

# CFSteel

*Версия 4.3*

Том III

**CFSTruss**  
**Расчёт ферм**  
**из стальных тонкостенных**  
**холодногнутых**  
**профилей**

**Руководство пользователя**

2022

НПК Дельта Инжиниринг оставляет за собой право на внесение изменений в данный документ без предварительного уведомления.

Никакая часть данного документа не может быть воспроизведена или передана в любой форме и любыми способами в каких-либо целях без письменного согласия НПК Дельта Инжиниринг.

© 2008 -2022 НПК Дельта Инжиниринг с сохранением всех прав

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. ИНТЕРФЕЙС .....	9
1.1. Обзор.....	9
1.1.1. Главное меню.....	9
1.1.1.1. Пункт <i>Файл</i> .....	9
1.1.1.2. Пункт <i>Редактирование</i> .....	12
1.1.1.3. Пункт <i>Расчёт</i> .....	12
1.1.1.4. Пункт <i>Настройки</i> .....	13
1.1.1.5. Пункт <i>Вид</i> .....	13
1.1.2. Панель инструментов.....	14
1.1.3. Окно графического редактора.....	14
1.1.4. Менеджер проекта.....	14
1.1.5. Таблицы.....	14
1.2. Терминология .....	17
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРМЫ .....	18
2.1. Вводные замечания .....	18
2.2. Системы ферм.....	18
2.3. Поперечные сечения элементов .....	19
2.3.1. Швеллер.....	19
2.3.2. С-образное сечение .....	20
2.3.3. С-образное сечение с двойными отгибами .....	20
2.3.4. С-образное сечение с рифом на стенке .....	21
2.3.5. Сигма-образное сечение .....	22
2.4. Новый проект.....	22
2.5. Схема фермы.....	22
2.5.1. Создание схемы фермы с помощью <i>Генератора ферм</i> .....	23
2.5.2. Импорт схемы фермы .....	26
2.5.3. Редактирование схемы фермы / формирование расчётной схемы.....	28
2.5.3.1. Операции с узлами .....	30
2.5.3.2. Операции с элементами .....	32
2.5.3.3. Редактирование опорных креплений.....	34
2.5.3.4. Набор элементов.....	34
2.5.3.5. Перенумерация узлов и элементов .....	36
2.5.4. Библиотека сечений и сталей проекта.....	36
2.5.4.1. Назначение сечений и сталей элементам фермы.....	36
2.6. Формирование конструктивной схемы фермы.....	37
2.6.1. Ввод данных для конструктивного расчёта элементов фермы.....	37

2.6.2. Ввод информации о конструктивном элементе.....	41
2.6.3. Редактирование конструктивного элемента .....	41
2.6.4. Расцентровка осей в узлах поясов .....	44
2.6.5. Формирование модели фермы при импорте схемы из DXF файла .....	45
3. НАГРУЗКИ .....	47
3.1. Нагрузки в соответствии с СП .....	47
3.1.1. Загружения (LC) .....	47
3.1.2. Сочетания (комбинации) загружений (CO) .....	48
3.2. Воздействия в соответствии с EN .....	49
3.2.1. Загружение /Load case (LC) .....	49
3.2.2. Комбинации воздействий /Combination of actions (CO).....	50
3.3. Нагрузки .....	52
3.3.1. Нагрузки на узлы .....	52
3.3.2. Нагрузки на элементы .....	53
4. РАСЧЁТ .....	56
4.1. Проверка модели фермы.....	56
4.2. Статический расчёт .....	56
4.3. Конструктивный расчёт .....	56
4.3.1. Общие замечания.....	56
4.3.2. Расчёт по СП 260.1325800.2016 .....	57
4.3.2.1. Система ферм 1 .....	57
4.3.2.2. Система ферм 2 .....	60
4.3.2.3. Система ферм 3 .....	61
4.3.2.4. Расчёт ферм по прогибам.....	61
4.3.3. Расчёт по нормам EN (Eurocode) .....	62
4.3.3.1. Общие замечания.....	62
4.3.3.2. Система ферм 1 .....	64
4.3.3.3. Система ферм 2 .....	68
4.3.3.4. Система ферм 3 .....	69
4.3.3.5. Расчёт по прогибам .....	70
5. РЕЗУЛЬТАТЫ .....	71
5.1. Результаты расчёта.....	71
5.1.1. Результаты статического расчёта.....	71
5.1.2. Результаты проверок (конструктивный расчёт) .....	73
5.2. Документирование .....	80
6. НАСТРОЙКИ.....	82
6.1. Конструкция.....	82

6.2. Нагрузки .....	83
6.3. Параметры конструктивного расчёта .....	84
6.4. Настройки программы .....	85
6.5. Настройки графики и цвета .....	86
6.5.1. Настройки графики.....	86
6.5.2. Настройки цвета .....	87
7. ВЕРИФИКАЦИОННЫЕ РАСЧЁТЫ .....	88
7.1. Ферма из спаренных профилей. Расчёт по нормам СП .....	88
7.2. Ферма из спаренных профилей. Расчёт по нормам EN .....	120
7.3. Ферма из одинарных профилей. Расчёт по нормам СП.....	142
7.4. Ферма из одинарных профилей. Расчёт по нормам EN.....	158
ЛИТЕРАТУРА.....	173



## ВВЕДЕНИЕ

Приложение CFSTruss является составной частью программного комплекса CFSteel и предназначено для расчёта ферм из стальных тонкостенных холодногнутых профилей. Программа позволяет выполнить сквозной расчёт от формирования схемы фермы, приложения нагрузок до конструктивного расчёта, включающего проверки прочности и устойчивости элементов фермы, а также проверку по прогибам.

Реализованы следующие конструктивные системы ферм:

- фермы, все элементы которых выполнены из спаренных профилей (стенка-к-стенке); узловые сопряжения выполняются на фасонках,
- пояса ферм выполнены из двойных профилей; элементы решётки из одинарных профилей заводятся между ветвями поясов,
- фермы со всеми элементами из одиночных профилей.

Ферма может быть выполнена из следующих типов поперечных сечений холодногнутых профилей (одинарных или спаренных): Швеллер, С-образное сечение, С-образное сечение с двойными отгибами, С-образное сечение с рифом на стенке, Сигма-образное сечение.

Для конструирования ферм имеется генератор, с помощью которого формируется схема фермы, назначаются сечения элементов, стали, а также некоторые другие конструктивные параметры. Введённая информация может быть изменена и/или дополнена в редакторе конструкции. Кроме того, схема фермы может быть загружена из внешнего файла формата DXF, полученного в какой-либо САД-системе.

Документация к расчётному комплексу CFSteel состоит из трёх частей:

CFSteel. Том I. Руководство пользователя.

CFSteel. Том II. Верификационные расчёты.

CFSTruss. Том III. Расчёт ферм из стальных тонкостенных холодногнутых профилей. Руководство пользователя.

Программа предназначена для подготовленных пользователей, знающих нормы и имеющих опыт проектирования подобных конструкций. Кроме того, пользователь должен принимать во внимание допущения и положения расчёта, принятые в программе и изложенные в данном Руководстве пользователя.

*С уважением,  
коллектив разработчиков CFSteel*

www.CFSteel.ru  
[deltaing@mail.ru](mailto:deltaing@mail.ru)





# 1. ИНТЕРФЕЙС

## 1.1. Обзор

Запустить модуль расчёта ферм можно из главного меню CFSteel, выбрав пункт *Конструкция* → *Ферма*. После чего появляется главное окно приложения CFSTruss (Рисунок 1.1), которое состоит из следующих функциональных элементов: Заголовок, Главное меню, Панели инструментов, Менеджер проекта, Окно графического редактора, Таблицы.

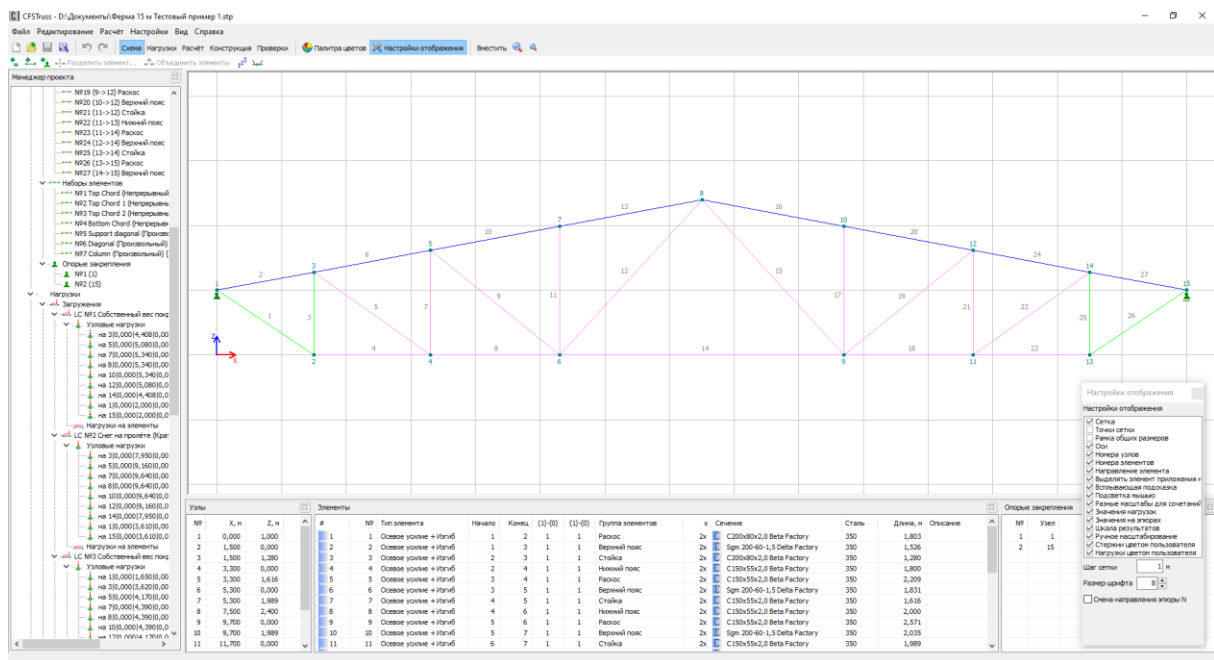


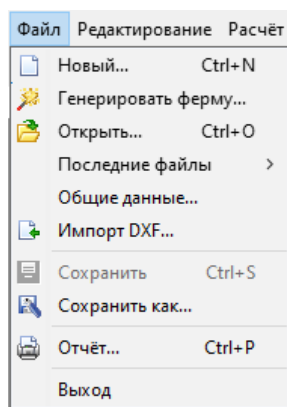
Рисунок 1.1 – Главное окно приложения

### 1.1.1. Главное меню

Основные функции приложения доступны в главном меню, которое содержит шесть пунктов: *Файл*, *Редактирование*, *Расчёт*, *Настройки*, *Вид*, *Справка*.

#### 1.1.1.1. Пункт *Файл*

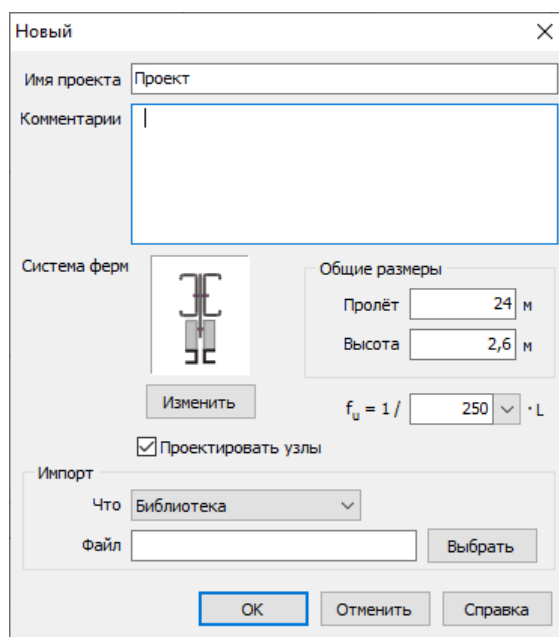
Обратиться к пункту главного меню *Файл* можно выбрав его мышью (щелчок (клик) левой кнопкой). Содержание пункта *Файл* показано на Рисунке 1.2.

Рисунок 1.2 – Пункт меню *Файл*

Выбор подпунктов осуществляется щелчком левой кнопкой мыши либо по нажатию клавиши [Enter] после подведения курсора. Перемещение между подпунктами осуществляется клавишами [Вверх] и [Вниз]. Клавишами [Влево] и [Вправо] можно перемещаться между пунктами главного меню.

Некоторые стандартные действия, в том числе из пункта *Файл*, доступны по горячим клавишам. Примером может служить комбинация [Ctrl+N], по которой открывается новый проект.

Подпункт *Новый...* открывает новый пустой проект фермы. В результате данного выбора появляется диалоговое окно *Новый*, показанное на Рисунке 1.3.

Рисунок 1.3 – Диалоговое окно *Новый*

Вводится *Имя проекта* и при необходимости *Комментарии* к нему. В окне *Система ферм* (п.2.2) показывается текущая система ферм. Если необходимо сменить систему следует нажать *Изменить* и в появившемся окне (Рисунок 1.4) выбрать иную систему ферм. Если выбрана система с узловыми фасонками, то при расчёте по нормам СП 260 на панели *Фасонки* необходимо ввести *Толщину фасонки t*, *Нормативное сопротивление стали по пределу*

текущей  $R_{yt}$ , Нормативное сопротивление стали по пределу прочности  $R_{in}$  и Коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m$  для стали фасонок.

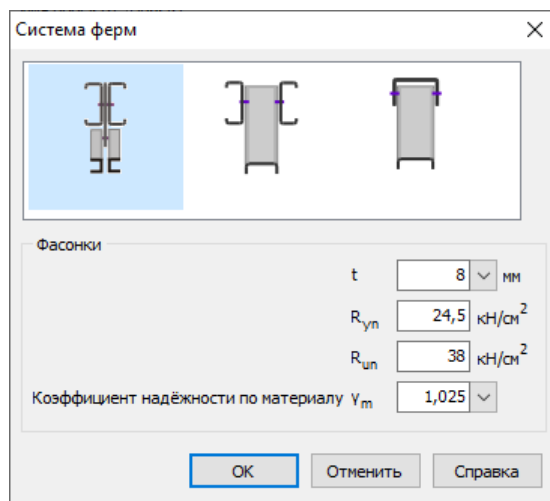


Рисунок 1.4 – Диалоговое окно Система ферм

Вводя *Общие размеры: Пролёт и Высота* (Рисунок 1.3), пользователь определяет масштаб изображения фермы в окне графического редактора. Данные параметры являются предварительными и в дальнейшем могут быть уточнены.

Для ферм с узлами на фасонках (система ферм I) реализованы некоторые компоненты расчёта примыкания элементов решётки к поясам (см. п.4.3.2, 4.3.3). Пользователь может включить или отключить данный сервис отметив или сбросив выбор поля *Проектировать узлы*.

*Разработчики программы не претендуют на абсолютную полноту перечня производимых расчётов примыкания элементов решётки к поясам, как и в целом полноту расчётов фермы.*

Для нового проекта фермы предусмотрен импорт некоторой информации из уже имеющихся проектов. Данная опция реализована на панели *Импорт*. В новый проект можно подгрузить библиотеки профилей и сталей и/или схему фермы из одного из существующих проектов. Пользователь из выпадающего списка выбирает, *Что необходимо подгрузить*. Далее по кнопке *Выбрать* стандартными средствами Windows выбирает файл проекта, из которого следует получить информацию. Если пользователь ничего не выбрал из выпадающего списка, то в новый проект ничего не подгружается.

Подпункт *Генерировать ферму...* служит для быстрого формирования схемы фермы и некоторых других параметров конструкции. Работа с *Генератором ферм* подробно рассмотрена в п.2.5.1.

Подпункт *Открыть...* предназначен для открытия существующего проекта. При его выборе открывается стандартное окно Windows, где пользователь выбирает нужный файл проекта.

Действия программы по подпунктам *Сохранить* и *Сохранить как...* совпадают со стандартными, принятыми в Windows.

По *Последние файлы* показывается список последних файлов с проектами. Количество показываемых файлов настраивается пользователем в *Настройки* → *Настройки программы* (п.6.4).

Подпункт *Общие данные...* открывает диалоговое окно, аналогичное окну *Новый*.

*Импорт DXF* открывает стандартное окно Windows для выбора файла, в котором пользователь выбирает файл DXF, содержащий схему фермы для загрузки в текущий проект.

*Отчёт...* открывает диалоговое окно подготовки данных к экспорту результатов расчёта в Microsoft Excel® либо конвертации в формат HTML. Подробнее см. п.5.2.

### 1.1.1.2. Пункт *Редактирование*

Содержание пункта главного меню *Редактирование* приведено на Рисунке 1.5.

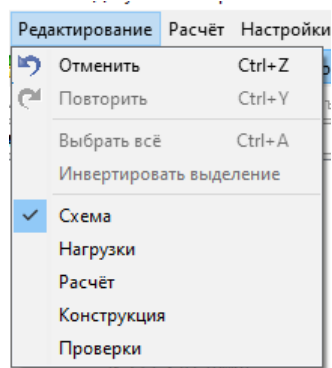


Рисунок 1.5 – Пункт главного меню *Редактирование*

Команда *Выбрать всё* выполняет выбор всех компонентов модели фермы, аналогичных заранее отмеченному. Например, если выбрать элемент на схеме и выбрать команду *Выбрать всё*, то в результате будут выделены все элементы схемы. Это также справедливо для узлов, опорных закреплений и конструктивных элементов.

Команда *Инвертировать выделение* выполняет выделение всех остальных компонентов модели кроме заранее выбранного.

Выбор подпунктов *Схема*, *Нагрузки*, *Расчёт*, *Конструкция*, *Проверки* погружает пользователя в следующие режимы работы над проектом:

- Формирование схемы/расчётной схемы фермы
- Формирование нагрузок на ферму
- Проверка фермы на корректность ввода данных, выполнение статического расчёта, конструктивного расчёта и показ результатов
- Конструирование фермы
- Результаты проверок конструктивных элементов.

Данные подпункты кроме того вынесены на панель быстрого доступа *Режимы работы*.

### 1.1.1.3. Пункт *Расчёт*

В пункт главного меню *Расчёт* (Рисунок 1.6) включены следующие команды: *Статический расчёт*, *Конструктивный расчёт*, *Проверить проект*.

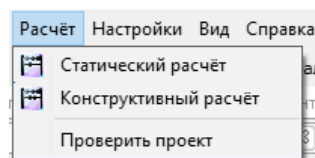


Рисунок 1.6 – Пункт главного меню *Расчёт*

По команде *Статический расчёт* производится статический расчёт фермы на все сформированные сочетания нагрузок и графическая среда программы автоматически настраивается на показ результатов расчёта.

*Для выполнения расчёта необходимо наличие как минимум одного сформированного сочетания загружений.*

По подпункту *Конструктивный расчёт* выполняется статический расчёт фермы на все созданные сочетания и производятся конструктивные проверки в соответствии с методиками, приведёнными в Главе 4. Графическая среда программы автоматически настраивается на показ результатов проверочных расчётов.

Пользователь может проверить корректность ввода данных выбрав *Проверить проект*. В результате проверки появится окно с результатами проверки, где будут отражены коллизии исходных данных и недостающие данные, без которых расчёт невозможен, а также предупреждения. В некоторых случаях по щелчку левой кнопкой мыши по какому-либо сообщению пользователю предоставляется возможность исправить несоответствие.

#### 1.1.1.4. Пункт *Настройки*

Пользователю доступны настройки, связанные с конструктивным решением фермы - *Конструкция*, нагрузками - *Нагрузки*, особенностями конструктивного расчёта - *Конструктивный расчёт*. Также могут меняться параметры, связанные с общим функционированием программы (Рисунок 1.7.). Подробно настройки программы рассмотрены в Главе 6.

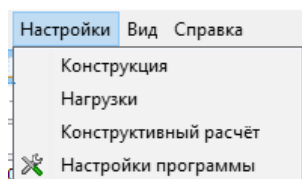
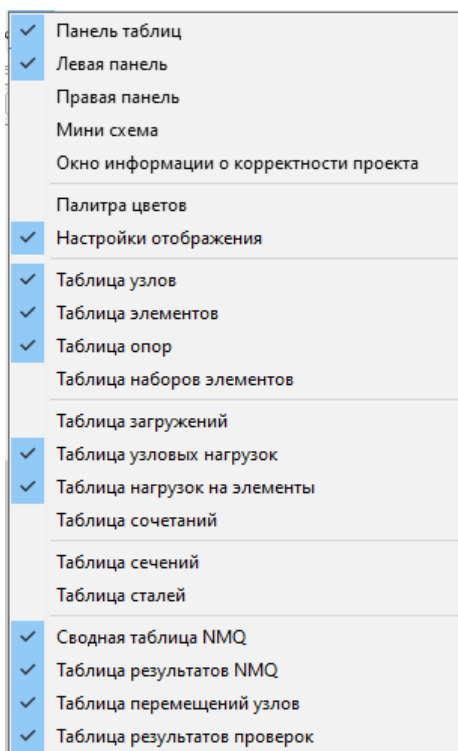


Рисунок 1.7 – Пункт главного меню *Настройки*

#### 1.1.1.5. Пункт *Вид*

Содержимое пункта главного меню *Вид* (Рисунок 1.8) определяет наличие или отсутствие в главном окне программы тех или иных визуальных компонентов.

Рисунок 1.8 – Пункт главного меню *Вид*

### 1.1.2. Панель инструментов

Под главным меню располагается панель инструментов, которая разбита на несколько частей по смысловому содержанию (Рисунок 1.1). При наведении курсора мыши на пункт панели появляется информация о его содержимом.

Нижняя часть панели инструментов контекстно зависимая. Её состав меняется в зависимости от режима работы.

### 1.1.3. Окно графического редактора

В окне графического редактора отображается модель фермы, нагрузки, результаты расчёта в зависимости от текущего режима работы, а также происходит работа по редактированию данных.

### 1.1.4. Менеджер проекта

В левой части рабочего окна программы располагается *Менеджер проекта*, где в виде дерева отражается структура проекта. С помощью щелчка правой кнопки мыши на каком-либо пункте дерева появляется контекстно-зависимое меню возможных действий с этим объектом.

Некоторые объекты *Менеджера проекта* синхронизированы с их представлениями в графическом редакторе и в *Таблицах*. Выбирая их в дереве, одновременно происходит выделение в соответствующей таблице и в графическом редакторе, и наоборот.

### 1.1.5. Таблицы

В нижней части рабочего окна программы располагаются *Таблицы*, где различного рода данные приводятся в таблично-числовой форме (Рисунок 1.9). Содержание информации зависит от текущего режима работы.

## Интерфейс

В режиме *Схема* (Рисунок 1.9,а) в *Таблице* отражаются координаты узлов; информация об элементах схемы фермы (номер элемента; тип элемента с точки зрения характера его работы: только осевое усилие ( $N$ ) или осевое усилие с изгибом ( $N+M$ ); номера узлов начала и конца элемента; шарнирное (0) или жёсткое прикрепление (1) элемента к начальному и конечному узлу; принадлежность к конструктивной группе элементов (верхний пояс, нижний пояс, раскос или стойка); сечение элемента; сталь; длина элемента в осях, примечания. Также указываются номера узлов опорных закреплений фермы.

Узлы			Элементы										Опорные закрепления			
№	X, м	Z, м	#	№	Тип элемента	Начало	Конец	(1)-(0)	(1)-(1)	Группа элементов	x	Сечение	Сталь	Длина, м	№	Узел
1	0,000	1,000	1	1	Осевое усилие + Изгиб	1	2	1	1	Раскос	2x	C200x80x2,0 Beta Factory	350	1,803	1	1
2	1,500	0,000	2	2	Осевое усилие + Изгиб	1	3	1	1	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	1,526	2	15
3	1,500	1,280	3	3	Осевое усилие + Изгиб	2	3	1	1	Стойка	2x	C200x80x2,0 Beta Factory	350	1,280		
4	3,300	0,000	4	4	Осевое усилие + Изгиб	2	4	1	1	Нижний пояс	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	1,800		
5	3,300	1,616	5	5	Осевое усилие + Изгиб	3	4	1	1	Раскос	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	2,209		
6	5,300	0,000	6	6	Осевое усилие + Изгиб	3	5	1	1	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	1,831		
7	5,300	1,989	7	7	Осевое усилие + Изгиб	4	5	1	1	Стойка	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	1,616		
8	7,500	2,400	8	8	Осевое усилие + Изгиб	4	6	1	1	Нижний пояс	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	2,000		
9	9,700	0,000	9	9	Осевое усилие + Изгиб	5	6	1	1	Раскос	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	2,571		
10	9,700	1,989	10	10	Осевое усилие + Изгиб	5	7	1	1	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	2,035		
11	11,700	0,000	11	11	Осевое усилие + Изгиб	6	7	1	1	Стойка	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	1,989		
12	11,700	1,616	12	12	Осевое усилие + Изгиб	6	8	1	1	Раскос	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	3,256		
13	13,500	0,000	13	13	Осевое усилие + Изгиб	7	8	1	1	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	2,238		
14	13,500	1,280	14	14	Осевое усилие + Изгиб	6	9	1	1	Нижний пояс	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	4,400		
15	15,000	1,000	15	15	Осевое усилие + Изгиб	9	8	1	1	Раскос	2x	C150x55x2,0 Beta Factory	350	3,256		
			16	16	Осевое усилие + Изгиб	8	10	1	1	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	2,238		

Рисунок 1.9,а – Содержание таблиц в режиме *Схема*

По щелчку правой кнопки мыши на каком-либо узле, элементе или опорном закреплении, происходит его выделение на схеме фермы и появляется всплывающее меню возможных действий с этими элементами (пп. 2.5.3.1, 2.5.3.2, 2.5.3.3).

В режиме *Нагрузки* (Рисунок 1.9,б) приводится информация об узловых и распределённых нагрузках для текущего нагружения. Переключиться между нагружениями можно в дереве *Менеджера проекта*.

Узловые нагрузки				Нагрузки на элементы										
№	Прилож...	Rx, кН	Rz, кН	M, кНм	#	№	Тип нагрузки	Приложена к	№	Направление	Длина	A-B, м	Значение	Ед.изм.
2	3	0,000	7,950	0,000										
3	5	0,000	9,160	0,000										
4	7	0,000	9,640	0,000										
5	8	0,000	9,640	0,000										
6	10	0,000	9,640	0,000										
7	12	0,000	9,160	0,000										
8	14	0,000	7,950	0,000										
9	1	0,000	3,610	0,000										
10	15	0,000	3,610	0,000										

Нагрузки на элементы									
№	Тип нагрузки	Приложена к	№	Направление	Длина	A, м	Значение	Ед.изм.	
1	Равномерно распределенная	набору стержней	1	Глобальная по Z	На стержень	-	0,100	кН/см	

Рисунок 1.9,б – Содержание таблиц в режиме *Нагрузки*

Кликнув правой кнопкой мыши на какой-либо нагрузке появляется всплывающее меню возможных действий с нагрузками (п.3.1).

В режиме *Расчёт* (Рисунок 1.9,в) отражаются соответствующие результаты статического расчёта для текущего сочетания. Переключиться на другое сочетание можно на панели инструментов. Приводится информация о перемещениях узлов (линейные перемещения и угловое в радианах), усилия  $N$ ,  $M$  и  $Q$  в расчётных сечениях конечных элементов, начале и конце элемента, а также минимальное и максимальное значение в пределах элемента. Количество расчётных сечений элемента  $a$ , следовательно, их координаты (равномерное разбиение) определяется пользователем в пункте меню *Настройки* → *Конструкция*.

Перемещения узлов				Результаты (детально)					Результаты				
Узел	X, мм	Z, мм	Угол поворота	Элемент	X, м	N, кН	M, кНм	Q, кН	Элемент	-	N, кН	M, кНм	Q, кН
1	0,00	0,00	0,00020	1	0,000	4,069	0,020	0,114	1	begin	4,069	0,020	0,114
2	-0,16	-0,28	0,00016		0,225	4,050	0,042	0,086		end	3,920	0,023	-0,110
3	0,03	-0,29	0,00016		0,451	4,032	0,058	0,058		min	3,920	0,020	-0,110
4	-0,13	-0,55	0,00011		0,676	4,013	0,068	0,030		max	4,069	0,072	0,114
5	0,04	-0,56	0,00012		0,901	3,994	0,072	0,002	2	begin	-3,402	-0,020	0,120
6	-0,09	-0,72	0,00008		1,127	3,976	0,069	-0,026		end	-3,374	0,049	-0,030
7	0,01	-0,73	0,00004		1,352	3,957	0,060	-0,054		min	-3,402	-0,020	-0,030
8	-0,04	-0,75	0,00000		1,577	3,938	0,045	-0,082		max	-3,374	0,054	0,120
9	0,00	-0,72	-0,00008		1,803	3,920	0,023	-0,110	3	begin	-1,938	0,077	-0,136
10	-0,10	-0,73	-0,00004	2	0,000	-3,402	-0,020	0,120		end	-1,747	-0,097	-0,136
11	0,05	-0,55	-0,00011		0,191	-3,399	0,001	0,102		min	-1,938	-0,097	-0,136
12	-0,12	-0,56	-0,00012		0,381	-3,395	0,019	0,083		max	-1,747	0,077	-0,136
13	0,07	-0,28	-0,00016		0,572	-3,392	0,033	0,064	4	begin	3,459	-0,054	0,145
14	-0,12	-0,29	-0,00016		0,763	-3,388	0,044	0,045		end	3,459	0,035	-0,046
15	-0,09	0,00	-0,00020		0,954	-3,385	0,050	0,027		min	3,459	-0,054	-0,046

Рисунок 1.9,в – Содержание таблиц в режиме *Расчёт*

На Рисунке 1.9,г представлено содержание таблицы *Конструктивные элементы*. Для каждого конструктивного элемента приведён его состав (номера элементов схемы фермы); тип элемента по характеру работы; конструктивная группа, в которую входит элемент; сечение элемента; сталь; длина в осях; описание.

Конструктивные элементы								
№	Элементы схемы	Тип элемента	Группа элементов	x	Сечение	Сталь	Длина, м	Описание
1	1	Осевое усилие + Изгиб	Раскос	2x	C 200x80x2,0 Beta Factory	350	1,803	
2	2	Осевое усилие + Изгиб	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	1,526	
3	3	Осевое усилие + Изгиб	Стойка	2x	C 200x80x2,0 Beta Factory	350	1,280	
4	4	Осевое усилие + Изгиб	Нижний пояс	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	1,800	
5	5	Осевое усилие + Изгиб	Раскос	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	2,209	
7	7	Осевое усилие + Изгиб	Стойка	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	1,616	
8	8	Осевое усилие + Изгиб	Нижний пояс	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	2,000	
9	9	Осевое усилие + Изгиб	Раскос	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	2,571	
10	10	Осевое усилие + Изгиб	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	2,035	
11	11	Осевое усилие + Изгиб	Стойка	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	1,989	
12	14	Осевое усилие + Изгиб	Нижний пояс	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	4,400	
13	12	Осевое усилие + Изгиб	Раскос	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	3,256	
14	13	Осевое усилие + Изгиб	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	2,238	
16	15	Осевое усилие + Изгиб	Раскос	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	3,256	
17	16	Осевое усилие + Изгиб	Верхний пояс	2x	Sgm 200-60-1,5 Delta Factory	350	2,238	
18	17	Осевое усилие + Изгиб	Стойка	2x	C 150x55x2,0 Beta Factory	350	1,989	

Рисунок 1.9,г – Содержание таблицы в режиме *Конструкция*

Щелчок правой кнопкой мыши по какому-либо элементу приводит к появлению меню с возможными действиями над выделенным конструктивным элементом (пп.2.6.2, 2.6.3).

В режиме работы *Проверки* (Рисунок 1.9,д) приводятся сокращённые результаты проверочных расчётов элементов. Для каждого конструктивного элемента в рамках текущего сочетания приводится одна проверка с наибольшим коэффициентом использования несущей способности. Переключение сочетаний производится на панели инструментов.



Результаты проверок		
№	Расчёт	Значение
1	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,947 < 1
2	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,683 < 1
3	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,726 < 1
4	Проверка прочности сечения по длине элемента	0,322 < 1
5	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,665 < 1
7	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,579 < 1
8	Проверка прочности сечения по длине элемента	0,412 < 1
9	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,691 < 1
10	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,973 < 1
11	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,755 < 1
12	Проверка прочности сечения по длине элемента	0,398 < 1
13	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,902 < 1
14	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,992 < 1
16	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,902 < 1
17	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,992 < 1
18	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,755 < 1
19	Проверка прочности сечения по длине элемента	0,412 < 1
20	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,691 < 1
21	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,973 < 1

Рисунок 1.9,д – Содержание таблицы в режиме *Проверки*

Двойным щелчком левой кнопки мыши активируется окно с подробными результатами проверок текущего конструктивного элемента (п. 5.1.2). Подробнее о результатах проверочных расчётов см. п.5.1.

## 1.2. Терминология

Ниже приведены некоторые термины и их определения, применительно к данному приложению.

*Конструктивный элемент* - совокупность нескольких элементов схемы/расчётной схемы фермы, которые при конструктивном расчёте рассматриваются как единый элемент. В состав конструктивного элемента входят элементы схемы с одинаковым сечением, между которыми нет разрывов. Эти элементы должны иметь общие узлы и лежать на одной прямой. Конструктивные элементы не должны входить в другие конструктивные элементы.

*Набор элементов* - совокупность элементов, сформированная по какому-либо критерию (признаку). Например, все элементы верхнего пояса, или все элементы нижнего пояса, или раскосы, или все элементы с определённым сечением, и т.д. Объединение элементов в набор может производиться в разных целях, например, для быстрого назначения набору сечения, стали, или приложения нагрузки, и т.д.

Различаются наборы из последовательно расположенных элементов и расположенных произвольно.

*Тип элемента* - характер работы элемента: Осевое усилие или Осевое усилие + Изгибающий момент.

*Конструктивная группа элементов (группа элементов)* - верхний пояс, нижний пояс, раскосы, стойки.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРМЫ

### 2.1. Вводные замечания

Формирование модели фермы обычно начинается с определения геометрической схемы, представляющей собой совокупность осей элементов фермы. Также назначаются: принципиальная *система фермы* (п.2.2), форма и размеры поперечных сечений элементов фермы, особенности конструктивного оформления элементов, стали. Также в некоторых случаях определяются конструктивные решения узловых сопряжений.

Начать работу по созданию модели фермы можно разными способами: при наличии уже созданных проектов - загрузить наиболее близкий и отредактировать его, либо создать новый проект и ввести заново информацию о проектируемой ферме. В последнем случае можно воспользоваться встроенным *Генератором ферм* или импортировать схему фермы из DXF файла.

### 2.2. Системы ферм

В программе предусмотрены три принципиальные конструктивные *системы ферм*. Под *системой ферм* подразумевается совокупность видов поперечных сечений поясов и решётки (одинарные или двойные профили) и способов соединения элементов решётки с поясами (на фасонках или бесфасоночное соединение). Рассматриваемые системы ферм показаны на Рисунке 2.1.

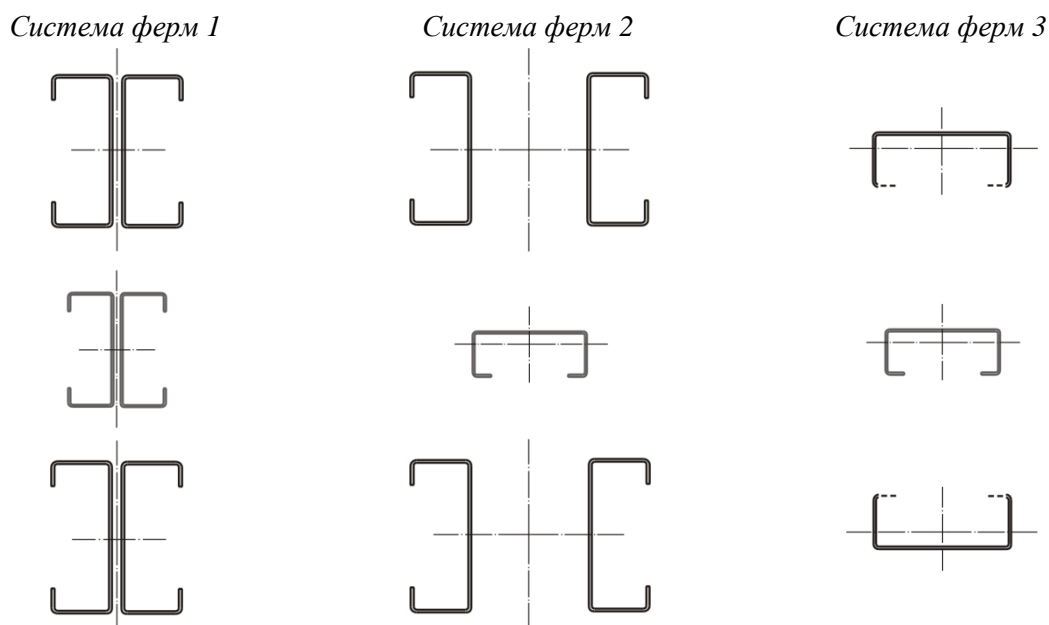


Рисунок 2.1 - Системы ферм

В *системе ферм 1* пояса и решётка выполняются из спаренных (стенка-к-стенке) профилей. Узловые соединения решаются на фасонках. По длине элементов фермы предусматриваются соединительные листовые вставки (сухари) (Рисунок 2.2,а).

В *системе ферм 2* пояса выполняются из двойных профилей, разведённых на расстояние, равное высоте профилей элементов решётки. Элементы решётки выполняются из одинарных профилей и заводятся горизонтально между ветвями поясов. Узловые сопряжения бесфасоночные. Ветви поясов между узлами соединяются листовыми деталями в двух горизонтальных плоскостях по верхнему и нижнему поясу профилей, составляющих элемент (Рисунок 2.2,б). Задание параметров объединения профилей для *систем ферм 1* и 2 см. п. 2.6.1.

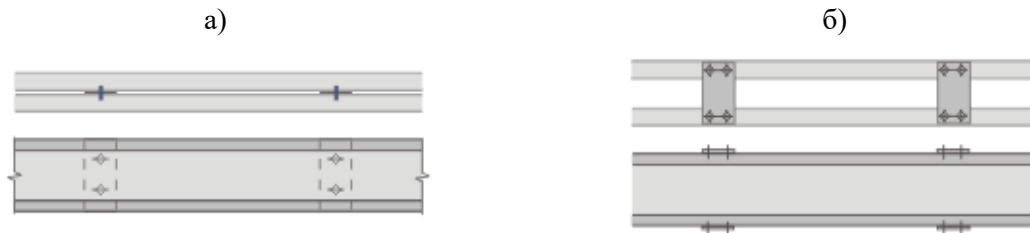


Рисунок 2.2 – Конструктивные решения элементов ферм:  
а) – элементы *системы ферм 1*; б) – пояса *системы ферм 2*

В *системе ферм 3* все элементы выполняются из одинарных профилей, стенка которых расположена горизонтально. Профили поясов располагаются навстречу друг другу. Элементы решётки заводятся внутрь поясов. Для этого наружный горизонтальный размер элемента решётки должен быть близок к внутреннему габариту сечения поясов фермы. Профили, из которых выполняются пояса фермы должны иметь отгибы, которые в местах сопряжения с элементами решётки отгибаются соосно поясам.

Все соединения осуществляется с помощью нефрикционных болтовых соединений.

## 2.3. Поперечные сечения элементов

Для элементов ферм предусмотрены следующие типы сечений холодногнутого профилей (одинарные или двойные в зависимости от системы ферм): Швеллер, С-образное сечение, С-образное сечение с двойными отгибами, С-образное сечение с рифом на стенке, Сигма-образное сечение.

### 2.3.1. Швеллер

Сечение в виде швеллера показано на Рисунке 2.3,а. Допускаемые значения размеров: высота сечения  $h = 70 \dots 400$  мм, номинальная толщина  $t = 0,7 \dots 4$  мм, ширина пояса  $b_f = 40 \dots 200$  мм, внутренний радиус закругления  $r = 1 \dots 8$  мм.

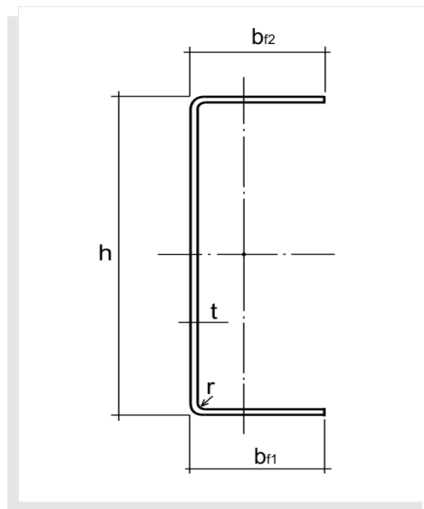


Рисунок 2.3,а – Швеллер

### 2.3.2. С-образное сечение

С-образное сечение показано на Рисунке 2.3,б. Допускаемые значения размеров:  $h = 70 \dots 400$  мм,  $t = 0,7 \dots 4$  мм,  $b_f = 40 \dots 200$  мм,  $c = 5$  мм... $1/3 h$ ,  $\alpha = 60 \dots 120^\circ$ ,  $r = 1 \dots 8$  мм.

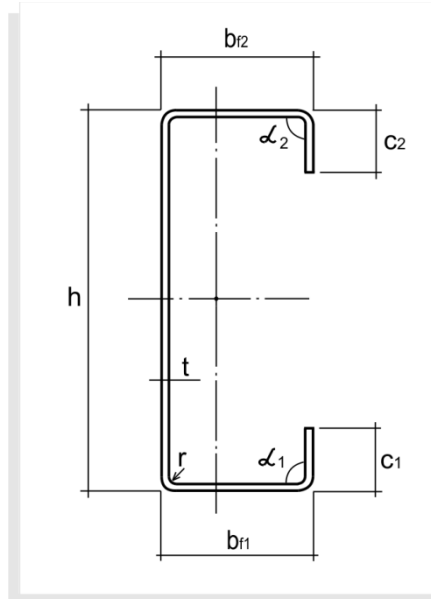


Рисунок 2.3,б – С-образное сечение

### 2.3.3. С-образное сечение с двойными отгибами

С-образное сечение с двойными отгибами показано на Рисунке 2.4. Допускаемые значения размеров:  $h = 80 \dots 400$  мм,  $t = 0,7 \dots 4$  мм,  $b_f = 40 \dots 200$  мм,  $c = 5$  мм... $1/5 h$ ,  $d < 1/3 b_f$ ,  $\alpha = 90 \dots 135^\circ$ ,  $r = 1 \dots 8$  мм.

При вычислении редуцированных характеристик эффективного сечения считается, что вертикальные части отгибов всегда эффективны.

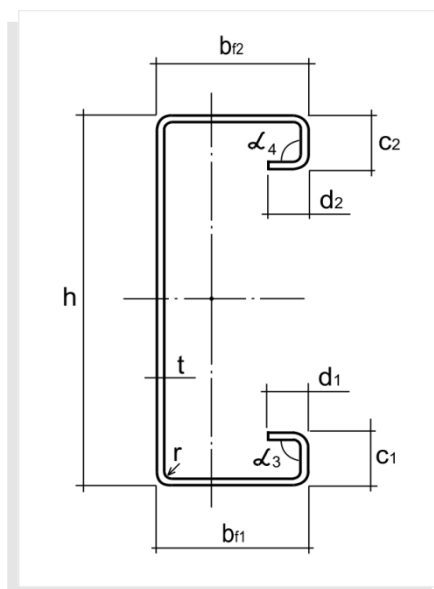


Рисунок 2.4 - С-образное сечение с двойными отгибами

### 2.3.4. С-образное сечение с рифом на стенке

С-образное сечение с рифом на стенке показано на Рисунке 2.5. Радиусы всех закруглений одинаковые. Допускаемые значения размеров:  $h = 80 \dots 400$  мм,  $t = 0,7 \dots 4$  мм,  $b_f = 40 \dots 200$  мм,  $d \geq 5$  мм,  $1,5d \leq h_1 \leq 3d$ ,  $c = 5$  мм...  $1/3 h$ ,  $r = 1 \dots 8$  мм. Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  могут принимать значение только  $90^\circ$ .

При вычислении редуцированных характеристик эффективного сечения считается, что жёсткость рифа в направлении оси, перпендикулярной стенке достаточна для того, чтобы в любом случае не происходили его относительные перемещения вдоль этой оси. Возможность потери устойчивости частей стенки между рифом и поясами сохраняется.

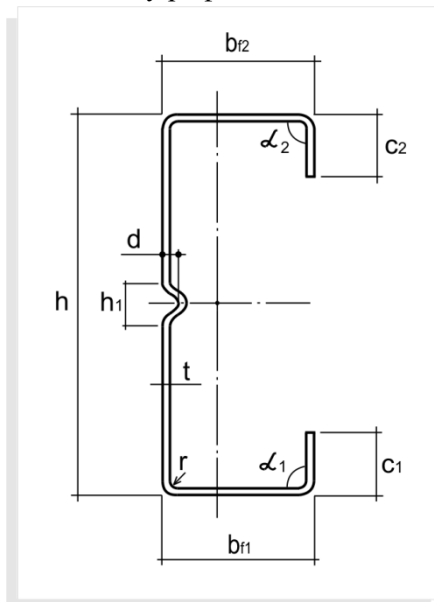


Рисунок 2.5 - С-образное сечение с рифом на стенке

### 2.3.5. Сигма-образное сечение

Сигма-образное сечение показано на Рисунке 2.6. Радиусы всех закруглений одинаковые. Допускаемые значения размеров:  $h = 80 \dots 400$  мм,  $t = 0,7 \dots 4$  мм,  $b_f = 40 \dots 200$  мм,  $h_1 = 40$  мм  $\dots 4/5 h$ ,  $h_2 = h_1 - 2d \dots h_1 - d/3$ ,  $d = 8$  мм  $\dots b_f/2$ ,  $c = 5$  мм  $\dots 1/3 h$ ,  $r = 1 \dots 8$  мм. Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  могут принимать значение только  $90^\circ$ .

При вычислении редуцированных характеристик эффективного сечения считается, что жёсткости двух наклонных участков стенки в направлении оси, перпендикулярной стенке, достаточны для того, чтобы при любой нагрузке не происходило их перемещение вдоль этой оси. Возможность потери устойчивости средней части стенки и частей стенки между наклонными участками и поясами сохраняется.

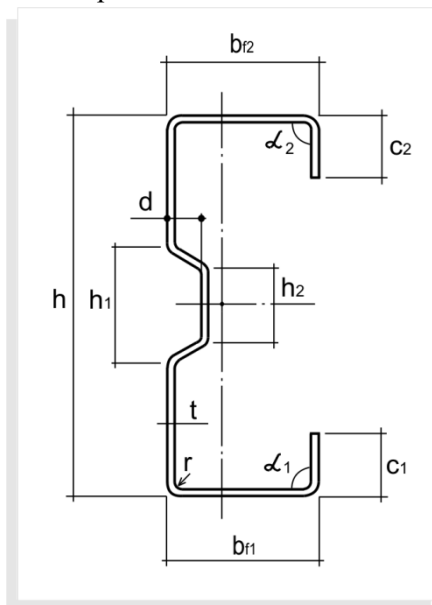



Рисунок 2.6 - Сигма-образное сечение

Приёмы работы с базами профилей подробно рассмотрены в *CFSteel. Том I. Руководство пользователя* [26].

## 2.4. Новый проект

Создать новый проект можно следующими образом. Выбрать в главном меню *Файл* → *Новый...*, или  на панели инструментов, или с помощью горячей клавиши Ctrl-N. После чего появляется диалоговое окно *Новый*, показанное на Рисунке 1.3. Вводимая в данное окно информация подробно рассмотрена в п. 1.1.1.1.

## 2.5. Схема фермы

Основой модели фермы является её схема. Если ферма проектируется на базе существующего проекта, то схема может быть отредактирована в окне графического редактора (п.2.5.3) в режиме *Схема*. При создании нового проекта доступны следующие варианты формирования схемы фермы:

- с помощью *Генератора ферм*;
- импорт схемы из какой-либо CAD системы через DXF файл.

- непосредственное формирование в окне графического редактора.

Созданная с помощью первых двух способов схема фермы, может быть в дальнейшем отредактирована в окне графического редактора.

Назначая элемент схемы, рекомендуется первым вводить узел, который располагается левее, а затем узел, имеющий большую координату X. Для вертикальных элементов сначала вводится нижний узел, затем верхний.

### 2.5.1. Создание схемы фермы с помощью Генератора ферм

Для входа в Генератор ферм выберите *Файл* → *Генерировать ферму...* Появится диалоговое окно *Генератор ферм* (Рисунок 2.7)

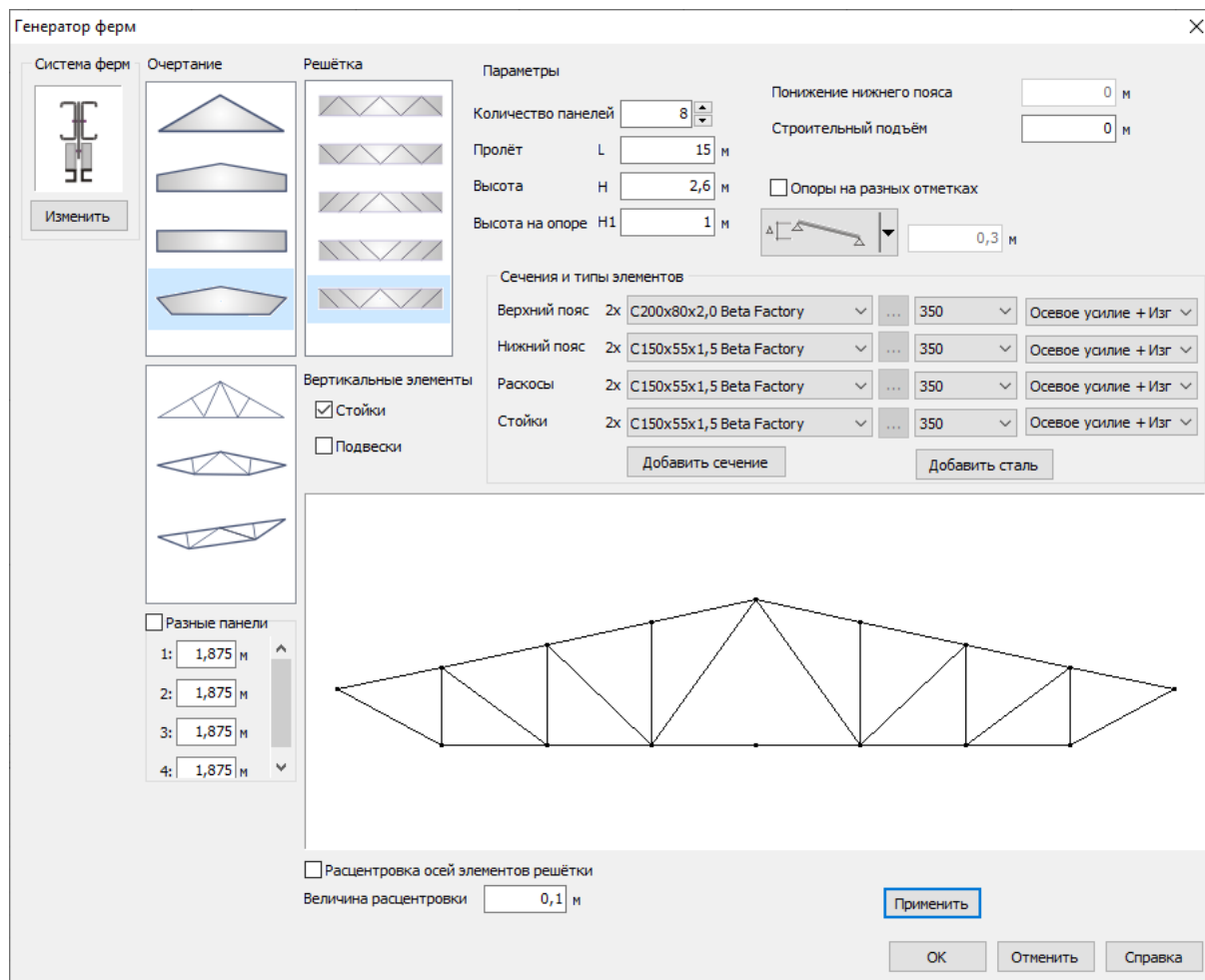


Рисунок 2.7 – Диалоговое окно *Генератор ферм*

Компоновка схемы фермы начинается с назначения её топологии, которая в свою очередь определяется параметрами *Очертание* и *Решётка*. Кроме того, на панели *Вертикальные элементы* можно включить в состав фермы вертикальные элементы, работающие на сжатие при гравитационной нагрузке *Стойки*, или исключить их. Это же относится и к вертикальным *Подвескам*, работающим на растяжение. Полагается, что при приложении вертикальной нагрузки к верхнему поясу в последних сколь-нибудь значимых осевых усилиях не возникает.

В нижней части панели *Очертание* приведены прототипы ферм с уже определённой решёткой. Для первой и третьей схемы из этого блока пользователь может изменить количество панелей верхнего пояса.

В группе данных *Параметры* вводятся: *Количество панелей* в ферме, *Пролёт фермы L*, *Высота в коньке H*, *Высота на опоре H1* (при необходимости). Здесь полагается, что ферма симметрична относительно вертикальной оси.

По умолчанию длина панелей фермы одинаковая. Если же в проектируемой ферме панели разные, то необходимо отметить *Разные панели* и ввести горизонтальные проекции длин панелей.

При вводе в поле *Понижение нижнего пояса* значения, отличного от нуля, происходит снижение нижнего пояса относительно опор на введённую величину. Данная операция не предусмотрена для ферм с четвёртым вариантом очертания. Строительный подъём фермы можно предусмотреть введя его значение в поле *Строительный подъём*. При этом нижний пояс из прямой, соединяющей две опоры, превращается в ломаный, состоящий из двух прямых, с максимальным превышением в среднем узле. Для типа ферм с параллельными поясами такие же изменения претерпевает и верхний пояс. Одновременное задание понижения нижнего пояса и создание строительного подъёма в *Генераторе ферм* не предусмотрено.

Если ферма имеет опоры, расположенные на разных высотных отметках, то необходимо отметить *Опоры на разных отметках*. Далее следует выбрать какая опора выше (левая или правая) и какова величина этого превышения.

Для трапецевидных ферм можно предусмотреть *Свес* поставив флажок на одноимённой панели и введя его значение.

На этапе генерации ферм возможна автоматическая расцентровка осей элементов в узлах поясов. Это может быть актуально для систем ферм 2 и 3. Для расцентровки осей следует отметить *Расцентровка осей* и ввести значение расцентровки. Подразумевается одинаковая расцентровка осей во всех узлах фермы. В дальнейшем в графическом редакторе схемы можно переопределить величину расцентровки для каждого узла индивидуально (п.2.5.3.1), а также при примыкании к узлу двух раскосов – разную величину расцентровки для каждого из них.

В *Генераторе ферм* кроме компоновки схемы рекомендуется присваивать сечения и стали *Группам элементов: Верхний пояс, Нижний пояс, Раскосы, Стойки* (вертикальные элементы). Также для них назначается *Тип элемента*. Это параметр, определяющий характер работы элемента: *Осевое усилие + Изгиб* или *Осевое усилие*. Данная вводимая информация служит для удобства формирования расчётной схемы фермы. Тип *Осевое усилие + Изгиб* подразумевает наличие осевых усилий, изгибающих моментов и поперечных сил в элементе фермы. Для элементов с параметром *Осевое усилие* в расчётной схеме фермы в начало и конец стержня автоматически врезаются шарниры, что означает возникновение только осевых сил (если к стержню не приложена поперечная нагрузка). Следует заметить, что после помещения скомпонованной в *Генераторе ферм* схемы в графический редактор имеется возможность пере назначить наличие/отсутствие шарниров в начале и конце каждого элемента индивидуально, а, следовательно, и переопределить *Тип элемента*. Поэтому на промежуточных этапах работы с проектом *Тип элемента* носит ориентировочный характер.

Точный характер работы элемента может быть определён только после расчёта.

Сечения для верхнего пояса, нижнего пояса, раскосов, вертикальных элементов присваиваются отдельно из уже сформированной в ходе работы с программой CFSteel *Базы профилей (CFSteel. Том I. Руководство пользователя [26])*. Если пользователь работает в *Генераторе ферм* непосредственно после открытия нового проекта и не подгрузил из какого-либо существующего проекта библиотеку профилей (см. п.1.1.1.1), то *Библиотека профилей* текущего проекта ещё не сформирована. В данном случае необходимо сформировать *Библиотеку профилей проекта*. Для этого по кнопке *Добавить сечение* открыть диалоговое



окно *Добавить сечение*, показанное на Рисунке 2.8, где нажать *Выбрать...*. В появившемся окне (Рисунок 2.9) следует выбрать *Тип профиля*, *Базу профилей* и *Профиль* из неё. По кнопке *Редактировать* можно назначить свои размеры сечения, после чего *обязательно* ввести наименование профиля.

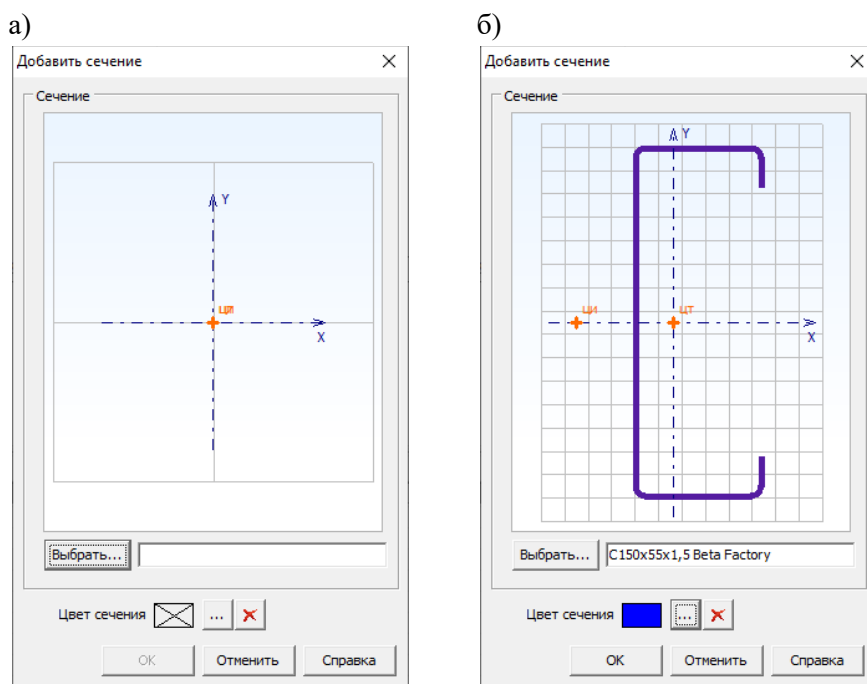


Рисунок 2.8 - Диалоговое окно *Добавить сечение*

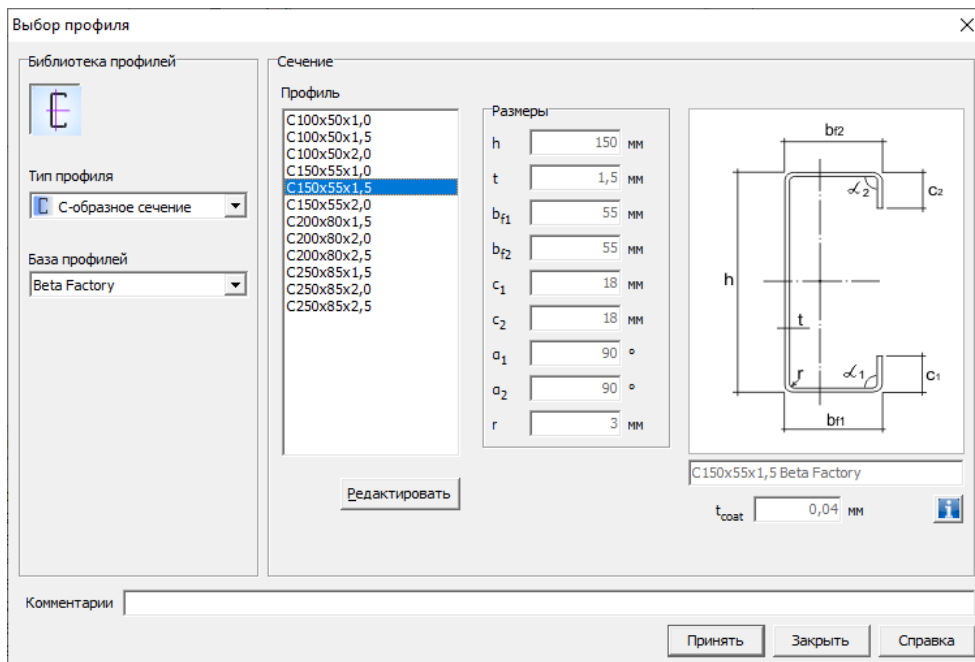


Рисунок 2.9 - Диалоговое окно *Выбор профиля*

Можно назначить текущему сечению цвет, которым имеющие его элементы будут показываться в окне графического редактора.

Далее таким же образом по кнопке *Добавить сечение* добавляется следующее сечение и т.д. Таким образом формируется *Библиотека профилей проекта*.

Если при работе в окне *Новый* или *Общие данные* пользователь подгрузил библиотеку профилей из какого-либо проекта, то она уже имеется в текущем проекте как *Библиотека профилей проекта*, которую в свою очередь можно пополнить как это показано выше по кнопке *Добавить сечение*.

Аналогично сечениям назначаются стали. По кнопке *Добавить сталь* появляется окно *Добавить сталь* (Рисунок 2.10). В данном окне содержатся базы сталей, которые пользователь создал в рамках работы с программой CFSteel (подробнее см. *CFSteel. Том 1. Руководство пользователя* [26]). Необходимо выбрать *Группу стандартов*, *Стандарт*, *Наименование стали* по этому стандарту. *Нормативное сопротивление стали по пределу текучести  $R_{yn}$  ( $f_y$ )* и *Нормативное сопротивление стали по пределу прочности  $R_{un}$  ( $f_u$ )* для данной стали присвоятся автоматически в соответствии с информацией из соответствующей базы.

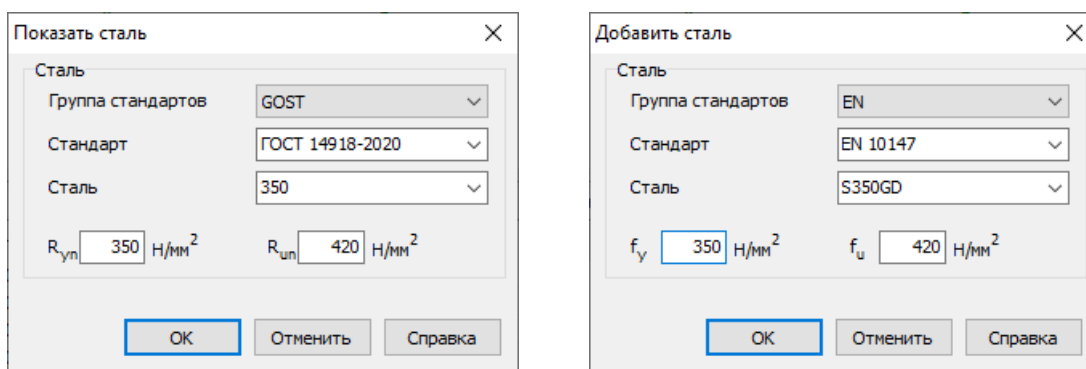


Рисунок 2.10 - Диалоговое окно *Добавить/Показать сталь*

В этом же окне пользователь может ввести свой *Стандарт* на сталь, наименование *Стали*, значения  $R_{yn}$  ( $f_y$ ) и  $R_{un}$  ( $f_u$ ), которые будут актуальны только в рамках текущего проекта.

Добавить сечение в *Библиотеку профилей проекта*, удалить сечение из неё в дальнейшем после окончания работы с *Генератором ферм* можно в *Менеджере проекта* в разделе *Библиотека проекта*. Это же относится и к сталям.

### 2.5.2. Импорт схемы фермы

Схема фермы может быть импортирована из какой-либо САД-системы посредством созданного в ней файла в формате DXF. При вычерчивании схемы допускается использование отрезков и полилиний. Для импорта в пункте главного меню *Файл* необходимо выбрать *Импорт DXF...* В результате появится стандартное диалоговое окно *Открыть*, где пользователь выбирает DXF файл, в котором содержится схема фермы. После чего появляется окно предварительного просмотра схемы (Рисунок 2.11), где доступны настройки импорта и некоторые элементы предварительного редактирования схемы фермы.

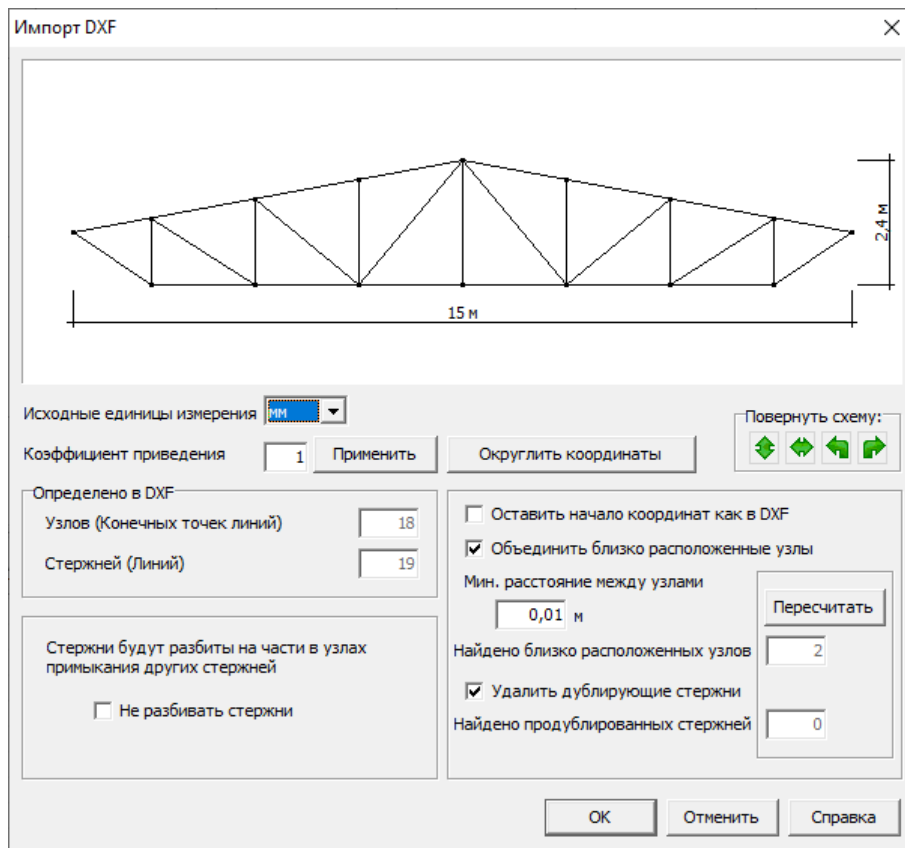


Рисунок 2.11 - Предварительный просмотр и обработка схемы фермы при импорте

Полагается, что чертёж схемы фермы в файле DXF выполнен в миллиметрах. Тогда при *Коэффициенте приведения*, равном единице будем иметь реальные размеры фермы. Если схема выполнена в других единицах измерения (в рамках системы СИ) или единицы измерения неизвестны, то с помощью *Коэффициенте приведения* можно добиться корректных размеров, которые можно проконтролировать в окне графического представления схемы. Отображение фермы в графическом окне происходит в текущих единицах измерения программы.


По кнопке *Округлить координаты* происходит округление размеров фермы.




В САД-системе схема фермы может быть начерчена в любом месте относительно начала системы координат. Если пользователь не отметит *Оставить начало координат как в DXF*, то программа в своём рабочем окне поместит ферму в начало координат.

Если пользователь отметит *Объединить близко расположенные узлы* и введёт *Минимальное расстояние между узлами*, то программа объединит отвечающие этому условию узлы в один узел. Причём, программа сообщает о количестве таких узлов. После редактирования минимального расстояния необходимо выполнить *Пересчитать*.

В DXF представлении схемы фермы могут присутствовать дублированные (совпадающие) стержни, т.е. стержни, начерченные два, три, ... раза. Программа сообщает о наличии таких стержней. Если отметить *Удалить дублирующие стержни* (рекомендуется), то программа оставит только один необходимый стержень. Если не отметить данный пункт, то программа поместит схему фермы в рабочее окно *как есть* и пользователю необходимо самостоятельно в окне графического редактора в режиме *Схема* удалить лишние стержни.

При импорте программа автоматически вставляет узлы в места пересечения линий исходной схемы.

В данном окне также возможны некоторые действия по редактированию схемы фермы. Например, по  происходит зеркальный переворот конструкции относительно горизонтальной

плоскости. По  поворот относительно вертикальной плоскости, по стрелке  ферма поворачивается на  $90^{\circ}$  против часовой стрелки, а по  - по часовой стрелке.

### 2.5.3. Редактирование схемы фермы / формирование расчётной схемы

Редактирование схемы фермы происходит в окне графического редактора в режиме *Схема*. Возможны операции с узлами, элементами (стержнями), опорными закреплениями и наборами элементов. Кликнув правой кнопкой мыши в любом месте окна графического редактора, можно вызвать контекстное меню (Рисунок 2.12), где возможны следующие действия:

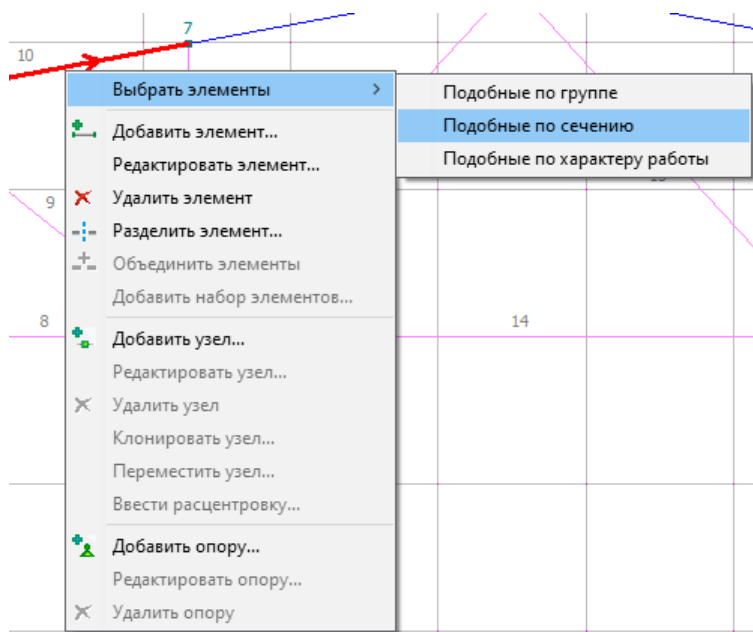


Рисунок 2.12 – Меню действий редактирования схемы

*Добавить узел.* После выбора данного пункта появляется одноимённое окно, показанное на Рисунке 2.13. Пользователь может ввести координаты добавляемого узла либо относительно начала координат, либо относительно выбранного узла. Введя координаты узла, следует нажать *ОК*, после чего узел появится в окне графического редактора. Если отмечено *Продолжить ввод*, программа будет готова к вводу координат следующего узла. В противном случае после нажатия *ОК* окно закрывается.

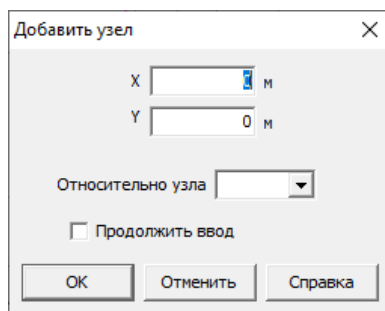



Рисунок 2.13 - Диалоговое окно *Добавить узел*

Добавить узел также можно кликнув правой кнопкой мыши по пункту *Узлы Менеджера проекта*, а также выбрав  на панели инструментов.

*Добавить элемент.* После выбора данного пункта появляется окно, показанное на Рисунке 2.14. Пользователю необходимо ввести номера начального и конечного узлов элемента. При необходимости следует отметить наличие шарнира в начале и/или конце элемента. Также указывается группа элементов: *верхний пояс*, *нижний пояс*, *стойка*, *раскос* или *не задана*. *Тип элемента* является не редактируемым полем и может принимать значение *Осевое усилие* при наличии шарниров на обоих концах элемента или *Осевое усилие + Изгиб*, если хотя бы в одном узле элемента отсутствует шарнир. Также назначается *Сечение* элемента и *Сталь* из *Библиотеки проекта*.

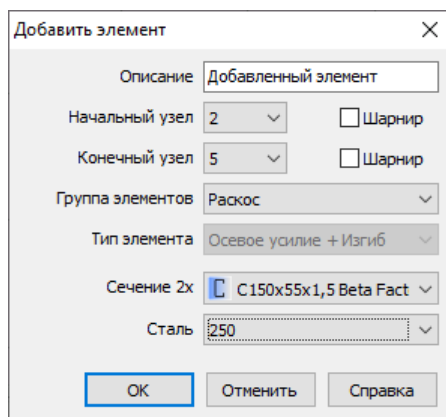



Рисунок 2.14 - Диалоговое окно *Добавить элемент*

Добавить элемент также можно кликнув правой кнопкой мыши по пункту *Элементы Менеджера проекта*, а также выбрав  на панели инструментов.

*Добавить/Редактировать опорное закрепление.* После выбора данного пункта появляется окно, показанное на Рисунке 2.15. Необходимо выбрать номер узла, который является опорным, и указать на какое перемещение накладывается связь. На Рисунке 2.15 наложена связь (исключено линейное перемещение) по оси X и по оси Z. Поворот относительно оси Y разрешается. Иными словами, имеет место шарнирно неподвижная опора.

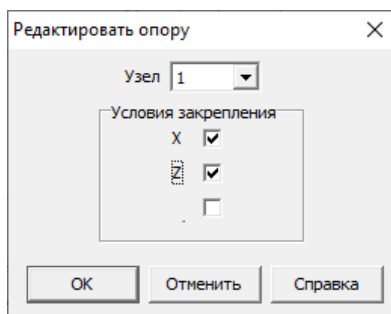



Рисунок 2.15 - Диалоговое окно *Добавить/Редактировать опорное закрепление*

Добавить опорное закрепление также можно кликнув правой кнопкой мыши по пункту *Опорные закрепления Менеджера проекта*, а также выбрав  на панели инструментов.

### 2.5.3.1. Операции с узлами

Для выполнения операции с каким-либо узлом его необходимо предварительно выбрать. Выбор может осуществляться по-разному:

- кликнуть по нему левой кнопкой мыши в графическом редакторе,
- отметить его на панели *Узлы Менеджера проекта*,
- отметить его на панели *Узлы Таблиц*.

Далее по клику правой кнопкой мыши в зависимости от способа выбора появляется окно выбора действий с узлами (Рисунок 2.16). Кроме добавления узла (см. выше) доступны:

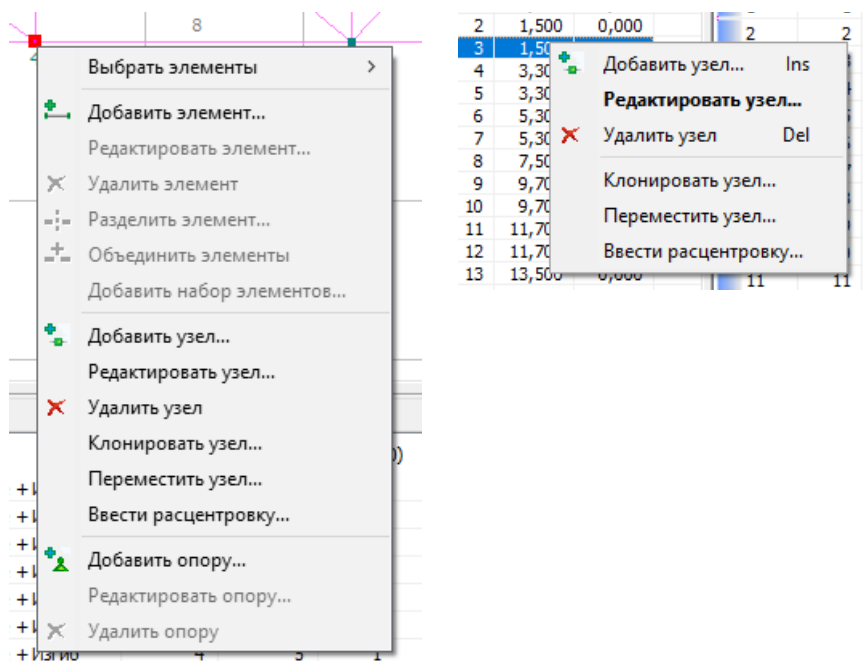


Рисунок 2.16 – Операции с узлами

- редактирование узла (изменение координат узла),
- удаление узла,
- клонирование (дублирование) узла,
- перемещение узла,
- расцентровка осей стержней решётки, примыкающих к узлу пояса.

При выборе *Удалить узел* появляется контекстно-зависимое диалоговое окно (Рисунок 2.17). Если к удаляемому узлу с противоположных сторон примыкают стержни, располагающиеся на одной прямой (Рисунок 2.17,а), то пользователь может выбрать что следует сделать при удалении узла: объединить примыкающие стержни или удалить их. В других случаях (например, Рисунок 2.17,б) при удалении узла удаляются все примыкающие к нему стержни.

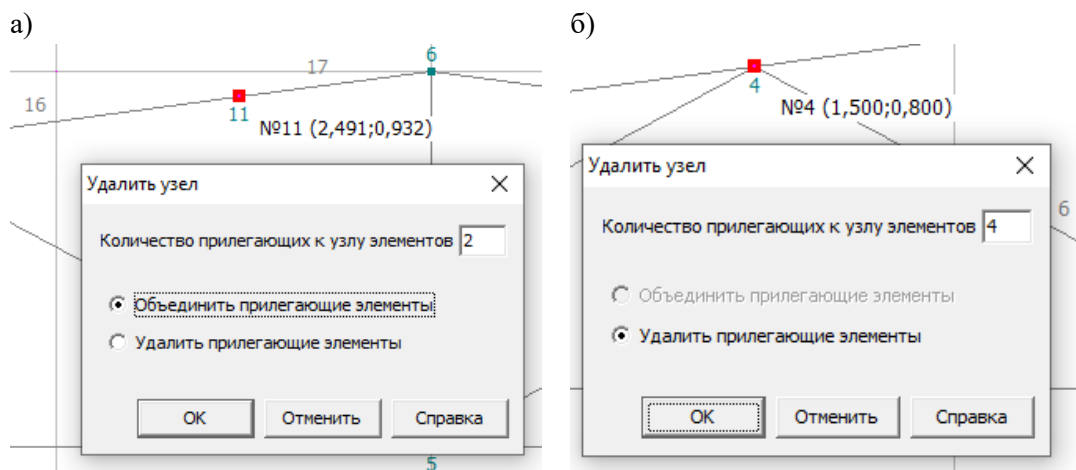


Рисунок 2.17 - Диалоговое окно *Удалить узел*

При выборе *Клонировать узел* появляется диалоговое окно, показанное на Рисунке 2.18. В результате выполнения данной процедуры появляется дубликат выделенного узла на выбранном примыкающем элементе, на введённом пользователем расстоянии. При этом примыкающий элемент будет разбит на два элемента (если отмечено *Разбить элемент*). В противном случае разбиения не произойдёт.

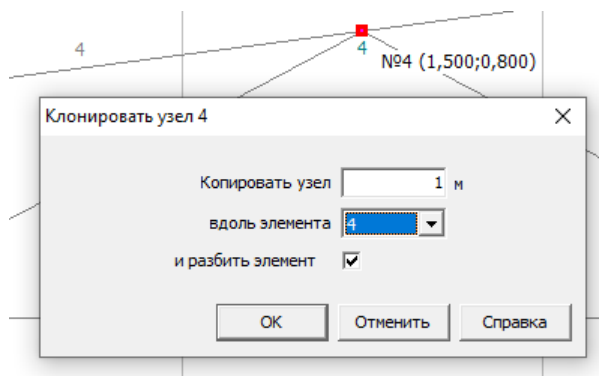


Рисунок 2.18 - Диалоговое окно *Клонировать узел*

Если необходимо переместить имеющийся узел, следует выбрать *Переместить узел*, после чего появляется диалоговое окно, приведённое на Рисунке 2.19. Задаётся расстояние от соседних базовых узлов и в каком направлении перемещать узел: вдоль элемента, на котором располагается перемещаемый узел, либо введённое расстояние должно откладываться от указанного базового узла по горизонтали, или по вертикали.

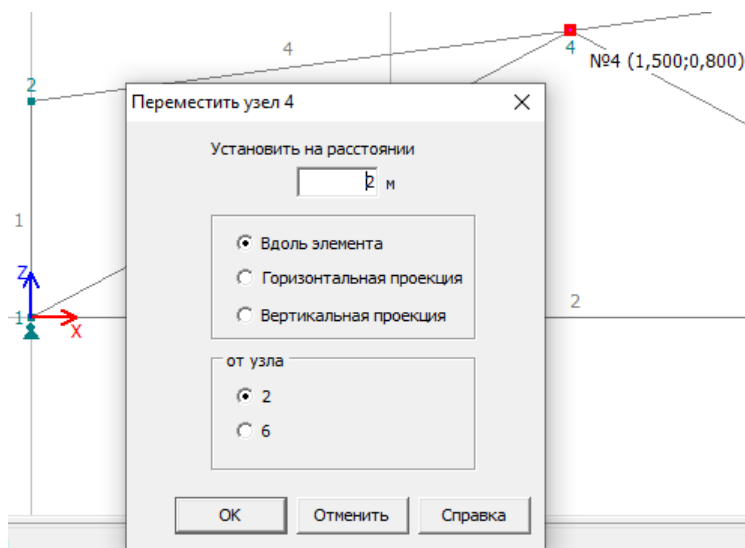


Рисунок 2.19 - Диалоговое окно *Переместить узел*

Для задания расцентровки осей элементов решётки, сходящихся в узле пояса, необходимо выбрать *Расцентровка осей*. В появившемся окне (Рисунок 2.20) задаётся величина расцентровки. Предполагается, что к узлу могут примыкать до двух раскосов. В этом случае расцентровка полагается одинаковой.

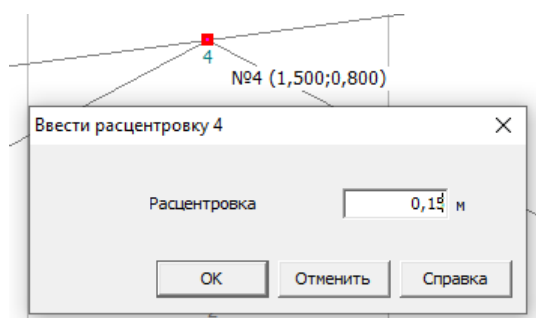



Рисунок 2.20 - Диалоговое окно *Ввести расцентровку*

Вызвать команду *Расцентровка осей* также можно выбрав  на панели инструментов. В этом случае будет выполнена расцентровка во всех узлах поясов, к которым примыкает два и более элемента решётки.

### 2.5.3.2. Операции с элементами

Для операций с каким-либо элементом его необходимо предварительно выбрать. Выбор может осуществляться разными способами:

- кликнуть по нему левой кнопкой мыши в графическом редакторе,
- отметить его на панели *Элементы Менеджера проекта*,
- отметить его на панели *Элементы Таблиц*.

Далее по щелчку правой кнопкой мыши в зависимости от способа выбора появляется окно выбора операций с элементами (Рисунок 2.21). Кроме добавления элемента (см. выше) доступны:



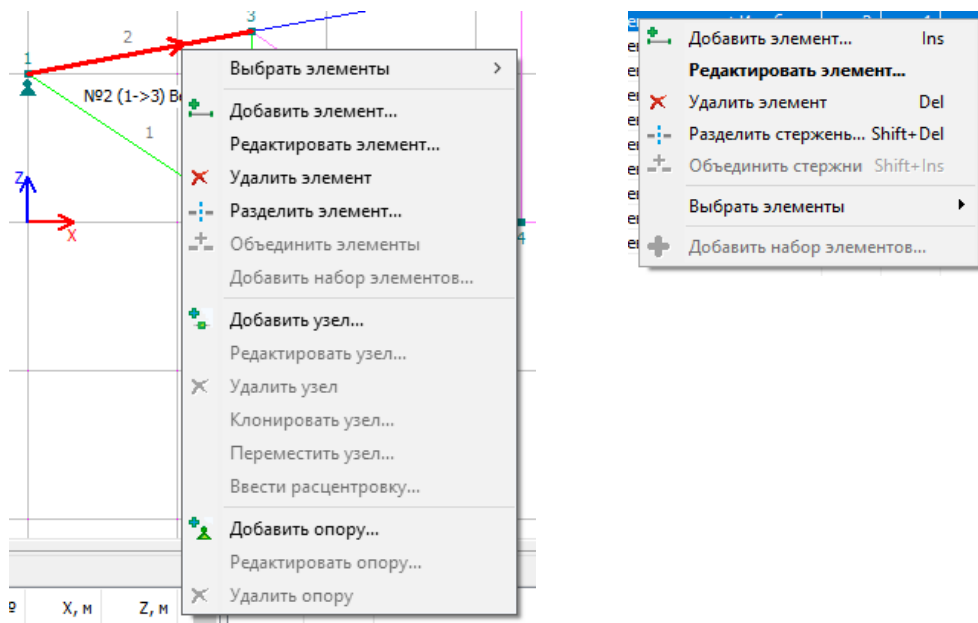


Рисунок 2.21 – Операции с элементами

- редактирование элемента,
- удаление элемента,
- разбиение элемента,
- объединение элементов.

При выборе *Редактировать элемент* появляется диалоговое окно (Рисунок 2.22), в котором можно внести корректировки.

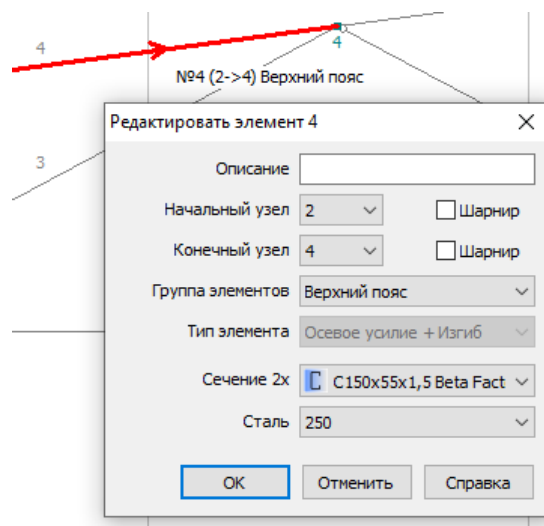


Рисунок 2.22 - Диалоговое окно *Редактировать элемент*

При выборе *Удалить элемент* выделенный элемент удаляется с предварительным запросом на подтверждение операции.

Если выбирается команда *Разделить элемент*, появляется диалоговое окно, показанное на Рисунке 2.23. Здесь для справки указывается длина элемента. Разбиение может производиться либо на две равные части, либо путём введения длины первого участка (от

начала элемента – начального узла) или второго участка. Если вводится длина первого участка, то второй участок вычисляется автоматически, и наоборот.

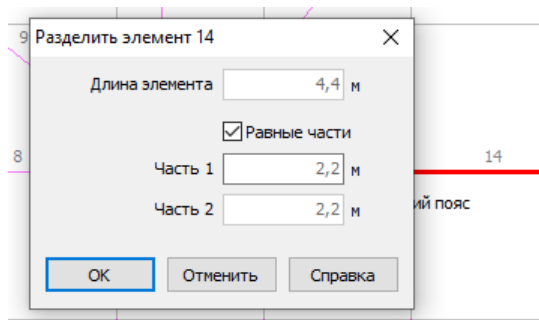




Рисунок 2.23 - Диалоговое окно *Разделить элемент*

Вызвать команду *Разделить элемент* также можно выбрав  на *Панели инструментов*.

Для объединения нескольких элементов в один их необходимо отметить; затем выбрать  на панели инструментов или *Объединить элементы*. После предварительного информационного сообщения элементы будут объединены. Объединить можно только последовательно расположенные на одной линии элементы. Кроме того, в узлах, их разделяющих, к ним не должны примыкать другие элементы.

### 2.5.3.3. Редактирование опорных закреплений

Для операций с опорным закреплением его необходимо предварительно выбрать. Это можно выполнить следующими способами:

- кликнуть по закреплению левой кнопкой мыши в графическом редакторе,
- отметить его на панели *Опорные закрепления Менеджера проекта*,
- отметить его на панели *Опорные закрепления Таблиц*.

Далее по щелчку правой кнопкой мыши появляется диалоговое окно выбора операций с опорными закреплениями. Кроме добавления (см. выше) также доступно редактирование, где пользователь назначает на какие перемещения накладываются связи. Также возможно удаление опорного закрепления.

### 2.5.3.4. Набор элементов

Программа позволяет пользователю сформировать неограниченное количество наборов элементов (п.1.2). Включение в тот или иной набор производится по какому-либо общему для элементов признаку, например, одинаковое сечение, одинаковая сталь, один укрупнённый элемент фермы (верхний пояс или левая/правая половина верхнего пояса, нижний пояс, раскосы, стойки, опорные раскосы) и т.д. Цели для различных наборов элементов могут быть разными, например, быстрая замена сечения, приложение нагрузки к верхнему поясу, приложение нагрузки к левой половине верхнего пояса, и т.д.

Для добавления нового набора элементов отметьте все входящие в предполагаемый набор элементы в графическом редакторе или наберите их список в *Менеджере проекта* или отметьте их в *Таблице*. Затем щёлкните правой кнопкой мыши по одному из них. В появившемся контекстном меню выберите *Добавить набор элементов*. После чего появится диалоговое окно, показанное на Рисунке 2.24. Необходимо ввести произвольное наименование набора. Желательно, чтобы название носило какую-то смысловую нагрузку. Во второй строке уже содержатся номера выбранных элементов. Набор может состоять из последовательно

расположенных без разрыва элементов – *Неразрывный* или расположенных в разных местах (например, набор, состоящий из опорных раскосов) *Произвольный*. Можно ввести пояснения к набору в поле *Описание*.

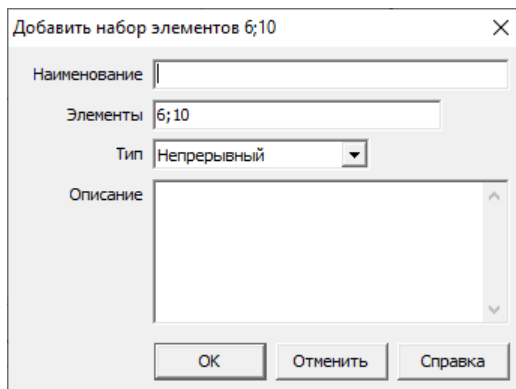


Рисунок 2.24 - Диалоговое окно *Добавить набор элементов*

Для существующего *Набора элементов* доступны следующие действия:

- редактирование набора,
- удаление набора,
- быстрый выбор всех элементов, входящих в набор,
- редактирование всех элементов, входящих в набор.

Для доступа к этим действиям кликните правой кнопкой мыши на нужном наборе элементов в *Менеджере проекта* и затем выберите нужное действие.

По команде *Редактировать набор элементов* появляется диалоговое окно, подобное показанному выше. В окне можно отредактировать *Наименование* набора и содержание *Описания* набора.

По кнопке *Редактировать все элементы из набора...* появляется диалоговое окно (Рисунок 2.25), в котором можно отредактировать общие параметры элементов, входящих в набор: *Описание*, установить/удалить *Шарниры*, заменить *Группу элементов* (*Верхний пояс*, *Нижний пояс*, *Раскос*, *Стойка*), отредактировать *Сечение* или *Сталь*. В результате новые значения параметров будут иметь все элементы, входящие в текущий набор.

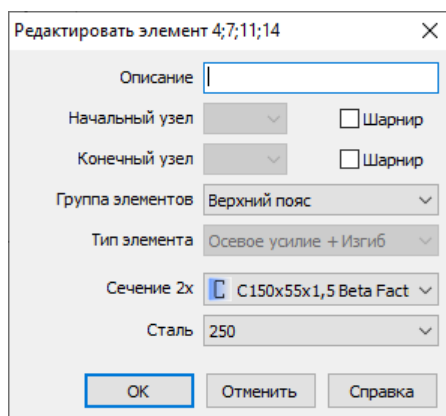


Рисунок 2.25 - Диалоговое окно редактирования всех элементов набора


По команде *Удалить набор элементов* происходит удаление всех элементов, входящих в набор. В некоторых случаях это сделать не представляется возможным, например, если хотя

бы к одному из элементов приложена нагрузка. Тогда программа сообщит об этом и прекратит выполнять команду на удаление. Если все же необходимо удалить элементы набора, тогда следует удалить препятствие, выданное программой, и снова повторить команду на удаление.

По команде *Выделить все элементы из набора* в графическом редакторе, в *Менеджере проекта* и в *Таблице* выделяются все элементы, входящие в состав текущего набора.

Выполнить выделение нескольких элементов можно стандартным способом отмечая их мышью в окне графического редактора, или в *Менеджере проекта*, или в *Таблице* при нажатой клавише Ctrl. Далее по щелчку правой кнопки мыши по одному из них появляется меню доступных действий.

### 2.5.3.5. Перенумерация узлов и элементов

При активном редактировании схемы фермы возникают разрывы в нумерации узлов и элементов. С помощью команды *Сортировать узлы и элементы*  на *Панели инструментов* можно выполнить сплошную без разрывов нумерацию. *Данная операция может быть выполнена только при отсутствии введенных нагрузок.*

## 2.5.4. Библиотека сечений и сталей проекта

Для проекта рекомендуется иметь библиотеки сечений и сталей, которые будут использоваться для назначения этих параметров элементам фермы. При открытии нового проекта такие библиотеки можно загрузить из какого-либо уже существующего проекта. В таком случае те сечения и стали, которые использовались в этом проекте, будут доступны и в новом проекте фермы. Для этого в диалоговом окне *Новый* на панели *Импорт* нужно выбрать *Библиотека* и стандартными средствами Windows выбрать файл проекта, из которого будут импортированы библиотеки.

Также для проекта можно создать новую библиотеку сечений. В таком случае в *Менеджере проекта* выберите в разделе *Библиотека проекта* пункт *Сечения*. Кликнув правой кнопкой мыши, во всплывающем меню выберите *Добавить сечение*. После чего выполните выбор сечения как это показано в п. 2.5.1.

Если модель создаётся с помощью генератора ферм, то рекомендуется добавлять сечение и/или сталь по кнопкам *Добавить сечение*, *Добавить сталь* (п.2.5.1).

В любой момент доступен просмотр информации о сечении и стали. Удалить сечение и сталь из библиотеки можно только в том случае, если они не присвоены ни одному из элементов фермы.

### 2.5.4.1. Назначение сечений и сталей элементам фермы

При формировании модели с помощью *Генератора ферм* сечения назначаются группам конструктивных элементов (*Верхний пояс*, *Нижний пояс*, *Раскосы*, *Стойки*) из уже созданной библиотеки или библиотеки, формируемой в ходе работы в генераторе. В дальнейшем сечения элементов могут быть переназначены в графическом редакторе. Изложенное выше относится и к сталям.

При импорте схемы фермы из DXF файла сечения и стали назначаются в графическом редакторе в режиме *Схема*. Если стержней в ферме достаточно много, вероятно, будет удобным сначала объединить элементы в *Наборы элементов* в данном случае по признаку одинакового сечения (п.2.5.3.4), и затем присвоить каждому набору сечение. Для этого в *Менеджере проекта* выбирается соответствующий набор элементов и по щелчку правой кнопки мыши во всплывающем меню выбирается *Редактировать все элементы из набора....* После чего в открывшемся диалоговом окне (Рисунок 2.25) можно назначить или отредактировать сечение и/или сталь.

Также набрать группу стержней, для которой впоследствии назначить сечение, можно стандартным способом, отмечая стержни левой кнопкой мыши при нажатой клавише Ctrl. Причём, отмечать можно на схеме фермы или в таблице. Далее, щёлкнув правой кнопкой мыши, выбрать во всплывающем меню *Редактировать элемент* и в появившемся диалоговом окне назначить сечение и/или сталь.

Назначить или отредактировать сечение/сталь можно и для каждого элемента отдельно. Для этого надо кликнуть по нему правой кнопкой мыши (или в графическом редакторе, или в *Таблице*) и далее выполнить необходимые действия как показано выше.

Существует возможность редактировать сечения для конструктивных элементов в режиме *Конструкция*. Причем изменение сечения в режиме *Конструкция* автоматически приводит к изменению сечения соответствующих элементов в расчётной схеме фермы. Но обратное несправедливо.

*Пользователь должен следить, чтобы для каждого элемента сечение, назначенное при формировании схемы фермы, и сечение конструктивного элемента совпадали.*

В программе осуществляется контроль отношений ширин пластин, составляющих сечение, к толщине  $h/t$ ,  $b/t$ ,  $c/t$  и  $d/t$  на соответствие требованиям норм СП 260 [1] и EN [7]. Исключение составляет отношение  $h/t$  для С-профилей с рифом на стенке и Сигма-профилей. Проверке подвергаются те сечения из библиотеки профилей проекта, которые присвоены каким-либо элементам фермы. При превышении отношений выдаётся сообщение, подобное приведённому на Рисунке 2.26. Данное сообщение является информационным и, в принципе, не препятствует дальнейшему расчёту. Пользователь сам должен определять, как на него реагировать.

Элемент	Номер	Сообщение
⚠ Сечение	8;9	Отношение h/t превышает допустимое нормами
⚠ Сечение	8;9;10	Отношение b/t превышает допустимое нормами

Рисунок 2.26 – Пример сообщения о превышении максимальных значений отношений ширины пластины к толщине

## 2.6. Формирование конструктивной схемы фермы

Определение конструктивного элемента, применяемое в рамках данного приложения, дано в п.1.2. Конструктивный элемент может состоять из одного или нескольких конечных элементов расчётной схемы фермы, сформированной в режиме *Схема*. Представление фермы, состоящей из конструктивных элементов, есть *конструктивная схема фермы*, которая формируется в режиме *Конструкция*.

*Конструктивную схему следует формировать таким образом, чтобы в дальнейшем выполнить конструктивный расчёт элементов, из которых она состоит.*

Под конструктивными расчётами элементов понимаются проверочные расчёты прочности, устойчивости, предельной гибкости.

### 2.6.1. Ввод данных для конструктивного расчёта элементов фермы

Ферма представляет собой набор достаточно однотипных элементов, требующих во многом ввода одинаковой или однотипной информации для расчёта, а с другой стороны,

отдельные элементы могут иметь некоторые особенности. Поэтому в программе применён следующий общий подход для ввода информации для конструктивного расчёта элементов. Вначале задаются общие параметры для всех элементов фермы. В дальнейшем пользователь для отдельных элементов при необходимости может их откорректировать.

Для назначения общих параметров конструктивных элементов следует в режиме *Конструирование* в поле графического редактора кликнуть правой кнопкой мыши. В появившемся меню выбрать *Для всех конструктивных элементов* (Рисунок 2.27).

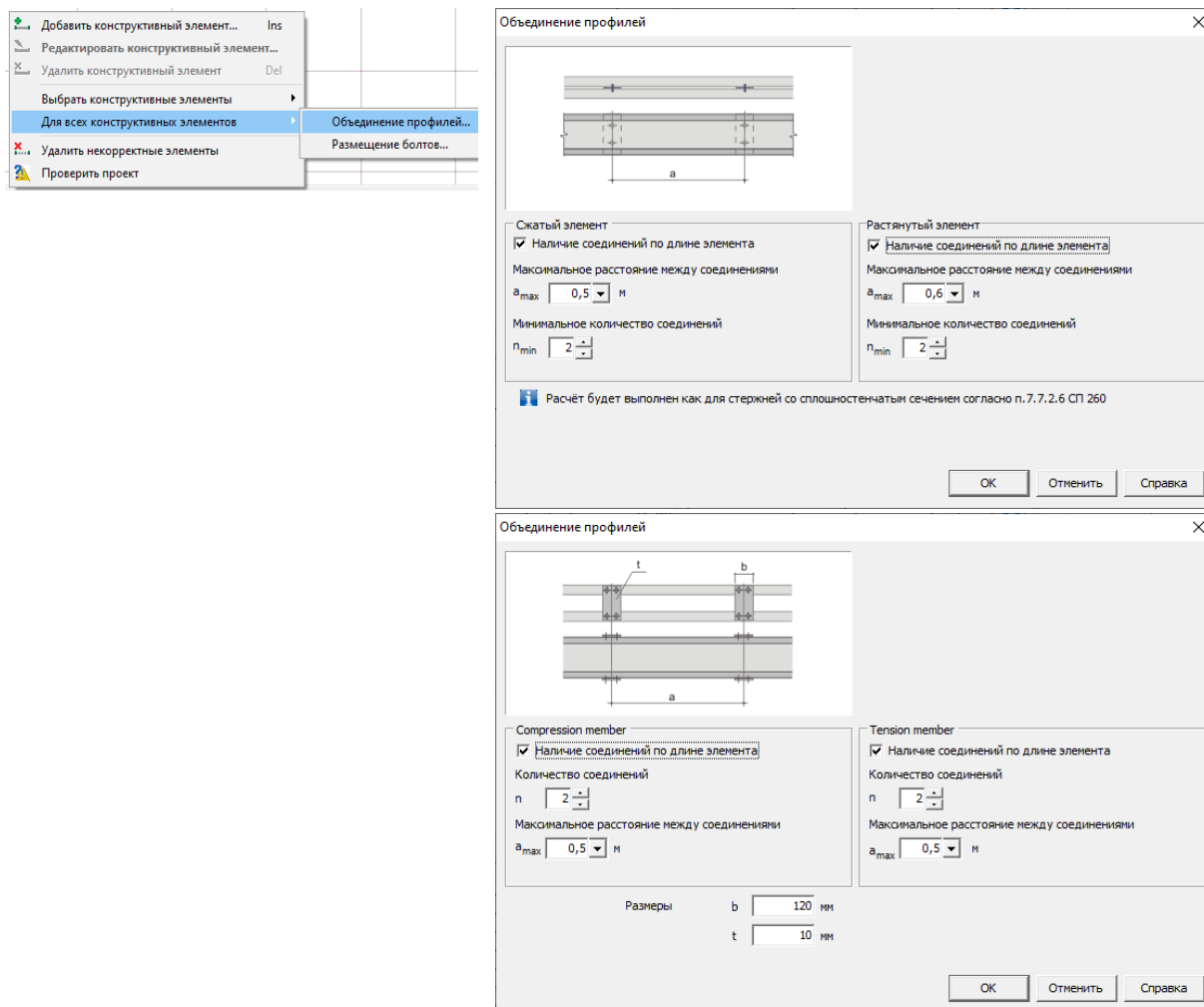


Рисунок 2.27 – Способы объединения спаренных профилей в системах ферм 1 и 2

Выбор *Объединение профилей...* позволяет задать параметры объединения профилей в конструктивных элементах системы ферм 1 и в конструктивных элементах поясов системы ферм 2.

Для системы ферм 1 для сжатых и растянутых конструктивных элементов пользователем определяется наличие или отсутствие соединений по длине элемента. При их наличии назначается максимальный шаг соединений  $a_{max}$  и минимальное количество соединений  $n_{min}$ . По этим данным программа для каждого элемента индивидуально с учётом его длины вычисляет расстояние между соединениями таким образом, чтобы для растянутых элементов оно не превышало  $70i$ , для сжатых  $30i_{ef}$ , которые являются нормативными (п. 7.7.2.6 [1]). Если введённые пользователем требования  $a_{max}$  и  $n_{min}$  являются более жёсткими, то программа назначает шаг соединений по последним. Далее в соответствии с п. 7.7.2.6 [1] элементы считаются сплошностенчатыми. Если пользователь назначил отсутствие соединений,

то за расчётную длину принимается длина элемента, которая сравнивается с нормативными значениями. Если условие выполняется, то элементы считаются сплошнотенчатыми. Если условие не выполняется, то расчёт прекращается и пользователю следует откорректировать данные.

Для системы ферм 2 для сжатых и растянутых элементов определяется наличие или отсутствие соединений по длине элемента. При их наличии назначается количество соединений  $n$  и их максимальный шаг  $a_{max}$ . По этим данным программа для каждого элемента индивидуально с учётом его длины вычисляет расстояние между соединениями таким образом, чтобы выполнялось наиболее жёсткое требование: или по количеству соединений или по максимальному расстоянию между соединениями. Далее такие стержни воспринимаются как сквозные.

Для системы ферм 1 реализованы некоторые расчёты болтового примыкания элементов решётки к поясам. Полагается решение узлов на фасонках. При необходимости выполнения таких расчётов пользователь должен отметить *Расчёт соединений* в окне *Общие данные* пункта меню *Файл* (п.1.1.1.1).

Размещение болтов в соединении зависит от типа сечения и его размеров. Для задания общих параметров размещения болтов в узлах примыкания решётки к поясам фермы необходимо выбрать пункт меню *Размещение болтов...* (Рисунок 2.27). После чего появляется диалоговое окно, показанное на Рисунке 2.28, в котором выбирается одинарный профиль, из которого состоит спаренное поперечное сечение элемента, и далее *Редактировать...* После чего, в открывшемся окне (Рисунок 2.29) задаются общие параметры примыкания конструктивных элементов решётки, имеющих выбранное поперечное сечение.

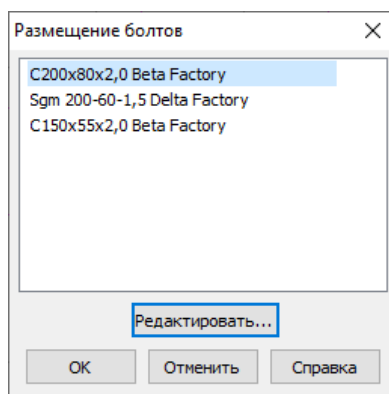


Рисунок 2.28 – Диалоговое окно выбора сечений



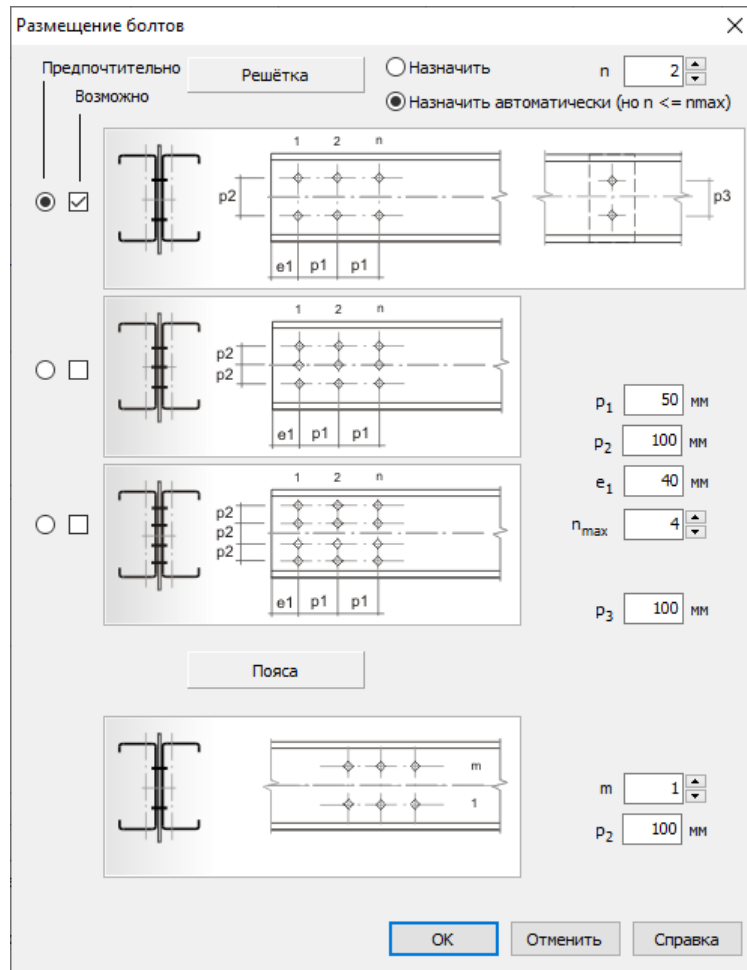


Рисунок 2.29 – Диалоговое окно для задания параметров болтового соединения

Пользователь назначает расстояние между болтами вдоль элемента  $p_1$ , в направлении высоты сечения  $p_2$ , и расстояние от торца элемента до крайнего поперечного ряда болтов  $e_1$ . Также расстояние между болтами в поперечном направлении в местах соединения профилей соединительными прокладками по длине элемента  $p_3$ .

Для системы ферм  $I$  в программе реализованы два подхода к расчету прикрепления элементов решётки к узловой фасонке. В первом случае *Назначить* пользователь задаёт количество рядов болтов в направлении, перпендикулярном действующему осевому усилию (количество поперечных рядов)  $n$ , и количество рядов болтов в направлении, параллельном действующему осевому усилию (количество продольных рядов). Последнее определяется выбором варианта *Предпочтительно*. Таким образом задаётся количество болтов в соединении. В данном случае считается, что количество болтов на обоих концах элемента одинаковое. Далее программно выполняются проверки по смятию профиля, фасонки и по срезу болтов на обоих концах элемента. В качестве результата выводится наиболее неблагоприятная проверка.

Во втором варианте *Назначить автоматически* в программе реализованы элементы синтеза прикрепления в части определения количества и варианта расстановки болтов. В данном случае программа сама назначает количество болтов и их расстановку исходя из пожеланий проектировщика, расчётных критериев и правил расстановки болтов, приведённых в п. 10.2 [1] или п.3.5 [9]. Количество болтов по разным концам конструктивного элемента в общем случае может быть различным. В диалоговом окне *Настройки* → *Конструктивный расчёт* пользователь может сделать выбор: одинаковое количество болтов по концам элемента



или различное. При одинаковом количестве производятся проверки на обоих концах. Определяется, для какого конца требуется наибольшее количество болтов исходя из требуемой несущей способности. Такое же количество и расстановка болтов принимается и для второго конца элемента. Если пользователь выбирает различное количество болтов по концам элемента, то программа подбирает и показывает в результатах параметры индивидуально по обоим концам элемента.

Если пользователь решает предоставить возможность программе самой назначить количество болтов необходимо путём постановки галочек отметить допустимое расположение рядов болтов по высоте сечения. Далее отмечается наиболее предпочтительный вариант расположения рядов болтов по высоте сечения. С него будет начинаться подбор размещения болтов. Также пользователь должен назначить максимальное количество поперечных рядов болтов  $n_{max}$ . На основании введённых данных программа автоматически назначает количество рядов болтов в двух направлениях с проверкой соответствия соответствующих расстояний нормам. Ведущим критерием является проверка по смятию тонкостенных элементов. После обеспечения данного критерия с минимальным запасом проверяется срез болтов и смятие фасонки.

Если выбранное сечение (Рисунок 2.28) относится и к поясам, то необходимо задать количество рядов болтов в направлении высоты сечения  $m$  и расстояние между ними в этом направлении  $p_2$ . В дальнейшем эти данные будут использованы для расчёта прочности конструктивных элементов поясов.

### 2.6.2. Ввод информации о конструктивном элементе

При компоновке модели фермы в *Генераторе ферм* одновременно формируется информация и о расчётной схеме, и о конструктивной схеме. В дальнейшем в окне графического редактора пользователь может отредактировать расчётную схему в режиме *Схема*, а конструктивную схему в режиме *Конструкция*.

Для выполнения какого-либо действия с конструктивным элементом необходимо его отметить, что можно сделать одним из следующих способов:

- кликнуть по нему левой кнопкой мыши в графическом редакторе,
- отметить его на панели *Конструктивные элементы Менеджера проекта*,
- отметить его в *Таблице*.

Далее по щелчку правой кнопкой мыши появляется окно выбора операций с конструктивными элементами (Рисунок 2.30).

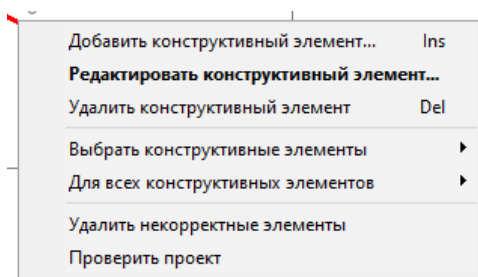


Рисунок 2.30 – Операции с конструктивными элементами

### 2.6.3. Редактирование конструктивного элемента

Для редактирования следует выбрать *Редактировать конструктивный элемент...* В результате появится диалоговое окно редактирования (Рисунок 2.31). Кроме того, если дважды

щёлкнуть левой кнопкой мыши на конструктивном элементе в графическом редакторе, *Менеджере проекта* или *Таблице*, сразу появится окно редактирования.

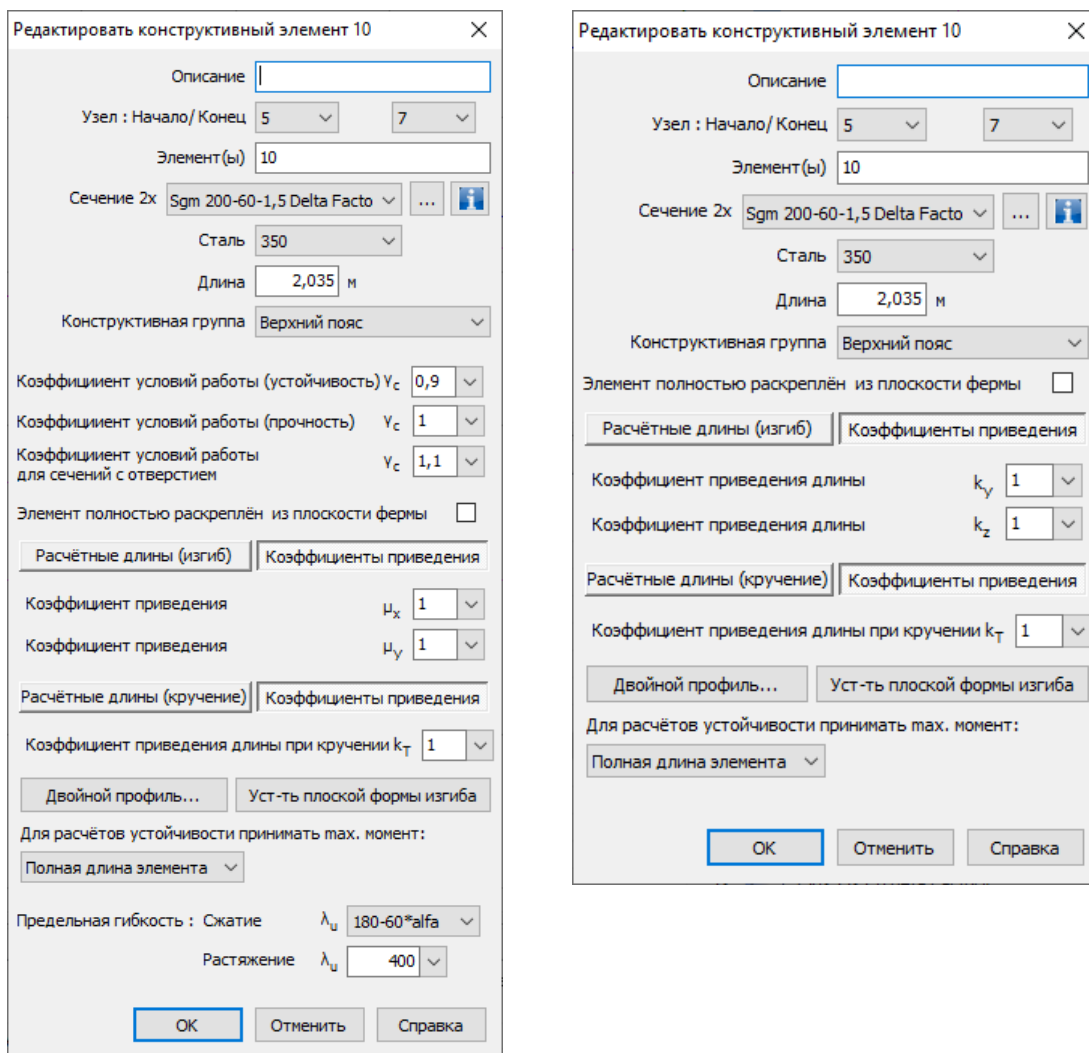



Рисунок 2.31 – Окно редактирования конструктивного элемента

В окне указывается номер начального и конечного узлов элемента. Конструктивный элемент может состоять из одного элемента схемы фермы или из нескольких последовательно расположенных на одной прямой элементов схемы.

В информационной строке *Элемент(ы)* указываются номера элементов схемы фермы, из которых состоит данный конструктивный элемент.

Далее указано поперечное сечение конструктивного элемента, которое можно поменять, выбрав из библиотеки сечений проекта. При замене сечения автоматически меняются сечения конечных элементов (схема фермы), из которых состоит конструктивный элемент. С другой стороны, замена сечения в конечном элементе не вызывает автоматически замену сечения соответствующего конструктивного элемента. *Пользователь должен следить, чтобы сечения соответствующих элементов расчётной схемы и конструктивной схемы совпадали.*

По кнопке  для системы ферм *I* возможна индивидуальная настройка параметров прикрепления элементов решётки к поясам для текущего конструктивного элемента (см. п. 2.6.1). Если текущий элемент является поясом, то актуальной является только вводимая информация для поясов (Рисунок 2.29).

В информационной строке указана длина конструктивного элемента в осях фермы.

Далее указывается *Тип элемента*, определяющий характер его работы: Осевое усилие + Изгиб или Осевое усилие. Если возникла необходимость поменять *Тип элемента*, это можно сделать в режиме *Схема* путём комбинирования наличия/отсутствия шарниров по концам стержня. Строкой ниже указывается текущая *Конструктивная группа* элемента (верхний пояс, нижний пояс, раскос, стойка), которую можно отредактировать.

Затем, если расчёт выполняется по нормам СП 260, следуют редактируемые величины *Коэффициента условий работы* для расчётов по устойчивости, *Коэффициента условий работы* для расчётов по прочности и *Коэффициента условий работы для сечения с отверстиями*.

Если конструктивный элемент закреплён из плоскости фермы по всей длине, то следует это отметить. В этом случае проверки на устойчивость по изгибной форме из плоскости фермы и по устойчивости плоской формы изгиба производиться для данного конструктивного элемента не будут.

Пользователю предоставляется выбор: для расчёта устойчивости по изгибной форме потери устойчивости и по крутильной форме потери устойчивости ввести соответствующие расчётные длины  $l_{ef,x}$   $l_{ef,y}$   $l_{cr,T}$  ( $L_{cr,y}$   $L_{cr,z}$   $L_{cr,T}$ ) или ввести коэффициенты приведения длины  $\mu_x$   $\mu_y$   $k_T$  ( $k_y$   $k_z$   $k_T$ ), по которым программно будут вычислены расчётные длины.

По кнопке *Двойной профиль...* пользователь попадает в диалоговое окно, где может отредактировать заданные параметры объединения спаренных профилей (см. п.2.6.1) для данного конструктивного элемента.

По кнопке *Уст-ть плоской формы изгиба* открывается окно (Рисунок 2.32) для ввода данных для расчёта потери устойчивости плоской формы изгиба.

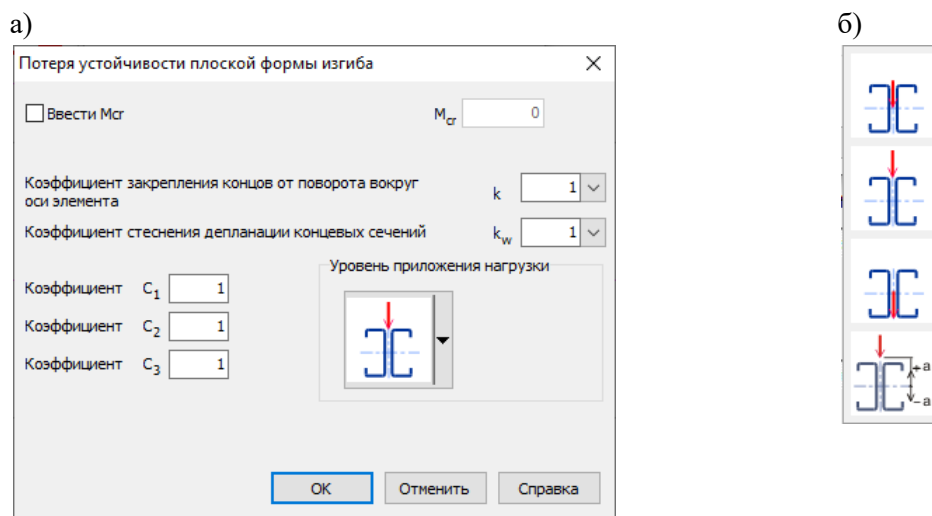


Рисунок 2.32 – Окно ввода данных для расчёта потери устойчивости плоской формы изгиба: а) – общие данные; б) – уровень приложения нагрузки


Пользователь может для данного конструктивного элемента ввести значение упругого критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба. Для этого следует поставить галочку в первой строке и ввести значение  $M_{cr}$ . Иначе  $M_{cr}$  будет вычисляться программно с учётом данных вводимых в окне далее. Необходимо ввести *Коэффициент закрепления концов от поворота вокруг оси элемента*  $k$  и *Коэффициент стеснения деформации концевых сечений*  $k_w$ . Некоторые рекомендации по назначению этих коэффициентов даны в Приложении Г [1] и [28]. Методика вычисления устанавливается пользователем в *Настройки* → *Конструктивный расчёт* (п.6.3).

Также в выпадающем меню (Рисунок 2.32,б) следует выбрать уровень приложения нагрузки (если имеется) к данному конструктивному элементу. При выборе последнего пункта пользователю предоставляется возможность ввести значение  $a$  (с учётом знака).

Если в настройках конструктивного расчёта *Настройки* → *Конструктивный расчёт* на панели *Определение СИ* пользователь выбрал *Вводить индивидуально для каждого конструктивного элемента*, то, следовательно, необходимо ввести значения коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  для текущего элемента.

Далее в окне редактирования конструктивного элемента следует выбрать на какой части длины элемента будет определяться максимальный изгибающий момент для расчётов на устойчивость. Возможны следующие варианты. Полная длина – программно определяется максимальный изгибающий момент по всей длине элемента.  $\frac{3}{4}$  длины – выделяется средняя часть элемента, длина которой равна  $\frac{3}{4}$  всей длины конструктивного элемента, и на этой длине программно определяется максимальный момент. Аналогично для  $\frac{2}{3}$  и  $\frac{1}{2}$  длины элемента. Данный выбор может быть полезен в фермах с расцентровкой осей элементов в узлах поясов. При этом следует учитывать форму эпюры изгибающих моментов для текущего конструктивного элемента.


Для расчёта по предельной гибкости следует ввести предельные гибкости при сжатии и растяжении.

Для добавления нового конструктивного элемента в модель фермы необходимо выбрать соответствующий пункт в меню (Рисунок 2.30) или выбрать  на панели инструментов в режиме *Конструкция*. Следует напомнить, что конструктивный элемент может быть создан только на основе последовательно расположенных на одной прямой элементов схемы фермы. В появившемся диалоговом окне, аналогичном показанному на Рисунке 2.31 ввести номер узла начала и конца конструктивного элемента, а также другую необходимую информацию.

*При назначении узлов начала и конца элемента следует руководствоваться тем, что координата  $X$  начального узла должна быть меньше соответствующей координаты конечного узла.*

При объединении двух и более элементов схемы в один конструктивный элемент возникает дублирование. То есть, второй, третий, ... элементы схемы оказываются внутри образованного конструктивного элемента. Эти элементы необходимо удалить вручную, выделив их на схеме фермы в режиме *Конструкция* или в *Таблице*, и выполнив затем команду *Удалить конструктивный элемент*.

Для удобства работы с моделью фермы в меню (Рисунок 2.30) включён пункт *Выбрать конструктивные элементы*. По данной команде могут быть быстро выбраны все элементы фермы, подобные выбранному по признаку *Конструктивной группы* или по признаку такого же *Сечения*.


При выборе пункта меню *Удалить некорректные элементы* (Рисунок 2.30)  происходит удаление конструктивных элементов, которые состоят из элементов схемы, не составляющих непрерывную цепочку.

#### 2.6.4. Расцентровка осей в узлах поясов

В некоторых случаях конструктивные решения ферм не позволяют отцентрировать оси элементов, сходящихся в узлах верхнего и нижнего поясов. Особенно это актуально для бесфасоночных систем ферм 2 и 3. Программа позволяет быстро выполнить расцентровку осей. С точки зрения расчётной схемы фермы это осуществляется за счёт добавления узлов и конечных элементов на поясах. В то время как конструктивными элементами будут совокупности конечных элементов между базовыми узлами фермы. Впрочем, пользователь может определить другое при формировании конструктивного элемента. Автоматизированное

задание расцентровки узлов может быть выполнено на разных этапах формирования модели фермы.

Прежде всего, возможность задания расцентровки предусмотрена в *Генераторе ферм*. В дальнейшем расчётная схема фермы и конструктивная схема будут сформированы с учётом этой информации.

Также предусмотрена возможность расцентровки в режиме *Схема* (см. п. 2.5.3.1) и аналогично – в режиме *Конструкция* – команда *Ввести расцентровку для для всех узлов*  на панели инструментов.

После выполнения команды во всех узлах верхнего и нижнего поясов, где примыкают два и более раскосов, появляются дополнительные узлы, к которым и примыкают раскосы. В режиме *Схема* также образуются дополнительные элементы поясов, длина которых равна величине заданной расцентровки (Рисунок 2.33, 2.34).

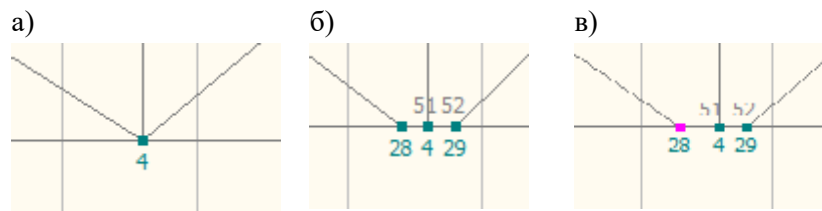


Рисунок 2.33 – Фрагмент схемы: а) – до расцентровки; б) – после расцентровки; в) – разные величины расцентровки

Если величина расцентровки для двух раскосов в узле разная, то далее можно с помощью команды *Переместить узел* (см. п.2.5.3.1) переместить узел, к которому примыкает раскос на необходимую величину, и таким образом создать нужную величину расцентровки.

В конструктивной схеме фермы конструктивные элементы включают основной стержень и стержень, являющий собой расцентровку.

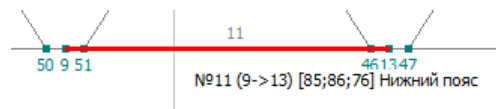


Рисунок 2.34 – Фрагмент конструктивной схемы фермы после процедуры расцентровки

Если необходимо задать расцентровку в отдельно взятом узле, следует щёлкнуть по нему правой кнопкой мыши и в появившемся меню выбрать *Ввести расцентровку...*

Если применяется импорт из DXF файла, то эта информация понимается как схема фермы. По ней в режиме *Схема* необходимо сформировать расчётную схему фермы. И в дальнейшем уже по ней разработать конструктивную схему с помощью инструментария, предоставляемого в режиме *Конструкция*. Если пользователь на этапе схемы задаст расцентровку осей стержней в узлах поясов, то в данном случае при переходе в режим *Конструкция* программа автоматически в качестве конструктивных элементов принимает конечные элементы схемы. Поэтому далее пользователь средствами редактирования корректирует конструктивную схему вручную.

## 2.6.5. Формирование модели фермы при импорте схемы из DXF файла

Ниже приводится примерная последовательность формирования конструктивной схемы фермы при импорте начальной схемы из DXF файла.

Назначается система фермы (*Файл* → *Общие данные*).


С помощью диалогового окна *Импорт DXF* (п. 2.5.2), доступного из *Файл* → *Импорт DXF* ..., схема фермы загружается в главное окно графического редактора. Первоначально активным является режим *Схема*.

При необходимости добавляются, удаляются элементы схемы (пп. 2.5.3.2, 2.5.3.4). Устанавливаются опорные закрепления (п.2.5.3.3) и т.д. Т.е. схема корректируется если это необходимо.

Создаётся база профилей (сечений) и стале́й (п. 2.5.4). Также эта информация может быть подгружена в проект заранее (п. 1.1.1.1).

Каждому элементу схемы присваивается группа элемента (верхний пояс, нижний пояс, стойка, раскос) (п. 2.5.3). Одновременно назначается поперечное сечение и сталь.

Формируется конструктивная схема фермы. Это происходит при выборе режима *Конструкция* на панели инструментов. При этом запрашивается, создать ли конструктивную схему по расчётной. При положительном ответе происходит автоматическое формирование конструктивной схемы фермы, состоящей из конструктивных элементов. При отрицательном ответе пользователь самостоятельно формирует конструктивные элементы, тем самым создавая конструктивную схему фермы. Для удобства в графическом редакторе появляется подложка схемы фермы.

Если требуется ввести расцентровку осей элементов в узлах верхнего и нижнего поясов, следует выбрать  *Ввести расцентровку для всех узлов* на панели инструментов. После чего произойдёт соответствующая расцентровка осей.

## 3. НАГРУЗКИ

Ввод нагрузок на ферму начинается с формирования *Загружений*. В рамках каждого нагружения прикладываются нагрузки (п.3.3). Затем формируются *Сочетания (Комбинации)* нагружений. Формирование *Сочетаний* является обязательным, так как расчёт фермы производится только на сочетания. Должно быть сформировано как минимум одно сочетание.

### 3.1. Нагрузки в соответствии с СП


#### 3.1.1. Загружения (LC)

Для создания нагружения необходимо перейти в режим *Нагрузки*. После чего выбрать на панели инструментов *Добавить Загружение....* Также можно щёлкнуть правой кнопкой мыши на пункте *Менеджера проекта Загружения* и в появившемся меню выбрать *Добавить Загружение....* В результате появляется окно для ввода нагружения, показанное на рисунке 3.1.

Рисунок 3.1 – Окно ввода нагружения

В окне номера появляется очередной номер *LC №* нагружения, который в дальнейшем может быть изменён пользователем. Необходимо ввести *Тип нагрузки* с точки зрения продолжительности действия: постоянная, временная длительная, временная кратковременная или особая нагрузка, а также *Коэффициент надёжности по нагрузке  $\gamma_f$* .

*Наименование* нагружения и *Цвет*, которым будут отражаться нагрузки данного нагружения, вводятся пользователем по желанию.

Вызвать окно редактора существующего нагружения можно следующим способом. При выбранном нагружении на панели инструментов выбрать *Редактировать нагружение...* . Или в *Менеджере проекта* выбрать нужное нагружение. Затем щёлкнуть по нему правой кнопкой мыши и в появившемся меню (рисунок 3.2) выбрать *Редактировать нагружение....* В результате появится диалоговое окно, аналогичное приведённому выше, где можно отредактировать данное нагружение.



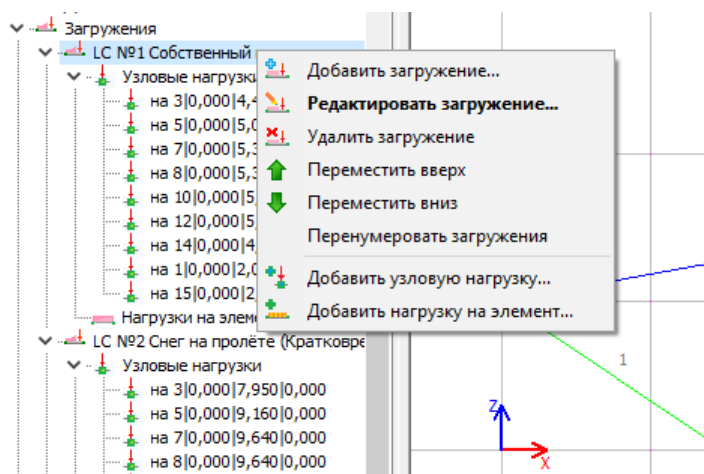



Рисунок 3.2 – Всплывающее меню

Для удаления загрузки в *Менеджере проекта* его следует отметить и в появившемся меню выбрать *Удалить загрузку*. Кроме того, команда *Удалить загрузку*  на панели инструментов также удаляет текущее *Загружение*.

Перенумеровать загрузки можно следующим образом. С помощью команд *Переместить вверх* и *Переместить вниз* из меню (Рисунок 3.2) расположить загрузки в нужном порядке, и затем выбрать команду *Перенумеровать загрузки*.

Если в настройках *Настройки* → *Нагрузки* (п.6.2) пользователь отметил *Автоматически прикладывать собственный вес*, то собственный вес фермы будет автоматически учтен в каждом *Сочетании* нагрузок как отдельное нумерованное загрузку. Иначе собственный вес фермы не учитывается, и пользователь сам должен сформировать либо отдельное загрузку, представляющее собой вес фермы, либо внести вес фермы в другое загрузку (например, вес покрытия) с типом постоянной нагрузки.

Внутри каждого загрузку могут быть введены нагрузки на узлы и/или нагрузки на элементы (п.3.3). Рекомендуется вводить нормативные значения нагрузок. Далее в программе эти значения умножаются на коэффициенты надёжности по нагрузке для загрузку  $\gamma_f$ , также вводимые пользователем (Рисунок 3.1).

Вводимые для загрузку параметры должны соответствовать требованиям [3,4].

*В рабочем окне программы в режиме Нагрузки указываются нормативные значения нагрузок соответствующего загрузку.*

### 3.1.2. Сочетания (комбинации) загрузку (СО)


Добавить новое сочетание в проект можно следующими образом. В режиме *Нагрузки* на панели инструментов выбрать  *Добавить сочетание....* Или в *Менеджере проекта* щёлкнуть правой кнопкой мыши на *Сочетания* и далее выбрать *Добавить Сочетание....* В результате появляется диалоговое окно ввода сочетаний (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Диалоговое окно ввода/редактирования сочетаний загружений

Перемещение между сочетаниями осуществляется в дереве *Менеджера проекта*. Щёлкнув правой кнопкой мыши на нужном сочетании, появится возможность его редактирования. Окно редактора аналогично представленному на Рисунке 3.3.

Необходимо задать к какой группе предельных состояний относится формируемое сочетание (Первая группа предельных состояний или Вторая группа предельных состояний). Затем вводятся коэффициенты сочетаний для включаемых в данное сочетание загружений. Если какое-либо загружение не входит в данное сочетание, то для него задаётся нулевой коэффициент сочетаний.

Если в настройках *Настройки* → *Нагрузки* (п.6.2) пользователь отметил *Автоматически прикладывать собственный вес*, то собственный вес фермы будет автоматически учтен в каждом сочетании нагрузок как отдельное нумерованное загружение. Об этом сообщается пользователю на форме. Иначе собственный вес фермы не учитывается, и пользователь сам должен сформировать либо отдельное загружение, представляющее собой вес фермы, либо внести вес фермы в другое загружение (например, вес покрытия) с типом постоянной нагрузки.

Необходимость ввода *Наименования* сочетания определяется пользователем.

Сочетания загружений должны формироваться в соответствии с [3,4].

*В рабочем окне программы в режиме Нагрузки указываются расчётные значения нагрузок, входящих в данное сочетание.*

## 3.2. Воздействия в соответствии с EN

### 3.2.1. Загружение /Load case (LC)

Для создания загружения необходимо перейти в режим *Нагрузки*. После чего выбрать на панели инструментов *Добавить Загружение....* Также можно щёлкнуть правой кнопкой мыши на пункте *Менеджера проекта Загружения* и в появившемся меню выбрать *Добавить Загружение....* В результате появляется окно для ввода/редактирования загружения, показанное на Рисунке 3.9.

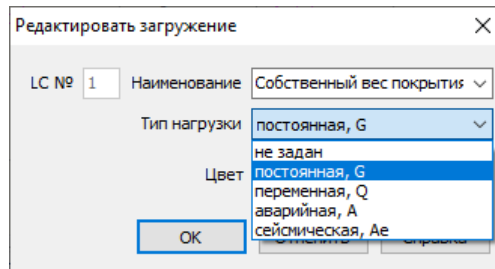


Рисунок 3.4 – Диалоговое окно ввода/редактирования нагрузений

В окне номера появляется очередной номер загрузки (*Load case*) (*LC*), который в дальнейшем может быть изменён пользователем. Тип воздействия (*Type of action*) может быть: постоянное воздействие (*Permanent*) *G*, переменное воздействие (*Variable*) *Q*, аварийное воздействие (*Accidental*) *A* или сейсмическое воздействие (*Seismic*) *A<sub>E</sub>*.

*Наименование* загрузки/воздействия и *Цвет*, которым будут отражаться на экране нагрузки данного нагружения, вводятся пользователем по желанию.


Процедуры редактирования загрузки, удаления и перенумерации описаны в п.3.1.1.

Если в настройках *Настройки* → *Нагрузки* (п.6.2) пользователь отметил *Автоматически прикладывать собственный вес*, то собственный вес фермы будет автоматически учтен в каждой *Комбинации* воздействий как отдельное нумерованное нагружение с коэффициентом  $\gamma_{G,j,sup}$ . Иначе собственный вес фермы не учитывается, и пользователь сам должен сформировать либо отдельное нагружение, представляющее собой вес фермы, либо внести вес фермы в другое нагружение (например, вес покрытия) с типом постоянного воздействия.

Внутри каждого нагружения могут быть введены нагрузки/воздействия на узлы и/или на элементы (п.3.3). Вводимые для нагружений параметры должны соответствовать требованиям [5,10,18] а также соответствующим Национальным приложениям.

В рабочем окне программы в режиме *Нагрузки* указываются нормативные (характеристические) значения нагрузок/воздействий соответствующего нагружения.

### 3.2.2. Комбинации воздействий /Combination of actions (CO)

Добавить новую комбинацию воздействий/нагружений в проект можно следующими способами. В режиме *Нагрузки* на панели инструментов выбрать  *Добавить сочетание....* Или в *Менеджере проекта* щёлкнуть правой кнопкой мыши на *Сочетания* и далее выбрать *Добавить Сочетание....* В результате появляется диалоговое окно ввода сочетаний/комбинаций (Рисунок 3.5).

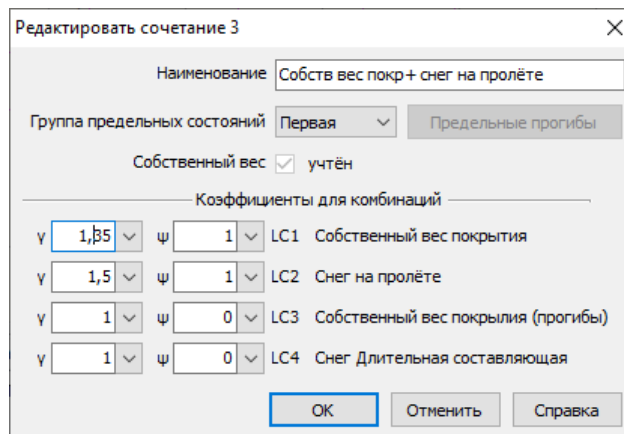


Рисунок 3.5 – Диалоговое окно ввода/редактирования комбинаций воздействий

Необходимо задать к какой группе предельных состояний относится формируемая комбинация: Критические предельные состояния/Ultimate limit states (ULS) или Предельные состояния по эксплуатационной пригодности/Serviceability limit states (SLS).

Затем для каждой комбинации вводятся частные коэффициенты для воздействий, входящих в данную комбинацию  $\gamma_{G,j}$ ,  $\gamma_{Q,i}$  и коэффициенты комбинации  $\psi_i$ . Если какое-либо воздействие не входит в данную комбинацию, то для него задаются нулевые коэффициенты  $\gamma$  и/или  $\psi$ .

Принципы и правила формирования комбинаций воздействий для Критических предельных состояний приведены в п.6.4.3 и Приложении A1 EN 1990:2002 [5]. В частности, в Таблице A1.2(B) рекомендуются следующие значения  $\gamma$ :  $\gamma_{G,j,sup} = 1,35$  – при неблагоприятном воздействии;  $\gamma_{G,j,inf} = 1,00$  – при благоприятном воздействии;  $\gamma_{Q,1} = 1,5$  – при неблагоприятном воздействии и  $\gamma_{Q,1} = 0$  – при благоприятном воздействии;  $\gamma_{Q,i} = 1,5$  – при неблагоприятном воздействии и  $\gamma_{Q,i} = 0$  – при благоприятном воздействии. Коэффициент  $\xi$  может быть учтён в составе коэффициентов  $\gamma_{G,j}$ . Значения данных коэффициентов могут быть переопределены в Национальных приложениях.

При выборе *Группы предельных состояний* - SLS необходимо по кнопке *Предельные прогибы* ввести Комбинацию нагрузок в соответствии с Таблицей A1.4 [5] и значение предельного прогиба в появившемся диалоговом окне (Рисунок 3.6).

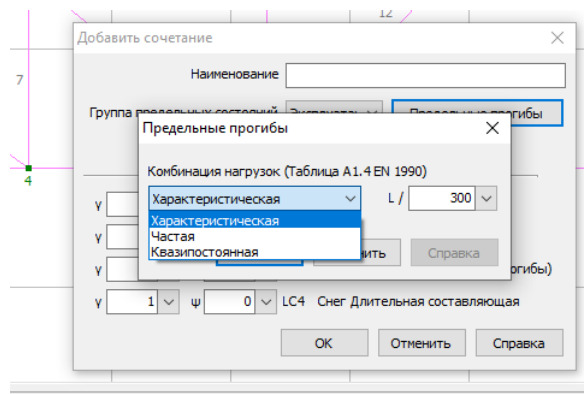


Рисунок 3.6 – Диалоговое окно ввода данных для расчёта по предельным состояниям по эксплуатационной пригодности

Принципы и правила формирования комбинаций воздействий для Предельных состояний по эксплуатационной пригодности (SLS) приведены в п.6.5.3 и Приложении A1 EN 1990 [5]. В соответствии с п.6.5.3 комбинации определяются как:

а) Характеристическая комбинация/Characteristic combination (как правило, применяется для необратимых предельных состояний):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

б) Частая комбинация/Frequent combination (как правило, применяется для обратимых предельных состояний):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

в) Квазипостоянная комбинация/Quasi-permanent combination (как правило, применяется для учёта длительных эффектов и оценки внешнего вида сооружений):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Полагается [5], что все частные коэффициенты для воздействий  $\gamma$  равны единице, но указывается, что их значения могут быть скорректированы в Национальных приложениях. Поэтому в программе предусмотрена возможность введения значения, отличного от единицы (*CFSteel* → *Настройки* → *Расчёт* → *ЕС3* → *Национальное приложение*).

В Таблице 3.1 приведены рекомендуемые (Таблица A1.1[5]) значения коэффициентов сочетаний для наиболее распространённых воздействий.

Таблица 3.1 - Рекомендуемые [5] значения коэффициентов сочетаний  $\Psi$  для зданий

Нагрузка	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Приложенные нагрузки в зданиях			
Категория А: бытовые, жилые зоны	0,7	0,5	0,3
Категория В: офисные помещения	0,7	0,5	0,3
Категория С: помещения для собраний	0,7	0,7	0,6
Категория D: торговые площади	0,7	0,7	0,6
Категория Е: склады	1,0	0,9	0,8
Категория у Н: крыши	0	0	0
Снеговые нагрузки на здания:			
Финляндия, Исландия, Норвегия, Швеция	0,7	0,5	0,2
Для районов в других странах – членах СЕН, находящихся на высоте $H > 1000$ м над уровнем моря	0,7	0,5	0,2
Для районов в других странах – членах СЕН, находящихся на высоте $H \leq 1000$ м над уровнем моря	0,5	0,2	0
Ветровые нагрузки на здания	0,6	0,2	0
Значения $\psi$ могут быть установлены в Национальных приложениях			

Пользователь имеет возможность ввести любые значения коэффициентов  $\gamma$  и  $\psi$  в соответствии с учитываемым Национальным приложением.

Необходимость ввода *Наименования* сочетания/комбинации определяется пользователем.

### 3.3. Нагрузки

Следует вводить нормативные (характеристические) значения нагрузок для каждого нагружения/воздействия.

#### 3.3.1. Нагрузки на узлы

Добавление/редактирование узловой нагрузки производится в диалоговом окне, показанном на Рисунке 3.7.

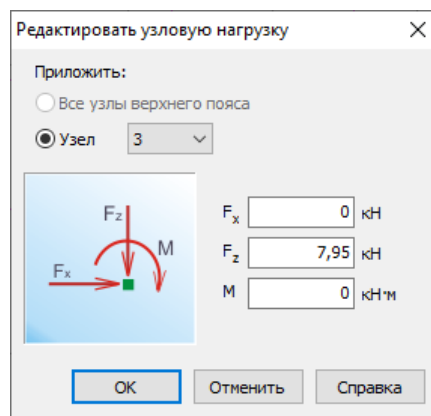




Рисунок 3.7 – Диалоговое окно ввода/редактирования узловой нагрузки

Вызвать окно можно разными способами. На панели инструментов выбрать  *Добавить узловую нагрузку*. Или в дереве *Менеджера проекта* для соответствующего нагружения по щелчку правой кнопки мыши выбрать *Добавить узловую нагрузку*.

Вызвать окно редактирования уже имеющейся узловой нагрузки можно дважды щёлкнув левой кнопкой мыши на этой нагрузке в *Менеджере проекта* или в *Таблице*.

В окне (Рисунок 3.7) необходимо выбрать номер узла и ввести значения нагрузок. Положительные направления нагрузок указаны в информационном окне. Также предоставляется возможность приложить введённые нагрузки сразу ко всем узлам верхнего пояса.

### 3.3.2. Нагрузки на элементы

Для добавления нагрузки на элемент: на панели инструментов выбрать  *Добавить нагрузку на элемент* при выделении в дереве *Менеджера проекта* соответствующего нагружения, в состав которого входит нагрузка. Или щёлкнуть правой кнопкой мыши на *Нагрузки на элементы* в *Менеджере проекта* и выбрать после этого *Добавить нагрузку на элемент*.

В появившемся окне, показанном на Рисунке 3.8, необходимо выбрать к какому элементу прикладывается нагрузка (ввести его номер). Также предусмотрена возможность прикладывать нагрузку к набору элементов. Это может быть удобным, например, когда есть необходимость приложить распределённую нагрузку к верхнему поясу. Или к левой (правой) половине верхнего пояса. В этом случае надо заранее создать соответствующие наборы элементов (п.2.5.3.4). Также следует задать вид нагрузки: сосредоточенная, равномерно распределённая или трапецевидная; а также направление её действия: вдоль глобальной оси  $Z$ , вдоль глобальной оси  $X$  или вдоль локальной оси стержня  $z$  (перпендикулярно стержню).

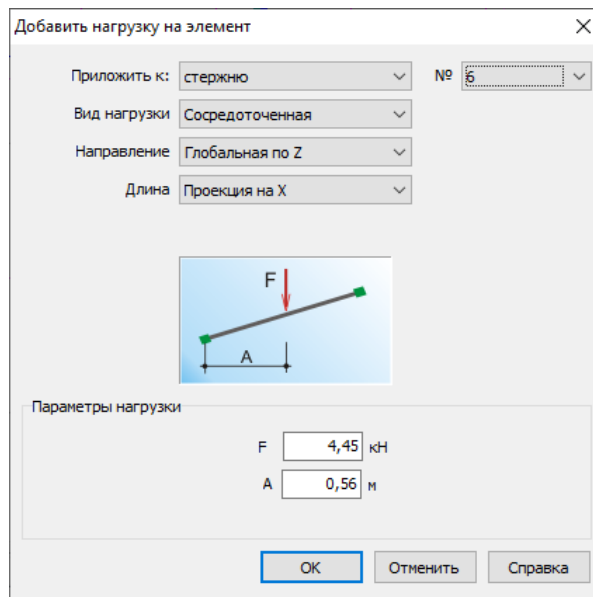
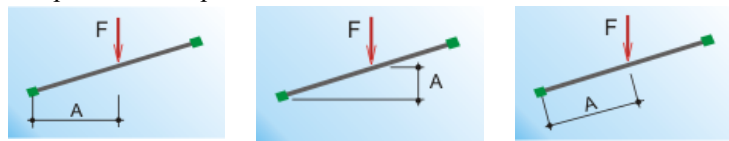


Рисунок 3.8 – Диалоговое окно ввода нагрузок на элемент

Место приложения сосредоточенной нагрузки привязывается к левому узлу элемента. Для вертикальных элементов – к нижнему узлу. В качестве привязки может быть проекция на ось  $X$ , проекция на ось  $Z$ , а также расстояние от места привязки до места приложения нагрузки, отсчитываемое вдоль стержня (Рисунок 3.9).

Направление сосредоточенной силы – вдоль глобальной оси  $Z$

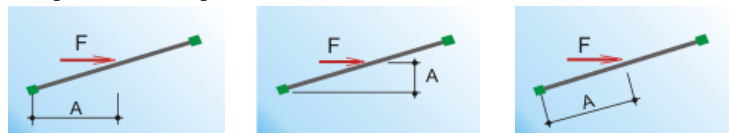


Проекция на ось  $X$

Проекция на ось  $Z$

Проекция на элемент

Направление сосредоточенной силы – вдоль глобальной оси  $X$



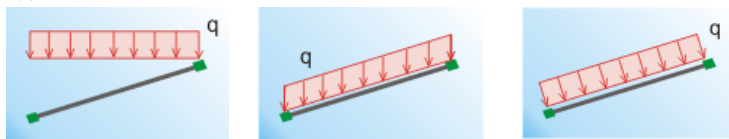
Проекция на ось  $X$

Проекция на ось  $Z$

Проекция на элемент

Рисунок 3.9 – Направления и привязки сосредоточенных сил на элемент

Направление распределённой нагрузки – Вдоль локальной оси  $z$   
вдоль глобальной оси  $Z$



Проекция на ось  $X$

Проекция на элемент

Проекция на элемент

Направление распределённой нагрузки –  
вдоль глобальной оси  $X$

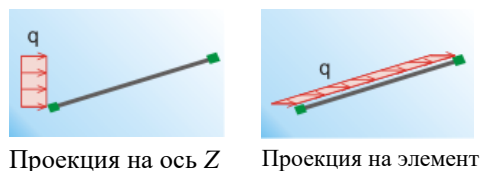
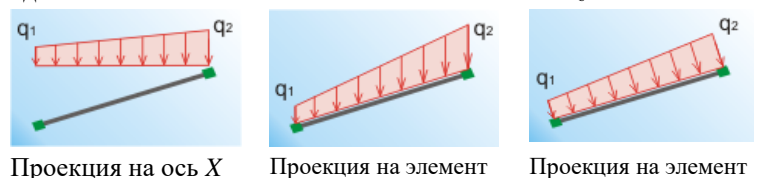


Рисунок 3.10 – Равномерно распределённые нагрузки

Направление распределённой нагрузки – Вдоль локальной  
вдоль глобальной оси Z оси z



Направление распределённой нагрузки –  
вдоль глобальной оси X

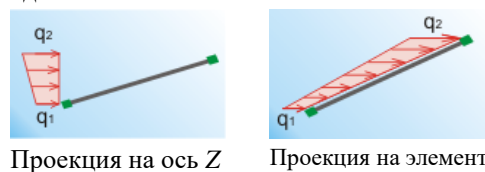


Рисунок 3.11 – Трапецевидные нагрузки

Также вводятся параметры нагрузки. Их состав зависит от вида нагрузки. Для сосредоточенной нагрузки вводится её значение  $F$  и величина привязки  $A$ . Для равномерно распределённой нагрузки вводится её значение  $q$  (Рисунок 3.10). Для трапецевидной нагрузки вводятся два значения:  $q_1$  – в левом узле элемента,  $q_2$  – в правом узле (Рисунок 3.11). Распределённая нагрузка может быть приложена перпендикулярно оси элемента – вдоль локальной оси  $z$ . В этом случае для трапецевидной нагрузки  $q_1$  – это значение нагрузки в начале элемента, т.е. в узле, который первым указан при идентификации элемента.  $q_2$  – значение нагрузки в конце элемента.

*Распределённые нагрузки прикладываются ко всему элементу.* Если распределённую нагрузку необходимо приложить не на весь элемент, его следует разбить на части дополнительными узлами и приложить нагрузку соответствующим образом.

## 4. РАСЧЁТ

### 4.1. Проверка модели фермы

В программе предусмотрена развитая система диагностики модели фермы на разных этапах работы с ней. Часть проверок производится автоматически; другие проверки инициализируются пользователем в пункте меню *Расчёт* → *Проверить проект* или на панели инструментов в режиме *Конструкция*. В результате проверки выдается список сообщений. Существует два вида сообщений:

*Ошибка* – несоответствие, делающее дальнейшие расчёты невозможными.

*Предупреждение* – ситуация, когда имеется несоответствие, например, требованиям норм, другим требованиям, хотя расчёты, в принципе, могут быть проведены. Но следует иметь в виду, что результаты этих расчётов могут быть неполными или некорректными.

### 4.2. Статический расчёт

Статический расчёт фермы производится методом конечных элементов (МКЭ) в плоской линейной постановке. Каждый конечный элемент (КЭ) имеет шесть степеней свободы – по три в начале и конце элемента. Учитываются осевые деформации и деформации изгиба.

### 4.3. Конструктивный расчёт

#### 4.3.1. Общие замечания

В данной версии приложения реализованы конструктивные расчёты элементов по нормам России СП 260.1325800.2016 [1], нормам Евросоюза (Еврокодам) EN [5-9], в том числе нормам Республики Беларусь ТКП EN [10-17] и нормам Республики Казахстан СП РК EN [18-24].

Расчёт распространяется на сечения, составленные из пластин, максимальные отношения ширины к толщине которых, не превышают значений, приведённых в соответствующих нормативных документах.

Расчёт производится в форме проверок ранее назначенных пользователем сечений элементов.

*Пользователь должен учитывать приведённую ниже информацию при формировании расчётной модели фермы и назначении параметров конструктивных элементов.*

При расчёте элементов на устойчивость при совместном действии осевой силы и изгибающего момента в зависимости от норм рекомендуется включать в состав расчёта проверки по п.7.7.10.4 (СП 260 [1]) и п.6.2.5 (EN 1993-1-3 [7]), как расчёты, дающие в большинстве случаев более надёжный результат.

*Пользователю следует понимать, что состав расчётов, реализованных в программе, не является абсолютно полным.*



## 4.3.2. Расчёт по СП 260.1325800.2016

### 4.3.2.1. Система ферм 1

Конструктивные элементы Системы ферм 1 (Рисунок 4.3.1) представляют собой стержни из спаренных (стенка к стенке) профилей С-образного сечения, С-образного с рифом на стенке сечения, С-образного сечения с двойными отгибами, Сигма-образного и Швеллерного сечений.



Рисунок 4.3.1 - Система ферм 1

#### Центрально растянутые элементы

Для центрально растянутых конструктивных элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента в сечении без ослабления;
- проверка прочности элемента с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях;
- проверка прочности по сечению с отверстиями для крепления фасонки в узле;
- проверка предельной гибкости.

Для элементов *решётки* фермы дополнительно выполняются (если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл* → *Общие данные*):

- проверка прочности по сечению с отверстиями в месте прикрепления элемента;
- проверка элемента на смятие в месте прикрепления;
- проверка на смятие узловой фасонки;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления.

*Подробное изложение методики расчёта растянутых элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### Центрально сжатые элементы

Для центрально сжатых конструктивных элементов производятся следующие расчеты:

- проверка прочности (в т.ч. с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях);
- проверка на устойчивость по изгибной форме потери устойчивости в плоскости фермы;
- проверка на устойчивость по изгибной форме в плоскости, перпендикулярной плоскости фермы (из плоскости фермы);
- проверка на устойчивость по изгибно-крутильной и/или крутильной форме потери устойчивости;
- проверка отдельной ветви на прочность;
- проверка отдельной ветви на устойчивость;
- проверка элемента по предельной гибкости.

Для элементов решётки дополнительно выполняются расчёты (если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл* → *Общие данные*):

- проверка на смятие элемента в месте прикрепления;
- проверка на смятие узловой фасонки;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления.

В соответствии с п.7.1.1 [1] расчёт распространяется на сечения, составленные из пластин, максимальные отношения ширины к толщине которых, не превышают значений, приведённых в Таблице 7.1 [1]. Элементы из составных сечений рассматриваются как сплошностенчатые при выполнении следующих условий (п.7.7.2.6 [1]):

- а) расстояние между метизами, объединяющими два профиля в единое сечение, не превышает  $30i_{ef}$  б) обеспечивается устойчивость каждой ветви между креплениями с учётом расцентровки. В программе производится проверка сечений на соответствие данным требованиям.

*Подробное изложение методики расчёта центрально сжатых элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

### Растянутые с изгибом элементы

Для растянутых с изгибом элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента на действие  $N$ ,  $M$  и  $Q$  с учётом ослабления отверстиями для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях;
- проверки прочности в начале и конце элемента с учётом ослабления отверстиями;
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы.

Для элементов решётки фермы дополнительно выполняются (если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл* → *Общие данные*):

- проверка на смятие элемента в месте прикрепления;
- проверка на смятие узловой фасонки;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления.

*Подробное изложение методики расчёта растянутых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

### Сжатые с изгибом элементы

Для сжатых с изгибом элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента на действие  $N$ ,  $M$  и  $Q$  с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях;
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы;
- проверки прочности в начале и конце элемента с учётом ослабления отверстиями;
- проверка отдельной ветви элемента на прочность;
- проверка устойчивости элемента при совместном действии осевой силы и изгибающего момента.

Для элементов решётки фермы дополнительно выполняются (если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл* → *Общие данные*):

- проверка на смятие элемента в месте прикрепления;
- проверка на смятие узловой фасонки;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления.

*Подробное изложение методики расчёта сжатых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

В программе реализованы два варианта расчёта на устойчивость сжатых с изгибом элементов: по пункту 7.7.10.3 [1] и по пункту 7.7.10.4 [1]. Пользователь может выбрать по какому из них выполнить расчёт в диалоговом окне *CFSteel* → *Настройки* → *Расчёт* → *СП260*. Также возможен вариант, когда расчёт производится по обоим методикам.

*Расчёт по п. 7.7.10.3[1]*

Для сжатых с изгибом элементов должны выполняться следующие условия:

$$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (4.3.2.45, \text{ а})$$

$$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (4.3.2.45, \text{ б})$$

$k_{ij}$  – коэффициенты взаимодействия, определяемые по Приложению В [1].

Если элемент закреплён по всей длине из плоскости фермы (в диалоговом окне *Редактировать конструктивный элемент* (Рисунок 2.31) пользователем отмечено *Элемент полностью раскреплён из плоскости фермы*, то  $\varphi_y = 1$  и  $\chi_{LT} = 1$ .

Если к элементу приложена поперечная нагрузка, то для определения критического момента  $M_{cr}$  важным является уровень приложения нагрузки по отношению к центру изгиба поперечного сечения. Влияние данного фактора учитывается произведением  $C_2 \cdot y_g$ . Где  $y_g$  - координата точки приложения поперечной нагрузки относительно центра изгиба. Если поперечная нагрузка действует по направлению к центру изгиба, то она оказывает дестабилизирующее воздействие; если нагрузка действует от центра изгиба, то, наоборот, стабилизирующее. Если нагрузка приложена в центре изгиба, то её воздействие с рассматриваемой точки зрения нейтрально. Учитываемые в программе варианты приведены на Рисунке 4.2.3.



Рисунок 4.2.3 - Варианты приложения поперечной нагрузки на элемент

Пользователь выбирает вариант приложения нагрузки и, при необходимости, расстояние от места приложения до центра изгиба  $a$ , в диалоговом окне (Рисунок 2.32). По умолчанию значение  $C_2$  принято равным  $1,0$ . Если пользователь выбрал явный ввод  $C_2$ , то ему предоставляется возможность ввести значение  $C_2$  (п.2.6.3).

Если на элемент нагрузка не приложена, то  $C_2 \cdot y_g = 0$ .

Коэффициенты взаимодействия  $k_{xx}$ ,  $k_{yx}$ , учитывающие совместное действие усилий, определяются по *Методу 1* (Приложение В [1] Таблицы В.1 и В.2).

Если пользователю необходимо выполнить расчёт устойчивости сжатого с изгибом элемента с вычислением коэффициентов  $k_{xx}$  и  $k_{yx}$  по *Методу 2* (Приложение В [1] Таблицы В.4 и В.5), он может выполнить это в основной программе *CFSteel* → *Элемент* → *Сжатие с изгибом*.

*Расчёт по п. 7.7.10.4[1]*

Проверка устойчивости элемента при совместном действии  $N$ ,  $M$  и  $Q$  в соответствии с п.7.7.10.4 [1] производится по неравенству:

$$\left( \frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1. \quad (4.3.2.56)$$

#### 4.3.2.2. Система ферм 2

В системе ферм 2 пояса выполнены из двойных профилей С-образного сечения, С-образного сечения с рифом на стенке, С-образного сечения с двойными отгибами, Сигма-образного и Швеллерного сечений. Элементы решётки выполняются из одинарных профилей и заводятся между профилями поясов (Рисунок 4.3.4). В узлах элементы решётки прикрепляются своими поясами к стенкам поясных элементов с помощью метизов.

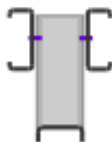


Рисунок 4.3.4 - Система ферм 2

#### Центрально растянутые элементы

Для центрально растянутых элементов производятся следующие расчеты:

- проверка прочности элемента по полному сечению;
- проверка прочности по сечению нетто с учётом отверстий для крепления соединительных элементов в двойных профилях поясов;
- проверка по предельной гибкости.

*Подробное изложение методики расчёта центрально растянутых элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### Центрально сжатые элементы

Для центрально сжатых элементов производятся следующие расчёты:

- проверка прочности по элемента;
- проверка устойчивости по изгибной форме потери устойчивости в плоскости фермы;
- проверка устойчивости по изгибной форме в плоскости, перпендикулярной плоскости фермы (только для элементов решётки);
- проверка на устойчивость по изгибно-крутильной и/или крутильной форме потери устойчивости (только для элементов решётки);
- проверка устойчивости элементов решётки с не полностью эффективным сечением на сжатие с изгибом;
- проверка отдельной ветви поясов на прочность;
- проверка отдельной ветви поясов на устойчивость;
- проверка элементов по предельной гибкости.

*Подробное изложение методики расчёта центрально сжатых элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### Растянутые с изгибом элементы

Для растянутых с изгибом элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента на действие  $N$ ,  $M$  и  $Q$  с учётом ослабления отверстиями для крепления соединительных планок в двойных профилях поясов;

- проверки прочности элемента на действие  $N$ ,  $M$  и  $Q$  для элементов решётки без учёта ослабления отверстиями;
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы;
- проверка элемента по предельной гибкости.

*Подробное изложение методики расчёта растянутых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### Сжатые с изгибом элементы

Для сжатых с изгибом элементов ферм системы 2 выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента на действие  $N$ ,  $M$  и  $Q$  с учётом ослабления отверстиями для крепления соединительных планок в двойных профилях поясов;
- проверки прочности элемента на действие  $N$ ,  $M$  и  $Q$  для элементов решётки без ослабления отверстиями;
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы;
- проверка отдельной ветви элементов из двойных профилей на прочность;
- проверка устойчивости элементов решётки на сжатие с изгибом.

*Подробное изложение методики расчёта сжатых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### 4.3.2.3. Система ферм 3

В системе ферм 3 пояса и решётка выполнены из одинарных профилей (Рисунок 4.3.9). В узлах элементы решётки заводятся между полками поясов и прикрепляются к ним своими полками.



Рисунок 4.3.9 - Система ферм 3

Состав и методика конструктивного расчёта элементов системы ферм 3 аналогичен представленному в п.4.3.2.2 в части элементов решётки.

#### 4.3.2.4. Расчёт ферм по прогибам

Прогиб фермы должен удовлетворять условию

$$f_{max} \leq f_u,$$

где  $f_{max}$  - максимальный прогиб фермы:  $f_{max} = P_z \cdot k$ , где  $P_z$  – максимальное перемещение вертикально вниз узла нижнего пояса,  $k$  - коэффициент влияния податливости болтовых соединений на величину прогиба фермы (задаётся пользователем в *Настройки* → *Конструктивный расчёт* (п.6.3)). Некоторая информация по значениям коэффициента  $k$  содержится, например, в [31].  $f_u$  – предельный нормируемый прогиб [3]. Вводится пользователем в *Файл* → *Общие данные*.

Согласно п. 10.3 [4] при расчётах по второй группе предельных состояний коэффициент надёжности по ответственности принят равным единице.

Расчёт по прогибам производится на специально созданные для этого сочетания. В диалоговом окне ввода сочетаний значение *Группа предельных состояний* должно быть

установлено Вторая группа п.с.. Если таких сочетаний пользователем не введено, то расчёт по прогибам не производится.

### 4.3.3. Расчёт по нормам EN (Eurocode)

#### 4.3.3.1. Общие замечания

Расчёт производится в соответствии с нормами EN 1990 [5], EN 1993-1-1 [6], EN 1993-1-3 [7], EN 1993-1-5 [8], EN 1993-1-8 [9], а также соответствующими нормами Республики Беларусь [10 - 17] и Республики Казахстан [18 - 24].

Параметры, определяемые на национальном уровне (Национально Определяемые/ Устанавливаемые Параметры - Nationally Determined Parameters – (NDP)), которые приводятся в Национальных приложениях (National Annex), для большинства стран Евросоюза и некоторых других государств, применяемых Еврокоды, уже определены в CFSteel. В Таблице 4.3.3.1 приведены государства и их Национальные приложения, Национально Определяемые Параметры которых реализованы в программе.

Таблица 4.3.3.1 – Государства и Национальные приложения

	CEN EU	Европейский Союз	Comite European de Normalization
	Austria	Австрия	ONORM B 1993-1-1* ONORM B 1993-1-3
	Belarus	Республика Беларусь	ТСР/ТКП EN 1993-1-1-2009 ТСР/ТКП EN 1993-1-3-2009
	Belgium	Бельгия	NBN EN 1993-1-3/ANB NBN EN 1993-1-3/ANB
	Bulgaria	Болгария	BDS EN 1993-1-1/NA BDS EN 1993-1-3/NA
	Cyprus	Кипр	CYS EN 1993-1-1/NA CYS EN 1993-1-3/NA
	Czech Republic	Чехия	CSN EN 1993-1-1/NA* CSN EN 1993-1-3/NA
	Denmark	Дания	DS/EN 1993-1-1 DK NA DS/EN 1993-1-3 DK NA
	Finland	Финляндия	SFS EN 1993-1-1/NA* SFS EN 1993-1-3/NA
	France	Франция	NF EN 1993-1-1/NA NF EN 1993-1-3/NA
	Germany	Германия	DIN EN 1993-1-1/NA* DIN EN 1993-1-3/NA
	Greece	Греция	ELOT EN 1993-1-1* ELOT EN 1993-1-3
	Ireland	Ирландия	I.S. EN 1993-1-1/NA* I.S. EN 1993-1-3/NA
	Italy	Италия	UNI EN 1993-1-1/NA UNI EN 1993-1-3/NA
	Kazakhstan	Республика Казахстан	SR RK EN/СП РК EN 1993-1-1:2005/2011 SR RK EN/СП РК EN 1993-1-3:2006/2011
	Lithuania	Литва	LST EN 1993-1-1/NA LST EN 1993-1-3/NA
	Luxembourg	Люксембург	LU EN 1993-1-1/AN-LU LU EN 1993-1-3/AN-LU
	Malaysia	Малайзия	MS EN 1993-1-1/NA MS EN 1993-1-3/NA

	Netherlands	Нидерланды	NEN EN 1993-1-1/NA* NEN EN 1993-1-3/NA
	Norway	Норвегия	NS EN 1993-1-1/NA* NS EN 1993-1-3/NA
	Poland	Польша	PN EN 1993-1-1/NA* PN EN 1993-1-3/NA
	Portugal	Португалия	NP EN 1993-1-1/NA NP EN 1993-1-3/NA
	Romania	Румыния	SR EN 1993-1-1/NA SR EN 1993-1-3/NA
	Singapore	Сингапур	SS EN 1993-1-1/NA SS EN 1993-1-3/NA
	Slovakia	Словакия	STN EN 1993-1-1/NA* STN EN 1993-1-3/NA
	Slovenia	Словения	SIST EN 1993-1-1/A101*
	Spain	Испания	UNE EN 1993-1-1/NA UNE EN 1993-1-3/NA
	Sweden	Швеция	SS EN 1993-1-1/NA SS EN 1993-1-3/NA
	United Kingdom	Соединённое Королевство	BS EN 1993-1-1/NA BS EN 1993-1-3/NA

\* В пункте 6.3.3(4) для вычисления коэффициентов взаимодействия  $k_{ij}$  реализован только Метод 1 (Приложение А) [6].

В Таблице 4.3.3.2 приведены пункты соответствующих норм, параметры расчёта которых в программе определяются в соответствии с Национальными приложениями.

Таблица 4.3.3.2 – Нормы и пункты с NDP

Нормы	Пункты норм
EN 1990	A1.2.2 (табл. А1.1), А1.3.1 (табл.А1.2(В), В3.3
EN 1993-1-1	6.1(1)В, 6.3.2.2(2), 6.3.2.3(1), 6.3.3(5)
EN 1993-1-3	2(3), 2(5), 8.3(5), 8.3(13)
EN 1993-1-8	2.2.2, 3.1.1(3)

Пользователю доступно редактирование значений Национально Определяемых Параметров (*CFSteel* → *Настройки* → *Расчёт* → *ЕС3* → *Национальное приложение*) (см. п. 3.1 *CFSteel v.4.3. Документация. Том I. Руководство пользователя* [26]). Таким образом, имеется возможность быстро реагировать на изменение норм и тем самым поддерживать значения Национально Определяемых Параметров в актуальном состоянии.

Также пользователь имеет возможность создать собственную редактируемую комбинацию NDP безотносительно какого-либо государства.

В соответствии с п.2(6) EN 1993-1-3 [7] и EN 1990 (Приложение В) [5] в программе реализована дифференциация конструкций по классам надёжности (*RC*) посредством введения коэффициентов  $K_{FI}$  (п. В3.3 [5]). Значение данного коэффициента определено в качестве Национально Определяемого Параметра соответствующего государства и может быть отредактировано пользователем: *CFSteel* → *Настройки* → *Расчёт* → *ЕС3* → *Национальное приложение*. На коэффициент  $K_{FI}$  умножаются частные коэффициенты воздействий  $\gamma_F$ , используемых в основных комбинациях для установившихся (постоянных) расчётных ситуаций.

В программе учтены особенности в назначении величин некоторых частных коэффициентов по нормам ТКП EN и СП РК EN. Подробно эта информация приведена в п. 2.4.2 *CFSteel v.4.3. Документация. Том I. Руководство пользователя* [26].



Кроме того, при расчёте по ТКП EN и СП РК EN вместо коэффициента  $K_{Fl}$ , применяемого для учёта уровня ответственности объекта, учитывается коэффициент надёжности по ответственности  $\gamma_n$ , на который умножаются нагрузки. Классификация объектов по уровням ответственности и значения коэффициента  $\gamma_n$  приведены в ГОСТ 27751 «Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту». В программе значение коэффициента  $\gamma_n$  вводится пользователем.

Значения коэффициентов  $\gamma_c$ ,  $\gamma_m$ ,  $\gamma_u$  и  $\gamma_n$  для норм ТКП EN и СП РК EN доступны пользователю для редактирования (*CFSteel* → *Настройки* → *Расчёт* → *ЕСЗ* → *Национальное приложение*).

Рассматривается общий случай потери устойчивости плоской формы изгиба в соответствии с п.6.3.2.3 EN 1993-1-1 [6].

Обозначение осей для сечений в модуле расчёта ферм принято аналогичным Еврокодам. Обозначение осей в конструктивных расчётах фермы: ось  $y - y$  – расчёт в плоскости фермы; ось  $z - z$  – расчёт в плоскости, перпендикулярной плоскости фермы (из плоскости фермы).

#### 4.3.3.2. Система ферм 1

Конструктивные элементы Системы ферм 1 представляют собой стержни из спаренных (стенка к стенке) профилей С-образного сечения, С-образного с рифом на стенке сечения, С-образного сечения с двойными отгибами, Сигма-образного и Швеллерного сечений.



Рисунок 4.3.3.1 - Система ферм 1

#### Центрально растянутые элементы

Для центрально растянутых конструктивных элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента в сечении без ослабления;
- проверка прочности с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях;
- проверка прочности по сечению с отверстиями для крепления фасонки в узле (для поясов фермы из спаренных профилей).

Для элементов *решётки* фермы, если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл* → *Общие данные*, дополнительно выполняются расчёты:

- проверка прочности по сечению с отверстиями в месте прикрепления элемента к узловой фасонке;
- проверка на предотвращение смятия болтами частей рассматриваемого конструктивного элемента;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления элемента;
- проверка на вырыв части элемента в месте прикрепления.

*Подробное изложение методики расчёта центрально сжатых элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*



В части Национальных Приложений исключены некоторые классы прочности болтов. В частности, это имеет место в НП к СП РК EN 1993-1-8:2005/2011 [23, 24] (Таблица НП.2). Эти данные приведены в Таблице 4.3.3.2.

Таблица 4.3.3.2 (НП.2 [24]) – Номинальные значения предела текучести  $f_{yb}$  и временного сопротивления на растяжение  $f_{ub}$  болтов

Класс прочности	5.6	5.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ Н/мм <sup>2</sup>	300	400	640	900
$f_{ub}$ Н/мм <sup>2</sup>	500	500	800	1000

Пользователь должен следить за тем, чтобы применять те классы болтов, которые предусмотрены в Национальном Приложении, по которому производится расчёт. Иначе в программе принимаются во внимание данные, приведённые в Таблице 3.1 [9].

Особенности назначения коэффициента  $\gamma_{M2}$  в программе в соответствии с Таблицей НП.1 Национального Приложения к СП РК EN 1993-1-8:2005/2011 [24]) подробно описаны в п. 2.4.2 *CFSteel v.4.3. Документация. Том I. Руководство пользователя* [26].

Расчётная несущая способность по вырыву части элемента решётки в месте прикрепления определяется по п. 3.10.2(2) [9]

$$N_{tbs,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + \left( \frac{1}{\sqrt{3}} \right) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}, \quad (4.3.3.12)$$

где  $A_{nt}$  – площадь сечения нетто растянутой зоны: зависит от количества болтов в ряду, расположенном перпендикулярно оси элемента;  $A_{nv}$  – площадь сечения нетто сдвигаемой зоны: зависит от количества рядов, расположенных перпендикулярно оси элемента. При вычислении площадей учитывается, что элемент выполнен из спаренных профилей. На рисунке 4.3.3.2 показан пример вырыва материала элемента при двух поперечных рядах болтов и трёх продольных рядах болтов.

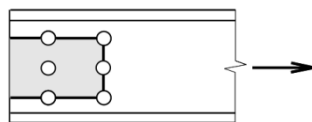


Рисунок 4.3.3.2 – Пример траектории вырыва части элемента в месте прикрепления

### Центрально сжатые элементы

Для центрально сжатых элементов ферм системы  $I$  выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности сечения элемента (в т.ч. с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях);
- проверка на устойчивость по изгибной (плоской) форме в плоскости фермы;
- проверка на устойчивость по изгибной форме в плоскости, перпендикулярной плоскости фермы (из плоскости фермы);
- проверка на устойчивость по изгибно-крутильной и/или крутильной форме потери устойчивости.

Для элементов решётки дополнительно выполняются (если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл → Общие данные*):

- проверка на смятие элемента в месте прикрепления;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления.

В соответствии с п.5.2(1) [7] расчёт распространяется на сечения, составленные из пластин, максимальные отношения ширины к толщине которых, не превышают значений, приведённых в Таблице 5.1 [7].

*Подробное изложение методики расчёта центрально сжатых элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### Растянутые с изгибом элементы

Для растянутых с изгибом элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы с учётом ослабления отверстиями для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях;
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы.

Для элементов решётки фермы дополнительно выполняются (если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл* → *Общие данные*):

- проверки прочности в начале и конце элемента с учётом ослабления отверстиями;
- проверка на смятие в месте прикрепления в начале и конце элемента;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления в начале и конце элемента.

*Подробное изложение методики расчёта растянутых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

В стержнях решётки фермы в общем случае усилия могут быть разными в начале и конце элемента. В зависимости от настроек расчёта количество и размещение отверстий по концам элемента может быть разным или одинаковым. И в том и в другом случае эти отверстия могут отличаться от отверстий, расположенных по длине элемента для крепления соединительных прокладок. Поэтому в программе предусмотрены отдельные проверки прочности на каждом конце элемента решётки с учётом этих факторов.

Проверка на смятие элемента решётки в месте прикрепления в общем случае производится в начале и конце конструктивного элемента на действие соответствующих сочетаний осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы. В рамках каждого болтового поля определяется наиболее нагруженный болт и для него записывается расчётное неравенство.

Если пользователь в диалоговом окне настроек конструктивного расчёта (Рисунок 4.3.3.3) выбрал одинаковое прикрепление элемента решётки к поясам, то расчёт производится на максимальное значение  $F_{v,Ed}$  в начале или в конце элемента.

Рисунок 4.3.3.3 - Одинаковое прикрепление элемента решётки к поясам

Проверка по срезу болта производится в начале и конце конструктивного элемента на действие соответствующих сочетаний осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы. В рамках каждого болтового поля определяется наиболее нагруженный болт и для него записывается расчётное неравенство.

Если пользователь в диалоговом окне настроек конструктивного расчёта выбрал одинаковое прикрепление элемента решётки к поясам, то расчёт производится на максимальное значение  $F_{v,Ed}$  в начале или в конце элемента.

Особенности в назначении частных коэффициентов  $\gamma_{Mi}$  приведены в п. 4.3.3.1 и в п. 2.4.2 *CFSteel v.4.3. Документация. Том I. Руководство пользователя* [26].

### Сжатые с изгибом элементы

Для сжатых с изгибом элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок в спаренных профилях;
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы;
- проверка устойчивости элемента при совместном действии осевой силы и момента.

Для элементов решётки фермы дополнительно выполняются (если пользователь отметил необходимость расчёта узлов в пункте меню *Файл* → *Общие данные*):

- проверки прочности элемента в начале и конце с учётом ослабления отверстиями для крепления к фасонке;
- проверка на смятие элемента в месте прикрепления;
- проверка на срез болтов в месте прикрепления.

*Подробное изложение методики расчёта сжатых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

Если к элементу приложена поперечная нагрузка, то для определения критического момента  $M_{cr}$  важным является уровень приложения нагрузки по отношению к центру изгиба поперечного сечения. Влияние данного фактора учитывается произведением  $C_2 \cdot z_g$ . Где  $z_g$  - координата точки приложения поперечной нагрузки относительно центра изгиба сечения. Учитываемые в программе варианты приведены на Рисунке 4.3.3.4.



Рисунок 4.3.3.4 - Варианты приложения поперечной нагрузки на элемент

Пользователь выбирает вариант приложения нагрузки и, при необходимости, расстояние от места приложения до центра изгиба  $a$ , в диалоговом окне (Рисунок 2.32). По умолчанию значение  $C_2$  принято равным  $1,0$ . Если пользователь выбрал явный ввод  $C_2$  (п. 6.3), то ему предоставляется возможность ввести значение  $C_2$  (п. 2.6.3). Если на элемент нагрузка не приложена, то  $C_2 \cdot y_g = 0$ .

Помимо программного вычисления критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба  $M_{cr}$  пользователю предоставляется возможность явно ввести его значение. Для этого в диалоговом окне *Потеря устойчивости плоской формы изгиба* (Рисунок 2.3.2) необходимо отметить: *Ввести  $M_{cr}$* , после чего непосредственно ввести значение.

#### 4.3.3.3. Система ферм 2

В системе ферм 2 пояса выполнены из двойных профилей С-образного сечения, С-образного сечения с рифом на стенке, С-образного сечения с двойными отгибами, Сигма-образного и Швеллерного сечений. Элементы решётки выполняются из одинарных профилей и заводятся между профилями поясов (Рисунок 4.3.3.5). В узлах элементы решётки прикрепляются своими поясами к стенкам поясных элементов с помощью болтов.

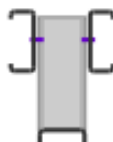


Рисунок 4.3.3.5 - Система ферм 2

#### Центрально растянутые элементы

Для центрально растянутых элементов ферм выполняются следующие расчёты:

- проверка прочности элемента по полному сечению;
- проверка прочности по сечению нетто с учётом отверстий для крепления соединительных элементов в двойных профилях поясов.

Расчёты производятся по методике соответствующих расчётов, приведённой в п. 4.3.3.2. Некоторые корректировки сделаны для расчёта прочности растянутых поясов в части различного объединения двух профилей в системах ферм 1 и 2.

#### Центрально сжатые элементы

Для центрально сжатых элементов производятся следующие расчёты:

- проверка прочности сечения элемента;

- проверка на устойчивость по изгибной форме в плоскости фермы (только для элементов решётки);
- проверка на устойчивость по изгибной форме в плоскости, перпендикулярной плоскости фермы (только для элементов решётки);
- проверка на устойчивость по изгибно-крутильной и/или крутильной форме потери устойчивости (только для элементов решётки);
- проверка элементов решётки как сжатых с изгибом стержней (при не полностью эффективном сечении).

В соответствии с п. 5.2(1) [7] расчёт распространяется на сечения, составленные из пластин, максимальные отношения ширины к толщине которых, не превышают значений, приведённых в Таблице 5.1 [7].

*Подробное изложение методики расчёта центрально сжатых элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### Растянутые с изгибом элементы

Для растянутых с изгибом элементов выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы (в поясах учитывается ослабление сечения отверстиями для крепления соединительных элементов по длине);
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы.

*Подробное изложение методики расчёта растянутых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### Сжатые с изгибом элементы

Для сжатых с изгибом элементов ферм системы 2 выполняются следующие расчеты:

- проверка прочности элемента при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы с учётом ослабления отверстиями для крепления соединительных планок в двойных профилях поясов;
- проверки прочности элемента по его длине при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы для элементов решётки без учёта ослабления отверстиями;
- проверка прочности элемента на действие поперечной силы;
- проверка отдельной ветви элементов поясов из двойных профилей на прочность;
- проверка устойчивости элементов решётки на сжатие с изгибом.

*Подробное изложение методики расчёта сжатых с изгибом элементов, реализованной в CFSTruss, содержится в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям, и здесь не приводится.*

#### 4.3.3.4. Система ферм 3

В системе ферм 3 пояса и решётка выполнены из одинарных профилей (Рисунок 4.3.3.8). В узлах элементы решётки заводятся между полками поясов и прикрепляются к ним своими полками.



Рисунок 4.3.3.8 - Система ферм 3

Состав и методика конструктивного расчёта элементов системы ферм 3 аналогичен представленному в п. 4.3.3.3 в части элементов решётки.

#### 4.3.3.5. Расчёт по прогибам

Прогиб фермы должен удовлетворять условию

$$f_{max} \leq f_u$$

$f_{max}$  - максимальный прогиб фермы:  $f_{max} = P_z \cdot k$ , где  $P_z$  – перемещение вертикально вниз узла нижнего пояса, для которого это перемещение максимально;  $k$  - коэффициент влияния податливости болтовых соединений на величину прогиба фермы (задаётся пользователем в *Настройки* → *Конструктивный расчёт*).

$f_u$  – предельный нормируемый прогиб, который вводится пользователем в *Нагрузки* → *Добавить/Редактировать Сочетание* (Рисунок 4.3.3.9).

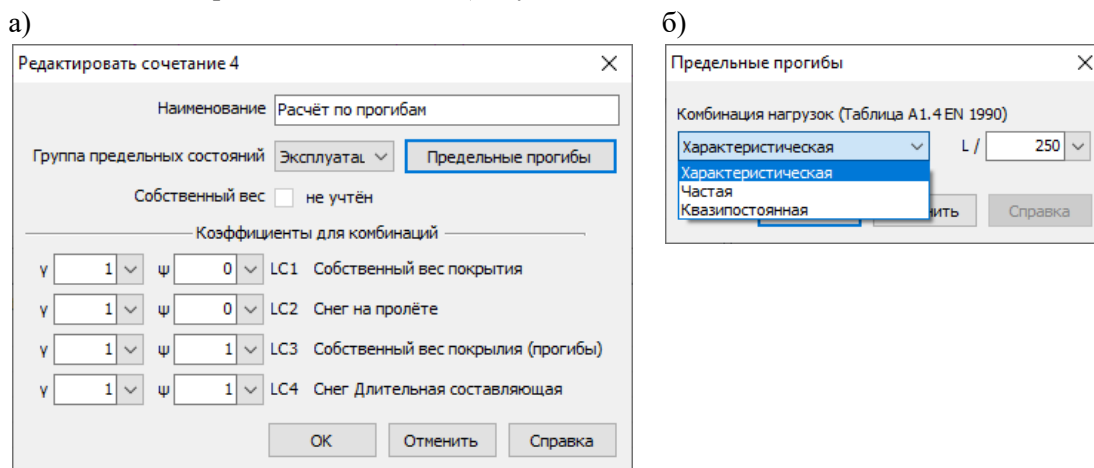


Рисунок 4.3.3.9 – Ввод данных для расчёта по эксплуатационной пригодности:

а) – формирование комбинаций; б) – ввод данных о комбинации

Расчёт по прогибам производится на специально созданные для этого комбинации воздействий, которые должны быть сформированы согласно пп. 3.4, 6.5, A1.4 EN 1990 [5]. На основании A1.4.1 [5] частные коэффициенты для воздействий приняты равными 1,0.

Если пользователь не ввёл ни одной комбинации для расчёта по эксплуатационной пригодности, то расчёт по прогибам не производится.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 5.1. Результаты расчёта

#### 5.1.1. Результаты статического расчёта

При выборе пользователем из пункта главного меню *Расчёт* → *Статический расчёт* результаты статического расчёта автоматически появляются на экране (Рисунок 5.1).

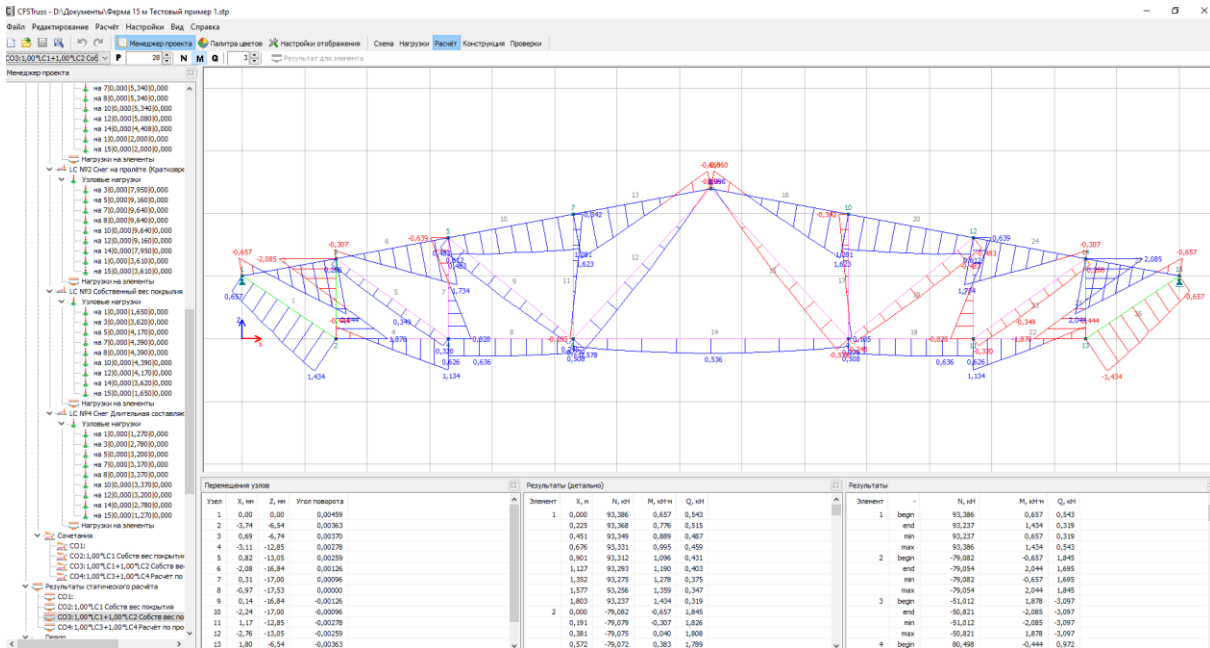


Рисунок 5.1 – Окно программы в результате выполнения статического расчёта с эпюрой изгибающих моментов

В рабочем окне в графической форме показывается эпюры осевых сил (Рисунок 5.2), изгибающих моментов, поперечных сил, а также деформированная схема фермы (Рисунок 5.3).

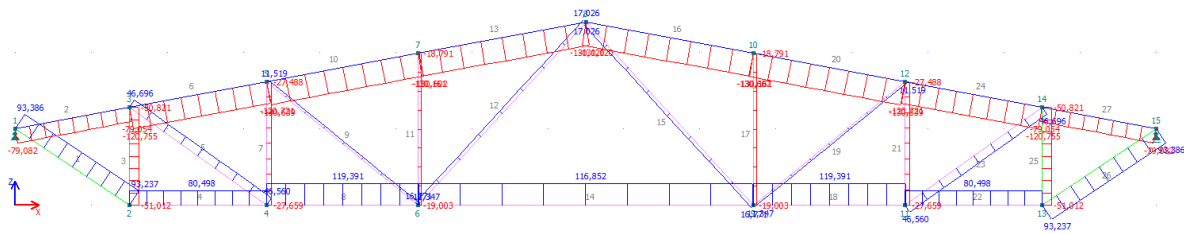


Рисунок 5.2,а – Эпюра осевых сил

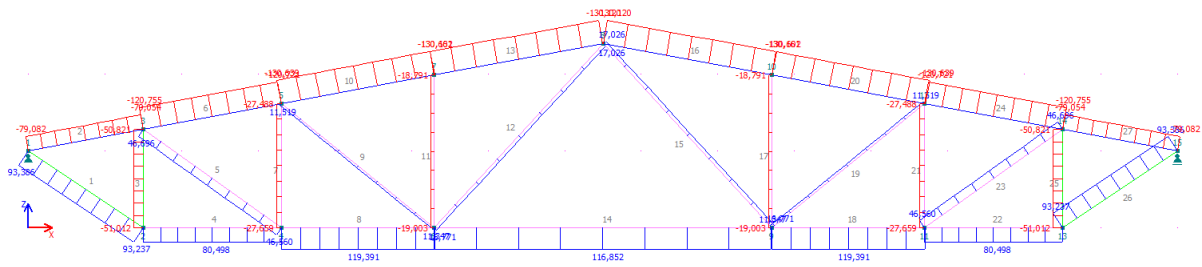


Рисунок 5.2,б – Эпюра осевых сил после смены направления отображения

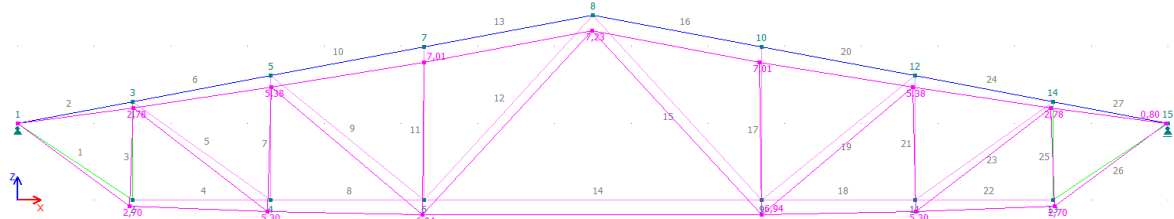


Рисунок 5.3 – Деформированная схема фермы

Переключение между сочетаниями/комбинациями загрузений осуществляется путём выбора из списка в левой части панели инструментов, рядом можно выбрать, что должно быть выведено в окно представления результатов: эпюра осевых усилий ( $N$ ), эпюра изгибающих моментов ( $M$ ), эпюра поперечных сил ( $Q$ ) или перемещения узлов ( $P$ ) (Рисунок 5.1). Здесь же можно выбрать масштаб изображения. Также выбрать сочетание/комбинацию можно в менеджере проекта в пункте *Результаты статического расчёта*. Имеется возможность смены направления отображения эпюры осевых усилий. Это можно сделать в диалоговом окне *Настройки отображения* (п.6.5.1).

Количество разбиений элемента по длине указывается пользователем в *Настройки* → *Конструкция* (п.6.1).

Кроме того, при наведении курсора мыши на какую-либо ординату усилий показывается её координата от начала элемента и значение усилия так как это показано на Рисунке 5.4.

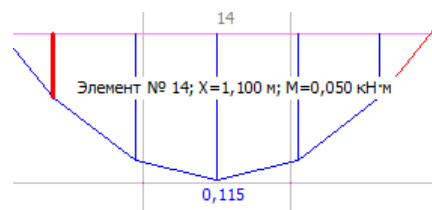


Рисунок 5.4 – Расшифровка ординаты изгибающего момента

Кроме графического представления результаты статического расчёта приводятся в табличной форме (Рисунок 5.1). В таблице *Перемещения узлов* показываются линейные перемещения узлов расчётной схемы по оси  $X$ , оси  $Z$  и угол поворота в радианах. В таблице *Результаты (детально)* для каждого элемента показываются значения усилий  $N$ ,  $M$ ,  $Q$  для всех сечений, на которые разбивается стержень. В таблице *Результаты* для каждого элемента показывается соответствующее усилие ( $N$ ,  $M$ ,  $Q$ ) в начале, конце элемента, а также их максимальное и минимальное значение.



## Результаты

Если пользователь выполнил конструктивный расчёт и появилась необходимость просмотра результатов статического расчёта, то в этом случае следует перейти в режим *Расчёт* на панели инструментов.

### 5.1.2. Результаты проверок (конструктивный расчёт)

Конструктивный расчёт производится после выбора пользователем пункта *Конструктивный расчёт* из пункта главного меню *Расчёт*. Вид экрана после выполнения расчёта показан на Рисунке 5.5.

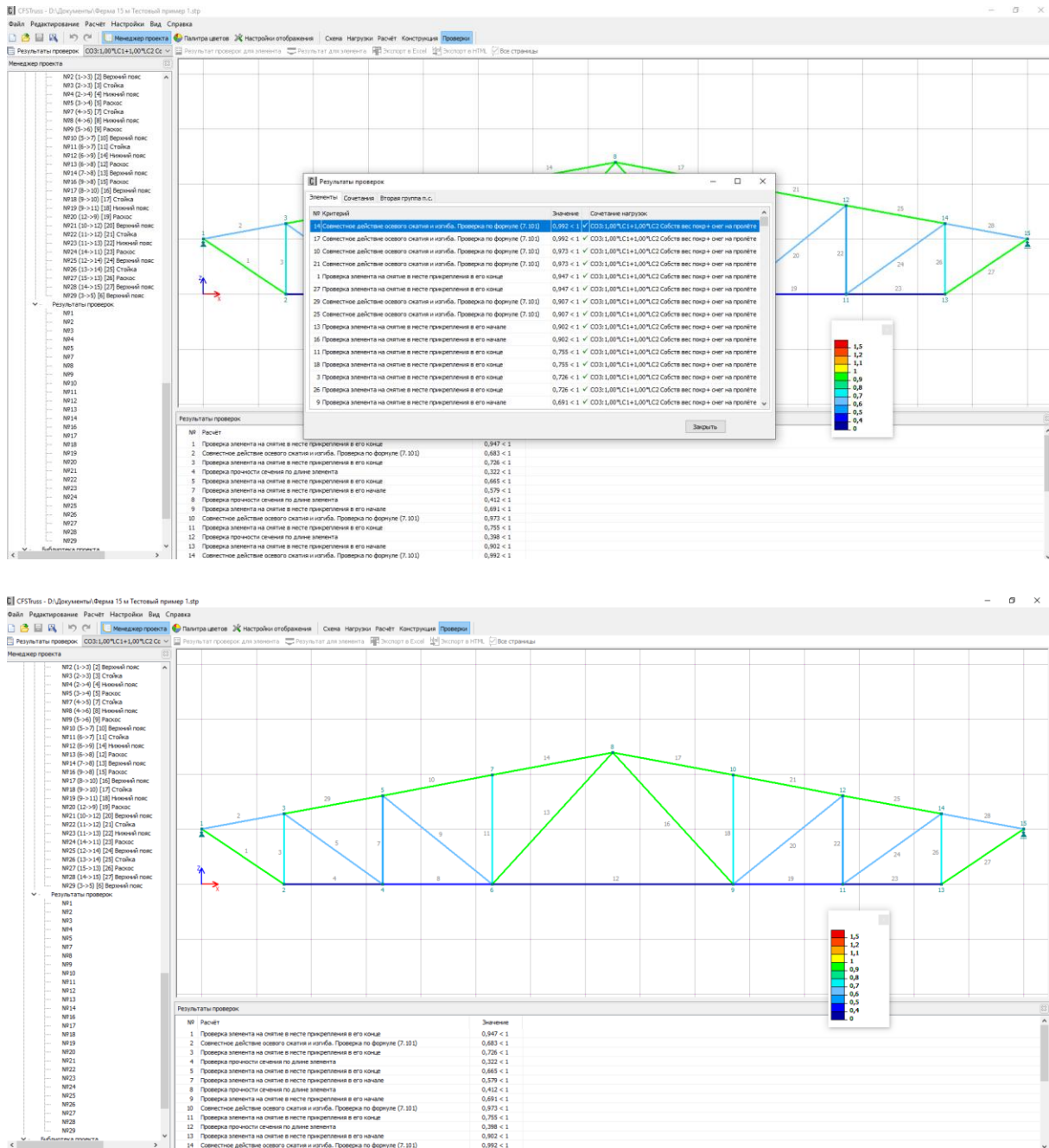


Рисунок 5.5 – Окно программы после выполнения конструктивного расчёта

В рабочем окне отображается ферма с элементами, окрашенными цветом, соответствующим наиболее опасной проверке из всех произведённых для данного

## Результаты

конструктивного элемента (по сочетаниям), в соответствии с принятой шкалой цветов (Рисунок 5.6).

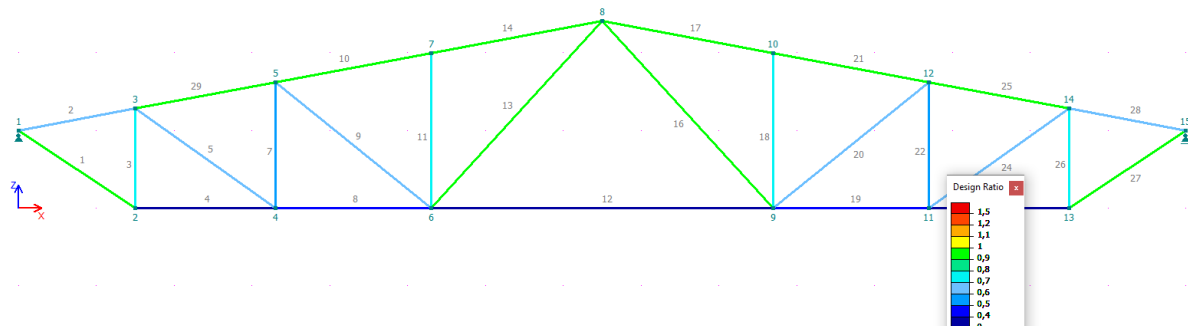


Рисунок 5.6 – Цветовое представление результатов проверок конструктивных элементов

На переднем плане отображается информационное окно, предназначенное для быстрой оценки пользователем результатов расчёта (Рисунок 5.7). Здесь на первой вкладке показаны номера конструктивных элементов, проверка с максимальным коэффициентом использования несущей способности для каждого, максимальное значение коэффициента использования и сочетание, где данная проверка реализуется. На первом месте стоит элемент с абсолютно максимальным коэффициентом. Далее элементы расположены в порядке убывания проверок с максимальным коэффициентом использования для каждого. По информации, представленной на данной вкладке и по форме её представления можно быстро оценить результаты проверочного расчёта фермы.

№	Критерий	Значение	Сочетание нагрузок
14	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,992 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
17	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,992 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
10	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,973 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
21	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,973 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
1	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его конце	0,947 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
27	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его конце	0,947 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
29	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,907 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
25	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,907 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
13	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его начале	0,902 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
16	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его начале	0,902 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
11	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его конце	0,755 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
18	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его конце	0,755 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
3	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его конце	0,726 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
26	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его конце	0,726 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте
9	Проверка элемента на снятие в месте прикрепления в его начале	0,691 < 1	✓ CO3:1,00%LC1+1,00%LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте

Рисунок 5.7 – Информационное окно по результатам проверок конструктивных элементов

На второй вкладке (Рисунок 5.8) приводится список сочетаний для первой группы предельных состояний. И для каждого сочетания приводится конструктивный элемент с максимальным коэффициентом использования и наименование соответствующей проверки.

Результаты проверок

Элементы Сочетания Вторая группа п.с.

Сочетание нагрузок	Критерий	Значение	№
CO1:	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,125 < 1	3
CO2: 1,00*LC1 Собств вес п	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,540 < 1	1
CO3: 1,00*LC1+1,00*LC2 Сс	Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,992 < 1	14

Закрывать

Рисунок 5.8 - Информационное окно результатов проверок по сочетаниям загружений

Третья вкладка (Рисунок 5.9) посвящена проверке фермы по прогибам. Здесь для каждого сочетания, предназначенного для расчёта по прогибам, указываются его состав, максимальное расчётное значение прогиба, нормируемое значение прогиба, применённый коэффициент надёжности по нагрузке  $\gamma_f$ , коэффициент влияния податливости болтовых соединений на величину прогиба фермы  $K$  и номер узла фермы с максимальным вертикальным перемещением.

Результаты проверок

Элементы Сочетания Вторая группа п.с.

Сочетание нагрузок	Неравенство	Значение	Ед.изм.	$\gamma_f$	$K$	Узел
CO4: 1,00*LC3+1,00*LC4 Расчёт по прогибам	$f_{max} \leq f_u$	9,03 < 66,67	мм	✓ 1	1,3	6

Закрывать

Рисунок 5.9 - Информационное окно результатов проверки фермы по прогибам

В нижней части экрана представлены результаты проверок элементов в табличной форме (Рисунок 5.10).

## Результаты

Результаты проверок		
№	Расчёт	Значение
1	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,947 < 1
2	Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,683 < 1
3	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,726 < 1
4	Проверка прочности сечения по длине элемента	0,322 < 1
5	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,665 < 1
7	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,579 < 1
8	Проверка прочности сечения по длине элемента	0,412 < 1
9	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,691 < 1
10	Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,973 < 1
11	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	0,755 < 1
12	Проверка прочности сечения по длине элемента	0,398 < 1
13	Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	0,902 < 1
14	Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	0,992 < 1

Рисунок 5.10 – Табличная форма представления результатов конструктивного расчёта

Здесь все стержни расположены в порядке возрастания их номеров. Для каждого выбрана проверка с максимальным коэффициентом использования для текущего сочетания/комбинации загрузений; приводится её наименование.

Также пользователю доступна более подробная информация о произведённых проверках для каждого конструктивного элемента и каждого сочетания/комбинации. Для её просмотра следует дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши по строке элемента в информационном окне, показанном на Рисунке 5.7, или 5.10, или по номеру конструктивного элемента в дереве *Менеджера проекта* в разделе *Результаты проверок*. После этого появится окно с подробной информацией о конструктивном элементе и произведённых проверках, аналогичное приведённому на Рисунке 5.11.

## Результаты

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,619 < 1	✓	7.7.4; 7.7.5
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_{эф}R_z\gamma_c} \leq 1$	0,007 < 1	✓	7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_{1z}}{W_{1эф} R_y \gamma_c} + \frac{\sigma_z \cdot N_i}{W_{2эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,832 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{1T} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,656 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{1T} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,816 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{1T} W_{x,эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,928 < 1	✓	7.7.10.4
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Площадь эффективного сечения	$A_{эф}$	8,418	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления эффективного сечения	$W_{эф}$	44,127	см <sup>3</sup>	
Длина элемента	L	2,035	м	
Расчётная длина в плоскости фермы	$l_{эфx}$	2,035	м	
Гибкость	$\lambda_x$	27,018		
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_x$	0,313		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы	a			7.7.8.1
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	0,969		7.7.8.1
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{эфy}$	2,035	м	
Гибкость	$\lambda_y$	69,971		
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_y$	0,811		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы	b			7.7.8.1
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	0,732		7.7.8.1
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{сТ}$	2,035	м	
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{сТ}$	658,865	кН	7.7.8.4
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{сТФ}$	658,865	кН	7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_Т$	0,653		(7.89)
Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	b			7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\varphi_{Т/ТФ}$	0,818		7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\varphi$	0,732		
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1		Приложение Г
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1		Приложение Г
Коэффициент	$C_1$	1,329		Приложение Г
Коэффициент	$C_3$	1,000		Приложение Г
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{ср}$	5683,505	кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{ЛТ}$	0,509		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)	b			7.7.9.2

Рисунок 5.11 – Окно информации о конструктивном элементе

Окно содержит несколько вкладок. На первой вкладке (Рисунок 5.12) приводится информация о конструктивном элементе, введённая пользователем.

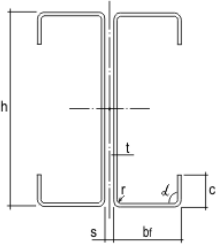
№3 (2->3) [3] Стойка; CO3:1,00\*LC1+1,00\*LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте

Общие данные | Характеристики полного сечения | Характеристики эффективного сечения (осевое скатие) | Характеристики эффективного сечения (изгиб) | Результаты расчёта

Номер элемента		3
Узел начала элемента		2
Узел конца элемента		3
Конструктивная группа		Стойка
Длина элемента	L	1,280 м
Коэффициент приведения длины в плоскости фермы	$\mu_x$	1
Коэффициент приведения длины из плоскости фермы	$\mu_y$	1
Расчётная длина элемента в плоскости фермы	$l_{efx}$	1,280 м
Расчётная длина элемента из плоскости фермы	$l_{efy}$	1,280 м
Элемент закреплён из плоскости фермы		Нет
Коэффициент приведения длины при кручении	$k_T$	1
Коэффициент условий работы при расчёте на устойчивость	$\gamma_c$	0,9
Коэффициент условий работы при расчёте на прочность	$\gamma_c$	1
Коэффициент податливости болтового соединения		1,1

**Сечение**

C200x80x2,0  
Beta Factory



h	200,00 мм
t	2,00 мм
b	80,00 мм
c	25,00 мм
r	3,00 мм
$t_{coat}$	0,0400 мм
S	8,00 мм

**Сталь**

Группа стандартов	GOST
Стандарт	ГОСТ Р 52246
Сталь	350
Нормативное сопротивление стали по пределу текучести	$R_{ym}$ 35,000 кН/см <sup>2</sup>
Нормативное сопротивление стали по пределу прочности	$R_{Ln}$ 42,000 кН/см <sup>2</sup>
Модуль упругости	E 20600,000 кН/см <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	$\nu$ 0,3

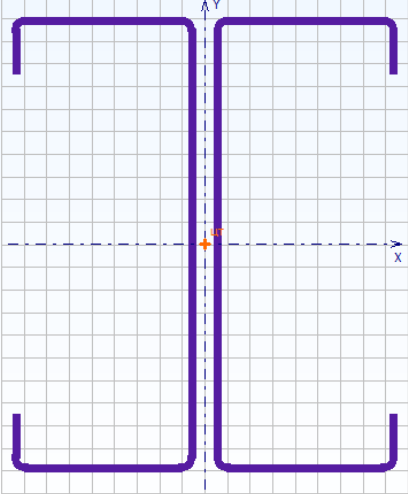


Рисунок 5.12 – Информация о конструктивном элементе

Далее следуют вкладки с вычисленными геометрическими характеристиками полного сечения, эффективного сечения и сечения с отверстиями (если такие имеются). Количество вкладок с характеристиками эффективного сечения зависит от характера работы элемента. Некоторые вкладки показаны на Рисунках 5.13 – 5.15.

## Результаты

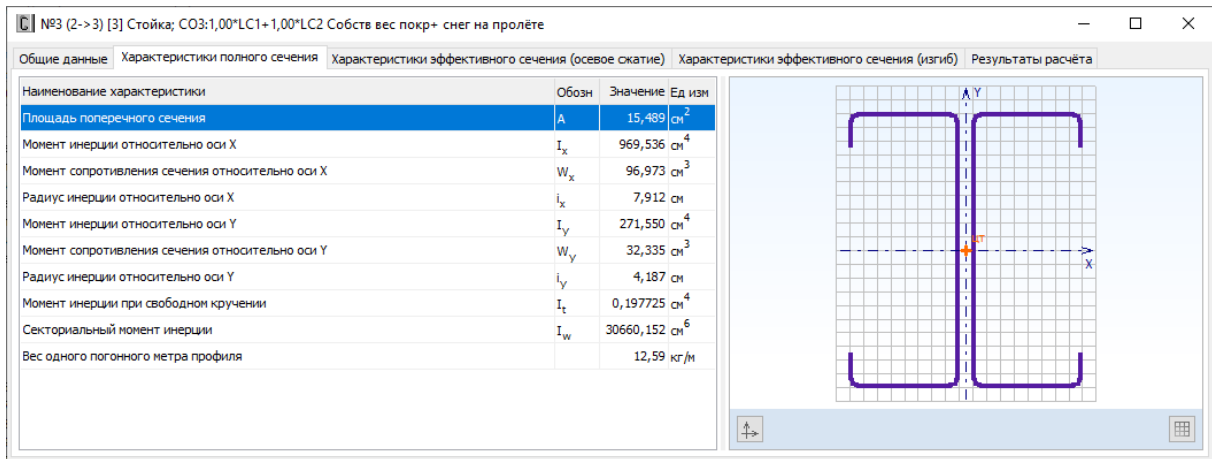


Рисунок 5.13 – Геометрические характеристики полного сечения

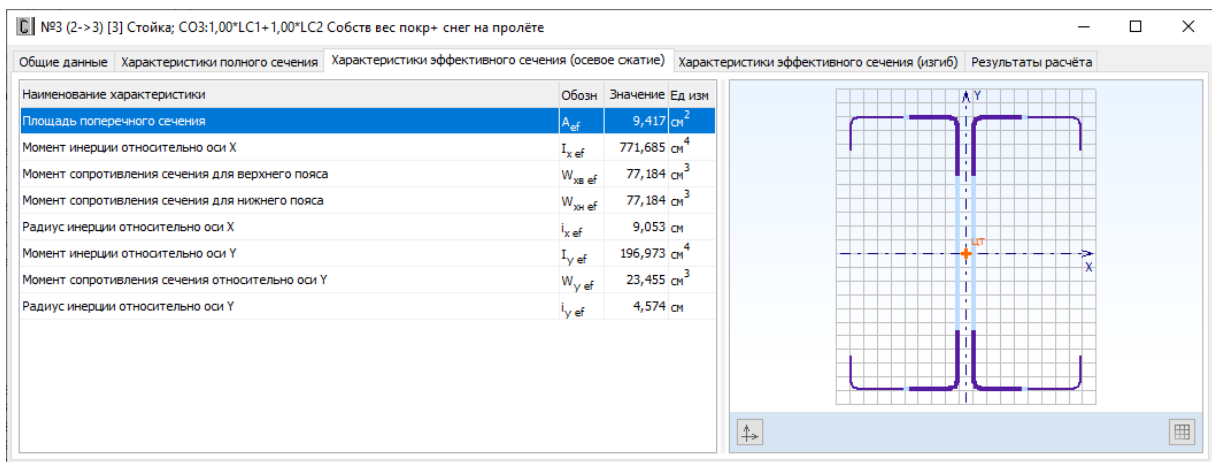


Рисунок 5.14 – Геометрические характеристики эффективного сечения при осевом сжатии

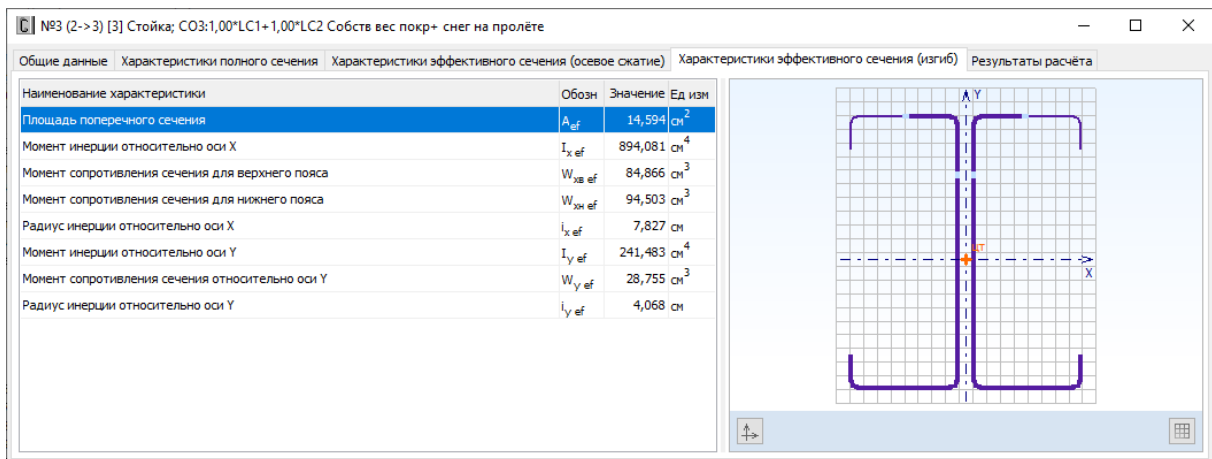



Рисунок 5.15 – Геометрические характеристики эффективного сечения при изгибе

Последняя вкладка *Результаты расчёта* (Рисунок 5.11) содержит подробную информацию о произведённых расчётах для данного конструктивного элемента для текущего сочетания нагрузок.



Окно вкладки *Результаты расчёта* функционально разделено на две части. В верхней части указывается перечень произведённых проверок. Данный список зависит от характера работы элемента, конкретных значений исходных данных, введённых пользователем, а также настроек расчёта (Глава 4). Для каждой проверки выводятся её наименование, символьное представление расчётного неравенства, по которому она производится, численное представление результата, значок, обозначающий удовлетворяется проверка или нет, а также пункт или формула соответствующих норм расчёта, по которым произведена проверка.

В нижней части окна приводится подробная информация по значениям величин, входящих в текущую выделенную пользователем проверку. Для каждой величины приводятся: её наименование, обозначение, численное значение, единицы измерения и пункт или формула соответствующих норм расчёта, по которым эта величина определена.

Для каждого отдельного конструктивного элемента в отдельном окне (Рисунок 5.16) могут быть показаны эпюры внутренних усилий. Для этого необходимо отметить конструктивный элемент и выбрать в режиме *Проверки*  *Результаты статического расчёта для элемента*.

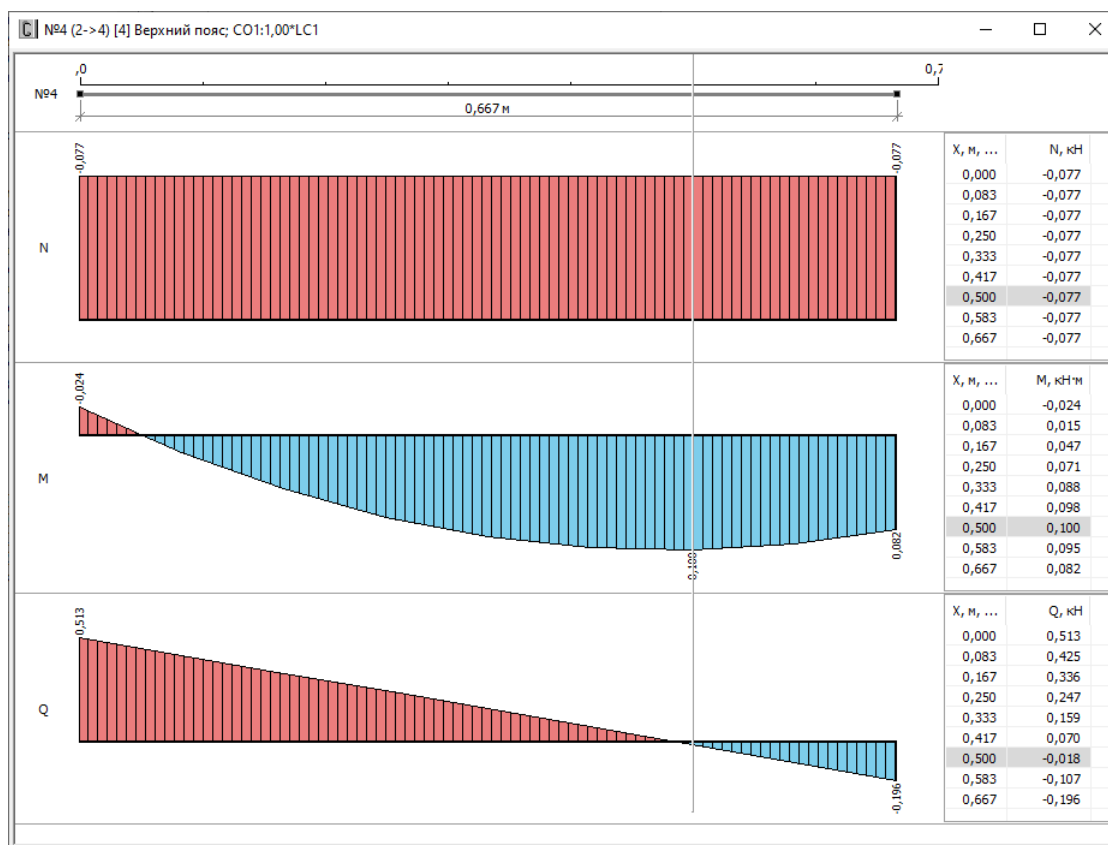


Рисунок 5.16 - Окно внутренних усилий для отдельного конструктивного элемента

## 5.2. Документирование

Пользователь может передать информацию о выполненном расчёте в Microsoft Excel<sup>®</sup> либо конвертировать результаты в формат HTML с последующим показом их в текущем браузере. В обоих вариантах возможна дальнейшая распечатка результатов средствами соответствующих программ. Для документирования в пункте главного меню *Файл* следует выбрать *Отчёт...* После чего появляется диалоговое окно, представленное на Рисунке 5.17.



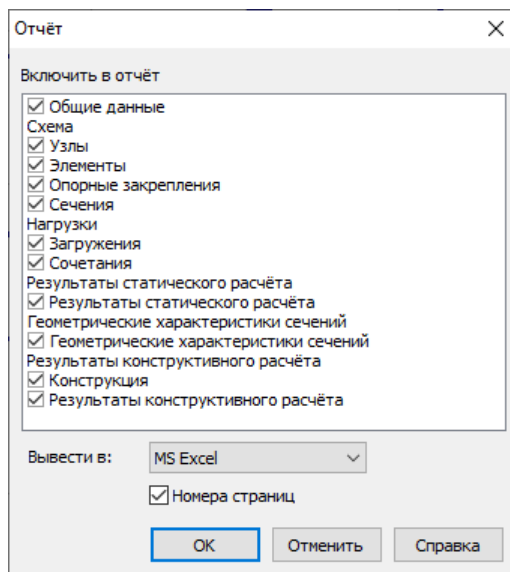


Рисунок 5.17 - Диалоговое окно результатов расчёта

Пользователь набирает содержание экспорта путём постановки или снятия галочек напротив соответствующего пункта из предлагаемого списка. Также необходимо определить проставлять номера страниц внутри отчёта или нет. В случае постановки нумерация страниц начинается с 1.

При выводе в Microsoft Excel® для дальнейшей распечатки может потребоваться небольшая предварительная корректировка форматирования.

## 6. НАСТРОЙКИ

### 6.1. Конструкция

Настройки, связанные с конструкцией фермы, доступны в пункте главного меню *Настройки* → *Конструкция* (Рисунке 6.1).

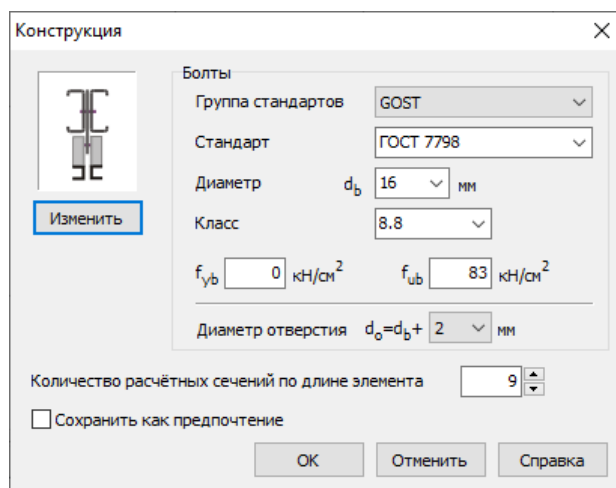


Рисунок 6.1 – Диалоговое окно настроек *Конструкция*

Помимо определения *Системы фермы*, и *Количества расчётных сечений по длине элемента*, в которых будут показываться внутренние усилия в элементах, в данном окне вводится информация о болтах, применяемых в проектируемой ферме. Вводятся данные о *Группе стандартов* (например, ГОСТ, DIN, ASTM, ...), *Наименовании стандарта*, *Диаметр болта*, *Класс прочности болта*, а также в зависимости от стандарта *Предел текучести* стали и *Предел прочности* стали болта. Кроме того, определяется *Диаметр отверстий* в зависимости от диаметра болта.

Программа позволяет выбирать выше приведённые данные из заранее созданной базы болтов. Пользователь может создать неограниченное количество собственных баз болтов. Для этого необходимо самостоятельно создать текстовый UTF-8 файл (файлы) с данными о болтах по оговоренным правилам и поместить его (их) в специальную папку. Пользователь должен иметь права Администратора.

Подразумевается, что каждый файл содержит одну базу болтов. Структура файла должна отвечать следующим требованиям:

В первой строке указывается группа стандартов.

Во второй строке приводится наименование стандарта.

В третьей строке указываются диаметры болтов.

В четвёртой и последующих строках (количество неограничено) указываются через пробел:

класс прочности болта (в кавычках) предел текучести предел прочности

На Рисунке 6.2 приведён пример файла базы болтов по ГОСТ 7798.

GOST  
 ГОСТ 7798  
 10 12 16 20 24  
 "5.6" Ø 50  
 "5.8" Ø 50  
 "8.8" Ø 83  
 "10.9" Ø 104  
 "12.9" Ø 122

Рисунок 6.2 – Пример файла базы болтов

Файл должен быть сохранён в папке, путь к которой можно найти в пункте главного меню главной программы CFSteel: *Настройки* → *Программа*. Расширение файла \*.blt. На имя файла не накладывается никаких дополнительных ограничений кроме правил, принятых в используемой операционной системе.

## 6.2. Нагрузки

При выборе *Настройки* → *Нагрузки* появляется окно, показанное на Рисунке 6.3.

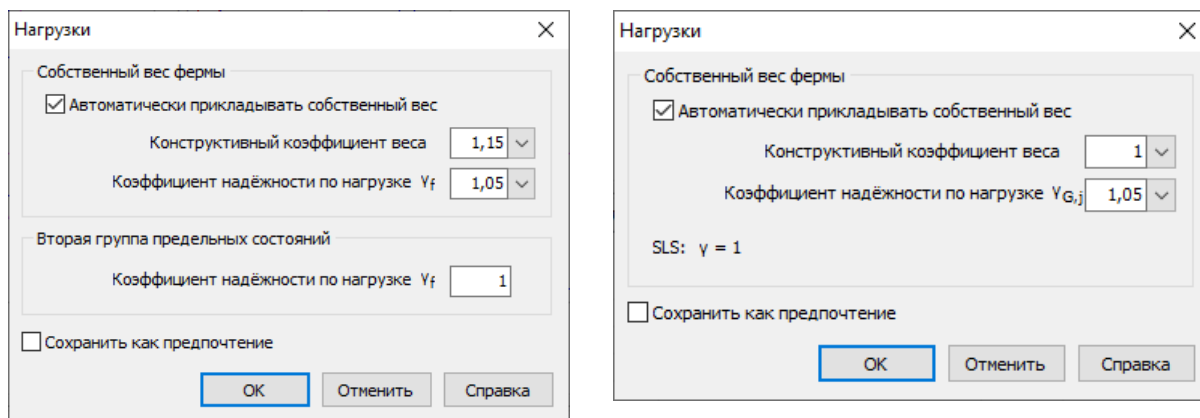


Рисунок 6.3 - Диалоговое окно настроек *Нагрузки*

На первой панели пользователь определяет, каким образом включать в расчёт собственный вес фермы. Постановка галочки в поле *Автоматически прикладывать собственный вес* означает автоматическое формирование в программе загрузки, представляющего собой собственный вес проектируемой фермы. Нормативное значение веса фермы вычисляется поэлементно как произведение геометрической длины элемента на вес погонного метра в зависимости от назначенного сечения и на *Конструктивный коэффициент веса*. Значение конструктивного коэффициента веса для фермы, вводится пользователем. Данный коэффициент учитывает вес деталей конструктивного оформления фермы, не вошедших в вес элементов, а также учитывает вес метизов [32]. Расчётное значение веса фермы вычисляется путем умножения нормативного значения на *Коэффициент надёжности по нагрузке* для веса фермы, вводимый пользователем. Собственный вес фермы учитывается как направленная вертикально вниз равномерно распределённая по длине каждого элемента нагрузка.

На второй панели окна (Рисунок 6.3) пользователем вводится коэффициент надёжности по нагрузке для расчёта по прогибам фермы (вторая группа предельных состояний).

### 6.3. Параметры конструктивного расчёта

Общие параметры конструктивного расчёта элементов фермы доступны после выбора в главном меню *Настройки* → *Конструктивный расчёт*. Вид окна показан на Рисунке 6.4.

Рисунок 6.4 – Диалоговое окно ввода параметров конструктивного расчёта

В данном окне, если расчёт выполняется по нормам СП, пользователь задаёт *Коэффициент надёжности по ответственности здания или сооружения  $\gamma_n$* , *Коэффициент условий работы для сечения с отверстиями*.

Пользователь должен выбрать каким способом определять коэффициенты  $C$  при вычислении упругого критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба. Доступны три варианта:

- Вводить их значения для каждого конструктивного элемента вручную (см. п.4.3). Далее введённые значения будут участвовать при вычислении  $M_{cr}$ .
- Вычислять автоматически; в этом случае программа вычисляет значения коэффициентов  $C$  по СП 260 [1] и [28] (см. п.4.3).
- Вычислять по методике, предложенной Lopez A., Yong D.J., Serna M.A. [30].

Также вводится *Коэффициент податливости болтового соединения  $k_b$* . Этот коэффициент учитывается при вычислении условной гибкости элемента из плоскости фермы:

$$\bar{\lambda}_y = k_b \frac{l_{ef,y}}{\pi \cdot i_y} \sqrt{\frac{R_y A_{ef}}{E A_g}}$$

Значение  $k_b > 1$  увеличивает гибкость из-за некоторой возможной податливости нефрикционных болтовых соединений на обычных болтах, с помощью которых соединяются два профиля в элементе.  $k_b = 1$  означает отсутствие учёта податливости в расчёте (абсолютно жёсткое объединение профилей в элементе). Пользователь сам определяет степень податливости болтового соединения.

Кроме того, для систем ферм 1 и 2 вводится значение *Коэффициента неравномерности включения в работу отдельной ветви*  $k_1$ .  $k_1$  учитывает возможное неравномерное распределение осевых усилий между ветвями при расчётах отдельной ветви (см. пп. 4.3.2, 4.3.3).

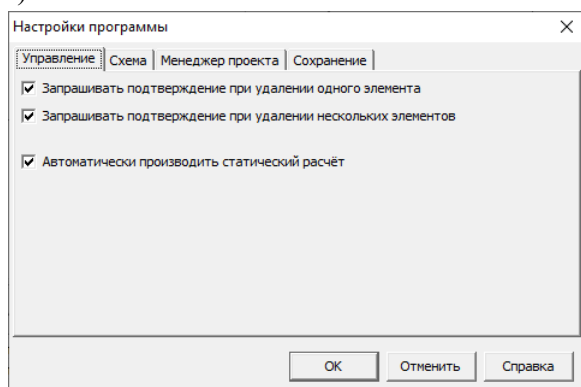
Для ферм системы 1 возможен вариант, допускающий разное количество болтов по концам элементов решётки (раскосы и стойки) в зависимости от сочетания  $N$ ,  $M$  и  $Q$  в начале и конце элемента. Это справедливо только в случае автоматического (программного) подбора количества болтов (Рисунок 2.29). Если пользователь назначает количество рядов болтов вдоль и поперёк элемента, то подразумевается их одинаковое количество по обоим концам.

Для расчёта по прогибам следует ввести *Коэффициент влияния податливости болтовых соединений* на величину прогиба фермы. На данный коэффициент будет домножено максимальное упругое перемещение узла нижнего пояса в противоположном направлении оси  $Z$ , полученное по МКЭ. Пользователь самостоятельно определяет значение данного коэффициента. Некоторые данные содержатся в [31].

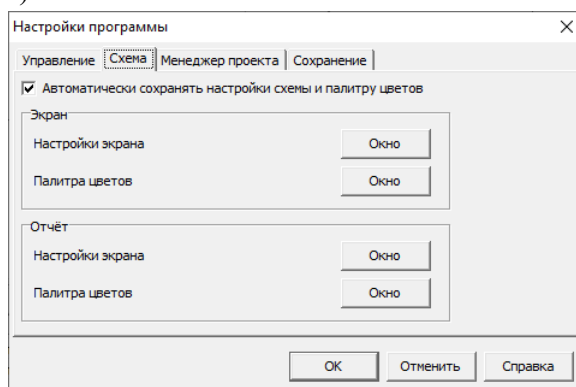
## 6.4. Настройки программы

Настройки программы определяют общее функционирование приложения. Диалоговое окно доступно из главного меню *Настройки* → *Настройки программы*. В окне (Рисунок 6.5) имеется четыре вкладки *Управление*, *Схема*, *Менеджер проекта* и *Сохранение*.

а)



б)



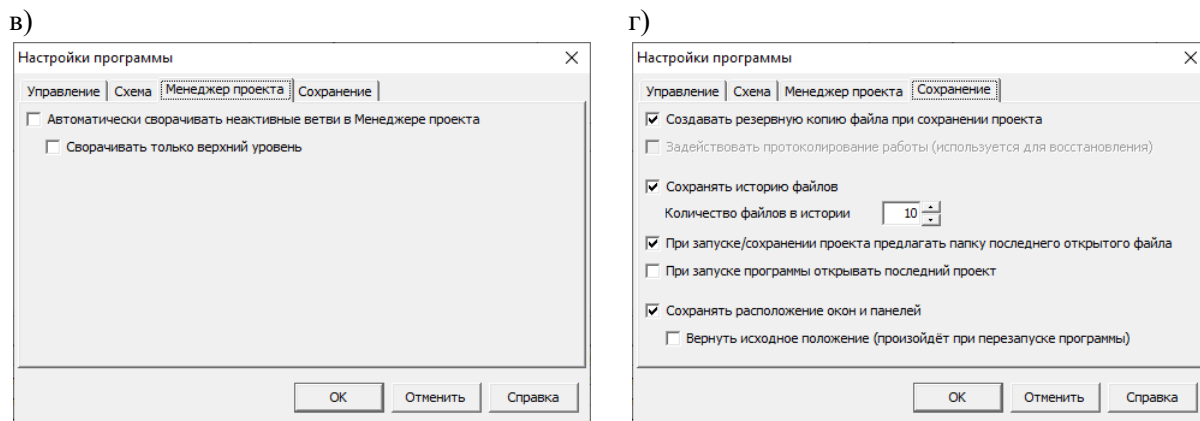



Рисунок 6.5 – Диалоговое окно *Настройки программы*

На вкладке *Управление* требует пояснения пункт *Автоматически производить статический расчёт*. При его выборе (рекомендуется) в случае изменения каких-либо параметров фермы при возврате в режим *Статический расчёт* будет автоматически происходить перерасчёт фермы с актуальными параметрами. Если данный пункт не отметить, то после корректировки фермы необходимо принудительно выполнить расчёт через пункт главного меню *Расчёт*.

## 6.5. Настройки графики и цвета

### 6.5.1. Настройки графики

Настройки графики позволяют пользователю настроить графическую среду приложения по своему усмотрению. Они доступны по иконке  на панели инструментов. После её выбора открывается окно с возможными настройками, показанное на Рисунке 6.6.

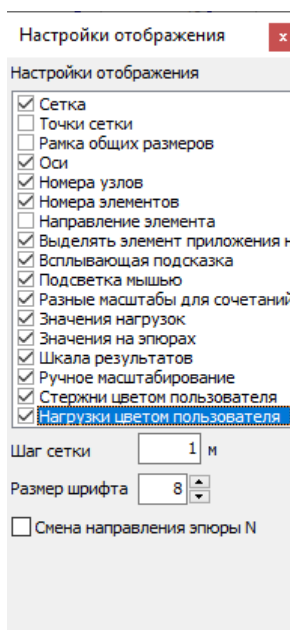



Рисунок 6.6 – Окно настроек графического отображения

### 6.5.2. Настройки цвета

Настройки цветового оформления приложения можно выполнить в окне *Палитра цветов* (Рисунок 6.7), доступном по  на панели инструментов.

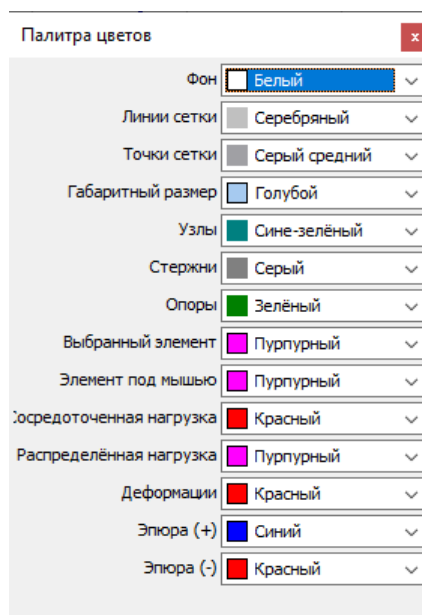


Рисунок 6.7 – Настройки цветового оформления приложения

## 7. ВЕРИФИКАЦИОННЫЕ РАСЧЁТЫ

### 7.1. Ферма из спаренных профилей. Расчёт по нормам СП

Схема фермы показана на рисунке 7.1.1. Верхний пояс фермы выполнен из спаренных Сигма-образных профилей 200х60х1,5. Нижний пояс выполнен из спаренных С-образных профилей 150х55х2,0. Из этих же профилей выполнены элементы решётки за исключением опорных раскосов и приопорных стоек, сечения которых представляют спаренные С-профили 200х80х2,0 (элементы 1,3,25 и 26 на расчётной схеме фермы - Рисунок 7.1.2). Сталь 350 по ГОСТ 14918-2020 с  $R_{yn} = 350 \text{ Н/мм}^2$ ,  $R_{tm} = 420 \text{ Н/мм}^2$  и  $\gamma_m = 1,05$ . В узлах элементы соединяются с помощью фасонки толщиной 8 мм из стали с  $R_{yn} = 245 \text{ Н/мм}^2$ ,  $R_{tm} = 380 \text{ Н/мм}^2$  и  $\gamma_m = 1,025$ . Расчёты выполнить по нормам СП 260.1325800.2016 [1].

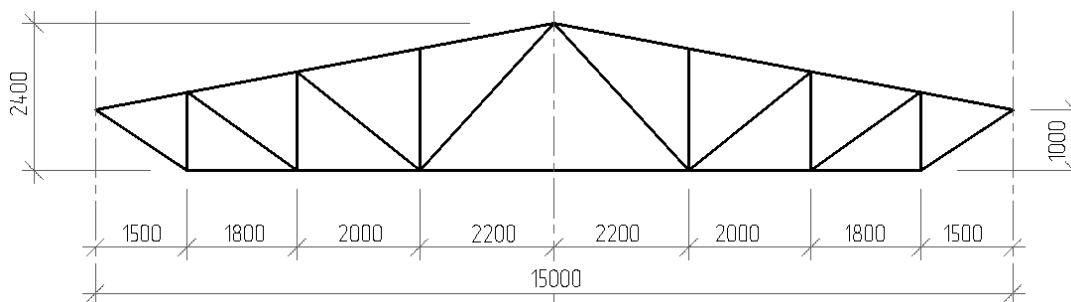


Рисунок 7.1.1 – Схема фермы с размерами

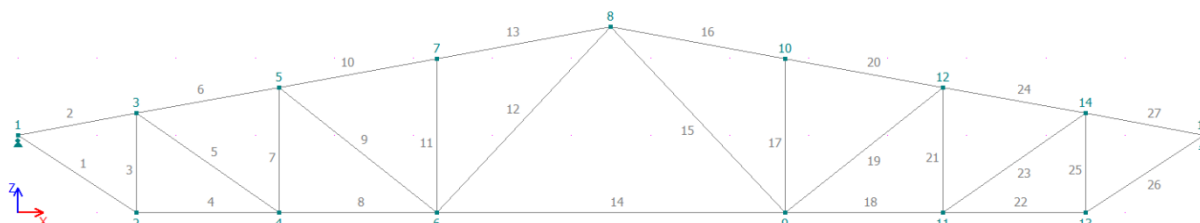


Рисунок 7.1.2 – Расчётная схема фермы

Нагрузка на ферму прикладывается через прогоны, опирающиеся в узлы верхнего пояса. В коньковом узле укладываются два прогона. Полагаем, что система покрытия устроена таким образом, что прогоны в местах опирания раскрепляют верхний пояс из плоскости фермы. В элементах, примыкающих к коньку, расчётная длина из плоскости фермы составляет  $0,9l$ .

Коэффициент условий работы при расчётах на прочность  $\gamma_c = 1$ , при расчётах на устойчивость  $\gamma_c = 0,9$ . Проверка прогибов производится по эстетико-психологическому критерию. Предельный нормируемый прогиб  $f_u = 1/225 \cdot L$  [3].

Загружение 1 (LC1) представляет собой вес покрытия. Схема приложения с нормативными значениями нагрузок в кН показана на Рисунке 7.1.3. Коэффициент надёжности по нагрузке, который получен делением суммарного расчётного значения веса покрытия на его нормативное значение в таблице сбора нагрузок, равен 1,2165. Для расчёта по прогибам определено отдельное загружение (LC 3) со значением коэффициента надёжности по нагрузке 1,0.



Собственный вес фермы представляется в отдельном нагружении и автоматически учитывается в каждом сочетании с параметрами: конструктивный коэффициент веса  $1,15$ ; коэффициент надёжности по нагрузке  $1,05$ ; коэффициент сочетаний  $1,0$ .

Загрузка 2 (LC2) представляет собой вес снегового покрова. На Рисунке 7.1.4 приведена схема с нормативными значениями нагрузок. Коэффициент надёжности по нагрузке составляет  $1,4$ . Для расчёта по прогибам сформировано отдельное нагружение (LC4) с пониженным значением веса снега, представляемого как длительная временная нагрузка, и коэффициентом надёжности по нагрузке  $1,0$ .

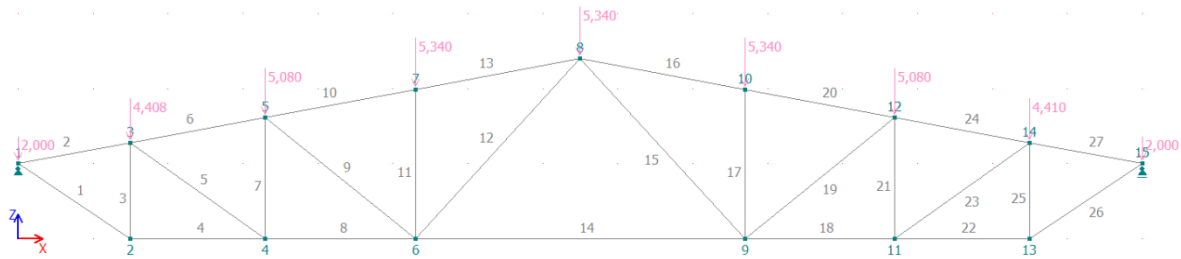


Рисунок 7.1.3 – Загрузка 1: Вес покрытия

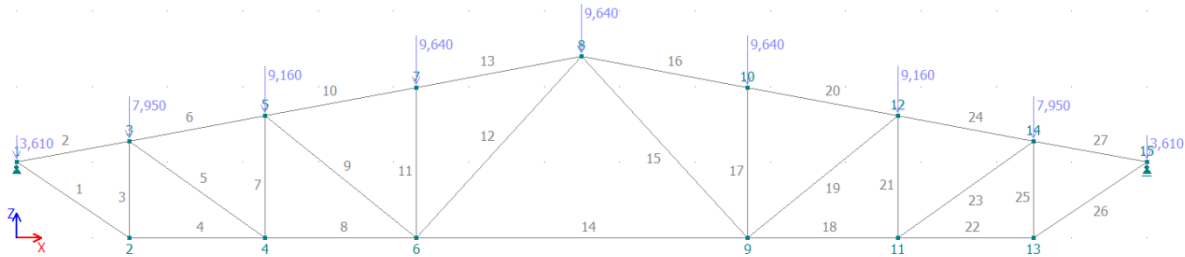


Рисунок 7.1.4 – Загрузка 2: Вес снега

В данном отчёте приведены результаты для сочетаний:

Сочетание 3 (CO3):  $1*LC1 + 1*LC2$  (расчёт по первой группе предельных состояний);

Сочетание 4 (CO4):  $1*LC3 + 1*LC4$  (расчёт по прогибам – вторая группа предельных состояний).

Эпюры усилий  $N$ ,  $M$  и  $Q$  для CO3 приведены на Рисунке 7.1.5. Значения усилий в табличной форме представлены на Рисунке 7.1/6.

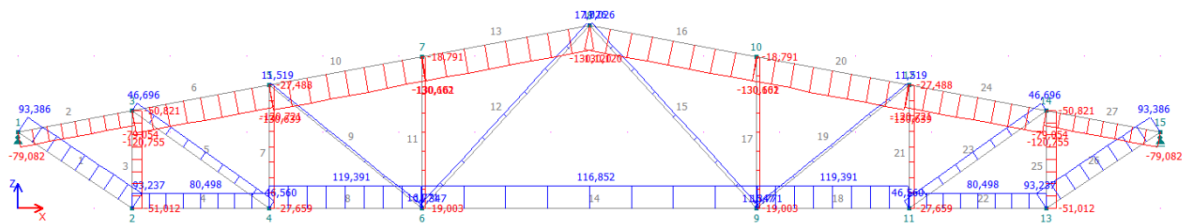


Рисунок 7.1,5,а – Сочетание 3: Эпюра N

## Верификационные расчёты

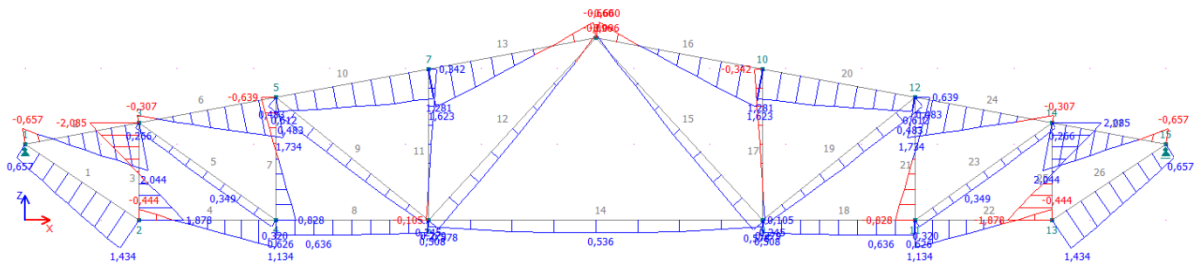


Рисунок 7.1.5,б – Сочетание 3: Эпюра  $M$

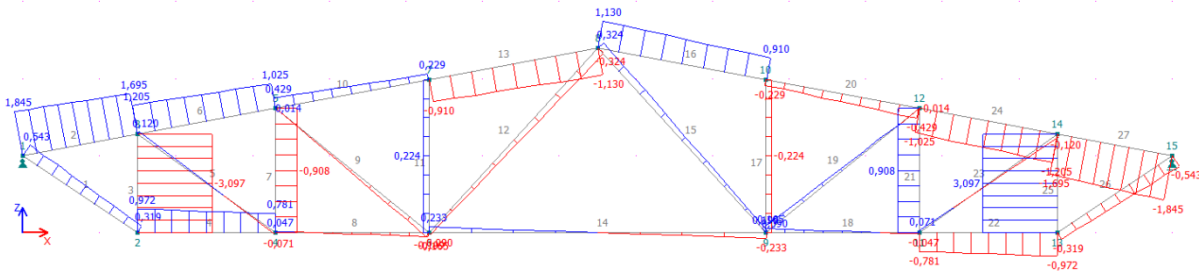


Рисунок 7.1.5,в – Сочетание 3: Эпюра  $Q$

Результаты (детально)					Результаты				
Элемент	X, м	N, кН	M, кН·м	Q, кН	Элемент		N, кН	M, кН·м	Q, кН
1	0,000	93,386	0,657	0,543	1	начало	93,386	0,657	0,543
	0,225	93,368	0,776	0,515		конец	93,237	1,434	0,319
	0,451	93,349	0,889	0,487		min	93,237	0,657	0,319
	0,676	93,331	0,995	0,459		max	93,386	1,434	0,543
	0,901	93,312	1,096	0,431	2	начало	-79,082	-0,657	1,845
	1,127	93,293	1,190	0,403		конец	-79,054	2,044	1,695
	1,352	93,275	1,278	0,375		min	-79,082	-0,657	1,695
	1,577	93,256	1,359	0,347		max	-79,054	2,044	1,845
	1,803	93,237	1,434	0,319		3	начало	-51,012	1,878
2	0,000	-79,082	-0,657	1,845	конец	-50,821	-2,085	-3,097	
	0,191	-79,079	-0,307	1,826	min	-51,012	-2,085	-3,097	
	0,381	-79,075	0,040	1,808	max	-50,821	1,878	-3,097	
	0,572	-79,072	0,383	1,789	4	начало	80,498	-0,444	0,972
	0,763	-79,068	0,722	1,770		конец	80,498	1,134	0,781
	0,954	-79,065	1,058	1,751		min	80,498	-0,444	0,781
	1,144	-79,061	1,391	1,733		max	80,498	1,134	0,972
	1,335	-79,058	1,719	1,714		5	начало	46,696	0,266
	1,526	-79,054	2,044	1,695	конец		46,560	0,320	-0,071
3	0,000	-51,012	1,878	-3,097	min		46,560	0,266	-0,071
	0,160	-50,988	1,383	-3,097	max		46,696	0,349	0,120
	0,320	-50,964	0,887	-3,097	6	начало	-120,755	-0,307	1,205
	0,480	-50,941	0,392	-3,097		конец	-120,721	1,734	1,025
	0,640	-50,917	-0,104	-3,097		min	-120,755	-0,307	1,025
	0,800	-50,893	-0,599	-3,097		max	-120,721	1,734	1,205
	0,960	-50,869	-1,095	-3,097	7	начало	-27,659	0,828	-0,908
	1,120	-50,845	-1,590	-3,097		конец	-27,488	-0,639	-0,908
1,280	-50,821	-2,085	-3,097	min		-27,659	-0,639	-0,908	
1,440	-50,797	-2,580	-3,097	max		-27,488	0,828	-0,908	
4	0,000	80,498	-0,444	0,972	8	начало	119,391	0,626	0,047
	0,225	80,498	-0,228	0,948					

Рисунок 7.1.6 – Сочетание 3: Таблица значений усилий

Конструктивная схема фермы представлена на Рисунке 7.1.7 (отличается от расчётной нумерацией элементов в левой части фермы).

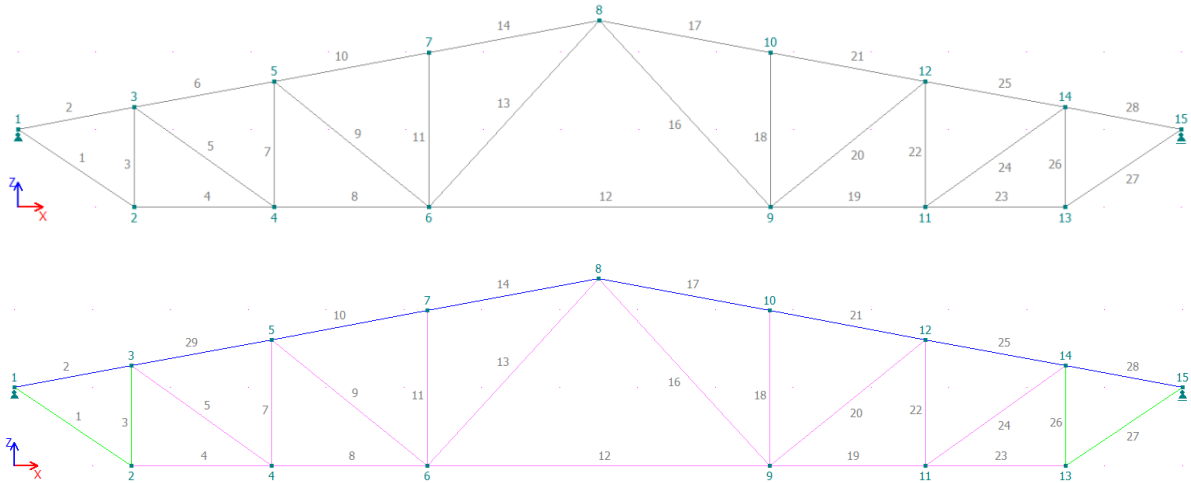


Рисунок 7.1.7 – Конструктивная схема фермы

Конструктивный расчёт

Коэффициент надёжности по ответственности

Коэффициент условий работы для сечений с отверстиями

Потеря устойчивости плоской формы изгиба

Определение C1

Вводить индивидуально для каждого конструктивного элемента


Вычислять автоматически по Приложению Ж СП 260

Вычислять по методике Lopez A., Yong D.J., Serna M.A.

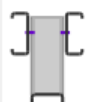
При расчётах на устойчивость принимать максимальный момент на длине:

Полная длина элемента  2/3 длины

3/4 длины  1/2 длины

 Коэффициент податливости болтового соединения  $k_b$

Разные прикрепления концов элемента решётки к поясам  
(Только для автоматического расчёта)

 Коэффициент податливости болтового соединения  $k_b$

Коэффициент неравномерности включения в работу отдельной ветви  $k_1$

Прогибы

Коэффициент влияния податливости болтовых соединений

Выполнять проверку по предельной гибкости

Сохранить как предпочтение

Рисунок 7.1.8 – Настройки расчёта

Конструктивный расчёт элемента 10 (верхний пояс)

Поперечное сечение элемента приведено на Рисунке 7.1.9. Размеры:  $h = 200$  мм,  $t = 1,5$  мм,  $b_f = 60$  мм,  $h_1 = 68$  мм,  $h_2 = 40$  мм,  $d = 16$  мм,  $c = 15$  мм,  $r = 3$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $S = 8$  мм (толщина фасонки).

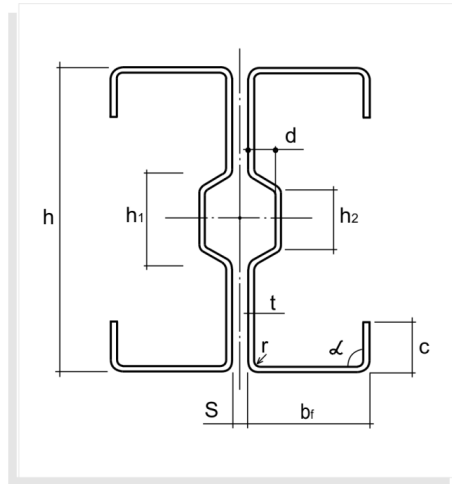


Рисунок 7.1.9 – Поперечное сечение конструктивного элемента 10

Сталь 350 по ГОСТ 14918-2020 с  $R_{yn} = 35$  кН/см<sup>2</sup> и  $R_{um} = 42$  кН/см<sup>2</sup>;  $\gamma_m = 1,05$  (п. 6.3 [1]);  $R_y = 33,33$  кН/см<sup>2</sup>;  $R_u = 40$  кН/см<sup>2</sup>.

Сталь фасонки:  $R_{yn} = 24,5$  кН/см<sup>2</sup>,  $R_{um} = 38$  кН/см<sup>2</sup>;  $\gamma_m = 1,025$ ;  $R_u = 37,07$  кН/см<sup>2</sup>.

Болты М16:  $d_b = 16$  мм, класс точности В, класс прочности 8.8,  $R_{ub} = 83$  кН/см<sup>2</sup>. Диаметр отверстия  $d_0 = 18$  мм.

Геометрические характеристики полного сечения:

$A_g = 10,261$  см<sup>2</sup>,  $I_x = 581,892$  см<sup>4</sup>,  $W_x = 58,201$  см<sup>3</sup>,  $i_x = 7,530$  см,  $I_y = 86,758$  см<sup>4</sup>,  $W_y = 13,560$  см<sup>3</sup>,  $i_y = 2,908$  см,  $I_t = 0,07272$  см<sup>4</sup>,  $I_w = 8623,530$  см<sup>6</sup>.

Геометрические характеристики эффективного сечения (осевое сжатие):

$A_{ef} = 8,418$  см<sup>2</sup>,  $I_{x,ef} = 441,181$  см<sup>4</sup>,  $W_{x,ef} = 44,127$  см<sup>3</sup>,  $i_{x,ef} = 7,240$  см,  $I_{y,ef} = 55,500$  см<sup>4</sup>,  $i_{y,ef} = 2,568$  см.

Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно горизонтальной оси):

$A_{ef} = 9,729$  см<sup>2</sup>,  $I_{x,ef} = 530,243$  см<sup>4</sup>,  $W_{x,ef} = 50,397$  см<sup>3</sup>,  $i_{x,ef} = 7,383$  см.

Верификация вычисления геометрических характеристик представлена в *CFSteel v.4.3. Документация. Том II. Верификационные расчёты* [27] и здесь не приводится.

*Проверка прочности элемента на совместное действие осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок*

Расчёт производится по формуле (п. 7.7.5 [1])

$$\frac{N}{A_{ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$$

Усилия  $N$ ,  $M$  и  $Q$  приведены на Рисунке 7.1.10.

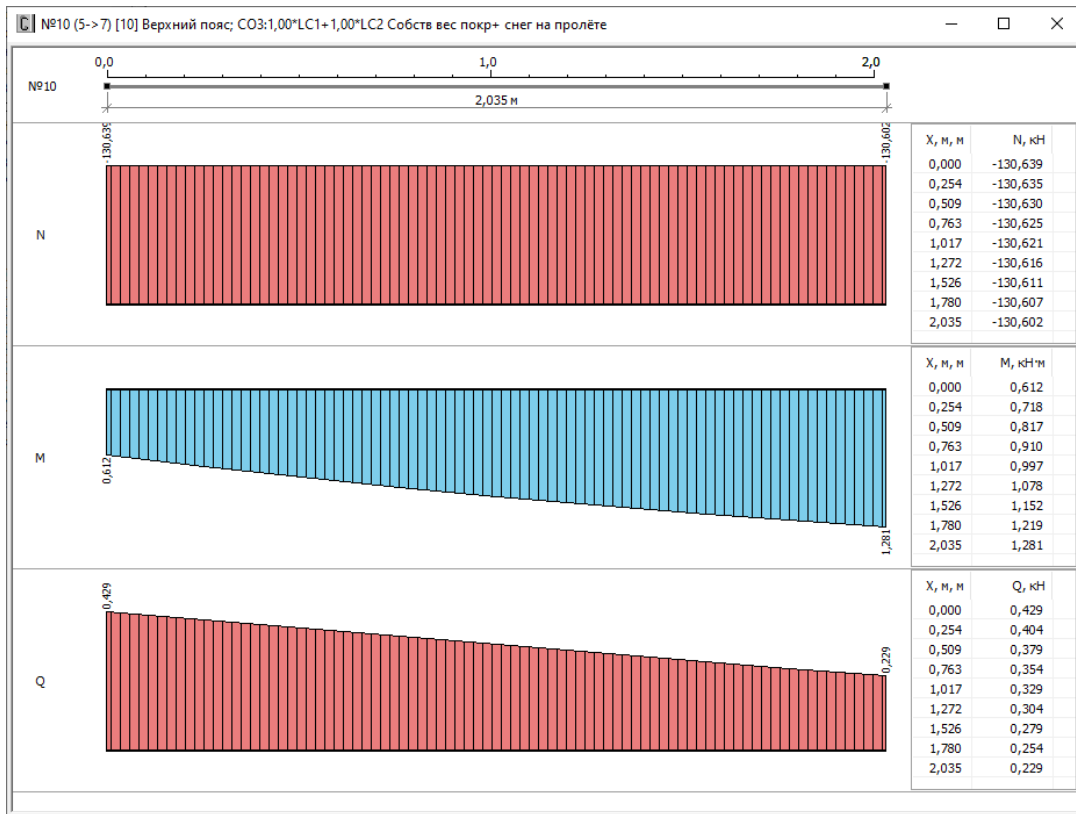


Рисунок 7.1.10 – Конструктивный элемент 10: Эпюры и значения усилий

Подробные численные расчёты содержатся в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям CFSteel, и здесь не приводятся. Результаты этих вычислений сведены в таблицу.

В программе реализован следующий подход к вычислению выражения

$$\frac{N}{A_{ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c}$$

Данное выражение вычисляется для каждого расчётного сечения конструктивного элемента при  $N_i$  и  $M_{xi}$ . Количество расчётных сечений задаёт пользователь в *Настройки* → *Конструкция*. В данном случае количество расчётных сечений задано равным 9. Усилия  $N_i$  и  $M_{xi}$  для элемента 10 представлены на Рисунке 7.1.10. Далее выбирается максимальное значение этого выражения, которое и является результатом. Для элемента 10 такие значения выражения приведены на Рисунке 7.1.11.

[0]	0,56844186451
[1]	0,57472517332
[2]	0,58063014199
[3]	0,58615677051
[4]	0,5913050589
[5]	0,59607500715
[6]	0,60046661525
[7]	0,60447988322
[8]	0,60811481104

Рисунок 7.1.11 – Значения выражения для расчёта прочности в конструктивном элементе 10

## Верификационные расчёты

В Таблице 7.1.1 приведено сравнение результатов ручного расчёта с результатами, полученными в CFSteel.

Таблица 7.1.1 – Сопоставление результатов расчётов прочности элемента при совместном действии  $N$ ,  $M$  и  $Q$  с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Коэффициент	$k_t$	-	7.7.6.2	10,698	10,749	0,5
Условная гибкость стенки	$\frac{\lambda_w}{R_s}$	-	7.7.6.2	1,435	1,431	0,3
Приведённое сопротивление сдвигу	$R_s$	кН/см <sup>2</sup>	7.7.6.1	10,9	10,9	0
Несущая способность сечения при действии поперечной силы	$Q_w$	кН	(7.79)	63,18	См. ниже	-
Левая часть проверки прочности	-	-	7.7.4, 7.7.5	0,608	0.608	0

Результаты расчёта прочности конструктивного элемента 10 в программе CFSteel представлены на Рисунке 7.1.12 – 7.1.16.

The screenshot displays the software interface for element 10. The window title is "№10 (5->7) [10] Верхний пояс; CO3:1,00\*LC1+1,00\*LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте". The interface is divided into several tabs: "Общие данные", "Характеристики полного сечения", "Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)", "Характеристики эффективного сечения (изгиб)", and "Результаты расчёта".

**Общие данные:**

- Длина элемента: L = 2,035 м
- Коэффициент приведения длины в плоскости фермы:  $\mu_x = 1$
- Коэффициент приведения длины из плоскости фермы:  $\mu_y = 1$
- Расчётная длина элемента в плоскости фермы:  $l_{efx} = 2,035$  м
- Расчётная длина элемента из плоскости фермы:  $l_{efy} = 2,035$  м
- Элемент закреплён из плоскости фермы: Нет
- Коэффициент приведения длины при кручении:  $k_T = 1$
- Коэффициент условий работы при расчёте на устойчивость:  $\gamma_c = 0,9$
- Коэффициент условий работы при расчёте на прочность:  $\gamma_c = 1$
- Коэффициент податливости болтового соединения: 1,1

**Сечение:**

- Sgm 200-60-1,5
- Delta Factory
- h = 200,0 мм
- t = 1,5 мм
- b = 60,0 мм
- h1 = 68,0 мм
- h2 = 40,0 мм
- d = 16,0 мм
- c = 15,0 мм
- r = 3,0 мм
- t<sub>coat</sub> = 0,04 мм
- S = 8,0 мм

**Сталь:**

- Группа стандартов: GOST
- Стандарт: ГОСТ 14918-2020
- Сталь: 350
- Нормативное сопротивление стали по пределу текучести:  $R_{yn} = 350$  Н/мм<sup>2</sup>
- Нормативное сопротивление стали по пределу прочности:  $R_{un} = 420$  Н/мм<sup>2</sup>
- Модуль упругости: E = 206000 Н/мм<sup>2</sup>
- Коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,3$
- Коэффициент надёжности по материалу:  $\gamma_m = 1,05$

On the right side, there is a diagram of the cross-section of the element, showing a double-channel profile with a central web and two flanges. The diagram includes a coordinate system with X and Y axes and a center of gravity (ЦТ) marked with an orange dot.

Рисунок 7.1.12 – Результаты расчёта *Общие данные*

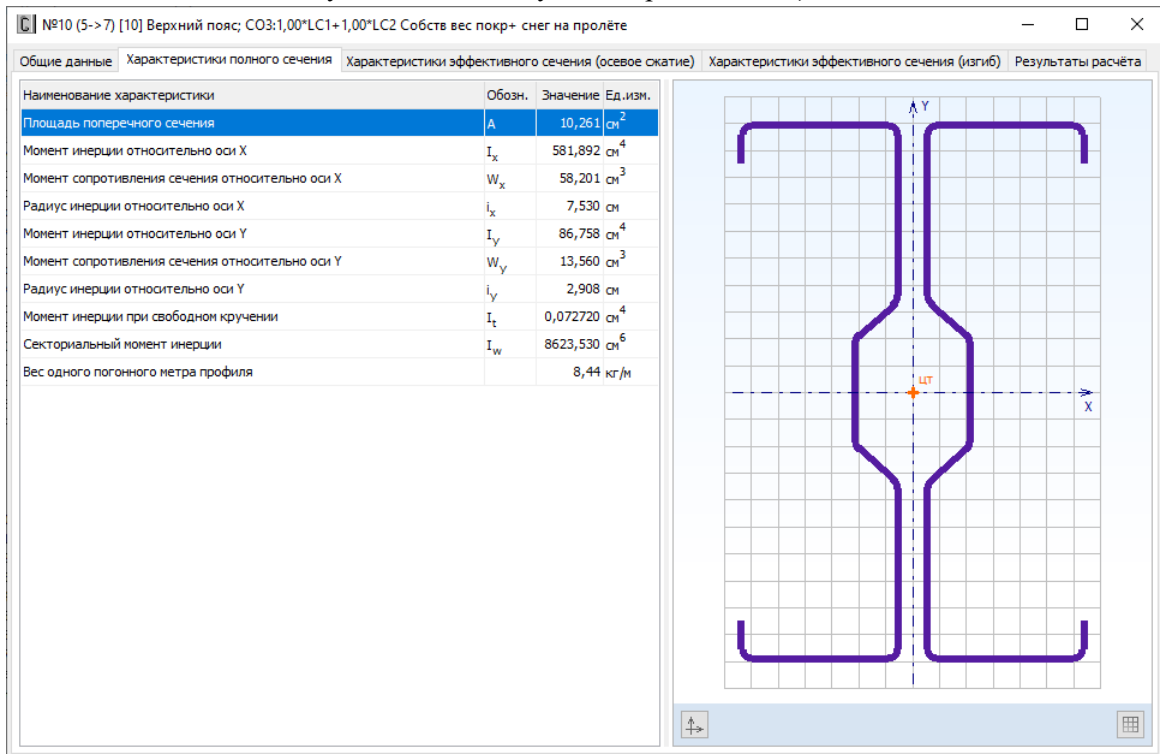


Рисунок 7.1.13 – Результаты расчёта *Геометрические характеристики полного сечения*

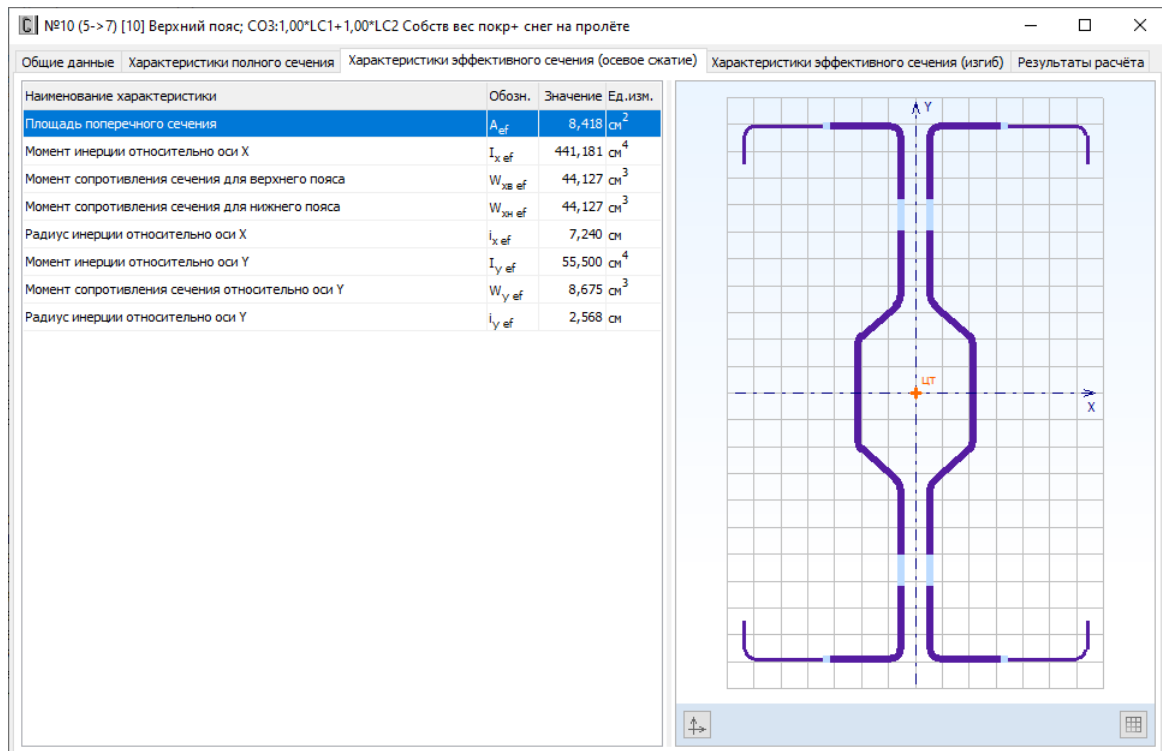


Рисунок 7.1.14 – Результаты расчёта *Геометрические характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)*

## Верификационные расчёты

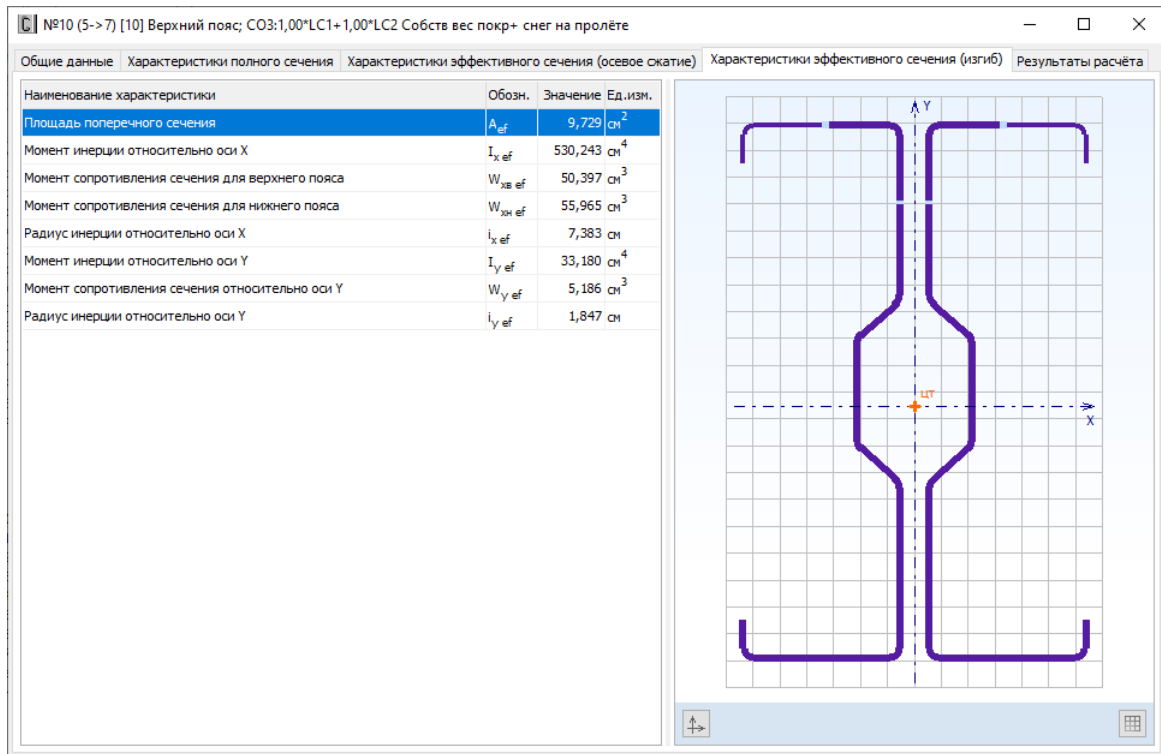


Рисунок 7.1.15 – Результаты расчёта *Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно оси x - x)*

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,619 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5	
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_w t R_z \gamma_c} \leq 1$	0,007 < 1	✓ 7.7.6	
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_1}{A_{1ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1x} R_y \gamma_c} + \frac{e_2 \cdot N_1}{W_{1x} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,832 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,656 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,816 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,928 < 1	✓ 7.7.10.4	
<b>Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное осевое усилие сжатия	N	130,602	кН	
Расчётный изгибающий момент	$M_x$	128,076	кН·см	
Эффективная площадь нетто	$A_{efn}$	7,367	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_x$	44,127	см <sup>3</sup>	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1		

Рисунок 7.1.16 – Результаты расчёта прочности на совместное действие  $N$ ,  $M$  и  $Q$

*Расчёт прочности элемента на действие поперечной силы*

Проверка прочности элемента на действие поперечной силы производится исходя из условия



$$\frac{Q_{max}}{Q_w} \leq 1.$$

Результаты расчёта в программе приведены на Рисунке 7.1.17.

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эфn} R_y \gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,619 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5	
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_w t R_z \gamma_c} \leq 1$	0,007 < 1	✓ 7.7.6	
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_{1эфn} R_y \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1xef} R_y \gamma_c} + \frac{e_1 \cdot N_i}{W_{2yef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,832 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,656 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,816 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi A_{эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,928 < 1	✓ 7.7.10.4	
<b>Расчёт на поперечную силу</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётная поперечная сила	$Q_{max}$	0,429	кН	
Расчётная высота стенки	$h_w$	198,5	мм	
Расчётная толщина стенки	$t$	1,5	мм	
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	1,431		
Расчётное сопротивление стали	$R_s$	109	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1		

Рисунок 7.1.17 – Результаты расчёта прочности на действие поперечной силы

*Расчёт на прочность отдельной ветви на сжатие с изгибом*

Расчёт производится по неравенству

$$\frac{N_1}{A_{1эфn} R_y \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1xef} R_y \gamma_c} + \frac{|e_1| \cdot N_1}{W_{1yefmin} R_y \gamma_c} \leq 1$$

В программе реализован следующий подход к вычислению выражения слева.

Данное выражение вычисляется для каждого расчётного сечения конструктивного элемента при  $N_{1i}$  и  $M_{1xi}$ . Количество расчётных сечений задаёт пользователь в *Настройки* → *Конструкция*. В данном случае количество расчётных сечений задано равным 9. Усилие  $N_{1i} = k_1 N_i / 2$ ;  $M_{1xi} = k_1 M_i / 2$ .  $N_i$  и  $M_{xi}$  приведены на Рисунке 7.1.10. Далее выбирается максимальное значение этого выражения. Результаты вычисления данного выражения в программе для каждого расчётного сечения приведены на Рисунке 7.1.18.

[0]	0,77617551474
[1]	0,78308176632
[2]	0,78957184375
[3]	0,79564574702
[4]	0,80130347613
[5]	0,80654503109
[6]	0,8113704119
[7]	0,81577961855
[8]	0,81977265104

Рисунок 7.1.18 – Значения выражения для расчёта прочности отдельной ветви в конструктивном элементе 10

Коэффициент  $k_I$  учитывает возможное неравномерное распределение усилий между ветвями и назначается пользователем в *Настройки* → *Конструктивный расчёт*. В данном случае принято  $k_I = 1,1$ .

Для наиболее опасного сечения

$$N_I = k_I N / 2 = 1,1 \cdot 130,6 / 2 = 71,832 \text{ кН}$$

$$M_{Ix} = k_I M_x / 2 = 1,1 \cdot 128,1 / 2 = 70,455 \text{ кНсм}$$

$$A_{Ief,n} = A_{ef,n} / 2 = 7,367 \text{ см}^2 / 2 = 3,684 \text{ см}^2 \text{ - эффективная площадь сечения нетто отдельной ветви}$$

$$W_{Ix,ef} = 44,127 / 2 = 22,064 \text{ см}^2$$

$$e_I = -0,269 \text{ см}$$

Эксцентриситет при осевом сжатии одинарного сечения ветви отрицателен. Следовательно, при перемещении центра тяжести в эффективном сечении будет возникать изгибающий момент, действующий относительно собственной вертикальной оси и догружающий отгибы профиля. В результате программного вычисления геометрических характеристик одинарного эффективного сечения ветви при изгибе относительно вертикальной оси (отгибы сжаты) получены результаты:

$$W_{Iy,ef,лев} = 10,562 \text{ см}^3 \text{ (для стенки),}$$

$$W_{Iy,ef,прав} = 3,839 \text{ см}^3 \text{ (для отгибов).}$$

В расчёт принимается абсолютное значение эксцентриситета и минимальный момент сопротивления эффективного сечения ветви  $W_{Iy,ef,min} = \min(W_{Iy,ef,лев}, W_{Iy,ef,прав}) = 3,839 \text{ см}^3$ .

$$\frac{N_I}{A_{Ief,n} R_{y,QYc}} + \frac{M_{Ix}}{W_{Ix,ef} R_{y,QYc}} + \frac{|e_I| \cdot N_I}{W_{Iy,ef,min} R_{y,QYc}} = \frac{71,832}{3,683 \cdot 33,33 \cdot 1} + \frac{70,455}{22,064 \cdot 33,33 \cdot 1} + \frac{0,269 \cdot 71,832}{3,839 \cdot 33,33 \cdot 1} = 0,832 < 1.$$

Результаты расчёта в программе приведены на Рисунке 7.1.19.

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{efn} R_{y,QYc}} + \frac{M_x}{W_{Ix,ef} R_{y,QYc}} \leq 1$	0,619 < 1	✓	7.7.4; 7.7.5
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{k_{yt} R_{y,QYc}} \leq 1$	0,007 < 1	✓	7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_I}{A_{Ief,n} R_{y,QYc}} + \frac{M_{Ix}}{W_{Ix,ef} R_{y,QYc}} + \frac{e_I \cdot N_I}{W_{Iy,ef} R_{y,QYc}} \leq 1$	0,832 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_{y,QYc}} + k_{xxx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{Ix,ef} R_{y,QYc}} \leq 1$	0,656 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_{y,QYc}} + k_{yyy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{Ix,ef} R_{y,QYc}} \leq 1$	0,816 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi A_{ef} R_{y,QYc}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{Ix,ef} R_{y,QYc}}\right)^{0,8} \leq 1$	0,928 < 1	✓	7.7.10.4

Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётный изгибающий момент в плоскости фермы	$M_{Ix}$	70,442	кН·см	
Эксцентриситет	$e_I$	0,269	см	7.7.2.3
Эффективная площадь нетто	$A_{Iefn}$	3,683	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления эффективного сечения в плоскости фермы	$W_{Ix,ef}$	22,063	см <sup>3</sup>	
Расчётный момент сопротивления эффективного сечения из плоскости фермы	$W_{Iy,ef}$	3,839	см <sup>3</sup>	
Расчётное сопротивление стали по пределу текучести	$R_y$	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы элемента	$\gamma_c$	1		

Рисунок 7.1.19 – Результаты расчёта прочности отдельной ветви на сжатие с изгибом

*Совместное действие осевого сжатия и изгиба*

Для рассматриваемого элемента введены данные для конструктивного расчёта:

Рисунок 7.1.20 – Данные для конструктивного расчёта

Расчётная осевая сжимающая сила  $N = -130,64 \text{ кН}$ .

В исходных данных указывается, что при расчёте устойчивости должен учитываться максимальный момент на полной длине элемента. Поэтому  $M_x = 128,1 \text{ кНсм}$ .

$k$  – коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений от поворота из плоскости изгиба:  $k = 1$ .

$k_w$  - коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений от деформации:  $k_w = 1$ .

$$l_{ef,x} = \mu_x \cdot L = 1 \cdot 203,5 = 203,5 \text{ см}$$

$$l_{ef,y} = \mu_y \cdot L = 1 \cdot 203,5 = 203,5 \text{ см}$$

$$l_{cr,T} = k_T \cdot L = 1 \cdot 203,5 = 203,5 \text{ см}$$

$l_{LT}$  - расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба:

$$l_{LT} = 203,5 \text{ см}$$

*Подробные численные расчёты содержатся в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям CFSteel. Ниже приведён сокращённый вариант.*

Определение понижающего коэффициента при плоской форме потери устойчивости относительно оси  $x-x$ :  $\varphi_x$

Приведённая гибкость относительно оси  $x-x$  (п.7.7.8.1 [1])

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_{ef,x}}{\pi \cdot i_x} \sqrt{\frac{R_y A_{ef}}{EA_g}} = \frac{203,5}{3,14 \cdot 7,53} \sqrt{\frac{33,33 \cdot 8,418}{20600 \cdot 10,261}} = 0,313$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости  $a$ . Согласно п.7.1.3 [2]

$$\bar{\lambda}_x = \pi \cdot \bar{\lambda}_x = 0,985$$

$$\delta_x = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_x) + \bar{\lambda}_x^2 = 9,87(1 - 0,03 + 0,06 \cdot 0,985) + 0,985^2 = 11,126$$

$$\varphi_x = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}_x^2} \right)}{\bar{\lambda}_x^2} = \frac{0,5 \left( 11,126 - \sqrt{11,126^2 - 39,48 \cdot 0,985^2} \right)}{0,985^2} = 0,969$$

Определение понижающего коэффициента при плоской форме потери устойчивости относительно оси  $y-y$ :  $\varphi_y$

Приведённая гибкость относительно оси  $y-y$  (п.7.7.8.1 [1])

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef,y}}{\pi \cdot i_y} \sqrt{\frac{R_y A_{ef}}{EA_g}} = \frac{203,5}{3,14 \cdot 2,908} \sqrt{\frac{33,33 \cdot 8,418}{20600 \cdot 10,261}} = 0,812$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости  $b$ . Согласно п.7.1.3 [2]

$$\bar{\lambda}_y = \pi \cdot \bar{\lambda}_y = 2,55$$

$$\delta_y = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_y) + \bar{\lambda}_y^2 = 9,87(1 - 0,04 + 0,09 \cdot 2,55) + 2,55^2 = 18,24$$

$$\varphi_y = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}_y^2} \right)}{\bar{\lambda}_y^2} = \frac{0,5 \left( 18,24 - \sqrt{18,24^2 - 39,48 \cdot 2,55^2} \right)}{2,55^2} = 0,732$$

Определение понижающего коэффициента при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости  $\varphi_T/\varphi_{TF}$

Параметр

$$i_0 = \sqrt{i_x^2 + i_y^2} = 8,072 \text{ см}$$

Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_{cr,T}^2} \right) = 658,613 \text{ кН}$$

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} \text{ (п. 7.7.8.4 [1])}$$

$$N_{cr,x} = \frac{EI_{x,g} \pi^2}{i_{ef,x}^2} = 2857 \text{ кН}$$

$$N_{cr,y} = \frac{EI_{y,g} \pi^2}{i_{ef,y}^2} = 426,94 \text{ кН}$$

Также согласно п.7.7.8.5 [1]

$$N_{cr,TF} = 658,613 \text{ кН.}$$

Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{ef} R_y}{N_{cr,TF}}} = 0,653$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости  $b$  (п.7.7.8.3 [1])

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \pi \bar{\lambda}_T) + (\pi \bar{\lambda}_T)^2 = 15,501$$

$$\varphi_{TF} = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48(\pi\overline{\lambda}_{TF})^2} \right)}{(\pi\overline{\lambda}_{TF})^2} = 0,818$$

$$\varphi = \min(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_{TF}) = 0,732.$$

Определение понижающего коэффициента при потере устойчивости плоской формы изгиба согласно п.7.7.9 [1]  $\chi_{LT}$

Вычисление упругого критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба производится по Приложению Г [1] для бисимметричного сечения

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_y}{(l_{LT})^2} \left( \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_y} + \frac{(l_{LT})^2 GI_t}{\pi^2 EI_y} + (C_2 y_g)^2} - (C_2 y_g) \right),$$

Значение  $C_1$  определяется по Таблице Г.1 [1] как для балки с моментами на опорах:

$$M_{cr} = 5678 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{x,ef} R_y}{M_{cr}}} = 0,509$$

Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$  в соответствии с п.7.7.9.2 [1] может быть вычислен по формуле

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \overline{\lambda}_{LT}^2}}$$

или по СП 16 [2] как  $\varphi$  при типе сечения  $b$  и  $\overline{\lambda} = \overline{\lambda}_{LT}$ . В CFSSteel вычисляются оба значения  $\chi_{LT}$  и в дальнейшем расчёт принимается минимальное из них.

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,682$$

$$\chi_{LT} = 0,880$$

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta\pi\overline{\lambda}_{LT}) + (\pi\overline{\lambda}_{LT})^2 = 13,45$$

$$\chi_{LT} = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48(\pi\overline{\lambda}_{LT})^2} \right)}{(\pi\overline{\lambda}_{LT})^2} = 0,881$$

Расчёт по п. 7.7.10.3[1]

Для сжатых с изгибом элементов должны выполняться условия (7.99) и (7.100):

$$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

$$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$$

Расчёт коэффициентов взаимодействия  $k_{xx}$  и  $k_{yx}$  по Таблицам В.1 и В.2 [1] (Метод 1):

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента

$$M_{cr,0} = \frac{\pi^2 EI_y}{(l_{LT})^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_y} + \frac{(l_{LT})^2 GI_t}{\pi^2 EI_y}} \right) = 4275 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента  $\bar{\lambda}_0$

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{x,ef} \cdot R_y}{M_{cr,0}}} = 0,587$$

Предельное значение условной гибкости при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента

$$\bar{\lambda}_{0,lim} = 0,2 \sqrt{C_1}^4 \sqrt{1 - \frac{N}{N_{cr,TF}}} = 0,218$$

Параметры:

$$\alpha_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_x} = 0,999$$

$$\varepsilon_x = \frac{M}{N} \frac{A_{ef}}{W_{x,ef}} = 0,187$$

Параметры  $\mu_x$  и  $\mu_y$  (Таблица В.1):

$$\mu_x = \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}}{1 - \varphi_x \frac{N}{N_{cr,x}}} = \frac{1 - \frac{130,64}{2857}}{1 - 0,969 \frac{130,64}{2857}} = 0,999$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}}{1 - \varphi_y \frac{N}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{130,64}{426,94}}{1 - 0,732 \frac{130,64}{426,94}} = 0,894$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{xx}$

$$k_{xx} = C_{m,x} C_{m,LT} \frac{\mu_x}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}} = 1,112$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{yx}$

$$k_{yx} = C_{m,x} C_{m,LT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}} = 0,995$$

Формулы взаимодействия (п. 7.7.10.3[1])

$$\frac{130,64}{0,969 \cdot 8,418 \cdot 33,33 \cdot 0,9} + 1,103 \frac{128,1}{0,88 \cdot 44,127 \cdot 33,33 \cdot 0,9} = 0,656 < 1,$$

$$\frac{130,64}{0,732 \cdot 8,418 \cdot 33,33 \cdot 0,9} + 0,995 \frac{128,1}{0,88 \cdot 44,127 \cdot 33,33 \cdot 0,9} = 0,816 < 1.$$

Расчёт по п. 7.7.10.4[1]

Условие устойчивости согласно п.7.7.10.5 [1] (формула (7.101)):

Верификационные расчёты

$$\left(\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$$

$$\left(\frac{130,64}{0,732 \cdot 8,418 \cdot 33,33 \cdot 0,9}\right)^{0,8} + \left(\frac{128,1}{0,88 \cdot 44,127 \cdot 33,33 \cdot 0,9}\right)^{0,8} = 0,928 < 1.$$

Полученные результаты расчёта на устойчивость сведены в Таблицу 7.1.2. Также в ней содержатся соответствующие результаты, полученные в CFSteel.

Таблица 7.1.2 – Сопоставление результатов расчёта устойчивости при совместном действии сжатия и изгиба

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Приведённая гибкость относительно оси $x - x$	$\bar{\lambda}_x$	-	7.7.8.1	0,313	0,313	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_x$	-	СП 16	0,969	0,969	0
Приведённая гибкость относительно оси $Y$	$\bar{\lambda}_y$	-	7.7.8.1	0,812	0,811	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_y$	-	СП 16	0,732	0,732	0
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	7.7.8.4	658,613	658,865	0,4
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,x}$	кН		2858	2858,1	0
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,y}$	кН		426,149	426,130	0
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	7.7.8.5	658,613	658,865	0,4
Условная гибкость при крутильной/ изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{TF}$		7.7.8.3	0,653	0,653	0
Коэффициент устойчивости по крутильной/ изгибно-крутильной форме	$\varphi_{TF}$		7.7.8.3	0,818	0,818	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм	Приложение Г	5678	5683,5	0,1
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_{LT}$	-	7.7.9.2	0,509	0,509	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	7.7.9.2	0,880	0,880	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	СП 16	0,881	0,881	0
<i>Расчёт п. 7.7.10.3</i>						
<i>Метод 1</i> Табл.В.1 и В.2 [1]						
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента	$M_{cr,0}$	кНсм		4275	4277	0
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\bar{\lambda}_0$	-	Приложение В	0,587	0,586	0
Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов	$C_{m,x0}$		Таблица В.2	0,892	0,893	0
Параметр	$a_{LT}$	-		0,999	0,999	0
Коэффициент	$C_{m,x}$	-		0,925	0,925	0
Коэффициент	$C_{m,LT}$	-		1,148	1,148	0
Параметр	$\mu_x$	-	Таблица В.1	0,999	0,999	0

Верификационные расчёты

Параметр	$\mu_y$	-	Таблица В.1	0,894	0,894	0
Коэффициент взаимодействия $k_{xx}$	$k_{xx}$	-	Таблица В.1	1,112	1,111	0,1
Коэффициент взаимодействия $k_{yx}$	$k_{yx}$	-	Таблица В.1	0,995	0,995	0
Левая часть неравенства (7.99)			п.7.7.10.3	0,656	0,656	0
Левая часть неравенства (7.100)			п.7.7.10.3	0,816	0,816	0
<i>Расчёт п. 7.7.10.4</i>						
Левая часть неравенства (7.101)			(7.101)	0,928	0,928	0

Результаты расчёта устойчивости конструктивного элемента 10 по СП 260 в программном комплексе приведены на Рисунке 7.1.21.

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,619 < 1	✓	7.7.4; 7.7.5
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_{wy} t R_{st} \gamma_c} \leq 1$	0,007 < 1	✓	7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_{1эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1эф} R_y \gamma_c} + \frac{\sigma_1 \cdot N_i}{W_{2эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,832 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,656 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,816 < 1	✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi A_{эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_x R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,928 < 1	✓	7.7.10.4

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Длина элемента	L	2,035 м		
Расчётная длина в плоскости фермы	$l_{эфx}$	2,035 м		
Гибкость	$\lambda_x$	27,018		
Условная гибкость	$\lambda_{\bar{x}}$	0,313		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы	a			7.7.8.1
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	0,969		7.7.8.1
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{эфy}$	2,035 м		
Гибкость	$\lambda_y$	69,971		
Условная гибкость	$\lambda_{\bar{y}}$	0,811		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы	b			7.7.8.1
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	0,732		7.7.8.1
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости в плоскости фермы	$N_{cr,x}$	2858,081 кН		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости из плоскости фермы	$N_{cr,y}$	426,130 кН		
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{cr,T}$	2,035 м		
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	658,865 кН		7.7.8.4
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	658,865 кН		7.7.8.5
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1		Приложение Г
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1		Приложение Г
Коэффициент	$C_1$	1,329		Приложение Г
Коэффициент	$C_3$	1,000		Приложение Г
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	5683,505 кН·см		Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\lambda_{\bar{LT}}$	0,509		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)	b			7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,880		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	1,111		Приложение В
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	0,9		



## Верификационные расчёты

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,619 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5	
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_w t R_z \gamma_c} \leq 1$	0,007 < 1	✓ 7.7.6	
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_{эф} R_y \gamma_c} + \frac{M_{ix}}{W_{ix} R_y \gamma_c} + \frac{e_{xi} \cdot N_i}{W_{ix} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,832 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,656 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,816 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,928 < 1	✓ 7.7.10.4	
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Длина элемента	L	2,035 м		
Расчётная длина в плоскости фермы	$l_{эфx}$	2,035 м		
Гибкость	$\lambda_x$	27,018		
Условная гибкость	$\lambda_{\bar{x}}$	0,313		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы		a		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	0,969		7.7.8.1
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{эфy}$	2,035 м		
Гибкость	$\lambda_y$	69,971		
Условная гибкость	$\lambda_{\bar{y}}$	0,811		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	0,732		7.7.8.1
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости в плоскости фермы	$N_{cr,x}$	2858,081 кН		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости из плоскости фермы	$N_{cr,y}$	426,130 кН		
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{crT}$	2,035 м		
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	658,865 кН		7.7.8.4
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	658,865 кН		7.7.8.5
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1		Приложение Г
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1		Приложение Г
Коэффициент	$C_1$	1,329		Приложение Г
Коэффициент	$C_3$	1,000		Приложение Г
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	5683,505 кН·см		Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\lambda_{LT}$	0,509		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,880		7.7.9.2
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k	0,995		Приложение В
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	0,9		

## Верификационные расчёты

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,619 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5	
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_w t R_z \gamma_c} \leq 1$	0,007 < 1	✓ 7.7.6	
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_{эфi} R_y \gamma_c} + \frac{M_{ix}}{W_{ixef} R_y \gamma_c} + \frac{e_{xi} \cdot N_i}{W_{ixef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,832 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,656 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,816 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,928 < 1	✓ 7.7.10.4	
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Длина элемента	L	2,035 м		
Расчётная длина в плоскости фермы	$l_{эфx}$	2,035 м		
Гибкость	$\lambda_x$	27,018		
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_x$	0,313		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы		a		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	0,969		7.7.8.1
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{эфy}$	2,035 м		
Гибкость	$\lambda_y$	69,971		
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_y$	0,811		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	0,732		7.7.8.1
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{crT}$	2,035 м		
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	658,865 кН		7.7.8.4
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	658,865 кН		7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_T$	0,653		(7.89)
Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости		b		7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\varphi_{T/TF}$	0,818		7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\varphi$	0,732		
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1		Приложение Г
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1		Приложение Г
Коэффициент	$C_1$	1,329		Приложение Г
Коэффициент	$C_3$	1,000		Приложение Г
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	5683,505 кН·см		Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,509		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,880		7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	0,9		

Рисунок 7.1.21 - Результат расчёта устойчивости конструктивного элемента 10

### Конструктивный расчёт элемента 3 (стойка)

Поперечное сечение элемента приведено на Рисунке 7.1.22. Размеры:  $h = 200$  мм,  $t = 2,0$  мм,  $b_f = 80$  мм,  $c = 25$  мм,  $r = 3$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $S = 8$  мм (толщина фасонки).

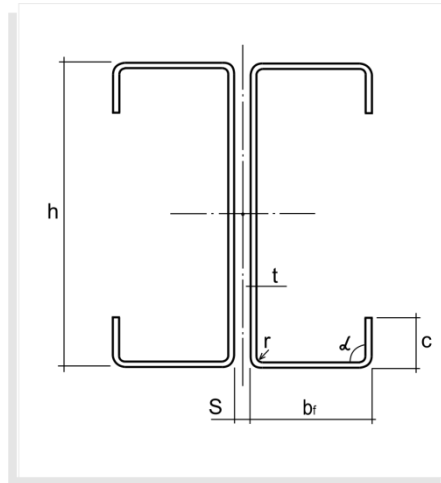


Рисунок 7.1.22 – Поперечное сечение конструктивного элемента 3

Сталь 350 по ГОСТ 14918-2020 с  $R_{ym} = 35 \text{ кН/см}^2$  и  $R_{tm} = 42 \text{ кН/см}^2$ ;  $\gamma_m = 1,05$  (п. 6.3 [1]);  $R_y = 33,33 \text{ кН/см}^2$ ;  $R_u = 40 \text{ кН/см}^2$ .

Болты М16:  $d_b = 16 \text{ мм}$ , класс точности В, класс прочности 8.8,  $R_{ub} = 83 \text{ кН/см}^2$ . Диаметр отверстия  $d_0 = 18 \text{ мм}$ .

Геометрические характеристики полного сечения:

$A_g = 15,489 \text{ см}^2$ ,  $I_x = 969,536 \text{ см}^4$ ,  $W_x = 96,937 \text{ см}^3$ ,  $i_x = 7,912 \text{ см}$ ,  $I_y = 271,550 \text{ см}^4$ ,  $W_y = 32,335 \text{ см}^3$ ,  $i_y = 4,187 \text{ см}$ ,  $I_t = 0,197725 \text{ см}^4$ ,  $I_w = 30660,152 \text{ см}^6$ .

Геометрические характеристики эффективного сечения (осевое сжатие):

$A_{ef} = 9,417 \text{ см}^2$ ,  $I_{x,ef} = 771,685 \text{ см}^4$ ,  $i_{x,ef} = 9,053 \text{ см}$ ,  $W_{x,ef} = 77,184 \text{ см}^3$ ,  $I_{y,ef} = 196,973 \text{ см}^4$ ,  $i_{y,ef} = 4,574 \text{ см}$ .

Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно горизонтальной оси):

$A_{ef} = 14,594 \text{ см}^2$ ,  $I_{x,ef} = 894,081 \text{ см}^4$ ,  $W_{x,ef} = 84,866 \text{ см}^3$ ,  $i_{x,ef} = 7,827 \text{ см}$ .

Проверка прочности элемента на совместное действие осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы с учётом отверстий для крепления соединительных прокладок (п. 7.7.5 [1])

$$\frac{N}{A_{ef,n} R_{yQ} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{yQ} \gamma_c} \leq 1$$

Усилия  $N$ ,  $M$  и  $Q$  приведены на Рисунке 7.1.23.

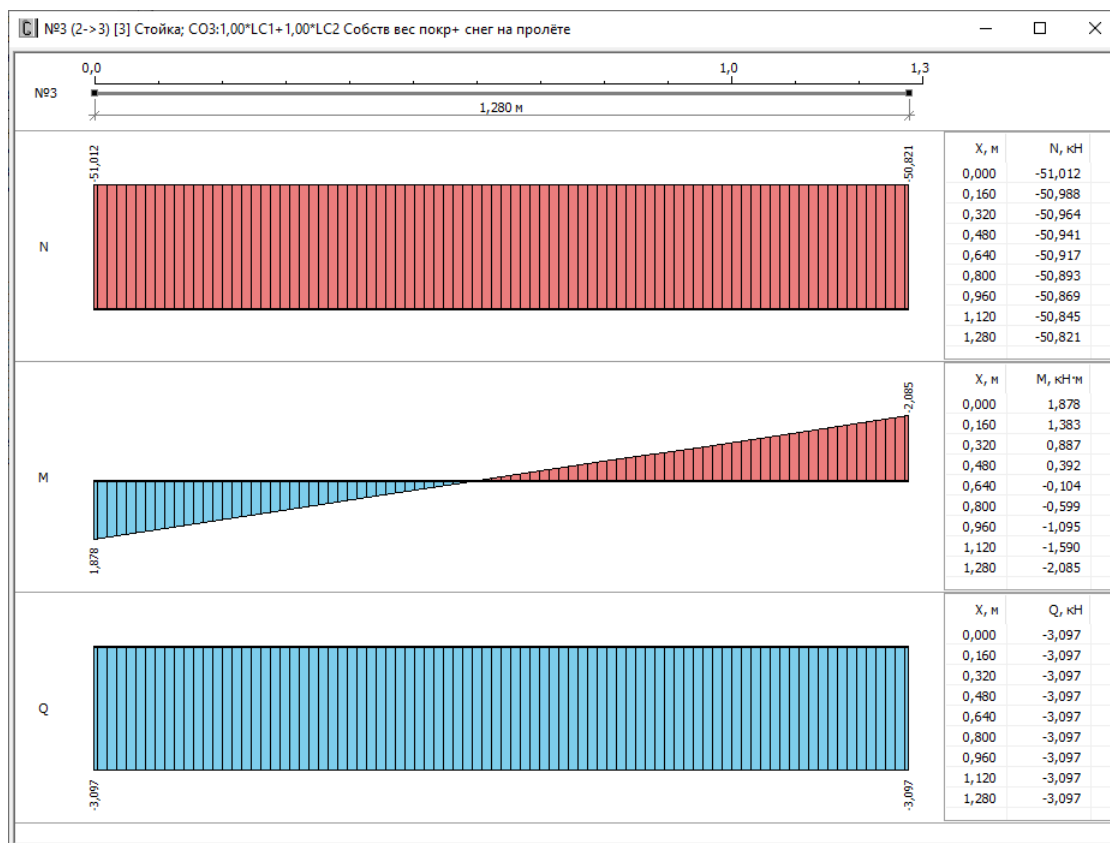


Рисунок 7.1.23 – Конструктивный элемент 3: Эпюры и значения усилий

$$\frac{N}{A_{ef,n} R_{yQ} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{yQ} \gamma_c} = 0,243 < 1$$

Расчёт прочности элемента на действие поперечной силы

Проверка прочности элемента на действие поперечной силы производится исходя из условия

$$\frac{Q_{max}}{Q_w} \leq 1,$$

$$\frac{3,097}{87,685} = 0,035 \leq 1$$

Результаты расчёта в программе приведены на Рисунке 7.1.24.

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство		Значение	Пункт (формула) СП 260
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$		0,243 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5
Проверка прочности в начальном сечении элемента	$\frac{N}{A_{ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$		0,236 < 1	✓ 7.7.5
Проверка прочности в конечном сечении элемента	$\frac{N}{A_{ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$		0,243 < 1	✓ 7.7.5
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_w t R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$		0,035 < 1	✓ 7.7.6
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_{1ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{e_1 \cdot N_i}{W_{1yef,min} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$		0,305 < 1	✓

Расчёт на поперечную силу				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётная поперечная сила	$Q_{max}$	3,097	кН	
Расчётная высота стенки	$h_w$	198,0	мм	
Расчётная толщина стенки	$t$	2,0	мм	
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	1,406		
Расчётное сопротивление стали	$R_s$	113	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1		

Рисунок 7.1.24 – Результаты расчёта прочности на действие поперечной силы

*Расчёт на прочность отдельной ветви на сжатие с изгибом*

Расчёт производится в соответствии с неравенством

$$\frac{N_i}{A_{1ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{|e_1| \cdot N_i}{W_{1yef,min} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$$

В программе реализован следующий подход к вычислению выражения слева.

Данное выражение вычисляется для каждого расчётного сечения конструктивного элемента при  $N_{1i}$  и  $M_{1xi}$ . Количество расчётных сечений задаёт пользователь в *Настройки* → *Конструкция*. В данном случае количество расчётных сечений задано равным 9. Усилие  $N_{1i} = k_1 N_i / 2$ ;  $M_{1xi} = k_1 M_i / 2$ .  $N_i$  и  $M_{xi}$  приведены на Рисунке 7.1.23. Далее выбирается максимальное значение этого выражения.

Коэффициент  $k_1$  учитывает возможное неравномерное распределение усилий между ветвями и назначается в *Настройки* → *Конструктивный расчёт*. В данном случае принято  $k_1 = 1,1$ .

Для наиболее опасного сечения в конце элемента

$$N_1 = k_1 N / 2 = 1,1 \cdot 50,821 / 2 = 27,952 \text{ кН}$$

$$M_{1x} = k_1 M_x / 2 = 1,1 \cdot 208,5 / 2 = 114,675 \text{ кНсм}$$

$$A_{1ef,n} = A_{ef,n} / 2 = 9,417 \text{ см}^2 / 2 = 4,708 \text{ см}^2$$
 - эффективная площадь сечения нетто отдельной ветви

$$W_{1x,ef} = 77,184 / 2 = 38,592 \text{ см}^3$$

$$e_1 = 0,511 \text{ см}$$

Эксцентриситет при осевом сжатии одинарного сечения ветви положителен. Следовательно, при перемещении центра тяжести в эффективном сечении будет возникать изгибающий момент, действующий относительно собственной вертикальной оси и догружающий стенку профиля. В результате программного вычисления геометрических характеристик одинарного эффективного сечения ветви при изгибе относительно вертикальной оси (стенка сжата) получены результаты:

$$W_{1y,efлев} = 14,837 \text{ см}^3 \text{ (для стенки),}$$

$$W_{1y,efправ} = 11,448 \text{ см}^3 \text{ (для отгибов).}$$

## Верификационные расчёты

В безопасную сторону в расчёт принимается абсолютное значение эксцентриситета и минимальный момент сопротивления эффективного сечения ветви  $W_{Iy,efmin} = \min (W_{Iy,efлев}, W_{Iy,efправ}) = 11,448 \text{ см}^3$ .

$$\frac{N_1}{A_{1ef,n} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1xef} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{|e_1| \cdot N_1}{W_{1yef,min} R_{y,Q} \gamma_c} = 0,304 < 1.$$

Результаты расчёта в программе приведены на Рисунке 7.1.25.

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{efn} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$	0,243 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5	
Проверка прочности в начальном сечении элемента	$\frac{N}{A_{efn} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$	0,236 < 1	✓ 7.7.5	
Проверка прочности в конечном сечении элемента	$\frac{N}{A_{efn} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$	0,243 < 1	✓ 7.7.5	
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_{y,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$	0,035 < 1	✓ 7.7.6	
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_1}{A_{1efn} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_{1x}}{W_{1xef} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{e_1 \cdot N_1}{W_{1yef,min} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$	0,305 < 1	✓	
<b>Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Коэффициент, учитывающий неравномерность работы ветвей		1,1		
Расчётное усилие сжатия	$N_1$	27,952	кН	
Расчётный изгибающий момент в плоскости фермы	$M_{1x}$	114,702	кН·см	
Эксцентриситет	$e_1$	0,511	см	7.7.2.3
Эффективная площадь нетто	$A_{1efn}$	4,708	см <sup>2</sup>	
Расчётный момент сопротивления эффективного сечения в плоскости фермы	$W_{1xef}$	38,592	см <sup>3</sup>	
Расчётный момент сопротивления эффективного сечения из плоскости фермы	$W_{1yef}$	11,448	см <sup>3</sup>	
Расчётное сопротивление стали по пределу текучести	$R_y$	333	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы элемента	$\gamma_c$	1		

Рисунок 7.1.25 - Результаты расчёта прочности отдельной ветви на сжатие с изгибом

*Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по п. 7.7.10.4[1]*

Условие устойчивости согласно п.7.7.10.4 [1] (формула (7.101)):

$$\left( \frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1$$

Для рассматриваемого элемента введены данные для конструктивного расчёта:

Рисунок 7.1.26 – Данные для конструктивного расчёта

Расчётная осевая сжимающая сила  $N = - 51,012 \text{ кН}$ .

В исходных данных указывается, что при расчёте устойчивости должен учитываться максимальный момент на полной длине элемента. Поэтому  $M_x = 208,5 \text{ кНсм}$ .

$k$  – коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений от поворота из плоскости изгиба:  $k = 1$ .

$k_w$  - коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений от депланации:  $k_w = 1$ .

$$l_{ef,x} = \mu_x \cdot L = 1 \cdot 128 = 128 \text{ см}$$

$$l_{ef,y} = \mu_y \cdot L = 1 \cdot 128 = 128 \text{ см}$$

$$l_{cr,T} = k_T \cdot L = 1 \cdot 128 = 128 \text{ см}$$

*Определение понижающего коэффициента при плоской форме потери устойчивости относительно оси x - x  $\varphi_x$*

Приведённая гибкость относительно оси x - x (п.7.7.8.1 [1])

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_{ef,x}}{\pi \cdot i_x} \sqrt{\frac{R_y A_{ef}}{EA_g}} = 0,162$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости  $a$ . Согласно п.7.1.3 [2]

$$\bar{\lambda}_x = \pi \cdot \bar{\lambda}_x = 0,507$$

$$\delta_x = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_x) + \bar{\lambda}_x^2 = 10,132$$

$$\varphi_x = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}_x^2} \right)}{\bar{\lambda}_x^2} = 1$$

Определение понижающего коэффициента при плоской форме потери устойчивости относительно оси у - у  $\varphi_y$

Приведённая гибкость относительно оси у - у (п.7.7.8.1 [1])

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef,y}}{\pi \cdot i_y} \sqrt{\frac{R_y A_{ef}}{E A_g}} = 0,305$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости *b*. Согласно п.7.1.3 [2]

$$\bar{\lambda}_y = \pi \cdot \bar{\lambda}_y = 0,959$$

$$\delta_y = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_y) + \bar{\lambda}_y^2 = 11,246$$

$$\varphi_y = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}_y^2} \right)}{\bar{\lambda}_y^2} = 0,952$$

Определение понижающего коэффициента при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости  $\varphi_T / \varphi_{TF}$

Параметр

$$i_0 = \sqrt{i_x^2 + i_y^2} = 8,952 \text{ см}$$

Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_{cr,T}^2} \right) = 4768 \text{ кН}$$

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} \text{ (п. 7.7.8.4 [1])}$$

$$N_{cr,x} = \frac{EI_{xg} \pi^2}{l_{ef,x}^2} = 12030 \text{ кН}$$

$$N_{cr,y} = \frac{EI_{yg} \pi^2}{l_{ef,y}^2} = 3370 \text{ кН}$$

Также согласно п.7.7.8.5 [1]

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} = 4768 \text{ кН.}$$

Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{ef} R_y}{N_{cr,TF}}} = 0,257$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости *b* (п.7.7.8.3 [1])

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \pi \bar{\lambda}_T) + (\pi \bar{\lambda}_T)^2 = 9,87(1 - 0,04 + 0,09 \cdot 3,14 \cdot 0,257) + (3,14 \cdot 0,257)^2 = 10,841$$

$$\varphi_{TF} = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 (\pi \bar{\lambda}_{TF})^2} \right)}{(\pi \bar{\lambda}_{TF})^2} = 0,966$$

$$\varphi = \min(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_{TF}) = 0,952$$



Определение понижающего коэффициента при потере устойчивости плоской формы изгиба согласно п.7.7.9 [1]  $\chi_{LT}$

Вычисление упругого критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба производится по Приложению Г [1] для бисимметричного сечения

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_y}{(l_{LT})^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_y} + \frac{(l_{LT})^2 GI_t}{\pi^2 EI_y} + (C_2 y_g)^2} - (C_2 y_g) \right)$$

Значение  $C_1$  определяется по Таблице Г.1 [1] как для балки с моментами на опорах:

$l_{LT}$  - расчётная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба:

$$l_{LT} = 1 \cdot 128 = 128 \text{ см}$$

$$M_{cr} = 93290 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{x,ef} R_y}{M_{cr}}} = 0,166$$

Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$  в соответствии с п.7.7.9.2 [1] может быть вычислен по формуле

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

или по СП 16 [2] как  $\phi$  при типе сечения  $b$  и  $\bar{\lambda} = \pi \bar{\lambda}_{LT}$ . В CFSteel вычисляются оба значения  $\chi_{LT}$  и в дальнейший расчёт принимается минимальное из них.

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,508$$

$$\chi_{LT} = 1$$

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \pi \bar{\lambda}_{LT}) + (\pi \bar{\lambda}_{LT})^2 = 10,211$$

$$\chi_{LT} = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48(\pi \bar{\lambda}_{LT})^2} \right)}{(\pi \bar{\lambda}_{LT})^2} = 0,993$$

Условие устойчивости согласно п.7.7.10.4 [1]

$$\left( \frac{51,012}{0,952 \cdot 9,417 \cdot 33,33 \cdot 0,9} \right)^{0,8} + \left( \frac{208,5}{0,993 \cdot 77,184 \cdot 33,33 \cdot 0,9} \right)^{0,8} = 0,411 < 1.$$

Полученные результаты расчёта сведены в Таблицу 7.1.3. Также в ней содержатся соответствующие результаты, полученные в CFSteel.

Таблица 7.1.3 – Сопоставление результатов расчёта по формуле (7.101) СП 260

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Приведённая гибкость относительно оси $x - x$	$\bar{\lambda}_x$	-	7.7.8.1	0,162	0,162	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\phi_x$	-	СП 16	1,0	1	0
Приведённая гибкость относительно оси $y - y$	$\bar{\lambda}_y$	-	7.7.8.1	0,305	0,305	0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\phi_y$	-	СП 16	0,952	0,952	0
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	(7.90)	4768	4768	0

*Верификационные расчёты*

Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,x}$	кН		12030	12031	0
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,y}$	кН		3370	3369,7	0
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	7.7.8.3	4768	4768	0
Условная гибкость при крутильной/ изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\overline{\lambda}_{TF}$	-	(7.89)	0,257	0,257	0
Коэффициент устойчивости по крутильной/ изгибно-крутильной форме	$\varphi_{TF}$	-	7.7.8.3	0,966	0,966	0
Расчётный коэффициент	$\varphi$	-		0,952	0,952	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм	Приложение Г	93290	93287,8	0,2
Условная гибкость	$\overline{\lambda}_{LT}$	-	7.7.9	0,166	0,166	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	7.7.9	1	1	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	СП 16	0,993	0,993	0
Левая часть проверки устойчивости элемента	-	-	(7.101)	0,411	0,411	0

Результат расчёта *конструктивного элемента 3* по формуле (7.101) СП 260 в программе CFSteel представлен на Рисунке 7.1.27.

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эфx}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_xR_y\gamma_c} \leq 1$	0,243 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5	
Проверка прочности в начальном сечении элемента	$\frac{N}{A_{эфx}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_xR_y\gamma_c} \leq 1$	0,236 < 1	✓ 7.7.5	
Проверка прочности в конечном сечении элемента	$\frac{N}{A_{эфx}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_xR_y\gamma_c} \leq 1$	0,243 < 1	✓ 7.7.5	
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{h_{эф}tR_z\gamma_c} \leq 1$	0,035 < 1	✓ 7.7.6	
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_i}{A_{эфn}R_y\gamma_c} + \frac{M_{ix}}{W_{ixef}R_y\gamma_c} + \frac{e_i \cdot N_i}{W_{iyef}R_y\gamma_c} \leq 1$	0,305 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф}R_y\gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_x \varphi_x R_y\gamma_c} \leq 1$	0,270 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф}R_y\gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_x \varphi_y R_y\gamma_c} \leq 1$	0,279 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_x A_{эф}R_y\gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_x \varphi_x R_y\gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,411 < 1	✓ 7.7.10.4	
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_x$	0,162		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы		a		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	1,000		7.7.8.1
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{efy}$	1,280 м		
Гибкость	$\lambda_y$	30,570		
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_y$	0,305		7.7.8.1
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы		b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	0,952		7.7.8.1
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{crT}$	1,280 м		
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	4767,964 кН		7.7.8.4
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	4767,964 кН		7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_T$	0,257		(7.89)
Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости		b		7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\varphi_{T/TF}$	0,966		7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\varphi$	0,952		
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1		Приложение Г
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1		Приложение Г
Коэффициент	$C_1$	2,600		Приложение Г
Коэффициент	$C_3$	0,398		Приложение Г
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	93287,841 кН·см		Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,166		7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,993		7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	0,9		

Рисунок 7.1.27 - Результат расчёта конструктивного элемента 3 по формуле (7.101) СП 260

В исходных данных проекта (Файл → Общие данные) отмечена необходимость проектирования узлов примыкания элементов решётки к поясам. Поэтому выполняем некоторые расчёты, с этим связанные.

По условиям проектирования (Настройки → Конструктивный расчёт, Рисунок 7.1.8) отмечено, что количество болтов в начале и конце элемента может быть разным. На Рисунке 7.1.28 Приведены исходные данные для проектирования прикрепления элемента с отметкой об автоматическом назначении количества болтов.

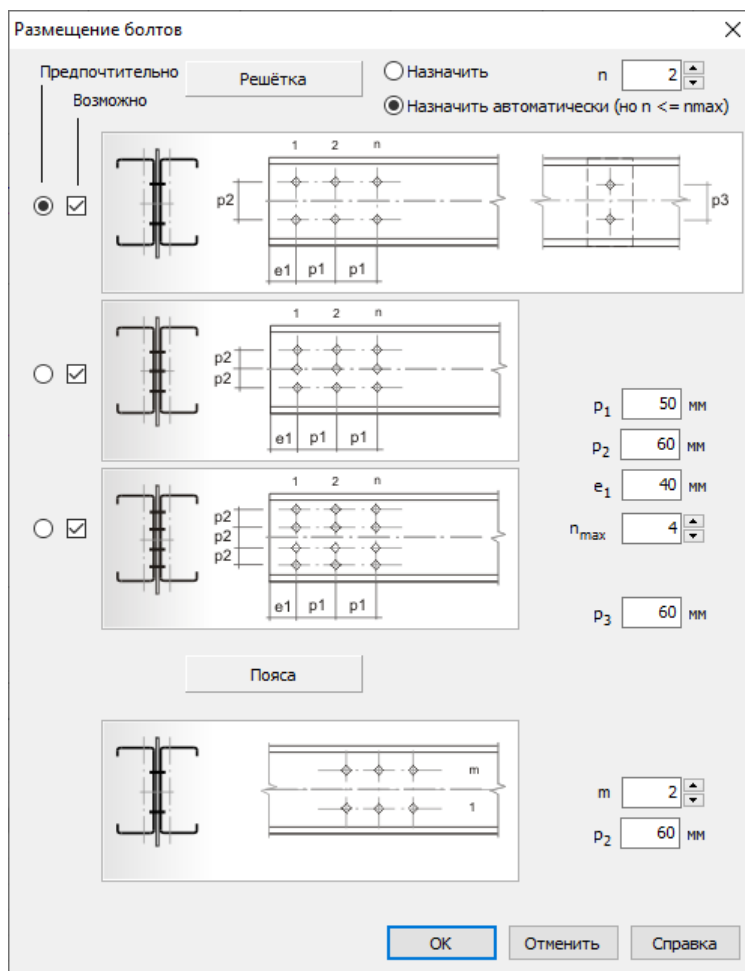


Рисунок 7.1.28 - Исходные данные для проектирования прикрепления элемента

Проверка на смятие элемента в месте прикрепления (начало элемента)

Действующие усилия в начале элемента:

$$N = -51,012 \text{ кН},$$

$$M = 187,8 \text{ кНсм},$$

$$Q = 3,097 \text{ кН}.$$

$R_{bp}$  – расчётное сопротивление стали соединяемых элементов по пределу прочности (п. 10.1.11 [1]);  $R_{bp} = 54 \text{ кН/см}^2$ .

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы болтового соединения по Таблице 41 [2].

$$a = 40 \text{ мм}, s = 50 \text{ мм}, d_0 = 18 \text{ мм}.$$

$$a/d_0 = 2,2; s/d_0 = 2,77.$$

$$\gamma_b = 0,9.$$

Проверка на смятие элемента производится по условию

$$\frac{F_{max}}{R_{bp} d_{b1} \sum t \gamma_b \gamma_c} \leq 1$$

При автоматическом назначении количества болтов подбор начинается с минимального количества рядов болтов вдоль оси элемента  $n = 1$  и предпочтительного количества рядов в поперечном направлении (по высоте сечения). В данном случае – 2. Предпочтительное и возможное количество рядов не должны вступать в противоречие. Если проверка удовлетворяется, то принимаются эти параметры. Если проверка не удовлетворяется, то  $n$  увеличивается на 1; и так далее до  $n_{max}$ . Если и при  $n_{max}$  проверка не удовлетворяется, то

увеличивается количество рядов в поперечном направлении и действия повторяются. Расчёт останавливается при минимальном количестве болтов, удовлетворяющем вышеприведённому условию.

На первом этапе принимаем  $n = 1$ :

$$F_N = 51,012/2 = 25,506 \text{ кН}$$

$$F_Q = 3,097/2 = 1,548 \text{ кН}$$

$$M_N = 187,8/6 = 31,3 \text{ кН}$$

$$M_Q = 0$$

$$F_{max} = 56,827 \text{ кН}$$

$$\frac{56,827}{54 \cdot 1,6 \cdot 2 \cdot 0,196 \cdot 0,9 \cdot 1} = 1,864 > 1$$

Принимаем  $n = 2$

$$n_b = 4$$

$$F_N = 51,012/4 = 12,753 \text{ кН}$$

$$F_Q = 3,097/4 = 0,774 \text{ кН}$$

$$M_N = 9,236 \text{ кН}$$

$$M_Q = 7,697 \text{ кН}$$

$$F_{max} = 23,564 \text{ кН}$$

$$\frac{23,564}{54 \cdot 1,6 \cdot 2 \cdot 0,196 \cdot 0,9 \cdot 1} = 0,773 < 1$$

Принимаем количество рядов болтов вдоль элемента  $n = 2$  и количество рядов по высоте сечения – 2 ряда. Количество болтов в прикреплении – 4 шт.

На Рисунке 7.1.29 представлены результаты расчёта в программе.

## Верификационные расчёты

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260	
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{эф,n}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,243 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5	
Проверка прочности в начальном сечении элемента	$\frac{N}{A_{эф,n}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,236 < 1	✓ 7.7.5	
Проверка прочности в конечном сечении элемента	$\frac{N}{A_{эф,n}R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1$	0,243 < 1	✓ 7.7.5	
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{k_n R_y \gamma_c} \leq 1$	0,035 < 1	✓ 7.7.6	
Расчёт на прочность отдельной ветви при сжатии с изгибом	$\frac{N_2}{A_{эф,n} R_y \gamma_c} + \frac{M_{2x}}{W_{2эф} R_y \gamma_c} + \frac{s_2 \cdot N_2}{W_{2эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,305 < 1	✓	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,270 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{эф} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,279 < 1	✓ 7.7.10.3	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_x A_{эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,эф} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,411 < 1	✓ 7.7.10.4	
Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале	$\frac{F}{R_{bp} d_b \sum t \gamma_b \gamma_c} \leq 1$	0,773 < 1	✓ 10.1.11	
Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его конце	$\frac{F}{R_{bp} d_b \sum t \gamma_b \gamma_c} \leq 1$	0,813 < 1	✓ 10.1.11	
Проверка узловой фасонки на смятие	$\frac{F}{R_{bp} d_b t \gamma_b \gamma_c} \leq 1$	0,430 < 1	✓ 14.2.9 СП 16	
Проверка болтов по срезу	$\frac{F}{R_{bz} A_b n_b \gamma_b \gamma_c} \leq 1$	0,264 < 1	✓ 10.1.11	

Проверка элемента на смятие в месте прикрепления в его начале				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётное усилие растяжения	N	51,012	кН	
Расчётный изгибающий момент	M <sub>x</sub>	187,802	кН·см	
Расчётная поперечная сила	Q	3,097	кН	
Расчётное усилие	F	23,564	кН	
Расчётное сопротивление стали элемента на смятие	R <sub>bp</sub>	540	Н/мм <sup>2</sup>	10.1.11
Расчётный диаметр болта	d	16,0	мм	
Расчётная толщина элемента	t	3,9	мм	
Кэффициент условий работы болтового соединения	γ <sub>b</sub>	0,90		
Кэффициент условий работы элемента	γ <sub>c</sub>	1		
Количество болтов в прикреплении	n <sub>b</sub>	4		
Количество рядов болтов в перпендикулярном направлении		2		
Количество рядов болтов в направлении вдоль элемента		2		

Рисунок 7.1.29 – Результат расчёта на смятие в начале конструктивного элемента 3

Расчёт на смятие в конце элемента производится аналогично.

*Проверка прочности сечения элемента вначале с учётом ослабления отверстиями*

Проверка производится в соответствии с неравенством

$$\frac{N_H}{A_{ef,nH} R_{y,QH} \gamma_c} + \frac{M_{xH}}{W_{x,ef} R_{y,QH} \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{51,012}{9,417 \cdot 33,33 \cdot 1} + \frac{187,8}{77,184 \cdot 33,33 \cdot 1} = 0,236 < 1$$

Проверка в конце элемента производится аналогично.

*Проверка на смятие узловой фасонки*

Проверка производится по максимальному усилию  $F_{max}$  поля болтов вначале или конце элемента в соответствии с неравенством [2]:

$$\frac{F_{max}}{R_{bp} d_b t \gamma_b \gamma_c} \leq 1.$$

Максимальное усилие возникает в конце элемента:

$$F_{max} = 24,782 \text{ кН}$$

$$R_{bp} = 1,35R_u = 1,35 \cdot 37,07 = 50,049 \text{ кН/см}^2$$

$$\frac{24,782}{50,049 \cdot 1,6 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1} = 0,430 < 1.$$

Результат, полученный программно см. Рисунок 7.1.29.

*Проверка на срез болтов в месте прикрепления элемента решётки*

Проверка производится по максимальному усилию  $F_{max}$  поля болтов вначале или конце элемента в соответствии с неравенством [2]:

$$\frac{F_{max}}{R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c} \leq 1.$$

Максимальное усилие возникает в конце элемента  $F_{max} = 24,782 \text{ кН}$ .

$$R_{bs} = 33,2 \text{ кН/см}^2 \text{ (Таблица Г.5 [2])}.$$

$$\frac{24,782}{33,2 \cdot 1,57 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 1} = 0,264 < 1$$

Результат, полученный программно см. Рисунок 7.1.29.

*Проверка фермы по прогибам*

$$f_{max} \leq f_u$$

$$f_{max} = 6,94 \cdot 1,3 = 9,02 \text{ мм}.$$

$$f_u = 1/225 \cdot L = 66,67 \text{ мм}.$$

$9,02 \text{ мм} < 66,67 \text{ мм}$  - условие выполняется.

Результаты расчёта в программе представлены на Рисунках 7.1.30 и 7.1.31.

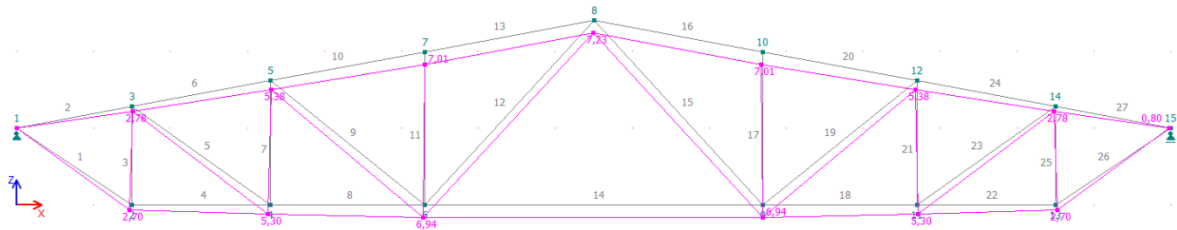


Рисунок 7.1.30 – Сочетание 4: Перемещения узлов

Результаты проверок							
Элементы		Сочетания		Вторая группа п.с.			
Сочетание нагрузок	Неравенство	Значение	Ед. изм.	$\gamma_f$	К	Узел	
СО4: 1,00 <sup>°</sup> LC3+1,00 <sup>°</sup> LC4 Расчёт по прогибам	$f_{max} \leq f_u$	9,03 < 66,67	мм	✓	1	1,3	6

Закреть

Рисунок 7.1.31 – Результат проверки прогибов фермы

## 7.2. Ферма из спаренных профилей. Расчёт по нормам EN

Выполнить проверочные расчёты конструктивного элемента верхнего пояса и элемента решётки фермы, схема которой представлена на Рисунке 7.2.1. Верхний пояс фермы выполнен из спаренных Сигма-образных профилей 200х60х1,5. Нижний пояс выполнен из двух С-образных профилей 150х55х2,0. Из этих же профилей выполнены элементы решётки за исключением опорных раскосов и приопорных стоек, сечения которых представляют спаренные С- профили 200х80х2,0 (элементы 1, 3, 25 и 26 на расчётной схеме фермы - Рисунок 7.2.2). Профили выполнены из стали S350GD + Z275 по EN 10147 с  $f_{yb} = 350 \text{ Н/мм}^2$ ,  $f_u = 420 \text{ Н/мм}^2$ .  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ . Расчёты выполнить по нормам EN (CEN EC).

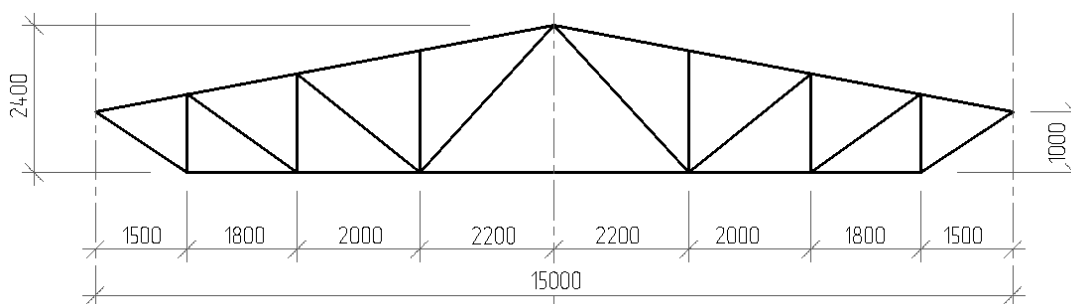


Рисунок 7.2.1 – Схема фермы с размерами

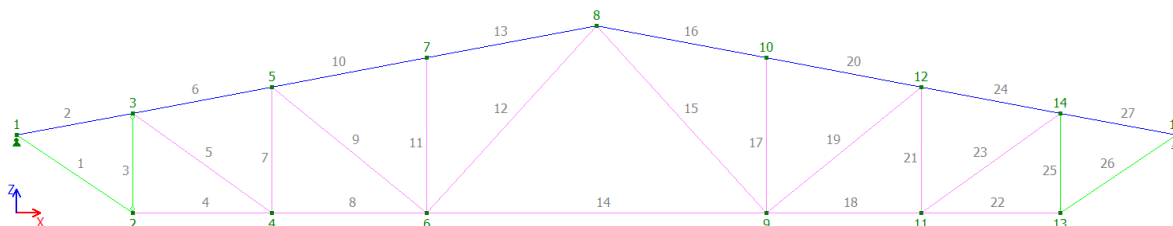


Рисунок 7.2.2 – Расчётная схема фермы

Нагрузка на ферму прикладывается через прогоны, опирающиеся на узлы верхнего пояса. В коньковом узле укладываются два прогона. Полагаем, что система покрытия устроена таким образом, что прогоны в местах опирания раскрепляют верхний пояс из плоскости фермы.

Расчётные длины элемента 10 (верхний пояс):

в плоскости фермы  $L_{cr,y} = k_y \cdot L = 1 \cdot 203,5 = 203,5 \text{ см}$

из плоскости фермы  $L_{cr,z} = k_z \cdot L = 1 \cdot 203,5 = 203,5 \text{ см}$

$L_{cr,T} = k_T \cdot L = 1 \cdot 203,5 = 203,5 \text{ см}$

$L_{cr,LT} = k_{LT} \cdot L = 1 \cdot 203,5 = 203,5 \text{ см}$

$k$  – коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений элемента от поворота из плоскости фермы:  $k = 1$ .

$k_w$  - коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений от депланации:  $k_w = 1$ .

Предельный нормируемый прогиб  $f_u = 1/250 \cdot L$ .

Воздействие  $G$  (постоянная нагрузка) представляет собой вес покрытия. Схема приложения с нормативными (характеристическими) значениями нагрузок в  $\text{кН}$  показана на Рисунке 7.2.3.



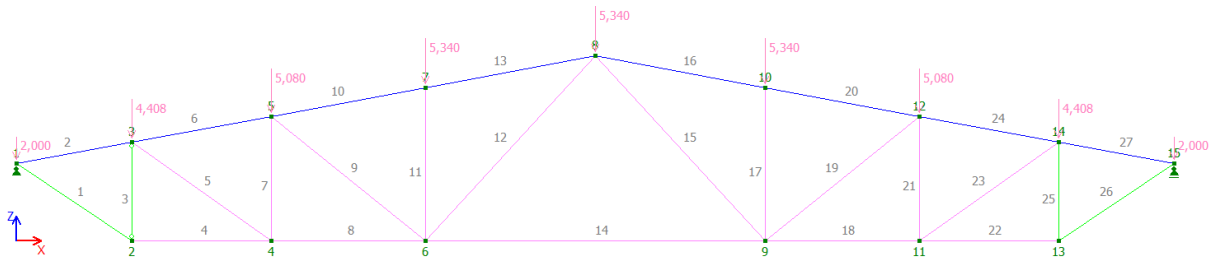


Рисунок 7.2.3 – Постоянное воздействие  $G$ : вес покрытия

Воздействие  $Q$  (переменная нагрузка) представляет собой вес снега. На Рисунке 7.2.4 приведена схема с нормативными (характеристическими) значениями нагрузок.

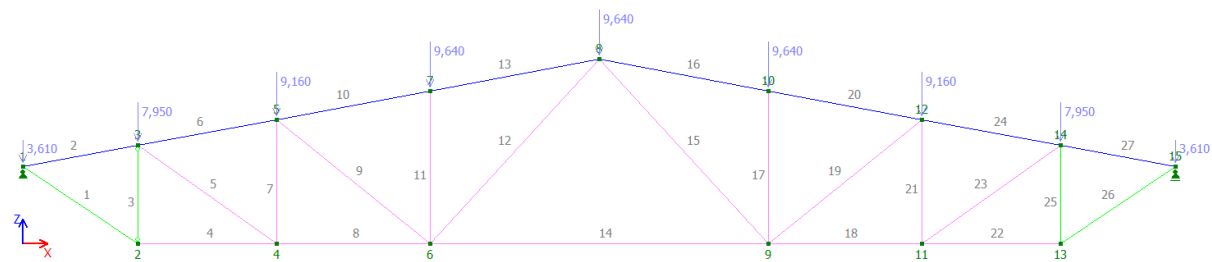


Рисунок 7.2.4 – Переменное воздействие  $Q$ : вес снега

Частные коэффициенты для критических предельных состояний (ULS):

$\gamma_G = 1,35$  (Таблица A1.2(B) [5])

$\gamma_Q = 1,5$  (Таблица A1.2(B) [5])

Комбинация (ULS): CO3:  $\gamma_G G + \gamma_Q Q$

Частные коэффициенты для предельных состояний по эксплуатационной пригодности (SLS):

$\gamma_G = 1,0$

$\gamma_Q = 1,0$

Комбинация (SLS): CO4:  $\gamma_G G + \gamma_Q Q$  (характеристическая)

Ввод исходных данных для расчёта по эксплуатационной пригодности (Рисунок 7.2.5):  
 Нагрузки → Добавить/Редактировать сочетание

Редактировать сочетание 4

Наименование: Расчёт по прогибам

Группа предельных состояний: Эксплуатац. | Предельные прогибы

Собственный вес:  не учтён

Коэффициенты для комбинаций

$\gamma$	$\psi$	LC1	Собственный вес покрытия
1	0		
$\gamma$	$\psi$	LC2	Снег на пролёте
1	0		
$\gamma$	$\psi$	LC3	Собственный вес покрытия (прогибы)
1	1		
$\gamma$	$\psi$	LC4	Снег Длительная составляющая
1	1		

OK | Отменить | Справка

Предельные прогибы

Комбинация нагрузок (Таблица A1.4 EN 1990)

Характеристическая | L / 250

OK | Отменить | Справка

Рисунок 7.2.5 – Ввод данных для расчёта фермы по прогибам (по эксплуатационной пригодности)

Эпюры усилий  $N$ ,  $M$  и  $V$  приведены на Рисунке 7.2.6. Значения усилий в табличной форме представлены на Рисунке 7.2.7.

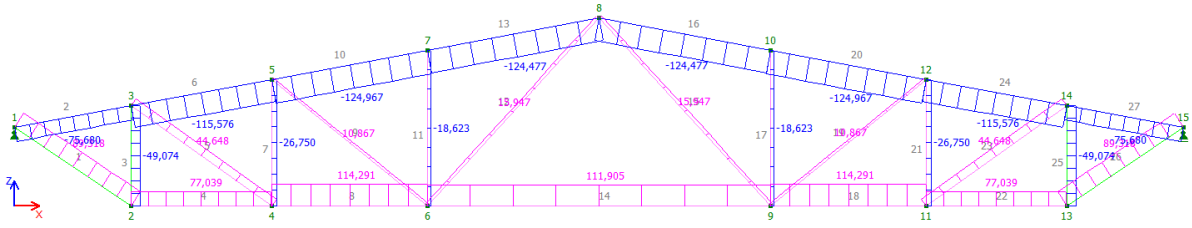


Рисунок 7.2.6,а – Сочетание 3: Эпюра  $N$

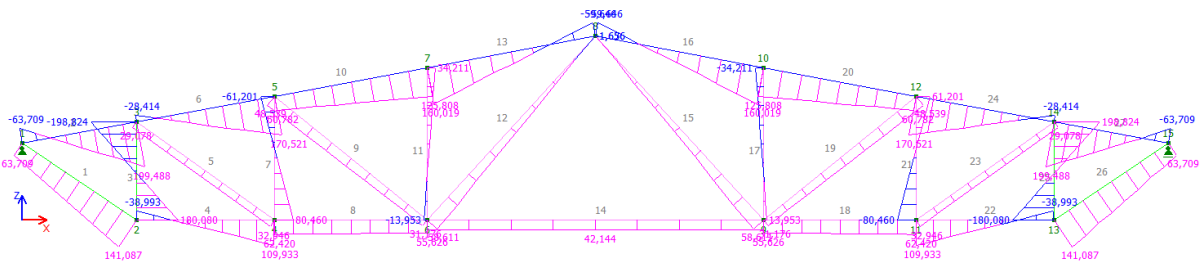


Рисунок 7.2.6,б – Сочетание 3: Эпюра  $M$

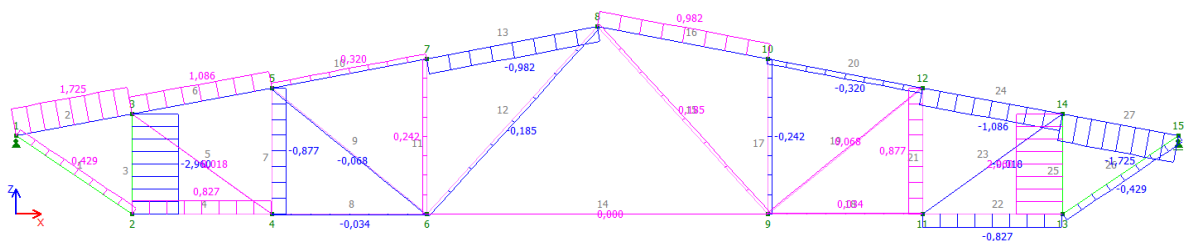


Рисунок 7.2.6,в – Сочетание 3: Эпюра  $V$

Результаты (детально)					Результаты				
Элемент	X, м	N, кН	M, кН·см	Q, кН	Элемент	-	N, кН	M, кН·см	Q, кН
1	0,000	89,318	63,709	0,429	1	начало	89,318	63,709	0,429
	0,225	89,318	73,381	0,429		конец	89,318	141,087	0,429
	0,451	89,318	83,053	0,429		min	89,318	63,709	0,429
	0,676	89,318	92,726	0,429		max	89,318	141,087	0,429
	0,901	89,318	102,398	0,429	2	начало	-75,680	-63,709	1,725
	1,127	89,318	112,070	0,429		конец	-75,680	199,488	1,725
	1,352	89,318	121,743	0,429		min	-75,680	2,091	1,725
	1,577	89,318	131,415	0,429	max	-75,680	199,488	1,725	
	1,803	89,318	141,087	0,429	3	начало	-49,074	180,080	-2,960
	2	0,000	-75,680	-63,709		1,725	конец	-49,074	-198,824
2	0,191	-75,680	-30,809	1,725	min	-49,074	-9,372	-2,960	
	0,381	-75,680	2,091	1,725	max	-49,074	-198,824	-2,960	
	0,572	-75,680	34,990	1,725	4	начало	77,039	-38,993	0,827
	0,763	-75,680	67,890	1,725		конец	77,039	109,933	0,827
	0,954	-75,680	100,790	1,725		min	77,039	-1,762	0,827
	1,144	-75,680	133,689	1,725	max	77,039	109,933	0,827	
	1,335	-75,680	166,589	1,725	5	начало	44,648	29,078	0,018
	1,526	-75,680	199,488	1,725		конец	44,648	32,946	0,018
	3	0,000	-49,074	180,080	-2,960	min	44,648	29,078	0,018
		0,160	-49,074	132,717	-2,960	max	44,648	32,946	0,018
0,320		-49,074	85,354	-2,960	6	начало	-115,576	-28,414	1,086
0,480		-49,074	37,991	-2,960		конец	-115,576	170,521	1,086
0,640		-49,074	-9,372	-2,960	min	-115,576	-3,547	1,086	
0,800		-49,074	-56,735	-2,960	max	-115,576	170,521	1,086	
0,960		-49,074	-104,098	-2,960	7	начало	-26,750	80,460	-0,877
1,120		-49,074	-151,461	-2,960		конец	-26,750	-61,201	-0,877

Рисунок 7.2.7 – Сочетание 3: Фрагмент таблицы значений усилий

Конструктивная схема фермы представлена на Рисунке 7.2.8 (отличается от расчётной нумерацией элементов в левой части фермы).

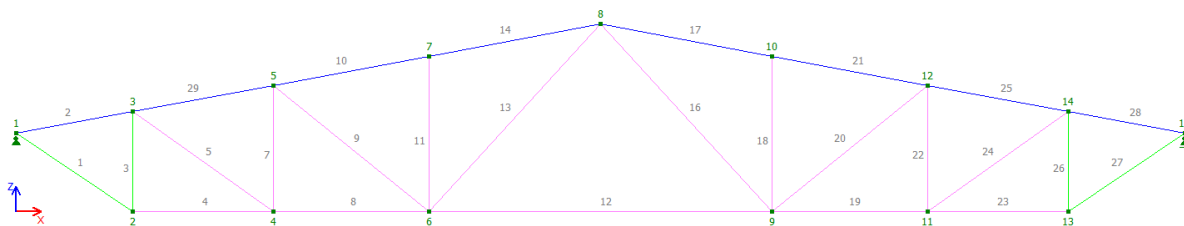


Рисунок 7.2.8 – Конструктивная схема фермы

*Конструктивный расчёт элемента 10 (верхний пояс)*

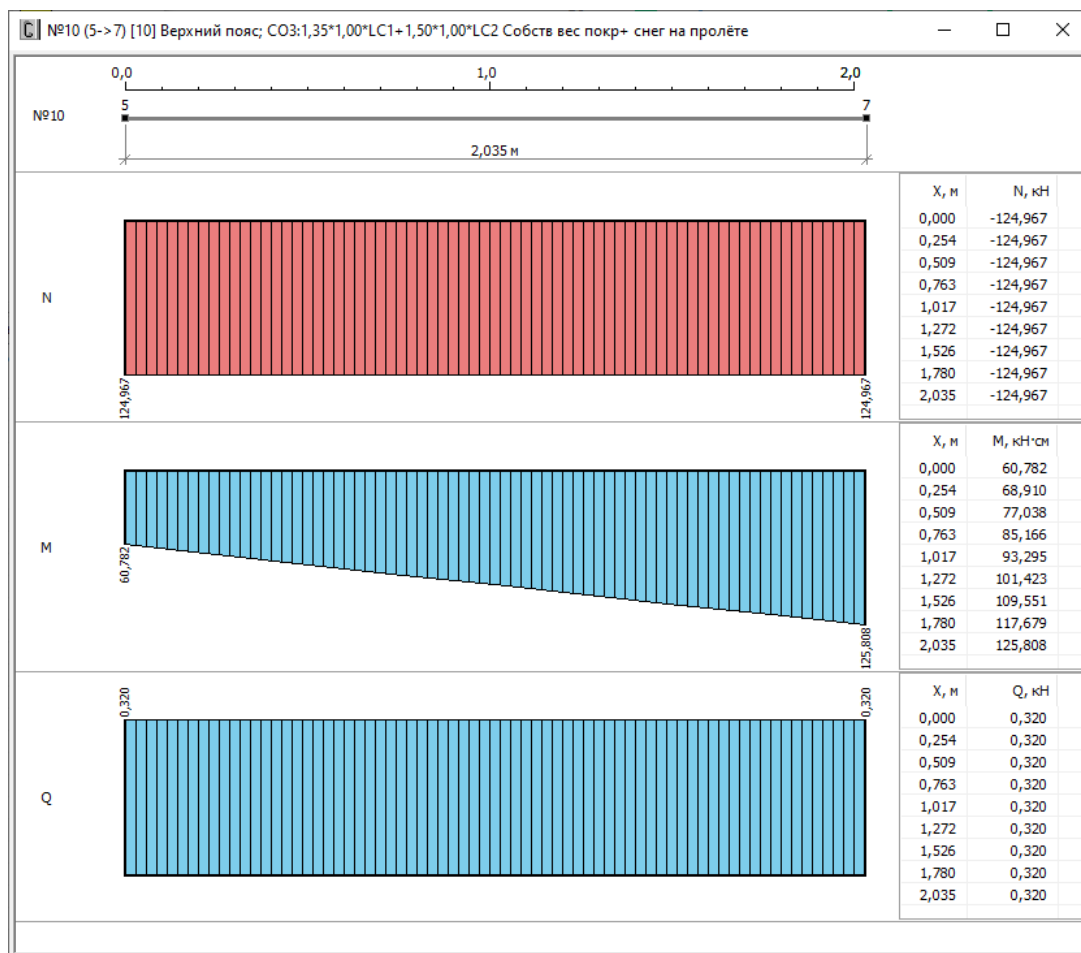


Рисунок 7.2.9 – Расчётные усилия в конструктивном элементе 10

Расчётная осевая сжимающая сила  $N_{Ed} = -124,97$  кН.

В исходных данных указывается, что при расчёте устойчивости должен учитываться максимальный момент на полной длине элемента (Рисунок 7.2.10,б). Следовательно  $M_{y,Ed} = 125,81$  кНсм.  $V_{Ed} = 0,32$  кН.

а)

б)

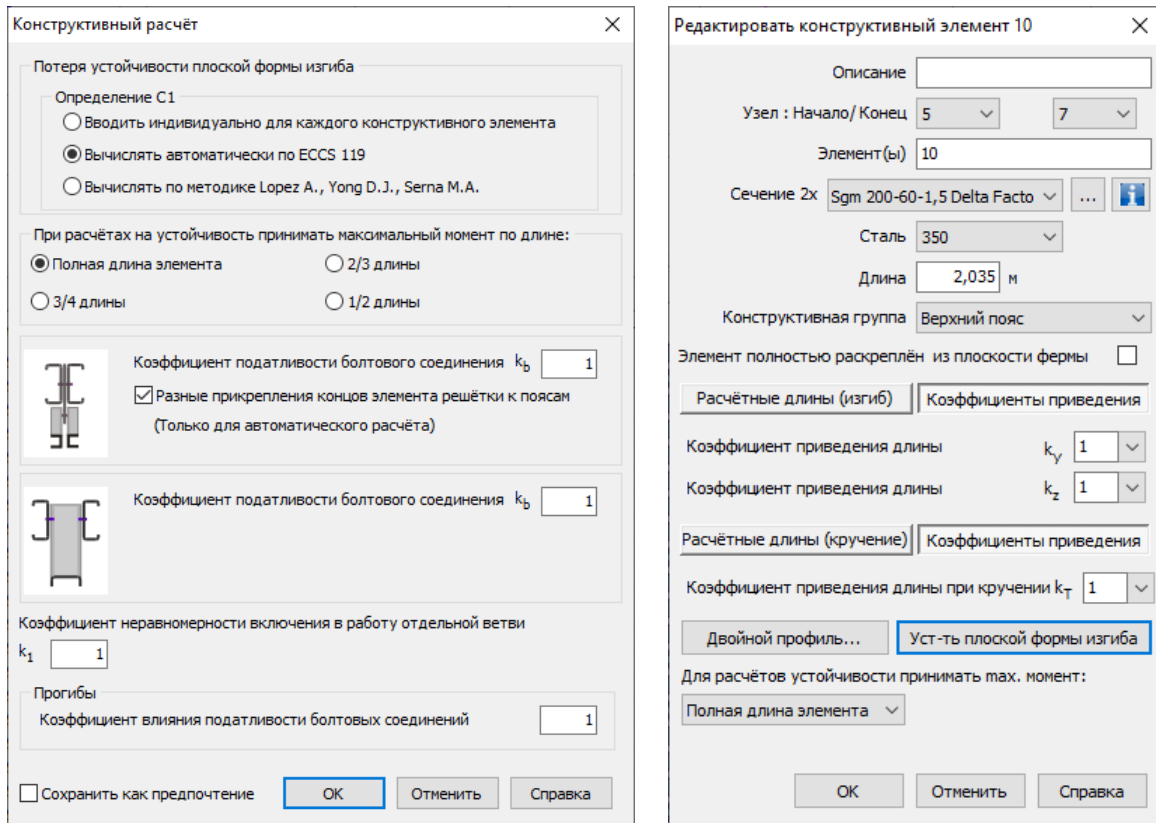


Рисунок 7.2.10 – Настройки расчёта конструктивного элемента 10:

- а) – пункт меню *Настройки - Расчёт*;
- б) – окно редактирования конструктивного элемента

Поперечное сечение элемента приведено на Рисунке 7.2.11. Размеры:  $h = 200$  мм,  $t = 1,5$  мм,  $b_f = 60$  мм,  $h_1 = 68$  мм,  $h_2 = 40$  мм,  $d = 16$  мм,  $c = 15$  мм,  $r = 3$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $S = 8$  мм (толщина узловой фасонки).

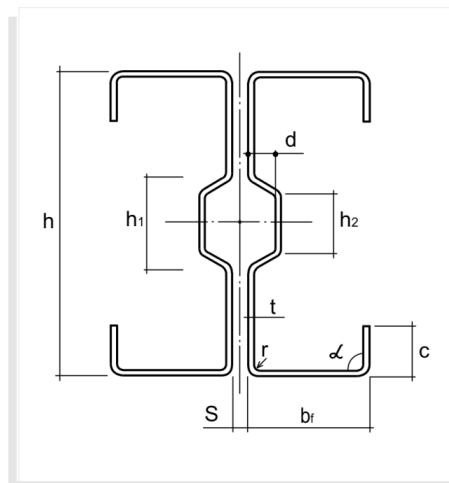


Рисунок 7.2.11 – Поперечное сечение конструктивного элемента 10

Толщина, принимаемая в расчёт  $t = 1,5 - 0,04 = 1,46$  мм.

Геометрические пропорции сечения (п. 5.2 [7])

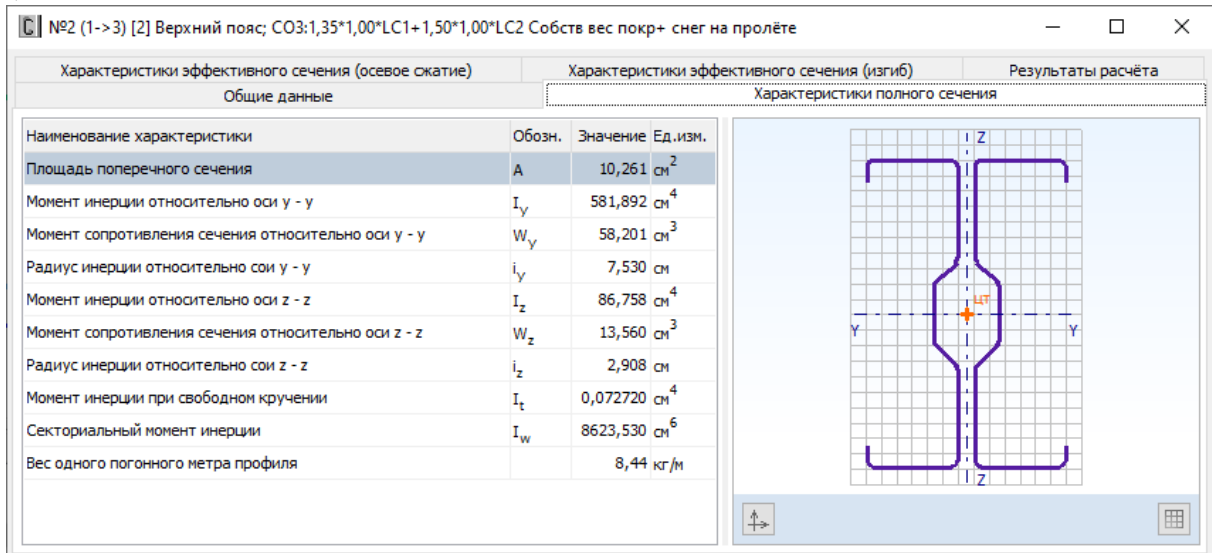
$$b/t = 60/1,46 < 60$$

$$c/t = 15/1,46 < 50$$

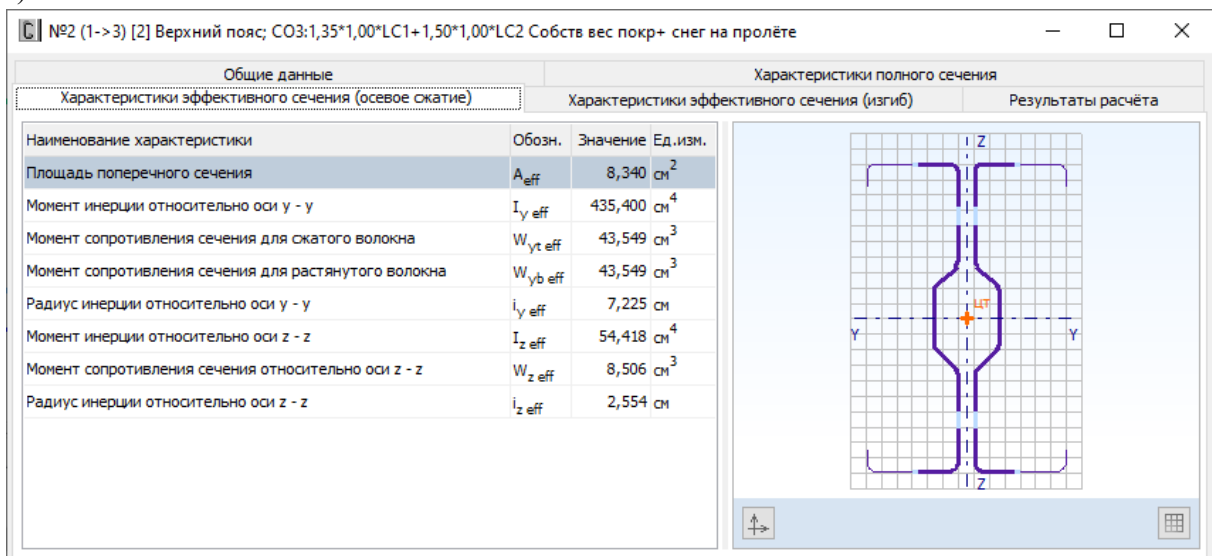
Болты М16:  $d_b = 16$  мм, класс точности В, класс прочности 8.8,  $f_{yb} = 640$  Н/мм<sup>2</sup>,  $f_{ub} = 800$  Н/мм<sup>2</sup>. Диаметр отверстия  $d_0 = 18$  мм.

Результаты расчёта геометрических характеристик сечения приведены на Рисунке 7.2.12.

а)



б)



в)

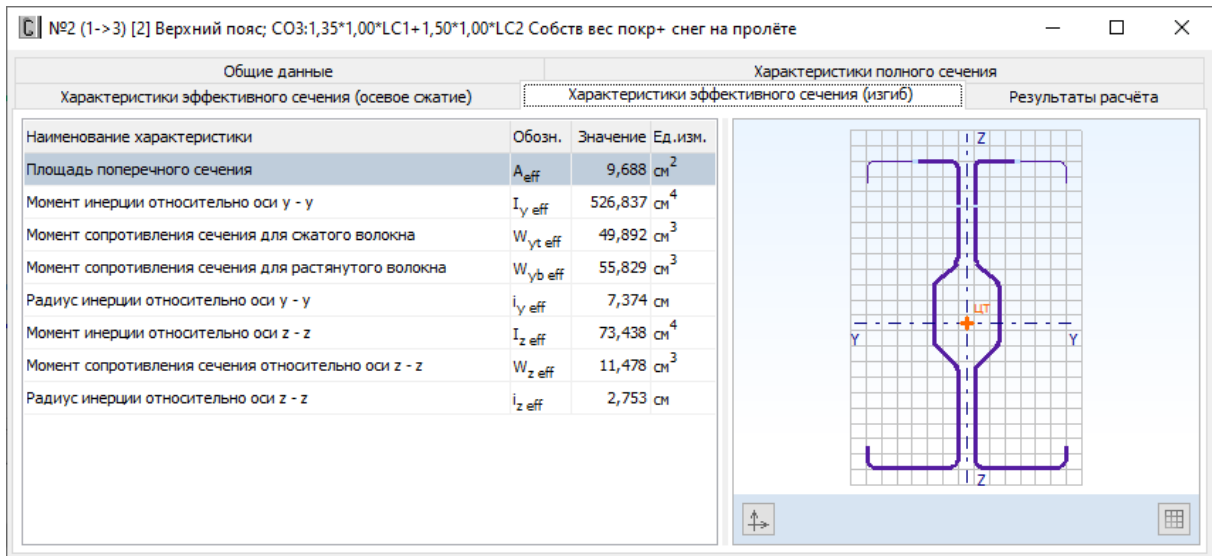


Рисунок 7.2.12 – Результаты расчёта геометрических характеристик: а) – полное сечение; б) – эффективное сечение (сжатие); в) – эффективное сечение (изгиб относительно оси у – у)

Геометрические характеристики сечения элемента  $IO$  (применительно к расчёту фермы: расчёт в плоскости фермы – значение характеристики относительно оси у – у; расчёт из плоскости фермы – значение характеристики относительно оси z – z)

Геометрические характеристики полного сечения:

$$A_g = 10,261 \text{ см}^2, I_y = 581,892 \text{ см}^4, W_y = 58,201 \text{ см}^3, i_y = 7,530 \text{ см}, I_z = 86,758 \text{ см}^4, W_z = 13,560 \text{ см}^3, i_z = 2,908 \text{ см}, I_t = 0,07272 \text{ см}^4, I_w = 8623,530 \text{ см}^6.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (осевое сжатие):

$$A_{eff} = 8,340 \text{ см}^2, I_{y,eff} = 435,400 \text{ см}^4, W_{y,eff} = 43,549 \text{ см}^3, i_{y,eff} = 7,225 \text{ см}, I_{z,eff} = 54,418 \text{ см}^4, i_{z,eff} = 2,554 \text{ см}.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно оси у - у):

$$A_{eff} = 9,688 \text{ см}^2, I_{y,eff} = 526,837 \text{ см}^4, W_{y,eff} = 49,892 \text{ см}^3, i_{y,eff} = 7,374 \text{ см}.$$

Верификация вычисления геометрических характеристик представлена в *CFSteel v.4.3. Документация. Том II. Верификационные расчёты* [27] и здесь не приводится.

*Проверка прочности при совместном действии продольной силы, изгибающего момента и поперечной силы*

*Подробные численные расчёты содержатся в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям CFSteel. Здесь расчёты приводятся в сокращённом виде.*

Расчётная несущая способность сечения при сжатии (п.6.1.3) [7]

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} = 8,34 \cdot 35 / 1 = 291,9 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность поперечного сечения при изгибе  $M_{c,Rd,com}$  (п.6.1.4 [7])

$$M_{c,Rd,com} = W_{y,eff,com} f_y / \gamma_{M0} = 49,892 \cdot 35 / 1 = 1746,22 \text{ кНсм}$$

$$\frac{124,97}{291,9} + \frac{125,81}{1746,22} = 0,50 < 1$$

*Проверка прочности при действии поперечной силы*

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1$$

$$V_{Ed} / V_{b,Rd} = 0,32 / 64,28 = 0,005 < 1$$

Устойчивость при совместном действии осевого сжатия и изгиба

Вычисление редуцированного коэффициента  $\chi_y$

$$N_{cr,y} = \frac{EI_y \pi^2}{L_{cr,y}^2} = 2912 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,y}}} = 0,317$$

$$\phi_y = 0,5 \left( 1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0,562$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,974$$

Расчётная несущая способность элемента по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y

$$N_{b,Rdy} = \frac{\chi_y A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} = 0,974 \cdot 8,34 \cdot \frac{35}{1} = 284,189 \text{ кН}$$

Вычисление редуцированного коэффициента  $\chi_z$

$$N_{cr,z} = \frac{EI_z \pi^2}{L_{cr,z}^2} = 434,21 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,z}}} = 0,82$$

$$\phi_z = 0,5 \left( 1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right) = 0,942$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0,712$$

Расчётная несущая способность элемента по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z

$$N_{b,Rdz} = \frac{\chi_z A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} = 207,859 \text{ кН}$$

Определение понижающего коэффициента при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости  $\chi_T / \chi_{TF}$

Параметр

$$i_0 = 8,072 \text{ см}$$

Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{cr,T}^2} \right) = 671,401 \text{ кН}$$

Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} = 671,401 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,TF}}} = 0,659$$

Коэффициент начальных несовершенств  $\alpha_{TF} = 0,34$

$$\phi_{TF} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{TF} (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right) = 0,795$$



$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi_{TF} + \sqrt{\phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} = 0,806$$

Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL_{cr,z})^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL_{cr,z})^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right),$$

Значение  $C_1$  в соответствии с установками расчёта (Рисунок 7.2.10,а) определяется автоматически программно.

$C_1 = 1,234$ . Сечение элемента бисимметрично, поэтому  $z_j = 0$ . Нагрузка на элемент не прикладывается, следовательно  $C_2 z_g = 0$ .

$$M_{cr} = 5770 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_y}{M_{cr}}} = 0,550$$

Коэффициент начальных несовершенств  $\alpha_{LT} = 0,34$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,711$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0,861$$

Расчёт по п.6.3.3 [6]

Уравнения взаимодействия (6.61) и (6.62) п.6.3.3 [6]

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Расчёт коэффициентов взаимодействия  $k_{yy}$  и  $k_{zy}$  по Методу 1 (Приложение А [6])

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента

$$M_{cr,0} = 4358 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента  $\bar{\lambda}_0$ :

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{y,eff} \cdot f_y}{M_{cr,0}}} = 0,633$$

Параметры:

$$\alpha_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 1$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{y,eff}} = 0,168$$

Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов (Таблица А.2) [6]:  
 $\psi = 60,782/125,808 = 0,483$

$$C_{m,y,0} = 0,79 + 0,21\psi + 0,36(\psi - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,894$$

Предельное значение условной гибкости при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента

$$\overline{\lambda}_{0,\text{lim}} = 0,2 \sqrt{C_1}^4 \sqrt{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}} = 0,219$$

При  $\overline{\lambda}_0 > \overline{\lambda}_{0,\text{lim}}$ :

$$C_{m,y} = C_{m,y0} + (1 - C_{m,y0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 0,925$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1,123$$

Параметры  $\mu_y$  и  $\mu_z$  (Таблица. А.1[6]):

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 0,999$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = 0,896$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{yy}$

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1,084$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{zy}$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 0,972$$

Нормативное значение сопротивления сжатию

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_{eff} = 291,9 \text{ кН}$$

Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту

$$M_{y,Rk} = f_y \cdot W_{y,eff} = 1746,22 \text{ кНсм}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{124,97}{0,974 \cdot 291,9/1} + 1,084 \frac{125,81}{0,861 \cdot 1746,22/1} = 0,530 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{124,97}{0,712 \cdot 291,9/1} + 0,972 \frac{125,81}{0,861 \cdot 1746,22/1} = 0,683 < 1$$

Расчёт по п.6.2.5 [7]

Условие устойчивости согласно п.6.2.5 [7]

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_y}{M_{b,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1$$

*Верификационные расчёты*

Минимальное значение  $\chi_{min} = \min(\chi_y, \chi_z, \chi_{TF}) = 0,712$

Расчётная несущая способность элемента на сжатие

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{min} f_y \cdot A_{eff}}{\gamma_{M1}} = 207,83 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность на изгиб

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} f_y \cdot W_{y,eff}}{\gamma_{M1}} = 1504 \text{ кН}$$

$$\left(\frac{124,97}{207,83}\right)^{0,8} + \left(\frac{125,81}{1504}\right)^{0,8} = 0,803 < 1$$

В Таблице 7.2.1 представлено сравнение результатов расчёта, приведённого выше, и результатов, полученных в программе.

Таблица 7.2.1 – Сопоставление результатов расчёта конструктивного элемента 10

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3 EN 1993-1-1	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
<i>Проверка прочности (п.б.1.9,6,1,10 [7])</i>						
Расчётная несущая способность сечения при сжатии	$N_{c,Rd}$	кН	6.1.3	291,9	291,91	0
Расчётная несущая способность поперечного сечения при изгибе	$M_{c,Rd}$	кНсм	6.1.4	1746,22	1746,24	0
Левая часть неравенства (6.25)			6.1.9	0,500	0,500	0
<i>Проверка прочности (п.б.1.5 [7])</i>						
Условная гибкость стенки	$\overline{\lambda}_w$	-	6.1.5	1,454	1,454	0
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$f_{bv}$	кН/см <sup>2</sup>	6.1.5	11,09	11,1	0,1
Расчётная несущая способность сечения на сдвиг	$V_{b,Rd}$	кН	6.1.5	64,28	64,27	0,02
<i>Устойчивость при совместном действии осевого сжатия и изгиба</i>						
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,y}$	кН		2912	2913,58	0,05
Условная гибкость относительно оси y - y	$\overline{\lambda}_y$	-	6.3.1.3	0,317	0,317	0
Редукционный коэффициент по изгибной форме потери устойчивости	$\chi_y$	-	6.3.1.2	0,974	0,974	0
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,z}$	кН		434,21	434,40	0,04
Условная гибкость относительно оси z - z	$\overline{\lambda}_z$	-	6.3.1.3	0,82	0,82	0
Редукционный коэффициент по изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	-	6.3.1.2	0,712	0,712	0
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	6.2.3(5)	671,401	671,658	0,04
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	6.2.3(6)	671,401	671,658	0,04
Условная гибкость при изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\overline{\lambda}_{TF}$	-		0,659	0,659	0
Коэффициент устойчивости по крутильной/ изгибно-крутильной форме	$\chi_{TF}$	-		0,806	0,806	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм		5771	5773,8	0,05
Условная гибкость	$\overline{\lambda}_{LT}$	-	6.3.2.2	0,550	0,550	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	6.3.2.2	0,861	0,861	0
<i>Расчёт п.б.3.3 [6]</i>						
<i>Вычисление коэффициентов</i>						

Верификационные расчёты

взаимодействия $k_{ij}$ по Методу 1						
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента	$M_{cr,0}$	кНсм		4358	4360,3	0,05
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\bar{\lambda}_0$	-	Приложение А	0,633	0,633	0
Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов	$C_{m,y0}$	-	Таблица А.2	0,894	0,894	0
Параметр	$a_{LT}$	-		1	1	0
Коэффициент	$C_{m,y}$	-		0,925	0,925	0
Коэффициент	$C_{m,LT}$	-		1,123	1,123	0
Параметр	$\mu_y$	-	Таблица А.1	0,999	0,999	0
Параметр	$\mu_z$	-	Таблица А.1	0,896	0,896	0
Коэффициент взаимодействия $k_{yy}$	$k_{yy}$	-	Таблица А.1	1,084	1,084	0
Коэффициент взаимодействия $k_{zy}$	$k_{zy}$	-	Таблица А.1	0,972	0,972	0
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	кН	6.3.3	291,9	291,91	0
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	кНсм	6.3.3	1746,22	1746,24	0
Левая часть неравенства (6.61)	-	-	6.3.3	0,530	0,530	0
Левая часть неравенства (6.62)	-	-	6.3.3	0,683	0,682	0
<i>Расчёт п. 6.2.5[7]</i>						
Расчётная несущая способность элемента на сжатие	$N_{b,Rd}$	кН		207,83	207,9	0
Расчётная несущая способность на изгиб	$M_{b,Rd}$	кНсм		1504	1504,2	0
Левая часть неравенства (6.36)	-	-	6.2.5	0,803	0,803	0

Результаты расчёта конструктивного элемента 10 в программном комплексе приведены на Рисунке 7.2.13 – 7.2.15.

№10 (5->7) [10] Верхний пояс; С03:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте			
Общие данные   Характеристики полного сечения   Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)   Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Результаты расчёта			
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$	0,500 < 1	✓ 6.1.10
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Rd}}{M_{y,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$	0,565 < 1	✓ 6.1.10
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{w,Rd} \leq 1$	0,005 < 1	✓ 6.1.5
<b>Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом с учётом поперечной силы</b>			
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм. Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	124,967	кН
Расчётный изгибающий момент	$M_{y,Ed}$	125,808	кН·см
Расчётная поперечная сила	$V_{Ed}$	0,320	кН
Площадь полного сечения	$A$	10,261	см <sup>2</sup>
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>
Частный коэффициент	$\gamma_{M0}$	1,000	
Площадь эффективного сечения	$A_{eff}$	8,340	см <sup>2</sup>
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{y,eff}$	49,892	см <sup>3</sup>
Расчётная несущая способность сечения при центральном сжатии	$N_{c,Rd}$	291,908	кН 6.1.3
Расчётная несущая способность поперечного сечения при изгибе	$M_{y,Rd}$	1746,237	кН·см 6.1.4
Расчётная несущая способность стенки на сдвиг	$V_{w,Rd}$	64,271	кН 6.1.5

Рисунок 7.2.13 – Результаты расчёта прочности при совместном действии продольной силы, изгибающего момента и поперечной силы

№10 (5->7) [10] Верхний пояс; С03:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2 Собств вес покр+ снег на пролёте			
Общие данные   Характеристики полного сечения   Характеристики эффективного сечения (осевое скатие)   Характеристики эффективного сечения (изгиб)   Результаты расчёта			
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$	0,500 < 1	✓ 6.1.10
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$	0,565 < 1	✓ 6.1.10
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$	0,005 < 1	✓ 6.1.5
<b>Расчёт на поперечную силу</b>			
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм. Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётная поперечная сила	$V_{Ed}$	0,320 кН	
Расчётная высота стенки	$s_w$	198,5 мм	6.1.5
Расчётная толщина стенки	$t$	1,5 мм	
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	1,454	6.1.5
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$f_{bV}$	111 Н/мм <sup>2</sup>	6.1.5
Расчётная несущая способность сечения на сдвиг	$V_{b,Rd}$	64,271 кН	(6.8)

Рисунок 7.2.14 – Результаты расчёта прочности при действии поперечной силы

## Верификационные расчёты

№10 (5->7) [10] Верхний пояс; CO3:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2				
Общие данные	Характеристики полного сечения	Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	Характеристики эффективного сечения (изгиб)	Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство		Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$		0,500 < 1	✓ 6.1.10
	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$			
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$		0,565 < 1	✓ 6.1.10
	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$			
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$		0,005 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$		0,530 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$		0,682 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{\alpha_s} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{\alpha_s} \leq 1$		0,803 < 1	✓ 6.2.5
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Геометрическая длина элемента	L	2,035 м		
Расчётная длина относительно оси y - y (в плоскости фермы)	L <sub>cr,y</sub>	2,035 м		
Расчётная длина относительно оси z - z (из плоскости фермы)	L <sub>cr,z</sub>	2,035 м		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	N <sub>cr,y</sub>	2913,578 кН		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	N <sub>cr,z</sub>	434,404 кН		
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,317		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,820		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось y - y)		a		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_y$	0,21		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Коэффициент начальных несовершенств	$\chi_y$	0,974		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось z - z)		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_z$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	0,712		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Предел текучести	f <sub>y</sub>	350 Н/мм <sup>2</sup>		
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Площадь эффективного сечения	A <sub>eff</sub>	8,340 см <sup>2</sup>		
Нормативное значение сопротивления сжатию	N <sub>Rk</sub>	291,908 кН		6.3.3 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>y</sub>	49,892 см <sup>3</sup>		
Упругий момент потери устойчивости плоской формы изгиба	M <sub>cr</sub>	5773,759 кН·см		
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,550		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости		b		6.2.4
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_{LT}$	0,34		
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,861		
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	M <sub>Rk</sub>	1746,237 кН·см		6.3.3 EN 1993-1-1
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k <sub>yy</sub>	1,084		

## Верификационные расчёты

№10 (5->7) [10] Верхний пояс; CO3:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2				
Общие данные	Характеристики полного сечения	Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	Характеристики эффективного сечения (изгиб)	Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство		Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$		0,500 < 1	✓ 6.1.10
	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Rd}}{M_{y,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$			
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$		0,565 < 1	✓ 6.1.10
	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Rd}}{M_{y,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$			
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$		0,005 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$		0,530 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$		0,682 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}}\right)^{\alpha_s} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{\alpha_s} \leq 1$		0,803 < 1	✓ 6.2.5
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Геометрическая длина элемента	L	2,035 м		
Расчётная длина относительно оси y - y (в плоскости фермы)	L <sub>cr,y</sub>	2,035 м		
Расчётная длина относительно оси z - z (из плоскости фермы)	L <sub>cr,z</sub>	2,035 м		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	N <sub>cr,y</sub>	2913,578 кН		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	N <sub>cr,z</sub>	434,404 кН		
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,317		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,820		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось y - y)		a		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_y$	0,21		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_y$	0,974		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось z - z)		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_z$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	0,712		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Предел текучести	f <sub>y</sub>	350 Н/мм <sup>2</sup>		
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Площадь эффективного сечения	A <sub>eff</sub>	8,340 см <sup>2</sup>		
Нормативное значение сопротивления сжатию	N <sub>Rk</sub>	291,908 кН		6.3.3 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	W <sub>y</sub>	49,892 см <sup>3</sup>		
Упругий момент потери устойчивости плоской формы изгиба	M <sub>cr</sub>	5773,759 кН·см		
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,550		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости		b		6.2.4
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_{LT}$	0,34		
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,861		
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	M <sub>Rk</sub>	1746,237 кН·см		6.3.3 EN 1993-1-1
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	k <sub>zy</sub>	0,972		

## Верификационные расчёты

№10 (5->7) [10] Верхний пояс; CO3:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2				
Общие данные	Характеристики полного сечения	Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	Характеристики эффективного сечения (изгиб)	Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство		Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$		0,500 < 1	✓ 6.1.10
	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Rd}}{M_{y,Ed}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$			
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$		0,565 < 1	✓ 6.1.10
	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,Rd}}{M_{y,Ed}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1$			
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$		0,005 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_{yT} N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$		0,530 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$		0,682 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{\alpha_s} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{\alpha_s} \leq 1$		0,803 < 1	✓ 6.2.5
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_y$	0,21		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_y$	0,974		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	$N_{bF,RdY}$	284,202	кН	6.3.1.1 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось z - z)		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_z$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	0,712		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	$N_{bF,RdZ}$	207,896	кН	6.3.1.1 EN 1993-1-1
Расчётная длина при расчёте на кручение	$L_T$	2,035	м	
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	671,658	кН	(6.33a)
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости в упругой стадии	$N_{cr,TF}$	671,658	кН	
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{TF}$	0,659		6.3.1.4 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент по крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\chi_{TF}$	0,806		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Расчётная несущая способность по крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{bTF,Rd}$	235,341	кН	6.3.1.1 EN 1993-1-1
Расчётная несущая способность скатого элемента (по изгибной, крутильной или изгибно-крутильной форме потери устойчивости)	$N_{b,Rd}$	207,896	кН	6.2.5
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_y$	49,892	см <sup>3</sup>	
Упругий момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	5773,759	кН·см	
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,550		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости		b		6.2.4
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_{LT}$	0,34		
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	0,861		
Расчётная несущая способность элемента при изгибе	$M_{b,Rd}$	1504,208	кН·см	6.2.5

Рисунок 7.2.15 - Результаты расчёта устойчивости конструктивного элемента 10 при совместном действии осевой силы и изгибающего момента

### Расчёт прикрепления конструктивного элемента 3 (стойка)

Поперечное сечение элемента приведено на Рисунке 7.2.16. Размеры:  $h = 200$  мм,  $t = 2,0$  мм,  $b_f = 80$  мм,  $c = 25$  мм,  $r = 3$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $S = 8$  мм (толщина фасонки).



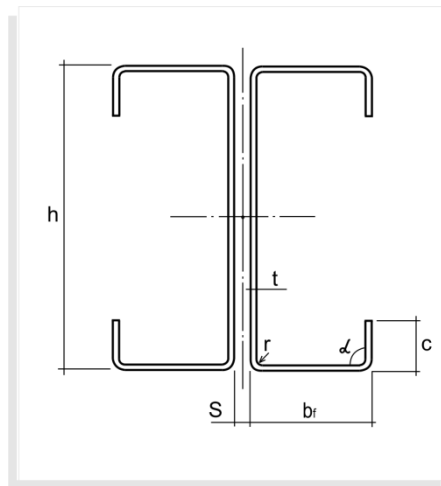


Рисунок 7.2.16 – Поперечное сечение конструктивного элемента 3

Геометрические характеристики полного сечения:

$A_g = 15,489 \text{ см}^2$ ,  $I_y = 969,536 \text{ см}^4$ ,  $W_y = 96,937 \text{ см}^3$ ,  $i_y = 7,912 \text{ см}$ ,  $I_z = 271,550 \text{ см}^4$ ,  $W_z = 32,335 \text{ см}^3$ ,  $i_z = 4,187 \text{ см}$ ,  $I_t = 0,197725 \text{ см}^4$ ,  $I_w = 30660,152 \text{ см}^6$ .

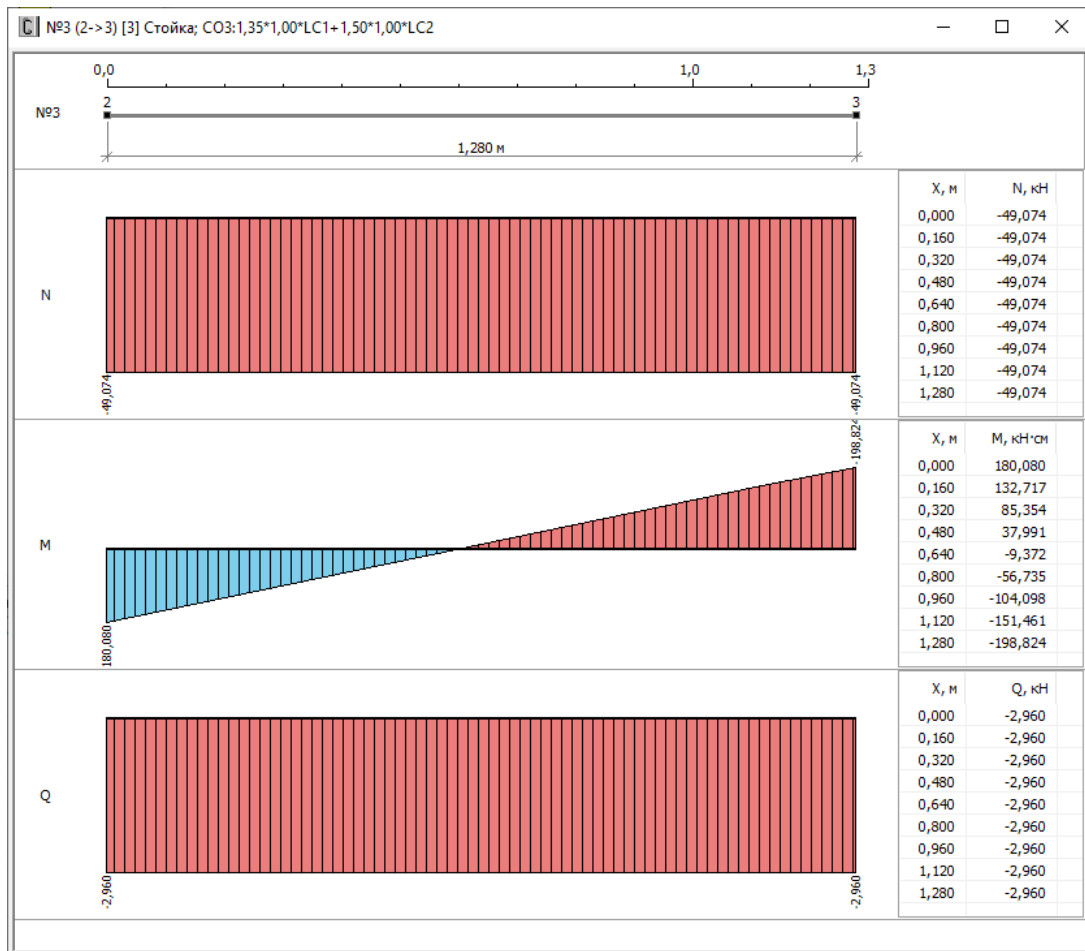


Рисунок 7.2.17 – Расчётные усилия в конструктивном элементе 3

Расчётная осевая сжимающая сила  $N_{Ed} = - 49,074 \text{ кН}$ . Расчётный изгибающий момент (начало элемента)  $M_{y,Ed} = 180,08 \text{ кНсм}$ . Расчётный изгибающий момент (конец элемента)  $M_{y,Ed} = 198,824 \text{ кНсм}$ .  $V_{Ed} = 2,96 \text{ кН}$ .

Болты М16:  $d_b = 16 \text{ мм}$ , класс точности  $B$ , класс прочности  $8.8$ ,  $f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2$ . Диаметр отверстия  $d_0 = 18 \text{ мм}$ .

В исходных данных проекта (Файл → Общие данные) отмечена необходимость проектирования узлов примыкания элементов решётки к поясам. Поэтому выполняем связанные с этим расчёты, реализованные в программе.

По условиям проектирования (Настройки → Конструктивный расчёт, Рисунок 7.2.10,а) отмечено, что количество болтов в начале и конце элемента может быть разным. На Рисунке 7.2.18 Приведены исходные данные для проектирования прикрепления элемента с отметкой об автоматическом назначении количества болтов.

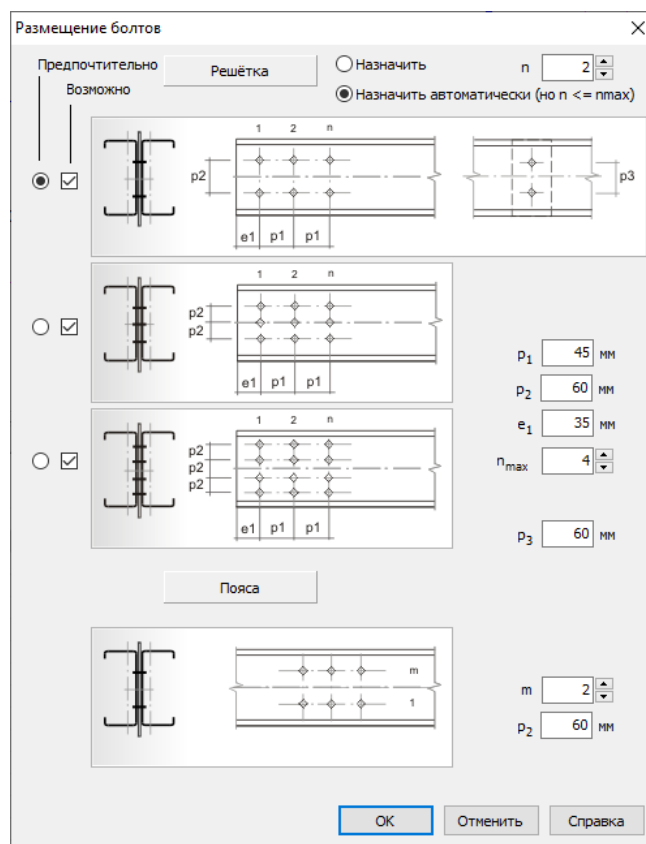


Рисунок 7.2.18 - Исходные данные для проектирования прикрепления элемента

*Проверка на смятие элемента в месте прикрепления (конец элемента)*

Проверка производится в соответствии с неравенством

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1$$

При автоматическом назначении количества болтов подбор начинается с минимального количества рядов вдоль оси элемента  $n = 1$  и предпочтительного количества рядов в поперечном направлении (по высоте сечения). В данном случае – 2. Предпочтительное и возможное количество рядов не должны вступать в противоречие. Если проверка удовлетворяется, то принимаются эти параметры. Если проверка не удовлетворяется, то  $n$  увеличивается на 1; и так далее до  $n_{max}$ . Если и при  $n_{max}$  проверка не удовлетворяется, то

увеличивается количество рядов в поперечном направлении и действия повторяются. Расчёт останавливается при минимальном количестве болтов, удовлетворяющем вышеприведённому условию.

На первом этапе принимаем  $n = 1$ :

$$F_N = 49,074/2 = 24,537 \text{ кН}$$

$$F_V = 2,96/2 = 1,48 \text{ кН}$$

$$M_N = 198,824 \cdot 3/18 = 33,137 \text{ кН}$$

$$M_V = 0$$

$$F_{v,Ed} = 57,693 \text{ кН}$$

По таблице 8.4 [7]

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha_b k_t f_u dt}{\gamma_{M2}} = 38,416 \text{ кН}$$

где

$$\alpha_b = 3,5/3 \cdot 1,6 = 0,729; \quad k_t = 1,0$$

$$\frac{57,693}{38,416} = 1,502 > 1$$

Принимаем  $n=2$

$$F_N = 49,074/4 = 12,268 \text{ кН}$$

$$F_V = 2,96/4 = 0,74 \text{ кН}$$

$$M_N = 10,604 \text{ кН}$$

$$M_V = 7,953 \text{ кН}$$

$$F_{v,Ed} = 24,469 \text{ кН}$$

$$\frac{24,469}{38,416} = 0,637 < 1$$

Принимаем два продольных ряда с двумя рядами болтов по высоте стенки. Суммарное количество болтов в соединении  $n_b = 4$ . На Рисунке 7.2.19 приведены результаты данного расчёта, полученные в программе.

Общие данные		Характеристики полного сечения		
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)		Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3	
Проверка элемента решётки на смятие в месте прикрепления в его начале	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,606 < 1	✓ Табл. 8.4	
Проверка элемента решётки на смятие в месте прикрепления в его конце	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,637 < 1	✓ Табл. 8.4	
Проверка по срезу болтов в начале элемента	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,193 < 1	✓ Табл. 8.4	
Проверка по срезу болтов в конце элемента	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,203 < 1	✓ Табл. 8.4	

Проверка элемента решётки на смятие в месте прикрепления в его конце				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед. изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	49,074	кН	
Расчётный изгибающий момент	$M_{y,Ed}$	198,824	кН·см	
Расчётная поперечная сила	$V_{Ed}$	2,960	кН	
Расчётное усилие на один болт	$F_{v,Ed}$	24,469	кН	
Расчётная толщина элемента	$t$	2,0	мм	
Диаметр болта	$d$	16,0	мм	
Диаметр отверстия	$d_0$	18,0	мм	
Предел прочности стали	$f_u$	420	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M2}$	1,250		
Расчётная несущая способность болта	$F_{b,Rd}$	38,416	кН	Табл. 8.4
Количество болтов в прикреплении	$n_b$	4		
Количество рядов болтов в перпендикулярном направлении		2		
Количество рядов болтов в направлении вдоль элемента		2		

Рисунок 7.2.19 – Результаты расчёта на смятие в конце конструктивного элемента 3

*Проверка на срез болтов в конце элемента*

Проверка производится в соответствии с неравенством

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1$$

Расчётная несущая способность обного болта (класс прочности 8.8) при двух площадках среза (Таблица 8.4 [7])

$$F_{v,Rd} = 2 \cdot 0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2} = 120,576 \text{ кН}$$

$$\frac{24,469}{120,576} = 0,203 < 1$$

На Рисунке 7.2.20 приведены результаты данного расчёта, полученные в программе.

Общие данные		Характеристики полного сечения	
Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)		Характеристики эффективного сечения (изгиб)	
		Результаты расчёта	
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 199-3
Проверка элемента решётки на смятие в месте прикрепления в его начале	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,606 < 1	✓ Табл. 8.4
Проверка элемента решётки на смятие в месте прикрепления в его конце	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,637 < 1	✓ Табл. 8.4
Проверка по срезу болтов в начале элемента	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,193 < 1	✓ Табл. 8.4
Проверка по срезу болтов в конце элемента	$F_{v,Ed} / F_{b,Rd} \leq 1$	0,203 < 1	✓ Табл. 8.4

Проверка по срезу болтов в конце элемента			
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.
Расчётное усилие на один болт	$F_{v,Ed}$	24,469	кН
Предел прочности стали болта	$V_{ub}$	800	Н/мм <sup>2</sup>
Расчётная площадь сечения болта по срезу	$A_s$	1,570	см <sup>2</sup>
Частный коэффициент	$\gamma_{M2}$	1,250	
Несущая способность одного болта по срезу	$F_{v,Rd}$	120,576	кН

Рисунок 7.2.20 – Результаты расчёта по срезу болтов в конце конструктивного элемента 3

Проверка фермы по прогибам (SLS)

Условие ненаступления предельного состояния

$$f_{max} \leq f_u$$

Прогибы фермы от комбинации воздействий *CO4* приведены на Рисунке 7.2.21.

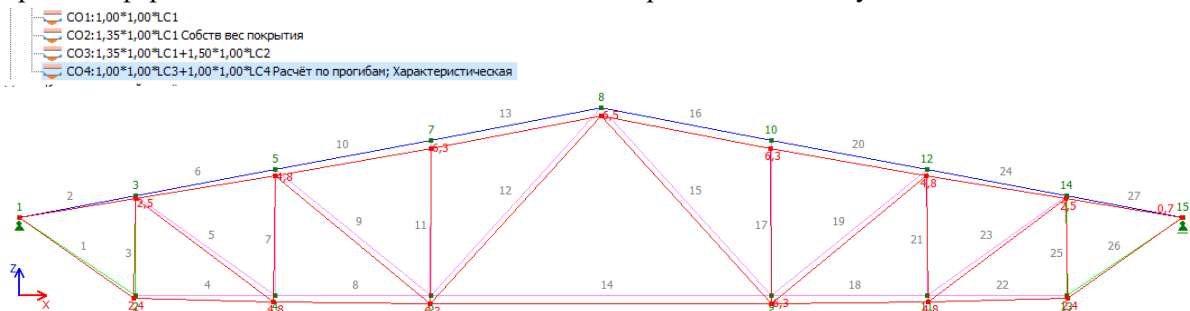


Рисунок 7.2.21 – Прогибы фермы от комбинации воздействий 4 (*CO4*)

$$f_{max} = k \cdot f_6 = 1 \cdot 6,3 \text{ мм.}$$

$$f_u = 1/250 \cdot L = 60 \text{ мм.}$$

6,3 мм < 60 мм - условие выполняется.

Результаты проверки фермы по эксплуатационной пригодности приведены на Рисунке 7.2.22.

Результаты проверок						
Элементы		Комбинации		Эксплуатационная пригодность		
Комбинация воздействий	Неравенство	Значение	Ед.изм.	γ	К	Узел
CO4: 1,00*1,00*LC3+1,00*1,00*LC4 Расчёт по прогибам; Характеристическая	$f_{max} \leq f_u$	6,3 < 60	мм	✓	1	1

Рисунок 7.2.22 – Результаты проверки фермы от комбинации воздействий 4 (*CO4*)

### 7.3. Ферма из одинарных профилей. Расчёт по нормам СП

Выполнить проверки конструктивного элемента 2 фермы, схема которой представлена на Рисунке 7.3.1. Пролёт фермы  $6\text{ м}$ , высота в коньке  $1\text{ м}$ . Пояса выполнены из С-образного профиля С126-180-3, решётка из С-образного профиля С120-60-1,5 (Рисунок 7.3.2). Профили выполнены из стали 350 по ГОСТ 14918 - 2020 с  $R_{yn} = 350\text{ Н/мм}^2$ ,  $R_{in} = 420\text{ Н/мм}^2$  и  $\gamma_m = 1,05$ . Профили располагаются горизонтально (Система ферм 3). Расчёты выполнить по нормам СП 260.1325800.2016 [1].

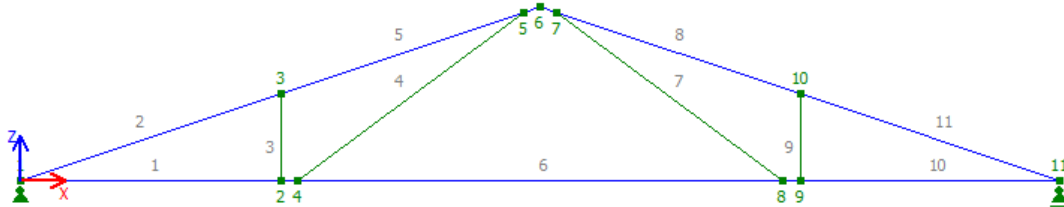
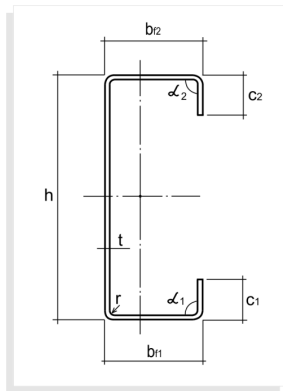


Рисунок 7.3.1 – Схема фермы



пояса

$$h = 126\text{ мм}$$

$$t = 3\text{ мм}$$

$$b = 180\text{ мм } c = 20\text{ мм } r = 4\text{ мм } \alpha = 90^\circ$$

решётка

$$h = 120\text{ мм}$$

$$t = 1,5\text{ мм}$$

$$b = 60\text{ мм } c = 16\text{ мм } r = 3\text{ мм } \alpha = 90^\circ$$

Рисунок 7.3.2 – Сечения элементов фермы

Нагрузка на ферму прикладывается через прогоны, опирающиеся сверху в узлах 3, 5, 7 и 10, а также в середине элементов верхнего пояса (Рисунок 7.3.3).

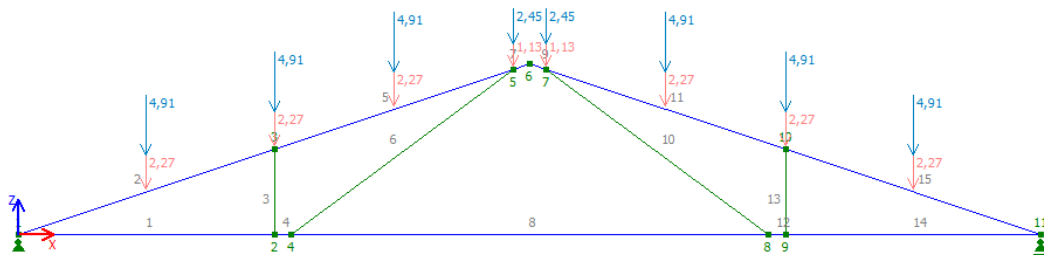


Рисунок 7.3.3 – Нагрузка на ферму

Конструкция покрытия такова, что раскрепляет верхний пояс фермы из его плоскости на опорах и в местах опирания прогонов. Расчётные длины элемента 2:

$$\text{в плоскости фермы } l_{ef,x} = \mu_x \cdot L = 1 \cdot 158,1 = 158,1\text{ см}$$

$$\text{из плоскости фермы } l_{ef,y} = \mu_y \cdot L = 0,5 \cdot 158,1 = 79,1\text{ см}$$

$$l_{cr,T} = k_T \cdot L = 1 \cdot 158,1 = 158,1\text{ см}$$

$k$  – коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений элемента от поворота из плоскости изгиба (фермы):  $k = 1$ .

$k_w$  - коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений от депланации:  $k_w = 1$ .

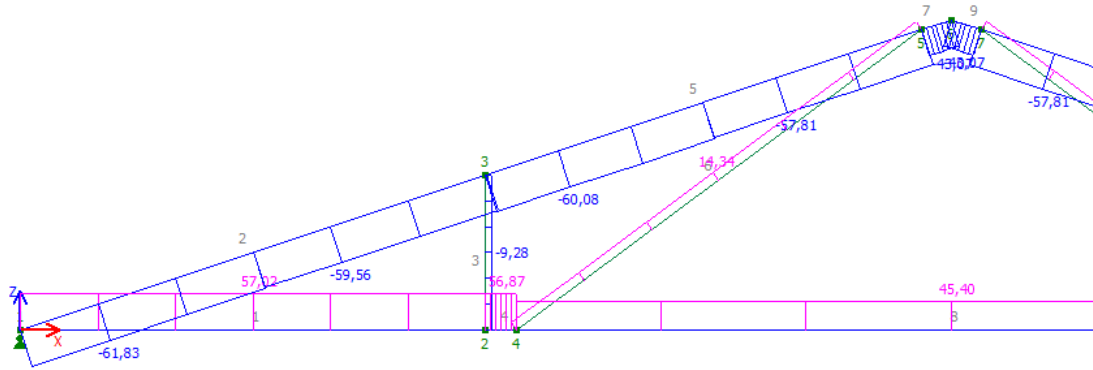
## Верификационные расчёты

$$l_{cr,LT} = k \cdot L / 2 = 1 \cdot 79,1 = 79,1 \text{ см}$$

Коэффициент условий работы при расчётах на прочность  $\gamma_c = 1$ ; при расчётах на устойчивость  $\gamma_c = 0,9$ .

Данное конструктивное решение приведено исключительно в целях верификации расчёта элементов из одинарных профилей в составе фермы на совместное действие сжатия, изгиба и поперечной силы.

Эпюры усилий  $N$ ,  $M$  и  $Q$  фрагмента фермы приведены на Рисунке 7.3.4. На Рисунке 7.3.5 представлены эпюры усилий для элемента 2.



Перемещения узлов				Результаты (детально)				Результаты			
Узел	X, мм	Z, мм	Угол поворота	Элемент	X, м	N, кН	M, кН·см	Q, кН	Элемент	N, кН	
1	0,0	0,0	0,00311	1	0,000	57,02	98,88	0,67	1	начало	57,02
2	0,3	-3,5	0,00130		0,250	57,02	115,62	0,67		конец	57,02
3	0,8	-3,5	0,00085		0,500	57,02	132,37	0,67	min	57,02	
4	0,3	-3,6	0,00117		0,750	57,02	149,11	0,67	max	57,02	
5	0,5	-3,4	-0,00027		1,000	57,02	165,85	0,67	2	начало	-61,83
6	0,5	-3,4	0,00000		1,250	57,02	182,59	0,67		конец	-59,56
7	0,5	-3,4	0,00027	2	1,500	57,02	199,33	0,67	min	-59,56	
8	0,7	-3,6	-0,00117		0,000	-61,83	-98,88	5,19	max	-61,83	
9	0,7	-3,5	-0,00130		0,264	-61,83	37,81	5,19	3	начало	-9,28
10	0,1	-3,5	-0,00085		0,527	-61,83	174,51	5,19		конец	-9,28
11	1,0	0,0	-0,00311		0,790	-61,83	311,17	5,19	min	-9,28	
					0,790	-59,56	311,17	-1,63	max	-9,28	
				0,791	-59,56	311,16	-1,63	4	начало	56,87	
				1,054	-59,56	268,17	-1,63		конец	56,87	
				1,318	-59,56	225,18	-1,63	min	56,87		
				1,581	-59,56	182,19	-1,63	max	56,87		
				3	0,000	-9,28	-0,22	0,15	5	начало	-60,08
					0,083	-9,28	1,04	0,15		конец	-57,81

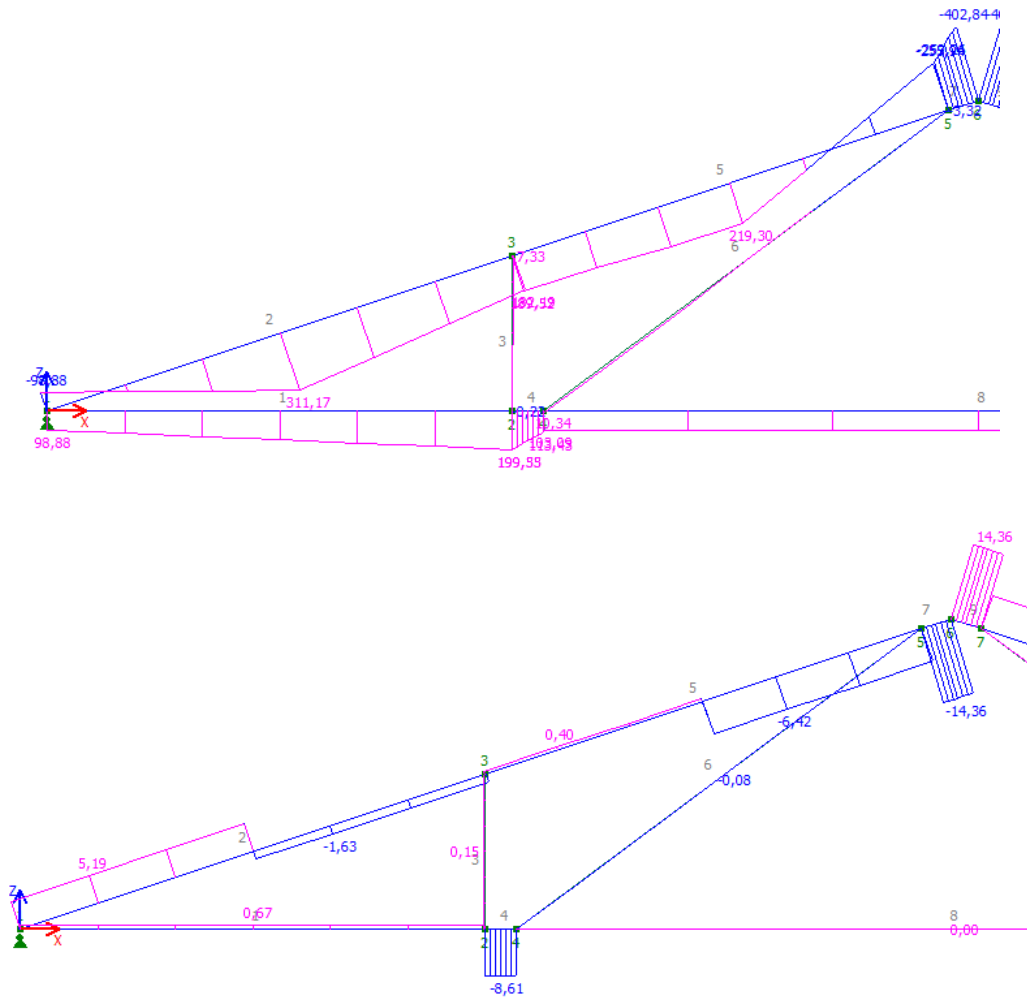


Рисунок 7.3.4 – Эпюры усилий  $N$ ,  $M$  и  $Q$  фрагмента фермы





Рисунок 7.3.5 – Эпюры и значения усилий для элемента 2

Расчётная осевая сжимающая сила  $N = -61,83$  кН.

В исходных данных указывается (Рисунок 7.3.7), что при расчёте устойчивости должен учитываться максимальный момент на полной длине элемента. Следовательно  $M_x = 311,17$  кНсм.

Расчётная поперечная сила  $Q = 5,19$  кН.

Результаты вычисления геометрических характеристик приведены на Рисунке 7.3.6.

а)

## Верификационные расчёты

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; CO1:1,00°LC1+1,00°LC2 Сочетание 1

Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Наименование характеристики	Обозн.	Значение	Ед.изм.		
Площадь поперечного сечения	A	14,935	см <sup>2</sup>		
Момент инерции относительно оси x - x	I <sub>x</sub>	461,627	см <sup>4</sup>		
Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	W <sub>хн</sub>	73,297	см <sup>3</sup>		
Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	W <sub>хв</sub>	73,297	см <sup>3</sup>		
Радиус инерции относительно оси x - x	i <sub>x</sub>	5,560	см		
Момент инерции относительно оси y - y	I <sub>y</sub>	588,207	см <sup>4</sup>		
Момент сопротивления сечения для левого волокна	W <sub>улев</sub>	78,537	см <sup>3</sup>		
Момент сопротивления сечения для правого волокна	W <sub>усп</sub>	55,985	см <sup>3</sup>		
Радиус инерции относительно оси y - y	i <sub>y</sub>	6,276	см		
Расстояние от левого волокна стенки до центра тяжести сечения	z <sub>0</sub>	7,492	см		
Расстояние от нижнего волокна до центра тяжести сечения	Y <sub>цт</sub>	6,300	см		
Положение центра изгиба относительно центра тяжести по оси x - x	X <sub>ци</sub>	-16,271	см		
Положение центра изгиба относительно центра тяжести по оси y - y	Y <sub>ци</sub>	0,000	см		
Момент инерции при свободном кручении	I <sub>t</sub>	0,444342	см <sup>4</sup>		
Секториальный момент инерции	I <sub>w</sub>	20991,992	см <sup>6</sup>		
Вес одного погонного метра профиля		12,00	кг/м		

б)

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; CO1:1,00°LC1+1,00°LC2 Сочетание 1

Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Наименование характеристики	Обозн.	Значение	Ед.изм.		
Площадь поперечного сечения	A <sub>ef</sub>	8,733	см <sup>2</sup>		
Момент инерции относительно оси x - x	I <sub>x ef</sub>	251,726	см <sup>4</sup>		
Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	W <sub>хв ef</sub>	39,969	см <sup>3</sup>		
Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	W <sub>хн ef</sub>	39,969	см <sup>3</sup>		
Радиус инерции относительно оси x - x	i <sub>x ef</sub>	5,369	см		
Момент инерции относительно оси y - y	I <sub>y ef</sub>	303,006	см <sup>4</sup>		
Момент сопротивления сечения для левого волокна	W <sub>улев ef</sub>	61,620	см <sup>3</sup>		
Момент сопротивления сечения для правого волокна	W <sub>усп ef</sub>	23,333	см <sup>3</sup>		
Радиус инерции относительно оси y - y	i <sub>y ef</sub>	5,890	см		
Расстояние от левого волокна стенки до центра тяжести сечения	z <sub>0 ef</sub>	4,919	см		
Расстояние от нижнего волокна до центра тяжести сечения	Y <sub>цт ef</sub>	6,300	см		

в)

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; CO1:1,00°LC1+1,00°LC2 Сочетание 1

Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Наименование характеристики	Обозн.	Значение	Ед.изм.		
Площадь поперечного сечения	A <sub>ef</sub>	14,467	см <sup>2</sup>		
Момент инерции относительно оси x - x	I <sub>x ef</sub>	461,529	см <sup>4</sup>		
Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	W <sub>хв ef</sub>	73,282	см <sup>3</sup>		
Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	W <sub>хн ef</sub>	73,282	см <sup>3</sup>		
Радиус инерции относительно оси x - x	i <sub>x ef</sub>	5,648	см		
Момент инерции относительно оси y - y	I <sub>y ef</sub>	562,147	см <sup>4</sup>		
Момент сопротивления сечения для левого волокна	W <sub>улев ef</sub>	72,749	см <sup>3</sup>		
Момент сопротивления сечения для правого волокна	W <sub>усп ef</sub>	54,743	см <sup>3</sup>		
Радиус инерции относительно оси y - y	i <sub>y ef</sub>	6,234	см		
Расстояние от левого волокна стенки до центра тяжести сечения	z <sub>0 ef</sub>	7,729	см		
Расстояние от нижнего волокна до центра тяжести сечения	Y <sub>цт ef</sub>	6,300	см		

г)

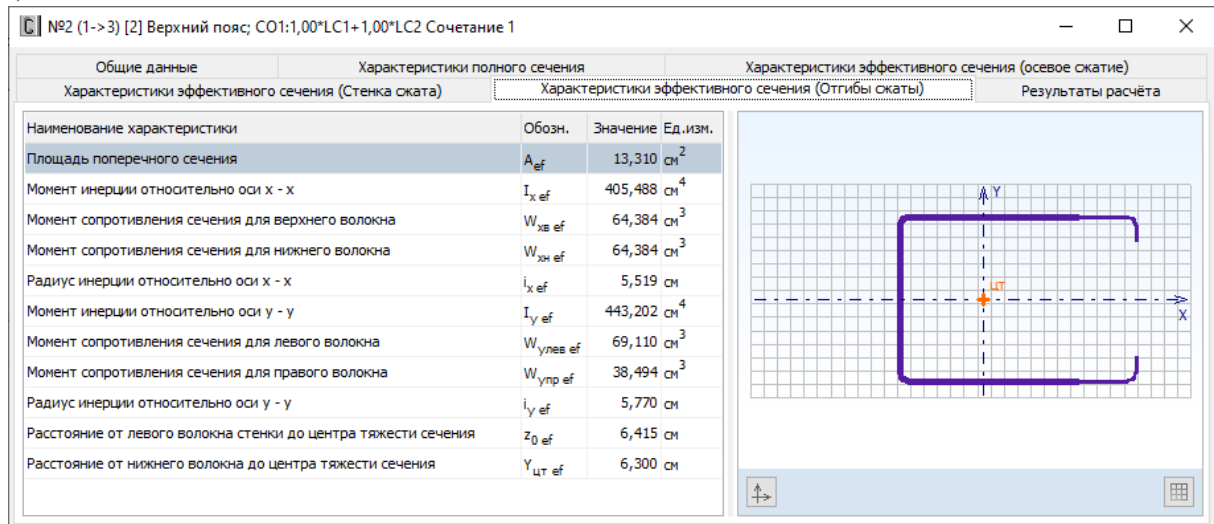


Рисунок 7.3.6 – Результаты расчёта геометрических характеристик: а) – полное сечение; б) – эффективное сечение (сжатие); в) – эффективное сечение (изгиб относительно оси y – y (стенка сжата)); г) – эффективное сечение (изгиб относительно оси y – y (отгибы сжаты))

Геометрические характеристики сечения элемента 2 применительно к расчёту фермы приведены ниже. Расчёт в плоскости фермы – значение характеристик относительно оси x – x; расчёт из плоскости фермы – значение характеристик относительно оси y – y.

Геометрические характеристики полного сечения:

$$A_g = 14,94 \text{ см}^2, I_x = 588,21 \text{ см}^4, W_{x,max} = 78,54 \text{ см}^3, W_{x,min} = 55,99 \text{ см}^3; i_x = 6,28 \text{ см}, I_y = 461,63 \text{ см}^4, W_y = 73,30 \text{ см}^3, i_y = 5,56 \text{ см}, I_t = 0,444 \text{ см}^4, I_w = 20992 \text{ см}^6, y_0 = -16,27 \text{ см}.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (осевое сжатие):

$$A_{ef} = 8,73 \text{ см}^2, I_{x,ef} = 303,01 \text{ см}^4, i_{x,ef} = 5,89 \text{ см}, I_{y,ef} = 251,73 \text{ см}^4, i_{y,ef} = 5,37 \text{ см}, eN = -2,57 \text{ см}.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно оси, параллельной стенке – стенка сжата):

$$A_{ef} = 14,47 \text{ см}^2, I_{x,ef} = 562,15 \text{ см}^4, W_{x,max} = 72,75 \text{ см}^3, W_{x,min} = 54,74 \text{ см}^3, i_{x,ef} = 6,23 \text{ см}.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно оси, параллельной стенке – отгибы сжаты):

$$A_{ef} = 13,31 \text{ см}^2, I_{x,ef} = 443,20 \text{ см}^4, W_{x,max} = 69,11 \text{ см}^3, W_{x,min} = 38,49 \text{ см}^3, i_{x,ef} = 6,77 \text{ см}.$$

Верификация вычисления геометрических характеристик представлена в *CFSteel v.4.3. Документация. Том II. Верификационные расчёты* [27] и здесь не приводится.

Настройки расчёта конструктивного элемента 2 приведены на Рисунке 7.3.7.

а)

б)

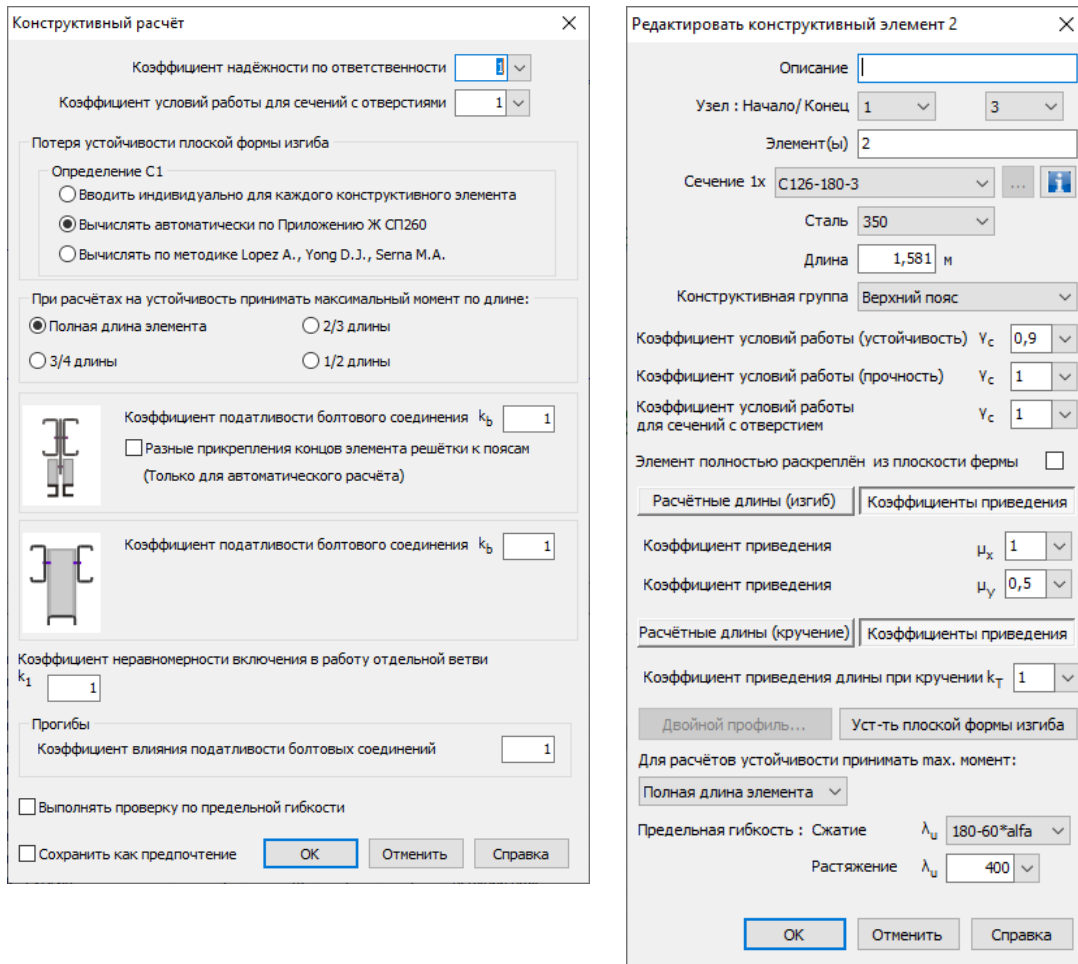


Рисунок 7.3.7 – Настройки расчёта конструктивного элемента 2:

а) – пункт меню *Настройки - Расчёт*;

б) – окно редактирования конструктивного элемента

*Проверка прочности при совместном действии продольной силы, изгибающего момента и поперечной силы (п. 7.7.4 [1])*

$$\frac{N}{A_{ef} R_{y,Q} \gamma_c} + \frac{M_x + N|e_N|}{W_{x,ef} R_{y,Q} \gamma_c} \leq 1$$

*Подробные численные расчёты содержатся в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям CFSteel. Здесь расчёты приводятся в сокращённом виде.*

$$\frac{61,83}{8,73 \cdot 33,33 \cdot 1} + \frac{311,17 + 61,83 \cdot 2,57}{38,49 \cdot 33,33 \cdot 1} = 0,578 < 1$$

*Проверка прочности при действии поперечной силы*

$$Q / Q_w = 5,19 / 201,5 = 0,026 < 1$$

*Проверка устойчивости при совместном действии осевого сжатия и изгиба*

$$N_{cr,x} = \frac{EI_{x,g} \pi^2}{l_{ef,x}^2} = 4784 \text{ кН}$$

$$N_{cr,y} = \frac{EI_{y,g}\pi^2}{l_{ef,y}^2} = 15020 \text{ кН}$$

Определение понижающего коэффициента  $\varphi_x$  при плоской форме потери устойчивости относительно оси  $x-x$

Приведённая гибкость относительно оси  $x-x$  (п.7.7.8.1 [1])

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_{ef,x}}{\pi \cdot i_x} \sqrt{\frac{R_y A_{ef}}{EA_g}} = 0,247$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости  $b$ . Согласно п.7.1.3 [2]

$$\bar{\lambda}_x = \pi \cdot \bar{\lambda}_x = 0,775$$

$$\delta_x = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_x) + \bar{\lambda}_x^2 = 910,764$$

$$\varphi_x = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}_x^2} \right)}{\bar{\lambda}_x^2} = 0,969$$

Определение понижающего коэффициента  $\varphi_y$  при плоской форме потери устойчивости относительно оси  $y-y$

Приведённая гибкость относительно оси  $y-y$  (п.7.7.8.1 [1])

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef,y}}{\pi \cdot i_y} \sqrt{\frac{R_y A_{ef}}{EA_g}} = 0,139$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости  $b$ . Согласно п.7.1.3 [2]

$$\bar{\lambda}_y = \pi \cdot \bar{\lambda}_y = 0,437$$

$$\delta_y = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_y) + \bar{\lambda}_y^2 = 10,055$$

$$\varphi_y = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}_y^2} \right)}{\bar{\lambda}_y^2} = 1$$

Определение понижающего коэффициента при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости  $\varphi_T/\varphi_{TF}$

Параметр

$$i_0 = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 + y_0^2} = 18,304 \text{ см}$$

Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_{cr,T}^2} \right) = 520,1 \text{ кН}$$

$$\beta = 1 - \left( \frac{y_0}{i_0} \right)^2 = 0,21$$

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left( 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left( 1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left( \frac{y_0}{i_0} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right) = 506,18 \text{ кН}$$

Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{ef} R_y}{N_{cr,TF}}} = 0,758$$

В соответствии с Таблицей 7.5 [1] кривая потери устойчивости  $b$  (п.7.7.8.4 [1])

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \pi \bar{\lambda}_{TF}) + (\pi \bar{\lambda}_{TF})^2 = 17,267$$

$$\varphi_{TF} = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 (\pi \bar{\lambda}_{TF})^2} \right)}{(\pi \bar{\lambda}_{TF})^2} = 0,763$$

$$\varphi_{min} = \min(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_{TF}) = 0,763$$

Определение понижающего коэффициента при потере устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$  согласно п.7.7.9 [1]

Вычисление упругого критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба производится по Приложению Г [1] для моносимметричного сечения

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_y}{(l_{cr,LT})^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_y} + \frac{(l_{cr,LT})^2 GI_t}{\pi^2 EI_y}} + (C_2 y_g - C_3 y_j)^2 - (C_2 y_g - C_3 y_j) \right),$$

Значение  $C_1$  в соответствии с установками расчёта (Рисунок 7.3.7,а) определяется автоматически программно. В случае, если на элемент прикладывается нагрузка, то вычисление  $C_1$  производится по [30] в соответствии с эпюрой распределения момента по длине.

$$C_1 = 1,194; C_2 = 1; C_3 = 1.$$

Параметр  $y_j$  зависит от того, какая часть сечения сжата при изгибе элемента, стенка или отгибы. Эпюра моментов может менять свой знак по длине элемента и, таким образом, в элементе одновременно могут быть сжаты и отгибы и стенка. В программе принимается наиболее неблагоприятный вариант.

$$y_j = -8,38 \text{ см}$$

Нагрузка на элемент прикладывается сверху (Рисунок 7.3.8), следовательно  $y_g = -8,93 \text{ см}$ .



Рисунок 7.3.8 – Схема приложения внешней нагрузки на элемент

$$M_{cr} = 131500 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{x,ef} R_y}{M_{cr}}} = 0,099$$

Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$  в соответствии с п.7.7.9.2 [1] может быть вычислен по формуле

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

или по СП 16 [2] как  $\varphi$  при типе сечения  $b$  и  $\bar{\lambda} = \pi \bar{\lambda}_{LT}$ . В CFSteel вычисляются оба значения  $\chi_{LT}$  и в дальнейшем расчёт принимается минимальное из них.

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,488$$

$$\chi_{LT} = 1,036$$

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \pi \bar{\lambda}_{LT}) + (\pi \bar{\lambda}_{LT})^2 = 9,847$$

$$\chi_{LT} = \frac{0,5 \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48(\pi \bar{\lambda}_{LT})^2} \right)}{(\pi \bar{\lambda}_{LT})^2} = 1,012$$

$$\chi_{LT} = 1.$$

Расчёт по п. 7.7.10.3[1]

Для сжатых с изгибом элементов должны выполняться условия (7.99) и (7.100):

$$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x + N|e_N|}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

$$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x + N|e_N|}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$$

Расчёт коэффициентов взаимодействия  $k_{xx}$  и  $k_{yx}$  по Таблицам В.1 и В.2 [1] (Метод 1)

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента

$$M_{cr,0} = 35850 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента  $\bar{\lambda}_0$ :

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{x,ef} \cdot R_y}{M_{cr,0}}} = 0,189$$

Параметры:

$$\alpha_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_x} = 0,999$$

$$\varepsilon_x = \frac{M + N|e_N|}{N} \frac{A_{ef}}{W_{x,ef}} = 1,725$$

Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов (Таблица В.2) [1], при  $\psi = 1$  (равномерное распределение момента по длине элемента)

$$C_{m,x,0} = 0,79 + 0,21\psi + 0,36(\psi - 0,33) \frac{N}{N_{cr,x}} = 1,003$$

Параметры  $\mu_x$  и  $\mu_y$  (Таблица В.1):

$$\mu_x = \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}}{1 - \varphi_x \frac{N}{N_{cr,x}}} = 1$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}}{1 - \varphi_y \frac{N}{N_{cr,y}}} = 1$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{xx}$

$$k_{xx} = C_{m,x} C_{m,LT} \frac{\mu_x}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}} = 1,0159$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{yx}$

$$k_{yx} = C_{m,x} C_{m,LT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}} = 1,0161$$

Формулы взаимодействия (п. 7.7.10.3[1])

$$\frac{61,83}{0,969 \cdot 8,73 \cdot 33,33 \cdot 0,9} + 1,016 \frac{311,17 + 61,83 \cdot 2,57}{1 \cdot 38,49 \cdot 33,33 \cdot 0,9} = 0,657 < 1,$$

$$\frac{61,83}{1 \cdot 8,73 \cdot 33,33 \cdot 0,9} + 1,016 \frac{311,17 + 61,83 \cdot 2,57}{1 \cdot 38,49 \cdot 33,33 \cdot 0,9} = 0,650 < 1$$

Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по п. 7.7.10.4[1]

Условие устойчивости согласно п.7.7.10.4 [1] (формула (7.101)):

$$\left(\frac{N}{\varphi_{min} A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x + N|e_N|}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$$

$$\left(\frac{61,83}{0,763 \cdot 8,73 \cdot 33,33 \cdot 0,9}\right)^{0,8} + \left(\frac{311,17 + 61,83 \cdot 2,57}{1 \cdot 38,49 \cdot 33,33 \cdot 0,9}\right)^{0,8} = 0,878 < 1$$

В Таблице 7.3.1 представлено сравнение результатов расчёта, приведённого выше, и результатов, полученных в программе.

Таблица 7.3.1 – Сопоставление результатов расчёта

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) СП 260	Ручной расчёт	CFSSteel	Расхождение, %
<i>Расчёт п. 7.7.4</i>						
Левая часть проверки прочности	-	-	7.7.4, 7.7.5	0,578	0,579	0,2
<i>Расчёт п. 7.7.6</i>						
Расчётная высота стенки	$h_w$	см	7.7.6	17,7	17,7	0
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	-	7.7.6.2	0,832	0,832	0
Расчётное напряжение при сдвиге	$R_s$	кН/см <sup>2</sup>	7.7.6.1	19,23	19,2	0
Несущая способность сечения от действия поперечной силы	$Q_w$	кН	(7.79)	201,5	201,4	0,1
Левая часть проверки прочности $Q/Q_w$	-	-		0,026	0,026	0
<i>Расчёт п. 7.7.10.3</i>						
Приведённая гибкость относительно оси $x - x$	$\bar{\lambda}_x$	-	7.7.8.1	0,775	0,774	0,1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_x$	-	СП 16	0,969	0,969	0
Приведённая гибкость относительно оси $y - y$	$\bar{\lambda}_y$	-	7.7.8.1	0,437	0,436	0,1
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по изгибной форме	$\varphi_y$	-	СП 16	1	1	0
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	(7.90)	520,1	520,1	0
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,x}$	кН		4784	4783,6	0
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,y}$	кН		15020	15016,8	0,1
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	7.7.8.5	506,18	506,11	0
Условная гибкость при крутильной/ изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{TF}$	-	7.7.8.3	0,758	0,758	0
Коэффициент устойчивости по крутильной/ изгибно-крутильной форме	$\varphi_{TF}$	-	7.7.8.4	0,763	0,763	0
Расчётный коэффициент	$\varphi_{min}$	-		0,763	0,763	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм	Приложение Г	131500	131482	0
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_{LT}$	-	(7.96)	0,099	0,099	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-		1	1	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего	$M_{cr,0}$	кНсм		35850	35845	0



Верификационные расчёты

момента по длине элемента						
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\bar{\lambda}_0$	-	Приложение В	0,189	0,189	0
Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов	$C_{m,\lambda 0}$	-	Таблица В.2	1,003	1,003	0
Параметр	$a_{LT}$	-		0,999	0,999	0
Коэффициент	$C_{m,x}$	-		1,001	1,002	0
Коэффициент	$C_{m,LT}$	-		1,07	1,07	0
Параметр	$\mu_x$	-	Таблица В.1	1	1	0
Параметр	$\mu_y$	-	Таблица В.1	1	1	0
Коэффициент взаимодействия $k_{xx}$	$k_{xx}$	-	Таблица В.1	1,0159	1,085	0
Коэффициент взаимодействия $k_{yx}$	$k_{yx}$	-	Таблица В.1	1,0161	1,086	0
Левая часть неравенства (7.99)			п.7.7.10.3	0,657	0,657	0
Левая часть неравенства (7.100)			п.7.7.10.3	0,650	0,650	0
<i>Расчёт п. 7.7.10.4</i>						
Левая часть неравенства (7.101)		-	п.7.7.10.4	0,878	0,879	0

Результаты расчёта конструктивного элемента 2 в программном комплексе приведены на Рисунке 7.3.9 – 7.3.13.

Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое скатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260		
Расчёт сечения на прочность при скатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_x + N  e_N }{W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,579 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5		
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{R_w R_y \gamma_c} \leq 1$	0,026 < 1	✓ 7.7.6		
Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\phi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,657 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\phi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,650 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left( \frac{N}{\phi A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1$	0,879 < 1	✓ 7.7.10.4		
<b>Расчёт сечения на прочность при скатии с изгибом</b>					
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260	
Расчётное осевое усилие скатия	N	61,834	кН		
Расчётный изгибающий момент	$M_x$	311,175	кН·см		
Эксцентриситет	$ e_N $	2,572	см	7.7.2.3	
Площадь эффективного сечения	$A_{ef}$	8,733	см <sup>2</sup>		
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_{x,ef}$	38,494	см <sup>3</sup>		
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333	Н/мм <sup>2</sup>		
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	1			

Рисунок 7.3.9 – Результаты расчёта прочности при совместном действии продольной силы, изгибающего момента и поперечной силы

## Верификационные расчёты

Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка сжата)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы сжаты)		Результаты расчёта	
Расчёт		Расчётное неравенство		Значение	Пункт (формула) СП 260
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом		$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_x + N e_N}{W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$		0,579 < 1 ✓	7.7.4; 7.7.5
Расчёт на поперечную силу		$\frac{Q_{max}}{h_w t R_s \gamma_c} \leq 1$		0,026 < 1 ✓	7.7.6
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)		$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$		0,657 < 1 ✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)		$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$		0,650 < 1 ✓	7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)		$\left( \frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} + \left( \frac{M_x + e_N N}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \right)^{0,8} \leq 1$		0,879 < 1 ✓	7.7.10.4
<b>Расчёт на поперечную силу</b>					
Расчёт		Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260
Расчётная поперечная сила		$Q_{max}$	5,187	кН	
Расчётная высота стенки		$h_w$	177,0	мм	
Расчётная толщина стенки		$t$	3,0	мм	
Условная гибкость стенки		$\lambda_w$	0,832		
Расчётное сопротивление стали		$R_s$	192	Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы		$\gamma_c$	1		

Рисунок 7.3.10 – Результаты расчёта прочности при действии поперечной силы

Верификационные расчёты

Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260		
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef}R_y\gamma_c} + \frac{M_x + N e_N}{W_{sef}R_y\gamma_c} \leq 1$	0,579 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5		
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{R_{wt}R_s\gamma_c} \leq 1$	0,026 < 1	✓ 7.7.6		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{ef}R_y\gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x + N e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef}R_y\gamma_c} \leq 1$	0,657 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef}R_y\gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x + N e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef}R_y\gamma_c} \leq 1$	0,650 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_x A_{ef}R_y\gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x + N e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef}R_y\gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,879 < 1	✓ 7.7.10.4		
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)</b>					
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260	
Гибкость	$\lambda_x$	25,195			
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_x$	0,247		7.7.8.1	
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы		b		7.7.8.1	
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	0,969		7.7.8.1	
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{efy}$	0,791 м			
Гибкость	$\lambda_y$	14,220			
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_y$	0,139		7.7.8.1	
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы		b		7.7.8.1	
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	1,000		7.7.8.1	
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости в плоскости фермы	$N_{cr,x}$	4783,629 кН			
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости из плоскости фермы	$N_{cr,y}$	15016,828 кН			
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{crT}$	1,581 м			
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	520,062 кН		7.7.8.4	
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	506,114 кН		7.7.8.5	
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1		Приложение Г	
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1		Приложение Г	
Коэффициент	$C_1$	1,194		Приложение Г	
Коэффициент	$C_2$	1,000		Приложение Г	
Коэффициент	$C_3$	1,000		Приложение Г	
Уровень приложения нагрузки	$y_g$	-8,929 см		Приложение Г	
Коэффициент асимметрии сечения	$y_j$	-8,381 см		Приложение Г	
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	131482,709 кН·см		Приложение Г	
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,099		7.7.9.2	
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2	
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	1,000		7.7.9.2	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1			
Коэффициент взаимодействия	k	1,016		Приложение В	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>			
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	0,9			

Рисунок 7.3.11 – Результаты расчёта устойчивости при совместном действии продольной силы и изгибающего момента по п.7.7.10.3 [1] (условие (7.99))

## Верификационные расчёты

Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260		
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef}R_y\gamma_c} + \frac{M_x + Ne_N}{W_{eff}R_y\gamma_c} \leq 1$	0,579 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5		
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{R_w R_s \gamma_c} \leq 1$	0,026 < 1	✓ 7.7.6		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_x A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x + N e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,657 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yy} \frac{M_x + N e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,650 < 1	✓ 7.7.10.3		
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x + N e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,879 < 1	✓ 7.7.10.4		
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)</b>					
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) СП 260	
Гибкость	$\lambda_x$	25,195			
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_x$	0,247		7.7.8.1	
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы		b		7.7.8.1	
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	0,969		7.7.8.1	
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{efy}$	0,791 м			
Гибкость	$\lambda_y$	14,220			
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_y$	0,139		7.7.8.1	
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы		b		7.7.8.1	
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	1,000		7.7.8.1	
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости в плоскости фермы	$N_{cr,x}$	4783,629 кН			
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости из плоскости фермы	$N_{cr,y}$	15016,828 кН			
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{crT}$	1,581 м			
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	520,062 кН		7.7.8.4	
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	506,114 кН		7.7.8.5	
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1		Приложение Г	
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1		Приложение Г	
Коэффициент	$C_1$	1,194		Приложение Г	
Коэффициент	$C_2$	1,000		Приложение Г	
Коэффициент	$C_3$	1,000		Приложение Г	
Уровень приложения нагрузки	$y_g$	-8,929 см		Приложение Г	
Коэффициент асимметрии сечения	$y_j$	-8,381 см		Приложение Г	
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	131482,709 кН·см		Приложение Г	
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,099		7.7.9.2	
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)		b		7.7.9.2	
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	1,000		7.7.9.2	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1			
Коэффициент взаимодействия	k	1,016		Приложение В	
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>			
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	0,9			

Рисунок 7.3.12 – Результаты расчёта устойчивости при совместном действии продольной силы и изгибающего момента по п.7.7.10.3 [1] (условие (7.100))

Верификационные расчёты

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; CO1:1,00*LC1+1,00*LC2 Сочетание 1			
Общие данные		Характеристики полного сечения	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)	
		Характеристики эффективного сечения (Осевое сжатие)	
		Результаты расчёта	
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) СП 260
Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом	$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_x + N e_N}{W_{eff} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,579 < 1	✓ 7.7.4; 7.7.5
Расчёт на поперечную силу	$\frac{Q_{max}}{R_w R_y \gamma_c} \leq 1$	0,026 < 1	✓ 7.7.6
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.99)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{xx} \frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,657 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.100)	$\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c} + k_{yx} \frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1$	0,650 < 1	✓ 7.7.10.3
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)	$\left(\frac{N}{\varphi_y A_{ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x + N  e_N }{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y \gamma_c}\right)^{0,8} \leq 1$	0,879 < 1	✓ 7.7.10.4
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (7.101)</b>			
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм. Пункт (формула) СП 260
Гибкость	$\lambda_x$	25,195	
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_x$	0,247	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости в плоскости фермы	b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости в плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_x$	0,969	7.7.8.1
Расчётная длина из плоскости фермы	$l_{efy}$	0,791 м	
Гибкость	$\lambda_y$	14,220	
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_y$	0,139	7.7.8.1
Кривая потери устойчивости из плоскости фермы	b		7.7.8.1
Коэффициент устойчивости из плоскости фермы (изгибная форма)	$\varphi_y$	1,000	7.7.8.1
Расчётная длина при расчёте на кручение	$l_{crT}$	1,581 м	
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	520,062 кН	7.7.8.4
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	506,114 кН	7.7.8.5
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_T$	0,758	(7.89)
Кривая потери устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	b		7.7.8.3
Коэффициент устойчивости при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\varphi_{T/TF}$	0,763	7.7.8.3
Расчётный понижающий коэффициент	$\varphi$	0,763	
Коэффициент закрепления концов элемента от поворота из плоскости фермы	k	1	Приложение Г
Коэффициент расчётной длины, характеризующий закрепление концов элемента от деформации	$k_w$	1	Приложение Г
Коэффициент	$C_1$	1,194	Приложение Г
Коэффициент	$C_2$	1,000	Приложение Г
Коэффициент	$C_3$	1,000	Приложение Г
Уровень приложения нагрузки	$y_g$	-8,929 см	Приложение Г
Коэффициент асимметрии сечения	$y_j$	-8,381 см	Приложение Г
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	131482,709 кН·см	Приложение Г
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,099	7.7.9.2
Кривая потери устойчивости (потеря устойчивости плоской формы изгиба)	b		7.7.9.2
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	1,000	7.7.9.2
Расчётное сопротивление стали	$R_y$	333 Н/мм <sup>2</sup>	
Коэффициент условий работы	$\gamma_c$	0,9	

Рисунок 7.3.13 – Результаты расчёта устойчивости при совместном действии продольной силы и изгибающего момента по п.7.7.10.4 [1]

## 7.4. Ферма из одинарных профилей. Расчёт по нормам EN

Выполнить проверочные расчёты конструктивного элемента 2 фермы, схема которой представлена на Рисунке 7.4.1. Пролёт фермы  $6\text{ м}$ , высота  $1\text{ м}$ . Пояса выполнены из С-образного профиля С126-180-3, решётка из С-образного профиля С120-60-1,5 (Рисунок 7.4.2). Профили выполнены из стали S350GD + Z275 по EN 10147 с  $f_{yb} = 350\text{ Н/мм}^2$ ,  $f_u = 420\text{ Н/мм}^2$ ,  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ . Профили располагаются горизонтально (Система ферм 3). Расчёты выполнить по нормам EN (CEN EC).

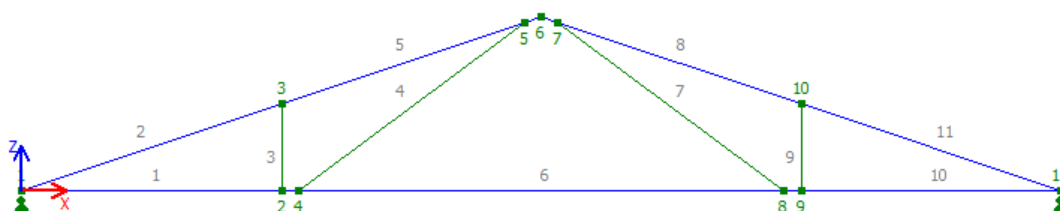
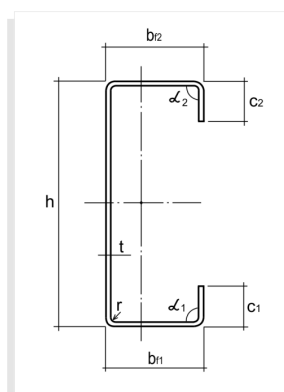


Рисунок 7.4.1 – Схема фермы



пояса

$$h = 126\text{ мм}$$

$$t = 3\text{ мм}$$

$$b = 180\text{ мм} \quad c = 20\text{ мм} \quad r = 4\text{ мм} \quad \alpha = 90^\circ$$

решётка

$$h = 120\text{ мм}$$

$$t = 1,5\text{ мм}$$

$$b = 60\text{ мм} \quad c = 16\text{ мм} \quad r = 3\text{ мм} \quad \alpha = 90^\circ$$

Рисунок 7.4.2 – Сечения элементов фермы

Нагрузка на ферму прикладывается через прогоны, опирающиеся сверху в узлах 3, 5, 7, 10, а также в середине элементов верхнего пояса 2, 5, 11 и 15 (Рисунок 7.4.3).

Комбинация загрузений COI (ULS): Собственный вес покрытия ( $\gamma_G = 1,35$ ) + Снег ( $\gamma_Q = 1,5$ ).

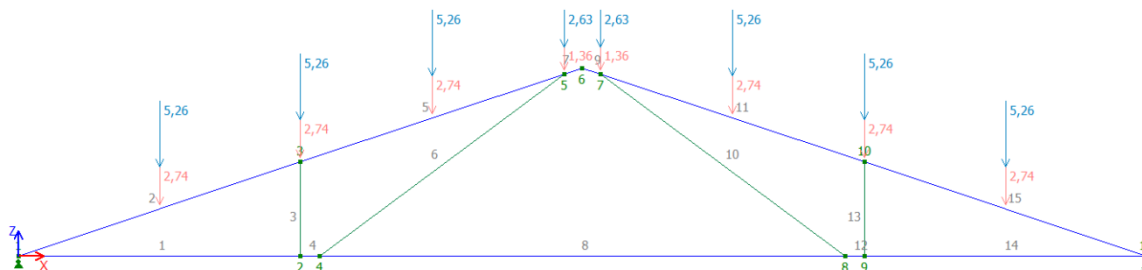


Рисунок 7.4.3 – Нагрузка на ферму

Конструкция покрытия такова, что раскрепляет верхний пояс фермы из его плоскости на опорах и в узлах 3, 5, 7 и 10. Расчётные длины элемента 2:

$$\text{в плоскости фермы } L_{cr,y} = k_y \cdot L = 1 \cdot 158,1 = 158,1\text{ см}$$

$$\text{из плоскости фермы } L_{cr,z} = k_z \cdot L = 0,5 \cdot 158,1 = 79,1\text{ см}$$

$$L_{cr,T} = k_T \cdot L = 1 \cdot 158,1 = 158,1 \text{ см}$$

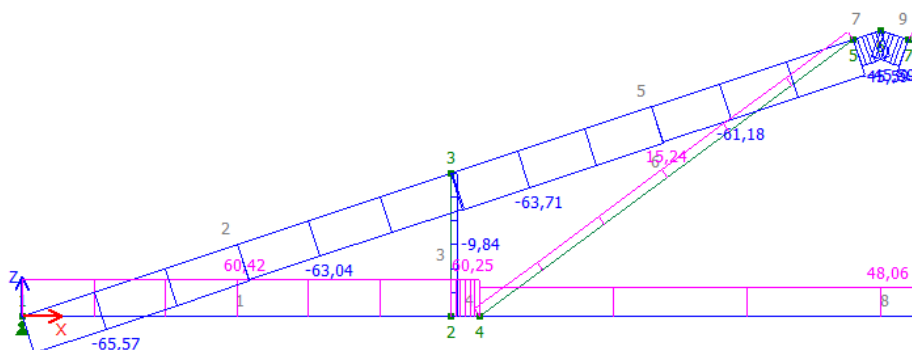
$$L_{cr,LT} = k_{LT} \cdot L = 1 \cdot 158,1 = 158,1 \text{ см}$$

$k$  – коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений элемента от поворота из плоскости изгиба:  $k = 1$ .

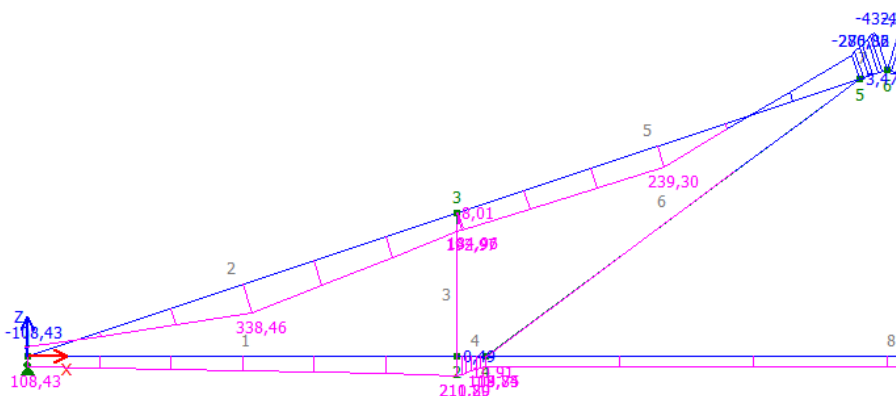
$k_w$  – коэффициент, определяющий степень закрепления опорных сечений от депланации:  $k_w = 1$ .

Данное конструктивное решение приведено исключительно в целях верификации расчёта элементов из одинарных профилей на совместное действие сжатия, изгиба и поперечной силы.

Эпюры усилий  $N$ ,  $M$  и  $V$  фрагмента фермы приведены на Рисунке 7.4.4. На Рисунке 7.4.5 представлены эпюры усилий для элемента 2.



определения узлов				Результаты (детально)					Результ
Узел	X, мм	Z, мм	Угол поворота	Элемент	X, м	N, кН	M, кН·м	Q, кН	Элемент
1	0,0	0,0	0,00331	1	0,000	60,42	108,43	0,68	
2	0,3	-3,7	0,00137		0,250	60,42	125,49	0,68	
3	0,9	-3,7	0,00089		0,500	60,42	142,55	0,68	
4	0,3	-3,8	0,00123		0,750	60,42	159,61	0,68	
5	0,5	-3,6	-0,00029		1,000	60,42	176,68	0,68	
6	0,5	-3,6	0,00000		1,250	60,42	193,74	0,68	
7	0,5	-3,6	0,00029		1,500	60,42	210,80	0,68	
8	0,7	-3,8	-0,00123	2	0,000	-65,57	-108,43	5,65	
9	0,8	-3,7	-0,00137		0,264	-65,57	40,55	5,65	
10	0,1	-3,7	-0,00089		0,527	-65,57	189,52	5,65	
11	1,0	0,0	-0,00331		0,790	-65,57	338,46	5,65	
					0,790	-63,04	338,46	-1,94	
					0,791	-63,04	338,45	-1,94	
					1,054	-63,04	287,28	-1,94	
					1,318	-63,04	236,12	-1,94	
					1,581	-63,04	184,96	-1,94	



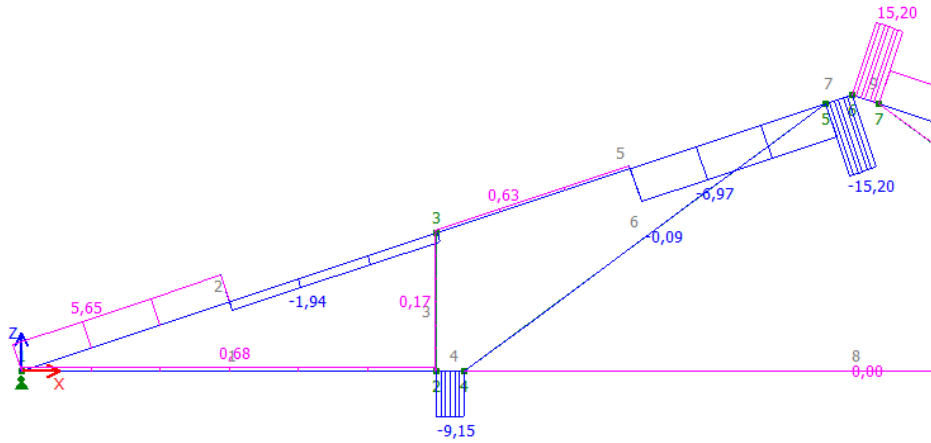


Рисунок 7.4.4 – Эпюры усилий  $N$ ,  $M$  и  $V$  в полуферме

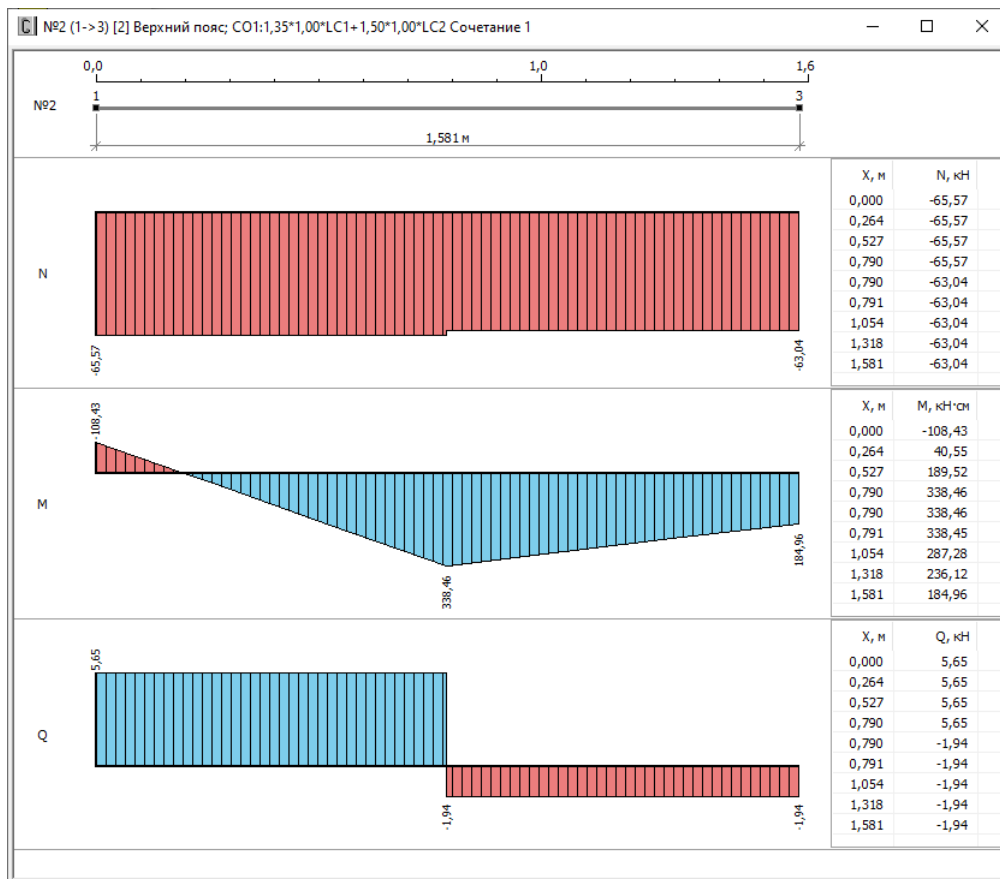


Рисунок 7.4.5 – Эпюры и значения усилий для элемента 2

Расчётная осевая сжимающая сила  $N_{Ed} = -65,57$  кН.

В исходных данных указывается, что при расчёте устойчивости должен учитываться максимальный момент на полной длине элемента (Рисунок 7.4.6). Следовательно  $M_{y,Ed} = 338,46$  кН·см.  $V_{Ed} = 5,65$  кН.



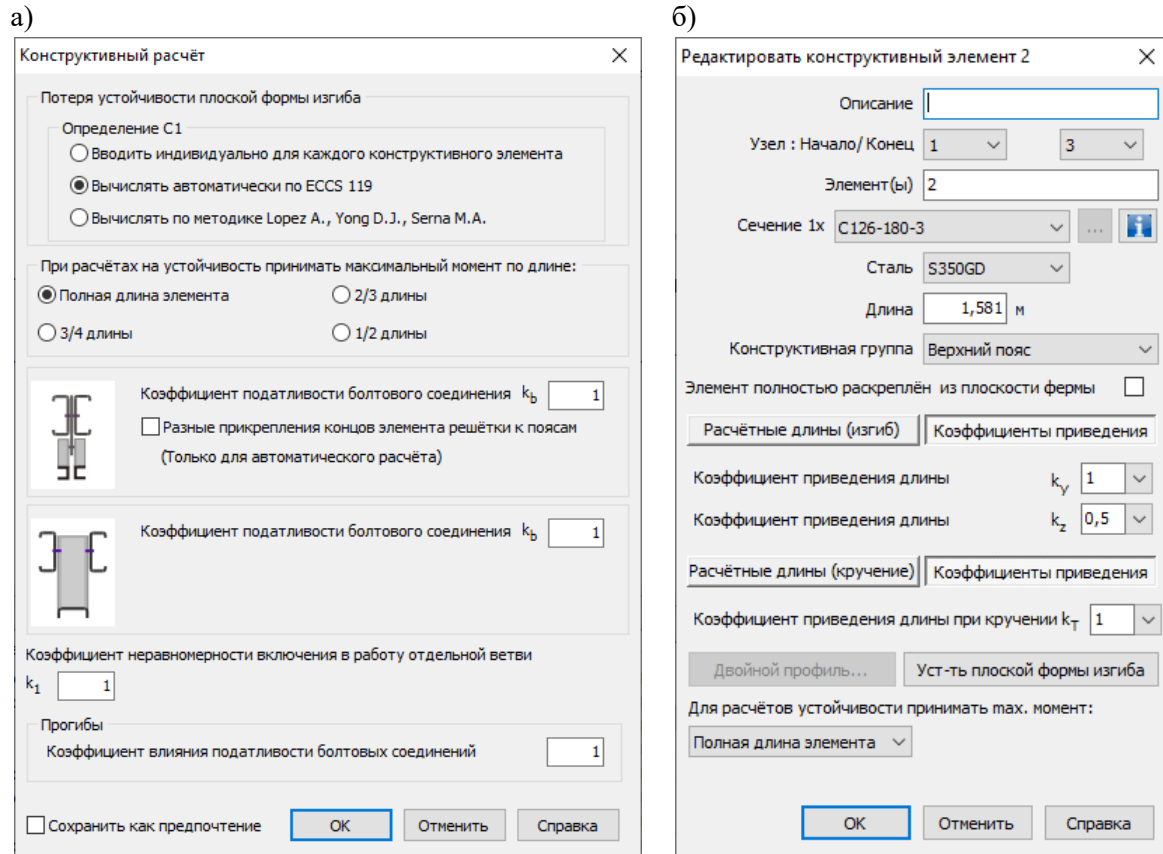
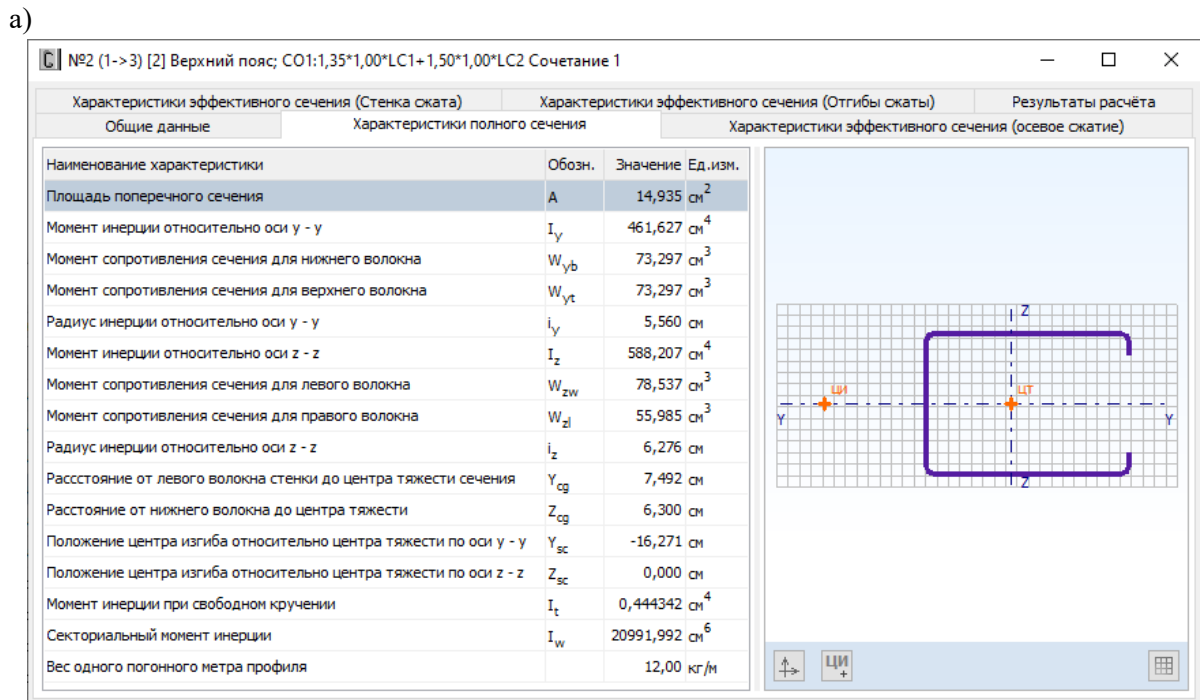


Рисунок 7.4.6 – Настройки расчёта конструктивного элемента 2:

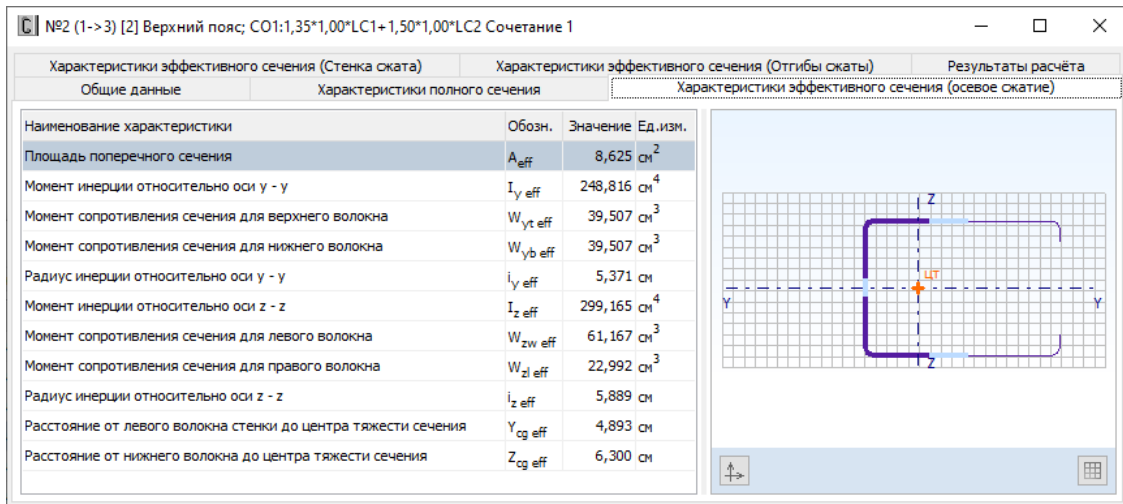
а) – пункт меню *Настройки - Расчёт*;

б) – окно редактирования конструктивного элемента

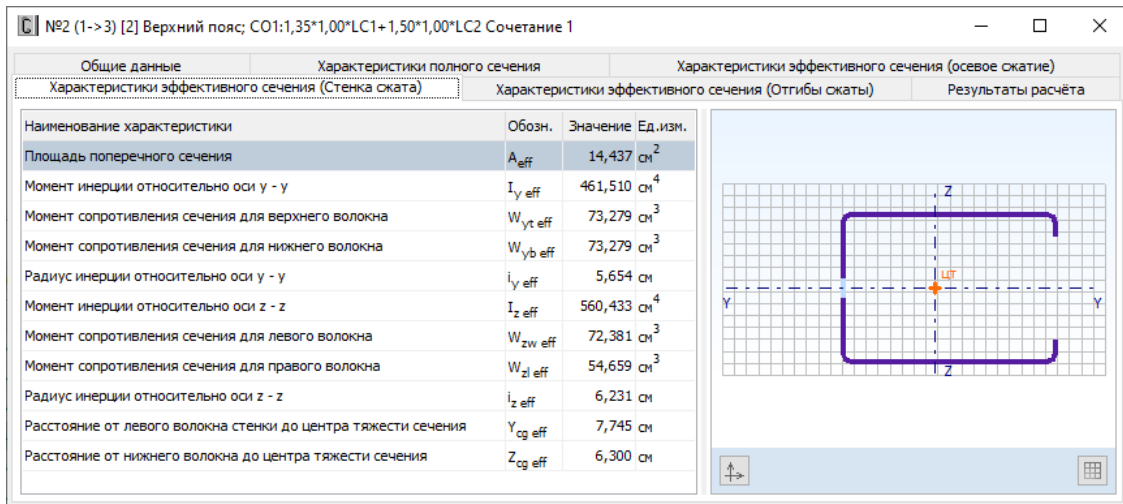
Результаты расчёта геометрических характеристик сечения приведены на Рисунке 7.4.7.



б)



в)



г)

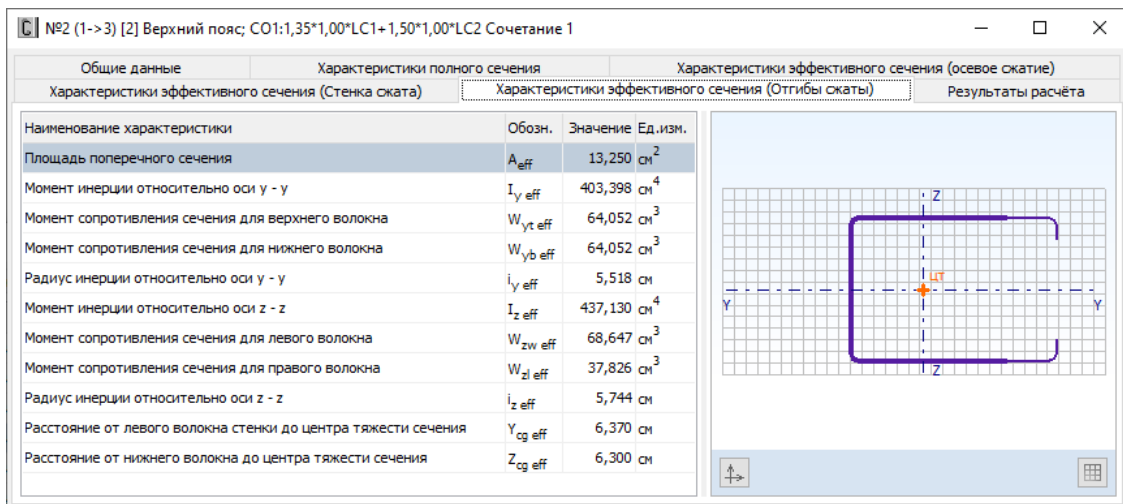


Рисунок 7.4.7 – Результаты расчёта геометрических характеристик: а) – полное сечение; б) – эффективное сечение (сжатие); в) – эффективное сечение (изгиб относительно оси z – z (стенка сжата)); г) – эффективное сечение (изгиб относительно оси z – z (отгибы сжаты))

Геометрические характеристики сечения элемента 2 (применительно к расчёту фермы: расчёт в плоскости фермы – значение характеристики относительно оси  $y - y$ ; расчёт из плоскости фермы – значение характеристики относительно оси  $z - z$ )

Геометрические характеристики полного сечения:

$$A_g = 14,94 \text{ см}^2, I_y = 588,21 \text{ см}^4, W_{y,max} = 78,54 \text{ см}^3, W_{y,min} = 55,99 \text{ см}^3; i_y = 6,28 \text{ см}, I_z = 461,63 \text{ см}^4, W_z = 73,30 \text{ см}^3, i_z = 5,56 \text{ см}, I_t = 0,444 \text{ см}^4, I_w = 20992 \text{ см}^6, z_0 = -16,27 \text{ см}.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (осевое сжатие):

$$A_{eff} = 8,63 \text{ см}^2, I_{y,eff} = 299,17 \text{ см}^4, i_{y,eff} = 5,89 \text{ см}, I_{z,eff} = 248,82 \text{ см}^4, i_{z,eff} = 5,37 \text{ см}, e_N = -2,6 \text{ см}.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно оси, параллельной стенке – стенка сжата):

$$A_{eff} = 14,44 \text{ см}^2, I_{y,eff} = 560,43 \text{ см}^4, W_{y,eff,max} = 72,38 \text{ см}^3, W_{y,eff,min} = 54,65 \text{ см}^3, i_{y,eff} = 6,23 \text{ см}.$$

Геометрические характеристики эффективного сечения (изгиб относительно оси, параллельной стенке – отгибы сжаты):

$$A_{eff} = 13,25 \text{ см}^2, I_{y,eff} = 437,13 \text{ см}^4, W_{y,eff,max} = 68,65 \text{ см}^3, W_{y,eff,min} = 37,83 \text{ см}^3, i_{y,eff} = 5,74 \text{ см}.$$

Верификация вычисления геометрических характеристик представлена в *CFSteel v.4.3. Документация. Том II. Верификационные расчёты* [27] и здесь не приводится.

*Проверка прочности при совместном действии продольной силы, изгибающего момента и поперечной силы*

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} |e_N|}{M_{cy,Rd,com}} \leq 1$$

*Подробные численные расчёты содержатся в Руководстве пользователя, поставляемом лицензированным пользователям CFSteel. Здесь расчёты приводятся в сокращённом виде.*

Расчётная несущая способность сечения при сжатии (п.6.1.3) [7]

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} = 8,63 \cdot 35 / 1 = 302,05 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность поперечного сечения при изгибе  $M_{c,Rd,com}$  (п.6.1.4 [7])

$$M_{c,Rd,com} = W_{y,eff,com} f_y / \gamma_{M0} = 37,83 \cdot 35 / 1 = 1324,05 \text{ кНсм}$$

$$\frac{65,57}{302,05} + \frac{338,46 + 65,57 \cdot 2,6}{1324,05} = 0,601 < 1$$

*Проверка прочности при действии поперечной силы*

$$V_{Ed} / V_{b,Rd} = 5,65 / 208,3 = 0,027 < 1$$

*Устойчивость при совместном действии осевого сжатия и изгиба*

Вычисление редуцированного коэффициента  $\chi_y$

$$N_{cr,y} = \frac{EI_y \pi^2}{L_{cr,y}^2} = 4877 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,y}}} = 0,249$$

$$\phi_y = 0,5 \left( 1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0,539$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,983$$

Расчётная несущая способность элемента по изгибной форме потери устойчивости относительно оси  $y - y$

$$N_{b,Rdy} = \frac{\chi_y A_{ef} f_y}{\gamma_{M1}} = 296,9 \text{ кН}$$

Вычисление редуцированного коэффициента  $\chi_z$

$$N_{cr,z} = \frac{EI_z \pi^2}{L_{cr,z}^2} = 15310 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{ef} f_y}{N_{cr,z}}} = 0,140$$

$$\phi_z = 0,5 \left( 1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right) = 0,5$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 1,02$$

$$\chi_z = 1$$

Расчётная несущая способность элемента по изгибной форме потери устойчивости относительно оси  $z - z$

$$N_{b,Rdz} = \frac{\chi_z A_{ef} f_y}{\gamma_{M1}} = 302,1 \text{ кН}$$

Определение понижающего коэффициента при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости  $\chi_T/\chi_{TF}$

Параметр

$$i_0 = \sqrt{i_y^2 + i_z^2 + z_0^2} = 18,305 \text{ см}$$

Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{cr,T}^2} \right) = \frac{1}{18,305^2} 530,2 \text{ кН}$$

$$\beta = 1 - \left( \frac{z_0}{i_0} \right)^2 = 0,21$$

Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,z}}{2\beta} \left( 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}} - \sqrt{\left( 1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}} \right)^2 + 4 \left( \frac{z_0}{i_0} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}}} \right) = 516 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{ef} f_y}{N_{cr,TF}}} = 0,765$$

Коэффициент начальных несовершенств  $\alpha_{TF} = 0,34$

$$\phi_{TF} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{TF} (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right) = 0,889$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi_{TF} + \sqrt{\phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} = 0,746$$

Расчётная несущая способность элемента по изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$N_{b,RdTF} = \frac{\chi_{TF} A_{ef} f_y}{\gamma_{M1}} = 225,3 \text{ кН}$$

$$N_{b,Rdmin} = \min(N_{b,Rdy}, N_{b,Rdz}, N_{b,RdTF}) = 225,3 \text{ кН}$$

Вычисление упругого критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба для моносимметричного сечения

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(L_{cr,z})^2} \left( \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(L_{cr,z})^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right),$$

Значение  $C_1$  в соответствии с установками расчёта (Рисунок 7.4.6,а) определяется автоматически программно. В случае, если на элемент прикладывается нагрузка, то вычисление  $C_1$  производится по [30] в соответствии с эпюрой распределения момента по длине.

$$C_1 = 1,2; C_2 = 1; C_3 = 1.$$

Параметр  $z_j$  зависит от того, какая часть сечения сжата при изгибе элемента, стенка или отгибы. Эпюра моментов может менять свой знак по длине элемента и, таким образом, в элементе одновременно могут быть сжаты и отгибы и стенка. В программе принимается наиболее неблагоприятный вариант.

$$z_j = -8,38 \text{ см}$$

Нагрузка на элемент прикладывается сверху (Рисунок 7.4.8), следовательно  $z_g = -8,93 \text{ см}$ .



Рисунок 7.4.8 – Схема приложения внешней нагрузки на элемент

$$M_{cr} = 134720 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,ef} f_y}{M_{cr}}} = 0,137$$

В соответствии с п. 6.3.2.2 [6]  $\chi_{LT} = 1$ .

*Расчёт коэффициентов взаимодействия  $k_{yy}$  и  $k_{zy}$  по Методу 1 (Приложение А [6])*

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента

$$M_{cr,0} = 36550 \text{ кНсм}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента  $\overline{\lambda}_0$

$$\overline{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{y,ef} \cdot f_y}{M_{cr,0}}} = 0,263$$

Параметры

$$\alpha_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 0,999$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed} + e_N N_{Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{ef}}{W_{y,ef}} = 0,925$$

Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов (Таблица А.2) [6], при  $\psi = 1$  (равномерное распределение момента по длине элемента).

$$C_{m,y,0} = 0,79 + 0,21\psi + 0,36(\psi - 0,33) \frac{N}{N_{cr,y}} = 1,003$$

Параметры  $\mu_y$  и  $\mu_z$  (Таблица А.1[6]):

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = 1$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{yy}$

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,L T} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1,089$$

Коэффициент взаимодействия  $k_{zy}$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,L T} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1,09$$

Нормативное значение сопротивления сжатию

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_{ef} = 35 \cdot 8,63 = 302,1 \text{ кН}$$

Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту

$$M_{y,Rk} = f_y \cdot W_{y,efmin} = 35 \cdot 37,83 = 1324,1 \text{ кНсм}$$

Уравнения взаимодействия (6.61) и (6.62) п.6.3.3 [6]

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + e_N N_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + e_N N_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + e_N N_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{65,57}{0,983 \cdot 302,1/1} + 1,089 \frac{338,46 + 2,6 \cdot 65,57}{1 \cdot 1324,1/1} = 0,64 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + e_N N_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{65,57}{1 \cdot 302,1/1} + 1,09 \frac{338,46 + 2,6 \cdot 65,57}{1 \cdot 1324,1/1} = 0,636 < 1$$

Расчёт по п.6.2.5 [7]

Условие устойчивости согласно п.6.2.5 [7]

$$\left( \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdmin}} \right)^{0,8} + \left( \frac{M_y + |e_N| N}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1$$

Расчётное значение несущей способности при изгибе

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{y,efmin} \cdot f_y / \gamma_{M1} = 1 \cdot 37,83 \cdot 35 / 1 = 1324,1 \text{ кНсм}$$

$$\left(\frac{65,57}{225,3}\right)^{0,8} + \left(\frac{338,46 + 2,6 \cdot 65,57}{1324,1}\right)^{0,8} = 0,838 < 1$$

В Таблице 7.4.1 представлено сравнение результатов расчёта, приведённого выше, и результатов, полученных в программе.

Таблица 7.4.1 – Сопоставление результатов расчёта

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-1 EN 1993-1-3	Ручной расчёт	CFSSteel	Расхождение, %
<i>Проверка прочности (п.6.1.9 [7])</i>						
Расчётная несущая способность сечения при сжатии	$N_{c,Rd}$	кН	6.1.3	302,05	301,89	0,05
Расчётная несущая способность поперечного сечения при изгибе	$M_{c,Rd}$	кНсм	6.1.4	1324,05	1323,92	0
Левая часть неравенства (6.25)			6.1.9	0,601	0,602	0,2
<i>Проверка прочности (п.6.1.5 [7])</i>						
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	-	6.1.5	0,845	0,845	0
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$f_{bv}$	кН/см <sup>2</sup>	6.1.5	19,88		
Расчётная несущая способность сечения на сдвиг	$V_{b,Rd}$	кН	6.1.5	208,3	208,4	0,05
<i>Проверка устойчивости</i>						
Условная гибкость относительно оси у - у	$\bar{\lambda}_y$	-	6.3.1.3	0,249	0,249	0
Редукционный коэффициент по изгибной форме потери устойчивости	$\chi_y$	-	6.3.1.2	0,983	0,983	0
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	-	6.3.1.3	0,140	0,140	0
Редукционный коэффициент по изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	-	6.3.1.2	1	1	0
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	кН	6.2.3(5)	530,2	530,2	0
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,y}$	кН		4877	4777	0
Упругая критическая сила по Эйлеру	$N_{cr,y}$	кН		15310	15308	0
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,TF}$	кН	6.2.3(7)	516	516	0
Условная гибкость при изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{TF}$			0,765	0,758	0
Коэффициент устойчивости по крутильной/ изгибно-крутильной форме	$\chi_{TF}$			0,746	0,746	0
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	кНсм		134720	134757	0
Условная гибкость	$\bar{\lambda}_{LT}$	-	6.3.2.2	0,137	0,137	0
Понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	-	6.3.2.2	1	1	0
<i>Расчёт п.6.3.3 [6]</i>						
<i>Метод 1</i>						
Упругий критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента	$M_{cr,0}$	кНсм		36550	36541	0
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном моменте по длине элемента	$\bar{\lambda}_0$	-	Приложение А	0,263	0,263	0
Коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов	$C_{m,y0}$		Таблица А.2	1,003	1,003	0

*Верификационные расчёты*

Параметр	$a_{LT}$	-		0,999	0,999	0
Коэффициент	$C_{m,y}$	-		1,002	1,002	0
Коэффициент	$C_{m,LT}$	-		1,073	1,073	0
Параметр	$\mu_y$	-	Таблица А.1	1	1	0
Параметр	$\mu_z$	-	Таблица А.1	1	1	0
Коэффициент взаимодействия $k_{yy}$	$k_{yy}$	-	Таблица А.1	1,089	1,089	0
Коэффициент взаимодействия $k_{zy}$	$k_{zy}$	-	Таблица А.1	1,009	1,089	0
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	кН	6.3.3	302,1	301,9	0,1
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	кНсм	6.3.3	1324,1	1323,9	0,02
Левая часть неравенства (6.61)		-	6.3.3	0,640	0,640	0
Левая часть неравенства (6.62)		-	6.3.3	0,636	0,636	0
<i>Расчёт п. 6.2.5</i>						
Левая часть неравенства (6.36)		-	6.2.5	0,838	0,838	0

Результаты расчёта *конструктивного элемента 2* в программном комплексе приведены на Рисунке 7.4.9 – 7.4.13.

Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Расчёт	Расчётное неравенство			Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N e_N}{M_{y,Rd}} \leq 1$			0,602 < 1	✓ 6.1.10
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$			0,027 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{1y} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$			0,640 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{1z} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$			0,636 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1$			0,838 < 1	✓ 6.2.5
<b>Расчёт сечения на прочность при сжатии с изгибом с учётом поперечной силы</b>					
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3	
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	65,57	кН		
Расчётный изгибающий момент	$M_{y,Ed}$	338,46	кН·см		
Расчётная поперечная сила	$V_{Ed}$	5,65	кН		
Площадь полного сечения	$A$	14,935	см <sup>2</sup>		
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>		
Частный коэффициент	$\gamma_{M0}$	1,000			
Эксцентриситет	$e_N$	2,599	см	6.1.3	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_y$	37,826	см <sup>3</sup>		
Площадь эффективного сечения	$A_{eff}$	8,625	см <sup>2</sup>		
Расчётная несущая способность сечения при центральном сжатии	$N_{c,Rd}$	301,89	кН	6.1.3	
Design moment resistance of the cross-section Расчётная несущая способность поперечного сечения при изгибе	$M_{y,Rd}$	1323,92	кН·см	6.1.4	

Рисунок 7.4.9 – Результаты расчёта прочности при совместном действии продольной силы, изгибающего момента и поперечной силы



## Верификационные расчёты

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; CO1:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2 Сочетание 1			
Общие данные	Характеристики полного сечения	Характеристики эффективного сечения (осевое скатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)	Результаты расчёта
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{eN}}{M_{y,Rd}} \leq 1$	0,602 < 1	✓ 6.1.10
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$	0,027 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{1z} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{1z} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,636 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993-1-1
Совместное действие осевого скатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1$	0,838 < 1	✓ 6.2.5
<b>Расчёт на поперечную силу</b>			
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм. Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётная поперечная сила	$V_{Ed}$	5,65 кН	
Расчётная высота стенки	$s_w$	177,0 мм	6.1.5
Расчётная толщина стенки	$t$	3,0 мм	
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	0,845	6.1.5
Расчётное сопротивление стали сдвигу	$f_{bv}$	199 Н/мм <sup>2</sup>	6.1.5
Расчётная несущая способность сечения на сдвиг	$V_{b,Rd}$	208,41 кН	(6.8)

Рисунок 7.4.10 – Результаты расчёта прочности при действии поперечной силы

Верификационные расчёты

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; С01:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2 Сочетание 1					
Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)	
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта	
Расчёт	Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)		
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{eN}}{M_{y,Rd}} \leq 1$	0,602 < 1	✓	6.1.10	
Расчёт на поперечную силу	$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$	0,027 < 1	✓	6.1.5	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,640 < 1	✓	6.3.3 EN 1993	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,636 < 1	✓	6.3.3 EN 1993	
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)	$\left( \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^{0,8} + \left( \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1$	0,838 < 1	✓	6.2.5	
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)</b>					
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3	
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	65,568	кН		
Расчётный изгибающий момент	$M_{y,Ed}$	338,460	кН*см		
Расчётное значение эксцентриситета	$e_N$	2,599	см	6.1.3	
Геометрическая длина элемента	$L$	1,581	м		
Расчётная длина относительно оси y - y (в плоскости фермы)	$L_{cr,y}$	1,581	м		
Расчётная длина относительно оси z - z (из плоскости фермы)	$L_{cr,z}$	0,791	м		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	$N_{cr,y}$	4876,515	кН		
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	$N_{cr,z}$	15308,417	кН		
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,249		6.3.1.3 EN 1993-1-1	
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,140		6.3.1.3 EN 1993-1-1	
Кривая устойчивости (ось y - y)		b		Табл. 6.3	
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_y$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1	
Коэффициент начальных несовершенств	$\chi_y$	0,983		6.3.1.2 EN 1993-1-1	
Кривая устойчивости (ось z - z)		b		Табл. 6.3	
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_z$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1	
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	1,000		6.3.1.2 EN 1993-1-1	
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>		
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000			
Площадь эффективного сечения	$A_{eff}$	8,625	см <sup>2</sup>		
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	301,886	кН	6.3.3 EN 1993-1-1	
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_y$	37,826	см <sup>3</sup>		
Упругий момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	134757,006	кН*см		
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,137		6.3.1.3 EN 1993-1-1	
Кривая устойчивости		b		6.2.4	
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_{LT}$	0,34			
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	1,000			
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	1323,921	кН*см	6.3.3 EN 1993-1-1	
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1			
Коэффициент взаимодействия	$k_{yy}$	1,089			

Рисунок 7.4.11 – Результаты расчёта устойчивости при совместном действии продольной силы и изгибающего момента по п.6.3.3 [6] (условие 6.61)

Верификационные расчёты

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; C01:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2 Сочетание 1				
Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта
Расчёт		Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)
Расчёт на прочность при действии осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы		$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{eN}}{M_{y,Rd}} \leq 1$	0,602 < 1	✓ 6.1.10
Расчёт на поперечную силу		$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$	0,027 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)		$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)		$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,636 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)		$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{0,8} < 1$	0,838 < 1	✓ 6.2.5
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Расчётное осевое усилие сжатия	$N_{Ed}$	65,568	кН	
Расчётный изгибающий момент	$M_{y,Ed}$	338,460	кН·см	
Расчётное значение эксцентриситета	$e_N$	2,599	см	6.1.3
Геометрическая длина элемента	$L$	1,581	м	
Расчётная длина относительно оси y - y (в плоскости фермы)	$L_{cr,y}$	1,581	м	
Расчётная длина относительно оси z - z (из плоскости фермы)	$L_{cr,z}$	0,791	м	
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	$N_{cr,y}$	4876,515	кН	
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	$N_{cr,z}$	15308,417	кН	
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,249		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,140		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось y - y)		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_y$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_y$	0,983		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось z - z)		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_z$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	1,000		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Площадь эффективного сечения	$A_{eff}$	8,625	см <sup>2</sup>	
Нормативное значение сопротивления сжатию	$N_{Rk}$	301,886	кН	6.3.3 EN 1993-1-1
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_y$	37,826	см <sup>3</sup>	
Упругий момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	134757,006	кН·см	
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,137		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости		b		6.2.4
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_{LT}$	0,34		
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	1,000		
Нормативное значение сопротивления изгибающему моменту	$M_{Rk}$	1323,921	кН·см	6.3.3 EN 1993-1-1
Метод определения коэффициентов взаимодействия		1		
Коэффициент взаимодействия	$k_{zy}$	1,089		

Рисунок 7.4.12 – Результаты расчёта устойчивости при совместном действии продольной силы и изгибающего момента по п.6.3.3 [6] (условие 6.62)

№2 (1->3) [2] Верхний пояс; С01:1,35*1,00*LC1+1,50*1,00*LC2 Сочетание 1				
Общие данные		Характеристики полного сечения		Характеристики эффективного сечения (осевое сжатие)
Характеристики эффективного сечения (Стенка ската)		Характеристики эффективного сечения (Отгибы скаты)		Результаты расчёта
Расчёт		Расчётное неравенство	Значение	Пункт (формула)
Расчёт на поперечную силу		$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$	0,027 < 1	✓ 6.1.5
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.61)		$\frac{N_{Ed}}{X_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{X_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,640 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле взаимодействия (6.62)		$\frac{N_{Ed}}{X_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{X_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$	0,636 < 1	✓ 6.3.3 EN 1993
Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)		$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1$	0,838 < 1	✓ 6.2.5
<b>Совместное действие осевого сжатия и изгиба. Проверка по формуле (6.36)</b>				
Расчёт	Обозн.	Значение	Ед.изм.	Пункт (формула) EN 1993-1-3
Критическая сила по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	$N_{cr,z}$	15308,417	кН	
Условная гибкость относительно оси y - y	$\bar{\lambda}_y$	0,249		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Условная гибкость относительно оси z - z	$\bar{\lambda}_z$	0,140		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось y - y)		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_y$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_y$	0,983		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Предел текучести	$f_y$	350	Н/мм <sup>2</sup>	
Частный коэффициент	$\gamma_{M1}$	1,000		
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси y - y	$N_{bF,Rdy}$	296,644	кН	6.3.1.1 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости (ось z - z)		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_z$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент при изгибной форме потери устойчивости	$\chi_z$	1,000		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Расчётная несущая способность по изгибной форме потери устойчивости относительно оси z - z	$N_{bF,Rdz}$	301,886	кН	6.3.1.1 EN 1993-1-1
Расчётная длина при расчёте на кручение	$L_T$	1,581	м	
Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости	$N_{cr,T}$	530,161	кН	(6.33a)
Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости в упругой стадии	$N_{cr,TF}$	515,941	кН	
Условная гибкость при крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\bar{\lambda}_{TF}$	0,765		6.3.1.4 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости		b		Табл. 6.3
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha$	0,34		Табл. 6.1 EN 1993-1-1
Редукционный коэффициент по крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$\chi_{TF}$	0,746		6.3.1.2 EN 1993-1-1
Расчётная несущая способность по крутильной/изгибно-крутильной форме потери устойчивости	$N_{bTF,Rd}$	225,154	кН	6.3.1.1 EN 1993-1-1
Расчётная несущая способность сжатого элемента (по изгибной, крутильной или изгибно-крутильной форме потери устойчивости)	$N_{b,Rd}$	225,154	кН	6.2.5
Расчётный момент сопротивления сечения	$W_y$	37,826	см <sup>3</sup>	
Упругий момент потери устойчивости плоской формы изгиба	$M_{cr}$	134757,006	кН·см	
Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\bar{\lambda}_{LT}$	0,137		6.3.1.3 EN 1993-1-1
Кривая устойчивости		b		6.2.4
Коэффициент начальных несовершенств	$\alpha_{LT}$	0,34		
Редукционный коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба	$\chi_{LT}$	1,000		
Расчётная несущая способность элемента при изгибе	$M_{b,Rd}$	1323,921	кН·см	6.2.5

Рисунок 7.4.13 – Результаты расчёта устойчивости при совместном действии продольной силы и изгибающего момента по п.6.2.5 [7]

## ЛИТЕРАТУРА

1. СП 260.1325800.2016: Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования (с изм. 1 и 2) / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации.– 2016.- 115 с.
2. СП 16.13330.2017: Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*/Минрегион России.– 2017.
3. СП 20.13330.2016: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* Минрегион России.– 2016.
4. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения / Стандартиформ, М.: 2015. – 14 с.
5. EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010: Eurocode – Basis of structural design
6. EN 1993-1-1:2005: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2005
7. EN 1993-1-3:2006: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2006 (including EN 1993-1-3:2006/AC, 2009)
8. EN 1993-1-5:2006: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structures elements / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2006 (including EN 1993-1-3:2006/AC, 2009)
9. EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2005
10. ТКП 1990-2011: Основы проектирования строительных конструкций / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.: 2010.
11. ТКП EN 1993-1-1-2009: Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.- 2009
12. Национальное приложение к ТКП EN 1993-1-1-2009: Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.- 2009
13. ТКП EN 1993-1-3-2009: Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.- 2010
14. Национальное приложение к ТКП EN 1993-1-3-2009: Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.- 2010
15. ТКП EN 1993-1-5-2009: Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. / Пластинчатые элементы / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.- 2010

16. ТКП EN 1993-1-8-2009: Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчёт соединений / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.- 2010
17. Национальное приложение к ТКП EN 1993-1-8-2009: Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчёт соединений / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск.- 2010
18. СП РК EN 1990:2002+A1:2005/2011: Основы проектирования несущих конструкций / Астана. - 2016
19. СП РК EN 1993-1-1:2005/2011: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий / Астана. - 2016
20. Национальное приложение к СП РК EN 1993-1-1:2005/2011: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий / Астана. - 2016
21. СП РК EN 1993-1-3:2006/2011: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов / Астана. - 2016
22. Национальное приложение к СП РК EN 1993-1-3:2006/2011: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов / Астана. - 2016
23. СП РК EN 1993-1-8:2005/2011: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчёт соединений / Астана. – 2016
24. Национальное приложение к СП РК EN 1993-1-8:2005/2011: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчёт соединений / Астана. – 2016
25. Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций / ВНИПИ Промстальконструкция, ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова, М., 1990, 17 с.
26. CFSteel v.4.3. Документация. Том I. Руководство пользователя, 2022, [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader, URL: <http://www.cfsteel.ru>
27. CFSteel v.4.3. Документация. Том II. Верификационные расчёты, 2022, [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader, URL: <http://www.cfsteel.ru>
28. Rules for member stability in EN 1993-1-1. Background documentation and design guidelines / European convention for constructional steelwork, ECCS Technical Committee 8 – Stability, № 119, 2006.- 259 p.
29. Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / European convention for constructional steelwork, ECCS Technical Committee 7 – Cold-formed Steel, № 123, 2008.- 235 p.
30. Lopez A., Yong D.J., Serna M.A. Lateral-torsional buckling of steel beams: a general expression for the moment gradient factor // A. Lopez, D.J. Yong, M.A. Serna // Stability and ductility of steel structures, Lisbon, Portugal, September 6-8, 2006
31. Семёнов А.С. Ферма из холодногнутых профилей повышенной жёсткости с болтовыми соединениями: Автореф. дисс. на соиск. учёной степени канд. техн. наук., Воронеж, 2009, 21 с.
32. Лихтарников Я.М. Металлические конструкции. Методы технико-экономического анализа при проектировании. – М.: Стройиздат, 1968, 264 с.