 5,0 мм	ПТМ 7,0 мм	ПТМ 10,0 мм
500,0	9,5	11,5	14,4
448,8	8,7	10,1	12,8
400,0	7,3	8,9	11,2

Исходя из полученных значений собственный (фактический) предел огнестойкости колонны 35Ш2С с $\delta_{\text{пр}} = 7,0$ мм для $t_{\text{кр}} = 448,8$ °С (721,8 К) составит $P_{\text{ф}} = 10,1$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис. 2.19.

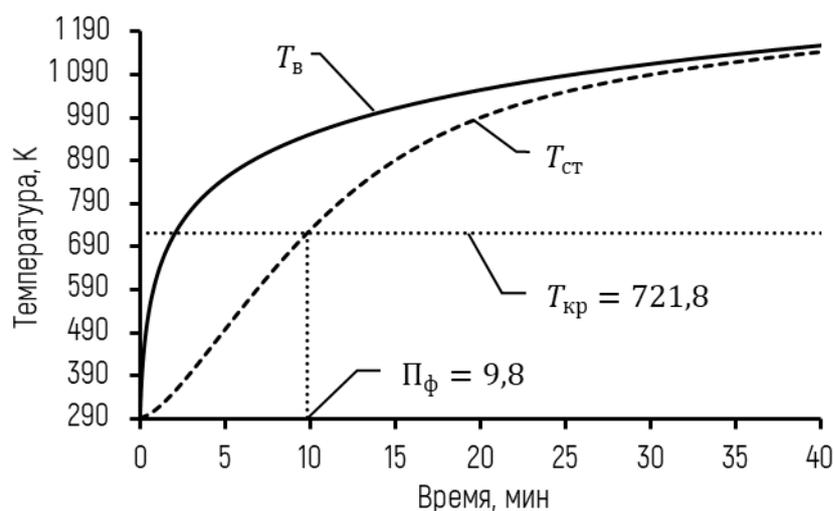


Рис. 2.19. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 7,0$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 721,8$ К ($448,8$ °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 7,0$ мм составляет $P_{ф} = 9,8$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет не более 2,9 % (менее 18 с).

Для рассматриваемого элемента конструкции - двутаврового сечения, защемленного с одной стороны, с распределенной нагрузкой $q = 42$ кН/м при 3-х стороннем обогреве, предел огнестойкости составляет R10. Результаты расчетов представлены в табл. 2.28.

Таблица 2.28. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Балка 35Ш2С	7,0	448,8	R9	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1

2.7. Пример VII. Консольная балка с защемлением с одного конца.

Сосредоточенная сила

Балка, являющаяся опорой для мостика между конструкциями, закреплена через болтовое соединение к другой металлоконструкции, образуя тем самым соединение, ограничивающее перемещение или вращение балки в каком-либо направлении. Расчетная распределенная нагрузка на конструкцию, включающую в себя массу мостика и полезную нагрузку, составляет 750 кг (рис. 2.20).

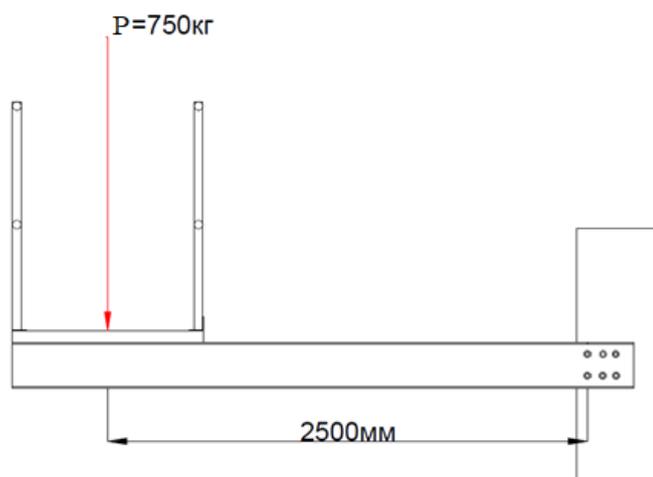


Рис. 2.20. Балка мостика под расчетной нагрузкой

2.7.1. Исходные данные

Балка стандартного прокатного швеллерного сечения 24П по ГОСТ 8240 [13]. Толщина полки двутаврового проката из стали С255 составляет $t = 10$ мм, в соответствии с ГОСТ 27772 [11] предел текучести составляет $R_{yn} = 255$ МПа = 2 600,28 кг/см².

Длина балки 3 000 мм. Мостик, шириной 1 000 мм, установлен на балке на расстоянии 2 000 мм от точки крепления балки к конструкции.

$a = 2 500$ мм = 250 см - расстояние, на котором приложено усилие $N_n = P$ от края закрепления консольной балки.

Таблица 2.29. Характеристики швеллера, указаны в таблице 2 ГОСТ 8240 [13]

Номинальные размеры, мм				Номинальная площадь поперечного сечения F_n , см ²	Справочные значения величин для осей	
h	b	s	t		W_x , см ³	W_y , см ³
240	90	5,6	10	30,60	193,0	31,00

2.7.2. Прочностной расчет

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Максимальный изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки для консольной балки с заземлением с одной стороны находится по формуле (15):

$$M_n = N_n \cdot a = 750 \cdot 250 = 187\,500 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{yT}} = \frac{187\,500}{193 \cdot 2\,600,28} = 0,374$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С255 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.30. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	600,0	0,450
650		634,7	0,374
700		650,0	0,340

Критическая температура балки стандартного прокатного швеллерного сечения 24П составит $t_{кр} = 634,7 \text{ °С}$ ($907,7 \text{ К}$).

2.7.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Периметр обогрева конструкции двутаврового сечения определяется по формулам, представленным в таблице 1.1:

$$\Pi = 4 \cdot b + 2 \cdot h - 2 \cdot s = 4 \cdot 90 + 2 \cdot 240 - 2 \cdot 5,6 = 828,8 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла, вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{3\,060}{828,8} = 3,7 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.31.

Таблица 2.31. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 3,7 мм	ПТМ 5,0 мм
700,0	15,3	16,2	17,9
634,7	11,8	12,7	14,4
600,0	10,0	10,9	12,5

Исходя из полученных значений собственный (фактический) предел огнестойкости балки стандартного прокатного швеллерного сечения 24П с $\delta_{\text{пр}} = 3,7$ мм для $t_{\text{кр}} = 634,7$ °С (907,7 К) составит $\Pi_{\text{ф}} = 12,7$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела

огнестойкости расчётным методом. Результаты расчетов представлены на рис.2.21.

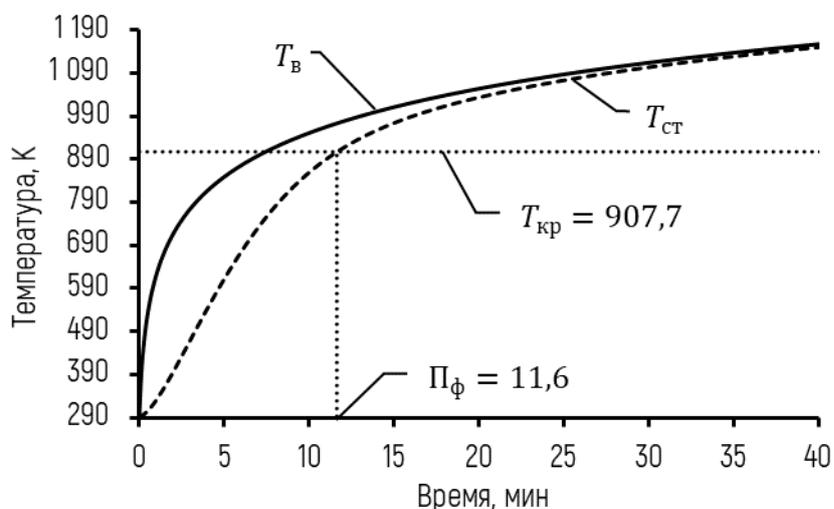


Рис. 2.21. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{\text{ст}}$) для $\delta_{\text{пр}} = 3,7$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{\text{кр}} = 907,7$ К ($634,7$ °С) условным образцом с $\delta_{\text{пр}} = 3,7$ мм составляет $P_{\text{ф}} = 11,6$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет не более 8,5 % (менее 65 с).

Для рассматриваемого элемента конструкции - прокатного швеллерного сечения с нагрузкой $N_n = 750$ кг при 4-х стороннем обогреве, предел огнестойкости составляет R12. Результаты расчетов представлены в таблице 2.32.

Таблица 2.32. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Балка 24П	3,7	634,7	R11	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1

2.8. Пример VIII. Сжатие с изгибом. Сосредоточенная нагрузка

Вертикальная опора трубопровода (Опора) с жестко закреплённой горизонтальной опорной балкой (Балка) для установки на неё трубопровода, создающего сосредоточенную нагрузку равную 2 000 кг (рис. 2.22).

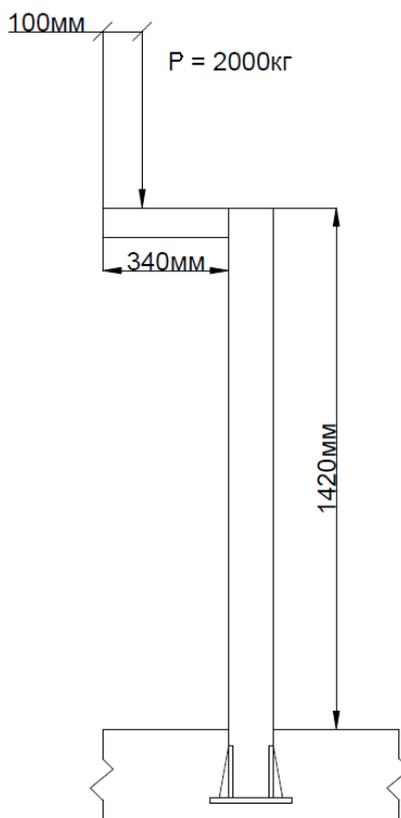


Рис. 2.22. Конструкция опоры

2.8.1. Исходные данные

Опора выполнена из профиля квадратного сечения по ГОСТ 30245 [14] 120x80x5 мм общей длиной 1 600 мм, нижняя часть опоры вместе с монтажной опорой замоноличена на 180 мм.

Балка выполнена из профиля квадратного сечения по ГОСТ 30245 [14] 80x80x5 мм общей длиной 340 мм, трубопровод, создающий нагрузку на расстоянии 240 мм от узла примыкания балки к опоре. Соединение металлоконструкций неразъемное без шарниров. $N_n = P = 2\,000$ кг. $E_n = 2\,100\,000$ кг/см².

$a = 240$ мм = 24 см - расстояние, на котором приложено усилие N_n от края закрепления консольной балки.

Профили стандартного прокатного сечения 80x80x5 и 120x80x5 по ГОСТ 30245 [14]. Прокат из стали С275 толщиной $t = 5$ мм, предел текучести составляет $R_{yn} = 275 \text{ МПа} = 2\,804,22 \text{ кг/см}^2$.

Таблица 2.33. Характеристики замкнутой сварной трубы сечением 80x80x5 и 120x80x5, указанные в ГОСТ 30245 [14]

Наименование элемента	Номинальные размеры, мм			Площадь поперечного, сечения $F, \text{ см}^2$	Справочные значения величин для осей			
					x-x		y-y	
	h	b	t		$I_x, \text{ см}^4$	$W_x, \text{ см}^3$	$I_y, \text{ см}^4$	$W_y, \text{ см}^3$
Балка	80	80	5	14,36	131,3 0	32,83	131,30	32,83
Опора	120	80	5	18,36	353,0	58,84	187,6	46,89

2.8.2. Прочностной расчет

В данной конструкции одновременно подвергаются нагрузке 2 элемента, за счет жесткого соединения балки с опорой одновременно создается изгибающее усилие на опору в виде момента от приложенной силы и усилия сжатия (со смещением).

Предельным состоянием всей конструкции будет наименьшее время нагрева до критической температуры одного из элементов. В этом случае нагрузкой от собственного веса балок пренебрегают для упрощения расчета.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Первый элемент (Балка 80x80x5)

Максимальный изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки для консольной балки с заземлением с одной стороны находится по формуле (15):

$$M_n = N_n \cdot a = 2\,000 \cdot 0,24 = 480 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 48\,000,0 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{yn}} = \frac{48\,000}{32,83 \cdot 2\,804,22} = 0,521$$

Второй элемент (Опора 120x80x5)

Основная опора испытывает нагрузку изгибающего момента 48 000 кг·см и нагрузку сжатия 2 000 кг, передаваемые от балки под нагрузкой от трубопровода.

Для данной сжато-изогнутой опоры коэффициент γ_T определяется суммированием формул для внецентренно-сжатой конструкции (3) и изгибаемой конструкции (4). Коэффициент γ_e не рассчитывается.

Эксцентриситет приложения силы сжатия $e = 6$ см (примыкание к трубе 120x80x5 по ширине 80 мм, соответственно приложение силы происходит на расстоянии $120/2 = 60$ мм от центра сечения).

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при внецентренном растяжении (сжатии) определяется по формуле (3):

$$\gamma_{T(\text{внецентр.})} = \frac{N_n}{R_{yn}} \cdot \left(\frac{e}{W} + \frac{1}{F} \right) = \frac{2\,000}{2\,804,22} \cdot \left(\frac{6}{58,84} + \frac{1}{18,36} \right) = 0,112$$

Для изгибаемой конструкции балки расчет выполняется по (4):

$$\gamma_{T(\text{изгиб})} = \frac{M_n}{W \cdot R_{уп}} = \frac{48\,000}{58,84 \cdot 2\,804,22} = 0,291$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали для сжато-изгибаемой конструкции составит:

$$\gamma_T = \gamma_{T(\text{внецентр.})} + \gamma_{T(\text{изгиб})} = 0,112 + 0,291 = 0,402$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С275 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Сталь 275 относится сталям обычной прочности, не смотря на отсутствие её коэффициентов в таблице, следует ориентироваться на коэффициенты для сталей С235, С245, С255.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.34. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	550,0	0,540
650		560,3	0,521
700		600,0	0,450

Таблица 2.35. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для внецентренно-сжатого (сжато-изгибаемого) элемента не определяется	600,0	0,450
650		621,6	0,402
700		650,0	0,340

Критическая температура балки сечением 80x80x5мм является значение $t_{кр} = 560,3$ °С (833,3 К), а для опоры сечением 120x80x5 критической температурой является $t_{кр} = 621,6$ °С (894,6 К).

2.8.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Несмотря на то, что на конструкцию опорной балки установлено оборудование, оно примыкает лишь в незначительной части, не препятствуя обогреву балки вдоль всего сечения. Колонна также не примыкает ни к какой рядом стоящей конструкции, исключаяющей обогрев какой-либо из сторон в случае пожара. Соответственно периметр обогрева элементов конструкции принимается со всех сторон (4-х сторонний обогрев).

Используя данные о номинальных размерах, указанных в таблице 2.33, рассчитывается периметр обогрева конструкции квадратного сечения, который определяется по формуле, представленной в таблице 1.1:

$$P_{80 \times 80 \times 5} = 2 \cdot b + 2 \cdot h = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 80 = 320 \text{ мм}$$

$$P_{120 \times 80 \times 5} = 2 \cdot b + 2 \cdot h = 2 \cdot 120 + 2 \cdot 80 = 400 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла определяется по формуле (18):

$$\delta_{\text{пр } 80 \times 80 \times 5} = \frac{F}{P} = \frac{1\,436}{320} = 4,5 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{пр } 120 \times 80 \times 5} = \frac{F}{P} = \frac{1\,836}{400} = 4,6 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.36 и 2.37.

Таблица 2.36. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 4,5 мм	ПТМ 5,0 мм
600,0	10,0	11,9	12,5
560,3	8,9	10,7	11,3
500,0	7,3	8,9	9,5

Таблица 2.37. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 4,6 мм	ПТМ 5,0 мм
600,0	10,0	12,0	12,5
621,6	10,6	12,6	13,1
500,0	7,3	9,0	9,5

Исходя из полученных значений собственный (фактический) предел огнестойкости балки сечением 80x80x5 мм с $\delta_{пр} = 4,5$ мм для $t_{кр} = 560,3$ °C (833,3 К) составит $P_{\phi} = 10,7$ мин и опоры сечением 120x80x5 мм с $\delta_{пр} = 4,6$ мм для $t_{кр} = 621,6$ °C (894,6 К) составит $P_{\phi} = 12,6$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис. 2.23. и 2.24.

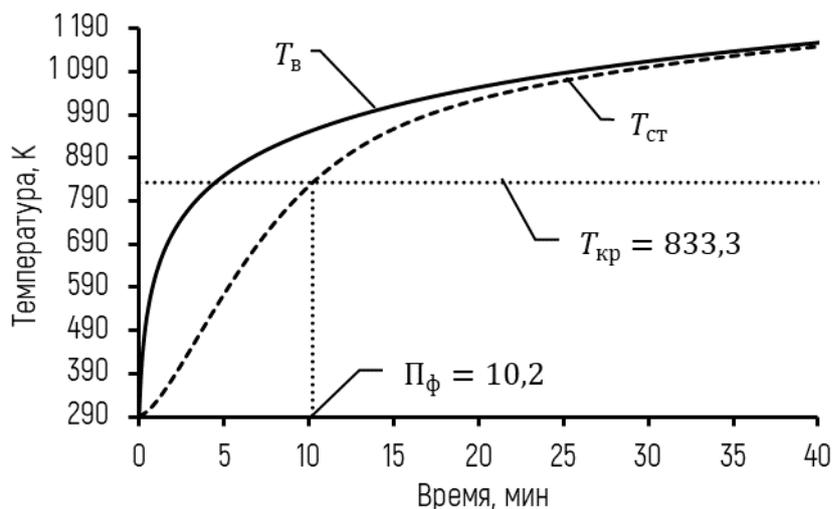


Рис. 2.23. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 4,5$ мм от времени

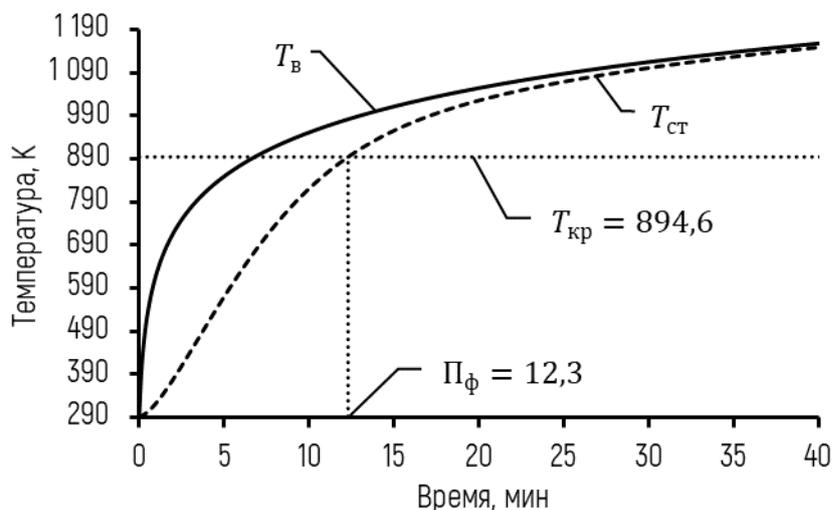


Рис. 2.24. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 4,6$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 833,3$ К ($560,3$ °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 4,5$ мм составляет $P_{ф} = 10,2$ мин и $T_{кр} = 894,6$ К ($621,6$ °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 4,6$ мм составляет $P_{ф} = 12,3$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет для первого элемента (балка) не более 4,5 % (менее 29 с) и для второго элемента (опора) не более 2,6 % (менее 19 с).

Для рассматриваемых элементов конструкции с нагрузкой $N_n = 2$ т, при 4-х стороннем обогреве - предел огнестойкости составляет R10 для первого элемента (балка) и R12 для второго элемента (опора). Результаты расчетов представлены в таблице 2.38.

Таблица 2.38. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Собственный предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Балка 80x80x5	4,5	560,3	R10	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1
Опора 120x80x5	4,6	621,6	R12		

2.9. Пример IX. Сжатие с изгибом. Распределенная нагрузка

К опоре площадки межэтажной лестницы жестко закреплена балка площадки лестницы. Опора выполнена из профиля квадратного сечения 160x160x5мм общей длиной 1 800 мм, нижняя часть опоры закреплена в опорную ЖБ плиту через закладную деталь без возможности перемещения в какой-либо из плоскостей. Балка площадки лестницы жестко закреплена на несущей колонне методом сварки. Длина балки площадки – 2 000 мм, балка выполнена из швеллера сечения 18П. Покрытие площадки – железобетонная (ЖБ) плита. Соединение металлоконструкций неразъемное без шарниров. На балку действует расчетная нагрузка, равная $q = 1000$ кг/м (рис. 2.25).

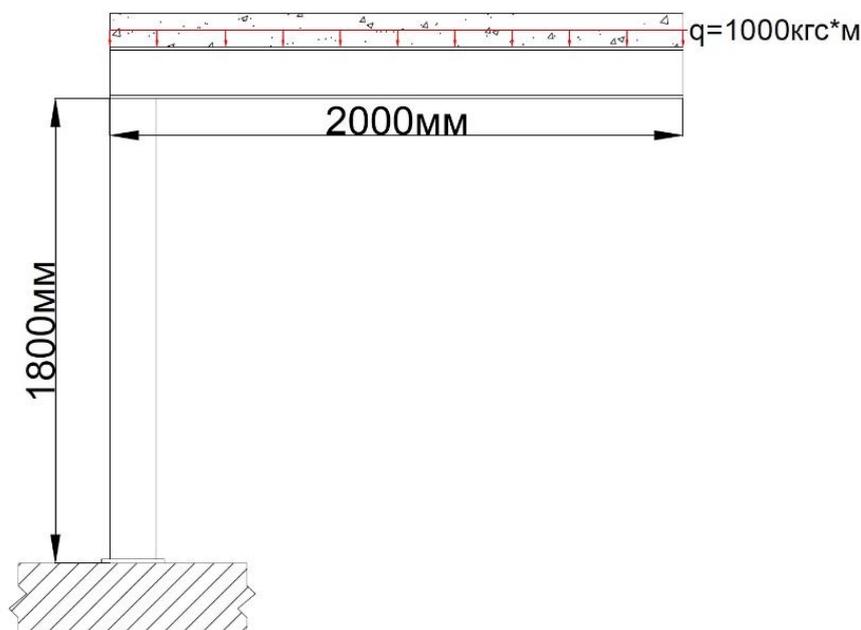


Рис. 2.25. Конструкция площадки лестницы с одной опорой

2.9.1. Исходные данные

Швеллер выполнен из стали С255 по ГОСТ 27772 [11], толщина полки проката составляет $t = 8,7$ мм, предел текучести составляет $R_{yn} = 255$ МПа = 2 600,28 кг/см².

Квадратный профиль выполнен из стали С245 по ГОСТ 27772 [11], толщина проката составляет $t = 5,0$ мм, предел текучести составляет $R_{yn} = 245$ МПа = 2 498,30 кг/см².

$$N_n = q \cdot l = 1000 \cdot 2 = 2\,000 \text{ кг}$$

Таблица 2.39. Характеристики швеллера, указанные в ГОСТ 8240 [13]

Высота, мм	Ширина, мм	Толщина стенки, мм	Площадь поперечного сечения, см ²	Справочные значения величин для осей			
				x-x		y-y	
<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>F</i>	<i>I_x</i> , см ⁴	<i>W_x</i> , см ³	<i>I_y</i> , см ⁴	<i>W_y</i> , см ³
180,0	70,0	8,7	8,7	1090,0	121,0	100,0	20,60

Таблица 2.40. Характеристики квадратного профиля, указанные в ГОСТ 30245 [14]

Высота, мм	Ширина, мм	Толщина стенки, мм	Площадь поперечного сечения, см ²	Справочные значения величин для осей			
				x-x		y-y	
<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>F</i>	<i>I_x</i> , см ⁴	<i>W_x</i> , см ³	<i>I_y</i> , см ⁴	<i>W_y</i> , см ³
160	160	5,0	30,36	1202	150,3	1202	150,3

2.9.2. Прочностной расчет

В данном расчете нагрузками от собственного веса балок и плиты перекрытия пренебрегают для упрощения расчета, считается, что распределенная нагрузка указана с учетом веса самой балки площадки и ЖБ плиты, давящей своим весом.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Максимальный изгибающий момент для консольной балки с заделкой (зашемлением) с одной стороны и без опирания с другой стороны находится по формуле (7):

$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{2} = \frac{1\,000 \cdot 2^2}{2} = 2\,000 \text{ кг} \cdot \text{м} = 200\,000 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе горизонтальной опорной балки (швеллер) определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{уп}} = \frac{200\,000}{121,0 \cdot 2\,600,28} = 0,636$$

Основная опора испытывает нагрузку изгибающего момента 200 000 кг·см и нагрузку сжатия 2 000 кг передаваемые расчетной нагрузкой с учетом длины плиты.

Для сжато-изогнутой опоры коэффициент γ_T определяется суммированием формул для центрально-сжатой конструкции (1) и изгибаемой конструкции (4).

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при внецентренном растяжении (сжатии) определяется по формуле (1):

$$\gamma_{T(\text{сжат.})} = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} = \frac{2\,000}{30,36 \cdot 2\,498,30} = 0,026$$

Для изгибаемой конструкции балки расчет выполняется по (4):

$$\gamma_{T(\text{изгиб})} = \frac{M_n}{W \cdot R_{yn}} = \frac{200\,000}{150,30 \cdot 2\,498,30} = 0,533$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали для сжато-изгибаемой конструкции составит:

$$\gamma_T = \gamma_{T(\text{сжат.})} + \gamma_{T(\text{изгиб})} = 0,026 + 0,533 = 0,559$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С245 и С255, и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.41. Результаты расчета критической температуры стали С245

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	450,0	0,670
650		478,6	0,636
700		500,0	0,610

Таблица 2.42. Результаты расчета критической температуры стали С255

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	500,0	0,610
650		536,4	0,559
700		550,0	0,540

Критическая температура балки швеллерного сечения составит $t_{кр} = 478,6$ °С (751,6 К), а для опоры сечением 160x160x5 составит $t_{кр} = 536,4$ °С (809,4 К).

2.9.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Используя данные из таблицы 2.39 и 2.40, определяется периметр обогрева конструкции по формулам таблицы 1.1.

Периметр обогрева швеллера при 3-х стороннем обогреве составит:

$$P_{18П} = 2 \cdot b + 3 \cdot h - 2 \cdot t = 2 \cdot 180 + 3 \cdot 70 - 2 \cdot 8,7 = 559,8 \text{ мм}$$

Периметр обогрева трубы квадратного сечения при 4-х стороннем обогреве составит:

$$P_{160 \times 160 \times 5} = 2 \cdot b + 2 \cdot h = 2 \cdot 160 + 2 \cdot 160 = 640 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{пр 18П} = \frac{F}{P} = \frac{2070}{320} = 3,7 \text{ мм}$$

$$\delta_{пр 160 \times 160 \times 5} = \frac{F}{P} = \frac{3036}{640} = 4,7 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.43 и 2.44.

Таблица 2.43. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 3,7 мм	ПТМ 5,0 мм
500,0	7,3	8,0	9,5
478,6	6,8	7,6	9,0
400,0	5,3	6,0	7,3

Таблица 2.44. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 4,7 мм	ПТМ 5,0 мм
600,0	10,0	12,2	12,5
536,4	8,3	10,3	10,6
500,0	7,3	9,2	9,5

Исходя из полученных значений время прогрева опоры швеллерного сечения 18П с $\delta_{пр} = 4,7$ мм до температуры $t_{кр} = 536,4$ °С (809,4 К) составит $P_{\phi} = 10,3$ мин и балки сечением 160x160x5 мм с $\delta_{пр} = 3,7$ мм до температуры $t_{кр} = 478,6$ °С (751,6 К) составит $P_{\phi} = 7,6$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис.2.26. и 2.27.

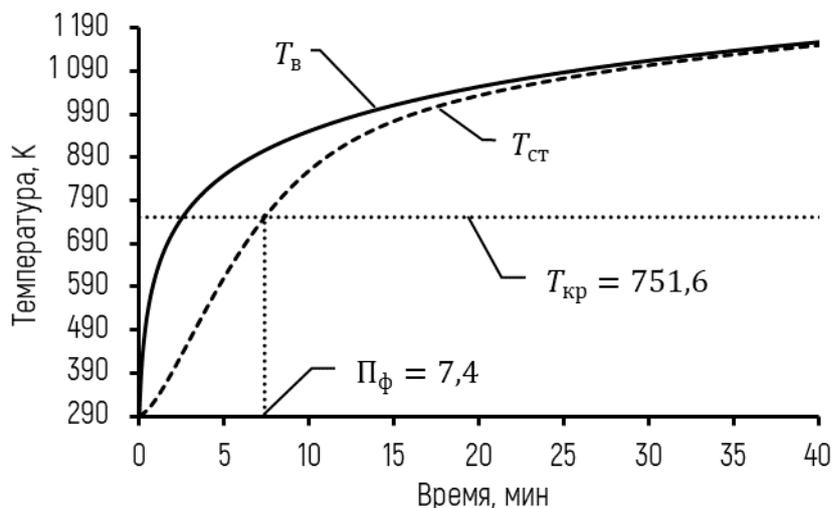


Рис. 2.26. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 3,7$ мм от времени

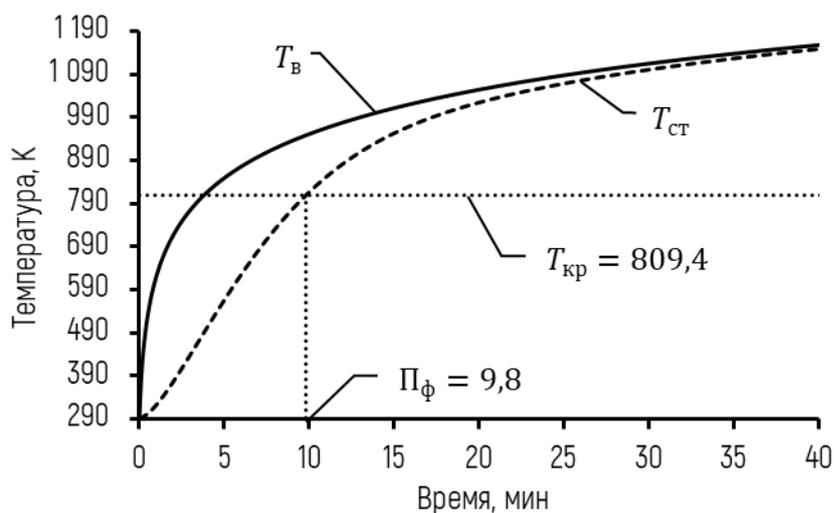


Рис. 2.27. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца (T_{CT}) для $\delta_{пр} = 4,7$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 751,6$ К ($478,6$ °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 3,7$ мм составляет $\Pi_{\phi} = 7,4$ мин и $T_{кр} = 809,4$ К ($536,4$ °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 4,7$ мм составляет $\Pi_{\phi} = 9,8$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет для первого элемента (швеллер) не более 3,0 % (менее 14 с) и для второго элемента (квадрат) не более 4,8 % (менее 30 с).

Для рассматриваемых элементов конструкции с нагрузкой $q = 1\ 000$ кг/м предел огнестойкости составляет R7 для первого элемента (швеллер) и R10 для второго элемента (квадрат). Результаты расчетов представлены в табл. 2.45.

Таблица 2.45. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Собственный предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Швеллер 18П	3,7	478,6	R7	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1
Опора 160x160x5	4,7	536,4	R9		

2.10. Пример X. Растяжение с изгибом. Сосредоточенная нагрузка

Опора транзитного трубопровода из равнополочного уголка расположена ниже основной рамы на 800 мм, спуск опоры выполнен из трубы квадратного сечения длиной 900 мм и закреплен на балке из сварного двутавра длиной 2 000 мм.

Расчетная сосредоточенная нагрузка от транзитного трубопровода на опору составляет 700 кг, точка приложения нагрузки располагается на расстоянии 210 мм от стенки спуска. Все конструкции между собой жестко закреплены методом сварки без шарниров и промежуточных опор. Металлоконструкции спуска и уголка выполнены из стали марки С245, сварная балка 25Б3С выполнена из стали марки С355 (рис. 2.28).

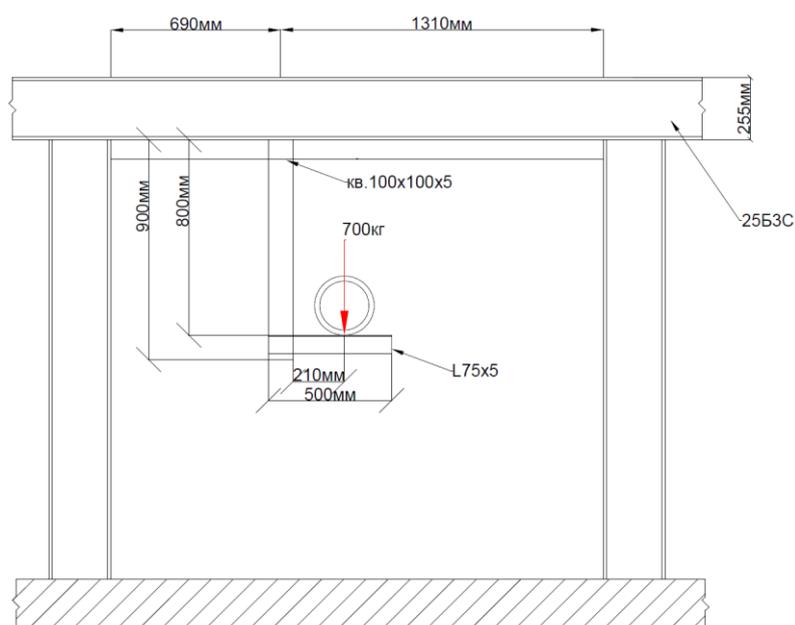


Рис. 2.28. Конструкция опоры трубопровода

2.10.1. Исходные данные

Опора длиной 500 мм транзитного трубопровода из равнополочного уголка 75x5 по ГОСТ 8509 [15] расположена ниже основной рамы на 800 мм, спуск опоры выполнен из трубы квадратного профиля 100x100x5 по ГОСТ 30245 [14] длиной 900 мм и закреплен на сварной балке 25Б3С, выполненной по ГОСТ 58966 [17].

Расчетная сосредоточенная нагрузка от транзитного трубопровода на опору составляет 700 кг, точка приложения нагрузки располагается на расстоянии 210 мм от стенки спуска.

Таблица 2.46. Характеристики равнополочного уголка, указанные в ГОСТ 8509 [15]

Номинальные размеры, мм		Площадь поперечного сечения, см ² <i>F</i>	Справочные значения величин для осей		
<i>b</i>	<i>t</i>		x-x (y-y)		
			<i>I_{x(y)}</i> , см ⁴	<i>W_{x(y)}</i> , см ³	<i>i_{x(y)}</i> , см
75,0	7,0	10,15	53,34	9,89	2,29

Таблица 2.47. Характеристики профиля квадратного сечения, указанные в ГОСТ 30245 [14]

Высота, мм	Ширина, мм	Толщина стенки, мм	Площадь поперечного сечения, см ² <i>F</i>	Справочные значения величин для осей			
				x-x		y-y	
<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t</i>		<i>I_x</i> , см ⁴	<i>W_x</i> , см ³	<i>I_y</i> , см ⁴	<i>W_y</i> , см ³
100	100	5,0	18,36	270,9	54,19	270,9	54,19

Таблица 2.48. Характеристики сварного двутавра, указанные в ГОСТ 58966 [17]

Высота, мм	Ширина, мм	Толщина на полки, мм	Толщина на стенки, мм	Площадь поперечного сечения, см ² <i>F</i>	Справочные значения величин для осей			
					x-x		y-y	
<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>s</i>		<i>I_x</i> , см ⁴	<i>W_x</i> , см ³	<i>I_y</i> , см ⁴	<i>W_y</i> , см ³
255	126	12,0	8,0	48,72	5289,49	414,86	401,06	63,66

2.10.2. Прочностной расчет

В данном расчете нагрузками от собственного веса конструкций пренебрегают для упрощения расчета, считается, что указанная конструкторами сосредоточенная нагрузка дана с учетом веса всех конструкций.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Предел текучести для стали С245 согласно условиям ГОСТ 27772 [11], составляет $R_{yn} = 245 \text{ МПа} = 2\,498,30 \text{ кг/см}^2$.

Нагрузка растяжения, передаваемая от опоры $N_n = 700 \text{ кг}$.

Максимальный изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки для консольной балки с заземлением с одной стороны находится по формуле (15):

$$M_n = N_n \cdot a = 700 \cdot 0,21 = 147 \text{ кг} \cdot \text{м} = 14\,700,0 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе горизонтальной опоры (уголок) определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{yII}} = \frac{14\,700}{9,89 \cdot 2\,498,30} = 0,595$$

Конструкция спуска испытывает нагрузку изгибающего момента $M_n = 14\,700 \text{ кг} \cdot \text{см}$ и нагрузку растяжения $N_n = 700 \text{ кг}$, передаваемые от опоры.

Для данной растянуто-изогнутой конструкции спуска коэффициент γ_T определяется суммированием формул для внецентренно-растянутой конструкции (3) и изгибаемой конструкции (4). Для примера посчитаем как внецентренно-растянутую конструкцию, усилие растяжения считаем приложенным с эксцентриситетом $e = 50 \text{ мм} = 5,0 \text{ см}$.

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при внецентренном растяжении (сжатии) определяется по формуле (3):

$$\gamma_{T(\text{раст.})} = \frac{N_n}{R_{yn}} \cdot \left(\frac{e}{W} + \frac{1}{F} \right) = \frac{700}{2\,498,30} \cdot \left(\frac{5}{54,19} + \frac{1}{18,36} \right) = 0,041$$

Для изгибаемой конструкции балки расчет выполняется по (4):

$$\gamma_{T(\text{изгиб})} = \frac{M_n}{W \cdot R_{yII}} = \frac{14\,700}{54,19 \cdot 2\,498,30} = 0,109$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали для сжато-изгибаемой конструкции составит:

$$\gamma_T = \gamma_{T(\text{раст.})} + \gamma_{T(\text{изгиб})} = 0,041 + 0,109 = 0,150$$

Балка, к которой закреплен спуск, испытывает сосредоточенную нагрузку в точке крепления спуска, равную 700 кг, кроме этого значения нагрузка дополняется весом спуска и горизонтальной опоры.

Масса 1пм трубы кв.100x100x5 составляет 14,41 кг, соответственно $0,9 \times 14,41 = 12,97$ кг, масса 1пм профиля уг.75x5 составляет 7,96 кг, соответственно $0,5 \times 7,96 = 3,98$ кг, общая сосредоточенная нагрузка на балку составит $N_n = 12,97 + 3,98 + 700 = 716,95$ кг.

Максимальный изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки для балки с сосредоточенной нагрузкой на неравном расстоянии от точек опор определяется по формуле (11):

$$M_n = \frac{N_n \cdot a \cdot b^2}{l^2} = \frac{716,95 \cdot 69 \cdot 131^2}{200^2} = \frac{848\,946\,947,55}{40\,000} = 21\,223,67 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

Предел текучести для стали С355 согласно условиям ГОСТ 27772 [11], составляет $R_{yn} = 355 \text{ МПа} = 3\,619,99 \text{ кг/см}^2$.

Для изгибаемой конструкции балки расчет выполняется по (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{yn}} = \frac{21\,223,67}{414,86 \cdot 3\,619,99} = 0,014$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С245 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.49. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	500,0	0,610
650		510,8	0,595
700		550,0	0,540

Таблица 2.50. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для растянуто-изогнутого элемента не определяется	650,0	0,340
650		700,0	0,200
700		700,0	0,150

Таблица 2.51. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	650,0	0,340
650		700,0	0,200
700		700,0	0,014

Критическая температура для опоры из равнополочного уголка 75x75x5 составит $t_{кр} = 700,0$ °С (973,0 К), для спуска из квадратной трубы сечением 100x100x5 $t_{кр} = 510,8$ °С (783,0 К) и для балки из сварного двутавра 25БЗС $t_{кр} = 700,0$ °С (973,0 К).

2.10.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия. Все металлоконструкции обогреваются с 4-х сторон.

Определение приведенной толщины металла

Используя данные из таблицы 2.46 - 2.48, определяется периметр обогрева конструкции по формулам таблицы 1.1.

Периметр обогрева уголка составит:

$$P_{75} = 4 \cdot b = 4 \cdot 75 = 300 \text{ мм}$$

Периметр обогрева трубы квадратного сечения составит:

$$P_{100 \times 100 \times 5} = 2 \cdot b + 2 \cdot h = 2 \cdot 100 + 2 \cdot 100 = 400 \text{ мм}$$

Периметр обогрева сварного двутавра составит:

$$P_{25БЗС} = 4 \cdot b + 2 \cdot h + 2 \cdot s = 4 \cdot 126 + 2 \cdot 255 + 2 \cdot 8 = 998 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла, вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{\text{пр } 75 \times 75 \times 5} = \frac{F}{\Pi} = \frac{1\,015}{300} = 3,4 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{пр } 100 \times 100 \times 5} = \frac{F}{\Pi} = \frac{1\,836}{400} = 4,6 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{пр } 25\text{БЗС}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{4\,872}{998} = 4,9 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.52 - 2.54.

Таблица 2.52. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 3,4 мм	ПТМ 5,0 мм
500,0	7,3	7,7	9,5
510,8	7,5	7,9	9,7
400,0	5,3	5,7	7,3

Таблица 2.53. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 4,6 мм	ПТМ 5,0 мм
730,0	17,7	19,5	20,0
700,0	15,7	17,6	18,1
630,0	11,1	13,2	13,7

Таблица 2.54. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 4,9 мм	ПТМ 5,0 мм
730,0	17,7	19,9	20,0
700,0	15,7	18,0	18,1
630,0	11,1	13,5	13,7

Исходя из полученных значений время прогрева для опоры из равнополочного уголка 75x75x5 с $\delta_{\text{пр}} = 3,4$ мм до температуры $t_{\text{кр}} = 510,8$ °С (783,8 К) составит $P_{\phi} = 7,9$ мин, для спуска из квадратной трубы сечением 100x100x5 с $\delta_{\text{пр}} = 4,6$ мм до температуры $t_{\text{кр}} = 700,0$ °С (973,0 К) составит $P_{\phi} = 17,6$ мин и для балки из сварного двутавра 25БЗС с $\delta_{\text{пр}} = 4,9$ мм до температуры $t_{\text{кр}} = 700,0$ °С (973,0 К) составит $P_{\phi} = 18,0$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис. 2.29 - 2.31.

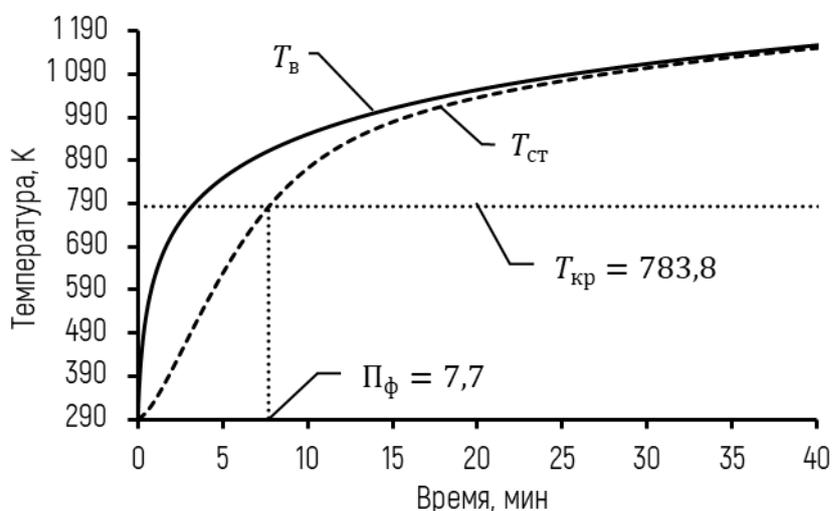


Рис. 2.29. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{\text{ст}}$) для $\delta_{\text{пр}} = 3,4$ мм от времени

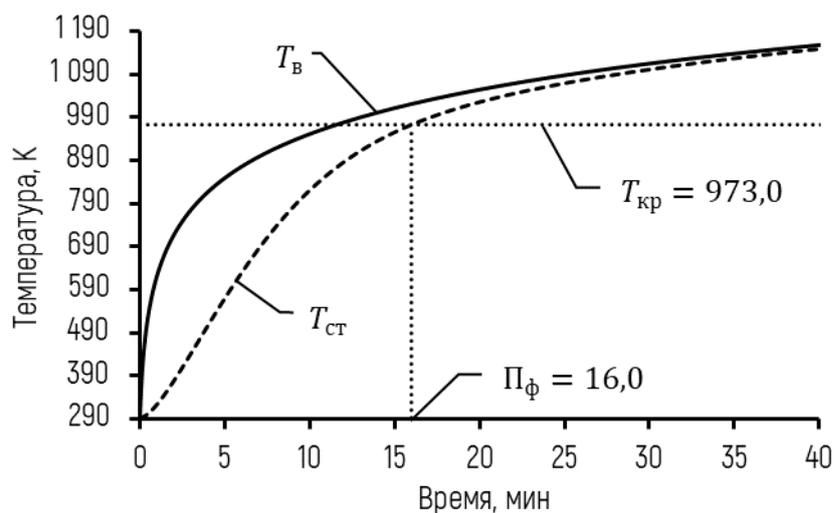


Рис. 2.30. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 4,6$ мм от времени

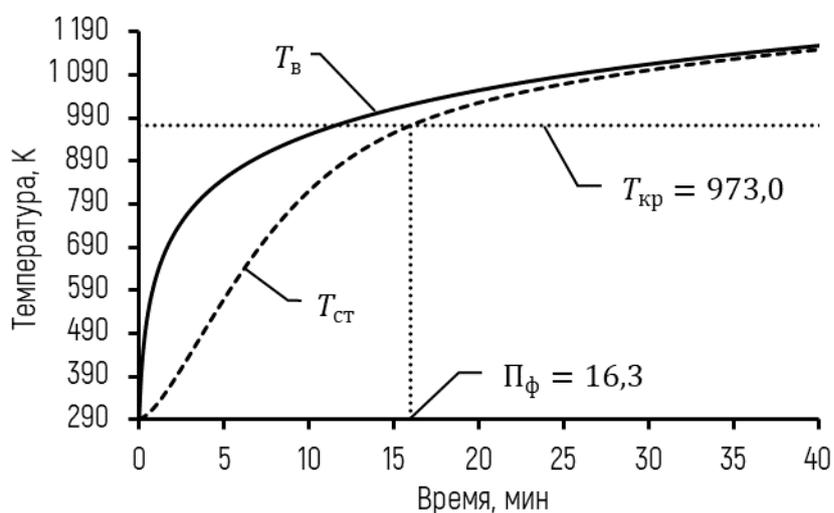


Рис. 2.31. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 4,9$ мм от времени

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет для первого элемента (уголок) не более 2,7 % (менее 13 с), для второго элемента (квадрат) не более 9,3 % (менее 98 с) и для третьего элемента (двутавр) не более 9,1 % (менее 5 с).

Для рассматриваемых элементов конструкции с нагрузкой $N_n = 700$ кг - предел огнестойкости составляет R7 для первого элемента (уголок), R17 для второго

элемента (квадрат) и третьего элементов (двутавр). Результаты расчетов представлены в таблице 2.55.

Таблица 2.55. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Собственный предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Уголок 75х5	3,4	510,8	R7	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1
Труба 100х100х5	4,6	700,0	R17		
Сварной двутавр 25БЗС	4,9	700,0	R17		

2.11. Пример XI. Растяжение с изгибом. Распределенная нагрузка

Опора для короба кабельной линии длиной 1540 мм, выполненная из неравнополочного уголка и опущенная на расстояние 800 мм от основной несущей балки, спуск представляет из себя трубу квадратного сечения длиной 900 мм. Опора удерживает кабельный короб (лоток) шириной 890 мм, распределенная нагрузка от короба составляет $q = 330$ кг/м. Все конструкции между собой жестко закреплены методом сварки, без шарниров и промежуточных опор. Все металлоконструкции выполнены из стали С245 (рис. 2.32).

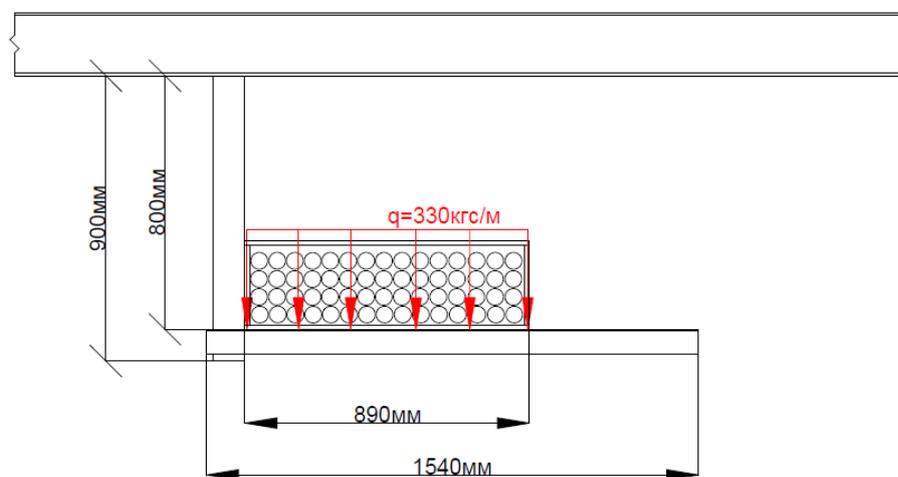


Рис. 2.32. Конструкция опоры кабельного короба

2.11.1. Исходные данные

Опора для короба кабельной линии длиной 1540 мм, выполненная из неравнополочного уголка 100x63x7 по ГОСТ 8510 [16] опущенная на расстояние 800 мм от основной несущей балки, спуск представляет из себя трубу квадратного профиля 100x100x5 по ГОСТ 30245 [14] длиной 900 мм.

Опора удерживает кабельный короб (лоток) шириной $a = 890$ мм = 89 см, распределенная нагрузка от короба составляет 330 кгс/м.

Все конструкции между собой жестко закреплены методом сварки без шарниров и промежуточных опор. Все металлоконструкции выполнены из стали С245 по ГОСТ 27772 [11], предел текучести составляет $R_{yn} = 245$ МПа = 2 498,30 кг/см².

Таблица 2.56. Характеристики неравнополочного уголка указанные в ГОСТ 8510 [16]

Номинальные размеры, мм			Площадь поперечного сечения, см ² <i>F</i>	Справочные значения величин для осей					
				x-x			y-y		
<i>B</i>	<i>b</i>	<i>t</i>		<i>I_x</i> , см ⁴	<i>W_x</i> , см ³	<i>i_x</i> , см	<i>I_y</i> , см ⁴	<i>W_y</i> , см ³	<i>i_y</i> , см
100,0	63,0	10,0	15,47	153,95	23,32	3,15	47,18	9,99	1,75

Таблица 2.57. Характеристики квадратного профиля, указанные в ГОСТ 30245 [14]

Высота, мм	Ширина, мм	Толщина стенки, мм	Площадь поперечного сечения, см ²	Справочные значения величин для осей			
				x-x		y-y	
<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>F</i>	<i>I_x</i> , см ⁴	<i>W_x</i> , см ³	<i>I_y</i> , см ⁴	<i>W_y</i> , см ³
100	100	5,0	18,36	270,9	54,19	270,9	54,19

2.11.2. Прочностной расчет

В данном расчете нагрузками от собственного веса конструкций пренебрегают для упрощения расчета, считается, что указанная конструкторами сосредоточенная нагрузка дана с учетом веса всех конструкций.

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Первый элемент (уголок)

Максимальный изгибающий момент для консольных балок с заделкой с одного конца без опирания с другого находится по формуле (7):

$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{2} = \frac{3,3 \cdot 89^2}{2} = 13\,069,6 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе опоры кабельного короба (уголок) определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{уп}} = \frac{13\,069,65}{23,32 \cdot 2\,498,30} = 0,224$$

Второй элемент (квадрат)

Конструкция спуска испытывает нагрузку изгибающего момента $M_n = 13069,6 \text{ кг} \cdot \text{см}$ и нагрузку растяжения $N_n = q \cdot a = 293,7 \text{ кг}$, передаваемые от опоры.

Для данной растянуто-изогнутой конструкции спуска коэффициент γ_T определяется суммированием формул для центрально-растянутой конструкции (1) и изгибаемой конструкции (4). Коэффициент γ_e не рассчитывается.

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при центрально-растянутой конструкции определяется по формуле (1):

$$\gamma_{T(\text{раст.})} = \frac{N_n}{F \cdot R_{yn}} = \frac{293,7}{18,36 \cdot 2\,498,30} = 0,006$$

Для изгибаемой конструкции балки расчет выполняется по (4):

$$\gamma_{T(\text{изгиб})} = \frac{M_n}{W \cdot R_{yn}} = \frac{13\,069,65}{54,19 \cdot 2\,498,30} = 0,097$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали для растянуто-изогнутой конструкции составит:

$$\gamma_T = \gamma_{T(\text{раст.})} + \gamma_{T(\text{изгиб})} = 0,006 + 0,097 = 0,103$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С245 и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.58. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для изгибаемого элемента не определяется	650,0	0,340
650		691,3	0,224
700		700,0	0,200

Таблица 2.59. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
600	Для растянуто-изгибаемого элемента не определяется	650,0	0,340
650		700,0	0,200
700		700,0	0,103

Критическая температура для опоры из неравнополочного уголка 80x60x5 составит $t_{кр} = 691,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (964,3 К), а для спуска из квадратной трубы сечением 100x100x5 $t_{кр} = 700,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (973,0 К).

2.11.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия. Все металлоконструкции обогреваются с 4-х сторон.

Определение приведенной толщины металла

Используя данные из таблицы 2.56 и 2.57, определяется периметр обогрева конструкции по формулам таблицы 1.1.

Периметр обогрева уголка составит:

$$P_{100 \times 63 \times 5} = 2 \cdot B + 2 \cdot b = 2 \cdot 100 + 2 \cdot 63 = 326 \text{ мм}$$

Периметр обогрева трубы квадратного сечения составит:

$$P_{100 \times 100 \times 5} = 2 \cdot b + 2 \cdot h = 2 \cdot 100 + 2 \cdot 100 = 400 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{пр 100 \times 63 \times 10} = \frac{F}{P} = \frac{1\,547}{326} = 4,7 \text{ мм}$$

$$\delta_{пр 100 \times 100 \times 5} = \frac{F}{P} = \frac{1\,836}{400} = 4,6 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 Приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.60 и 2.61.

Таблица 2.60. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 4,7 мм	ПТМ 5,0 мм
700,0	15,3	17,6	17,9
691,3	14,8	17,1	17,4
600,0	10,0	12,2	12,5

Таблица 2.61. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 3,0 мм	ПТМ 4,6 мм	ПТМ 5,0 мм
730,0	17,7	19,5	20,0
700,0	15,7	17,6	18,1
630,0	11,1	13,2	13,7

Исходя из полученных значений время прогрева для опоры из неравнополочного уголка 100х63х10 с $\delta_{пр} = 4,7$ мм до температуры $t_{кр} = 691,3$ °С (964,3 К) составит $P_{\phi} = 16,3$ мин и для трубы сечением 100х100х5 с $\delta_{пр} = 4,6$ мм до температуры $t_{кр} = 700,0$ °С (973,0 К) составит $P_{\phi} = 17,6$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис. 2.33. и 2.34.

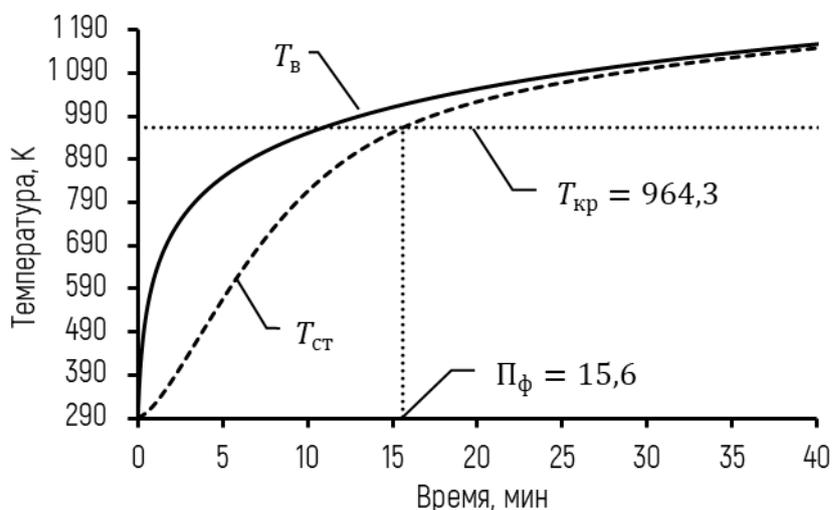


Рис. 2.33. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 4,7$ мм от времени

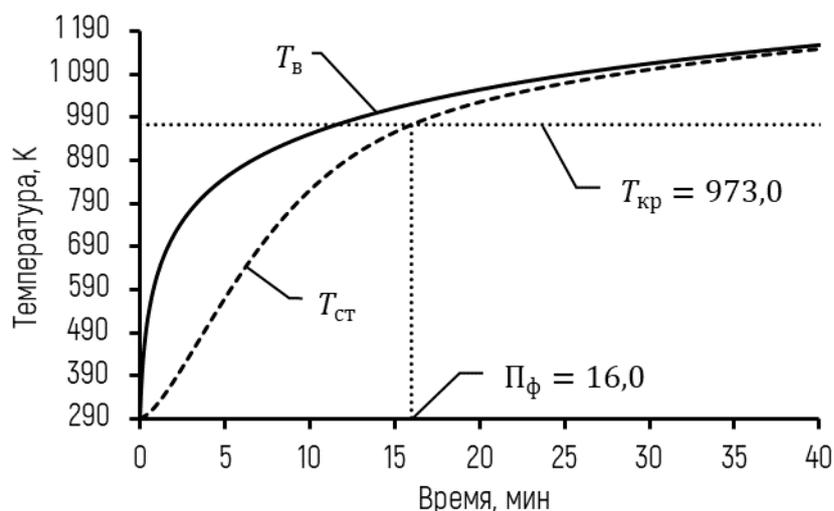


Рис. 2.34. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 4,6$ мм от времени

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет для первого элемента (уголок) не более 8,8 % (менее 90 с) и для второго элемента (квадрат) не более 9,3 % (менее 98 с).

Для рассматриваемых элементов конструкции с нагрузкой $q = 330$ кг/м предел огнестойкости составляет R17 для первого элемента (уголок) и второго элемента (квадрат). Результаты расчетов представлены в таблице 2.62.

Таблица 2.62. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Собственный предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Уголок 100x63x10	4,7	691,3	R15	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1
Труба 100x100x5	4,6	700,0	R16		

2.12. Пример XII. Балка без заземления. Распределенная нагрузка

Несущая балка, являющейся одной из опор для мостового пролета. Воспринимает расчетную распределенную нагрузку от суммы всех нагрузок покрытия полотна (ж/б плита, инженерные сети и асфальтовое полотно), лежащей на самой балке. Балка опирается на железобетонные колонны, перемещение балки ничем не ограничено (рис. 2.35).

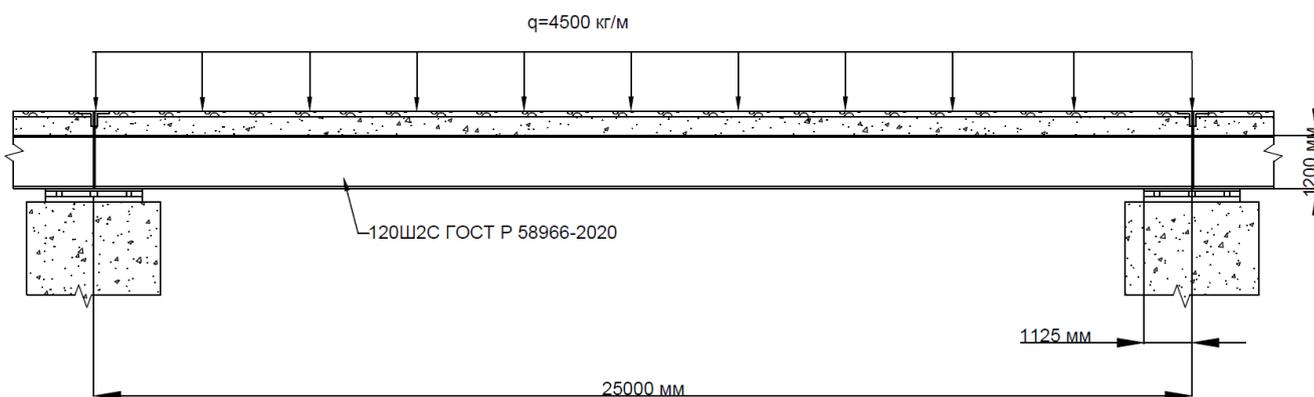


Рис. 2.35. Расположение сварного двутавра 120Ш2С в конструкции мостового пролета и воздействующая на него нагрузка

2.12.1. Исходные данные

Балка стандартного сварного двутаврового сечения 120Ш2С (рис. 2.36) по ГОСТ Р 58966 [17]. В соответствии с ГОСТ 27772 [11] предел текучести стали С355П составляет $R_{yn} = 355 \text{ МПа} = 3\,619,99 \text{ кг/см}^2$. Общая длина балки мостового пролета 25 000 мм, длина опорной площадки, на которую установлена балка составляет 1 125 мм. Соответственно в расчете используется длина участка между опорами и вычисляется длина балки без участка опирания.

$$l = 25\,000 - 1\,125 \cdot 2 = 22\,750 \text{ мм} = 2\,275 \text{ см.}$$

Таблица 2.63. Характеристики сварного двутавра 120Ш2С, указанные в ГОСТ Р 58966 [17]

Номинальные размеры, мм				Номинальная площадь поперечного, сечения $F_n, \text{ см}^2$	Справочные значения величин для осей	
h	b	s	t		$W_x, \text{ см}^3$	$W_y, \text{ см}^3$
1200,0	450,0	14,0	30,0	429,60	18284,28	2026,16

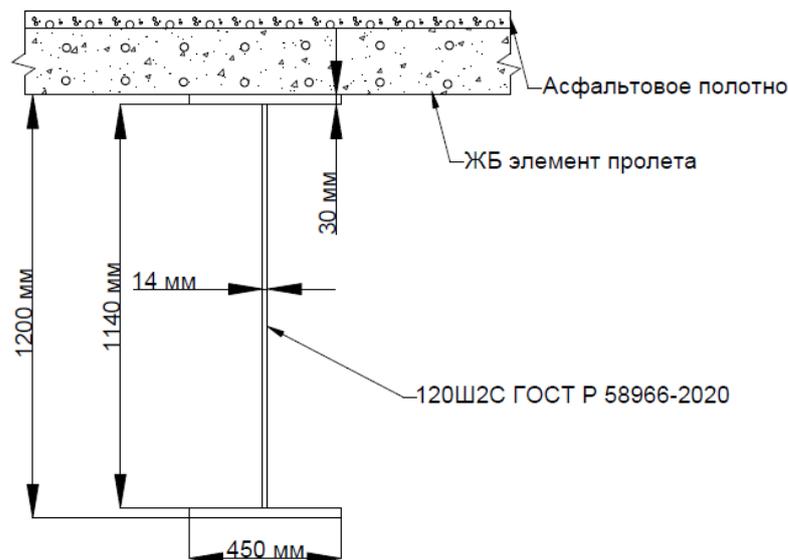


Рис. 2.36. Размеры балки пролета моста с учетом примыкания сверху конструкции моста

2.12.2. Прочностной расчет

Определение температурных коэффициентов снижения прочности стали

Максимальный изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки для балки без защемления находится по формуле (5):

$$M_n = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{45 \cdot 2275^2}{8} = 29\,112\,890,6 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент снижения предела текучести стали при изгибе определяется по формуле (4):

$$\gamma_T = \frac{M_n}{W \cdot R_{yT}} = \frac{29\,112\,890,6}{18\,284,28 \cdot 3\,619,99} = 0,440$$

Определение критической температуры

По таблице А.1 приложения А определяются температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей для стали С355П и устанавливается критическая температура по вычисленным коэффициентам.

Для получения промежуточных значений используется метод линейной интерполяции по примеру П1.1.

Таблица 2.64. Результаты расчета критической температуры стали

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
650	Для изгибаемого элемента не определяется	700	0,470
700		710,8	0,440
750		750	0,330

Критическая температура балки стандартного сварного двутаврового сечения 120Ш2С составит $t_{кр} = 710,8 \text{ °С}$ (983,8 К).

2.12.3. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполняется в соответствии с разделом 1.2. настоящего пособия.

Определение приведенной толщины металла

Периметр обогрева конструкции двутаврового сечения определяется по формулам, представленным в таблице 1.1:

$$\Pi = 3 \cdot b + 2 \cdot h + 2 \cdot s = 3 \cdot 450 + 2 \cdot 1200 + 2 \cdot 14 = 3722 \text{ мм}$$

Приведенная толщина металла вычисляется по формуле (18):

$$\delta_{пр} = \frac{F}{\Pi} = \frac{42960}{3722} = 11,5 \text{ мм}$$

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости по номограмме

Используя рисунок Б.1 приложения Б «Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций» находим необходимое значение, соответствующее найденной критической температуре и вычисленной приведенной толщине металла.

Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры представлены в таблице 2.65.

Таблица 2.65. Результаты расчета времени прогрева конструкции до критической температуры

Температура незащищенной стальной конструкции, °С	Время прогрева конструкции, мин		
	ПТМ 10,0 мм	ПТМ 11,5 мм	ПТМ 15,0 мм
730,0	25,0	26,5	30,0
710,8	23,9	25,4	28,8
630,0	19,4	20,8	23,9

Исходя из полученных значений собственный (фактический) предел огнестойкости балки 120Ш2С с $\delta_{пр} = 11,5$ мм для $t_{кр} = 710,8$ °С (983,8 К) составит $P_{ф} = 25,4$ мин.

Определение собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом

Используя метод, описанный в разделе 1.2.3, свойства стали и расчетный интервал, принятые в разделе 1.2.4, выполняется расчет собственного (фактического) предела огнестойкости расчетным методом. Результаты расчетов представлены на рис.2.37.

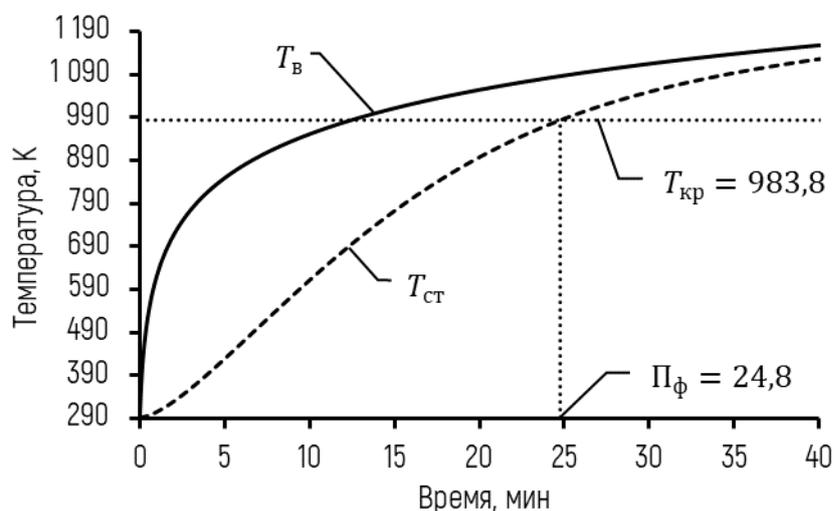


Рис. 2.37. График зависимости температуры при стандартном режиме пожара и температуры образца ($T_{ст}$) для $\delta_{пр} = 11,5$ мм от времени

По результатам расчетного метода время достижения критической температуры $T_{кр} = 983,8$ К (710,8 °С) условным образцом с $\delta_{пр} = 11,5$ мм составляет $P_{ф} = 24,8$ мин.

Выводы

Оценка определения времени прогрева незащищенных конструкций графическим (по номограмме) и расчетным (расчётный метод) способами показывает, что относительное отклонение составляет не более 2,7 % (менее 41 с).

Для рассматриваемого элемента конструкции - балка стандартного сварного двутаврового сечения 120Ш2С с распределенной нагрузкой $q = 45$ кН/м при 3-х стороннем обогреве, предел огнестойкости составляет R25. Результаты расчетов представлены в табл. 2.66.

Таблица 2.66. Ведомость стальных несущих конструкций здания

Шифр конструкции	ПТМ, мм	Критическая температура, °С	Предел огнестойкости	Требуемый предел огнестойкости	Марка и толщина огнезащиты
Балка 120Ш2С	11,5	710,8	R24	Устанавливается в проектной документации	Разработка проекта огнезащиты по СТО АРСС 11251254.001-022-1

БИБЛИОГРАФИЯ

Официальные издания

1. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
2. Свод правил «Конструкции стальные строительные. Правила обеспечения огнестойкости». Проект. Первая редакция. 2023. – 31 с.
3. Свод правил СП 2.13130 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты». 2020. – 32 с.
4. Свод правил СП 477.1325800 «Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности». 2020. – 28 с.
5. Свод правил СП 267.1325800 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования». 2016. – 102 с.
6. ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75) «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования».
7. ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции».
8. ГОСТ Р 53295-2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности».
9. ГОСТ Р 57639-2017 «Пожарно-технический анализ. Валидация и верификация методов расчета».
10. ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия».
11. ГОСТ 27772-2015 «Межгосударственный стандарт. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия».
12. ГОСТ 25577-83 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные».
13. ГОСТ 8240-97 «Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент».
14. ГОСТ 30245-2012 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия».
15. ГОСТ 8509-93 «Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент».

16. ГОСТ 8510-86 «Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. Сортамент».

17. ГОСТ Р 58966 - 2020 «Балки стальные двутавровые сварные. Технические условия».

18. ГОСТ 33228 - 2018 «Трубы стальные сварные общего назначения. Технические условия».

19. СТО АРСС 11251254.001-018-03 (ВНПБ 73-18) «Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок» / Ассоциация развития стального строительства; Д.Г. Пронин, С.А. Тимонин, В.И. Голованов. - Москва: АКЦИОМ ГРАФИКС ЮНИОН, 2018. - 72 с.

20. СТО АРСС 11251254.001-022-1 «Методические рекомендации по разработке проекта огнезащиты стальных конструкций» / Ассоциация развития стального строительства; Авторский коллектив. Под общ. ред. Д.Г. Пронина. - Москва: АКЦИОМ ГРАФИКС ЮНИОН, 2022. - 51 с.

Учебные издания

21. Демехин В.Н. «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре»: Учебник / В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, – М: Москва, Академия ГПС МЧС России, 2003. – 656 с.

22. Пронин Д.Г. «Огнестойкость стальных несущих конструкций»: Пособие / Ассоциация развития стального строительства; Пронин Д.Г. – Москва: АКЦИОМ ГРАФИКС ЮНИОН, 2015. – 52 с.

23. Межецкий Г.Д. «Соппротивление материалов»: Учебник / Г.Д. Межецкий, Г.Г. Загребин, Н.Н. Решетник; под общ. ред. Г.Д. Межецкого, Г.Г. Загребина. - 5-е изд., - М. 2016. – 432 с.

24. Михеев М.А., Михеева И.М. «Основы теплопередачи». Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. – 344 с.

25. Файбищенко В.К. «Металлические конструкции»: Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Стройиздат, 1984. – 336 с.

26. Яковлев А.И. «Расчет огнестойкости строительных конструкций», Москва, Стройиздат, 1988 г. – 143 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица температурных коэффициентов снижения прочности строительных сталей, принятых в соответствии со Сводом правил [2] и СТО АРСС 11251254.001-022-1 [20].

Таблица А.1. Температурные коэффициенты снижения прочности строительных сталей

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_e	Температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T
Стали обычной прочности С235, С245, С255		
20	1,00	1,00
250	1,00	1,00
300	0,94	0,84
350	0,89	0,78
400	0,84	0,72
450	0,79	0,67
500	0,73	0,61
550	0,67	0,54
600	0,59	0,45
650	0,52	0,34
700	0,43	0,20
Стали повышенной прочности (С345, С345К, С355, С355, С355-1, С355-К, С375)		
20	1,00	1,00
250	1,00	1,00
300	0,96	0,84
350	0,92	0,75
400	0,88	0,70
450	0,85	0,65
500	0,81	0,60
550	0,75	0,55
600	0,66	0,46
650	0,53	0,34
700	0,35	0,18
Стали высокой прочности (С390, С390-1, С440, С550, С590)		
20	1,00	1,00
250	1,00	1,00
300	0,95	0,89
350	0,90	0,83
400	0,86	0,79
450	0,82	0,75
500	0,78	0,71
550	0,73	0,66
600	0,68	0,58
650	0,62	0,47
700	0,54	0,32

Огнестойкие стали (С355П, С390П)		
20	1,00	1,00
250	1,00	1,00
300	0,96	0,96
350	0,93	0,95
400	0,90	0,92
450	0,86	0,89
500	0,82	0,83
550	0,77	0,76
600	0,71	0,68
650	0,65	0,58
700	0,58	0,47
750	0,50	0,33
800	0,42	0,20
850	0,33	0,02

Примечания

1 Для сталей высокой прочности (С390, С390-1, С440, С550, С590) температурные коэффициенты снижения механических свойств следует применять после проведения испытаний по ГОСТ 9651 при условии сохранения прочности по пределу текучести при нагреве до 600°С не менее 55% от предела текучести при 20°С. Для сталей высокой прочности, не соответствующих указанным условиям, следует применять коэффициенты как для сталей повышенной прочности.

2 При разработке новых видов огнестойких сталей температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей применяются после проведения испытаний по ГОСТ 9651 по определению физико-механических свойств при повышенных температурах, при условии сохранения прочности по пределу текучести при нагреве до 600°С не менее 60% от предела текучести при 20°С.

3. Для температурных коэффициентов снижения модуля упругости и предела текучести, ниже указанных в таблице значений, для соответствующего вида стали, следует принять максимальное значение температуры нагрева.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций, используемая для определения собственного предела огнестойкости, принятая по СТО АРСС 11251254.001-018-03 [19], представлена на рисунке Б.1.

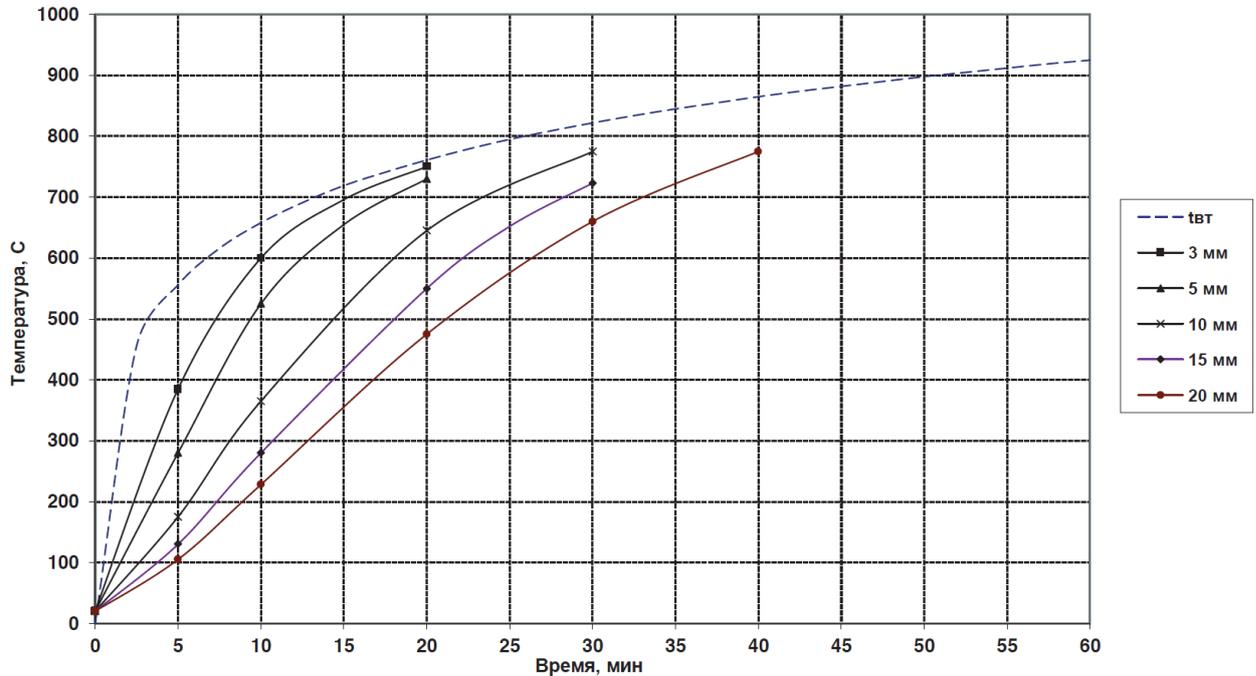


Рис. Б.1. Номограмма прогрева незащищенных стальных конструкций:

t_{BT} — стандартная температурная кривая по ГОСТ 30247.0;

$\delta_{пр}$ — приведенная толщина металла: 3, 5, 10, 15, 20 мм.