

## Подбор сечений стальных строительных конструкций

Версия 3.1

Руководство пользователя

### Оглавление

#### **Введение 2**

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1.</b>  | <b><i>Используемые обозначения.....</i></b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>1.</b>  | <b><i>Единицы измерения и система координат .....</i></b>                      | <b>4</b>  |
| <b>2.</b>  | <b><i>Подбор сечений при задании РСУ.....</i></b>                              | <b>5</b>  |
| <b>2.1</b> | <b><i>Соглашения.....</i></b>  | <b>5</b>  |
| <b>2.2</b> | <b><i>Алгоритм подбора сечений .....</i></b>                                   | <b>5</b>  |
| <b>2.3</b> | <b><i>Исходные данные .....</i></b>  | <b>5</b>  |
| <b>3.</b>  | <b><i>Подбор сечений при получении РСУ из расчета многопролетной балки</i></b> | <b>7</b>  |
| <b>4.</b>  | <b><i>Алгоритм подбора прокатных двутавров, гнутых профилей и труб</i></b>     | <b>7</b>  |
| <b>4.</b>  | <b><i>Алгоритм подбора параметров сечения сварных двутавров ...</i></b>        | <b>8</b>  |
| <b>5.</b>  | <b><i>Алгоритм подбора двутавров с перфорированной стенкой .....</i></b>       | <b>9</b>  |
| <b>6.</b>  | <b><i>Список проверок сечений двутавров .....</i></b>                          | <b>10</b> |
| <b>6.1</b> | <b><i>Центрально-растянутые элементы .....</i></b>                             | <b>10</b> |
| <b>6.2</b> | <b><i>Сжатые элементы .....</i></b>  | <b>10</b> |
| <b>6.3</b> | <b><i>Растянуто-изгибаемые элементы.....</i></b>                               | <b>11</b> |
| <b>6.4</b> | <b><i>Сжато-изгибаемые элементы .....</i></b>                                  | <b>12</b> |
| <b>6.5</b> | <b><i>Изгибаемые элементы.....</i></b>   | <b>14</b> |
| <b>7.</b>  | <b><i>Список проверок сечений гнутых профилей и труб.....</i></b>              | <b>15</b> |

|     |                                      |    |
|-----|--------------------------------------|----|
| 7.1 | Центрально-растянутые элементы ..... | 15 |
| 7.2 | Сжатые элементы .....                | 16 |
| 7.3 | Растянуто-изгибаемые элементы.....   | 17 |
| 7.4 | Сжато-изгибаемые элементы .....      | 17 |
| 7.5 | Изгибаемые элементы.....             | 18 |
| 8.  | <b>Интерфейс пользователя</b> .....  | 20 |
| 8.1 | Файл проекта .....                   | 20 |
| 8.2 | Диалоговое окно .....                | 20 |
| 8.3 | Неудачное завершение подбора.....    | 23 |
|     | <b>Используемые источники</b> .....  | 28 |

## **Введение**

Программа подбора сечений предназначена для предварительного назначения параметров стальных конструкций на основании ограниченного набора исходных данных о конструкции, и действующих на неё нагрузок.

Программа позволяет подбирать сечения:

- прокатных двутавров с параллельными гранями полок (сортамент ГОСТ Р 57837);
- сварных труб круглого сечения (ГОСТ Р 58064);
- профилей гнутых замкнутых квадратного и прямоугольного сечений (ГОСТ 30245);
- сварных двутавров;
- балок из прокатных двутавров с перфорированной стенкой.

Критерий подбора сечений –минимальная масса конструкции.

В программе есть две возможности задания усилий, действующих на конструкцию:

- Задание РСУ из решения на модели здания в какой-либо расчетной программе, либо использование в качестве РСУ неблагоприятного сочетания нагрузок на колонну или балку
- Получение РСУ из расчета многопролетной балки.

При подборе сечений используются формулы и рекомендации нормативных документов

1. СП 16.13330.2017; Стальные конструкции, Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*, М., 2017 г;
2. Руководство по проектированию стальных конструкций многоэтажных зданий, М., 2018.; (стандарт организации СТО АРСС 11251254.001-018-3).

## 1. Используемые обозначения

|                        |  |
|------------------------|--|
| $A$                    | – площадь сечения брутто   |
| $A_n$                  | – площадь сечения нетто  |
| $i$                    | – радиус инерции сечения   |
| $l_{ef}$               | – расчетная длина  |
| $m_{ef}$               | – приведенный относительный эксцентриситет                           |
| $R_y$                  | – расчетное сопротивление стали по пределу текучести                 |
| $R_u$                  | – расчетное сопротивление стали по временному сопротивлению          |
| $W_{tn}$               | – момент сопротивления сечения, вычисленный для растянутого волокна  |
| $\gamma_c$             | – коэффициент условий работы   |
| $\gamma_m$             | – коэффициент надежности по материалу                                |
| $\gamma_p$             | – коэффициент надежности по ответственности                          |
| $\gamma_t$             | – коэффициент надежности по временному сопротивлению                 |
| $\Phi$                 | – коэффициент устойчивости при центральном сжатии                    |
| $\Phi_x$               | – коэффициент устойчивости в плоскости стенки при центральном сжатии |
| $\Phi_y$               | – коэффициент устойчивости в плоскости поясов при центральном сжатии |
| $\bar{\lambda}_f$      | – условная гибкость свеса пояса                                      |
| $\lambda_x, \lambda_y$ | – расчетные гибкости в плоскостях перпендикулярных x-x и y-y         |
| $\lambda_u$            | – предельная гибкость растянутых элементов*                          |
| $\bar{\lambda}_{uf}$   | – предельная условная гибкость свеса пояса                           |
| $\bar{\lambda}_w$      | – условная гибкость стенки   |

## 1. Единицы измерения и система координат

В программе используются следующие единицы измерения

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

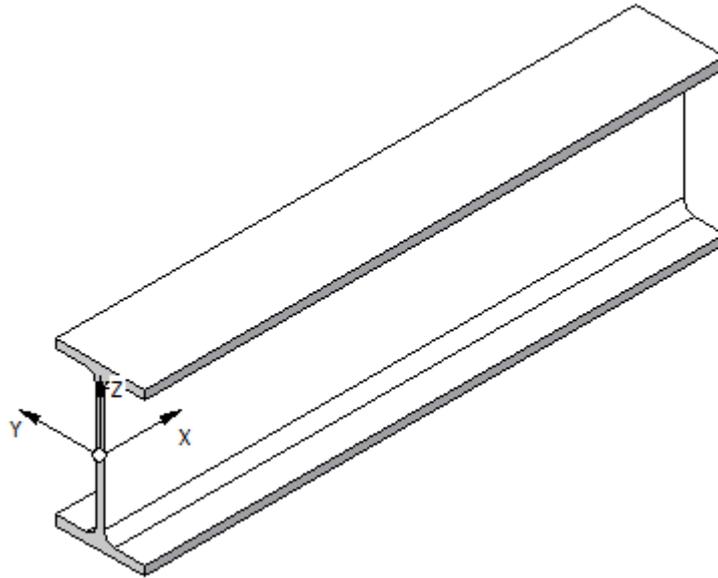


Рисунок 1. Система координат двутавра

## 2. Подбор сечений при задании РСУ

### 2.1 Соглашения

Конструктивный элемент (КЭ), для которого подбирается сечение может быть

- одним конструктивным элементом (колонной);
- группой конструктивных элементов;

Все участки КЭ имеют одинаковое сечение;

При вычислении изгибающих моментов от поперечной распределенной нагрузки, участок полагается разрезной балкой

На каждом участке может быть задано одно или несколько РСУ

### 2.2 Алгоритм подбора сечений

1. Для каждого РСУ автоматически назначается необходимый набор проверок в соответствии с СП 16.13330.2017:
  - для центрально-сжатых или растянутых элементов;
  - для сжато-изгибаемых элементов или растянуто-изгибаемых элементов;
  - для изгибаемых элементов;
2. Для всех сечений выбранной номенклатуры выполняются проверки, соответствующие типу элемента, вычисляются коэффициенты использования;
3. Для сварных сечений применяется один из двух алгоритмов поиска рациональной конфигурации сечения;
4. Выбирается сечение, при котором сумма масс всех участков минимальна, при условии, что все коэффициенты использования  $k_{ff} \leq 1.0$ .

### 2.3 Исходные данные

Для выполнения подбора сечения конструктивного элемента (КЭ) необходимо задать следующие данные:

- коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_n$ ;
- коэффициент условий работы  $\gamma_c$ ;
- марку стали;
- класс конструкций по НДС, п. 4.2.7 [1];
- вид сечения (сварной двутавр, прокатной двутавр, труба и т.д.);
- для прокатного двутаврового сечения - номенклатуру (балочный нормальный, широкополочный, колонный, и.т.д сортамента ГОСТ Р 57837 );
- для трубы – форму;
- предельные гибкости для сжатой и растянутой зон;
- для сварных и перфорированных двутавров задать дополнительные параметры.

Конструктивный элемент, например, колонна многоэтажного здания, может состоять из нескольких участков. Для каждого участка необходимо задать:

- длину участка;
- коэффициенты расчетных длин участка в двух плоскостях, рис. 1 и 2, которые назначаются исходя из вида опирания участка;
- шаг раскрепления сжатого пояса;

- нагрузки на участке (осевые силы, изгибающие моменты, поперечные силы, погонные нагрузки) в виде одной или нескольких групп расчетных сочетаний усилий (PCY).

Расчетные сочетания усилий на каждом из участков могут быть получены либо из простейшей модели нагружения элемента, например, колонны многоэтажного здания, либо взяты из комплексного расчета здания, например, в системе SCAD.

Для конструктивных элементов могут быть заданы любые комбинации силовых факторов (продольные и поперечные силы, изгибающие моменты в двух плоскостях).

Для конструктивных элементов, выполненных из перфорированных двутавров могут быть заданы только изгибающие моменты и (или) погонные нагрузки.

Поскольку PCY участков конструктивного элемента не связаны между собой, конструктивный элемент можно рассматривать как группу элементов, которые имеют одинаковое сечение, которое назначается по участку с максимальным коэффициентом использования.

### **3. Подбор сечений при получении РСУ из расчета многопролетной балки**

Подбор сечений выполняется в два этапа

#### **Первый этап – построение расчетной модели балки**

- Задается длина балки;
- Назначаются опоры и раскрепления;
- Создаются необходимые загрузки;
- Задаются коэффициенты сочетаний загрузок;
- Выполняется расчет, после которого автоматически создаются РСУ.

Ограничения

- Нагрузки задаются в вертикальной плоскости

#### **Второй этап – подбор сечения балки**

- Для каждого РСУ автоматически проверяется вид напряженного состояния.
- Если он не соответствует изгибаемому элементу, требуется задание расчетных длин в вертикальной плоскости и переход к алгоритму подбора по РСУ.
- Для всех сечений выбранной номенклатуры выполняются проверки, соответствующие изгибаемому элементу, вычисляются коэффициенты использования;
- Для сварных сечений применяется один из двух алгоритмов поиска рациональной конфигурации сечения;
- Выбирается сечение, при котором сумма масс всех участков минимальна, при условии, что все коэффициенты использования  $k_f \leq 1.0$ .

### **4. Алгоритм подбора прокатных двутавров, гнутых профилей и труб**

1. Для каждого РСУ определяется вид напряженного состояния участка КЭ, табл. 1:
  - центрально-растянутый;
  - центрально-сжатый;
  - растянуто-изгибаемый (внецентренно-растянутый);
  - сжато-изгибаемый (внецентренно-сжатый);
  - изгибаемый.
2. Для выбранной номенклатуры профилей выполняются проверки прочности, устойчивости, несущей способности и прогибов по критериям СНиП и СП 20.13330.2017, и определяются коэффициенты использования (КИ) для каждого участка и для каждого РСУ.
3. По результатам проверок выбирается профиль минимальной погонной массы, для которого все КИ меньше или равный 1.0.

После выполнения подбора сечений пользователь может проверить альтернативные варианты профилей данной номенклатуры.

## 4. Алгоритм подбора параметров сечения сварных двутавров

Сечения конструктивных элементов из сварных двутавров подбираются одним из двух алгоритмов:

- Алгоритм подбора сечений изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов, изложенный в книге В.В. Катюшина "Здания с каркасами из рам переменного сечения" [5]
- Алгоритм подбора сечений сжатых и сжато-изгибаемых элементов, изложенный в Пособии по проектированию стальных конструкций [3]

После подбора сечения по каждому алгоритму выполняются предписанные проверки по СП 16.13330.2017.

Как правило, *исходный вариант сечения*, полученный в результате работы алгоритмов, имеет коэффициенты использования больше 1.0 по некоторым видам проверок, выполняемых в соответствии с СП 16.13330.2017.

В этом случае проводится пошаговое изменение толщин полок и стенок для удовлетворения всем критериям проверок.

По умолчанию, принимается одно из двух полученных сечений, имеющее минимальную площадь.

Результат работы алгоритмов зависит от выбранных опций на вкладке *Параметры выбора сечения сварного двутавра*, рис. 2.

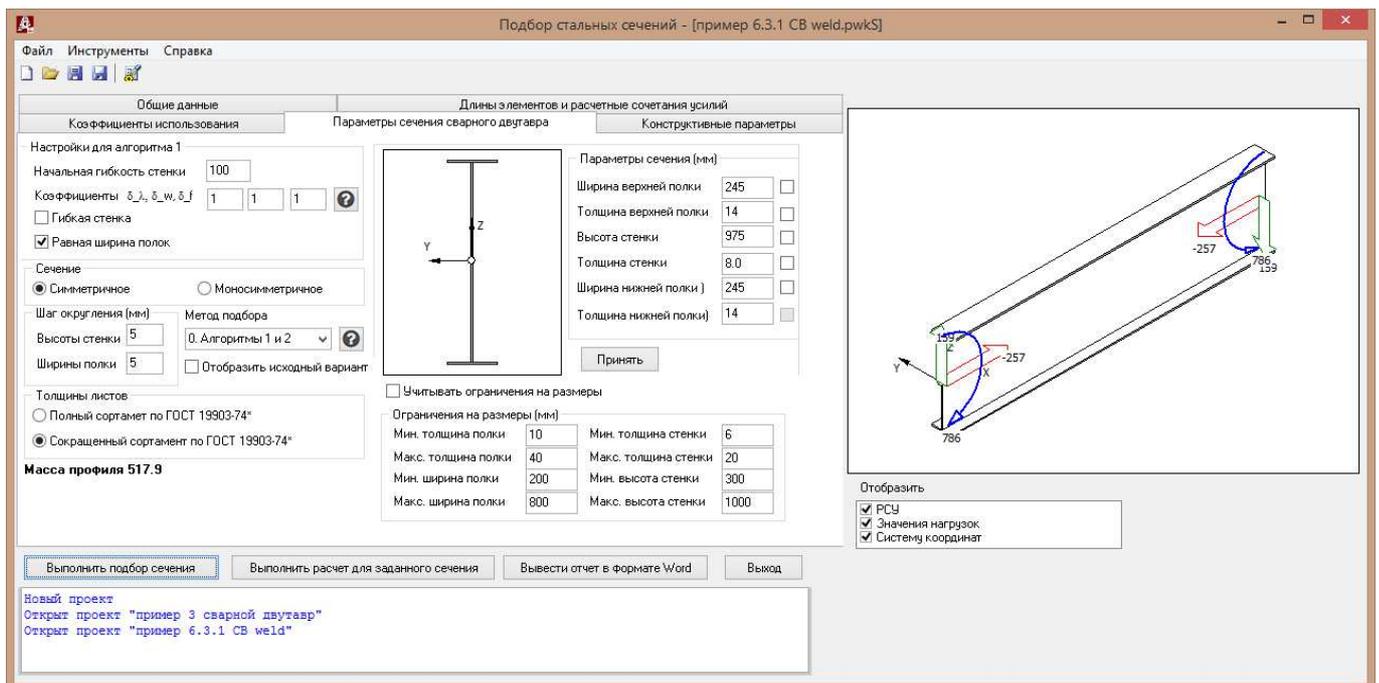


Рисунок 2. Вкладка *Параметры выбора сечения сварного двутавра*

## 5. Алгоритм подбора двутавров с перфорированной стенкой

Алгоритм подбора двутавров с перфорированной стенкой аналогичен алгоритму подбора сечений прокатных двутавров. При этом кроме общих параметров при подборе учитываются степень развития прокатного профиля (отношение высоты развитой балки к высоте исходного двутавра), и угол выреза  $\alpha$ , которые задаются на вкладке *Параметры выбора балки с перфорированной стенкой*, рис. 3.

Балки с перфорированной стенкой проверяются только на действие изгибающего момента и перерезывающей силы. При этом дополнительно выполняются проверки по п. М.5.2-М.5.6 СП 16.13330.2017.

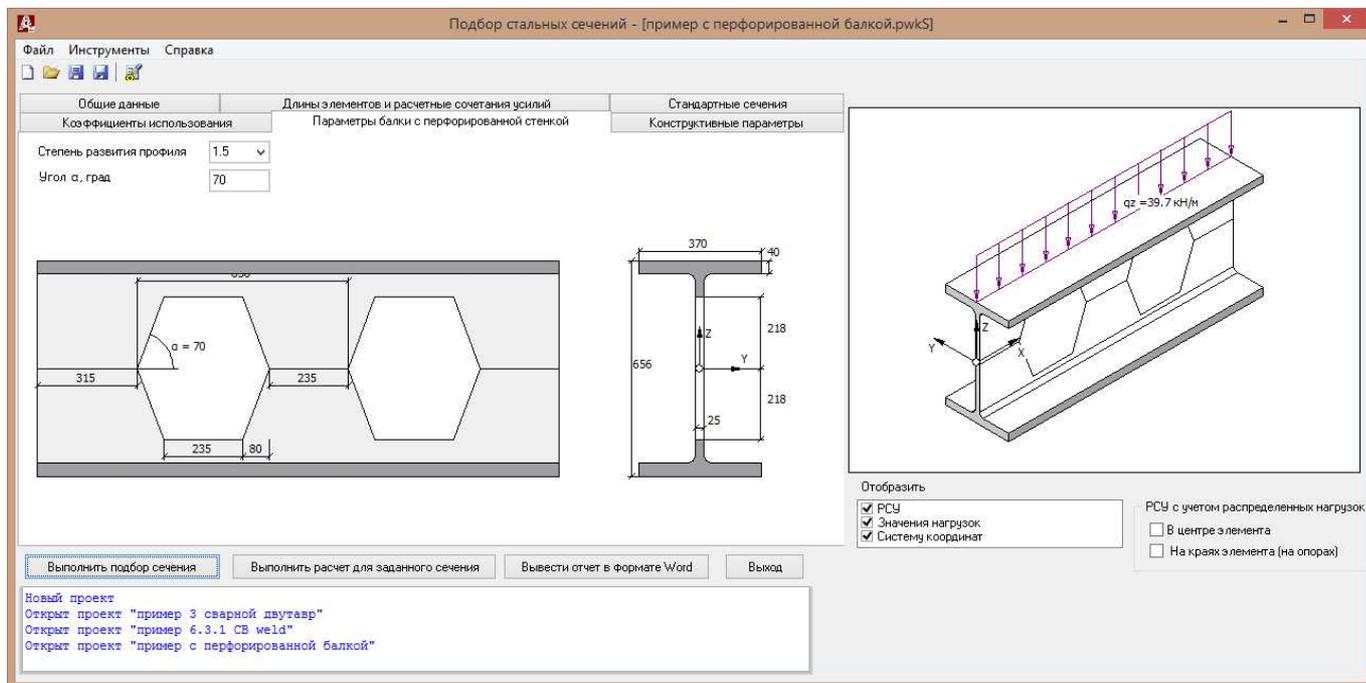


Рисунок 3. Вкладка *Параметры выбора балки с перфорированной стенкой*

## 6. Список проверок сечений двутавров

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

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 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.

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

### 6.2 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

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

### 6.3 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)

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

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

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.

Если выполняется условие  $\frac{\bar{\lambda}_w}{2.3} < 1$ , 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

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

#### 6.4 Сжато-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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **7. Список проверок 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.

### **7.1 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 XZ, п. 10.4.1, 10.4.2. табл. 33.

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

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

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

## 7.2 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

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

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

6. Предельная гибкость в плоскости XZ, табл. 32

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

7. Предельная гибкость в плоскости YZ, табл. 32

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

### 7.3 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

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

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

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

### 7.4 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

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

11. Предельная гибкость в плоскости XZ, табл. 32

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

## 7.5 Изгибаемые элементы

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

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

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)

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

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. XZ, п. 8.5.18 (не выполняется для круглых труб)

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

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

## 8. Интерфейс пользователя

### 8.1 Файл проекта

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

### 8.2 Диалоговое окно

Диалоговое окно программы для *Нового проекта* показано на рис. 4.

*Главное меню* состоит из двух пунктов.

Раздел *Файл* содержит команды чтения и записи проекта, и вывода отчета. Эти команды вынесены на *Панель инструментов*.

Раздел *Файл* также содержит список ранее открытых *файлов проектов*, выбрав которые, можно открыть соответствующий проект.

В исходном состоянии в *Главном окне* доступны вкладки:

*Общие данные, Длины элементов и расчетные сочетания усилий, Стандартные сечения и Конструктивные параметры*

На вкладке *Общие данные* пользователь должен выбрать:

- тип сечения (двутавры прокатные, сварные, балки с перфорированной стенкой и т.д.);
- для прокатного двутаврового сечения и перфорированного двутавра следует выбрать номенклатуру (балочный нормальный, широкополочный, колонный, и т.д); для трубы – форму;
- марку стали;
- способ задания РСУ

Флаг *Учитывать ограничения на размеры сечения* позволяет задать дополнительные ограничения при подборе сечения.

На вкладке *Конструктивные параметры* задаются:

- предельные гибкости для сжатой и растянутой зон.
- коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_n$ ;
- коэффициент условий работы  $\gamma_s$ ;
- класс конструкций по НДС, п. 4.2.7 [1];
- данные для определения фб

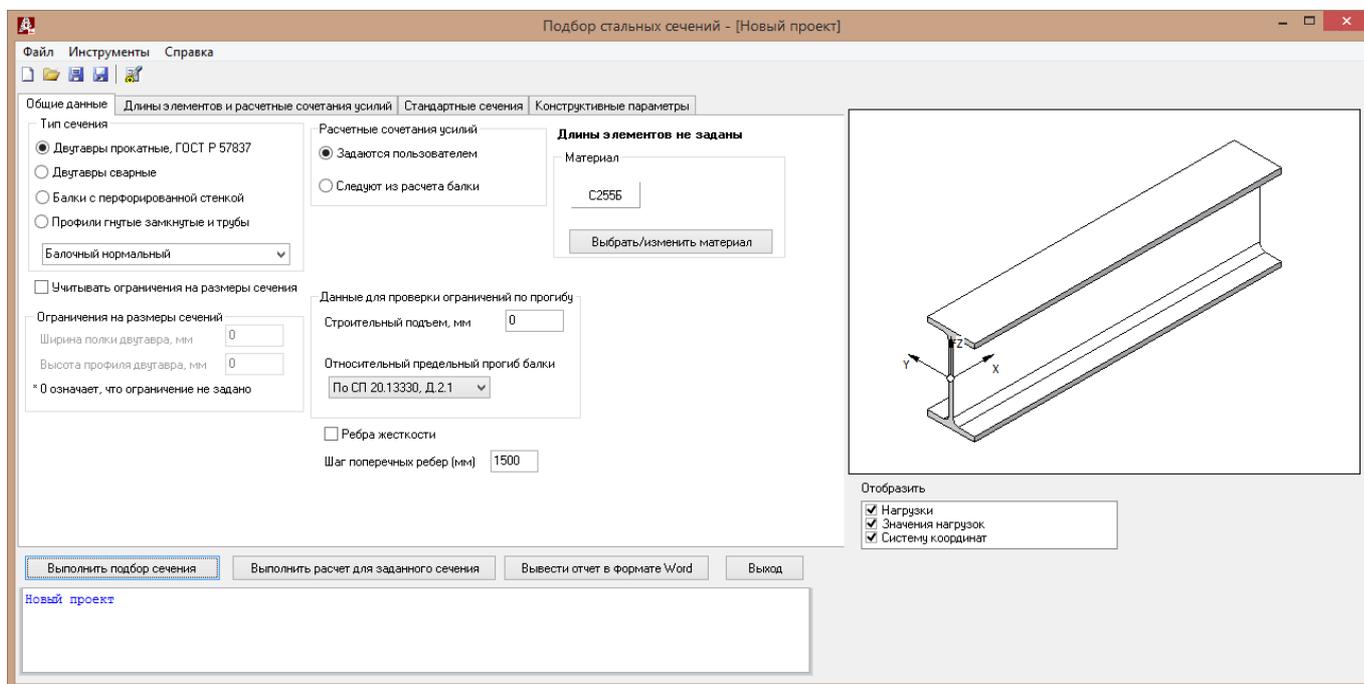


Рисунок 4. Диалоговое окно программы

В том случае, если РСУ задается пользователем, на вкладке *Длины элементов и расчетные сочетания усилий*, рис. 5, задаются:

- длины участков;
- расчетные длины или коэффициенты расчетных длин участков в двух плоскостях, которые назначаются исходя из вида опирания участка;
- шаг раскрепления сжатого пояса;
- РСУ на участке (осевые силы, изгибающие моменты, поперечные силы).
- Для участка, который является однопролетной балкой, можно дополнительно задать погонную равномерную нагрузку в плоскости стенки двутавра – плоскости YZ. В соответствии с этой нагрузкой к заданным РСУ будут добавлены изгибающий момент в центре участка и реакции в опорах на концах участка.
- Заданные РСУ отображаются нажатием кнопки *Показать РСУ*.
- Для вычисления КИ по условиям жесткости для изгибаемых элементов необходимо задать коэффициент перехода к нормативной нагрузке..

При нажатия кнопки *Выполнить подбор сечения* выполняется попытка найти сечение, удовлетворяющее заданным параметрам, при котором конструктивный элемент будет иметь минимальную массу.

Если сечение, удовлетворяющее заданным условиям, существует, в главном окне появляются две дополнительные вкладки: *Сечение* и *Коэффициенты использования*. Сечение сварного двутавра отображается на вкладке *Параметры выбора сечения сварного двутавра*,

На вкладке *Сечение* либо *Параметры выбора сечения сварного двутавра* отображается подобранное сечение и масса конструктивного элемента, рис. 6, 7.

На вкладке *Коэффициенты использования* выводятся КИ для каждого вида напряженного состояния конструктивного элемента, рис. 8.

Пользователь может проверить альтернативные варианты сечений, выбрав их на вкладке *Сечение*, либо изменив размеры сварного сечения, и нажав кнопку *Выполнить расчет для заданного сечения*, сравнить массы и КИ этих вариантов с полученными программным путем.

При нажатии кнопки *Вывести отчет в формате Word* генерируется отчет, содержащий исходные данные, основные расчетные параметры и коэффициенты использования.

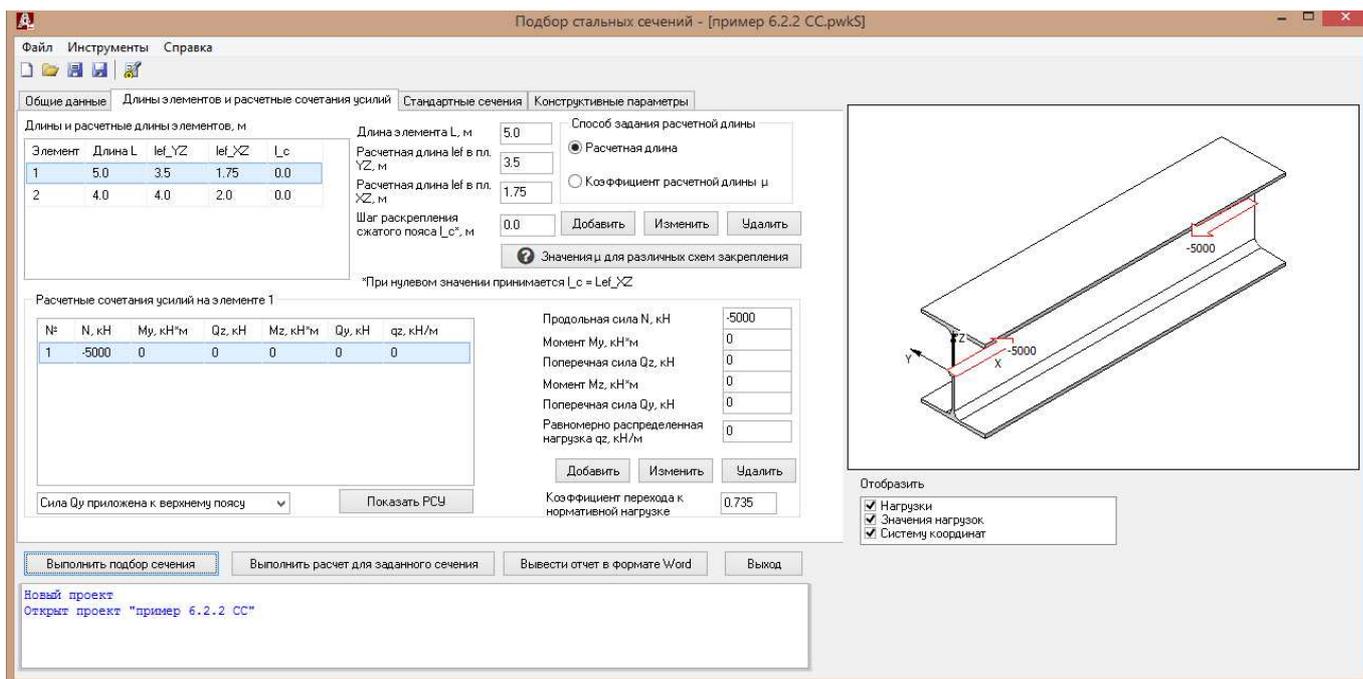


Рисунок 5. Диалоговое окно программы, задание параметров участков

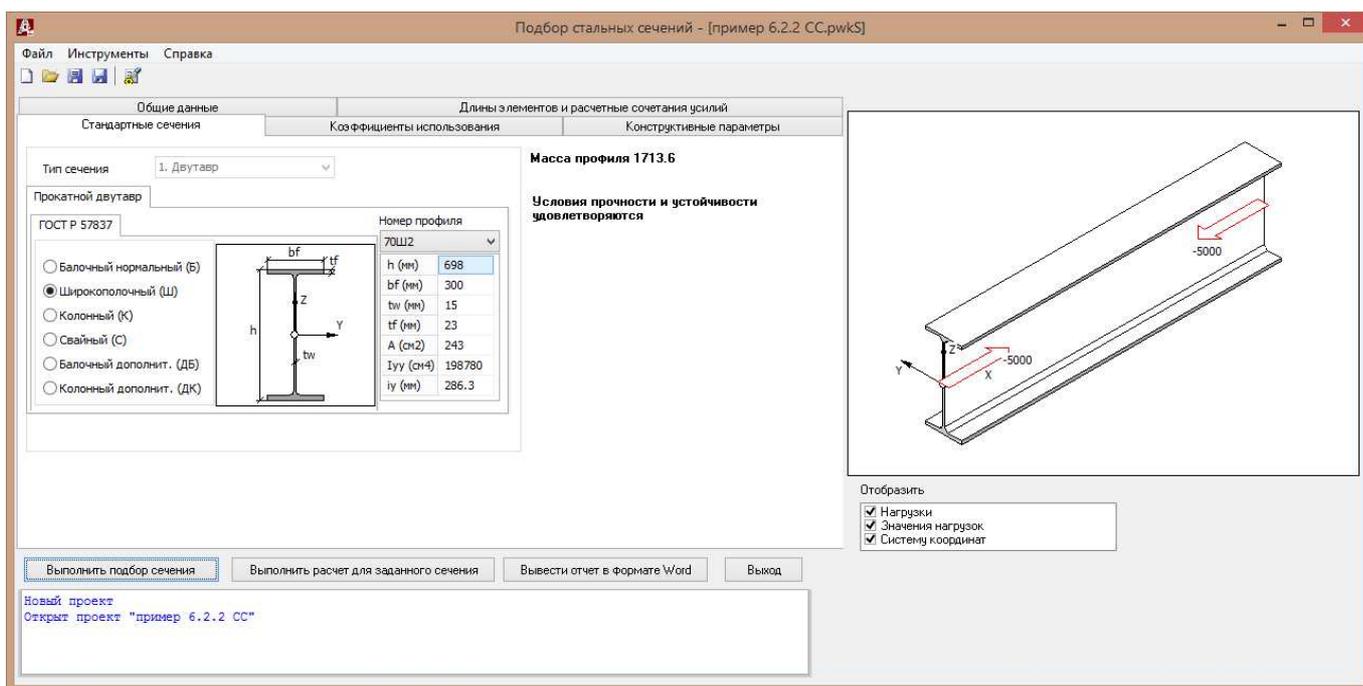


Рисунок 6. Диалоговое окно программы, выбранное прокатное сечение КЭ

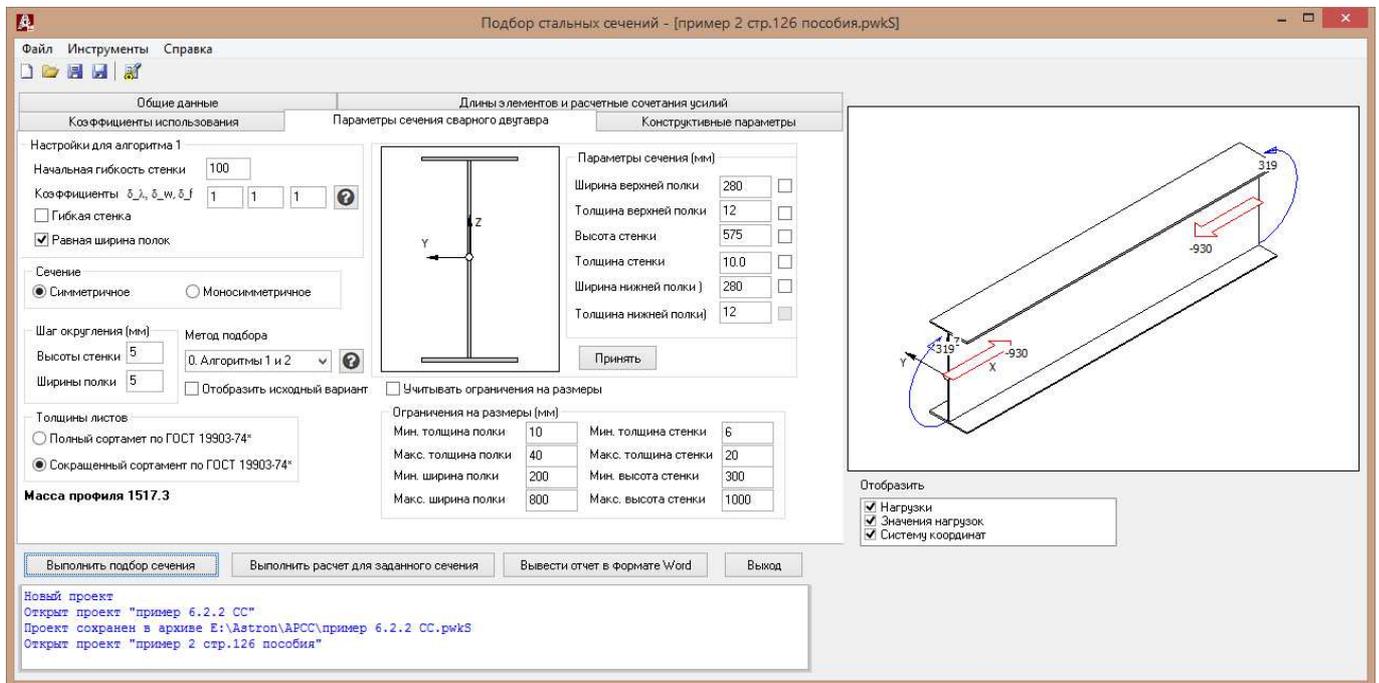


Рисунок 7. Диалоговое окно программы, выбранное сварное сечение КЭ

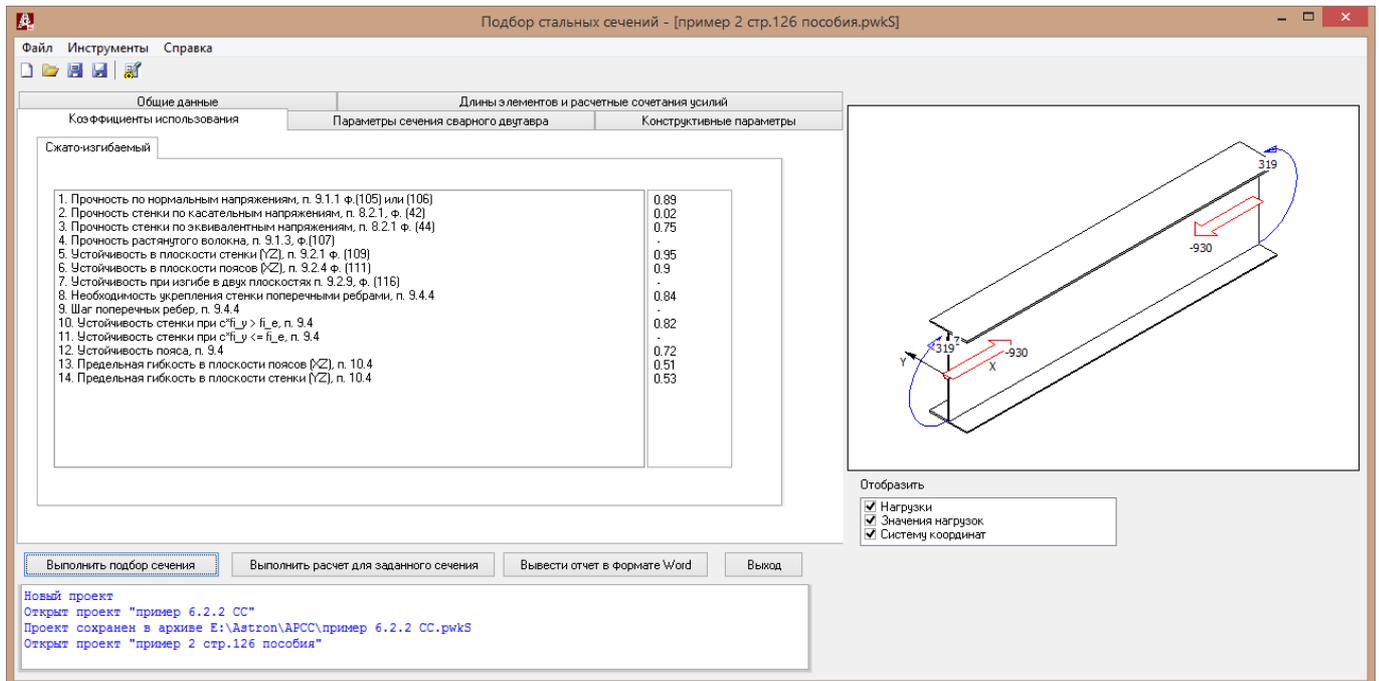


Рисунок 8. Диалоговое окно программы, коэффициенты использования

### 8.3 Неудачное завершение подбора

Подбор сечения может закончиться неудачно по одной из следующих причин:

1. Выбранная марка стали не содержит требуемого диапазона толщин;
2. Выбранная марка стали имеет недостаточно высокое расчетное сопротивление;
3. При заданных РСУ и расчетных длинах решение не существует для выбранной номенклатуры профилей.
4. Заданные нагрузки слишком велики, чтобы им соответствовал какой-либо профиль.

В последних трех случаях на вкладке *Сечение* выводится последний профиль проверяемого сортамента, рис. 9, а на вкладке *Коэффициенты использования* – соответствующие КИ, рис. 10.

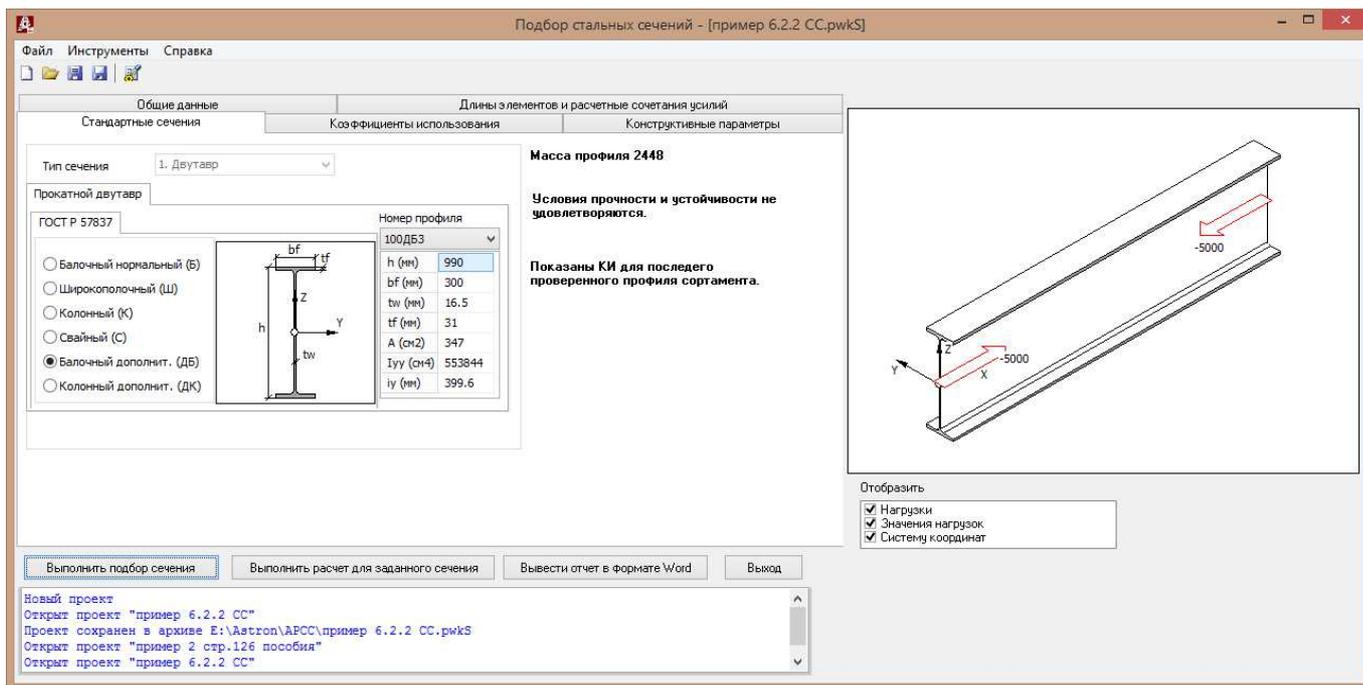


Рисунок 9. Диалоговое окно программы после неудачного подбора

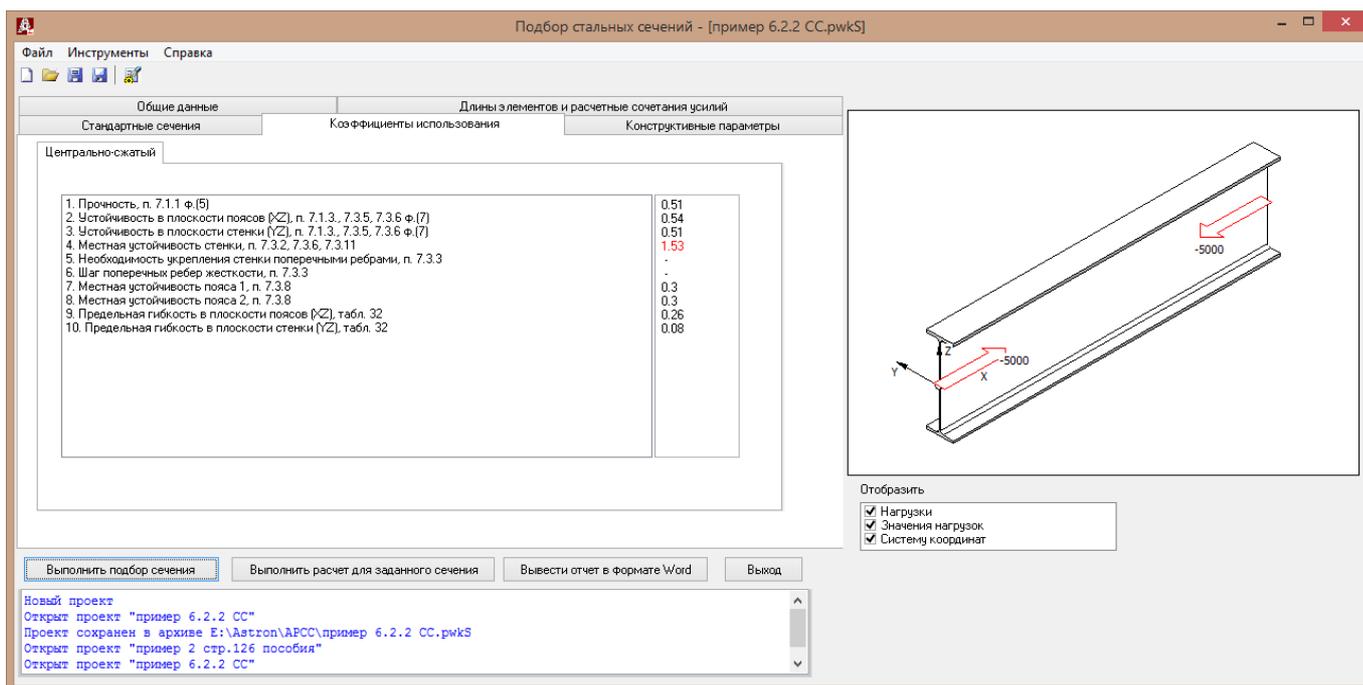


Рисунок 10. Диалоговое окно программы, коэффициенты использования после неудачного подбора

## 9. Панель создания расчетной модели многоопорной балки

На вкладке Расчетная модель балки задаются исходные данные для расчета многопролетной балки, рис. 11.

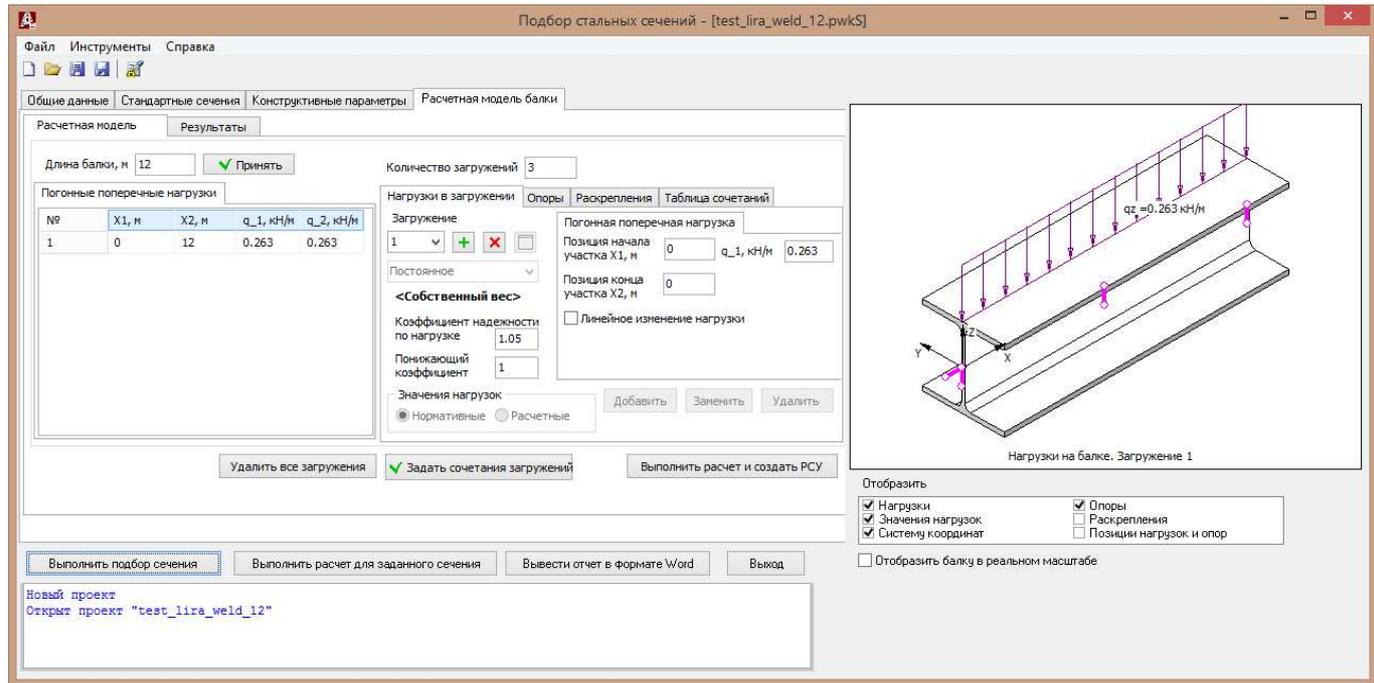


Рисунок 11. Панель создания модели многопролетной балки

Вначале задается длина балки, после чего становится доступен интерфейс задания нагрузок (загрузений), опор, раскреплений и сочетаний загрузений. При этом автоматически создается загрузка *Собственный вес*.

На вкладке *Нагрузки в загрузении* можно создать новое загрузение, рис. 12, в котором доступны виды нагрузок

- Сосредоточенные;
- Погонные поперечные;
- Распределенные продольные.

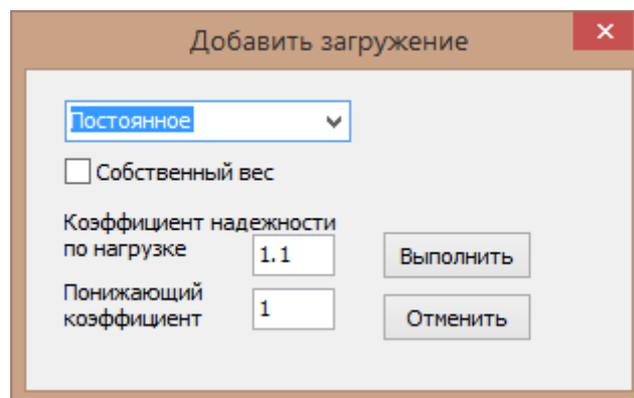


Рисунок 12. Панель создания загрузения

На панели *Таблицы нагрузок*, рис. 13 нагрузки могут быть заполнены в виде таблицы вручную, либо вставлены из буфера обмена.

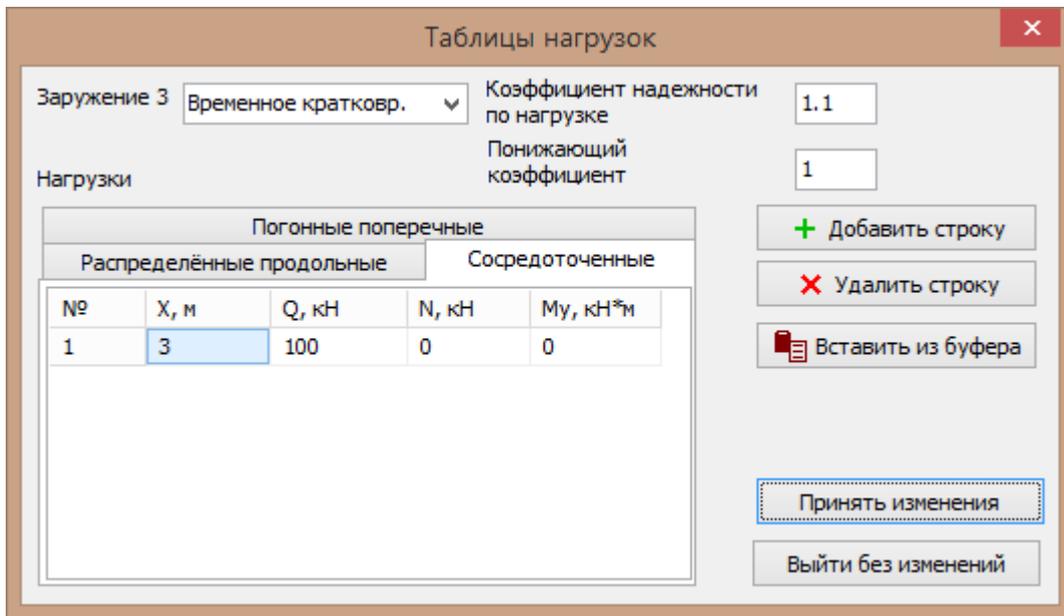


Рисунок 13. Панель Таблицы нагрузок

На вкладке *Опоры* задаются опоры на балке двумя способами, рис. 14:

- По степеням свободы в произвольных позициях;
- Заданием шарнирных опор многопролетной балки.

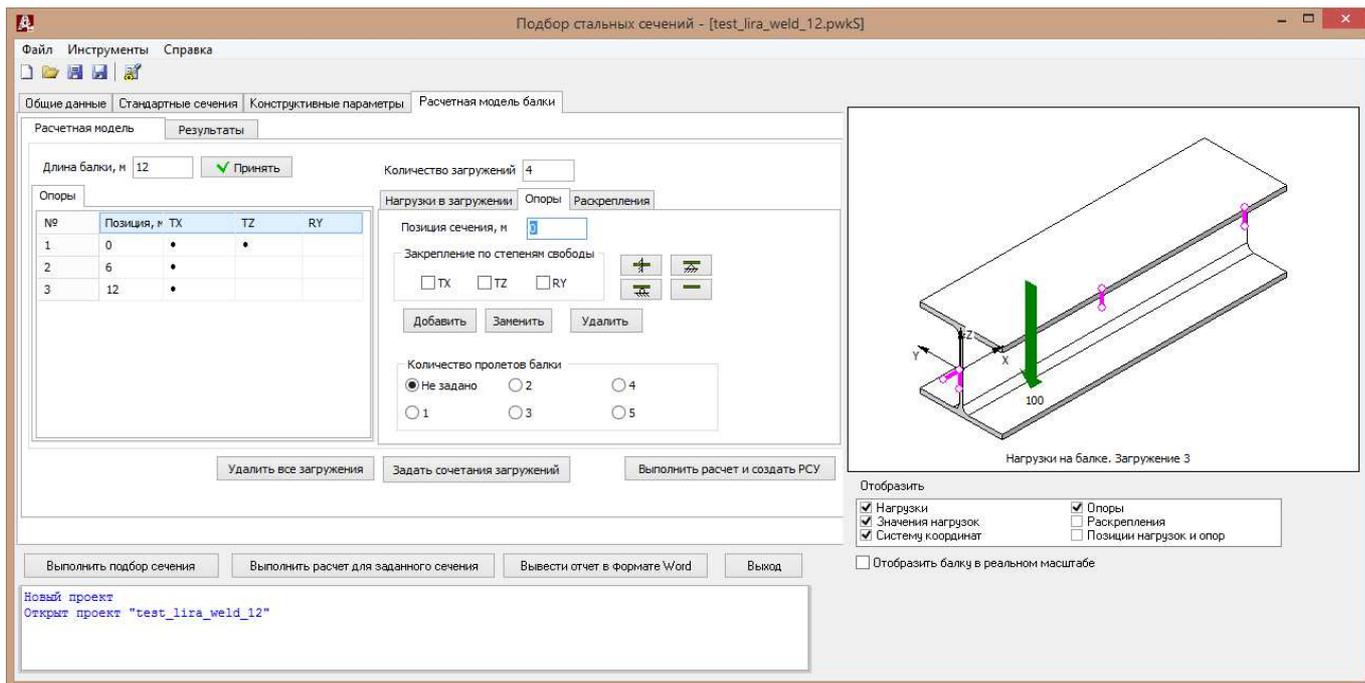


Рисунок 14. Задание опор

На вкладке *Раскрепления* задаются раскрепления в плоскости XY, рис. 15:

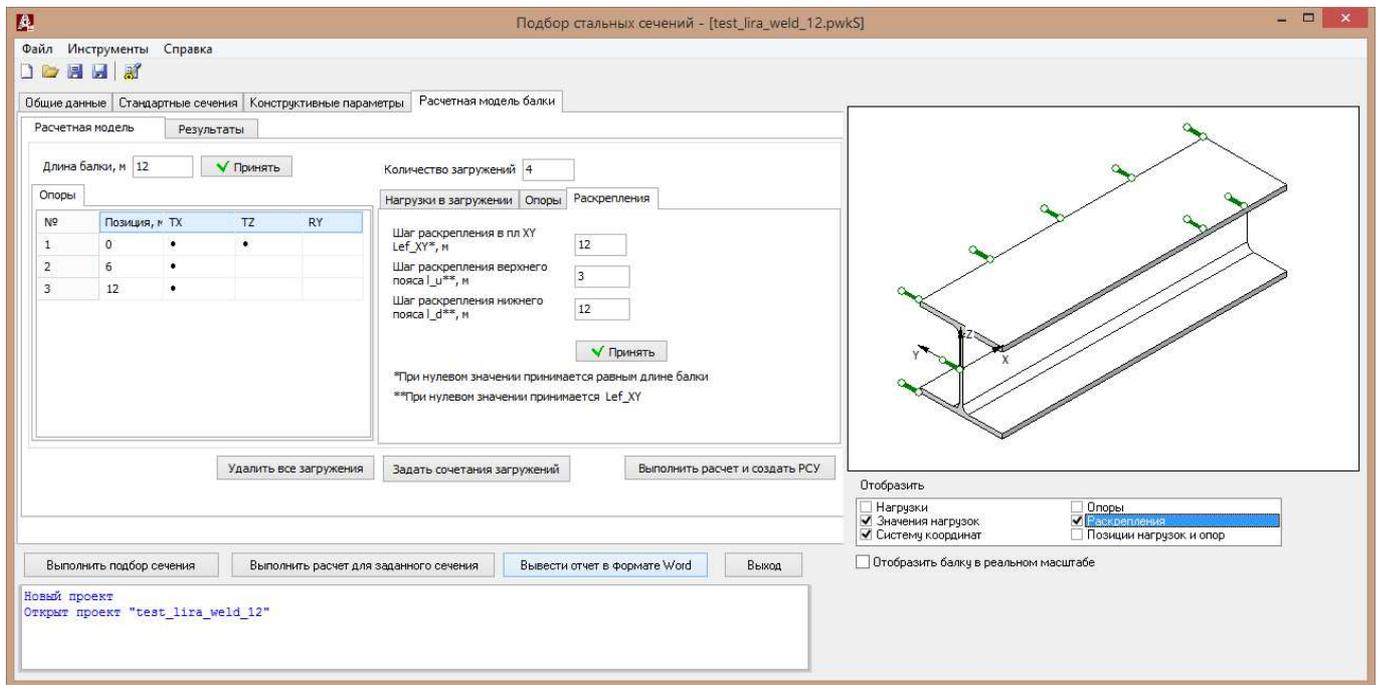


Рисунок 15. Задание раскреплений

На панели *Сочетания загружений*, рис. 16 отображаются сочетания, созданные по умолчанию, и заданные пользователем вручную, либо вставленные из буфера обмена.

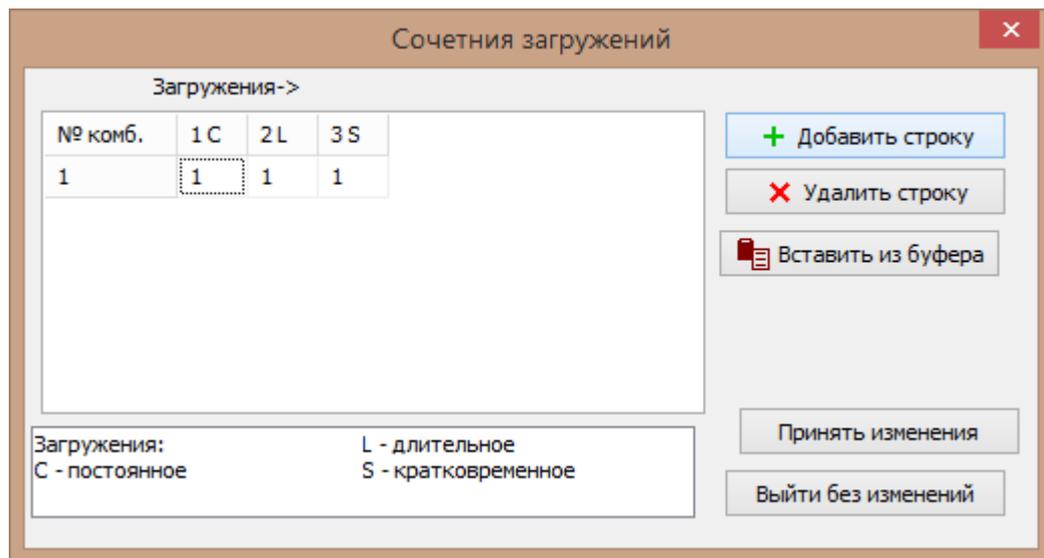


Рисунок 16. Панель Сочетания загружений

После выполнения расчета на вкладке *Результаты* отображаются эпюры силовых факторов по загружениям и сочетаниям, рис. 17. На основной панели становится доступной вкладка *Длины элементов и расчетные сочетания усилий*, на которой отображаются РСУ, полученные из расчета балки, рис. 18.

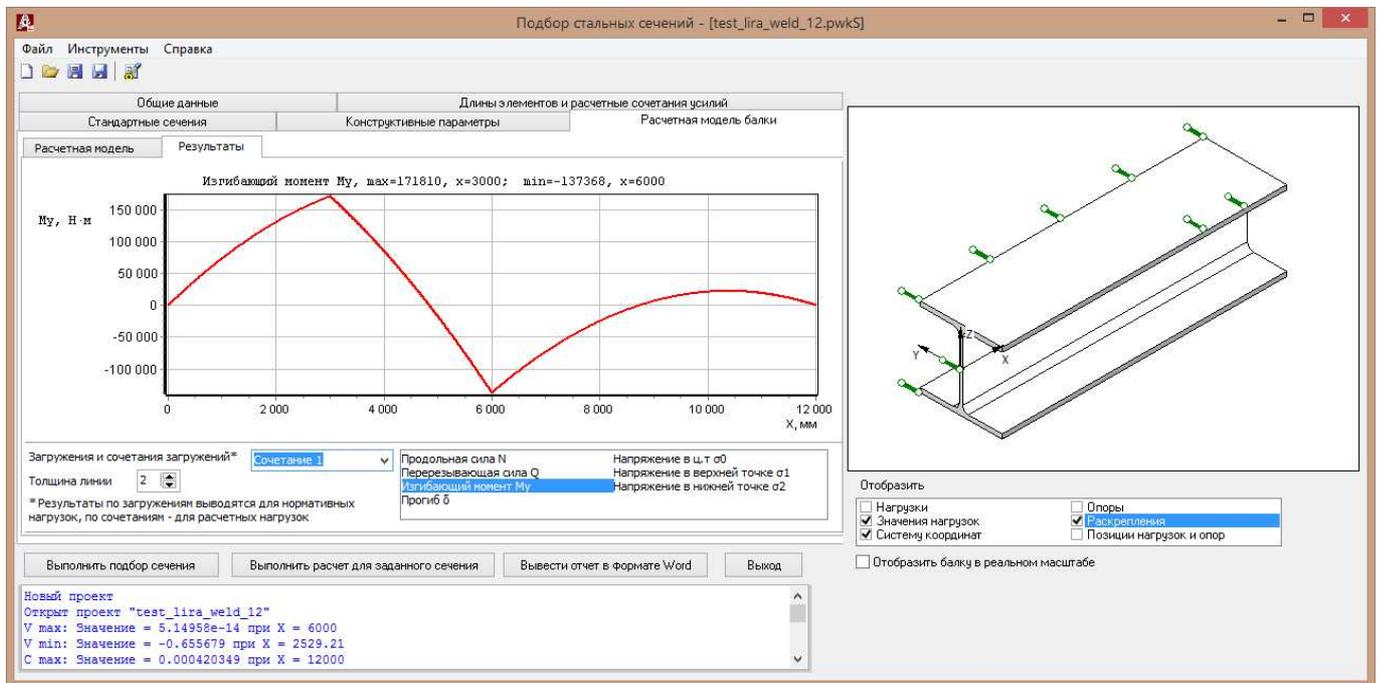


Рисунок 17. Отображение результатов расчета многоопорной балки

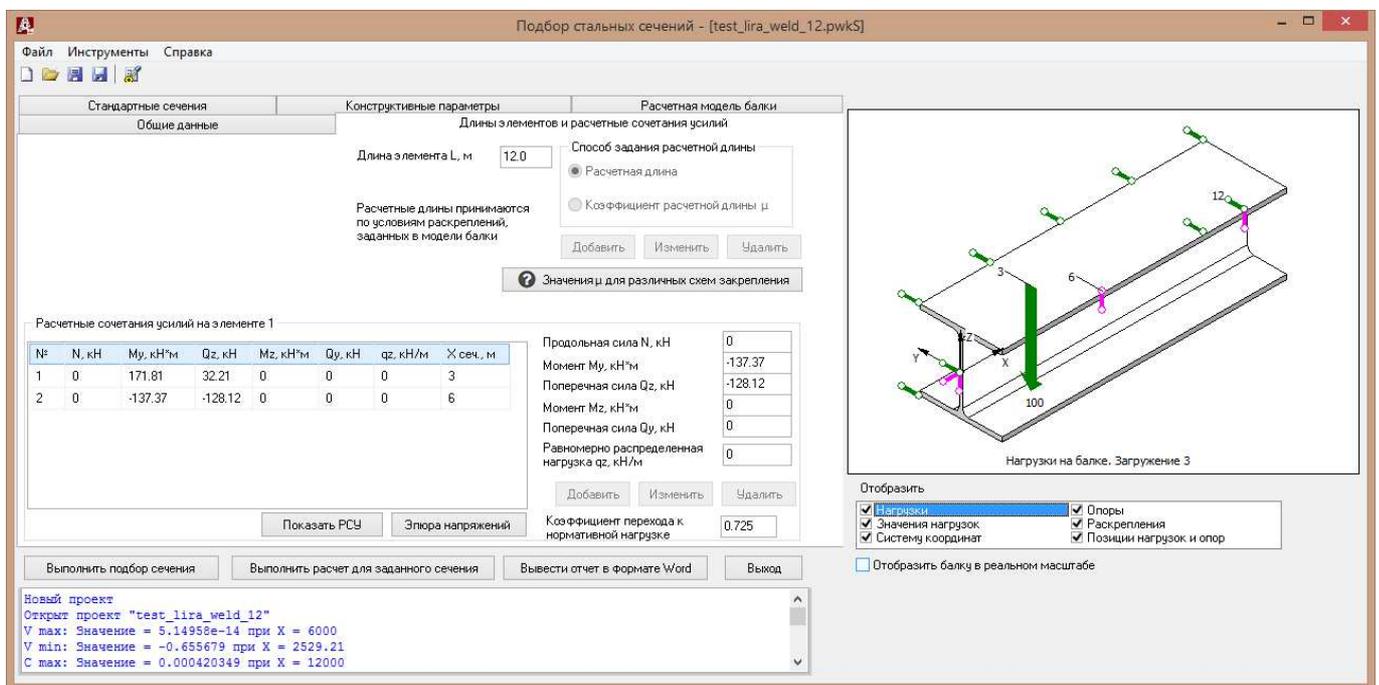


Рисунок 18. РСУ, полученные из расчета многоопорной балки

### Используемые источники

1. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*.
2. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». 2016
3. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). ЦНИИСК им. Кучеренко, М. 1989 г.
4. Руководство по проектированию стальных конструкций многоэтажных зданий. Стандарт организации СТО АРСС 11251254.001-018-3. М. 2018

5. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство), Изд. "АСВ", М. 2018