

## Подбор сечений стальных строительных конструкций

Версия 4.1

Руководство пользователя

### Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1. Единицы измерения и система координат</b>	<b>4</b>
<b>1. Интерфейс пользователя</b>	<b>5</b>
1.1 Файл проекта	5
1.2 Диалоговое окно	5
1.3 Неудачное завершение подбора	8
1.4 Панель создания расчетной модели многоопорной балки	12
1.5 Панель создания расчетной модели стойки	18
<b>2. Подбор сечений при задании РСУ</b>	<b>10</b>
2.1 Соглашения	10
2.2 Алгоритм подбора сечений	10
2.3 Исходные данные	10
<b>3. Подбор сечений при получении РСУ из расчета многопролетной балки</b>	<b>12</b>
<b>4. Подбор сечений при получении РСУ из расчета стойки</b>	<b>17</b>
<b>5. Алгоритм подбора прокатных двутавров, гнутых профилей и труб</b>	<b>23</b>
<b>5. Алгоритм подбора параметров сечения сварных двутавров</b>	<b>24</b>
<b>6. Алгоритм подбора двутавров с перфорированной стенкой</b>	<b>25</b>
<b>7. Список проверок сечений двутавров</b>	<b>26</b>

<b>7.1</b>	<b>Центрально-растянутые элементы .....</b>	<b>26</b>
<b>7.2</b>	<b>Сжатые элементы .....</b>	<b>26</b>
<b>7.3</b>	<b>Растянуто-изгибаемые элементы.....</b>	<b>27</b>
<b>7.4</b>	<b>Сжато-изгибаемые элементы .....</b>	<b>28</b>
<b>7.5</b>	<b>Изгибаемые элементы.....</b>	<b>30</b>
<b>8.</b>	<b><i>Список проверок сечений гнутых профилей и труб.....</i></b>	<b>31</b>
<b>8.1</b>	<b>Центрально-растянутые элементы .....</b>	<b>31</b>
<b>8.2</b>	<b>Сжатые элементы .....</b>	<b>32</b>
<b>8.3</b>	<b>Растянуто-изгибаемые элементы.....</b>	<b>33</b>
<b>8.4</b>	<b>Сжато-изгибаемые элементы .....</b>	<b>33</b>
<b>8.5</b>	<b>Изгибаемые элементы.....</b>	<b>34</b>
	<b><i>Используемые источники .....</i></b>	<b>35</b>

## **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.
- балок из составных сечений:
  - тавра с приваренной пластиной в качестве верхнего пояса;
  - тавра с приваренной пластиной в качестве нижнего пояса;
  - двутавра с приваренной пластиной к нижнему поясу.

Критерий подбора сечений –минимальная масса конструкции.

В программе есть три возможности формирования 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;
- Получение РСУ из расчета стойки.

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. Единицы измерения и система координат

В программе используются следующие единицы измерения

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

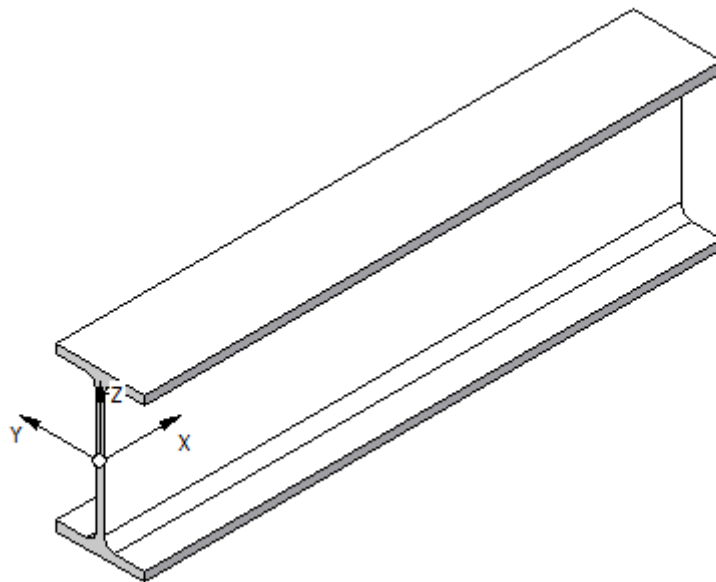


Рисунок 1. Система координат двутавра

# 1. Интерфейс пользователя

## 1.1 Файл проекта

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

## 1.2 Диалоговое окно

Диалоговое окно программы для *Нового проекта* показано на рис. 2.

Раздел *Файл Главного меню* 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 выбирают:

- ☐ 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;
- ☐ марка 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  $\phi_b$

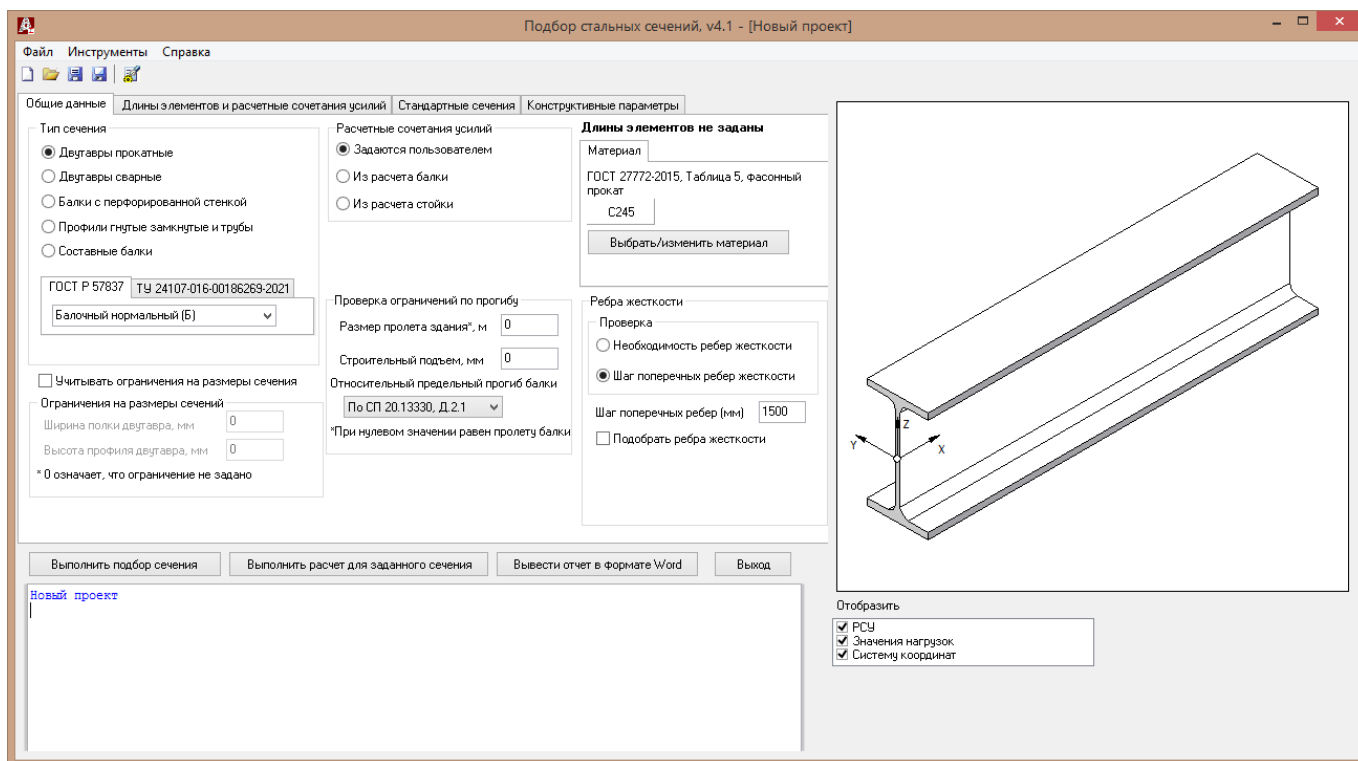


Рисунок 2. Диалоговое окно программы

В том случае, если РСУ задается пользователем, на вкладке *Длины элементов и расчетные сочетания усилий*, рис. 3, задаются:

- ❑ длины элементов (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 XZ. 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*.

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 появляется дополнительная вкладка - *Коэффициенты использования*.

На вкладке *Стандартные сечения* либо *Параметры выбора сечения сварного двутавра* отображается подобранное сечение и масса конструктивного элемента, рис. 4, 5.

На вкладке *Коэффициенты использования* выводятся КИ для каждого вида напряженного состояния конструктивного элемента, рис. 6.

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 вариантом, полученным программным путем.

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

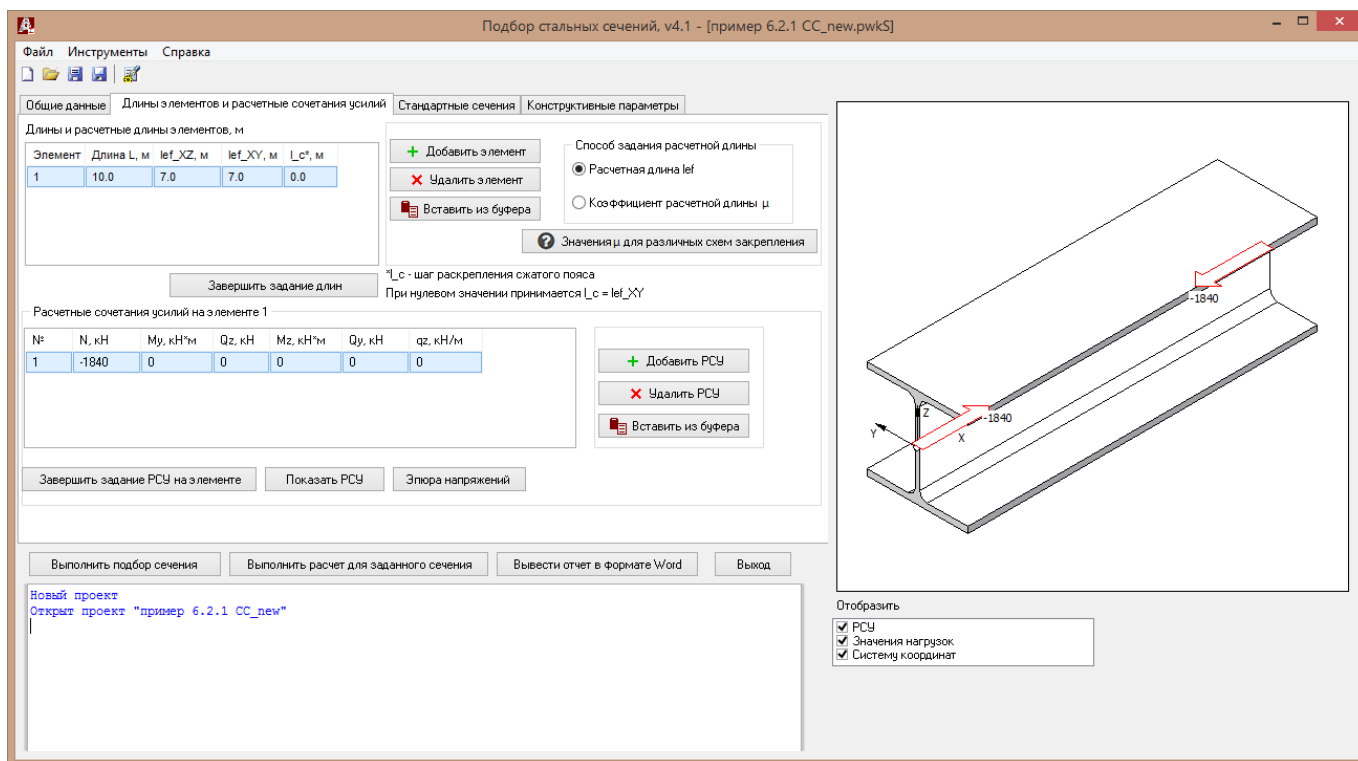


Рисунок 3. Диалоговое окно программы, задание параметров участков

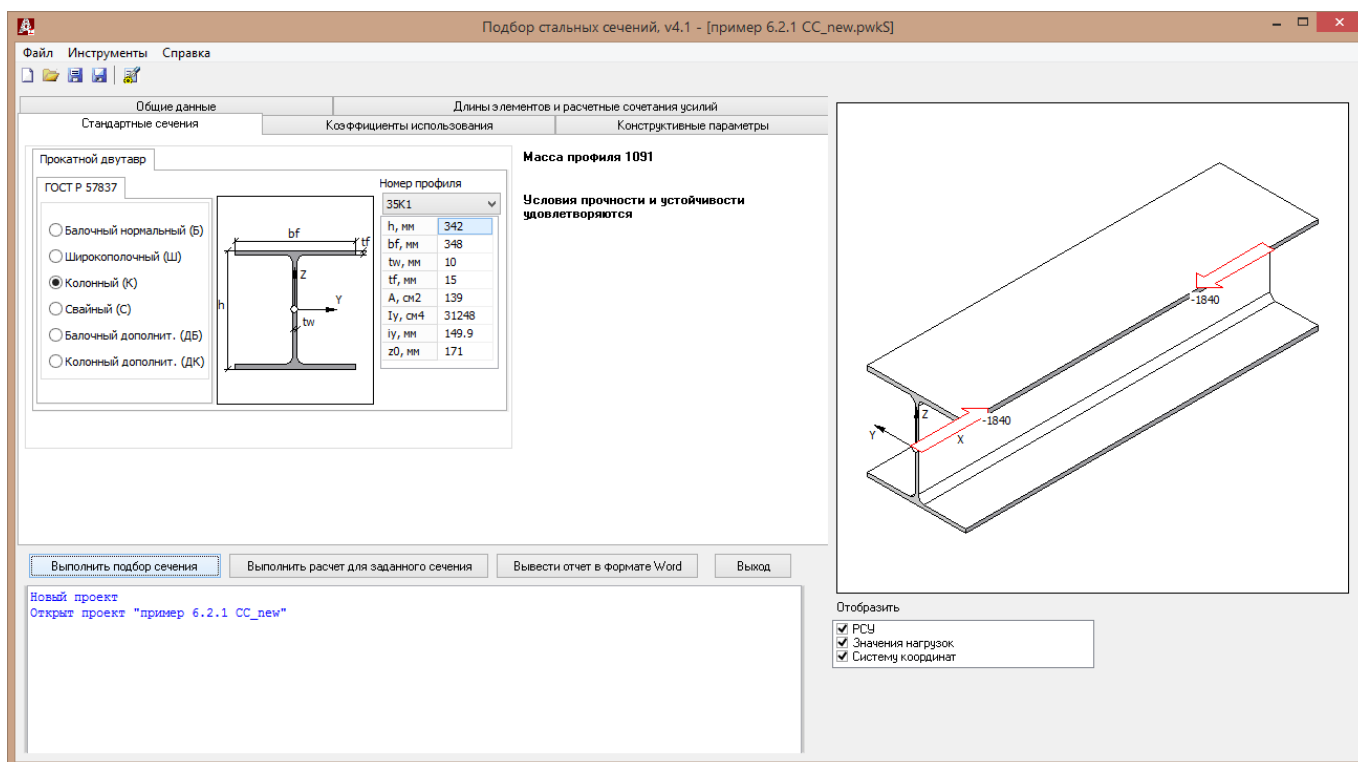


Рисунок 4. Диалоговое окно программы, выбранное прокатное сечение КЭ

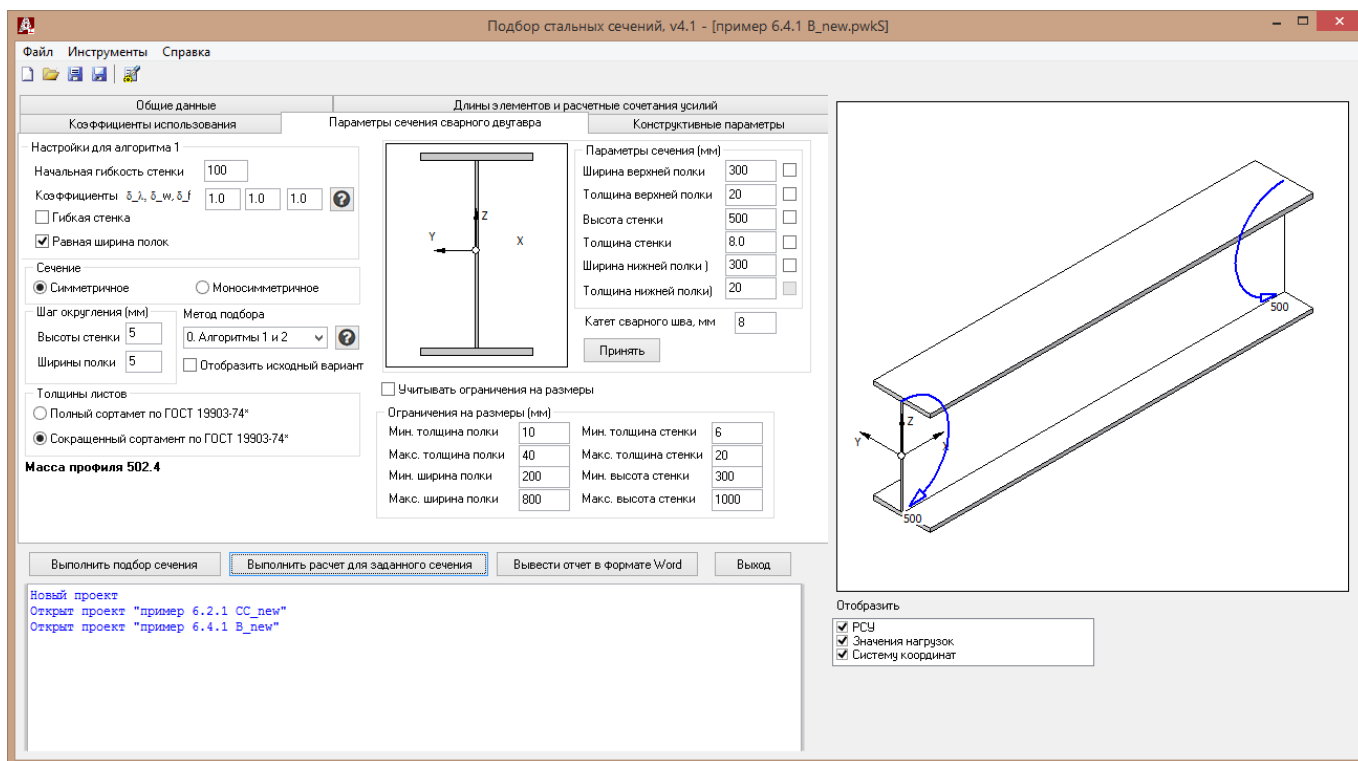


Рисунок 5. Диалоговое окно программы, выбранное сварное сечение КЭ

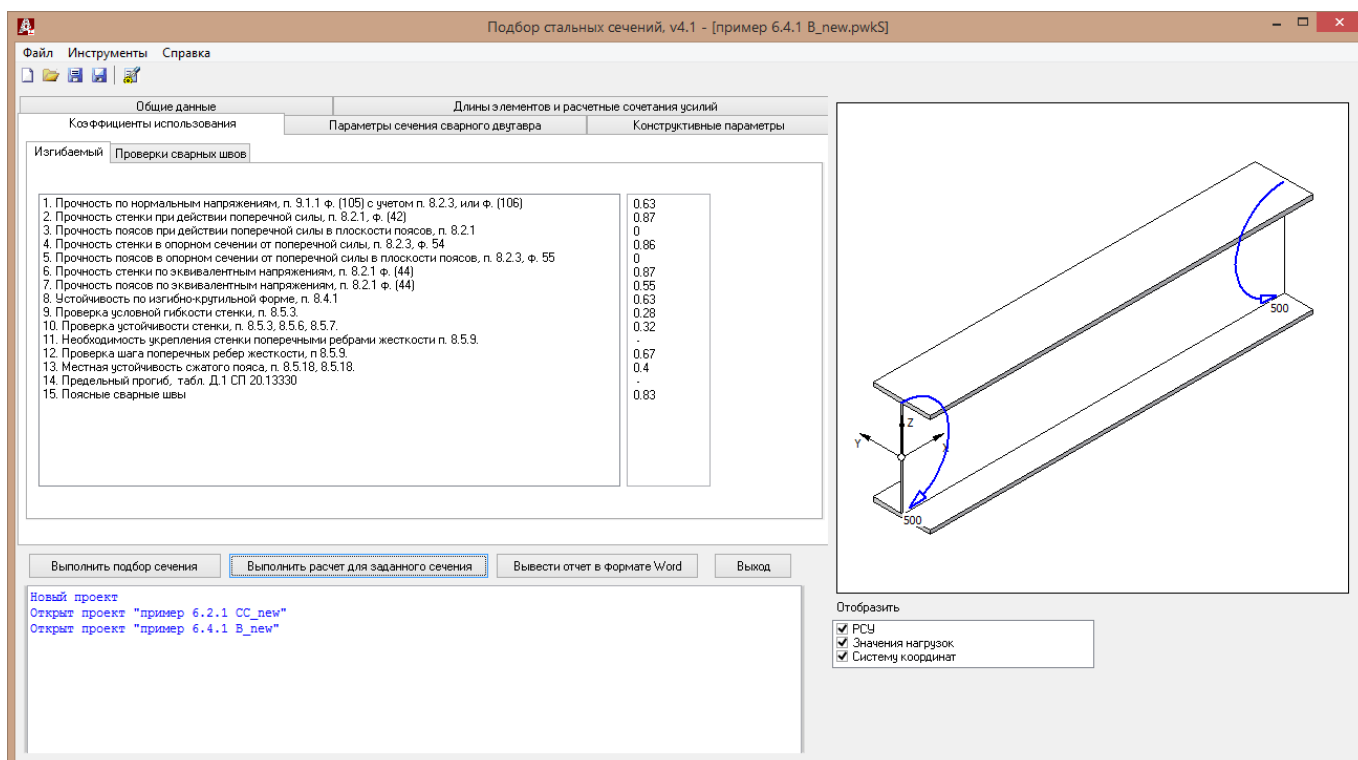


Рисунок 6. Диалоговое окно программы, коэффициенты использования

### 1.3 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. 7, а на вкладке *Коэффициенты использования* – соответствующие КИ, рис. 8.

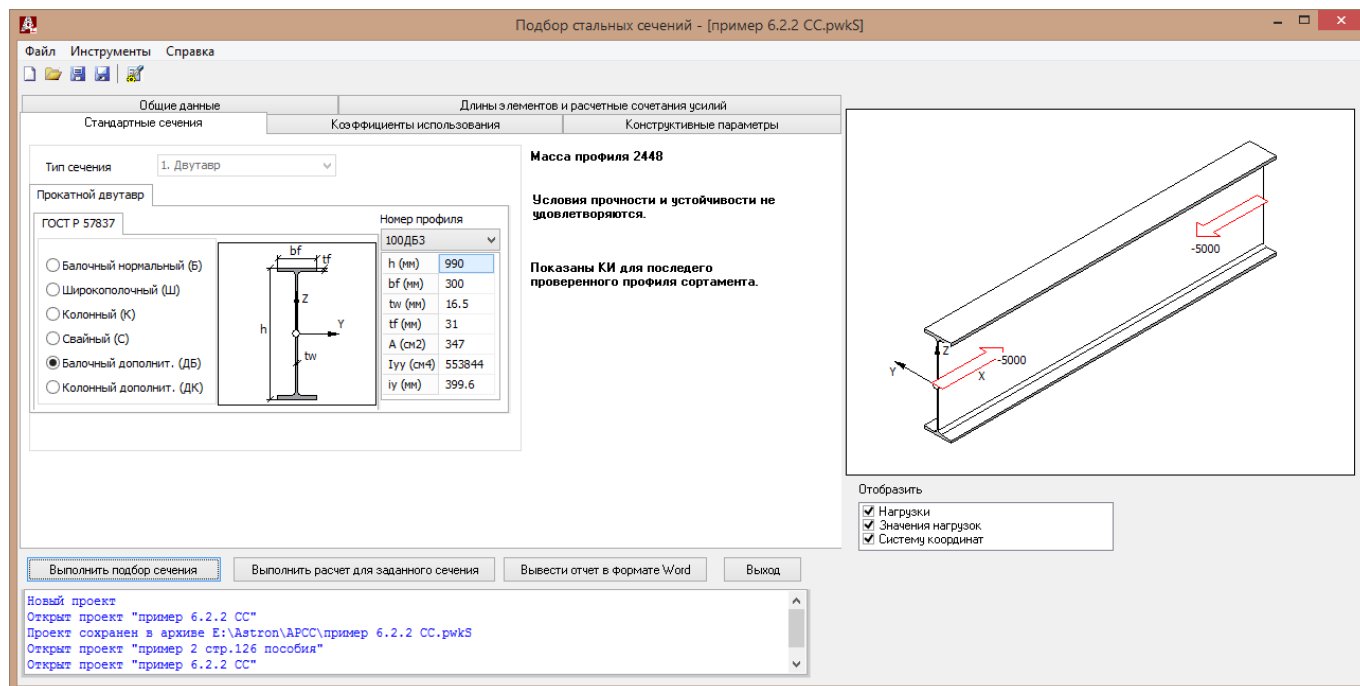


Рисунок 7. Диалоговое окно программы после неудачного подбора

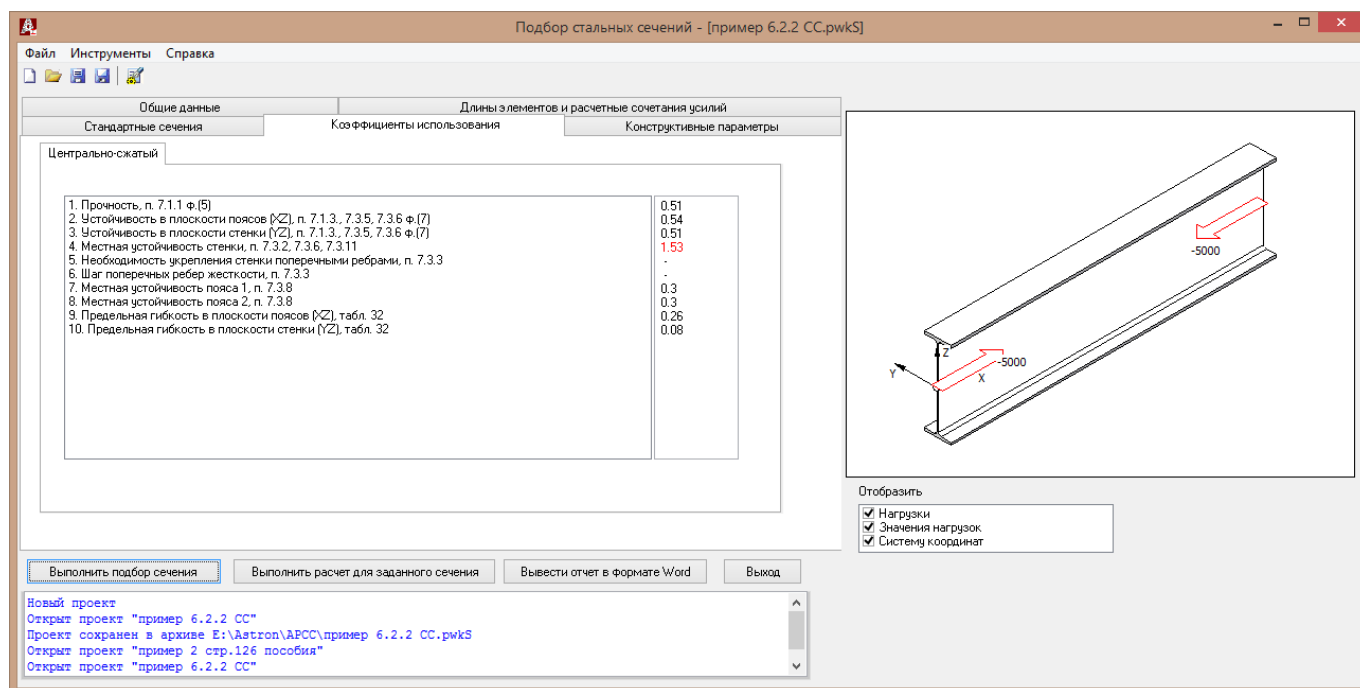


Рисунок 8. Диалоговое окно программы, коэффициенты использования после неудачного подбора

## 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 меньше 1.0.

### 2.3 Исходные данные

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

На вкладке **Общие данные**:

- ☐ 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 или ТУ-24107-016-001862-69);
- ☐ для трубы – форму;
- ☐ марку стали;

На вкладке **Конструктивные параметры**:

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

Для сварных и перфорированных двутавров необходимо задать дополнительные параметры на соответствующих вкладках **Параметры сечения сварного двутавра** и **Параметры балки с перфорированной стенкой**.

На вкладке **Длины элемента и расчетные сочетания усилий**

Для каждого участка необходимо задать:

- ☐ длину участка;

- ❑ коэффициенты расчетных длин участка в двух плоскостях, 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 (РСУ).

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 РСУ 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 PCY из расчета многопролетной балки

Подбор сечений выполняется в два этапа

#### 3.1 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 PCY.

Ограничения

- Нагрузки задаются в вертикальной плоскости

#### 3.2 Панель создания расчетной модели многоопорной балки

На вкладке Расчетная модель балки задаются исходные данные для расчета многопролетной балки, рис. 9.

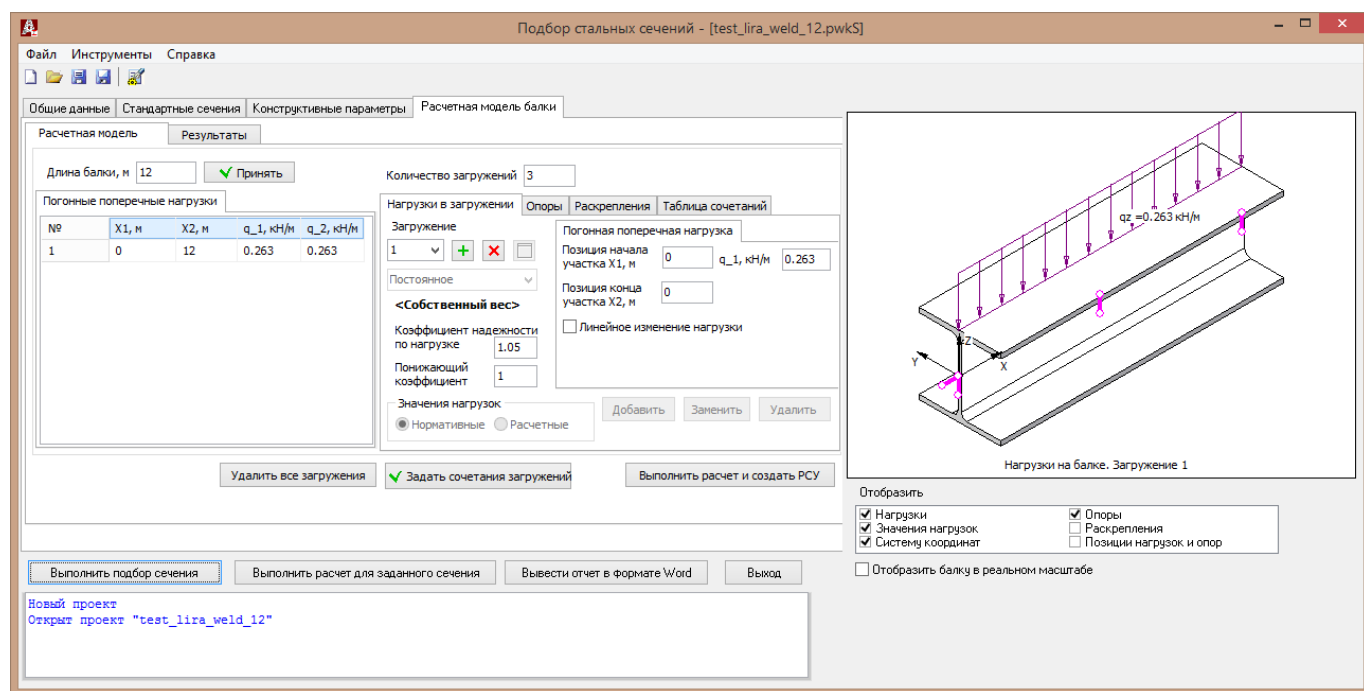


Рисунок 9. Панель создания модели многопролетной балки

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

На вкладке *Нагрузки в загрузке* можно создать новое загрузку, рис. 10, в котором доступны виды нагрузок

- Сосредоточенные;
- Погонные поперечные;
- Распределенные продольные.

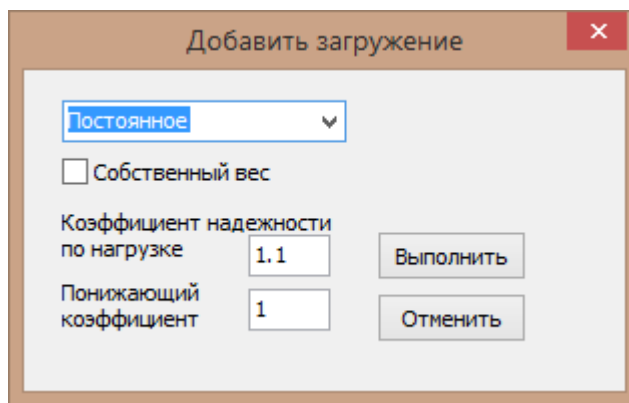


Рисунок 10. Панель создания загрузки

Нагрузки могут быть заданы вручную, на вкладке *Нагрузки в загрузении*, рис. 11.

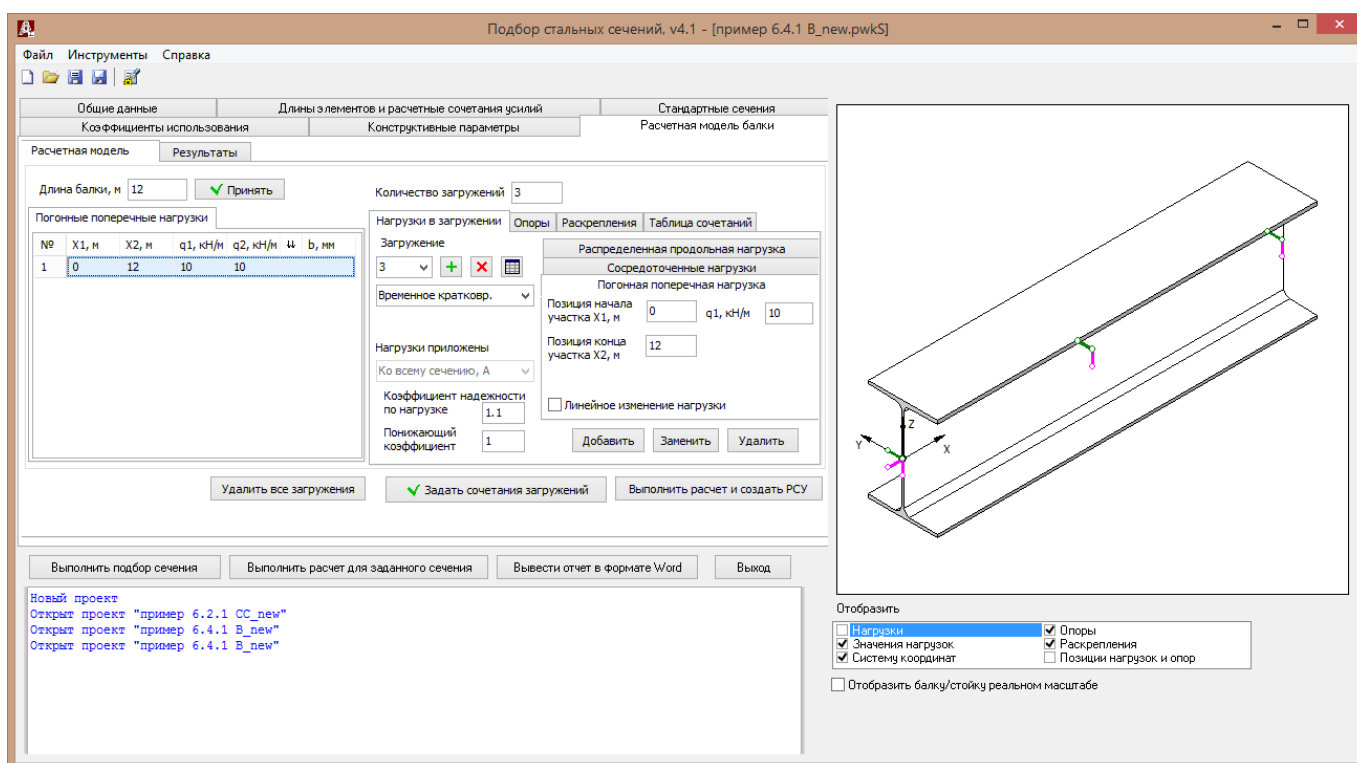


Рисунок 11. Задание нпагрузок на вкладке *Нагрузки в загрузении*

На панели *Таблицы нагрузок*, рис. 12 нагрузки могут быть заполнены в таблице вручную, либо вставлены из буфера обмена.

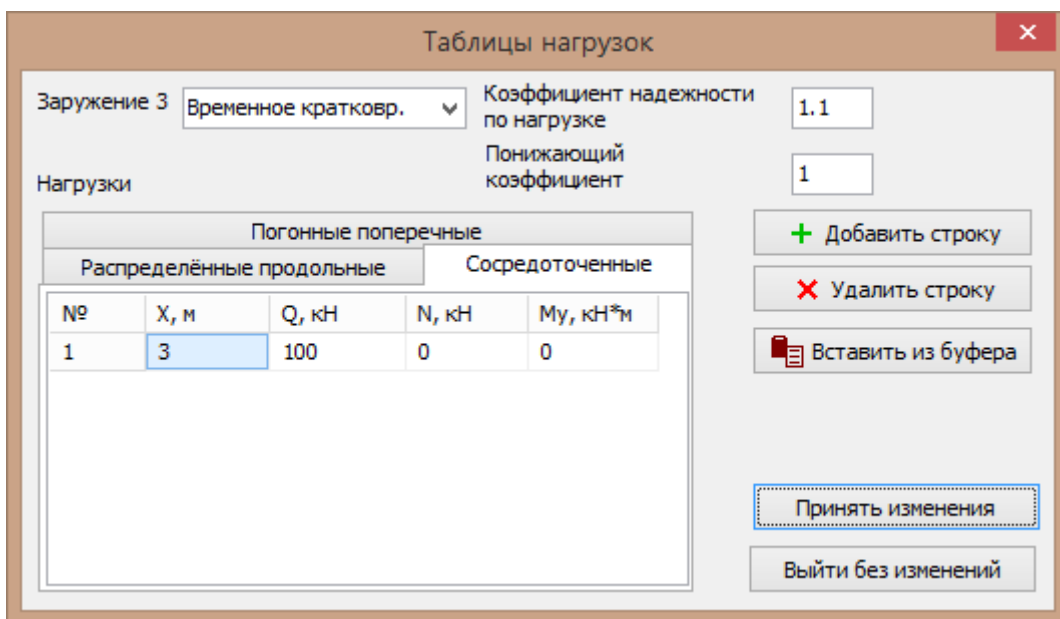


Рисунок 12. Панель Таблицы нагрузок

На вкладке *Опоры* задаются опоры на балке двумя способами, рис. 13:

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

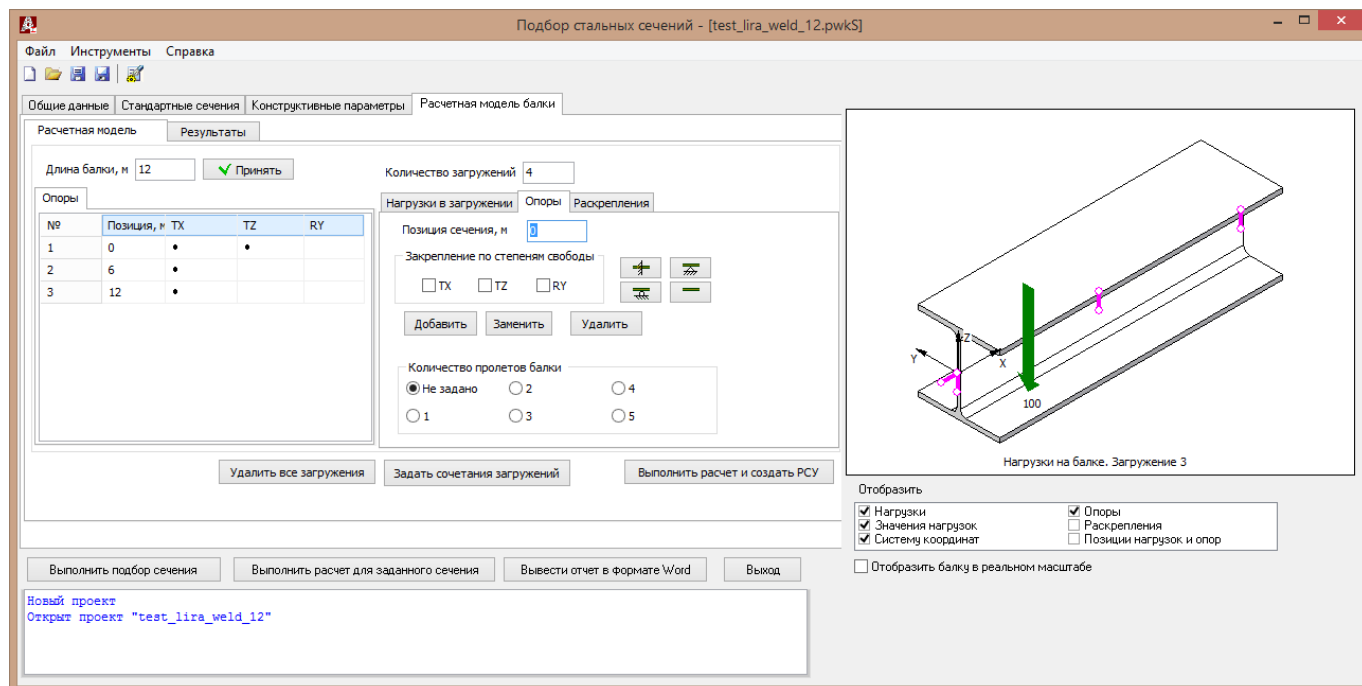


Рисунок 13. Задание опор

На вкладке *Раскрепления* задается шаг раскреплений в плоскости XY, рис. 14:

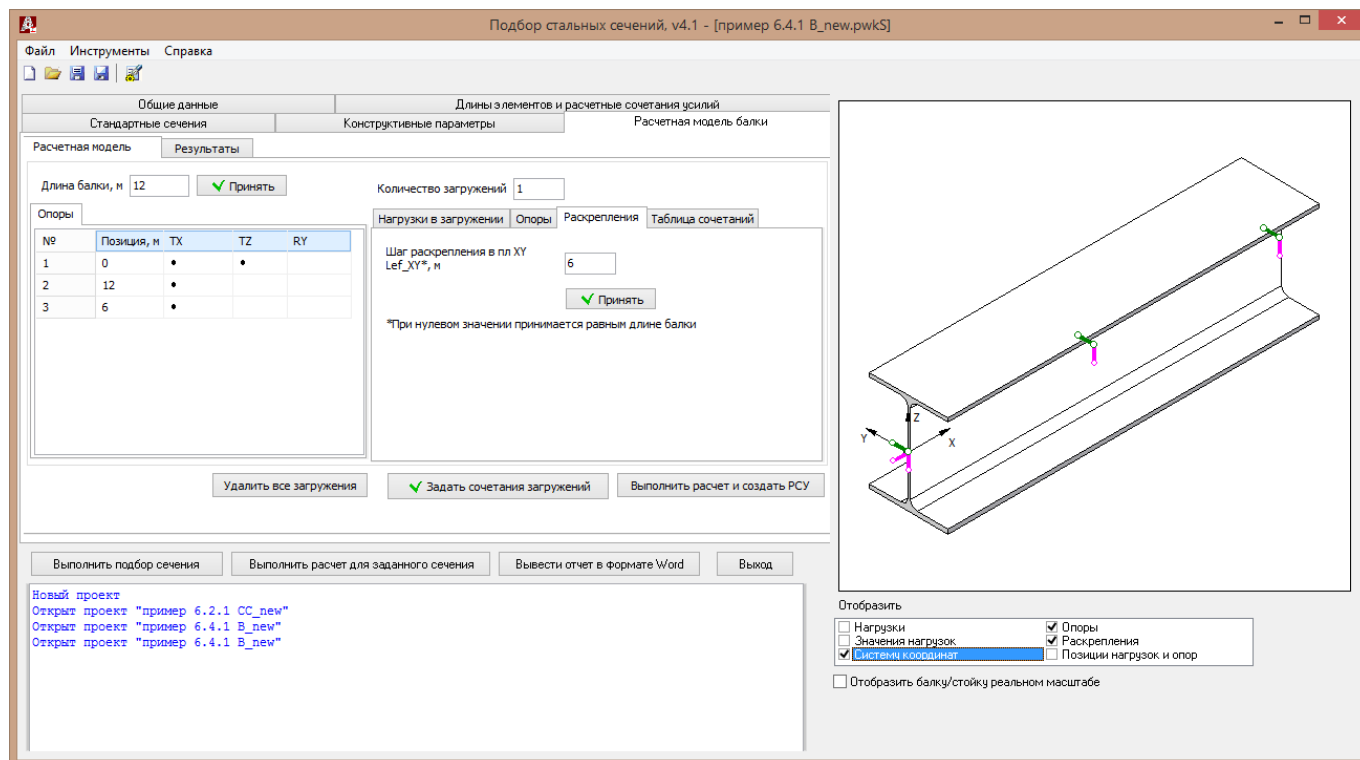


Рисунок 14. Задание рас\*креплений

На панели *Сочетания загружений*, рис. 15 отображаются сочетания, созданные по умолчанию, и заданные пользователем вручную, либо вставленные из буфера обмена.

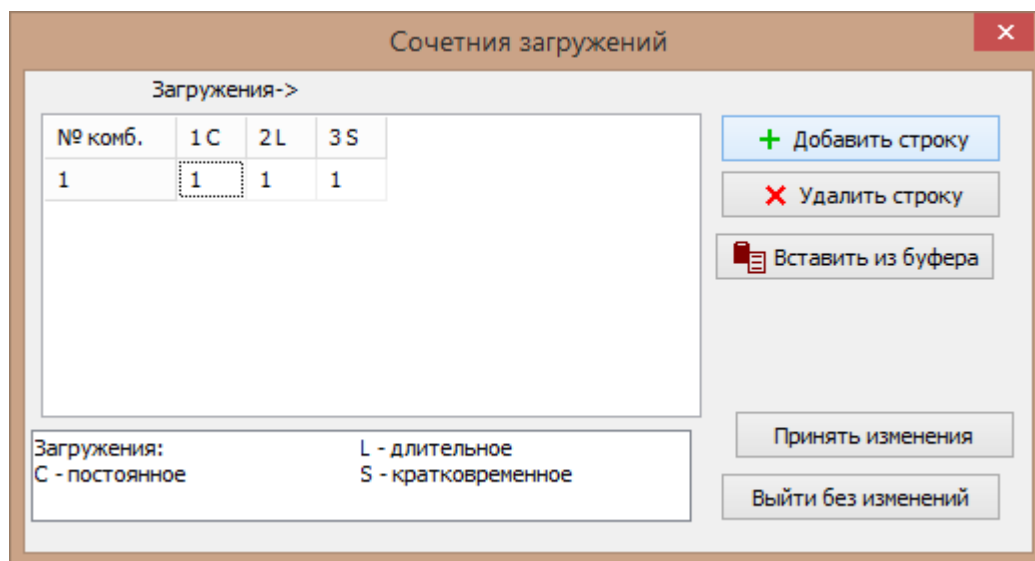


Рисунок 15. Панель Сочетания загружений

После выполнения расчета на вкладке *Результаты* отображаются эпюры силовых факторов по загружениям и сочетаниям, рис. 16. На основной панели становится доступной вкладка *Длины элементов и расчетные сочетания усилий*, на которой отображаются PCY, полученные из расчета балки, рис. 17.

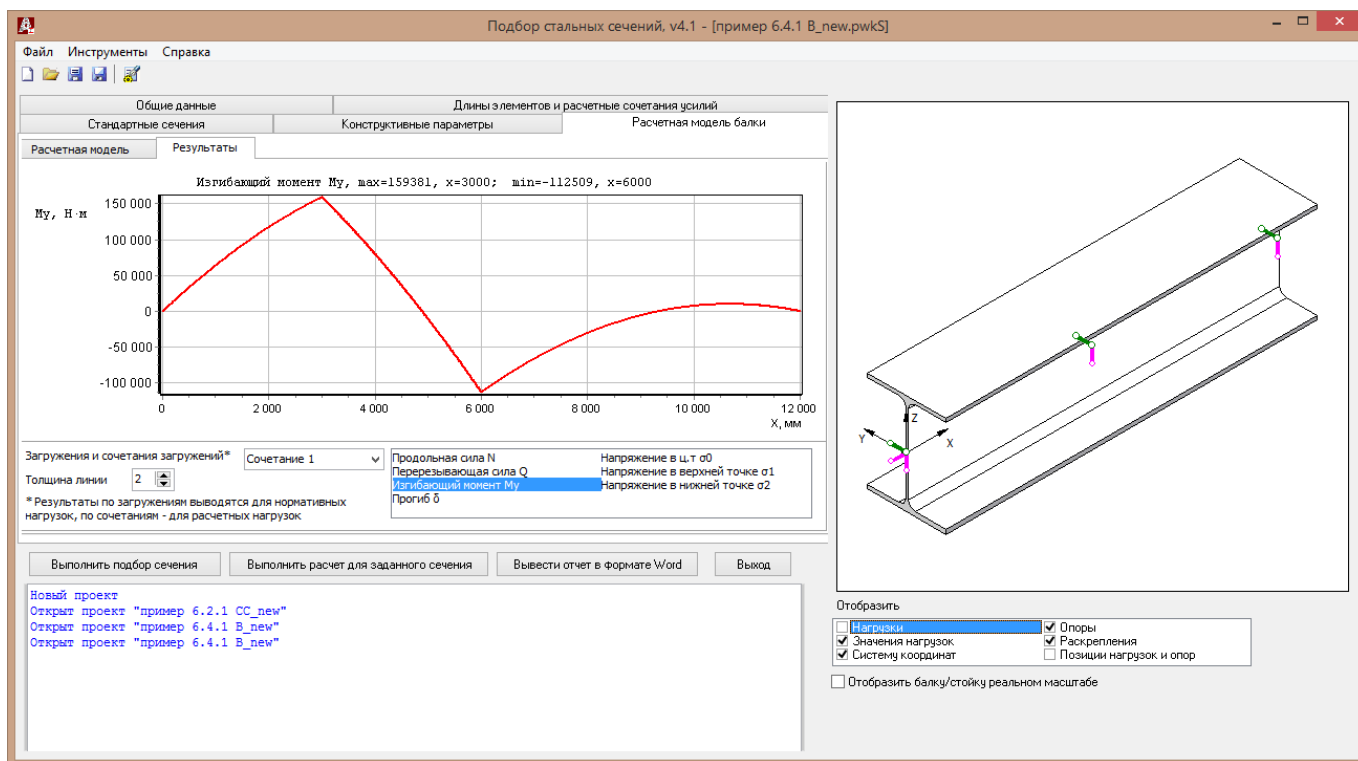


Рисунок 16. Отображение результатов расчета многоопорной балки

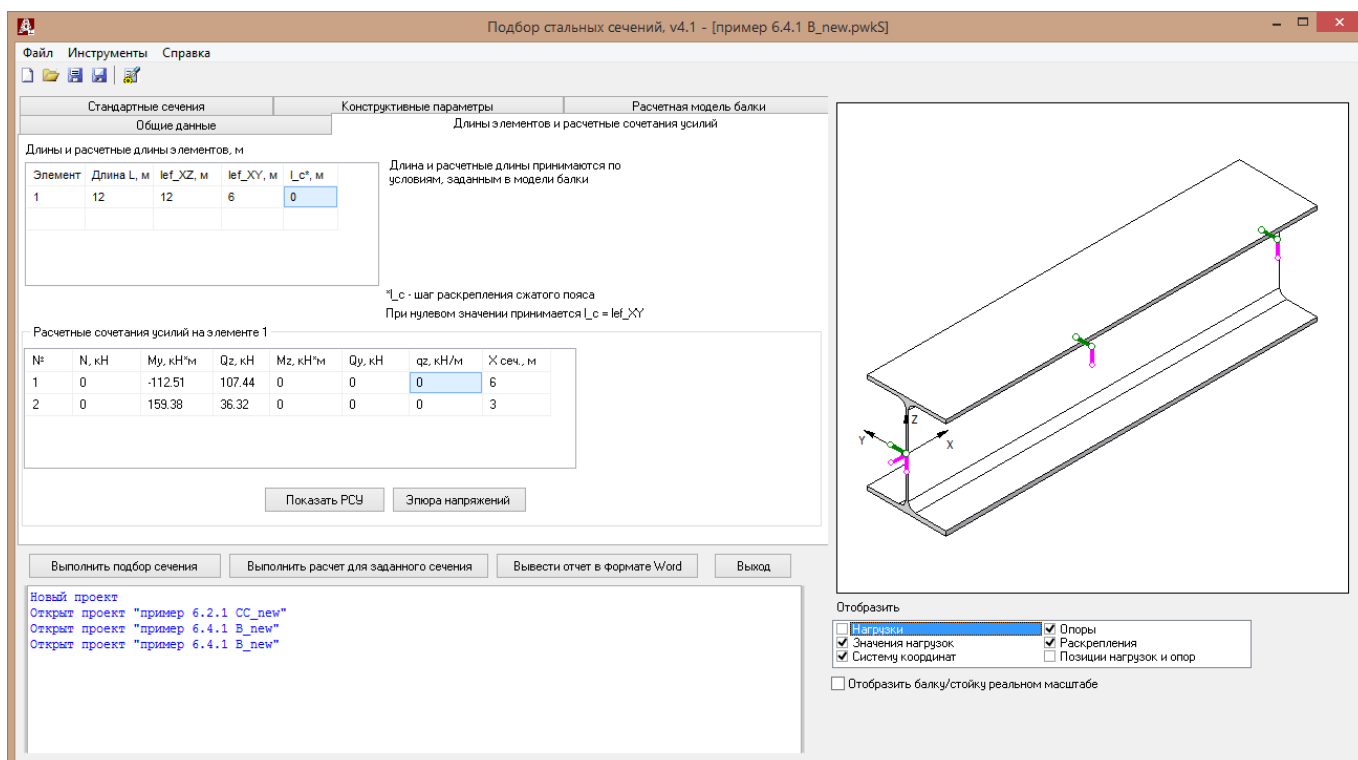


Рисунок 17. РСУ, полученные из расчета многоопорной балки

## 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  $k_f \leq 1.0$ , рис. 18, 19

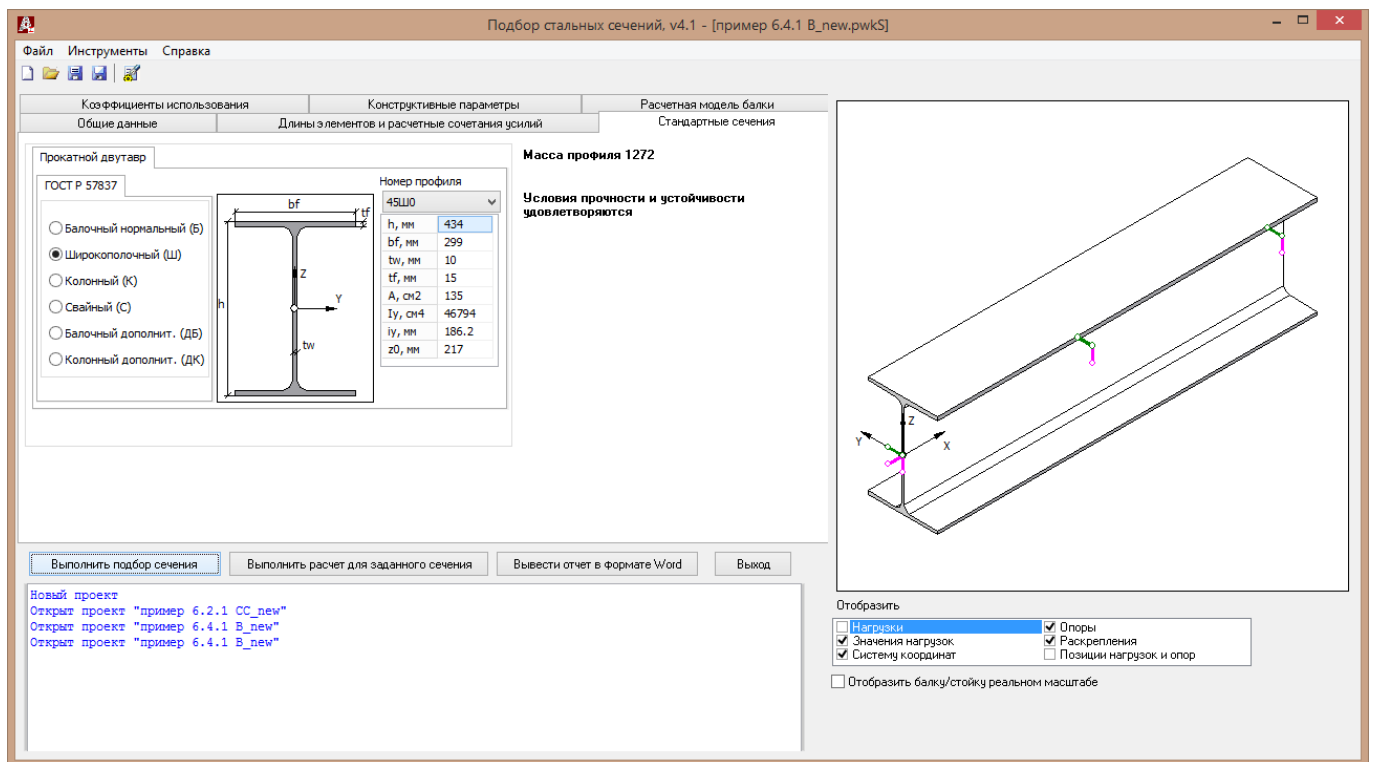


Рисунок 18. Подбранное сечение многоопорной балки

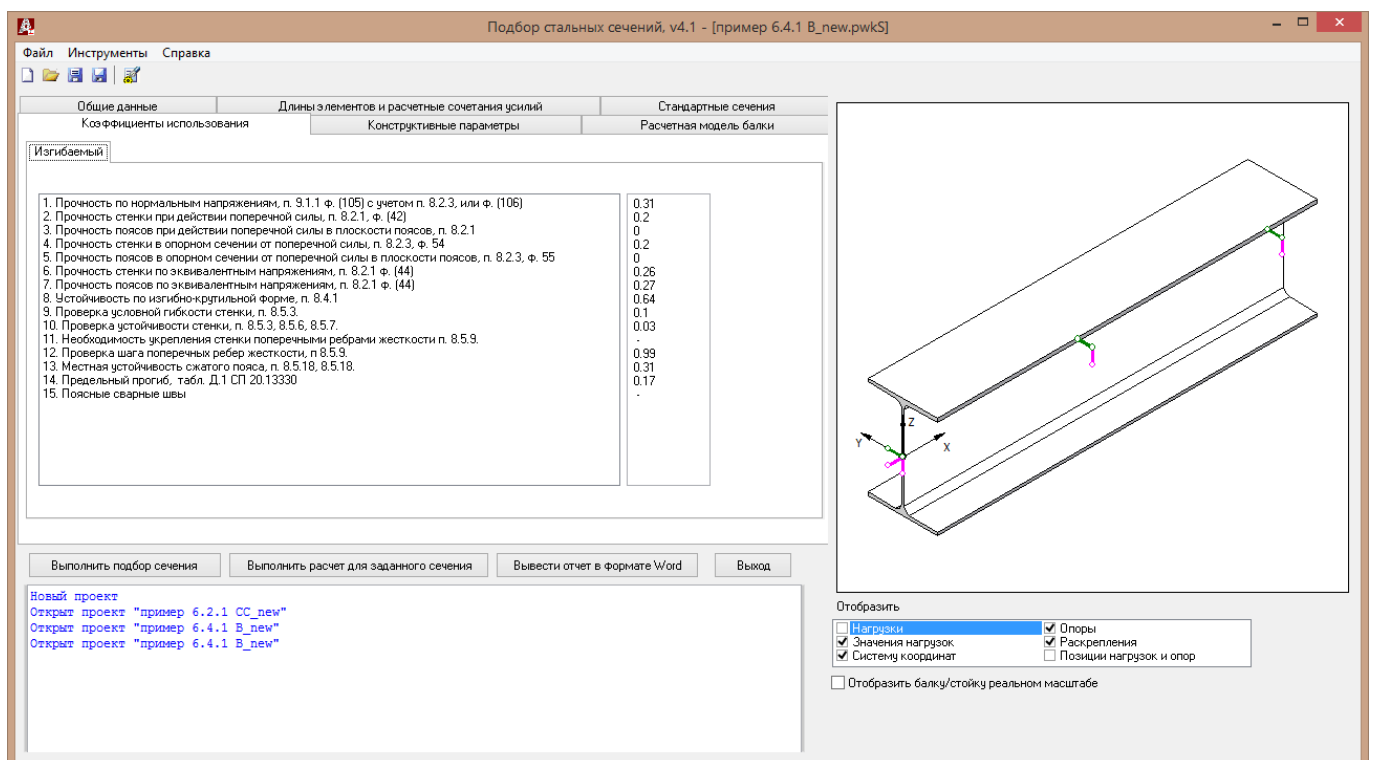


Рисунок 19. Коэффициенты использования для сечения многоопорной балки

## 4. Подбор сечений при получении РСУ из расчета стойки

Подбор сечений выполняется в два этапа

### Первый этап – построение расчетной модели стойки

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

### Ограничения

- Нагрузки задаются в плоскости стенки двутавра

#### 4.1 Панель создания расчетной модели стойки

На вкладке Расчетная модель стойки задаются исходные данные для расчета многоэтажной стойки, рис. 20.

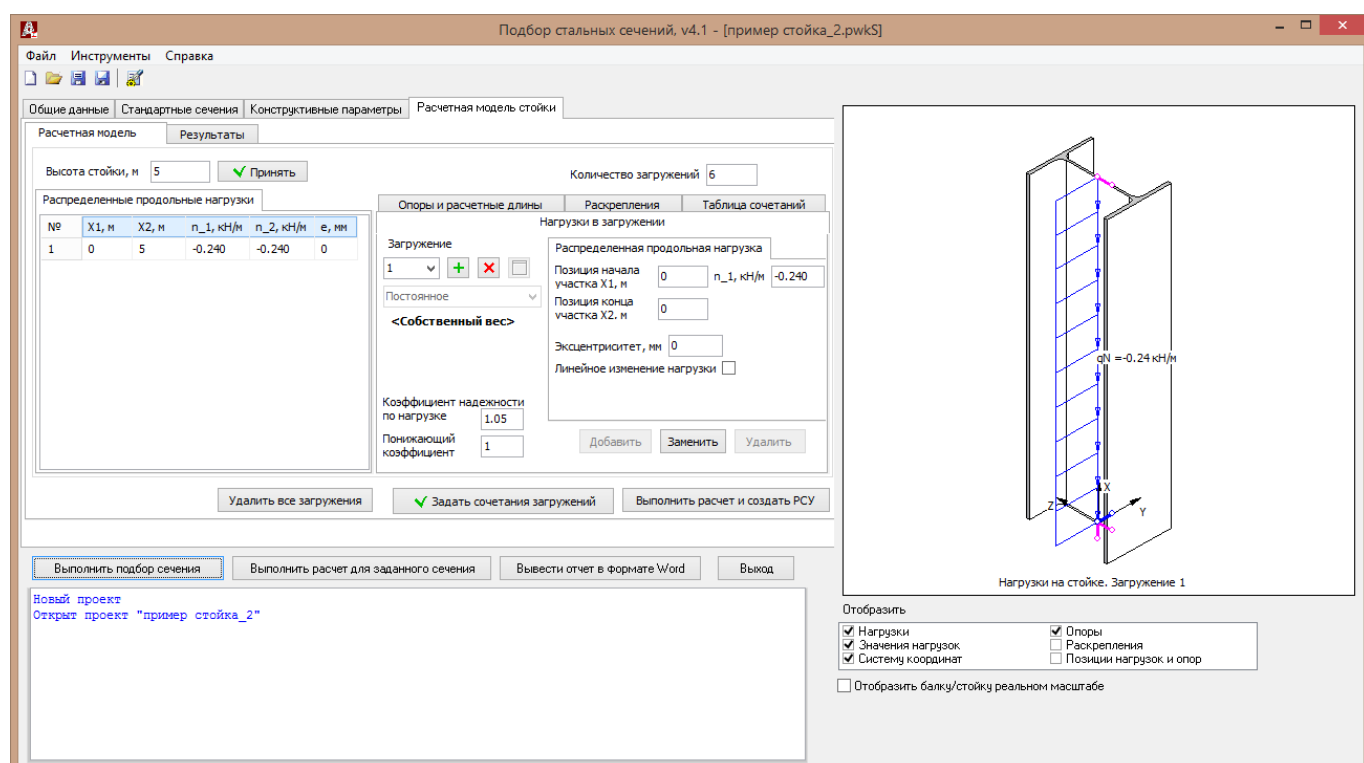


Рисунок 20. Панель создания модели многоэтажной стойки

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

На вкладке *Нагрузки в загрузках* можно создать новое загрузку, рис. 21, в котором доступны виды нагрузок

- Сосредоточенные;
- Погонные поперечные;
- Распределенные продольные.

Рисунок 21. Панель создания загрузки

На панели *Таблицы нагрузок*, рис. 22 нагрузки могут быть заполнены в виде таблицы вручную, либо вставлены из буфера обмена.

Погонные поперечные				
Распределённые продольные			Сосредоточенные	
№	X, м	Q, кН	N, кН	My, кН*м
1	5	0	-45	0

Рисунок 22. Панель Таблицы нагрузок

На вкладке *Опоры и коэффициенты расчетных длин участков* задаются опоры на стойке и расчетные длины двумя способами, рис. 23:

- Для одноэтажных стоек нажатием кнопок, соответствующих схеме закрепления стойки;
- Заданием коэффициентов расчетных длин в явном виде для многоэтажных рам

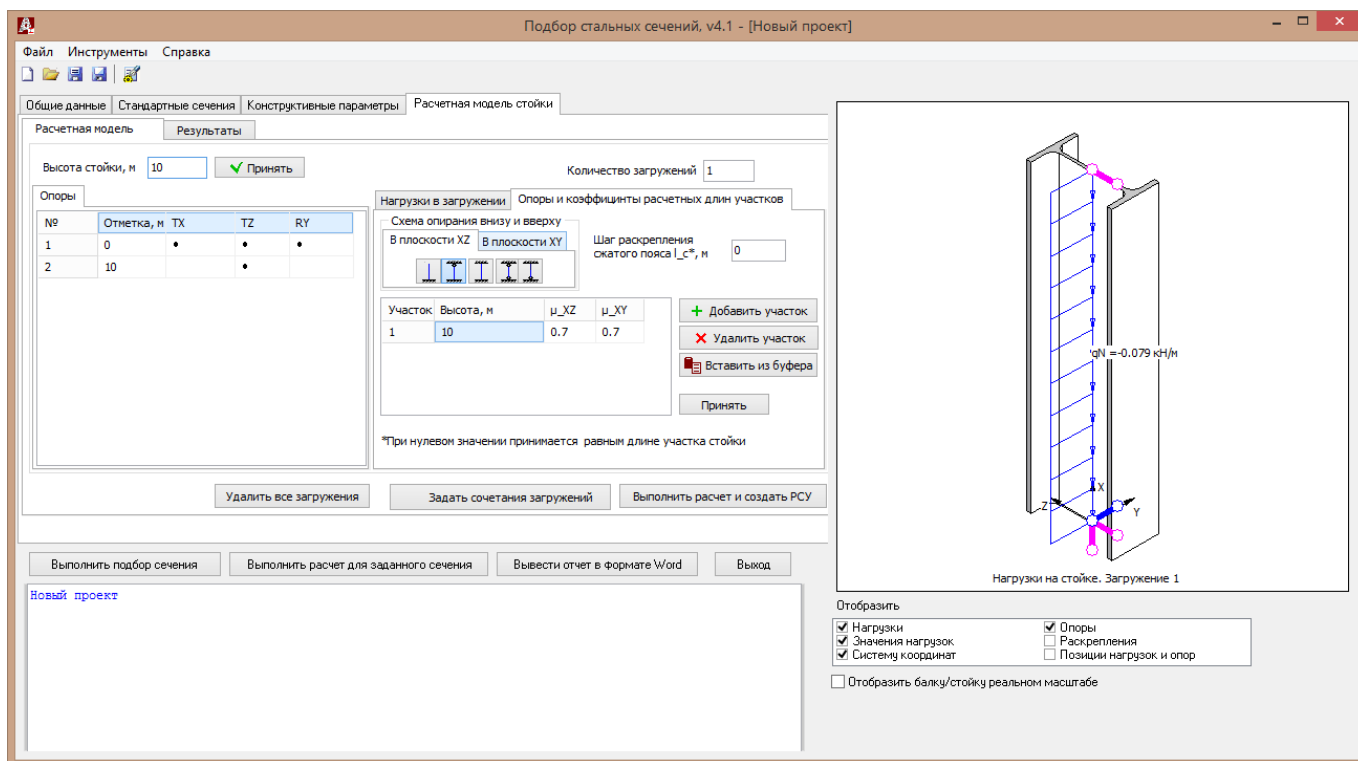


Рисунок 23. Задание опор и расчетных длин

На вкладке *Раскрепления* задается шаг раскрепления сжатого пояса:

На панели *Сочетания загрузок*, рис. 24 отображаются сочетания, созданные по умолчанию, и заданные пользователем вручную, либо вставленные из буфера обмена.

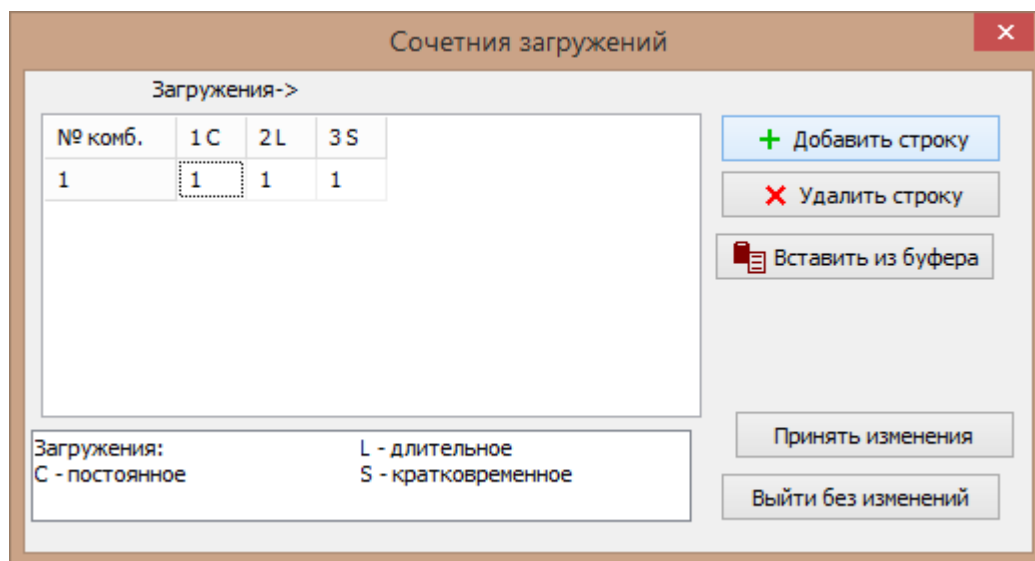


Рисунок 24. Панель Сочетания загрузок

После выполнения расчета на вкладке *Результаты* отображаются эпюры силовых факторов по загрузкам и сочетаниям, рис. 25. На основной панели становится доступной вкладка *Длины элементов и расчетные сочетания усилий*, на которой отображаются РСУ, полученные из расчета балки, рис. 26.

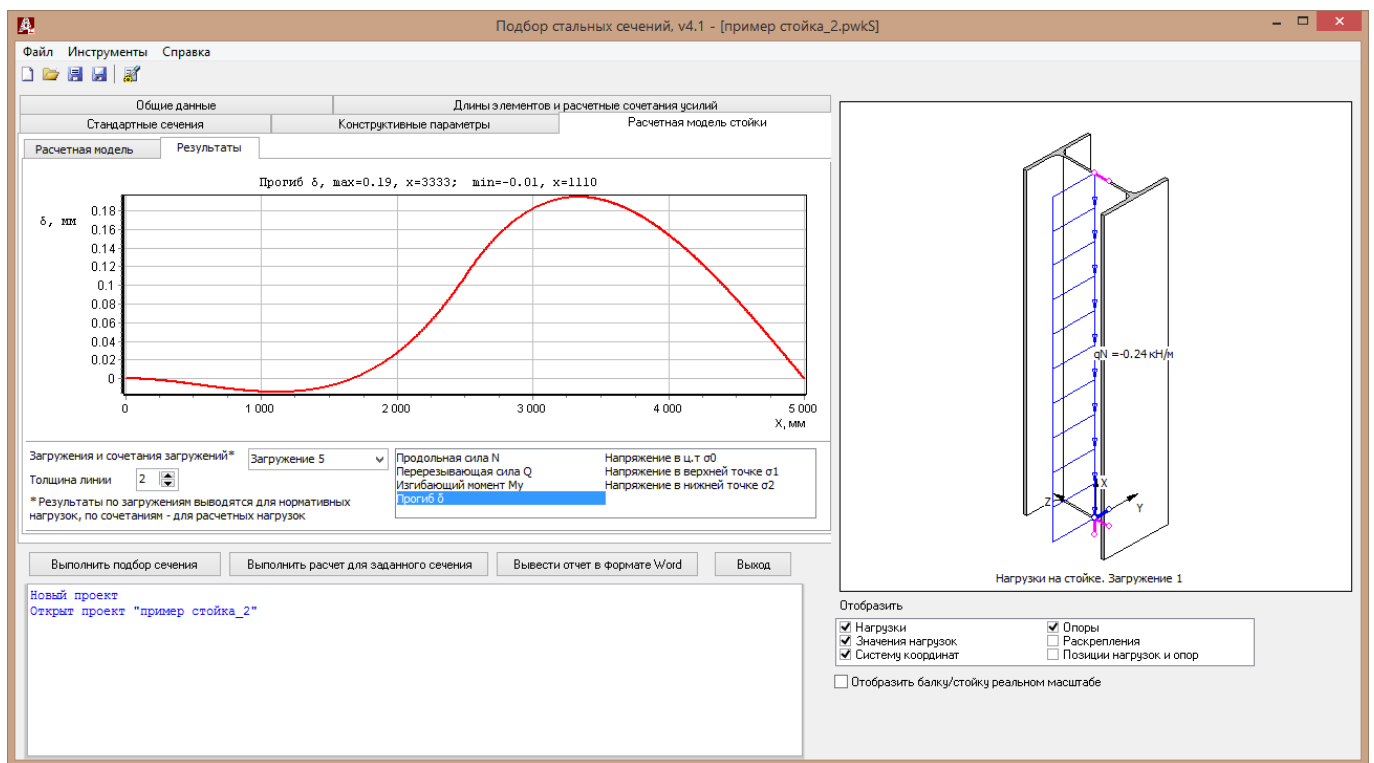


Рисунок 25. Отображение результатов расчета стойки

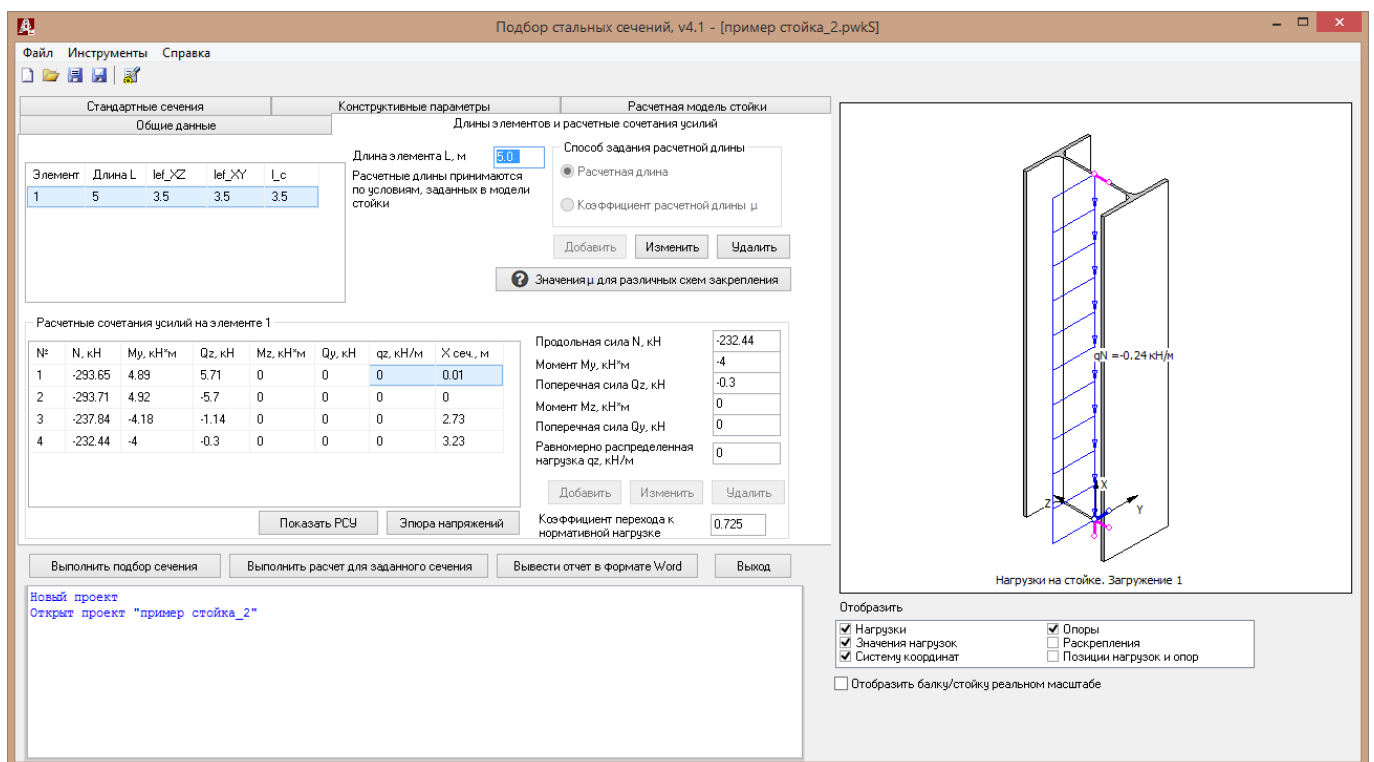


Рисунок 26. РСУ, полученные из расчета стойки

## **Второй этап – подбор сечения стойки**

- Для каждого РСУ автоматически проверяется вид напряженного состояния.
- 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  $k_f \leq 1.0$ .

## **5. 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.

## 6. 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. 27.

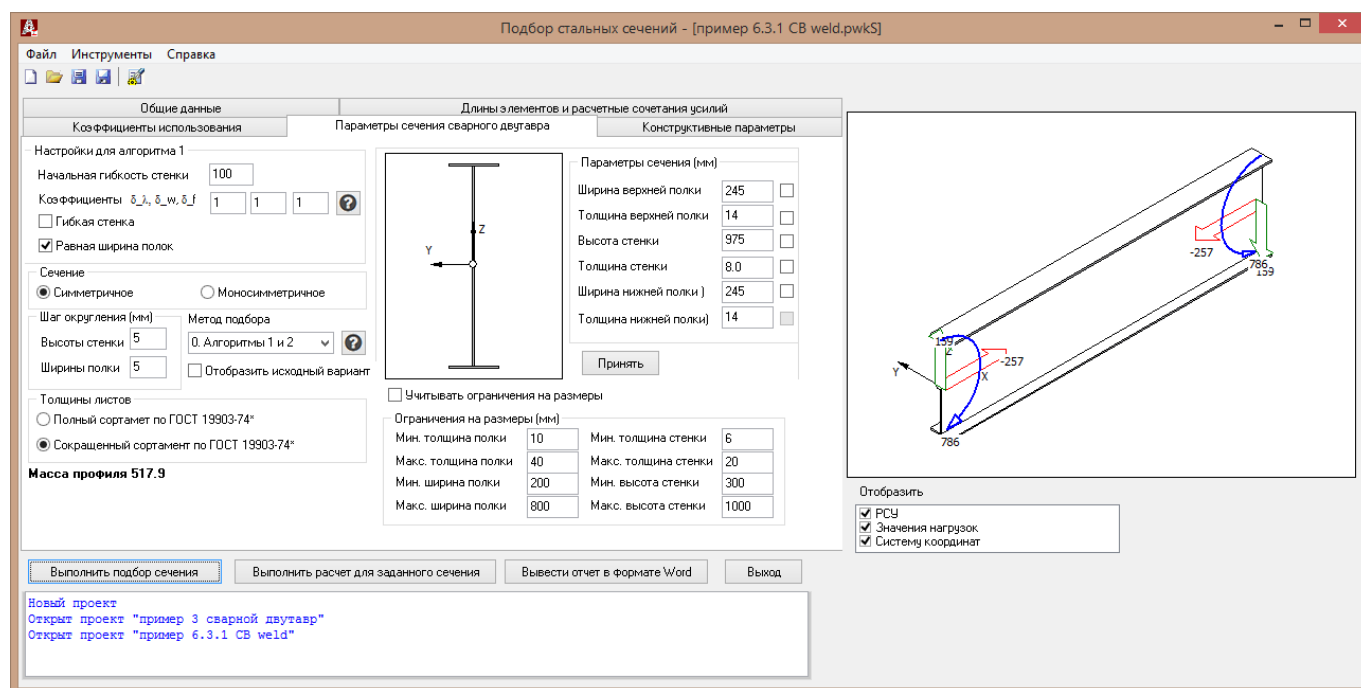


Рисунок 27. Вкладка *Параметры выбора сечения сварного двутавра*



## 7. 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. 28.

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.

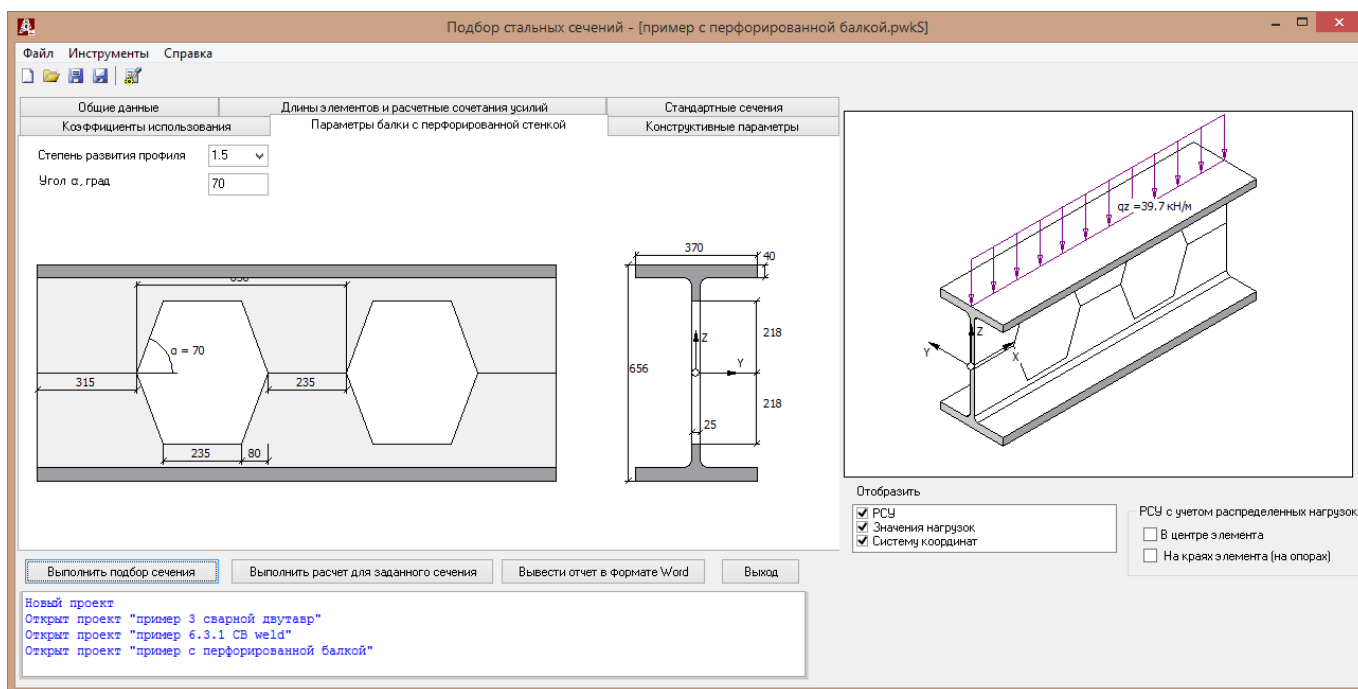


Рисунок 28. Вкладка *Параметры выбора балки с перфорированной стенкой*

## 8. 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 $m_{ef} > 20$

### 8.1 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.

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

### 8.2 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

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

### 8.3 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

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

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

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

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

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

### 8.5 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

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

## 9. 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.

### 9.1 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.

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

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

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

## 9.2 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

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

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

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



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

7. Предельная гибкость в плоскости YZ, табл. 32

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

### 9.3 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

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

### 9.4 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)

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

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

$$\frac{\lambda_x}{k \cdot \bar{\lambda}_u} \leq 1$$

11. Предельная гибкость в плоскости XZ, табл. 32

$$\frac{\lambda_y}{k \cdot \bar{\lambda}_u} \leq 1$$

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

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

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

## 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