



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 загрузений, 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  $XOY0Z0$ . Ферма располагается в плоскости  $X0Z0$ , рис. 1.

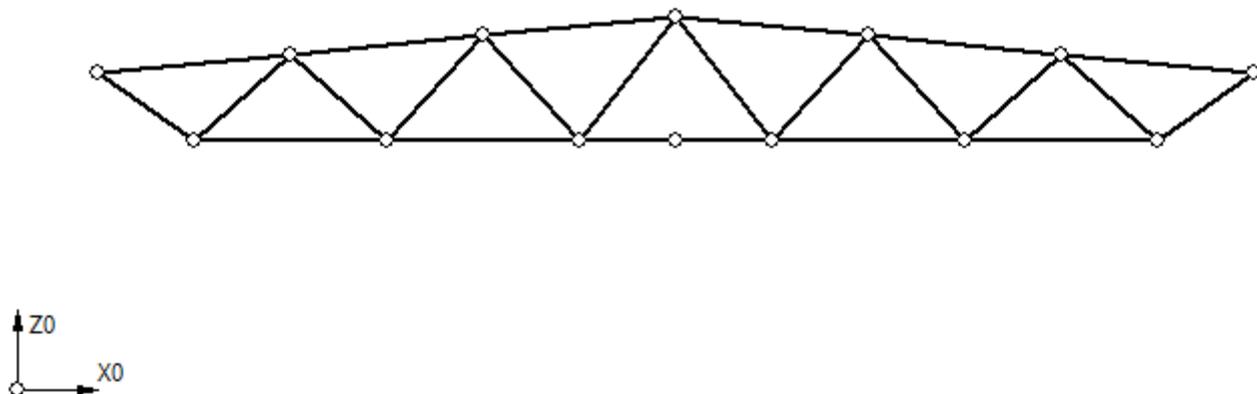


Рисунок 1. Оси общей системы координат

Ось  $X0$  общей системы координат горизонтальна, ось  $Z0$  – вертикальна, ось  $Y0$  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  $X0Y0$  фермы, ось  $Y$  направлена по нормали к оси элемента, и лежит в вертикальной плоскости  $X0Z0$  фермы, ось  $Z$  совпадает с осью элемента.

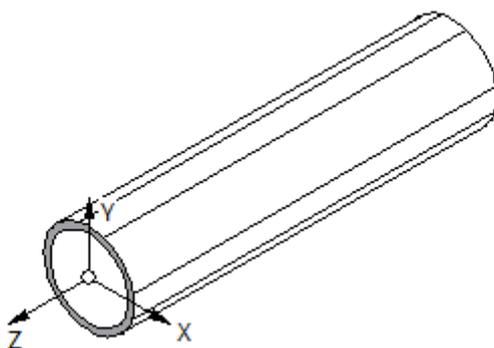


Рисунок 2. Оси местной системы координат элемента фермы

## 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.

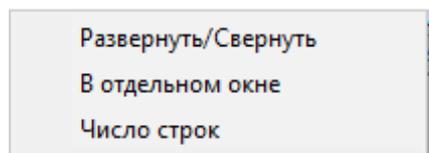
*Главное меню* содержит группы команд – **Файл, Проектирование, Вид, Вывод, Справка**. Каждый пункт сопровождается выпадающим меню со списком команд, некоторые из которых имеют подменю.

*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.

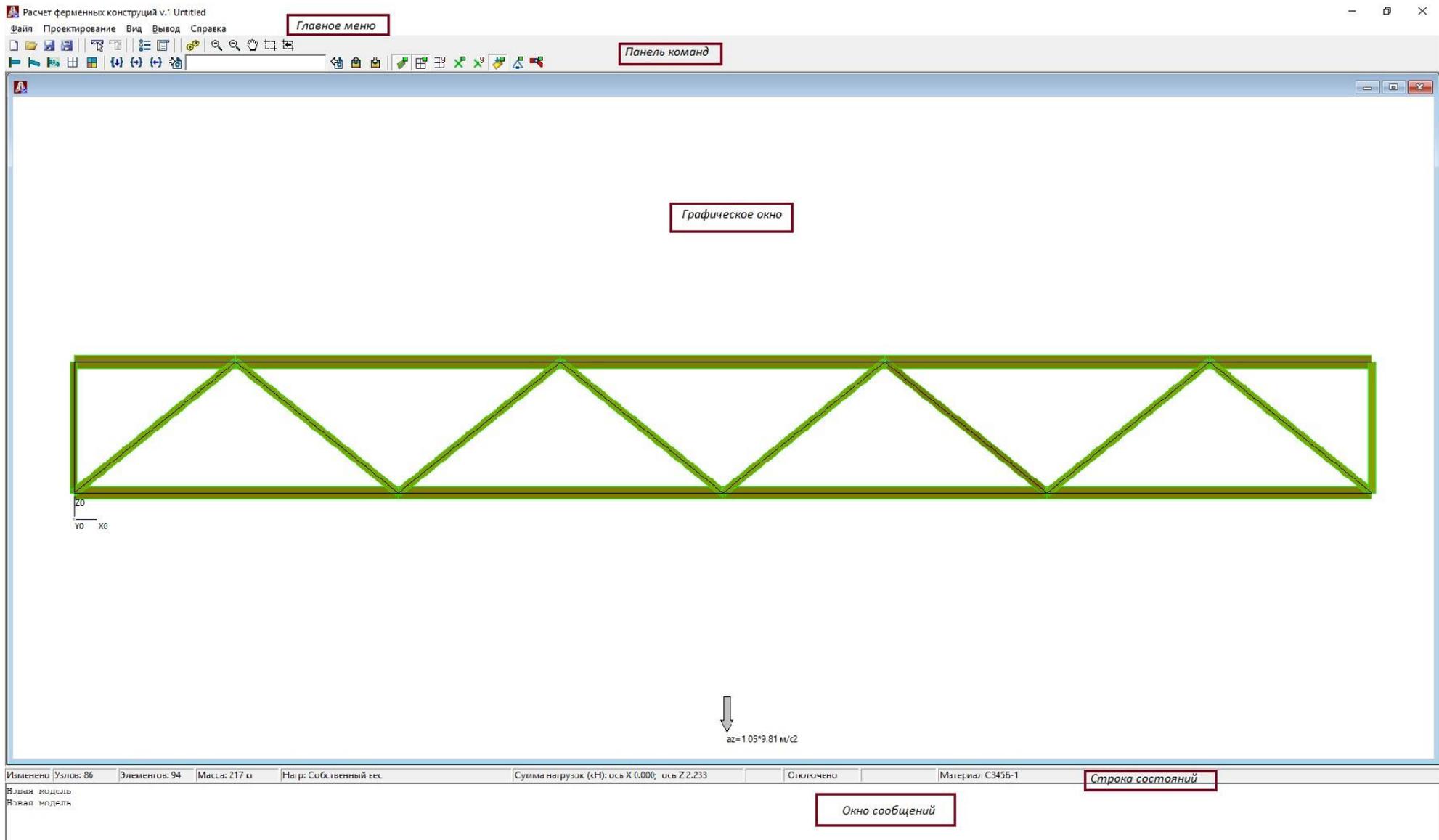


Рисунок 3. Главное окно программы

### 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** ⇒ **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** ⇒ **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.

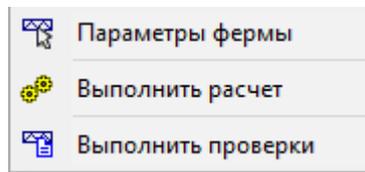


Рисунок 5. Меню Проектирование

### 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.

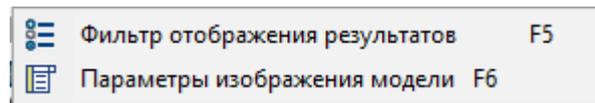


Рисунок 6. Меню Вид

### 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.

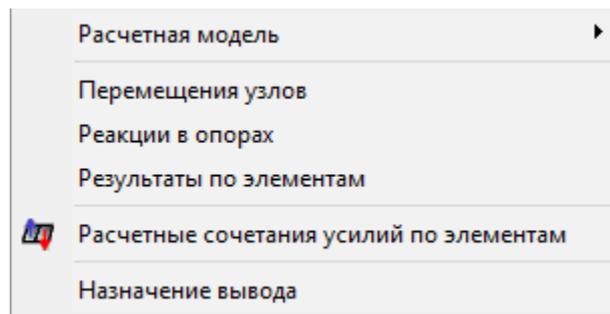


Рисунок 7. Меню Вывод

## 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.

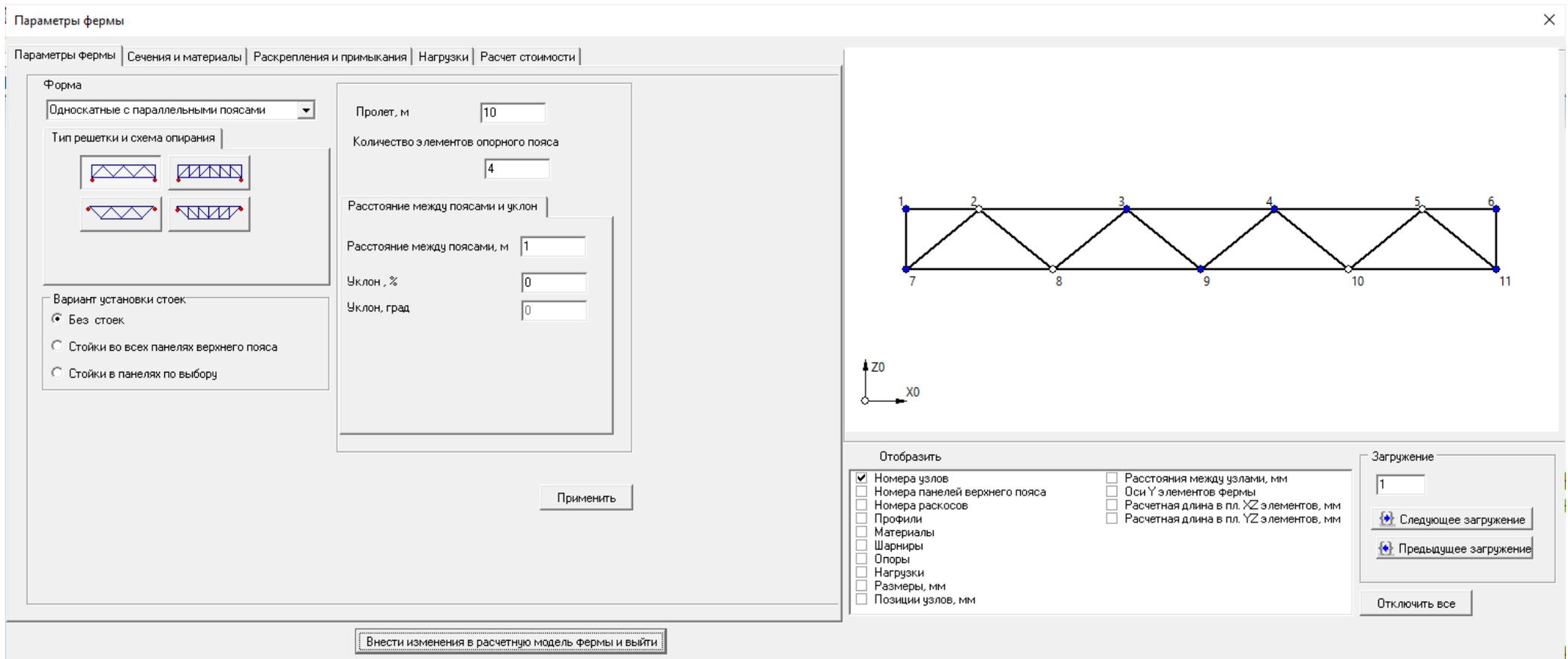


Рисунок 8. Диалоговое окно команды задания параметров фермы

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

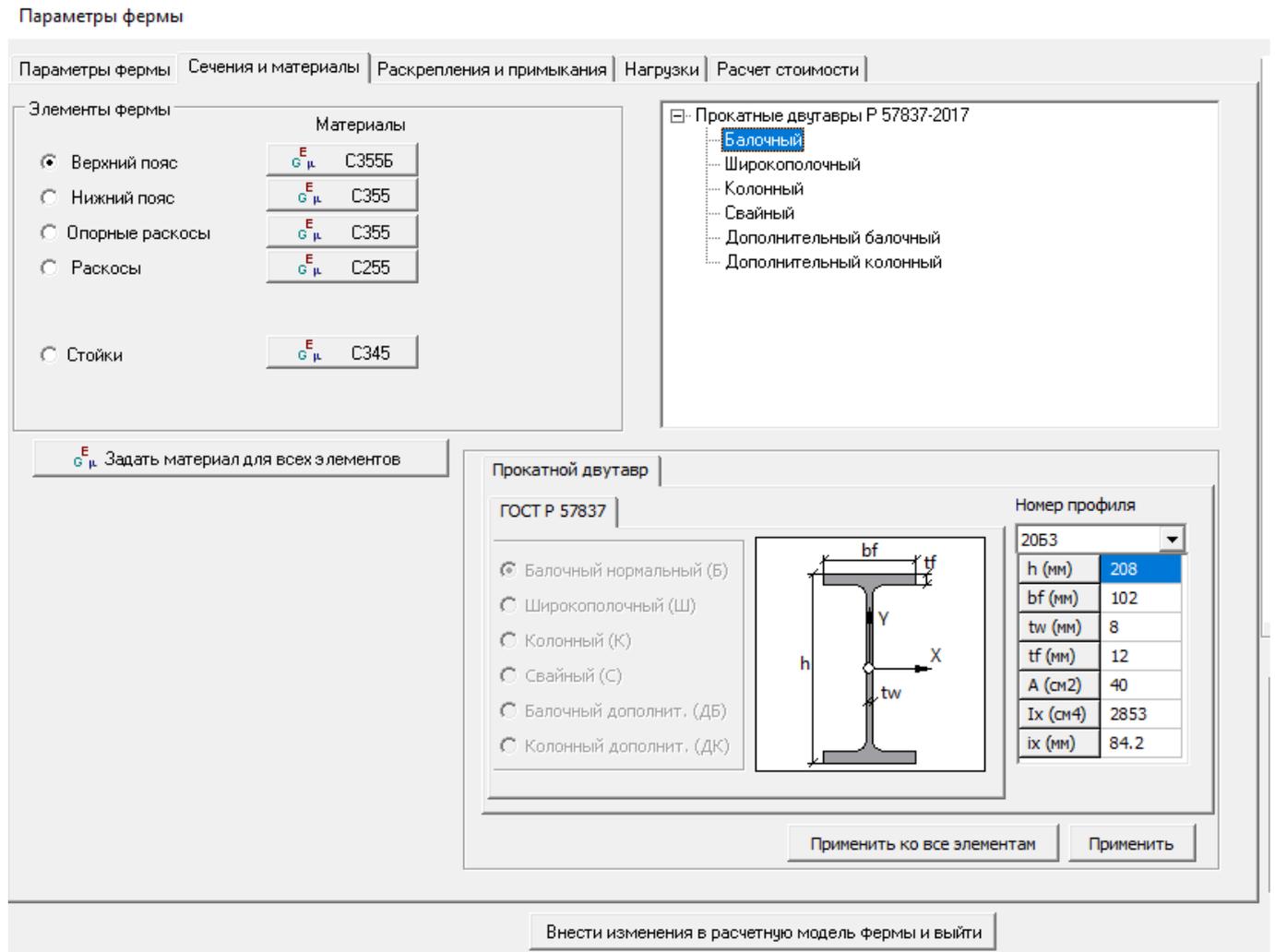


Рисунок 9. Вкладка диалогового окна при задании сечений и материалов:

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.

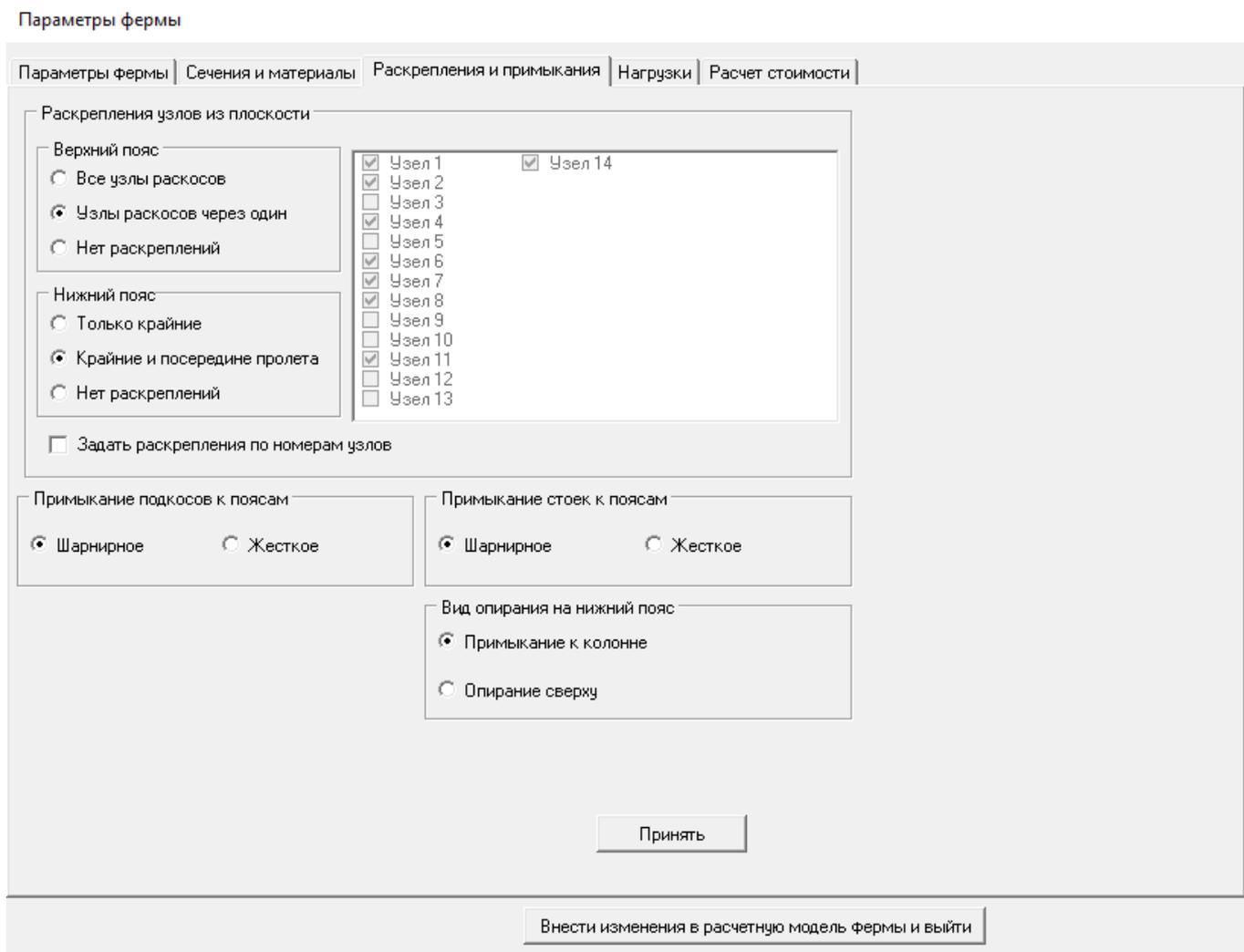


Рисунок 10. Диалоговое окно команды при задании раскреплений и примыканий

#### 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.

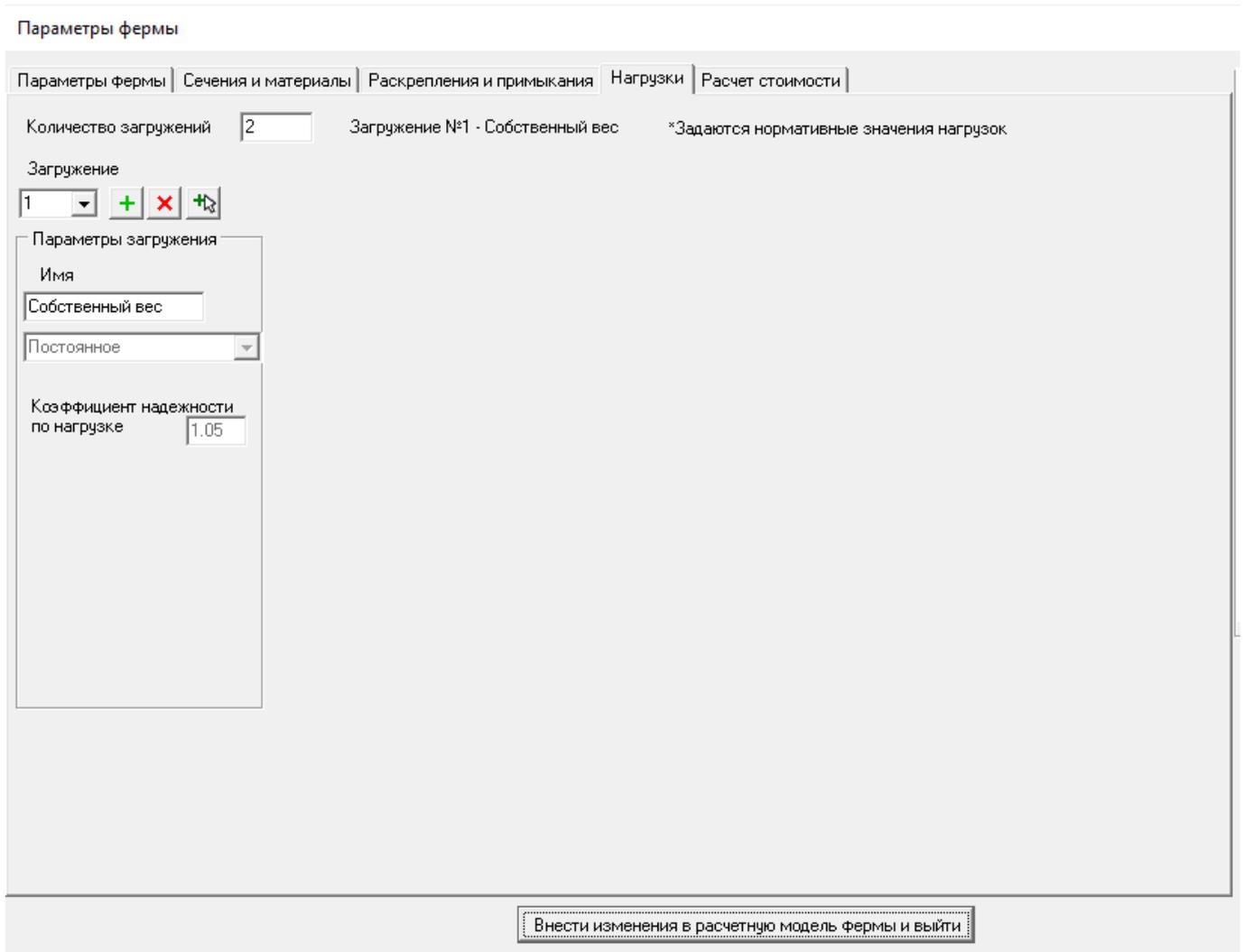


Рисунок 11. Начальная конфигурация вкладки **Нагрузки**

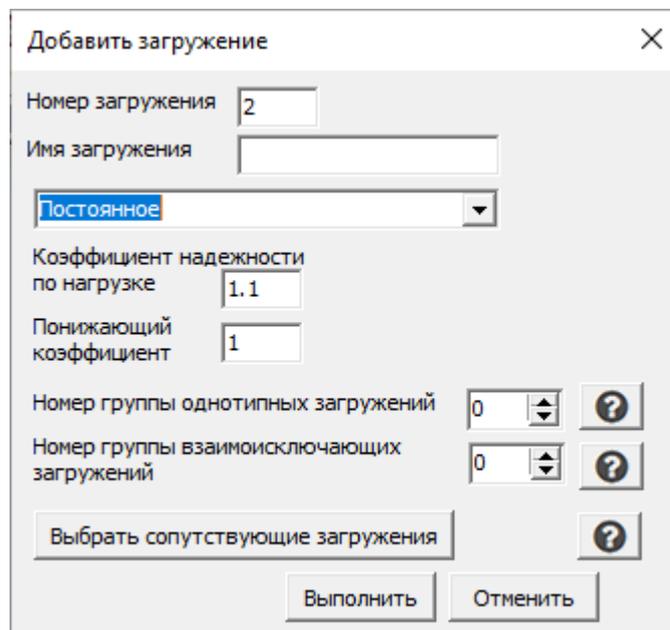


Рисунок 12. Диалоговое окно задания параметров загрузения

Параметры фермы

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

Количество загрузий: 2    Загрузка №1 - Собственный вес    \*Задаются нормативные значения нагрузок

Загрузка: 2    +    -    ↺

Параметры загрузки

Имя: TOTAL

Временное/длительное: [выбор]

Коэффициент надежности по нагрузке: 1

Номер группы однотипных загрузий: -

Номер группы взаимноисключающих загрузий: -

Погонная поперечная нагрузка

Сосредоточенные нагрузки

Позиция, м: 0    Q, кН: 0

Добавить    Заменить    Удалить

Сосредоточенные нагрузки

№	Позиция, м	Q, кН	Пояс	Сторона	Напр.
1	3.015	63.315	ВП	Лев.	V
2	6.030	63.315	ВП	Лев.	V
3	9.045	63.315	ВП	Лев.	V
4	6.030	63.315	ВП	Прав.	V
5	3.015	63.315	ВП	Прав.	V

Направление нагрузки

Нагрузки прикладываются

К правой стороне верхнего пояса

По оси Z0 системы координат фермы

По нормали к поясу фермы

Способ задания положения нагрузки

Позицией    Номером узла и смещением

Номером узла

Загрузка 2 - TOTAL

Отобразить

- Номера узлов
- Номера панелей верхнего пояса
- Номера раскосов
- Профили
- Материалы
- Шарниры
- Опоры
- Нагрузки
- Размеры, мм
- Позиции узлов, мм
- Расстояния между узлами, мм
- Оси Y элементов фермы
- Расчетная длина в пл. XZ элементов, мм
- Расчетная длина в пл. YZ элементов, мм

Загрузка: 2

Следующее загрузие

Предыдущее загрузие

Отключить все

Внести изменения в расчетную модель фермы и выйти

Рисунок 13. Конфигурация вкладки задания нагрузок

## 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.

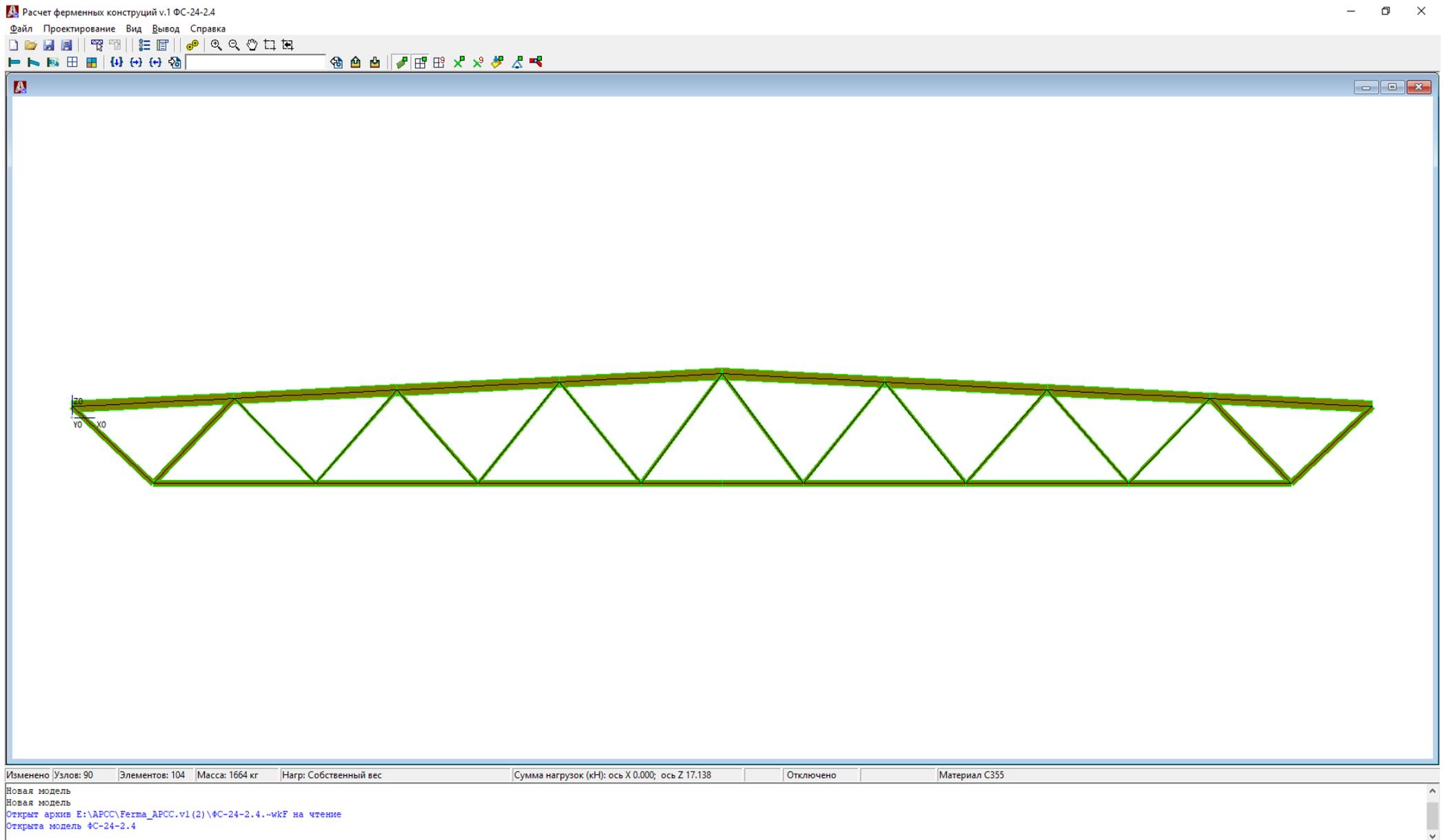


Рисунок 14. Отображение расчетной модели фермы в графическом окне

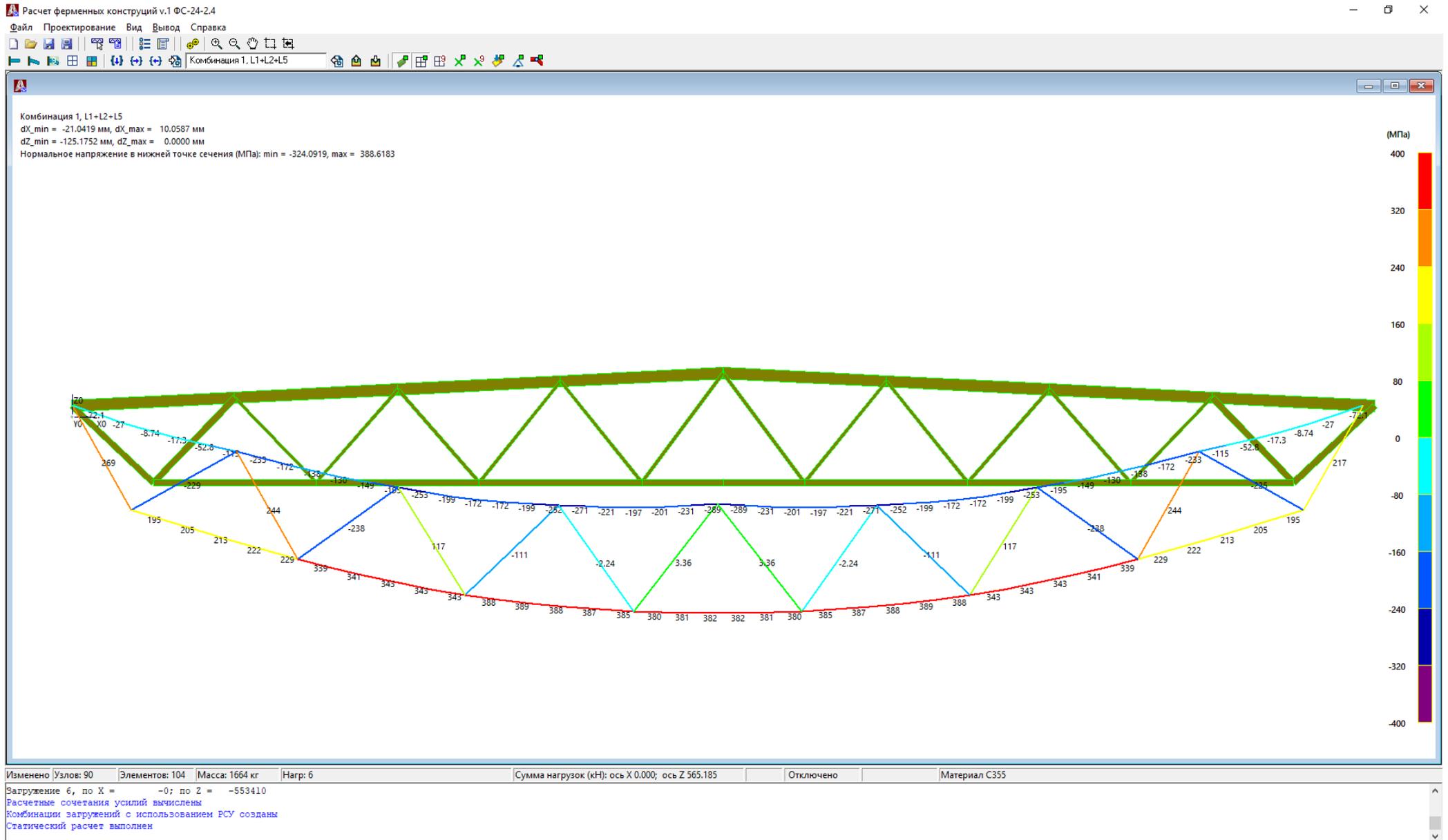


Рисунок 15. Отображение результатов на расчетной модели фермы в графическом окне

Проверки элементов фермы

Проверка элементов фермы | Конструктивные параметры | Расчет стоимости

Масса фермы, кг 1601.4

Верхний пояс | Нижний пояс | Раскосы | Опорные раскосы

Двутавр, сечение 20Б3 Масса 759.3 кг.

Расчетные сочетания усилий

№ элемента	N, кН	Mx, кН*м	Qz, кН
5	-362.7	22.8	-2.8
6	-347.5	22.74	13.5
8	-345.9	-22.01	46.1
8	-345.9	1.05	46.1
12	-836.2	20.92	3.8
14	-834.6	-9.22	36.3
17	-1132.8	27.13	-8
17	-1132.8	27.13	-8
23	-1200.8	23.54	-5.9
23	-1123.7	23.57	-6.6
23	-1123.7	20.29	-6.6

Коэффициенты использования

Центрально-сжатый | Сжато-изгибаемый

1. Прочность, п. 7.1.1 ф.(5)	0.87 (32)
2. Устойчивость в плоскости поясов (XZ), п. 7.1.3., 7.3.5, 7.3.6 ф.(7)	>5
3. Устойчивость в плоскости стенки (YZ), п. 7.1.3., 7.3.5, 7.3.6 ф.(7)	0.96 (32)
4. Местная устойчивость стенки, п. 7.3.2, 7.3.6, 7.3.11	0.36 (27)
5. Необходимость укрепления стенки поперечными ребрами, п. 7.3.3	Не требуется
6. Шаг поперечных ребер жесткости, п. 7.3.3	Не требуется
7. Местная устойчивость пояса 1, п. 7.3.8	0.16 (8)
8. Местная устойчивость пояса 2, п. 7.3.8	0.16 (8)
9. Предельная гибкость в плоскости поясов (XZ), табл. 32	>5
10. Предельная гибкость в плоскости стенки (YZ), табл. 32	0.29 (32)

\*Результаты проверок выдаются в системе координат элемента фермы  
 \*№ элемента - номер конечного элемента расчетной модели  
 \*Справа от коэффициента использования, в скобках - номер конечного элемента

Выполнить проверки

Система координат элемента фермы

Выход

Отобразить

- Номера узлов
- Номера панелей верхнего пояса
- Номера раскосов
- Профили
- Материалы
- Шарниры
- Опоры
- Нагрузки
- Размеры, мм
- Позиции узлов, мм
- Расстояния между узлами, мм
- Оси Y элементов фермы
- Расчетная длина в пл. XZ элементов, мм
- Расчетная длина в пл. YZ элементов, мм

Загрузка

1

Следующее загрузение

Предыдущее загрузение

Отключить все

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

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,  $\delta = 1 - 0.1N\lambda^2 / (AR_y)$

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

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.

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

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

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

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

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

11. Устойчивость пояса, п. 9.4.7

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

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

12. Предельная гибкость в плоскости поясов, табл. 32

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

13. Предельная гибкость в плоскости стенки, табл. 32

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

### 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,  $\delta = 1 - 0.1N\bar{\lambda}^2 / (AR_y)$

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

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.

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

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

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

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

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

11. Устойчивость пояса, п. 9.4.7

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

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

12. Предельная гибкость в плоскости поясов, табл. 32

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

13. Предельная гибкость в плоскости стенки, табл. 32

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

## 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)

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 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

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

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

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

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

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

6. Предельная гибкость в плоскости XZ, табл. 32

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y AR_y \gamma_c}$$

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

7. Предельная гибкость в плоскости YZ, табл. 32

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

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_x AR_y \gamma_c}$$

### 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

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y AR_y \gamma_c}$$

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

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

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_e AR_y \gamma_c}$$

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

#### 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)

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

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

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

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. ХZ, 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