



Ассоциация развития  
стального строительства

## **Расчет и проверка сечений ферм**

Версия 1.0

Руководство пользователя

## Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>	
<b>1.</b>	<b><i>Единицы измерения и системы координат</i> .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b><i>Интерфейс пользователя</i> .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Файл проекта .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Главное окно .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Объекты данных модели .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4</b>	<b>Меню Файл.....</b>	<b>7</b>
<b>2.5</b>	<b>Меню Проектирование .....</b>	<b>7</b>
<b>2.6</b>	<b>Меню Вид.....</b>	<b>8</b>
<b>2.7</b>	<b>Меню Вывод.....</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b><i>Задание параметров фермы</i>.....</b>	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b><i>Задание нагрузок</i>.....</b>	<b>11</b>
<b>5.</b>	<b><i>Переход к расчетной модели и выполнение анализа</i> .....</b>	<b>14</b>
<b>6.</b>	<b><i>Список проверок сечений</i>.....</b>	<b>18</b>
<b>6.1.</b>	<b>Проверки двутавровых сечений .....</b>	<b>18</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Центрально-растянутые элементы .....</b>	<b>18</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Центрально сжатые элементы .....</b>	<b>18</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Растянуто-изгибаемые элементы.....</b>	<b>19</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Сжато-изгибаемые (внецентренно-сжатые) элементы.....</b>	<b>20</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Изгибаемые элементы.....</b>	<b>22</b>
<b>6.2</b>	<b>Проверки сечений гнутых профилей и труб .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Центрально-растянутые элементы .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Центрально сжатые элементы .....</b>	<b>24</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Растянуто-изгибаемые элементы.....</b>	<b>25</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Сжато-изгибаемые элементы .....</b>	<b>26</b>
<b>6.2.5</b>	<b>Изгибаемые элементы.....</b>	<b>27</b>
<b>Используемые источники</b>	<b>.....</b>	<b>28</b>

## **Введение**

Программа расчета и проверки сечений ферм позволяет задать параметры для наиболее распространенных видов ферм, назначить сечения для элементов фермы, задать нагрузки, выполнить расчет для нескольких загрузок, получить РСУ и выполнить проверки по СП 16.13330.2017 для всех элементов фермы.

Номенклатура доступных сечений:

- прокатные двутавры с параллельными гранями полок (сортамент ГОСТ Р 57837);
- профили гнутые замкнутые квадратного и прямоугольного сечений (ГОСТ 30245);
- сварные трубы круглого сечения (ГОСТ Р 58064).

## **1. Единицы измерения и системы координат**

В программе используются следующие единицы измерения

- ☐ Длина – м;
- ☐ размеры сечений – мм;
- ☐ сила – кН;
- ☐ изгибающий момент - кН·м;
- ☐ напряжения – МПа.

Параметры и нагрузки фермы задаются в общей системе координат фермы  $XOY_0Z_0$ . Ферма располагается в плоскости  $XOZ_0$ , рис. 1.

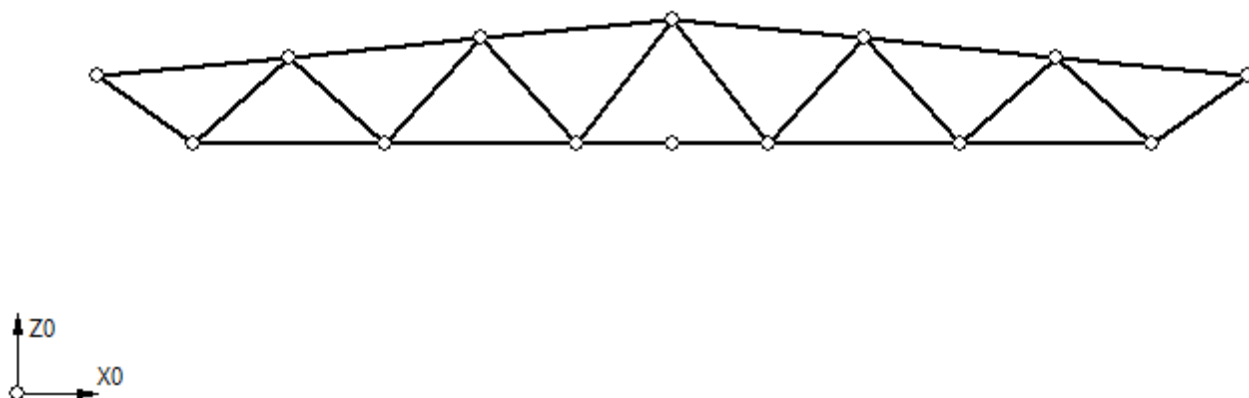


Рисунок 1. Оси общей системы координат

Ось  $X_0$  общей системы координат горизонтальна, ось  $Z_0$  – вертикальна, ось  $Y_0$  дополняет систему до правой системы координат.

Результаты решения и результаты проверок выдаются в местной системе координат элемента фермы  $XYZ$ , рис. 2, в которой ось  $X$  направлена по нормали к оси элемента, и лежит в горизонтальной плоскости  $XOY_0$  фермы, ось  $Y$  направлена по нормали к оси элемента, и лежит в вертикальной плоскости  $XOZ_0$  фермы, ось  $Z$  совпадает с осью элемента.

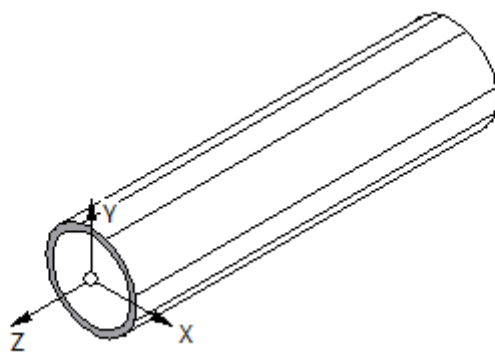


Рисунок 2. Оси местной системы координат элемента фермы

## 2. Интерфейс пользователя

### 2.1 Файл проекта

Набор исходных данных, использованный при расчете фермы, может быть сохранен в виде *Файла проекта*, который имеет расширение “*rwkF*”. Вызов программы может осуществляться щелчком по названию файла проекта.

### 2.2 Главное окно

Все элементы среды моделирования фермы объединяет Главное окно (рис. 3). Главное окно включает в себя Главное меню, Панель команд, Графическое окно, Статусную строку и Окно сообщений.

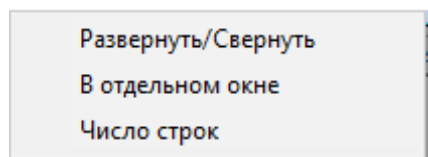
*Главное меню* содержит группы команд – **Файл, Проектирование, Вид, Вывод, Справка**. Каждый пункт сопровождается выпадающим меню со списком команд, некоторые из которых имеют подменю.

*Панель команд* содержит кнопки, дублирующие часто используемые команды Главного меню.

Все кнопки *Панели команд* снабжены подсказками, объясняющими назначение кнопки.

*Графическое окно* служит для отображения расчетной модели. Изображение модели выводится в графическом окне в соответствии с опциями установки, которые запоминаются вместе с моделью.

*Окно сообщений* служит для отображения сообщений о выполняемых действиях, ошибках и предупреждениях. В это окно также выводятся данные с использованием команд меню **Вывод**. Окно сообщений может быть развернуто и свернуто выбором соответствующей строки в контекстном меню, которое появляется после щелчка правой кнопкой мыши в поле окна:



В *статусной строке*, находящейся внизу, находится справочная информация о состоянии модели.

При выполнении команд осуществляется задание текстовых и числовых данных в соответствующих полях диалоговых окон. При задании числовых данных можно использовать арифметические выражения с использованием знаков “+”, “-”, “\*”, “/”. Корректность задания числовых данных контролируется программой.

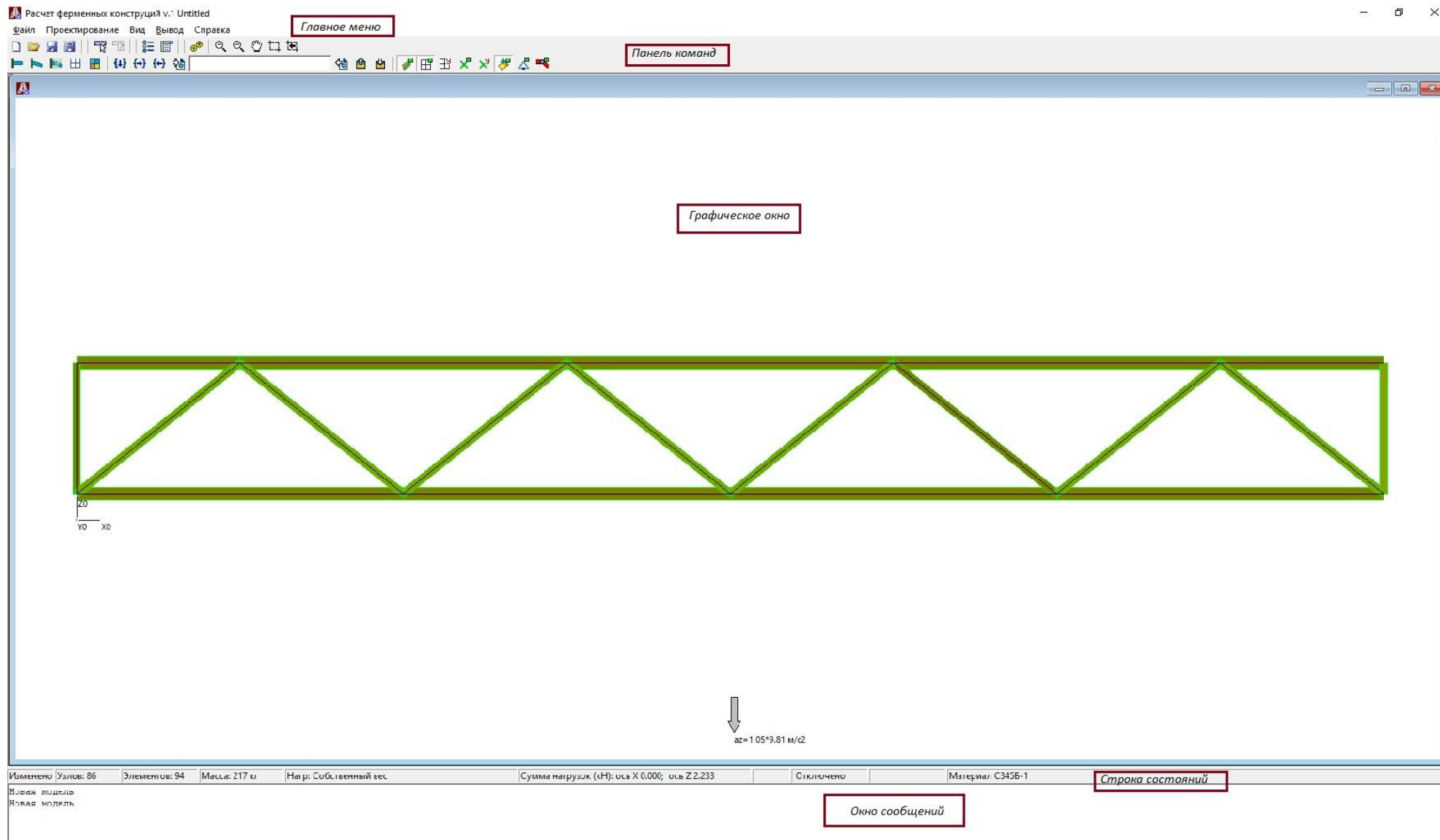


Рисунок 3. Главное окно программы

### 2.3 Объекты данных модели

Объектами данных являются составляющие модели фермы. Они включают в себя объекты следующих типов:

Объекты расчетной модели:

- Геометрическая модель фермы;
- Узлы конечно-элементной (КЭ) модели;
- Элементы КЭ-модели;
- Нагрузки;
- Закрепления;
- Шарниры.

Результаты:

- Перемещения узлов под действием статической нагрузки;
- Усилия и напряжения в конечных элементах;

Вспомогательные объекты:

- Метки
- Оси координат;

### 2.4 Меню Файл

Команды меню **Файл** предназначены для работы с новыми или существующими моделями программы. Назначение команд ясно из их названия, рис. 4.



Рисунок 4. Меню Файл

С помощью команды **Файл**  $\Rightarrow$  **Новая ферма** открывается новый, пустой файл модели и по умолчанию создается ферма с параллельными поясами, которая пользователем заменяется на любую желаемую.

С помощью команды **Файл**  $\Rightarrow$  **Настройки** можно изменить параметры разбивки геометрической модели сеткой конечных элементов.

### 2.5 Меню Проектирование

Меню Проектирование, рис. 5, содержит команды задания и редактирования параметров фермы;

Команду выполнения расчета, и команду выполнения проверок элементов фермы.

Команды **Параметры фермы** и **Выполнить проверки** подробно рассматриваются в соответствующих разделах.

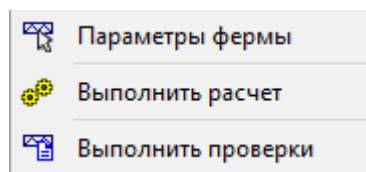


Рисунок 5. Меню Проектирование

## 2.6 Меню Вид

Меню Вид, рис. 6, содержит две команды, с помощью которых выбираются результаты для отображения, и задаются параметры отображения тех или иных объектов в Графическом окне.

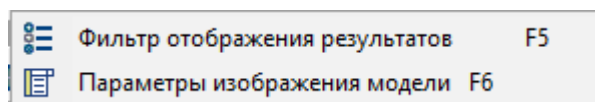


Рисунок 6. Меню Вид

## 2.7 Меню Вывод

Меню Вывод, рис. 7, содержит две команды, с помощью которых в окно сообщений и/или в текстовый файл могут быть выведены параметры расчетной КЭ-модели и результаты. Для назначения вывода используется одноименная команда.

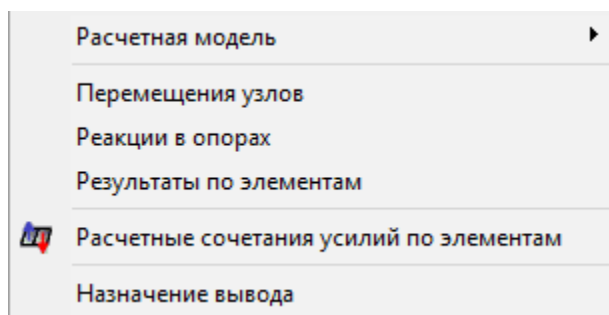


Рисунок 7. Меню Вывод

## 3. Задание параметров фермы

Диалоговое окно команды в начальной конфигурации показано на рис. 8.

**На вкладке *Параметры фермы* выбирается одна из трех доступных форм:**

- Ферма с параллельными поясами;
- Односкатная ферма;
- Двускатная ферма.

Для выбранной формы выбирается тип решетки и схема опирания – на узлы либо верхнего, либо нижнего пояса.

Далее, выбирается вариант установки стоек и назначаются численные параметры фермы.

После нажатия кнопки **Применить** схема фермы отображается в слева, в графическом окне.





На вкладке *Сечения и материалы*, рис. 9, задаются сечения и материалы элементов фермы.

Параметры фермы

Параметры фермы | Сечения и материалы | Раскрепления и примыкания | Нагрузки | Расчет стоимости

Элементы фермы

Материалы

☒ Верхний пояс 

$E$	$G$	$\mu$	C355B
-----	-----	-------	-------

☐ Нижний пояс 

$E$	$G$	$\mu$	C355
-----	-----	-------	------

☐ Опорные раскосы 

$E$	$G$	$\mu$	C355
-----	-----	-------	------

☐ Раскосы 

$E$	$G$	$\mu$	C255
-----	-----	-------	------

☐ Стойки 

$E$	$G$	$\mu$	C345
-----	-----	-------	------

$E$   
 $G$   $\mu$  Задать материал для всех элементов

Прокатные двутавры Р 57837-2017

**Балочный**

Широкополочный

Колонный

Свайный

Дополнительный балочный

Дополнительный колонный

Прокатной двутавр

ГОСТ Р 57837

☒ Балочный нормальный (Б)

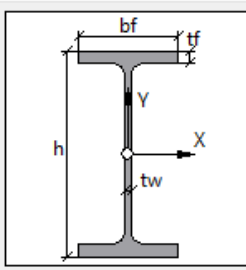
☐ Широкополочный (Ш)

☐ Колонный (К)

☐ Свайный (С)

☐ Балочный дополнит. (ДБ)

☐ Колонный дополнит. (ДК)



Номер профиля

20Б3

h (мм)	208
bf (мм)	102
tw (мм)	8
tf (мм)	12
A (см <sup>2</sup> )	40
Ix (см <sup>4</sup> )	2853
ix (мм)	84.2

Применить ко все элементам

Применить

Внести изменения в расчетную модель фермы и выйти

Рисунок 9. Вкладка диалогового окна при задании сечений и материалов:

На вкладке **Раскрепления и примыкания**, рис.10 , назначаются раскрепления в узлах фермы, назначается тип соединения подкосов и стоек с поясами, и задается способ опирания фермы на колонну.

Параметры фермы

Параметры фермы | Сечения и материалы | **Раскрепления и примыкания** | Нагрузки | Расчет стоимости

Раскрепления узлов из плоскости

Верхний пояс

☐ Все узлы раскосов

☒ Узлы раскосов через один

☐ Нет раскреплений

Нижний пояс

☐ Только крайние

☒ Крайние и посередине пролета

☐ Нет раскреплений

☐ Задать раскрепления по номерам узлов

<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 1	<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 14
<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 2		
<input type="checkbox"/>	Узел 3		
<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 4		
<input type="checkbox"/>	Узел 5		
<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 6		
<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 7		
<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 8		
<input type="checkbox"/>	Узел 9		
<input type="checkbox"/>	Узел 10		
<input checked="" type="checkbox"/>	Узел 11		
<input type="checkbox"/>	Узел 12		
<input type="checkbox"/>	Узел 13		

Примыкание подкосов к поясам

☒ Шарнирное ☐ Жесткое

Примыкание стоек к поясам

☒ Шарнирное ☐ Жесткое

Вид опирания на нижний пояс

☒ Примыкание к колонне

☐ Опирание сверху




Принять

Внести изменения в расчетную модель фермы и выйти

Рисунок 10. Диалоговое окно команды при задании раскреплений и примыканий

#### 4. Задание нагрузок

Нагрузки на ферму задаются на вкладке **Нагрузки** команды **Параметры фермы**. Начальная конфигурация вкладки **Нагрузки** показана на рис 11. При задании параметров фермы автоматически создается загрузка “Собственный вес”.

Остальные загрузки создаются, редактируются и удаляются пользователем с помощью кнопок   . При создании и редактировании загрузки открывается панель, рис. 12, на которой выбираются параметры загрузки и задаются коэффициенты для выбора РСУ.

Нагрузки на ферму могут быть заданы в форме сосредоточенных и погонных поперечных нагрузок, приложенных к верхнему и нижнему поясам, рис. 13.

Привязка нагрузок может выполняться заданием позиций, номеров узлов фермы, номеров узлов и сдвига относительно узлов, и заданием погонных нагрузок на весь пояс.

Направление нагрузок может быть либо по оси Z0, либо по нормали к поясу.

Параметры фермы

Параметры фермы | Сечения и материалы | Раскрепления и примыкания | **Нагрузки** | Расчет стоимости

Количество загрузений       Загрузка №1 - Собственный вес      \*Задаются нормативные значения нагрузок

Загрузка

1

Параметры загрузки

Имя

Коэффициент надежности по нагрузке

Рисунок 11. Начальная конфигурация вкладки **Нагрузки**

Добавить загрузение

Номер загрузки

Имя загрузки

Коэффициент надежности по нагрузке

Понижающий коэффициент

Номер группы однотипных загрузений    

Номер группы взаимоисключающих загрузений

Рисунок 12. Диалоговое окно задания параметров загрузки




## 5. Переход к расчетной модели и выполнение анализа

Расчетная конечно-элементная модель строится автоматически при нажатии кнопки




или закрытии панели **Параметры фермы**.

Расчетная модель отображается в Графическом окне программы, рис 14. Для выполнения расчета необходимо выполнить команду **Проектирование->Выполнить расчет** (кнопка ).

На рис. 15 показано отображение результатов после выполнения расчета.

Для управления отображения примитивов расчетной модели и результатов используются команды меню **Вид** и кнопки на панели инструментов.

После выполнения расчета становится активной кнопка **Выполнить проверки** (). После нажатия этой кнопки появляется панель с отображением результатов проверок, рис. 16.

Проверки для элементов фермы могут не выполняться, если толщины профиля не попадают в диапазон толщин материала, назначенного для этих элементов. Сообщение об этой ситуации появляется на панели.

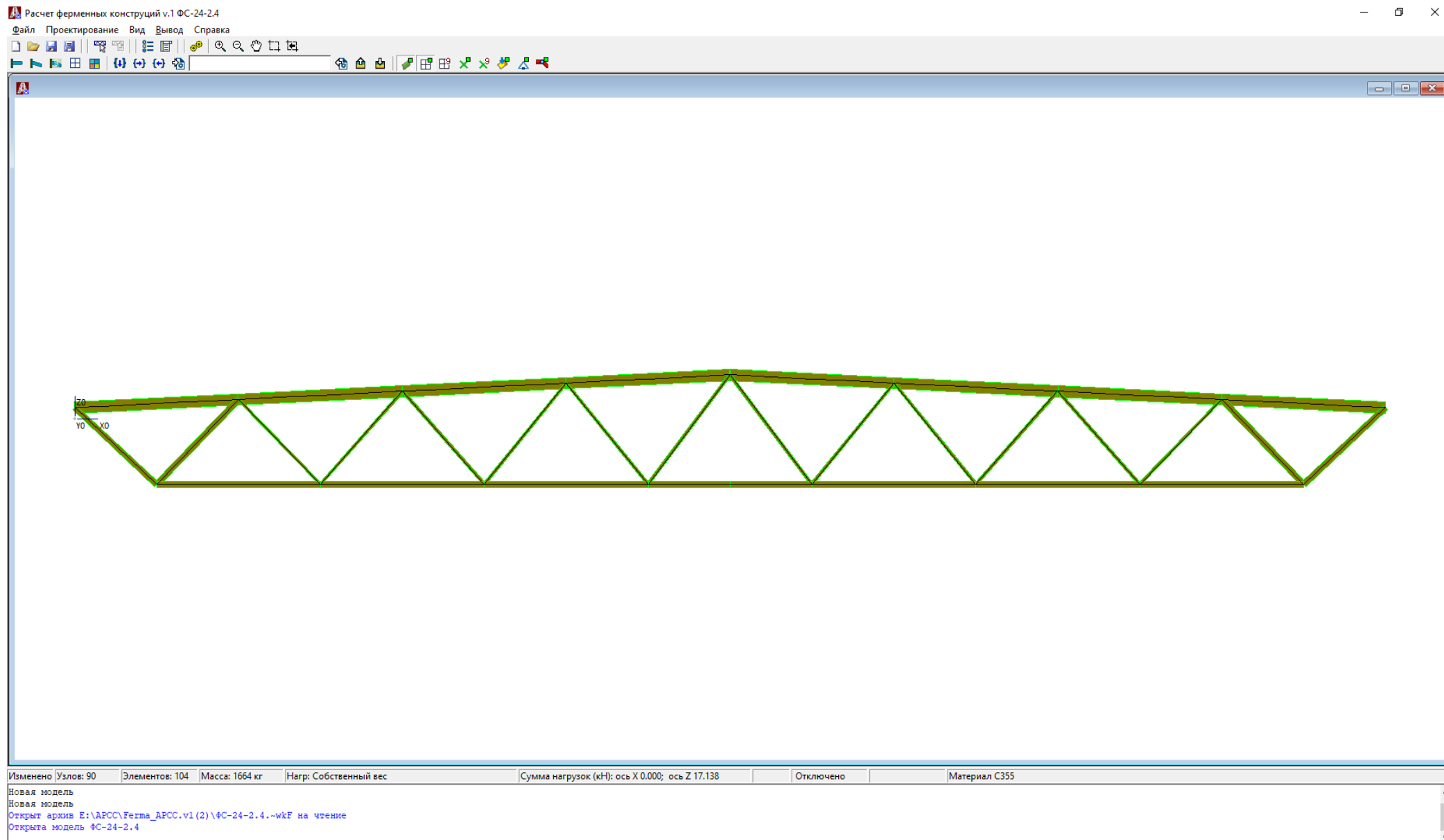


Рисунок 14. Отображение расчетной модели фермы в графическом окне

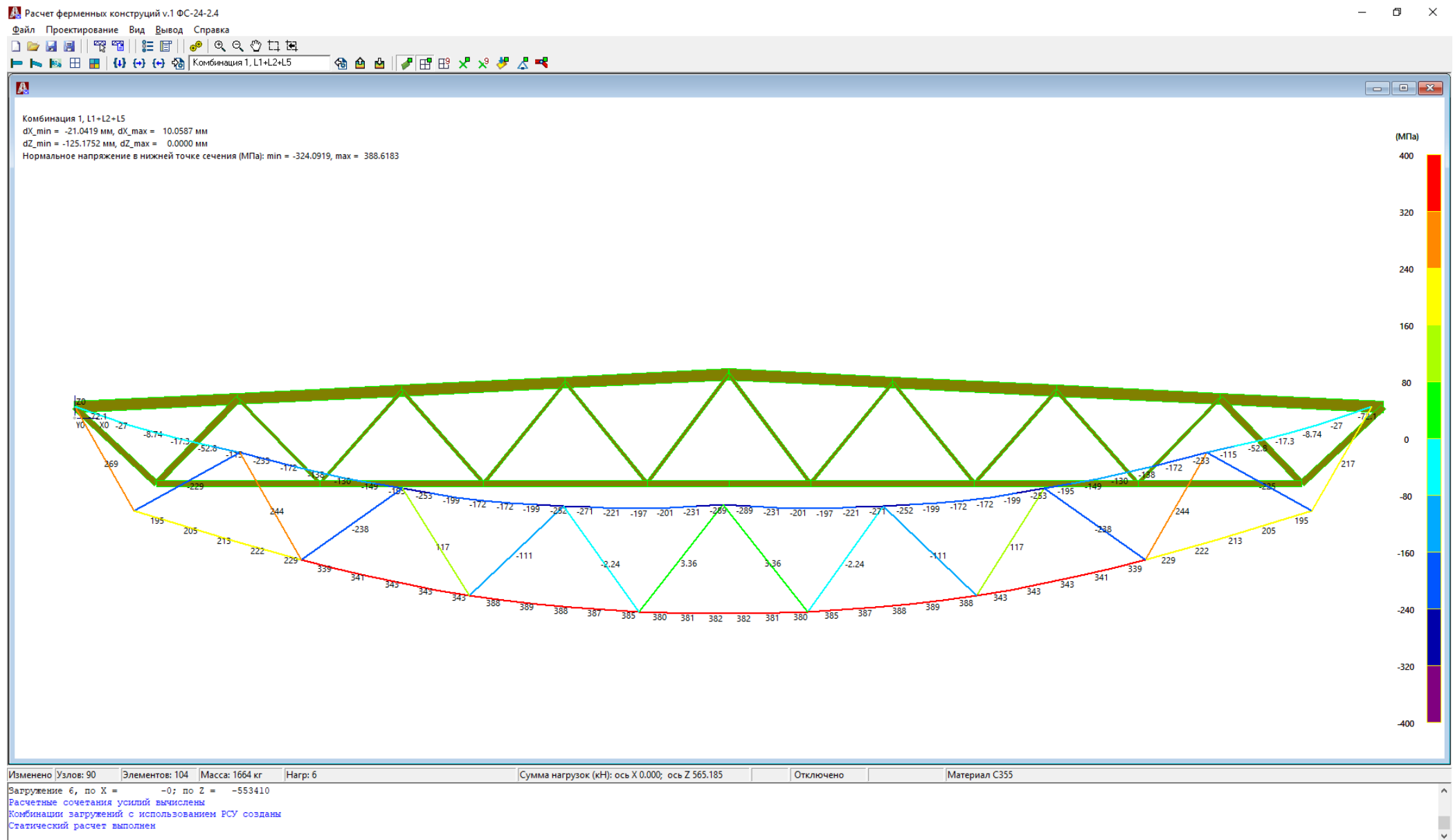


Рисунок 15. Отображение результатов на расчетной модели фермы в графическом окне



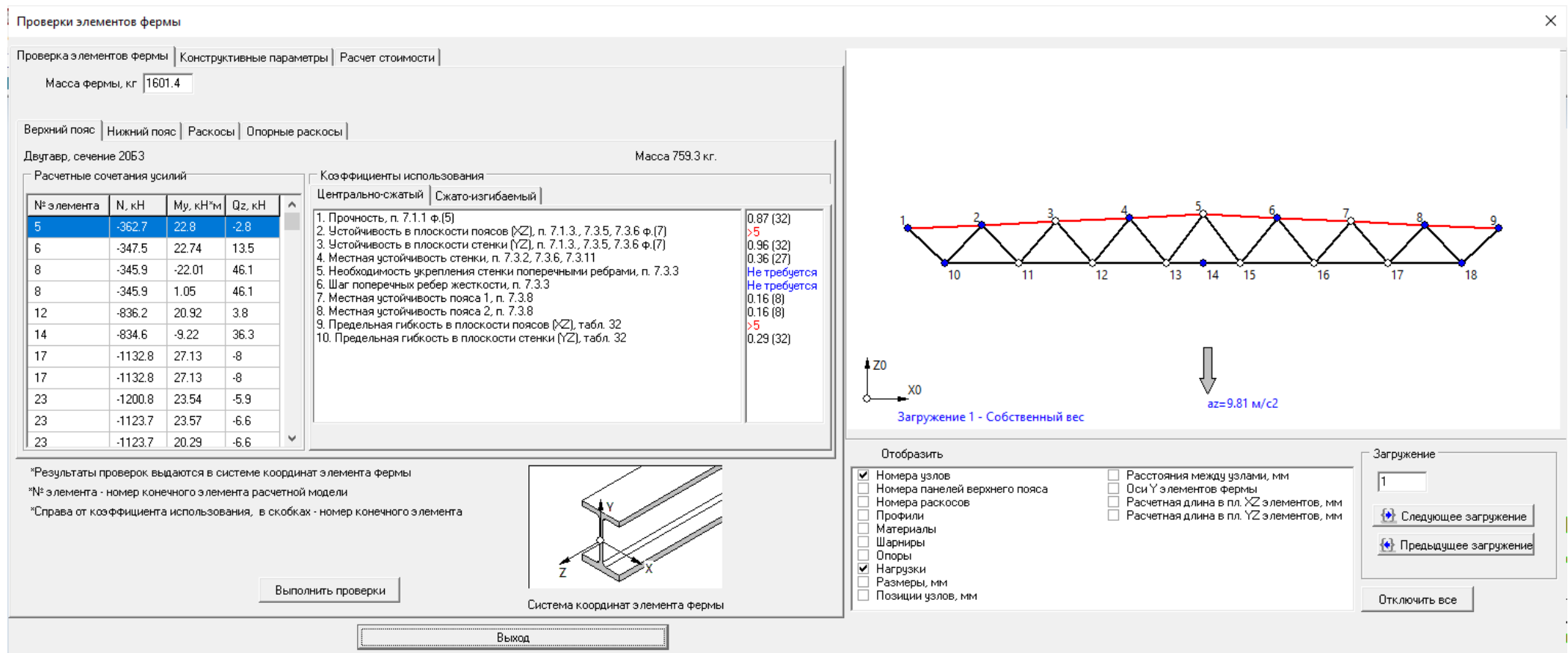


Рисунок 16. Отображение результатов проверок

## 6. Список проверок сечений

В таблице 1 приводятся пять выполняемых типов проверок, которые автоматически определяются по виду напряженного состояния.

Таблица 1. Критерии отнесения элементов к виду напряженного состояния

№ п.п.	Вид напряженного состояния	Критерии
1	Центрально-растянутые	$M=0$ и $N>0$ ;
2	Центрально-сжатые	$N<0$ и $\frac{M}{N} \leq \frac{i}{20} + \frac{l_{ef}}{750}$
3	Растянуто-изгибаемые (внецентренно-растянутые)	$M \neq 0$ и $N > 0$ и $m_{ef} \leq 20$
4	Сжато-изгибаемые (внецентренно-сжатые)	$M \neq 0$ и $N < 0$ и $m_{ef} \leq 20$
5	Изгибаемые (балки)	$M \neq 0$ и $N \neq 0$ и $m_{ef} > 20$

### 6.1. Проверки двутавровых сечений

Ниже приводятся формулы и ссылки на пункты СП 16.13330.2017, которые используются при вычислении КИ конструктивных элементов для различных групп напряженного состояния, табл. 1

#### 6.1.1 Центрально-растянутые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 7.1.1 ф.(5)

При  $R_{yn} \leq 440$  МПа

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1;$$

При  $R_{yn} > 440$  МПа  $R_y = R_u / \gamma_u$

2. Предельная гибкость в плоскости поясов, п. 10.4.1, 10.4.2. табл. 33.

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_u} \leq 1$$

3. Предельная гибкость в плоскости стенки, п. 10.4.1, 10.4.2. табл. 33.

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_u} \leq 1$$

#### 6.1.2 Центрально сжатые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 7.1.1 ф.(5)

При  $R_{yn} \leq 440$  МПа

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1;$$

При  $R_{yn} > 440$  МПа  $R_y = R_u / \gamma_u$

2. Устойчивость в плоскости поясов, п. 7.1.3, 7.3.5, 7.3.6, ф. (7, 8, 9)

$$\frac{N}{\varphi_y A R_y \gamma_c} \leq 1$$

3. Устойчивость в плоскости стенки, п. 7.1.3, 7.3.5, 7.3.6, ф. (7, 8, 9)

$$\frac{N}{\varphi_x A R_y \gamma_c} \leq 1$$

4. Местная устойчивость стенки, п. 7.3.2, 7.3.6, 7.3.11

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1, \text{ где}$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

5. Необходимость укрепления стенки поперечными ребрами, п. 7.3.3

Если выполняется условие  $\frac{\bar{\lambda}_w}{2.3} < 1$ , стенку укреплять не нужно

6. Местная устойчивость пояса, п. 7.3.8

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{k \cdot \bar{\lambda}_{uf}} \leq 1, \text{ где}$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

7. Предельная гибкость в плоскости поясов, табл. 32

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_u} \leq 1$$

8. Предельная гибкость в плоскости поясов, табл. 32

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_u} \leq 1$$

### 6.1.3 Растянуто-изгибаемые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 9.1.1, ф. (105) с учетом п. 8.2.3

$$\left( \frac{|N|}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{|M_x|}{c_x W_{xn. \min} R_y \gamma_c} + \frac{|M_y|}{c_y W_{yn. \min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

или

$$\left| \frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{xy}}{I_{xn} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{yx}}{I_{yn} R_y \gamma_c} \right| \leq 1$$

2. Прочность при действии поперечной силы, п. 8.2.1, ф. (42)

$$\frac{Q}{I \cdot t_w R_s \gamma_c} \leq 1$$

3. Прочность стенки по эквивалентным напряжениям, п. 8.2.1 ф. (44)

$$\frac{0.87}{R_{yw} \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$$

4. Прочность растянутого волокна, п. 9.1.3, ф.(107)

$$\text{Для стали } R_{yn} > 440 \text{ МПа, } \delta = 1 - 0.1 N \bar{\lambda}^2 / (A R_y)$$

$$\frac{\gamma_u}{R_u \gamma_c} \left| \frac{N}{A_n} - \frac{M}{\delta W_{tn}} \right| \leq 1$$

5. Устойчивость в плоскости поясов по стержневой аналогии для сжатого пояса, п. 7.1.3, ф. (7)

$$\frac{N_f}{\varphi_f A_f R_y \gamma_c} \leq 1$$

6. Необходимость укрепления стенки поперечными ребрами жесткости п. 7.3.3.

$$\text{Если выполняется условие } \frac{\bar{\lambda}_w}{2.3} < 1, \text{ стенку укреплять не нужно}$$

7. Устойчивость сжатого пояса, п. 9.4.7

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{k \cdot \bar{\lambda}_{uf}} \leq 1,$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

8. Предельная гибкость в плоскости поясов, табл. 32

$$\frac{\bar{\lambda}_y}{\bar{\lambda}_{uy}} \leq 1$$

9. Предельная гибкость в плоскости стенки, табл. 32

$$\frac{\bar{\lambda}_x}{\bar{\lambda}_{ux}} \leq 1$$

#### 6.1.4 Сжато-изгибаемые (внецентренно-сжатые) элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 9.1.1, ф. (105) с учетом п. 8.2.3

$$\left( \frac{|N|}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{|M_x|}{c_x W_{xn. \min} R_y \gamma_c} + \frac{|M_y|}{c_y W_{yn. \min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

или

$$\left| \frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{xy}}{I_{xn} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{yx}}{I_{yn} R_y \gamma_c} \right| \leq 1$$

2. Прочность при действии поперечной силы, п. 8.2.1, ф. (42)

$$\frac{Q}{I \cdot t_w R_s \gamma_c} \leq 1$$

3. Прочность стенки по эквивалентным напряжениям, п. 8.2.1 ф. (44)

$$\frac{0.87}{R_{yw} \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$$

4. Прочность растянутого волокна, п. 9.1.3, ф.(107)

Для стали  $R_{yn} > 440$  МПа,  $\delta = 1 - 0.1N\bar{\lambda}^2 / (AR_y)$

$$\frac{\gamma_u}{R_u \gamma_c} \left| \frac{N}{A_n} - \frac{M}{\delta W_{tn}} \right| \leq 1$$

5. Устойчивость в плоскости стенки (плоская форма), п. 9.2.1 ф.(109)

$$\frac{N}{\varphi_e AR_y \gamma_c} \leq 1$$

6. Устойчивость в плоскости поясов (изгибно-крутильная форма), п. 9.2.4 ф. (111)

$$\frac{N}{c\varphi_y AR_y \gamma_c} \leq 1$$

7. Устойчивость при изгибе в двух плоскостях п. 9.2.9, ф. (116)

$$\frac{N}{\varphi_{exy} AR_y \gamma_c} \leq 1$$

8. Необходимость укрепления стенки поперечными ребрами жесткости п. 7.3.3.

Если выполняется условие  $\frac{\bar{\lambda}_w}{2.3} < 1$ , стенку укреплять не нужно

9. Устойчивость стенки при  $c \cdot \varphi_y > \varphi_e$ , п. 9.4.

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1,$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi AR_y}{N}}, 1.25 \right)$$

10. Устойчивость стенки при  $c \cdot \varphi_y \leq \varphi_e$ , п. 9.4.

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1,$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi AR_y}{N}}, 1.25 \right)$$

11. Устойчивость пояса, п. 9.4.7

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{k \cdot \bar{\lambda}_{uf}} \leq 1,$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

12. Предельная гибкость в плоскости поясов, табл. 32

$$\frac{\bar{\lambda}_y}{\bar{\lambda}_{uy}} \leq 1$$

13. Предельная гибкость в плоскости стенки, табл. 32

$$\frac{\bar{\lambda}_x}{\bar{\lambda}_{ux}} \leq 1$$

### 6.1.5 Изгибаемые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 9.1.1, ф. (105) с учетом п. 8.2.3

$$\left( \frac{|N|}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{|M_x|}{c_x W_{xn. \min} R_y \gamma_c} + \frac{|M_y|}{c_y W_{yn. \min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

или

$$\left| \frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{xy}}{I_{xn} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{yx}}{I_{yn} R_y \gamma_c} \right| \leq 1$$

2. Прочность при действии поперечной силы, п. 8.2.1, ф. (42)

$$\frac{Q}{I \cdot t_w R_s \gamma_c} \leq 1$$

3. Прочность стенки по эквивалентным напряжениям, п. 8.2.1 ф. (44)

$$\frac{0.87}{R_{yw} \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$$

4. Прочность растянутого волокна, п. 9.1.3, ф.(107)

Для стали  $R_{yn} > 440$  МПа,  $\delta = 1 - 0.1 N \bar{\lambda}^2 / (A R_y)$

$$\frac{\gamma_u}{R_u \gamma_c} \left| \frac{N}{A_n} - \frac{M}{\delta W_{tn}} \right| \leq 1$$

5. Устойчивость в плоскости стенки (плоская форма), п. 9.2.1 ф.(109)

$$\frac{N}{\varphi_e A R_y \gamma_c} \leq 1$$

6. Устойчивость в плоскости поясов (изгибно-крутильная форма), п. 9.2.4 ф. (111)

$$\frac{N}{c \varphi_y A R_y \gamma_c} \leq 1$$

7. Устойчивость при изгибе в двух плоскостях п. 9.2.9, ф. (116)

$$\frac{N}{\varphi_{exy} A R_y \gamma_c} \leq 1$$

8. Необходимость укрепления стенки поперечными ребрами жесткости п. 7.3.3.

Если выполняется условие  $\frac{\bar{\lambda}_w}{2.3} < 1$ , стенку укреплять не нужно

9. Устойчивость стенки при  $c \cdot \varphi_y > \varphi_e$ , п. 9.4.

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1,$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

10. Устойчивость стенки при  $c \cdot \varphi_y \leq \varphi_e$ , п. 9.4.

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1,$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

11. Устойчивость пояса, п. 9.4.7

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{k \cdot \bar{\lambda}_{uf}} \leq 1,$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

12. Предельная гибкость в плоскости поясов, табл. 32

$$\frac{\bar{\lambda}_y}{\bar{\lambda}_{uy}} \leq 1$$

13. Предельная гибкость в плоскости стенки, табл. 32

$$\frac{\bar{\lambda}_x}{\bar{\lambda}_{ux}} \leq 1$$

## 6.2 Проверки сечений гнутых профилей и труб

Ниже приводятся формулы и ссылки на пункты СП 16.13330.2017, которые используются при вычислении КИ конструктивных элементов для различных групп напряженного состояния.

### 6.2.1 Центральнo-растянутые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 7.1.1 ф.(5)

$$\text{При } R_{yn} \leq 440 \text{ МПа}$$

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1;$$

При  $R_{yn} > 440$  МПа  $R_y = R_u / \gamma_u$

2. Предельная гибкость в плоскости XZ, п. 10.4.1, 10.4.2. табл. 33.

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y A R_y \gamma_c}$$

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_{uy}} \leq 1$$

3. Предельная гибкость в плоскости YZ, п. 10.4.1, 10.4.2. табл. 33.

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_x A R_y \gamma_c}$$

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_{ux}} \leq 1$$

## 6.2.2 Центральные сжатые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 7.1.1 ф.(5)

При  $R_{yn} \leq 440$  МПа

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1;$$

При  $R_{yn} > 440$  МПа  $R_y = R_u / \gamma_u$

2. Устойчивость в плоскости XZ, п. 7.1.3, 7.3.5, 7.3.6, ф. (7, 8, 9)

$$\frac{N}{\varphi_y A R_y \gamma_c} \leq 1$$

3. Устойчивость в плоскости YZ, п. 7.1.3, 7.3.5, 7.3.6, ф. (7, 8, 9)

$$\frac{N}{\varphi_x A R_y \gamma_c} \leq 1$$

4. Местная устойчивость стенок в пл. XZ, п. 7.3.2, 7.3.6, 7.3.11

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1, \text{ где}$$

$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

5. Местная устойчивость стенок в пл. YZ, п. 7.3.2, 7.3.6, 7.3.11

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1, \text{ где}$$



$$k = \min \left( \sqrt{\frac{\varphi A R_y}{N}}, 1.25 \right)$$

6. Предельная гибкость в плоскости XZ, табл. 32

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y A R_y \gamma_c}$$

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_{uy}} \leq 1$$

7. Предельная гибкость в плоскости YZ, табл. 32

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_{ux}} \leq 1$$

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_x A R_y \gamma_c}$$

### 6.2.3 Растянуто-изгибаемые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 9.1.1 ф.(105) или (106)

$$\left( \frac{|N|}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{|M_x|}{c_x W_{xn} \min R_y \gamma_c} + \frac{|M_y|}{c_y W_{yn} \min R_y \gamma_c} \leq 1$$

или

$$\left| \frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{xy}}{I_{xn} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{yx}}{I_{yn} R_y \gamma_c} \right| \leq 1$$

2. Прочность стенки при действии поперечной силы в пл. YZ, п. 8.2.1, ф. (42)

$$\frac{Q_y S}{I_y \cdot t \cdot R_s \gamma_c} \leq 1$$

3. Прочность стенки при действии поперечной силы в пл. XZ, п. 8.2.1, ф. (42)

$$\frac{Q_x S}{I_x \cdot t \cdot R_s \gamma_c} \leq 1$$

4. Предельная гибкость в пл. XZ, табл. 32

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y A R_y \gamma_c}$$

$$\frac{\lambda_y}{k \cdot \lambda_{uy}} \leq 1$$

5. Предельная гибкость в пл. YZ, табл. 32

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_e A R_y \gamma_c}$$

$$\frac{\lambda_y}{k \cdot \lambda_{uy}} \leq 1$$

#### 6.2.4 Сжато-изгибаемые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 9.1.1 ф.(105) или (106)

$$\left( \frac{|N|}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{|M_x|}{c_x W_{xn, \min} R_y \gamma_c} + \frac{|M_y|}{c_y W_{yn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

или

$$\left| \frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{xy}}{I_{xn} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{yx}}{I_{yn} R_y \gamma_c} \right| \leq 1$$

2. Прочность стенки при действии поперечной силы в пл. YZ, п. 8.2.1, ф. (42) (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{Q_y S}{I_y \cdot t \cdot R_s \gamma_c} \leq 1$$

3. Прочность стенки при действии поперечной силы в пл. XZ, п. 8.2.1, ф. (42) (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{Q_x S}{I_x \cdot t \cdot R_s \gamma_c} \leq 1$$

4. Прочность стенки по эквивалентным напряжениям, п. 8.2.1 ф. (44) (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{0.87}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$$

5. Прочность растянутой стенки, п. 9.1.3 ф. (107) (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{\gamma_u}{R_u \gamma_c} \left| \frac{N}{A_n} - \frac{M}{\delta \cdot W_m} \right| \leq 1$$

6. Устойчивость при действии момента в пл. YZ п. 9.2.10 ф.(120)

$$N / (\varphi_{ey} A R_y \gamma_c) + M_x / (c_x \delta_x W_{x, \min} \gamma_c) \leq 1$$

7. Устойчивость при действии момента в пл. XZ п. 9.2.10 ф.(121)

$$N / (\varphi_{ex} A R_y \gamma_c) + M_y / (c_y \delta_y W_{y, \min} \gamma_c) \leq 1$$

8. Устойчивость стенки в пл. YZ п. 9.4.7 (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{k \cdot \bar{\lambda}_{uw}} \leq 1$$

9. Устойчивость стенки в пл. XZ п. 9.4.7 (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{k \cdot \bar{\lambda}_{uf}} \leq 1$$

10. Предельная гибкость в плоскости YZ в, табл. 32

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y A R_y \gamma_c}$$

$$\frac{\lambda_y}{k \cdot \lambda_{uy}} \leq 1$$

11. Предельная гибкость в плоскости XZ, табл. 32

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_e A R_y \gamma_c}$$

$$\frac{\lambda_y}{k \cdot \lambda_{uy}} \leq 1$$

### 6.2.5 Изгибаемые элементы

1. Прочность по нормальным напряжениям, п. 9.1.1 ф. (105) с учетом п. 8.2.3

$$\left( \frac{|N|}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{|M_x|}{c_x W_{xn. \min} R_y \gamma_c} + \frac{|M_y|}{c_y W_{yn. \min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

или

$$\left| \frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{xy}}{I_{xn} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_{yx}}{I_{yn} R_y \gamma_c} \right| \leq 1$$

2. Прочность стенки при действии поперечной силы в пл. XZ, п. 8.2.1, ф. (42)

$$\frac{Q_x S}{I_x \cdot t \cdot R_s \gamma_c} \leq 1$$

3. Прочность стенки при действии поперечной силы в пл. YZ, п. 8.2.1, ф. (42)

$$\frac{Q_y S}{I_y \cdot t \cdot R_s \gamma_c} \leq 1$$

4. Прочность стенки по эквивалентным напряжениям, п. 8.2.1 ф. (44) (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{0.87}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$$

5. Устойчивость по изгибно-крутильной форме, п. 8.4.1 (не выполняется для круглых труб)

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{W_y R_y \gamma_c} \leq 1$$

6. Устойчивость стенки в пл. YZ, п. 8.5.1, 8.5.3, 8.5.6, 8.5.7.8.5.8 (не выполняется для круглых труб)

$$M / [R_y \gamma_c h_{ef}^2 t (r \alpha_f + \alpha)] \leq 1 \text{ или } \frac{\bar{\lambda}_w}{k_w} \leq 1 \text{ или}$$

$$\sqrt{(\sigma / \sigma_{cr} + \sigma_{loc} / \sigma_{cr.loc})^2 + (\tau / \tau_{cr})^2} / \gamma_c \leq 1$$

7. Устойчивость сжатой стенки в пл. ХЗ, п. 8.5.18 *(не выполняется для круглых труб)*

$$M / [R_y \gamma_c h_{ef}^2 t (r \alpha_f + \alpha)] \leq 1 \text{ или } \frac{\bar{\lambda}_w}{k_w} \leq 1 \text{ или}$$

$$\sqrt{(\sigma / \sigma_{cr} + \sigma_{loc} / \sigma_{cr.loc})^2 + (\tau / \tau_{cr})^2} / \gamma_c \leq 1$$

### **Используемые источники**

1. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*.
2. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». 2016