

Российская Федерация
Научно-производственная компания
Дельта Инжиниринг

CFSteel

**Программа расчёта элементов и конструкций из
стальных тонкостенных холодногнутых профилей**

Версия 3.1

Руководство пользователя

Июнь
2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	
1. ВЫЧИСЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ	6
1.1. Общие замечания	6
1.2. Типы поперечных сечений	6
1.2.1. Швеллер	6
1.2.2. С-образное сечение	7
1.2.3. С-образное сечение с двойными отгибами	15
1.2.4. С-образное сечение с рифом на стенке	15
1.2.5. Сигма-образное сечение	16
1.2.6. Z-образное сечение	16
1.2.7. Двойной швеллер	19
1.2.8. Двойной С-образный профиль	21
1.2.9. Двойной С-образный профиль с двойными отгибами	21
1.2.10. Двойной С-образный профиль с рифом на стенке	22
1.2.11. Двойной Сигма-образный профиль	22
1.3. Ввод размеров сечения	24
2. РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ	26
2.1. Расчёт центрально-сжатых элементов из одиночных профилей	26
2.1.1. Ввод данных	26
2.1.2. Методика расчёта	27
2.1.3. Вывод результатов расчёта	29
2.1.4. Верификация расчёта	34
2.2. Расчёт центрально-сжатых элементов составного сечения	46
2.2.1. Методика расчёта	46
2.2.2. Ввод исходных данных	46
2.3. Расчёт внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов из одиночных профилей	48
2.3.1. Ввод данных	48
2.3.2. Методика расчёта	49
2.3.3. Вывод результатов расчёта	50
2.3.4. Верификация расчёта	50
2.4. Расчёт внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов составного сечения	55
2.4.1. Ввод данных	55
2.4.2. Методика расчёта	57
2.4.3. Вывод результатов расчёта	58
2.4.4. Верификация расчёта	59
2.5. Расчёт изгибаемых элементов	62
2.5.1. Ввод данных	62
2.5.2. Методика расчёта	63
2.5.3. Верификация расчёта	64
3. РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ	67
3.1. Общие замечания	67
3.2. Определение усилий и прогибов в балках и прогонах покрытия	68

3.3. Расчёт балок	74
3.3.1. Ввод данных	74
3.3.2. Выполнение расчёта	80
3.3.3. Методика расчёта балок	80
3.3.3.1. Проверка прочности по нормальным напряжениям ..	81
3.3.3.2. Проверка несущей способности на сдвиг	81
3.3.3.3. Проверка местной несущей способности на опорах ..	82
3.3.3.4. Проверка по прогибам	82
3.3.4. Результаты расчёта	82
3.3.4.1. Просмотр Отчёта	82
3.3.4.2. Просмотр Эпюр	92
3.4. Расчёт прогонов покрытия	93
3.4.1. Ввод данных	93
3.4.2. Статический расчёт прогонов	99
3.4.3. Конструктивный расчёт прогонов	102
3.4.3.1. Расчёт по несущей способности	104
3.4.3.1.1. Проверка прочности поперечного сечения по нормальным напряжениям	104
3.4.3.1.2. Проверка устойчивости свободного нижнего пояса	109
3.4.3.1.3. Проверка несущей способности сечения прогона на опорах	110
3.4.3.2. Расчёт по эксплуатационной пригодности	111
3.4.4. Результаты расчёта	111
3.4.4.1. Просмотр Отчёта	112
3.4.4.2. Просмотр Эпюр	124
3.4.5. Тестовые расчёты прогонов покрытия	125
ЛИТЕРАТУРА	139

ВВЕДЕНИЕ

Существенной особенностью стальных холодногнутых профилей является их тонкостенность, которая во многом определяет поведение под нагрузкой элементов и конструкций из таких профилей, а также характер исчерпания их несущей способности. Зачастую последняя связана с потерей местной устойчивости, потерей устойчивости формы сечения, или их совместным действием. Иногда они сами непосредственно являются причиной исчерпания несущей способности (с учётом закритической работы), а в некоторых случаях они провоцируют потерю общей устойчивости, в результате которой и происходит исчерпание несущей способности элемента или всей конструкции. Чем более тонкостенный профиль, тем сложнее работа элемента и, соответственно, его расчёт.

Расчёт стальных тонкостенных холодногнутых профилей исключительно по российским нормам проектирования [1, 2] невозможен. Хотя последние и допускают закритическую работу некоторых компонентов стержней (например, стенки сжатого двутаврового элемента), тем не менее, они не содержат стройной методики расчёта тонкостенных профилей во всём многообразии форм поперечных сечений после потери местной устойчивости в зависимости от уровня напряжений, их распределения по сечению, граничных условий пластин, составляющих профиль.

В экономически развитых зарубежных странах существуют нормы проектирования конструкций из стальных тонкостенных холодногнутых профилей [3, 4, 5]. Общий подход к расчёту стержней в них аналогичен расчёту стержней из более толстого металла. Но при этом, при необходимости, в расчётных формулах фигурируют редуцированные характеристики эффективного сечения. Учитывая это, а также тот факт, что в «Рекомендациях...» ЦНИИПроектстальконструкции им. Н. П. Мельникова [6] по существу изложена такая же общая методика, разработчики CFSteel также приняли аналогичный подход. А именно, расчёт стержневых элементов выполняется по СП 16.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП II-23-81*) [1], но при этом в расчётных формулах, когда это необходимо, участвуют редуцированные геометрические характеристики эффективных сечений, вычисляемые по методике Eurocode 3 (EC3) [3, 7].

CFSteel v.1.x была разработана в 2009 году и предназначалась для вычисления полных и редуцированных *геометрических характеристик* различных типов сечений тонкостенных холодногнутых профилей при различных видах внутренних усилий в них.

Версия 2.x программы появилась в 2011 году и предназначена для расчёта *элементов* конструкций из стальных тонкостенных холодногнутых профилей. В частности, в версии v.2.1 предусмотрены следующие типы поперечных сечений: Швеллер, С-образный, С-образный с рифом на стенке, Z-образный, Сигма-образный профили; сдвоенный Швеллер, сдвоенный С-образный, сдвоенный С-образный с рифом на стенке, сдвоенный Сигма-образный профили. Выполняются расчёты центрально-сжатых,

внецентренно-сжатых, сжато-изгибаемых и изгибаемых элементов. Предусмотрены проверки различных видов устойчивости, прочности и по предельной гибкости.

Версия v.3.0 явилась дальнейшим существенным развитием семейства программ CFSteel. Наряду с расчётами *элементов* конструкций добавлены расчёты *конструкций*: балок и прогонов покрытия.

Рассматриваются одно-, двух- и трёхпролётные балки с консолью и без консоли. Предусмотрен расчёт балок из спаренных С-образных и Сигма-образных профилей. Нагрузка – равномерно-распределённая, неравномерно-распределённая, а также их комбинации. Выполняются расчёты прочности по нормальным напряжениям, несущей способности при действии локальной поперечной силы на опоре, а также по прогибам.

Расчёт прогонов выполняется в соответствии с положениями Раздела 10 EN 1993-1-3 [3]. Для расчёта прогонов предусмотрены разнообразные расчётные схемы: одно-, двух- и трёхпролётные системы с консолью и без консоли. Также возможны перехлёсты прогонов на опорах. Изгибная жёсткость перехлёстов может быть как бесконечной (в этом случае моделируется неразрезной прогон), так и конечной упругой. Закрепление нижних поясов прогонов из плоскости может отсутствовать или в зависимости от количества пролётов в прогоне достигать трёх закреплений на пролёт. Это позволяет моделировать в программе большинство систем прогонов, применяемых в практике строительства. Прогонки могут выполняться из Z-образных, С-образных и Сигма-образных одиночных профилей. Нагрузка – равномерно-распределённая по всей длине прогона. В том числе предусмотрен вариант подъёмной нагрузки. Также предусмотрена возможность появления осевой сжимающей силы в прогоне. Производятся расчёты прочности по нормальным напряжениям, устойчивости свободного пояса из плоскости прогона, несущей способности прогона на опоре, а также проверка прогибов прогона.

Во всех случаях полагается, что на верхний пояс опирается (и надёжно прикрепляется к нему) жёсткий горизонтальный диск из профилированного настила, который обеспечивает общую устойчивость балок и прогонов, а также воспринимает и передаёт на опоры скатную составляющую нагрузки (в случае с прогонами).

Настоящая версия v. 3.1 CFSteel имеет следующие дополнения относительно v.3.0:

- в библиотеку сечений добавлены С-образные профили с двойными отгибами;
- появилась возможность учёта толщины цинкового покрытия профилей.

Программа CFSteel предназначена для подготовленных пользователей, знающих нормы проектирования [1, 3, 7, 8, 24]. Кроме того, пользователь должен принимать во внимание допущения и положения расчёта, принятые в программе и изложенные в данном Руководстве пользователя.

Программный продукт может эксплуатироваться под управлением операционных систем Windows XP, Windows Vista и Windows 7.

*С уважением,
коллектив разработчиков CFSteel*

*www.CFSteel.ru
deltaing@mail.ru*

1. ВЫЧИСЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ

1.1. Общие замечания

В программе вычисляются два вида геометрических характеристик: характеристики полного сечения и характеристики эффективного сечения (редуцированные характеристики). Вычисление выполняется по общепринятым правилам сопротивления материалов с учётом закруглений в местахгиба. Исключением является определение моментов инерции при свободном кручении, секториальных характеристик (в т.ч. положения центра изгиба). Для этих характеристик вычисления выполняются в предположении «острых» углов.

Для полных сечений вычисляются следующие геометрические характеристики: площадь сечения, моменты инерции относительно взаимно перпендикулярных центральных осей, моменты сопротивления сечения и радиусы инерции относительно этих осей, положение центра тяжести сечения и центра изгиба, момент инерции при свободном кручении и секториальный момент инерции, некоторых случаях, положение главных центральных осей, моменты инерции, радиусы инерции и моменты сопротивления относительно этих осей, центробежный момент инерции. Также определяется вес одного погонного метра профиля с учётом толщины цинкового покрытия и теоретическая ширина заготовки.

Для эффективных сечений определяются характеристики: площадь, моменты инерции относительно центральных осей эффективного сечения, моменты сопротивления сечения, радиусы инерции, положение центра тяжести эффективного сечения.

Параметры эффективного сечения определяются по методике ЕС3 [3, 7] по заданным пользователем усилиям. Предусмотрены следующие виды усилий: осевое сжатие, сжатие с изгибом в одной плоскости и плоский изгиб.

1.2. Типы поперечных сечений

1.2.1. Швеллер

Сечение в виде швеллера показано на рисунке 1.1. Предусмотрена возможность разных ширин верхнего и нижнего пояса. Допускаемые значения размеров: $H = 100...400$ мм, $T = 0,8...4$ мм, $B_f = 40...200$ мм, $R = 1...8$ мм.

В таблице 1.1 приведено сравнение геометрических характеристик сечений гнутых швеллеров по ГОСТ 8278 с соответствующими характеристиками, вычисленными по программе CFSteel.

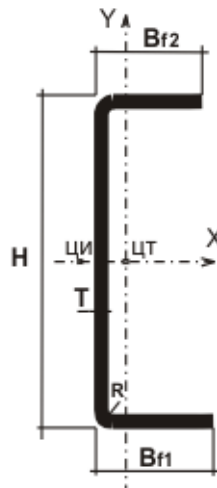


Рисунок 1.1 – Швеллер

1.2.2. С-образное сечение

С-образное сечение показано на рисунке 1.2. В некоторых случаях предусмотрена возможность разных ширин верхнего и нижнего пояса, разных ширин и углов наклона отгибов, а также разных радиусов закругления между стенкой и поясом и между поясом и отгибом. Допускаемые значения размеров: $H = 100...400$ мм, $T = 0,8...4$ мм, $B_f = 40...200$ мм, $C = 5$ мм... $1/3 H$, $\alpha = 60...120^\circ$, $R_{1,2} = 1...8$ мм.

В таблице 1.2 приведено сравнение геометрических характеристик сечений С-образных гнутых профилей по ГОСТ 8282-83* с соответствующими характеристиками, вычисленными по программе CFSteel. В таблице 1.3 представлены характеристики сечений С-образных холодногнутых профилей из оцинкованной стали, производимых различными предприятиями США [9,10,11,12,13] по стандарту североамериканской «Ассоциации

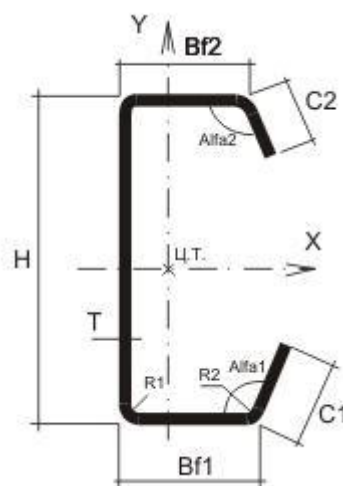


Рисунок 1.2 – С-образное сечение

производителей стальных колонн» [14]. В таблице 1.4 представлены характеристики холодногнутых С-образных профилей производства BlueScope Steel Limited [15] и соответствующие результаты расчёта по CFSteel.

В работе [15] приведён численный пример вычисления геометрических параметров эффективного (редуцированного) сечения С-образного профиля, представленного на рисунке 1.3. Размеры сечения и механические характеристики стали приведены в таблице 1.5. Расчёт выполнен в соответствии с EC3 [3, 7]. Поскольку приведённые вычисления выполнены вручную, вероятно, поэтому в расчёте [15] не

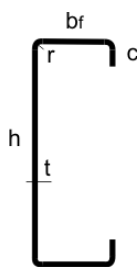


Рисунок 1.3 – С-образный профиль

реализован итерационный процесс, необходимый для уточнения положения центра тяжести редуцированного сечения. Также в работе отсутствует итерационный процесс по определению редуцированного коэффициента χ_d (п.5.5.3.2 [3]), который в дальнейшем используется для редуцирования площади $A_{s,red}$ и толщины t_{red} отгибов и прилегающих к ним участков поясов, которые в совокупности трактуются EN 1993-1-3 как ребро жесткости. Последний итерационный процесс в соответствии с п.5.5.3.2(3) [3] носит рекомендательный характер.

Таблица 1.1 – Сравнение характеристик гнутых швеллеров по ГОСТ 8278 с результатами вычислений по программе CFSteel

h, mm	b _f , mm	t, mm	R, mm	A, cm ²			I _x , cm ⁴			W _x , cm ³			i _x , cm			I _y , cm ⁴			W _y , cm ³			i _y , cm		
				ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
60	32	3	4	3,4	3,4	0,0	18,31	18,28	0,2	6,1	6,09	0,2	2,32	2,32	0	3,38	3,37	0,3	1,52	1,52	0	1	1	0,0
80	50	4	6	6,6	6,6	0,0	65,98	65,89	0,1	16,5	16,5	0,0	3,16	3,16	0,0	16,6	16,6	0,0	4,48	4,88	8,9	1,58	1,58	0,0
100	50	3	4	5,68	5,68	0,0	87,88	87,83	0,1	15,57	17,57	12,8	3,93	3,93	0,0	14,05	14,04	0,1	3,9	3,9	0,0	1,57	1,57	0,0
120	60	4	6	9	9	0,0	198,65	198,52	0,1	33,11	33,09	0,1	4,7	4,7	0,0	31,92	31,88	0,1	7,42	7,41	0,1	1,88	1,88	0,0
140	60	4	6	9,8	9,8	0,0	285,42	285,27	0,1	40,77	40,75	0,0	5,39	5,39	0,0	33,57	33,53	0,1	7,59	7,58	0,1	1,85	1,85	0,0
160	80	4	6	12,2	12,2	0,0	489,16	489	0,0	61,14	61,12	0,0	6,33	6,33	0,0	78,01	77,96	0,1	13,44	13,43	0,1	2,53	2,53	0,0
180	80	5	7	16,09	16,09	0,0	784,86	784,5	0,0	87,21	87,17	0,0	6,98	6,98	0,0	99,15	99,06	0,1	16,85	16,85	0,1	2,48	2,48	0,0
200	80	4	6	13,81	13,81	0,0	823,48	823,27	0,0	82,35	82,33	0,0	7,72	7,72	0,0	83,67	83,63	0,0	13,86	13,86	0,0	2,46	2,46	0,0
250	125	6	9	28,66	28,66	0,0	2811,7	2810,8	0,0	224,94	224,87	0,0	9,9	9,9	0,0	448,01	447,78	0,1	49,33	49,31	0,0	3,95	3,95	0,0
300	100	8	12	37,62	37,62	0,0	4694,8	4692,2	0,1	312,98	312,81	0,1	11,17	11,17	0,0	327,88	327,5	0,1	42,94	42,91	0,1	2,95	2,95	0,0

Таблица 1.2 – Сравнение характеристик С-образных гнутых профилей по ГОСТ 8282-83* с результатами вычислений по программе CFSteel

h, mm	b _f , mm	c, mm	t, mm	R, mm	A, cm ²			I _x , cm ⁴			W _x , cm ³			i _x , cm			I _y , cm ⁴			W _y , cm ³			i _y , cm		
					ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%	ГОСТ	CFSteel	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
62	66	17,5	3	4,5	6,23	6,23	0,0	40,14	41,3	2,9	12,95	13,12	1,3	2,54	2,58	1,6	36,65	35,5	3,1	9,61	9,51	1,0	2,39	2,39	0,0
65	32	8	1	1,5	1,38	1,38	0,0	9,38	9,4	0,2	2,69	2,89	7,4	2,61	2,61	0,0	1,89	1,9	0,5	0,88	0,88	0,0	1,17	1,17	0,0
100	50	10	2	3	4,12	4,1	0,5	65,59	65,6	0,0	13,12	13,11	0,1	4	4	0,0	12,64	12,6	0,3	3,6	3,68	2,2	1,76	1,75	0,6
120	55	18	5	7,5	11,66	11,44	1,9	245,74	237,5	3,4	40,96	39,58	3,4	4,59	4,56	0,7	42,52	40,5	4,8	11,65	11,04	5,2	1,91	1,88	1,6
160	50	20	3	4,5	8,36	8,33	0,4	306,37	304,6	0,6	38,3	38,07	0,6	6,05	6,05	0,0	27,12	26,9	0,8	7,74	7,66	1,0	1,8	1,8	0,0
300	60	50	5	7,5	24,36	24,14	0,9	2861,6	2811,8	1,7	190,77	187,46	1,7	10,84	10,79	0,5	125,61	123,1	2,0	30,42	29,73	2,3	2,27	2,26	0,4
400	160	50	3	4,5	24,01	23,93	0,3	6073	6042	0,5	303,7	302,12	0,5	15,94	15,89	0,3	884,5	878,7	0,7	80,83	80,23	0,7	6,07	6,06	0,2
550	65	30	4	6	28,55	28,41	0,5	10258	10154	1,0	373	369	1,1	18,96	18,9	0,3	110,3	108,1	2,0	20,64	20,19	2,2	1,97	1,95	1,0

Таблица 1.3 - С-образные профили. Сопоставление результатов, полученных по CFSteel, с данными североамериканских производителей

Профиль (обозначение по SSMA)	b _f , мм	c, мм	t, мм	Источник, расхождение в %	Характеристики полного сечения						I _x , см ⁴	I _w , см ⁶	X _{ши} , см
					A, см ²	I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _y , см ⁴	i _y , см			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
600S137-33 h=152,4 мм	34,8	9,53	0,88	[9],[10],[11],[12],[13]	2,05	65,8	8,63	5,66	2,87	1,18	0,0053	132,62	-2,09
				CFSteel	2,05	65,8	8,64	5,66	2,8	1,17	0,0054	129,59	-2,08
				%	0,0	0,0	0,1	0,0	2,4	0,8	1,9	2,3	0,5
600S137-43			1,15	[9],[10],[11],[12],[13]	2,66	85	11,16	5,65	3,62	1,17	0,0117	168,13	-2,07
				CFSteel	2,67	85,1	11,17	5,64	3,6	1,16	0,012	164,43	-2,06
				%	0,4	0,1	0,1	0,2	0,6	0,9	2,6	2,2	0,5
600S137-54			1,44	[9],[10],[11],[12],[13]	3,31	104,8	13,75	5,62	4,37	1,15	0,0228	203,63	-2,04
				CFSteel	3,32	104,7	13,75	5,62	4,3	1,14	0,0234	198,17	-2,03
				%	0,3	0,1	0,0	0,0	1,6	0,9	2,6	2,7	0,5
600S137-68			1,81	[9],[10],[11],[12],[13]	4,13	128,8	16,9	5,59	5,2	1,13	0,0451	245,06	-2,01
				CFSteel	4,13	128,8	16,9	5,59	5,2	1,12	0,0462	237,29	-2
				%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	2,4	3,2	0,5
600S137-97			2,58	[9],[10],[11],[12],[13]	5,73	174,4	22,88	5,51	6,62	1,06	0,1276	317,15	-1,96
				CFSteel	5,73	174	22,84	5,51	6,6	1,07	0,1321	303	-1,95
				%	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,9	3,5	4,5	0,5
600S162-33	41,1	12,5	0,88	[9],[10],[11],[12],[13]	2,22	74,6	9,8	5,8	4,8	1,48	0,0057	228,92	-2,77
				CFSteel	2,22	74,4	9,76	5,79	4,8	1,47	0,0058	221,02	-2,75
				%	0,0	0,3	0,4	0,2	0,0	0,7	1,8	3,5	0,7
600S162-43			1,15	[9],[10],[11],[12],[13]	2,88	96,3	12,65	5,78	6,2	1,46	0,0126	291,06	-2,75
				CFSteel	2,89	96,3	12,64	5,78	6,1	1,45	0,0129	281,56	-2,72
				%	0,3	0,0	0,1	0,0	1,6	0,7	2,4	3,3	1,1
600S162-54			1,44	[9],[10],[11],[12],[13]	3,59	119	15,62	5,76	7,5	1,45	0,0247	354,54	-2,72
				CFSteel	3,58	118,7	15,58	5,75	7,4	1,44	0,0253	340,88	-2,7
				%	0,3	0,3	0,3	0,2	1,3	0,7	2,4	3,9	0,7
600S162-68			1,81	[9],[10],[11],[12],[13]	4,47	146,7	19,26	5,73	9,1	1,42	0,0489	429,32	-2,69
				CFSteel	4,46	146,3	19,2	5,72	8,9	1,42	0,0499	410,57	-2,67
				%	0,2	0,3	0,3	0,2	2,2	0,0	2,0	4,4	0,7
600S162-97			2,58	[9],[10],[11],[12],[13]	6,23	199,7	26,21	5,66	11,8	1,37	0,1386	563	-2,64
				CFSteel	6,21	198,8	26,08	5,66	11,6	1,37	0,1427	531,04	-2,61
				%	0,3	0,5	0,5	0,0	1,7	0,0	3,0	5,7	1,1
600S200-33	50,8	15,9	0,88	[9],[10],[11],[12],[13]	2,44	86,4	11,34	5,94	8,7	1,86	0,0063	424,21	-3,76
				CFSteel	2,45	86,5	11,35	5,94	8,7	1,89	0,0064	417,68	-3,76
				%	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	1,6	1,6	1,5	0,0
600S200-43			1,15	[9],[10],[11],[12],[13]	3,17	111,7	14,65	5,93	11,2	1,88	0,0139	541,23	-3,73
				CFSteel	3,19	112,1	14,71	5,93	11,2	1,88	0,0143	534,11	-3,73
				%	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	2,9	1,3	0,0
600S200-54			1,44	[9],[10],[11],[12],[13]	3,95	138,1	18,13	5,91	13,7	1,86	0,0273	662	-3,71
				CFSteel	3,96	138,4	18,16	5,91	13,7	1,86	0,0279	649,53	-3,71
				%	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	2,2	1,9	0,0
600S200-68			1,81	[9],[10],[11],[12],[13]	4,93	170,7	22,41	5,88	16,7	1,87	0,0539	806,19	-3,68
				CFSteel	4,93	170,9	22,43	5,89	16,7	1,84	0,0551	786,86	-3,68
				%	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	1,6	2,2	2,4	0,0
600S200-97			2,58	[9],[10],[11],[12],[13]	6,94	233,6	30,67	5,82	22,1	1,79	0,1531	1070,9	-3,62
				CFSteel	6,88	233,6	30,66	5,83	22,1	1,79	0,1577	1030,9	-3,62
				%	0,9	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	3,0	3,7	0,0

Окончание табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
600S250-43	63,5	15,9	1,15	[9],[10],[11],[12],[13]	3,46	128,3	16,83	6,09	19,1	2,34	0,015	908,95	-4,82
				CFSteel	3,48	128,8	16,9	6,08	19,1	2,35	0,0155	896,97	-4,82
				%	0,6	0,4	0,4	0,2	0,0	0,4	3,3	1,3	0,0
600S250-54			1,44	[9],[10],[11],[12],[13]	4,32	158,9	20,86	6,07	23,4	2,33	0,0298	1115,3	-4,8
				CFSteel	4,33	159,2	20,9	6,04	23,5	2,33	0,0304	1094,3	-4,8
				%	0,2	0,2	0,2	0,5	0,4	0,0	2,0	1,9	0,0
600S250-68			1,81	[9],[10],[11],[12],[13]	5,39	196,7	25,83	6,04	28,6	2,31	0,0589	1364,1	-4,77
				CFSteel	5,39	197	25,85	6,04	28,7	2,31	0,0601	1331,1	-4,77
				%	0,0	0,2	0,1	0,0	0,3	0,0	2,0	2,4	0,0
600S250-97			2,58	[9],[10],[11],[12],[13]	7,54	270,4	35,48	5,99	38,4	2,26	0,1677	1828,7	-4,72
				CFSteel	7,54	270,4	35,48	5,99	38,5	2,26	0,1722	1759,7	-4,72
				%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	2,7	3,8	0,0
800S137-33 h=203,2 mm	34,8	9,53	0,88	[9],[10],[11],[12],[13]	2,5	133,1	13,1	7,29	3,04	1,1	0,0064	255,01	-1,8
				CFSteel	2,5	133,1	13,1	7,29	3	1,1	0,0065	250,12	-1,79
				%	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	1,6	1,9	0,6
800S137-43			1,15	[9],[10],[11],[12],[13]	3,24	172,1	16,9	7,28	3,9	1,09	0,0142	323,34	-1,78
				CFSteel	3,26	172,4	17	7,28	3,9	1,09	0,0146	317,81	-1,77
				%	0,6	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	2,8	1,7	0,6
800S137-54			1,44	[9],[10],[11],[12],[13]	4,04	212,7	20,9	7,25	4,7	1,07	0,0279	392,74	-1,76
				CFSteel	4,05	213,2	21	7,25	4,7	1,07	0,0285	384,32	-1,75
				%	0,2	0,2	0,5	0,0	0,0	0,0	2,2	2,1	0,6
800S137-68			1,81	[9],[10],[11],[12],[13]	5,04	262,3	25,8	7,21	5,6	1,05	0,0551	473,98	-1,73
				CFSteel	5,06	264,3	26	7,22	5,5	1,06	0,0563	462,1	-1,72
				%	0,4	0,8	0,8	0,1	1,8	1,0	2,2	2,5	0,6
800S137-97			2,58	[9],[10],[11],[12],[13]	7,05	357,8	35,2	7,12	7	1	0,1568	617,36	-1,67
				CFSteel	7,12	365,7	36	7,17	7,4	1,02	0,1612	596,69	-1,66
				%	1,0	2,2	2,3	0,7	5,7	2,0	2,8	3,3	0,6

В программе CFSteel реализованы оба упомянутых итерационных процесса. В таблице 1.6 приведены результаты, полученные при первом прохождении цикла, т.е. результаты нулевой итерации, которые должны соответствовать результатам, приведённым в работе [15]. Редуцированное сечение показано на рисунке 1.4.

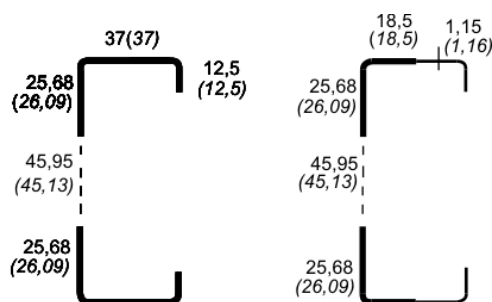


Рисунок 1.4 – Редуцированное сечение:

- а) редукция с учётом потери местной устойчивости стенки,
 б) редукция с учётом потери местной устойчивости и потери устойчивости формы сечения
 (в скобках показаны размеры по CFSteel)

Таблица 1.4 - С-образные профили. Сопоставление результатов, полученных по CFSteel, с данными BlueScope Steel Limited

Профиль	t, мм	Источник, расхождение в %	Характеристики полного сечения										
			A, см ²	I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _y , см ⁴	W _y , см ³	i _y , см	z ₀ , см	Центр изгиба X _c , см	I _t , см ⁴	I _w , см ⁶
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C10010	1	Lysaght	2,16	36,4	7,13	4,11	7,55	2,19	1,87	1,66	-3,99	0,00719	160
		CFSteel	2,16	36,4	7,13	4,11	7,5	2,19	1,87	1,66	-4,18	0,0075	163
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	4,8	4,3	1,9
C10012	1,2	Lysaght	2,58	43,2	8,48	4,1	8,92	2,59	1,86	1,66	-3,97	0,0124	188
		CFSteel	2,58	43,2	8,48	4,1	8,9	2,59	1,86	1,66	-4,16	0,0129	192
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	4,8	4,0	2,1
C10015	1,5	Lysaght	3,23	53,7	10,5	4,08	11,2	3,29	1,87	1,69	-4,01	0,0242	241,0
		CFSteel	3,23	53,7	10,53	4,08	11,2	3,29	1,87	1,69	-4,21	0,0253	245,4
		%	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	5,0	4,5	1,8
C10019	1,9	Lysaght	4,09	67,3	13,2	4,06	14,2	4,21	1,87	1,72	-4,04	0,0492	311,0
		CFSteel	4,09	67,3	13,2	4,06	14,2	4,2	1,87	1,72	-4,25	0,0515	315,3
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	5,2	4,7	1,4
C15012	1,2	Lysaght	3,54	129	17	6,04	18,8	4,17	2,31	1,89	-4,65	0,017	842,0
		CFSteel	3,54	129	16,97	6,04	18,8	4,17	2,31	1,89	-4,83	0,0175	860,5
		%	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	2,9	2,2
C15015	1,5	Lysaght	4,43	161	21,1	6,02	23,7	5,29	2,31	1,92	-4,69	0,0332	1070,0
		CFSteel	4,43	161	21,1	6,02	23,7	5,28	2,31	1,92	-4,87	0,0343	1093,0
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	3,8	3,3	2,1
C15019	1,9	Lysaght	5,61	202	26,6	6	30	6,74	2,31	1,95	-4,71	0,0675	1370,0
		CFSteel	5,61	202	26,6	6	30	6,74	2,31	1,95	-4,9	0,0698	1396,4
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	3,4	1,9
C15024	2,4	Lysaght	7,12	254	33,5	5,98	38,6	8,79	2,33	2,01	-4,8	0,137	1810,0
		CFSteel	7,12	254	33,5	5,98	38,6	8,78	2,33	2,01	-5	0,142	1836,4
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	4,2	3,6	1,5

Окончание табл. 1.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C20015	1,5	Lysaght	5,55	353	34,7	7,97	39,6	7,17	2,67	2,07	-5,16	0,0416	3060,0
		CFSteel	5,55	353	34,7	7,97	39,6	7,17	2,67	2,07	-5,33	0,0427	3140,8
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	2,6	2,6
C20019	1,9	Lysaght	7,13	451	44,4	7,96	53,1	9,77	2,73	2,18	-5,36	0,0859	4240,0
		CFSteel	7,13	451	44,4	7,95	53	9,77	2,73	2,17	-5,54	0,0881	4326,4
		%	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,5	3,4	2,6	2,0
C20024	2,4	Lysaght	9,04	569	56	7,93	68,1	12,7	2,74	2,24	-5,44	0,174	5540
		CFSteel	9,04	569	56	7,93	68	12,7	2,74	2,23	-5,63	0,179	5635
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	3,5	2,9	1,7
C25019	1,9	Lysaght	8,08	762	60	9,71	56,1	9,86	2,64	1,91	-4,85	0,0972	6860
		CFSteel	8,08	762	60	9,71	56,1	9,86	2,64	1,91	-5,01	0,0995	7053
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	2,4	2,8
C25024	2,4	Lysaght	10,2	962	75,7	9,69	72,1	12,8	2,65	1,96	-4,93	0,197	8920,0
		CFSteel	10,2	962	75,7	9,69	72,1	12,8	2,65	1,96	-5,1	0,202	9145,0
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	2,5	2,5
C30024	2,4	Lysaght	12,6	1700	113	11,6	151	21,7	3,46	2,62	-6,6	0,243	26800,0
		CFSteel	12,6	1698	113	11,6	151	21,7	3,46	2,62	-6,8	0,248	27206,0
		%	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	2,1	1,5
C30030	3	Lysaght	16	2130	142	11,6	196	28,5	3,5	2,63	-6,79	0,479	35700,0
		CFSteel	16	2133	142	11,6	196	28,5	3,5	2,73	-6,97	0,489	36104,0
		%	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	2,7	2,1	1,1
C35030	3	Lysaght	19,1	3580	205	13,7	382	42,3	4,47	3,47	-8,63	0,573	90000,0
		CFSteel	19,1	3581	205	13,7	382	42,3	4,47	3,47	-8,81	0,583	91222,0
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	1,7	1,4

Таблица 1.5 – Значения размеров С-профиля и механических характеристик стали

Параметр	h, мм	b _f , мм	c, мм	t, мм	г, мм	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа
Значение	97,3	37,0	12,5	1,48	0,85	505	2,1*10 ⁵

Таблица 1.6 – Сопоставление расчёта редуцированных характеристик С-образного профиля по [15] и по CFSteel

№ п/п	Параметр	Пункт EN 1993-1-3 EN 1993-1-5	[15]	CFSteel	Расхождение, %
1	Полная площадь сечения A _g , мм ²		277,1	281	1,2
2	Расчётная ширина отгиба, c _{peff} , мм	5.1(1)	11,29	11,29	0
3	Расчётная ширина пояса b _{peff} , мм	5.1(1)	34,59	34,59	0
4	Расчётная высота стенки h _{peff} , мм	5.1(1)	94,89	94,89	0
5	Относительная гибкость отгиба λ _{pc}	4.4(2)	0,562	0,557	0,9
6	Относительная гибкость пояса λ _{pb}	4.4(2)	0,609	0,603	1,0
7	Относительная гибкость стенки λ _{ph}	4.4(2)	1,671	1,653	1,0
8	Редукционный коэффициент для отгиба ρ _c	4.4(2)	1	1	0
9	Редукционный коэффициент для пояса ρ _f	4.4(2)	1	1	0
10	Редукционный коэффициент для стенки ρ _w	4.4(2)	1	1	0
11	Площадь редуцированного с учетом потери местной устойчивости стенки сечения A _{eff} , мм ²		211,87	212	0,06
12	Полная площадь ребра жёсткости на поясе A _s , мм ²		42,66	42,31	0,8
13	Момент инерции полного ребра жёсткости относительно собственной оси, параллельной плоскости пояса I _s , мм ⁴		560,24	560,21	0
14	Параметр упругой жёсткости K, Н/мм ²	5.3.1(5)	1,193	1,196	0,3
15	Критическое напряжение для ребра жёсткости σ _{cr,s} , МПа	5.5.3.2(7)	555	550	0,9
16	Относительная гибкость λ _d	5.3.1(7)	0,963	0,964	0,1
17	Редукционный коэффициент χ _d	5.3.1(7)	0,774	0,773	0,1
18	Редуцированная площадь ребра жёсткости на поясе A _{s red} , мм ²	5.5.3.2(11)	33,01	33,16	0,5
19	Редуцированная толщина ребра жесткости на поясе t _{red} , мм	5.5.3.2(12)	1,15	1,16	0,9
20	Площадь редуцированного сечения с учётом потери местной устойчивости и потери устойчивости формы A _{eff} , мм ²		190,24	192,19	1,0

1.2.3. С-образное сечение с двойными отгибами

С-образное сечение с двойными отгибами показано на рисунке 1.5. В некоторых случаях предусмотрена возможность разных ширин верхнего и нижнего пояса, разных ширин верхних и нижних вертикальных частей отгибов, а также разных ширин и углов наклона вторых отгибов. Допускаемые значения размеров: $H = 100 \dots 400$ мм, $T = 0,8 \dots 4$ 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.

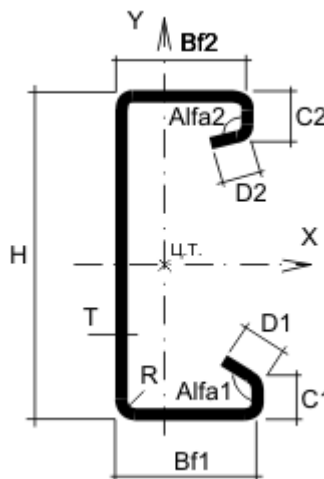


Рисунок 1.5 – С-образное сечение с двойными отгибами

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

1.2.4. С-образное сечение с рифом на стенке

С-образное сечение с рифом на стенке показано на рисунке 1.6. В некоторых случаях предусмотрена

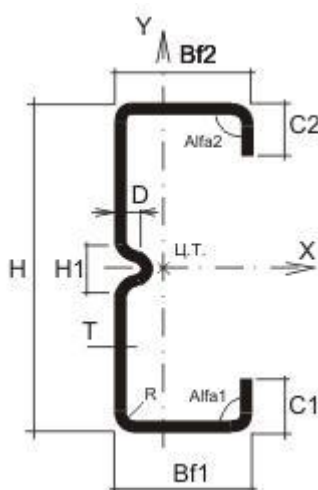


Рисунок 1.6 – С-образное сечение с рифом на стенке

возможность разных ширин верхнего и нижнего пояса, разных ширин и углов наклона отгибов. Радиусы всех закруглений одинаковые. Допускаемые значения размеров: $H =$

$100...40$ мм, $T = 0,8...4$ мм, $B_f = 40...200$ мм, $D \geq 5$ мм, $C = 5$ мм... $1/3 H$, $\alpha = 60...120^\circ$, $R = 1...8$ мм.

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

1.2.5. Сигма-образное сечение

Сигма-образное сечение показано на рисунке 1.7. В некоторых случаях предусмотрена возможность

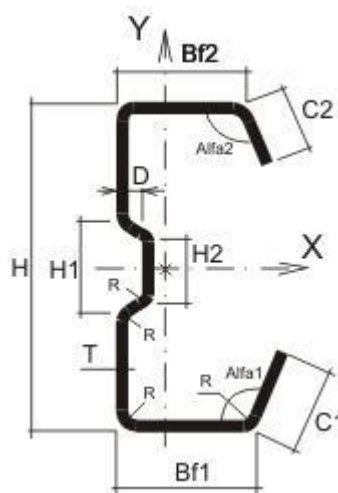


Рисунок 1.7 – Сигма-образный профиль

разных ширин верхнего и нижнего пояса, разных ширин и углов наклона отгибов. Радиусы всех закруглений одинаковые. Допускаемые значения размеров: $H = 100...400$ мм, $T = 0,8...4$ мм, $B_f = 40...200$ мм, $H1 = H2...H-2R$, $H2 = 5\text{мм}...H1$, $D \geq 5$ мм, $C = 5$ мм... $1/3 H$, $\alpha = 60...120^\circ$, $R = 1...8$ мм.

При вычислении редуцированных характеристик эффективного сечения считается, что жёсткости двух наклонных участков стенки в направлении оси X 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.

В таблице 1.7 приведены характеристик холодногнутых Сигма-образных профилей из оцинкованной стали производства A. Kalpinis-N. Simos S.A. [16] и соответствующие результаты расчёта по CFSteel.

1.2.6. Z-образное сечение

Z-образное сечение показано на рисунке 1.8. Предусмотрена возможность разных ширин верхнего и нижнего пояса, разных ширин и углов наклона отгибов, а также разных

радиусов закругления между стенкой и поясом и между поясом и отгибом. Допускаемые значения размеров: $H = 100 \dots 400$ мм, $T = 0,8 \dots 4$ мм, $B_f = 40 \dots 200$ мм, $C = 10$ мм $\dots 1/3 H$, $\alpha = 45 \dots 135^\circ$, $R = 1 \dots 8$ мм.

В таблице 1.8 представлены характеристики холодногнутых Z-образных профилей из оцинкованной стали производства BlueScope Steel Limited [17] и соответствующие результаты расчёта по CFSteel.

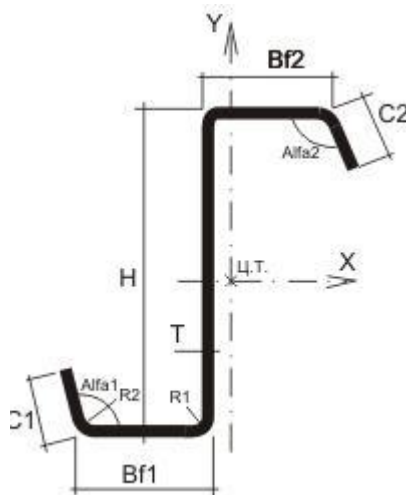


Рисунок 1.8 – Z-образное сечение

Таблица 1.7 - Сигма-образный профиль. Сопоставление результатов, полученных по CFSteel, с данными А. Kalpinis-N. Simos S.A.

Профиль	t, мм	Источник, расхождение, %	Характеристики полного сечения						
			A, см ²	I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _y , см ⁴	W _y , см ³	i _y , см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
175	1,5	Каталог производителя	5,28	231,54	26,58	6,64	22,29	5,93	2,06
		CFSteel	5,31	231,26	26,43	6,6	21,98	5,8	2,03
		%	0,6	0,1	0,6	0,6	1,4	2,2	1,5
	2	Каталог производителя	7,03	308,24	35,23	6,62	29,15	7,78	2,04
		CFSteel	7,03	303,52	34,69	6,57	28,46	7,52	2,01
		%	0,0	1,5	1,5	0,8	2,4	3,3	1,5
	2,5	Каталог производителя	8,77	381,97	43,65	6,6	35,65	9,53	2,02
		CFSteel	8,72	373,42	42,68	6,54	34,54	9,14	1,99
		%	0,6	2,2	2,2	0,9	3,1	4,1	1,5
205	1,5	Каталог производителя	5,72	340,24	33,19	7,72	22,36	6,01	1,98
		CFSteel	5,76	339,05	33,08	7,67	22,06	5,88	1,96
		%	0,7	0,3	0,3	0,6	1,3	2,2	1,0
	2	Каталог производителя	7,62	451,47	44,05	7,7	29,26	7,88	1,96
		CFSteel	7,63	445,61	43,47	7,64	28,58	7,63	1,94
		%	0,1	1,3	1,3	0,8	2,3	3,2	1,0
	2,5	Каталог производителя	9,5	?	54,64	7,68	35,8	9,66	1,94
		CFSteel	9,47	549	53,56	7,61	34,7	9,28	1,91
		%	0,3		2,0	0,9	3,1	3,9	1,5
	3	Каталог производителя	11,36	665,99	64,97	7,66	41,96	11,36	1,92
		CFSteel	11,29	649,24	63,34	7,58	40,45	10,84	1,89
		%	0,6	2,5	2,5	1,0	3,6	4,6	1,6
225	1,5	Каталог производителя	6,39	469,62	41,74	8,57	33,65	7,73	2,3
		CFSteel	6,46	470,58	41,83	8,54	33,4	7,62	2,27
		%	1,1	0,2	0,2	0,4	0,7	1,4	1,3
	2	Каталог производителя	8,52	623,91	55,46	8,56	44,14	10,16	2,28
		CFSteel	8,56	619,55	55,07	8,51	43,39	9,91	2,25
		%	0,5	0,7	0,7	0,6	1,7	2,5	1,3
	2,5	Каталог производителя	10,64	774,92	68,88	8,54	54,13	12,48	2,26
		CFSteel	10,63	764,63	67,97	8,48	52,83	12,23	2,23
		%	0,1	1,3	1,3	0,7	2,4	2,0	1,3

Окончание табл. 1.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
255	1,5	Каталог производителя	6,83	634,26	49,75	9,64	33,65	7,73	2,22
		CFSteel	6,91	636,46	49,92	9,6	33,39	7,62	2,2
		%	1,2	0,3	0,3	0,4	0,8	1,4	0,9
	2	Каталог производителя	9,11	843,18	66,13	9,63	44,14	10,16	2,2
		CFSteel	9,16	838,67	65,78	9,57	43,37	9,92	2,18
		%	0,5	0,5	0,5	0,6	1,7	2,4	0,9
	2,5	Каталог производителя	11,37	1047,91	82,19	9,6	54,13	12,5	2,18
		CFSteel	11,38	1035,96	81,25	9,54	52,82	12,1	2,15
		%	0,1	1,1	1,1	0,6	2,4	3,2	1,4
	3	Каталог производителя	13,61	1248,49	97,92	9,58	63,64	14,72	2,16
		CFSteel	13,58	1228,4	96,34	9,51	61,37	14,17	2,13
		%	0,2	1,6	1,6	0,7	3,6	3,7	1,4

1.2.7. Двойной Швеллер

Сечение, составленное из двух швеллеров, показано на рисунке 1.8. Расстояние между профилями $S \geq 0$. Допускаемые значения размеров: $H = 100...400$ мм, $T = 0,8...4$ мм, $B_f = 40...200$ мм, $R = 1...8$ мм.

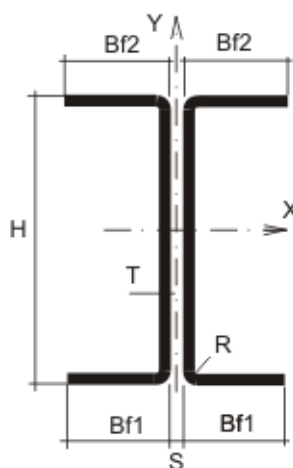


Рисунок 1.8 – Двойной швеллер

Таблица 1.8 - Z-образный профиль. Сопоставление результатов, полученных по CFSteel, с данными BlueScope Steel Limited

Профиль	t, мм	Источник, расхождение в %	Характеристики полного сечения						
			A, см ²	I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _y , см ⁴	W _y , см ³	i _y , см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z10010	1	BSSL	2,16	36,4	7	4,11	13,1	2,56	2,47
		CFSteel	2,16	36,2	7,09	4,09	13,4	2,61	2,49
		%	0,0	0,5	1,3	0,5	2,3	2,0	0,8
Z10012	1,2	BSSL	2,58	43,2	8,32	4,1	15,5	3,02	2,45
		CFSteel	2,58	43,1	8,3	4,1	15,8	3,08	2,48
		%	0,0	0,2	0,2	0,0	1,9	2,0	1,2
Z10015	1,5	BSSL	3,23	53,7	10,3	4,08	19,7	3,84	2,47
		CFSteel	3,23	53,5	10,31	4,07	20,05	3,92	2,49
		%	0,0	0,4	0,1	0,2	1,8	2,1	0,8
Z10019	1,9	BSSL	4,09	67,3	13	4,06	25	4,92	2,47
		CFSteel	4,1	67,1	13,2	4,05	25,5	5,01	2,49
		%	0,2	0,3	1,5	0,2	2,0	1,8	0,8
Z15012	1,2	BSSL	3,54	129	16,7	6,04	30,3	4,78	2,93
		CFSteel	3,56	128	16,9	6	30,1	4,9	2,96
		%	0,6	0,8	1,2	0,7	0,7	2,5	1,0
Z15015	1,5	BSSL	4,43	160	20,8	6,02	38,3	6,06	2,94
		CFSteel	4,46	160	21,05	5,99	39,3	6,21	2,97
		%	0,7	0,0	1,2	0,5	2,6	2,5	1,0
Z15019	1,9	BSSL	5,61	201	26,1	5,99	48,7	7,73	2,95
		CFSteel	5,65	201	26,5	5,97	49,9	7,92	2,97
		%	0,7	0,0	1,5	0,3	2,5	2,5	0,7
Z15024	2,4	BSSL	7,12	253	32,6	5,96	63,2	10	2,98
		CFSteel	7,18	254	33,4	5,94	64,8	10,25	3
		%	0,8	0,4	2,5	0,3	2,5	2,5	0,7
Z20015	1,5	BSSL	5,55	353	34,3	7,97	62,1	8,05	3,34
		CFSteel	5,61	353	34,8	7,94	63,7	8,27	3,37
		%	1,1	0,0	1,5	0,4	2,6	2,7	0,9
Z20019	1,9	BSSL	7,13	452	43,9	7,96	84,3	11	3,44
		CFSteel	7,2	453	44,6	7,93	86,7	11,28	3,47
		%	1,0	0,2	1,6	0,4	2,8	2,5	0,9
Z20024	2,4	BSSL	9,07	570	55,3	7,93	110	14,4	3,48
		CFSteel	9,17	573	56,4	7,9	113	14,78	3,51
		%	1,1	0,5	2,0	0,4	2,7	2,6	0,9
Z25019	1,9	BSSL	8,08	762	59,3	9,71	83,3	10,8	3,21
		CFSteel	8,17	764	60,1	9,67	85,6	11,1	3,24
		%	1,1	0,3	1,3	0,4	2,8	2,8	0,9
Z25024	2,4	BSSL	10,3	964	74,9	9,69	108	14,2	3,25
		CFSteel	10,4	967	76,2	9,65	112	14,6	3,28
		%	1,0	0,3	1,7	0,4	3,7	2,8	0,9
Z30024	2,4	BSSL	12,6	1700	112	11,6	232	23,8	4,28
		CFSteel	12,8	1710	113	11,6	240	24,6	4,32
		%	1,6	0,6	0,9	0,0	3,4	3,4	0,9
Z30030	3	BSSL	16	2130	140	11,6	304	31,4	4,36
		CFSteel	16	2151	143	11,53	314	32,4	4,4
		%	0,0	1,0	2,1	0,6	3,3	3,2	0,9
Z35030	3	BSSL	19,1	3580	202	13,7	593	47,2	5,57
		CFSteel	19,4	3615	207	13,7	614	48,9	5,63
		%	1,6	1,0	2,5	0,0	3,5	3,6	1,1

1.2.8. Двойной С-образный профиль

Сечение двойного С-образного профиля показано на рисунке 1.9. Сечение состоит

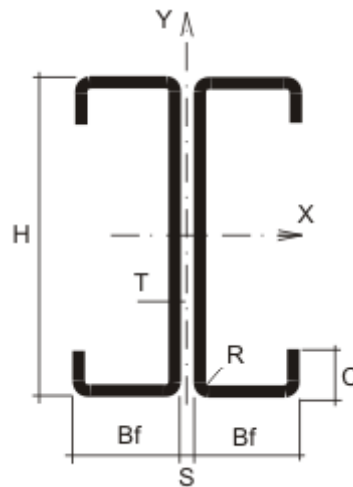


Рисунок 1.9 – Двойной С-образный профиль

из двух С-образных профилей, симметричных относительно оси X. Расстояние между профилями $S \geq 0$. Допускаемые значения размеров: $H = 100 \dots 400$ мм, $T = 0,8 \dots 4$ мм, $B_f = 40 \dots 200$ мм, $C = 10$ мм $\dots 1/3 H$, $\alpha = 90^\circ$, $R = 1 \dots 8$ мм.

1.2.9. Двойной С-образный профиль с двойными отгибами

Сечение двойного С-образного профиля с двойными отгибами показано на рисунке 1.10.

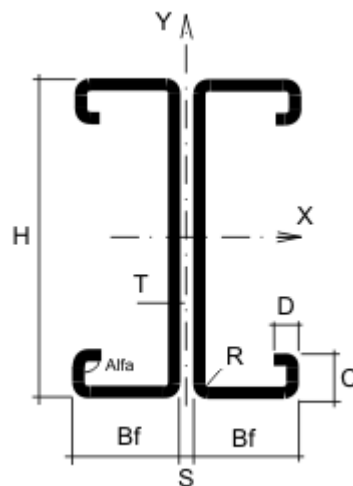


Рисунок 1.10 – Двойной С-образный профиль с двойными отгибами

Сечение состоит из двух С-образных профилей с двойными отгибами. Каждый профиль симметричен относительно оси X. Расстояние между профилями $S \geq 0$. Допускаемые значения размеров: $H = 100 \dots 400$ мм, $T = 0,8 \dots 4$ мм, $B_f = 40 \dots 200$ мм, $C = 5$ мм $\dots 1/5 H$, $D < 1/3 B_f$, $\alpha = 90 \dots 135^\circ$, $R = 1 \dots 8$ мм.

1.2.10. Двойной С-образный профиль с рифом на стенке

Сечение двойного С-образного профиля с рифом показано на рисунке 1.11. Сечение состоит из двух С-профилей с рифом на стенке, симметричных относительно оси X.

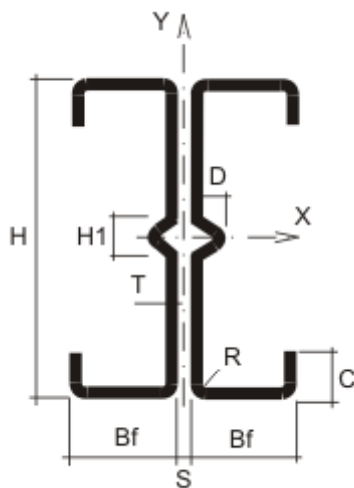


Рисунок 1.11 – Двойной С-образный профиль с рифом на стенке

Расстояние между профилями $S \geq 0$. Допускаемые значения размеров: $H = 100 \dots 400$ мм, $T = 0,8 \dots 4$ мм, $B_f = 40 \dots 200$ мм, $D \geq 5$ мм, $C = 10$ мм $\dots 1/3 H$, $\alpha = 90^\circ$, $R = 1 \dots 8$ мм.

1.2.11. Двойной Сигма-образный профиль

Сечение двойного Сигма-образного профиля показано на рисунке 1.12. Сечение состоит из двух Сигма-профилей, симметричных относительно оси X.

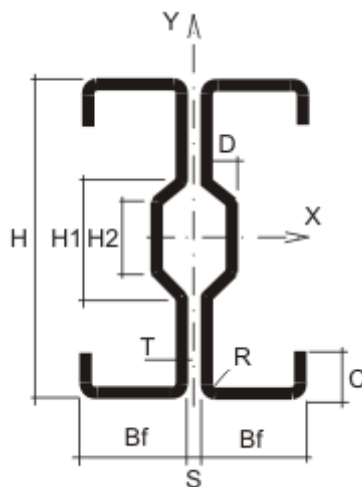


Рисунок 1.12 – Двойной Сигма-образный профиль

Расстояние между профилями $S \geq 0$. Допускаемые значения размеров: $H = 100 \dots 400$ мм, $T = 0,8 \dots 4$ мм, $B_f = 40 \dots 200$ мм, $H1 = H2 \dots H-2R$, $H2 = 5 \text{ мм} \dots H1$, $D \geq 5$ мм, $C = 10 \text{ мм} \dots 1/3H$, $\alpha = 90^\circ$, $R = 1 \dots 8$ мм.

1.3. Ввод параметров сечения

1.3.1. Общие замечания

В программе CFSteel предусмотрено два варианта ввода типа и размеров поперечных сечений элементов или конструкций: выбор из сортаментов и ввод индивидуальных размеров выбранного вида профиля. В первом случае пользователь вначале выбирает сортаментом какого производителя он предполагает воспользоваться. Для каждого вида профиля доступны по два сортамента разных (или одного) производителей.

Важно: Сортаменты профилей встраиваются в программу разработчиком программного обеспечения (ПО) индивидуально для каждого конкретного пользователя при приобретении лицензии. После чего пользователь не может изменить сортаменты без вмешательства разработчика.

Пользователь выбирает нужный **Профиль** из выбранного **Сортамента** (рисунок 1.13). Одновременно в полях **Размеров** появляются их значения, а в поле ниже эскиза сечения появляются название профиля и сортамента.

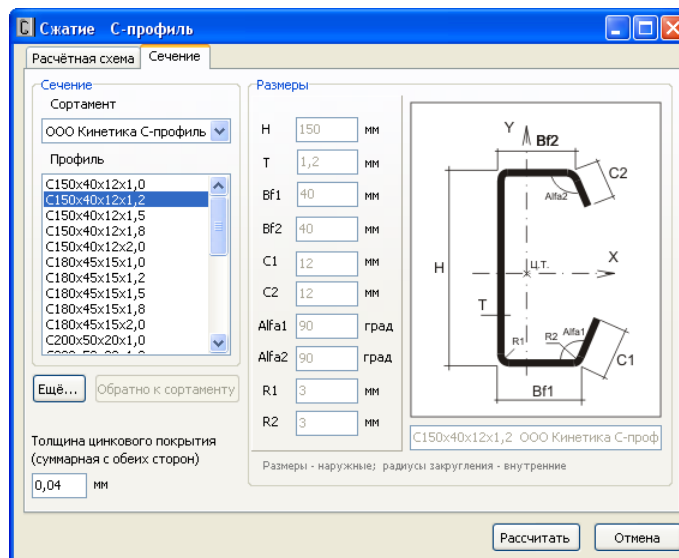


Рисунок 1.13 – Ввод размеров сечения из сортамента

Если необходимо ввести индивидуальные размеры сечения, следует воспользоваться опцией **Ещё...** и с клавиатуры ввести значения размеров в поля **Размеров**, а также название сечения в поле ввода ниже эскиза сечения (не обязательно) (рисунок 1.14).

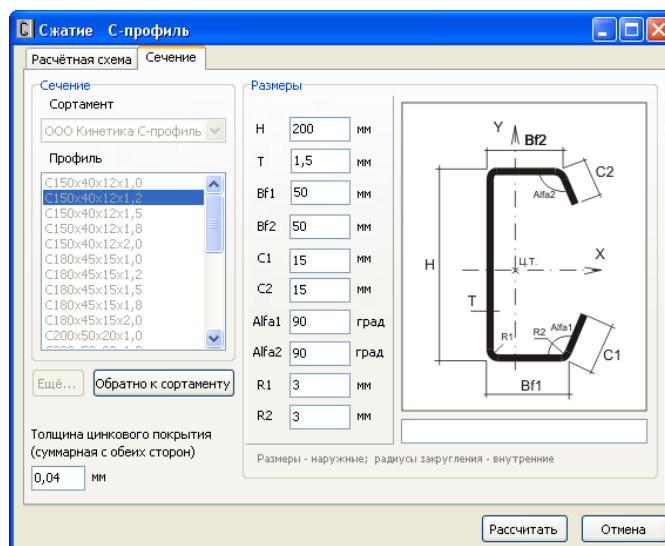


Рисунок 1.14 – Ввод индивидуальных размеров сечения

По кнопке **Обратно к сортаменту** можно вернуться к варианту ввода размеров из сортамента.

В версии v. 3.1 CFSteel имеется возможность в явном виде учитывать толщину цинкового покрытия стали с обеих сторон t_{coat} [3]. Данная характеристика наряду с номинальной толщиной профиля t_{nom} содержится в исходных сортаментах. При необходимости значение t_{coat} можно откорректировать в окне ввода размеров сечения (рисунок 1.14). В том числе, принять равной нулю в случае, если металл профиля ничем не покрыт, например, не оцинкован; или значение толщины профиля уже назначено с учётом какого-либо покрытия.

Геометрические характеристики профилей (площади, моменты инерции, моменты сопротивления сечения, радиусы инерции, секториальные характеристики, и т.д.) вычисляются с учётом расчётной толщины $t = t_{cor} = t_{nom} - t_{coat}$ [3].

По умолчанию t_{coat} принята равной 0,04 мм, что по [3] соответствует толщине цинкового покрытия марки Z275.

2. РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

2.1. Расчёт центрально-сжатых элементов из одиночных профилей

2.1.1. Ввод данных

Для расчёта центрально сжатых элементов необходимо в главном меню выбрать **Элемент**, затем **Центральное сжатие** и далее тип профиля. Для одиночных профилей появляется окно ввода исходных данных (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1 – Пример окна ввода исходных данных

На вкладке **Расчётная схема** вводятся следующие параметры расчёта:

Наименование элемента, где пользователь может ввести название рассчитываемого элемента, наименование конструкции, название проекта или другую информацию (данное поле необязательно для заполнения);

Расчётная продольная сила N в кН;

Геометрическая длина стержня в см;

Коэффициент приведения длины относительно оси X ;

Коэффициент приведения длины относительно оси Y ;

Наименование стали (выбирается из списка или вводится в строку ввода);

Расчётное сопротивление стали R_y в МПа (выбирается из списка или вводится в строку ввода);

Коэффициент условий работы γ_c для расчёта на устойчивость (выбирается из списка или вводится в строку ввода);

Предельная гибкость (выбирается из списка или вводится в строку ввода). Если пользователь выбирает *Проверку не выполнять*, то расчёт по гибкости не выполняется.

При расчёте редуцированных геометрических характеристик эффективного сечения пользователю предоставляется выбор: **Учесть потерю устойчивости формы сечения** или не учитывать (кроме швеллера). В первом случае эффективное сечение формируется с учётом потери местной устойчивости пластин, составляющих профиль, путём исключения участков, потерявших устойчивость (п.5.5.2 [3]), и учёта потери устойчивости формы сечения путём редуцирования толщины ребра жёсткости в составе отгиба и части пояса, примыкающей к нему (п.5.5.3 [3]). Во втором случае учитывается только потеря местной устойчивости.

Эффективность поясов швеллера может определяться как по основному тексту [3], так и по Приложению Д (п. 5.5.2 [3]). Это учтено на вкладке **Расчётная схема** для сечений в виде швеллера.

На вкладке **Сечение** вводятся данные о сечении элемента (Глава 1).

При нажатии на кнопку **Рассчитать** выполняется расчёт и на экран выводится окно результатов расчёта. Если выбрана кнопка **Отмена**, то происходит возврат в главное меню.

2.1.2. Методика расчёта

Для центрально сжатых стержней из одиночных профилей в программе выполняются следующие расчёты:

- проверка на устойчивость по изгибной (плоской) форме потери устойчивости;
- проверка на устойчивость по изгибно-крутильной форме потери устойчивости;
- проверка по предельной гибкости.

Проверка на устойчивость по изгибной форме потери устойчивости выполняется по формуле (7) [1]:

$$\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1 ,$$

где φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии определяется по формулам (8) – (9) [1], A – площадь полного сечения.

Проверка устойчивости по изгибно-крутильной форме выполняется по формуле (10) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_c A R_y \gamma_c} \leq 1 ,$$

где φ_c – коэффициент, определяемый по формуле п.7.1.5 [1] как для швеллера, но при этом учитывается расстояние между центром изгиба и центром тяжести Швеллера, С-образного, С-образного с рифом на стенке или Сигма-образного сечения, вычисляемое в программе;

A – площадь полного сечения.

Проверка по предельной гибкости выполняется исходя из условия

$$\lambda \leq \lambda_u ,$$

где λ – максимальная гибкость элемента, λ_u – предельная гибкость, вводимая пользователем. Параметр α вычисляется в соответствии с таблицей 32 [1].

При заданном уровне нагрузки и введённых размерах сечения может оказаться, что не обеспечена устойчивость одного или нескольких компонентов профиля (стенки, полки, отгибы), иными словами, не обеспечена местная устойчивость. Кроме того, может не обеспечиваться устойчивость формы сечения (кроме швеллера). То есть сечение может быть не полностью эффективным. В этом случае CFSteel выполняет редуцирование сечения в соответствии с п.5.5.2 и 5.5.3 EC3 [3], и в расчётах по методике [1] учитываются редуцированные геометрические характеристики эффективного сечения.

Переход от первоначального (полного) сечения к эффективному сопровождается изменением положения центра тяжести. При этом считается, что нагрузка приложена по-прежнему в центре тяжести первоначального сечения. Таким образом, возникает эксцентриситет в приложении нагрузки. Элемент уже не может считаться центрально сжатым и рассчитывается как внецентренно-сжатый с эксцентриситетом в плоскости X, равным величине смещения центра тяжести эффективного сечения относительно центра тяжести полного сечения.

В данном случае рассматриваются симметричные относительно оси X сжатые с изгибом элементы из одиночных профилей.

Для внецентренно-сжатых стержней выполняются расчёты:

- расчёт на устойчивость в плоскости эксцентриситета;
- расчёт на устойчивость из плоскости эксцентриситета;
- расчёт прочности;
- проверка по предельной гибкости.

Расчёт на устойчивость по изгибно-крутильной форме потери устойчивости (формула (111) [1]) не выполняется, так как в таблице 21 [1] не предусмотрено случая, когда швеллер (или П-образное сечение) имеет эксцентриситет в плоскости X. Такая форма потери устойчивости может произойти в случае, если жёсткость профиля относительно оси X меньше жёсткости относительно оси Y ($I_x < I_y$), что в реальных профилях рассматриваемых форм сечения встречается редко.

Расчёт на устойчивость в плоскости эксцентриситета выполняется по формуле (109) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где φ_e определяется по редуцированным геометрическим характеристикам эффективного сечения по п. 9.2.2. Эксцентриситет e принимается как разность между положением центра тяжести эффективного сечения и центра тяжести полного сечения с учётом направления смещения вдоль оси X. При определении коэффициента влияния формы сечения η в таблице Д.2 [1] рассматриваются сечения в виде швеллера (отгибы С-профилей, С-профилей с рифом и Сигма-профилей не учитываются). A_{eff} – площадь эффективного сечения.

Внецентренно-сжатые элементы, эксцентриситет которых лежит в плоскости наименьшей жёсткости ($I_y < I_x$) при $\lambda_x > \lambda_y$ рассчитываются на устойчивость из плоскости эксцентриситета по формуле (115) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_x A_{eff} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где φ_x – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, определяемый согласно требованиям п.7.1.3 [1] для эффективного сечения. A_{eff} – площадь эффективного сечения. При $\lambda_x \leq \lambda_y$ данный расчёт не производится.

Расчёт прочности элемента выполняется при условии $m_{eff} > 20$ в пределах упругости в предположении отсутствия бимоента по формуле (106) [1]:

$$\left(\frac{N}{A_{eff}} + \frac{M_y}{W_{yeffmin}} \right) / R_y \gamma_c \leq 1 ,$$

где $M_y = e \cdot N$ (принимается абсолютное значение), $W_{yeffmin}$ – минимальное из значений моментов сопротивления эффективного сечения для крайнего левого или правого волокна.

Гибкость элемента должна удовлетворять условию

$$\lambda \leq \lambda_u ,$$

где λ – максимальная гибкость элемента. λ_u – предельная гибкость, вводимая пользователем. Параметр α вычисляется в соответствии с таблицей 32 [1] для эффективного сечения.

2.1.3. Вывод результатов расчёта

Вывод результатов расчёта осуществляется в окно вывода результатов, которое разбито на две области (рисунок 2.2). В левой части содержится текстовая информация. Справа – графическая информация.

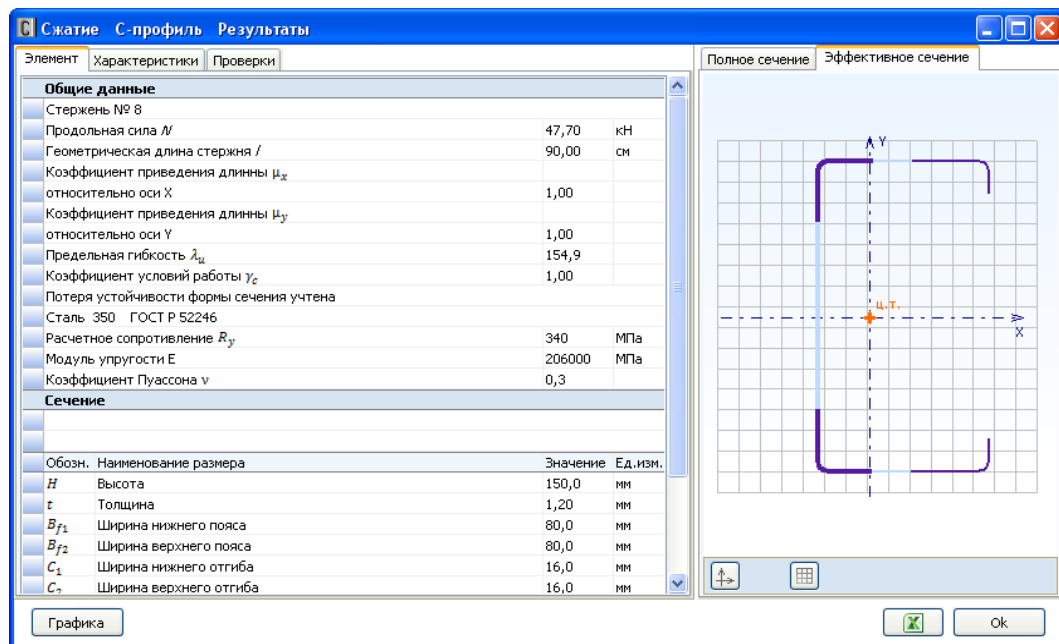


Рисунок 2.2 - Окно результатов расчёта (Элемент - Полное сечение)

Текстовая часть содержит три вкладки. На вкладке **Элемент** приводятся *Общие данные* об элементе, название *Сечения* и его размеры. На вкладке **Характеристики** приводятся геометрические характеристики полного и эффективного сечения (рисунок 2.3). На вкладке **Проверки** приводятся результаты выполненных проверок элемента (рисунок 2.4).

Графическая часть результатов содержит две вкладки. На вкладке **Полное сечение** приводится параметризованное изображение профиля. На вкладке **Эффективное сечение** показывается эффективное сечение, на котором потерявшие устойчивость участки пластин показаны более светлым цветом. Редуцированная толщина ребра жёсткости t_{red} (п. 5.5.3.2 [3]) отображается более тонкой линией если она отличается от полной толщины более чем на 10%.

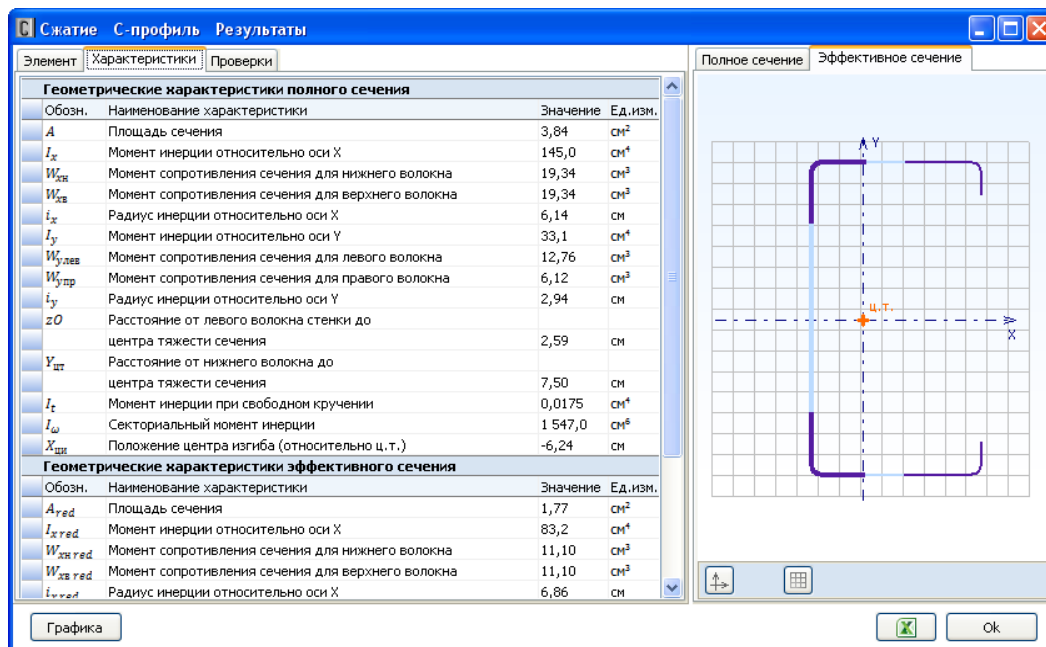





Рисунок 2.3 - Окно результатов расчёта (Характеристики – Эффективное сечение)

Кнопка  позволяет включать/выключать изображение осей. Кнопка  включает/выключает изображение центра изгиба. Кнопка  включает/выключает изображение сетки. По кнопке **Графика** появляется изображение сечения рассчитываемого элемента с обозначением размеров.

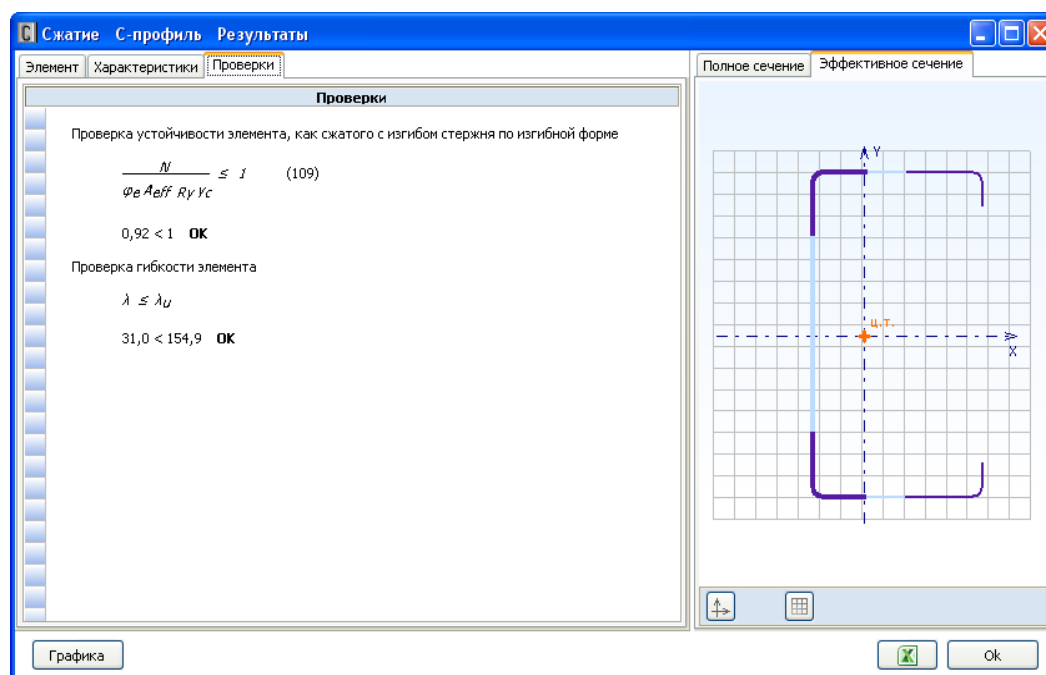




Рисунок 2.4 – Окно результатов расчёта (Проверки – Эффективное сечение)

При нажатии на кнопку  результаты выводятся в Excel в удобной для дальнейшей распечатки форме. Вид отчёта после распечатки из Excel показан на рисунках 2.5 – 2.7.

	ДЕЛЬТА	CFSteel v.3.1		Страница 1
	Инжиниринг	Пользователь		
	www.CFSteel.ru	04.06.2014		
Стержень № 8				
Сечение				
Производитель				
Тип расчёта Сжатие				
Продольная сила N = 47,70 кН				
Геометрическая длина стержня l = 90,00 см				
Коэффициент приведения длины относительно оси X $\mu_x = 1,00$				
Коэффициент приведения длины относительно оси Y $\mu_y = 1,00$				
Предельная гибкость $\lambda_u = 154,9$				
Коэффициент условий работы $\gamma_c = 1,00$				
Сталь 350 ГОСТ Р 52246				
Расчётное сопротивление $R_y = 340$ МПа				
Модуль упругости $E = 206000$ МПа				
Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$				
Потеря устойчивости формы сечения учтена				
Размеры сечения				
Обознач.	Наименование	Значение	Ед. изм.	
H	Высота	150,0	мм	
t	Толщина	1,20	мм	
B _{f1}	Ширина нижнего пояса	80,0	мм	
B _{f2}	Ширина верхнего пояса	80,0	мм	
C ₁	Ширина нижнего отгиба	16,0	мм	
C ₂	Ширина верхнего отгиба	16,0	мм	
α_1	Угол наклона нижнего отгиба	90,0	°	
α_2	Угол наклона верхнего отгиба	90,0	°	
R ₁	Внутренний радиус закругления стенка-отгиб	3,0	мм	
R ₂	Внутренний радиус закругления пояс-отгиб	3,0	мм	
	Вес 1 погонного метра профиля	3,20	кг	
t _{coat}	Толщина цинкового покрытия	0,040	мм	
Результаты				
Проверка устойчивости элемента как внецентренно сжатого стержня				
$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (109)$				
0,92 < 1 ОК				
Проверка гибкости элемента				
$\lambda \leq \lambda_u$				
31,00 < 154,85 ОК				

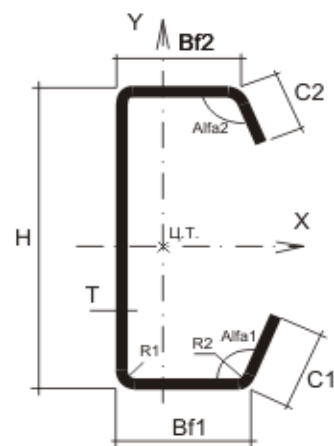


Рисунок 2.5 - Вид Страницы 1 в Excel

ДЕЛЬТА
Инжиниринг
Deltaing@mail.ru

CFSteel v.3.1
Пользователь

Страница 2
04.06.2014

Стержень № 8

Сечение

Геометрические характеристики полного сечения

Обознач.	Наименование	Значение	Ед. изм.
A	Площадь сечения	3,84	см ²
I _x	Момент инерции относительно оси X	145,0	см ⁴
W _{хн}	Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	19,34	см ³
W _{хв}	Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	19,34	см ³
i _x	Радиус инерции относительно оси X	6,14	см
I _y	Момент инерции относительно оси Y	33,1	см ⁴
W _{улев}	Момент сопротивления сечения для левого волокна	12,76	см ³
W _{упр}	Момент сопротивления сечения для правого волокна	6,12	см ³
i _y	Радиус инерции относительно оси Y	2,94	см
z _O	Расстояние от левого волокна стенки до центра тяжести сечения	2,59	см
Y _{цт}	Расстояние от нижнего волокна до центра тяжести сечения	7,50	см
I _t	Момент инерции при свободном кручении	0,0175	см ⁴
I _ω	Секторальный момент инерции	1 547,0	см ⁶
X _{цн}	Положение центра изгиба (относительно ц.т.)	-6,24	см

Рисунок 2.6 - Вид Страницы 2 в Excel


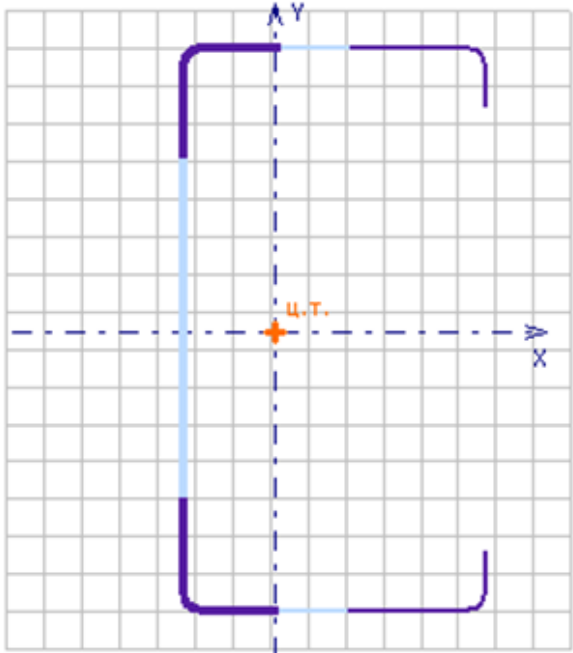
	ДЕЛЬТА	CFSteel v.3.1			
	Инжиниринг www.CFSteel.ru	Пользователь			Страница 3 04.06.2014
Стержень № 8					
Сечение					
					
Геометрические характеристики эффективного сечения					
Обознач.	Наименование	Значение	Ед. изм.		
A_{red}	Площадь сечения	1,77	см ²		
$I_{x, red}$	Момент инерции относительно оси X	83,2	см ⁴		
$W_{xn, red}$	Момент сопротивления сечения для нижнего волокна	11,10	см ³		
$W_{xs, red}$	Момент сопротивления сечения для верхнего волокна	11,10	см ³		
$i_{x, red}$	Радиус инерции относительно оси X	6,86	см		
$I_{y, red}$	Момент инерции относительно оси Y	14,9	см ⁴		
$W_{yles, red}$	Момент сопротивления сечения для левого волокна	6,02	см ³		
$W_{ynp, red}$	Момент сопротивления сечения для правого волокна	2,72	см ³		
$i_{y, red}$	Радиус инерции относительно оси Y	2,90	см		
zO_{red}	Расстояние от левого волокна стенки до центра тяжести сечения	2,48	см		
$y_{цт, red}$	Расстояние от нижнего волокна до центра тяжести сечения	7,50	см		

Рисунок 2.7 - Вид Страницы 3 в Excel

По кнопке **Ok** происходит возврат к окну ввода данных.

2.1.4. Верификация расчёта

Корректность программной реализации методик расчёта, заложенных в [1], проверяется путём сравнения результатов, полученных с помощью CFSteel, с результатами ручного расчёта.

Задание 2.1: Выполнить проверку устойчивости центрально сжатого стержня С-образного сечения (рисунок 2.8) с исходными данными: $N=52 \text{ кН}$; $l=280 \text{ см}$; коэффициенты приведения длины $\mu_x=\mu_y=1$; предельная гибкость $\lambda_u=210-60\alpha$; $R_y=250 \text{ МПа}$. Размеры сечения: $h=150 \text{ мм}$, $t=2,5 \text{ мм}$, $b_{f1}=b_{f2}=60 \text{ мм}$, $c_1=c_2=15 \text{ мм}$, $r=3 \text{ мм}$. Покрытие отсутствует, т.е. $t_{coat}=0$.

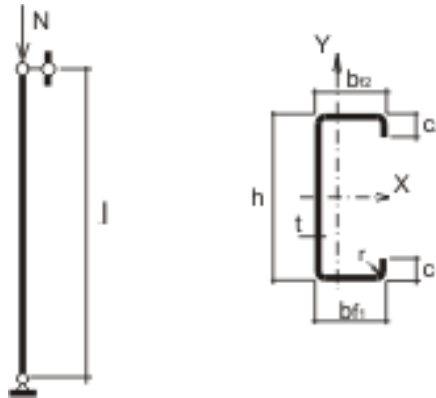


Рисунок 2.8 – Расчётная схема и сечение элемента

Расчёт: Геометрические характеристики полного сечения определены по CFSteel: $A=7,07 \text{ см}^2$, $I_x=244,0 \text{ см}^4$, $I_y=32,0 \text{ см}^4$, $i_x=5,88 \text{ см}$, $i_y=2,13 \text{ см}$, $I_t=0,151 \text{ см}^4$, $I_w=1479,2 \text{ см}^6$.

Коэффициенты редукции для всех пластин, составляющих сечение (стенка, пояс, отгиб), ρ равны 1,0 (п.4.4.(1),(2) [7]). Следовательно они полностью эффективны. Коэффициент редукции для учёта потери устойчивости формы сечения $\chi_d = 1$ (п.5.5.3.2[3]). Следовательно $t_{red} = t = 2,5 \text{ мм}$. Таким образом, при заданном уровне нагружения сечение остаётся полностью эффективным и проверки на устойчивость выполняются с учётом геометрических характеристик полного сечения.

Расчётные длины элемента

$$l_{efx} = \mu_x l = 280 \text{ см} \quad l_{efy} = \mu_y l = 280 \text{ см}$$

Гибкости элемента

$$\lambda_x = l_{efx} / i_x = 280 / 5,88 = 47,62 \quad \lambda_y = l_{efy} / i_y = 280 / 2,13 = 131,46$$

Условная гибкость элемента относительно оси Y

$$\overline{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 4,57$$

Тип сечения – c (табл.7 [1]), следовательно $\alpha=0,04$ и $\beta=0,14$.

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \overline{\lambda}_y) + \overline{\lambda}_y^2 = 36,69.$$

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии

$$\varphi_y = 0,5(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \overline{\lambda}_y^2}) / \overline{\lambda}_y^2 = 0,332.$$

Проверка на устойчивость по изгибной форме потери устойчивости

$$\frac{N}{\varphi_y AR_y \gamma_c} = \frac{52}{0,332 \cdot 7,07 \cdot 25 \cdot 1} = 0,902 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Проверка на устойчивость по изгибно-крутильной форме потери устойчивости

$$b = h - t = 15 - 0,25 = 14,75 \text{ см}$$

$$h = b_f - t/2 = 6 - 0,125 = 5,875 \text{ см (обозначение размеров } b \text{ и } h \text{ по рисунку в таблице Д.6}$$

[1])

$$a_x = -4,26 \text{ см}$$

$$\alpha = |a_x| / h = 0,725$$

$$\rho = \frac{I_y + I_x}{Ah^2} + \alpha^2 = 1,657$$

$$w = \frac{I_w}{Ih^2} = 0,176$$

$$\mu = 8w + 0,156I_w \lambda^2 / (Ah^2) = 1,627$$

$$\delta = \frac{4\rho}{\mu} = 4,074$$

$$c_{\max} = \frac{2}{1 + \delta + \sqrt{1 - \delta + \frac{16\alpha^2}{\mu}}} = 0,225$$

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 1,659$$

$$\varphi_1 = 7,6c_{\max} / \bar{\lambda}_x^2 = 0,622$$

$$\varphi_c = \varphi_1 = 0,622$$

$$\frac{N}{\varphi_c AR_y \gamma_c} = \frac{52}{0,622 \cdot 7,07 \cdot 25 \cdot 1} = 0,473 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Предельная гибкость

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y AR_y \gamma_c} = 0,886$$

$$\lambda_u = 210 - 60\alpha = 156,8.$$

Вид окна ввода общих исходных данных в CFSteel по заданию 2.1 показан на рисунке 2.9. Окно ввода размеров сечения приведено на рисунке 2.10.

Рисунок 2.9 – Окно ввода общих исходных данных по заданию 2.1

Рисунок 2.10 - Окно ввода размеров сечения по заданию 2.1

Результаты расчёта по CFSteel представлены на рисунках 2.11 – 2.13.

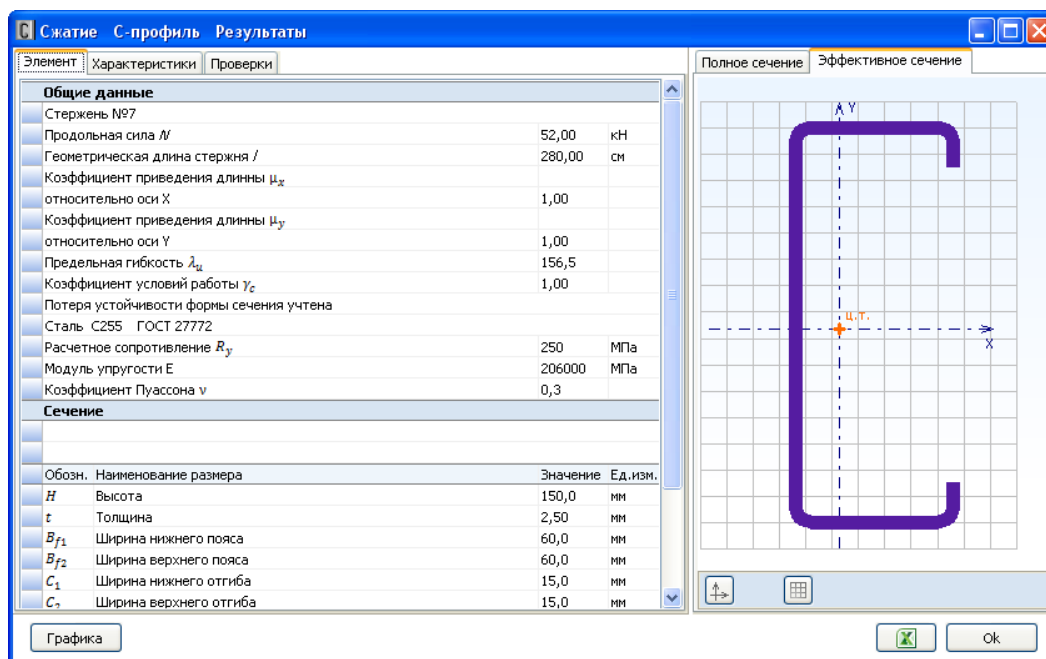


Рисунок 2.11 – Результаты расчёта по заданию 2.1 (Элемент - Полное сечение)

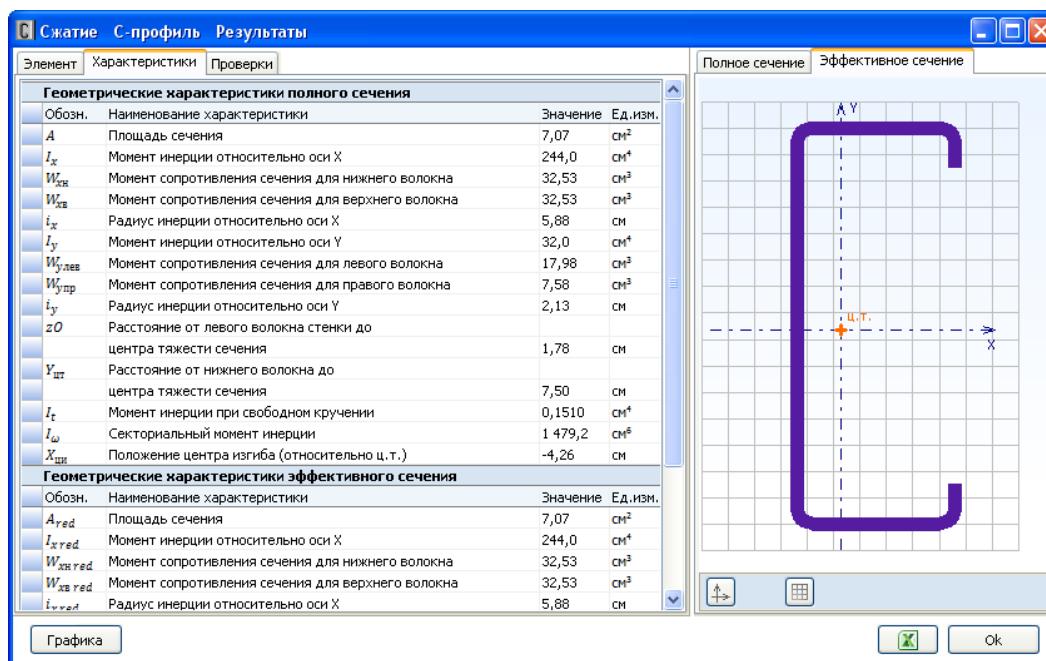


Рисунок 2.12 - Результаты расчёта по заданию 2.1 (Характеристики - Эффективное сечение)

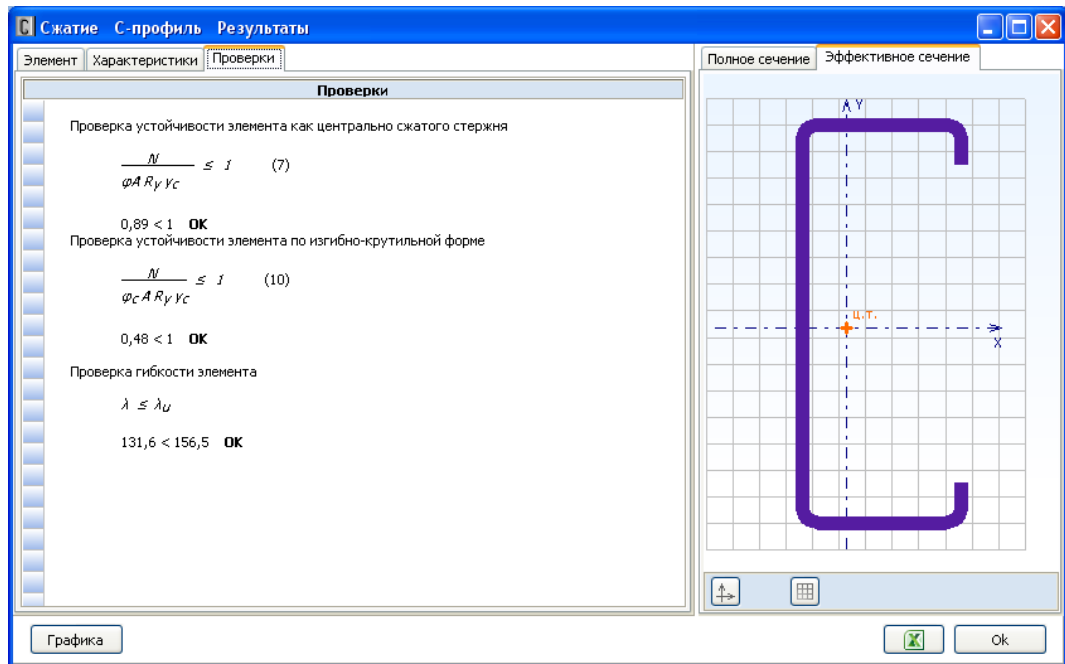


Рисунок 2.13 - Результаты расчёта по заданию 2.1 (Проверки - Эффективное сечение)

В таблице 2.1 приведено сравнение результатов ручного расчёта с результатами, полученными по CFSteel.

Таблица 2.1 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.1

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Расчётная длина элемента относительно оси X	l_{efx}	см	280	280	0
Расчётная длина элемента относительно оси Y	l_{efy}	см	280	280	0
Гибкость относительно оси X	λ_x	-	47,62	47,65	0,06
Гибкость относительно оси Y	λ_y	-	131,46	131,60	0,01
Условная гибкость относительно оси Y	$\overline{\lambda}_y$	-	4,57	4,58	0,2
Условная гибкость относительно оси X	$\overline{\lambda}_x$	-	1,66	1,66	0
Коэффициент устойчивости	φ_y	-	0,332	0,330	0,6
Проверка устойчивости элемента по изгибной форме потери устойчивости (формула (7) [1])		-	0,902	0,89	1,3
Параметр α (Приложение Д [1])	α	-	0,725	0,725	0
Параметр ρ (Приложение Д [1])	ρ	-	1,657	1,657	0
Параметр w (Приложение Д [1])	w	-	0,176	0,176	0
Параметр μ (Приложение Д [1])	μ	-	1,627	1,625	0,1
Параметр δ (Приложение Д [1])	δ	-	4,074	4,080	0,1
Параметр c_{max} (Приложение Д [1])	c_{max}	-	0,225	0,224	0,4
Коэффициент φ_c	φ_c	-	0,622	0,619	0,5
Проверка устойчивости элемента по изгибно-крутильной форме потери устойчивости (формула (10) [1])		-	0,473	0,475	0,4
Значение предельной гибкости	λ_u	-	156,8	156,5	0,2

RGB: 232 244 254

Задание 2.2: Выполнить расчёт центрально сжатого стержня С-образного сечения (рисунок 2.8) с исходными данными: $N=32,6$ кН; $l=180$ см; коэффициенты приведения

длины $\mu_x=\mu_y=1$; предельная гибкость $\lambda_u=210-60\alpha$; $R_y=250$ МПа. Размеры сечения: $h=200$ мм, $t=1,5$ мм, $b_{f1}=b_{f2}=50$ мм, $c_1=c_2=15$ мм, $r=3$ мм. $t_{coat}=0,04$ мм.

Расчёт: Геометрические характеристики полного и эффективного сечений определяем программно по CFSteel. Характеристики полного сечения: $A=4,64$ см², $I_x=260,7$ см⁴, $I_y=13,9$ см⁴, $i_x=7,5$ см, $i_y=1,73$ см, $W_{улев}=11,57$ см³, $W_{унр}=3,66$ см³. Редуцированные характеристики эффективного сечения, вычисленные с учётом потери устойчивости формы сечения: $A_{eff}=3,20$ см², $I_{xeff}=249,2$ см⁴, $I_{yeff}=11,2$ см⁴, $i_{xeff}=8,82$ см, $i_{yeff}=1,873$ см, $W_{улевeff}=6,59$ см³, $W_{унреff}=3,41$ см³, эксцентриситет $e_N=0,5$ см.

Расчётные длины элемента

$$l_{efx}=\mu_x l=180 \text{ см} \quad l_{efy}=\mu_y l=180 \text{ см}$$

Гибкости элемента

$$\lambda_x=l_{efx}/i_{xeff}=180/8,82=20,41 \quad \lambda_y=l_{efy}/i_{yeff}=180/1,873=96,10$$

Условная гибкость элемента относительно оси Y

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 3,34$$

Относительный эксцентриситет

$$m=e_N \frac{A_{eff}}{W_{улевeff}}=0,5*3,2/6,59=0,243$$

Коэффициент влияния формы сечения

$$\eta=3,0+0,25m+0,1\bar{\lambda}_y=3+0,25*0,243+0,1*3,34=3,395$$

Приведённый относительный эксцентриситет

$$m_{ef}=\eta m=3,395*0,243=0,825$$

Коэффициент устойчивости при сжатии с изгибом

$$\varphi_e=0,417$$

Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня с эксцентриситетом в плоскости X по формуле (109):

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{32,6}{0,417 \cdot 3,2 \cdot 25 \cdot 1} = 0,977 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Проверка элемента по предельной гибкости:

$$\lambda \leq \lambda_u$$

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{32,6}{0,417 \cdot 3,2 \cdot 25 \cdot 1} = 0,977$$

$$\lambda_u=210-60\alpha=210-60*0,977=151,4$$

$$96,10 < 151,4 - \text{условие выполняется.}$$

Вид окна ввода общих исходных данных в CFSteel по заданию 2.2 показан на рисунке 2.14. Окно ввода размеров сечения приведено на рисунке 2.15.

Рисунок 2.14 – Окно ввода общих исходных данных по заданию 2.2

Рисунок 2.15 - Окно ввода размеров сечения по заданию 2.2

Результаты расчёта по CFSteel представлены на рисунках 2.16 – 2.18.

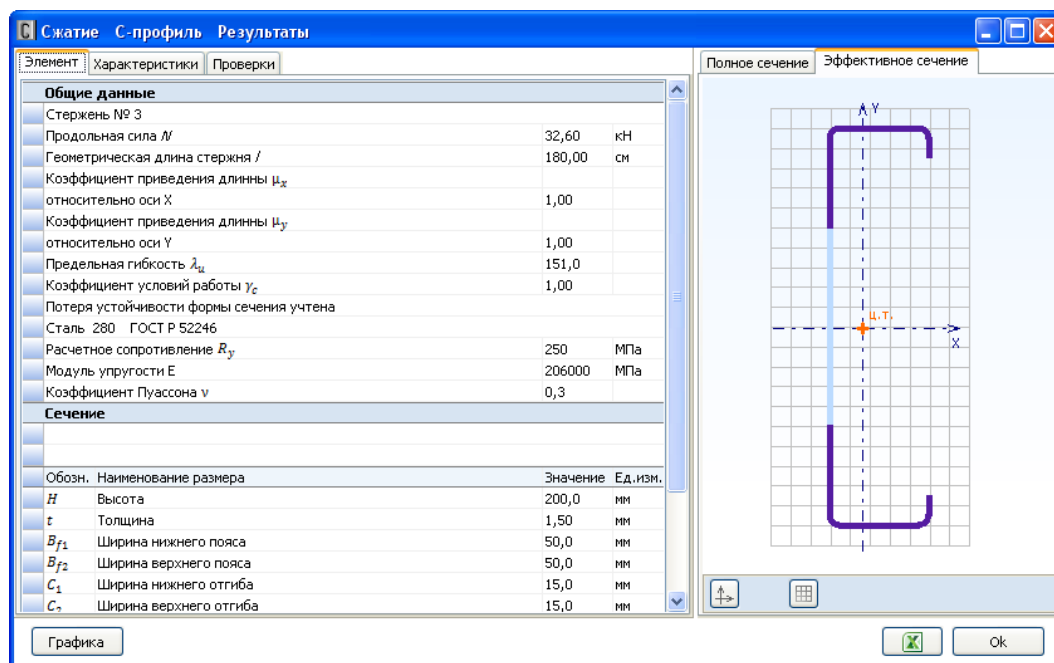


Рисунок 2.16 – Результаты расчёта по заданию 2.2 (Элемент - Полное сечение)

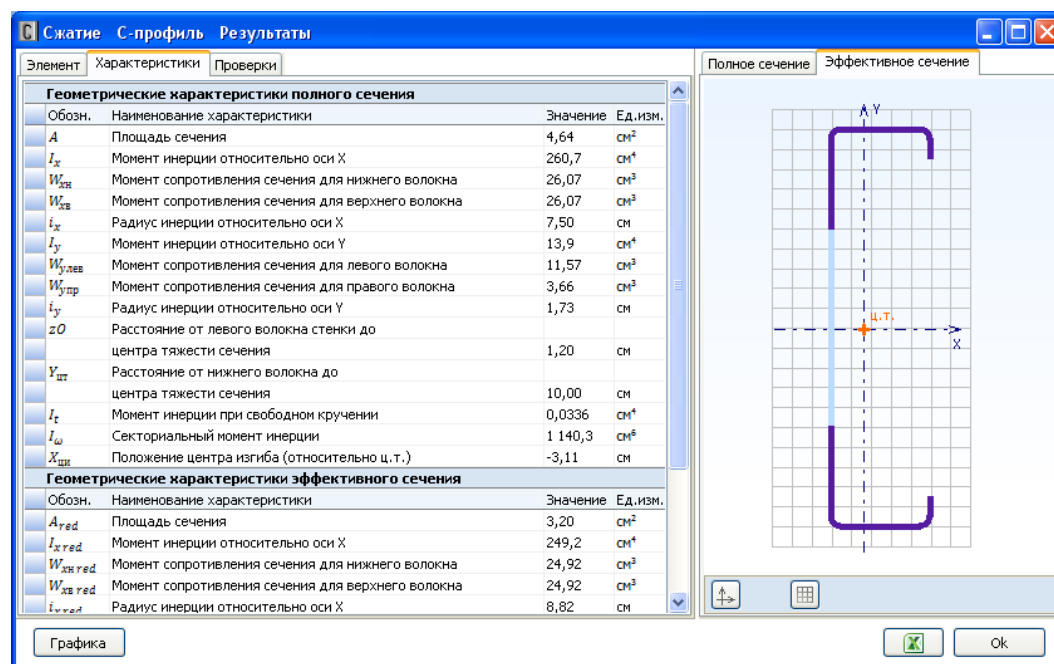


Рисунок 2.17 - Результаты расчёта по заданию 2.2 (Характеристики - Эффективное сечение)

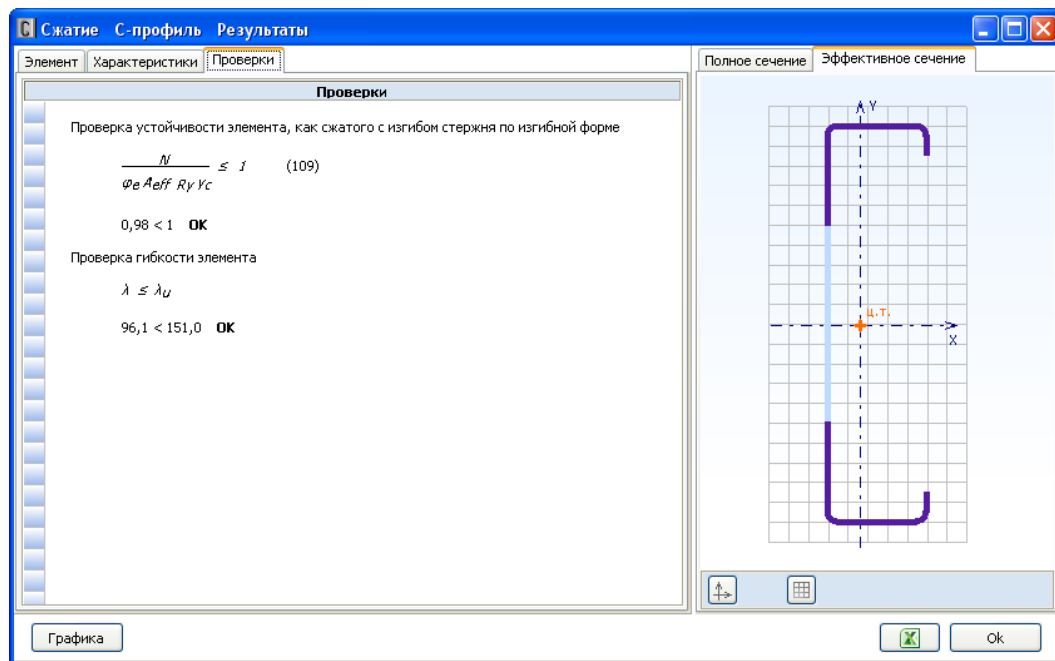


Рисунок 2.18 - Результаты расчёта по заданию 2.2 (Проверки - Эффективное сечение)

В таблице 2.2 приведено сопоставление результатов, полученных выше для задания 2.2, с результатами вычислений по программе CFSteel.

Таблица 2.2 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.2

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Расчётная длина элемента относительно оси X	l_{efx}	см	180	180	0
Расчётная длина элемента относительно оси Y	l_{efy}	см	180	180	0
Гибкость относительно оси X	λ_x	-	20,41	20,41	0,
Гибкость относительно оси Y	λ_y	-	96,10	96,09	0,8
Условная гибкость относительно оси Y	$\overline{\lambda}_y$	-	3,34	3,35	0,3
Относительный эксцентриситет	m	-	0,243	0,245	0,8
Коэффициент влияния формы сечения	η	-	3,395	3,396	0,03
Приведённый относительный эксцентриситет	m_{ef}	-	0,825	0,832	0,9
Коэффициент устойчивости при сжатии с изгибом	φ_e	-	0,417	0,414	0,7
Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня по формуле (109)		-	0,977	0,984	0,7
Значение предельной гибкости	λ_{u1}	-	151,4	151,0	0,3

Задание 2.3: Выполнить проверку устойчивости центрально сжатого стержня швеллерного сечения (рисунок 2.19) с исходными данными: $N=28$ кН; $l=280$ см; коэффициенты приведения длины $\mu_x=1$, $\mu_y=0,7$; предельная гибкость $\lambda_u=180-60\alpha$; $R_y=250$ МПа. Размеры сечения: $h=150$ мм, $t=2,5$ мм, $b_{f1}=b_{f2}=70$ мм, $r=3$ мм, $t_{coat}=0$.

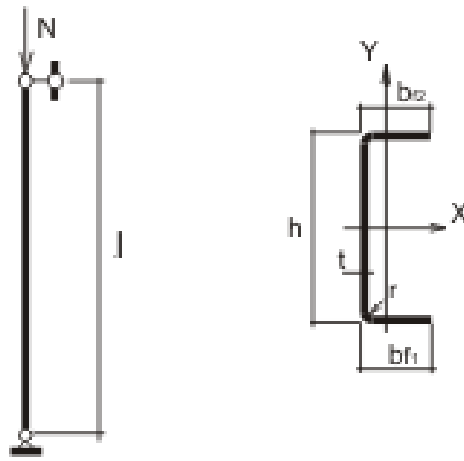


Рисунок 2.19 – Расчётная схема и сечение элемента

Расчёт: Геометрические характеристики полного сечения определённые по CFSteel: $A=7,03 \text{ см}^2$, $I_x=248,78 \text{ см}^4$, $I_y=34,31 \text{ см}^4$, $i_x=5,95 \text{ см}$, $i_y=2,21 \text{ см}$, $I_t=0,1484 \text{ см}^4$, $I_w=1318,3 \text{ см}^6$.

Коэффициенты редукции для всех пластин, составляющих сечение (стенка, пояса), ρ равны 1,0 (п.4.4.(1),(2) [7]). Следовательно они полностью эффективны. Таким образом, при заданном уровне нагружения сечение остаётся полностью эффективным и проверки на устойчивость выполняются с учётом геометрических характеристик полного сечения.

Расчётные длины элемента

$$l_{efx} = \mu_x l = 280 \text{ см} \quad l_{efy} = \mu_y l = 196 \text{ см}$$

Гибкости элемента

$$\lambda_x = l_{efx} / i_x = 280 / 5,95 = 47,06 \quad \lambda_y = l_{efy} / i_y = 196 / 2,21 = 88,69$$

Условная гибкость элемента относительно оси Y

$$\overline{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 3,09$$

Тип сечения – c (табл.7 [1]), следовательно $\alpha=0,04$ и $\beta=0,14$.

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \overline{\lambda}_y) + \overline{\lambda}_y^2 = 23,27.$$

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии

$$\varphi_y = 0,5(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \overline{\lambda}_y^2}) / \overline{\lambda}_y^2 = 0,548.$$

Проверка на устойчивость по изгибной форме потери устойчивости

$$\frac{N}{\varphi_y A R_y \gamma_c} = \frac{28}{0,548 \cdot 7,03 \cdot 25 \cdot 1} = 0,291 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Проверка на устойчивость по изгибно-крутильной форме

$$b = h - t = 15 - 0,25 = 14,75 \text{ см}$$

$$h = b_f - t/2 = 7 - 0,125 = 6,875 \text{ см (обозначение размеров } b \text{ и } h \text{ по рисунку в таблице Д.6}$$

[1])

$$a_x = -4,21 \text{ см}$$

$$\alpha = |a_x| / h = 0,612$$

$$\rho = \frac{I_y + I_x}{A h^2} + \alpha^2 = 1,253$$

$$w = \frac{I_w}{Ih^2} = 0,112$$

$$\mu = 8w + 0,156I_t \lambda^2 / (Ah^2) = 1,069$$

$$\delta = \frac{4\rho}{\mu} = 4,688$$

$$c_{\max} = \frac{2}{1 + \delta + \sqrt{1 - \delta + \frac{16\alpha^2}{\mu}}} = 0,199$$

$$\overline{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 1,639$$

$$\varphi_1 = 7,6c_{\max} / \overline{\lambda}_x^2 = 0,563$$

$$\varphi_c = \varphi_1 = 0,563$$

$$\frac{N}{\varphi_c AR_y \gamma_c} = \frac{28}{0,563 \cdot 7,03 \cdot 25 \cdot 1} = 0,283 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Предельная гибкость

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y AR_y \gamma_c} = 0,291 \quad \alpha = 0,5$$

$$\lambda_u = 180 - 60\alpha = 150.$$

В таблице 2.3 приведено сравнение результатов ручного расчёта с результатами, полученными по CFSteel.

Таблица 2.3 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.3

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Расчётная длина элемента относительно оси X	l_{efx}	см	280	280	0
Расчётная длина элемента относительно оси Y	l_{efy}	см	196	196	0
Гибкость относительно оси X	λ_x	-	47,06	47,08	0,04
Гибкость относительно оси Y	λ_y	-	88,69	88,75	0,07
Условная гибкость относительно оси Y	$\overline{\lambda}_y$	-	3,09	3,09	0
Условная гибкость относительно оси X	$\overline{\lambda}_x$	-	-	-	-
Коэффициент устойчивости	φ_y	-	0,548	0,546	0,04
Проверка устойчивости элемента по изгибной форме потери устойчивости (формула (7) [1])		-	0,291	0,292	0,03
Параметр α (Приложение Д [1])	α	-	0,612	0,613	0,02
Параметр ρ (Приложение Д [1])	ρ	-	1,253	1,227	2,1
Параметр w (Приложение Д [1])	w	-	0,112	0,113	0,09
Параметр μ (Приложение Д [1])	μ	-	1,069	1,051	1,7
Параметр δ (Приложение Д [1])	δ	-	4,688	4,668	0,4
Параметр c_{\max} (Приложение Д [1])	c_{\max}	-	0,199	0,199	0
Коэффициент φ_c	φ_c	-	0,563	0,562	0,2
Проверка устойчивости элемента по изгибно-крутильной форме потери устойчивости (формула (10) [1])		-	0,283	0,283	0
Значение предельной гибкости	λ_u	-	150	150	0

Задание 2.4: Выполнить проверку устойчивости центрально сжатого стержня швеллерного сечения (рисунок 2.19) с исходными данными: $N=49,8$ кН; $l=180$ см; коэффициенты приведения длины $\mu_x=1$, $\mu_y=0,7$; предельная гибкость $\lambda_u=180-60\alpha$; $R_y=250$ МПа. Размеры сечения те же, что и в **Задании 2.3**. $t_{coat}=0,04$ мм.

Расчёт: Геометрические характеристики полного и эффективного сечений определяем программно по CFSteel. Характеристики полного сечения: $A=6,92$ см², $I_x=244,8$ см⁴, $I_y=33,8$ см⁴, $i_x=5,95$ см, $i_y=2,21$ см.

Редуцированные характеристики эффективного сечения: $A_{eff}=5,88$ см², $I_{xeff}=187,9$ см⁴, $I_{yeff}=12,3$ см⁴, $i_{xeff}=5,66$ см, $i_{yeff}=1,45$ см, $W_{ynpeff}=3,24$ см³, эксцентриситет $e_N=-0,73$ см.

Расчётные длины элемента

$$l_{efx} = \mu_x l = 180 \text{ см} \quad l_{efy} = \mu_y l = 126 \text{ см}$$

Гибкости элемента

$$\lambda_x = l_{efx} / i_{xeff} = 180 / 5,66 = 31,8 \quad \lambda_y = l_{efy} / i_{yeff} = 126 / 1,45 = 86,9$$

Условная гибкость элемента относительно оси Y

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 3,02$$

Относительный эксцентриситет

$$m = e_N \frac{A_{eff}}{W_{ynpeff}} = 0,73 \cdot 5,88 / 3,24 = 1,325$$

Коэффициент влияния формы сечения

$$\eta = (1,5 - 0,1m) - 0,02(5-m) \bar{\lambda}_y = 1,146$$

Приведённый относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta m = 1,146 \cdot 1,325 = 1,518$$

Коэффициент устойчивости при сжатии с изгибом

$$\varphi_e = 0,364$$

Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня с эксцентриситетом в плоскости X по формуле (109):

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{49,8}{0,364 \cdot 5,88 \cdot 25 \cdot 1} = 0,931 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

В таблице 2.4 приведено сопоставление результатов, полученных выше для задания 2.4, с результатами вычислений по программе CFSteel.

Таблица 2.4 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.4

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Расчётная длина элемента относительно оси X	l_{efx}	см	180	180	0
Расчётная длина элемента относительно оси Y	l_{efy}	см	126	126	0
Гибкость относительно оси X	λ_x	-	31,8	31,8	0
Гибкость относительно оси Y	λ_y	-	86,9	87,0	0,1
Условная гибкость относительно оси Y	$\bar{\lambda}_y$	-	3,02	3,03	0,3
Относительный эксцентриситет	m	-	1,325	1,333	0,6
Коэффициент влияния формы сечения	η	-	1,146	1,144	0,1
Приведённый относительный эксцентриситет	m_{ef}	-	1,518	1,525	0,5
Коэффициент устойчивости при сжатии с	φ_e	-	0,364	0,360	1,2

изгибом					
Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня по формуле (109)		-	0,931	0,940	1,0

2.2. Расчёт центрально сжатых элементов составного сечения

2.2.1. Методика расчёта

Профили в элементах составного сечения должны быть надёжно конструктивно объединены в достаточной степени, чтобы считать составное сечение монолитным.

Рассчитываемые составные профили имеют две оси симметрии. В результате редуцирования центр тяжести эффективного сечения не смещается по отношению к центру тяжести полного сечения. Таким образом, элементы из составных профилей рассчитываются по методике [1] как центрально сжатые стержни с характеристиками полного или эффективного (если требуется редукция) сечения.

2.2.2. Ввод исходных данных

Для расчёта центрально сжатых элементов составного сечения необходимо в главном меню выбрать **Элемент**, затем **Центральное сжатие** и далее тип профиля. Появляется окно ввода исходных данных (рисунок 2.20).

Рисунок 2.20 – Окно ввода исходных данных для составных профилей (центральное сжатие)

Оставив на панели *Тип расчёта* **Осевое сжатие**, необходимо ввести **Расчётные** **длины элемента относительно оси X и Y**, **Расчётную продольную силу N** , **Коэффициент условий работы γ_c** , **Наименование стали** (необязательно), **Расчётное сопротивление стали R_y** и **Предельную гибкость элемента**. По кнопке **Рассчитать** выполняется расчёт и появляется окно результатов, подобное показанному на рисунках 2.11-2.13. Далее результаты могут быть переданы в Excel для дальнейшей работы, а также их распечатки.

2.3. Расчёт внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов из одиночных профилей

2.3.1. Ввод данных

Для расчёта сжатых с изгибом элементов необходимо в главном меню выбрать **Элемент**, затем **Сжатие с изгибом** и далее тип профиля. Для одиночных профилей появляется окно ввода исходных данных (рисунок 2.21).

Рисунок 2.21 – Окно ввода данных

На вкладке **Расчётная схема** вводятся следующие параметры:

Наименование элемента, где пользователь может ввести название рассчитываемого элемента, наименование конструкции, название проекта или другую информацию (данное поле необязательно для заполнения);

Расчётная длина относительно оси X в см;

Расчётная длина относительно оси Y в см;

Расчётное продольное усилие N в кН;

Наименование стали (выбирается из списка или вводится в строку ввода);

Расчётное сопротивление стали R_y в МПа (выбирается из списка или вводится в строку ввода);

Предельная гибкость (выбирается из списка или вводится в строку ввода). Если пользователь выбирает *Проверку не выполнять*, то расчёт по предельной гибкости не выполняется.

На панели *Тип расчёта* в зависимости от расчётной схемы элемента необходимо выбрать либо **Внецентренно-сжатый элемент** или **Сжато-изгибаемый элемент**. В первом

случае, выбрав направление эксцентриситета, необходимо ввести его значение и **Коэффициент условий работы γ_c** для расчёта на устойчивость внецентренно-сжатого элемента. Если выбран тип расчёта **Сжато-изгибаемый элемент**, на соответствующей панели необходимо ввести значение **расчётного момента для расчёта на устойчивость** (п.9.2.3 [1]) и **Коэффициент условий работы γ_c** для расчёта на устойчивость сжато-изгибаемого элемента.

Для сжато-изгибаемых стержней в программе предусмотрен случай, когда изгибающий момент для расчёта редуцированных характеристик сечения не совпадает по значению или/и знаку с моментом для расчёта на устойчивость. Если это так, то на панели *Настройка расчёта* необходимо сбросить флажок в пункте *Всегда $M_{eff} = M_{yct}$* и затем ввести **Расчётный момент для определения редуцированных характеристик сечения**. В противном случае программа вычисляет характеристики эффективного сечения по осевой силе N и изгибающему моменту для расчёта на устойчивость (или по осевой силе и эксцентриситету - в случае внецентренного сжатия).

При $m_{ef} > 20$ выполняется расчёт на прочность. Также в программе предусмотрена возможность принудительно выполнять проверку прочности вне зависимости от значения m_{ef} . Для этого на панели *Настройки расчёта* необходимо установить флажок в пункте **Выполнить проверку прочности на специальный момент**. Затем ввести этот **Специальный момент для расчёта на прочность** и **Коэффициент условий работы γ_c** для расчёта на прочность на соответствующей панели.

Далее следует выбрать вкладку **Сечение** и ввести информацию о нём.

В данном случае в программе рассматриваются сжатые с изгибом одинарные профили, симметричные относительно оси X.

При нажатии на кнопку **Рассчитать** выполняется расчёт и на экран выводится окно результатов расчёта. Если выбрана кнопка **Отмена**, то происходит возврат в главное меню.

2.3.2. Методика расчёта

В программе рассматриваются одинарные сжатые элементы с изгибом в плоскости симметрии (в плоскости X). Для внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых стержней выполняются следующие расчёты:

- проверка на устойчивость в плоскости изгиба;
- проверка на устойчивость из плоскости изгиба;
- проверка прочности;
- проверка по предельной гибкости.

Расчёт на устойчивость по изгибно-крутильной форме потери устойчивости (формула (111) [1]) не выполняется, так как в таблице 21 [1] не предусмотрено случая, когда швеллер (или П-образное сечение) имеет эксцентриситет в плоскости X. Такая форма потери устойчивости может произойти в случае, если жёсткость профиля относительно оси X меньше жёсткости относительно оси Y ($I_x < I_y$), что в реальных профилях рассматриваемых форм сечения встречается редко.

Расчёт на устойчивость в плоскости эксцентриситета/изгибающего момента выполняется по формуле (109) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где φ_e определяется по редуцированным геометрическим характеристикам эффективного сечения по п. 9.2.2. Эксцентриситет e вычисляется с учётом дополнительного эксцентриситета e_{eff} , который возникает в результате редуцирования сечения. При определении коэффициента влияния формы сечения η в таблице Д.2 [1] рассматриваются полные сечения в виде швеллера (отгибы не учитываются). A_{eff} – площадь эффективного сечения (если редукция не требуется, то принимается площадь полного сечения A).

Внецентренно-сжатые и сжато-изгибаемые элементы, изгиб которых происходит в плоскости наименьшей жёсткости ($I_y < I_x$) при $\lambda_x > \lambda_y$ рассчитываются на устойчивость из плоскости изгиба по формуле (115) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_x A_{eff} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где φ_x – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, определяемый согласно требованиям п.7.1.3 [1] для эффективного или полного сечения. A_{eff} – площадь эффективного или полного сечения. При $\lambda_x \leq \lambda_y$ данный расчёт не производится.

Расчёт прочности элемента выполняется при условии $m_{eff} > 20$ в пределах упругости стали в предположении отсутствия бимоментов по формуле (106) [1]:

$$\left(\frac{N}{A_{eff}} + \frac{M_y}{W_{yeff}} \right) / (R_y \gamma_c) \leq 1,$$

где $M_y = e' * N$ (принимается абсолютное значение), e' – эксцентриситет, вычисляемый в зависимости от типа расчётной схемы элемента с учётом e_{eff} , W_{yeff} – значение момента сопротивления эффективного сечения для крайнего волокна стенки или поясов (отгибов) в зависимости от направления действия момента.

Если пользователь активизировал принудительную проверку прочности на специальный момент, она выполняется дополнительно по той же формуле с введёнными для расчёта на прочность значениями M_y и γ_c . Тогда в результатах работы программы показывается максимальное из значений левых частей неравенств.

Гибкость элемента должна удовлетворять условию

$$\lambda \leq \lambda_u,$$

где λ – максимальная гибкость элемента. λ_u – предельная гибкость, вводимая пользователем. Параметр α вычисляется в соответствии с таблицей 32 [1] для эффективного сечения.

2.3.3. Вывод результатов расчёта

Вывод результатов расчёта осуществляется в окно вывода и, при необходимости, в Excel аналогично тому, как это делается в расчёте центрально-сжатых элементов.

2.3.4. Верификация расчёта

Задание 2.5: Выполнить расчёт внецентренно-сжатого стержня С-образного сечения (рисунок 2.22) с исходными данными: $N=30$ кН; $e_N=2$ см; $l_{efx}=120$ см; $l_{efy}=120$ см; предельная гибкость $\lambda_u=210-60\alpha$; $R_y=330$ МПа. Коэффициент условий работы $\gamma_c=1,0$.

Размеры сечения: $h=200$ мм, $t=1,2$ мм, $b_{f1}=b_{f2}=50$ мм, $c_1=c_2=20$ мм, $\alpha_1=\alpha_2=90^\circ$, $r=3$ мм, $t_{coat}=0,04$ мм.

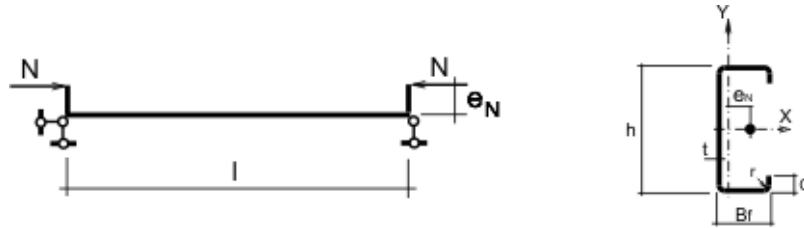


Рисунок 2.22 - Расчётная схема и сечение элемента

Расчёт: Геометрические характеристики полного и эффективного сечений определяются программно по CFSteel. Характеристики полного сечения: $A=3,82$ см², $I_x=217,00$ см⁴, $I_y=12,84$ см⁴, $i_x=7,54$ см, $i_y=1,83$ см, $W_{улев}=9,79$ см³, $W_{упр}=3,48$ см³.

Редуцированные характеристики эффективного сечения, вычисленные с учётом потери устойчивости формы сечения: $A_{eff}=3,45$ см², $I_{xeff}=207,61$ см⁴, $I_{yeff}=11,38$ см⁴, $i_{xeff}=7,76$ см, $i_{yeff}=1,82$ см, $W_{улевeff}=8,66$ см³, $W_{упрeff}=3,10$ см³, эксцентриситет $e_{eff}=0,003$ см.

Гибкости элемента

$$\lambda_x = l_{efx} / i_{xeff} = 120 / 7,76 = 15,46 \quad \lambda_y = l_{efy} / i_{yeff} = 120 / 1,82 = 65,93$$

Условная гибкость элемента относительно оси Y

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 2,64$$

Эксцентриситет

$$e = e_N - e_{eff} = 2 - 0,003 = 1,997 \text{ см}$$

Относительный эксцентриситет

$$m = e \frac{A_{eff}}{W_{упрeff}} = 1,997 \frac{3,45}{3,10} = 2,22$$

Коэффициент влияния формы сечения

$$\eta = (1,5 - 0,1m) - 0,02(5 - m) \bar{\lambda}_y = 1,131$$

Приведённый относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta m = 1,131 \cdot 2,22 = 2,511$$

Коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии

$$\varphi_e = 0,308$$

Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня по формуле (109) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{30}{0,308 \cdot 3,45 \cdot 33 \cdot 1} = 0,856 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Проверка элемента по предельной гибкости:

$$\lambda \leq \lambda_u$$

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_e A R_y \gamma_c} = \frac{30}{0,308 \cdot 3,45 \cdot 33 \cdot 1} = 0,856$$

$$\lambda_u = 210 - 60\alpha = 210 - 60 \cdot 0,856 = 158,7$$

$$65,93 < 158,7 - \text{условие выполняется.}$$

Вид окна ввода общих исходных данных в CFSteel по заданию 2.5 показан на рисунке 2.21. Результаты расчёта по CFSteel представлены на рисунках 2.23 – 2.25.

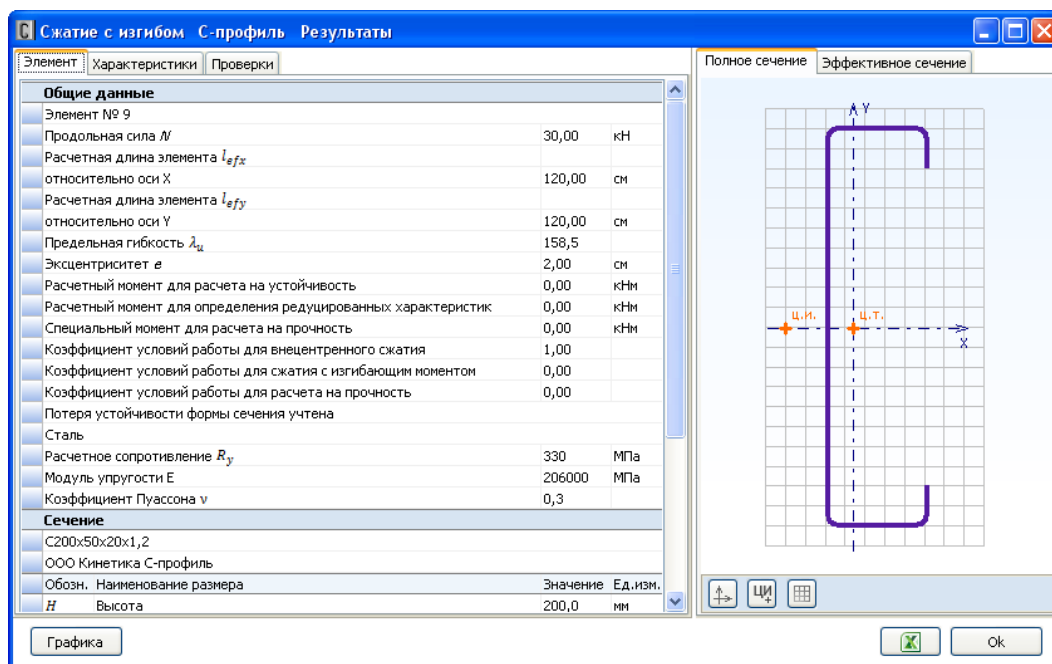


Рисунок 2.23 – Результаты расчёта по заданию 2.5 (Элемент - Полное сечение)

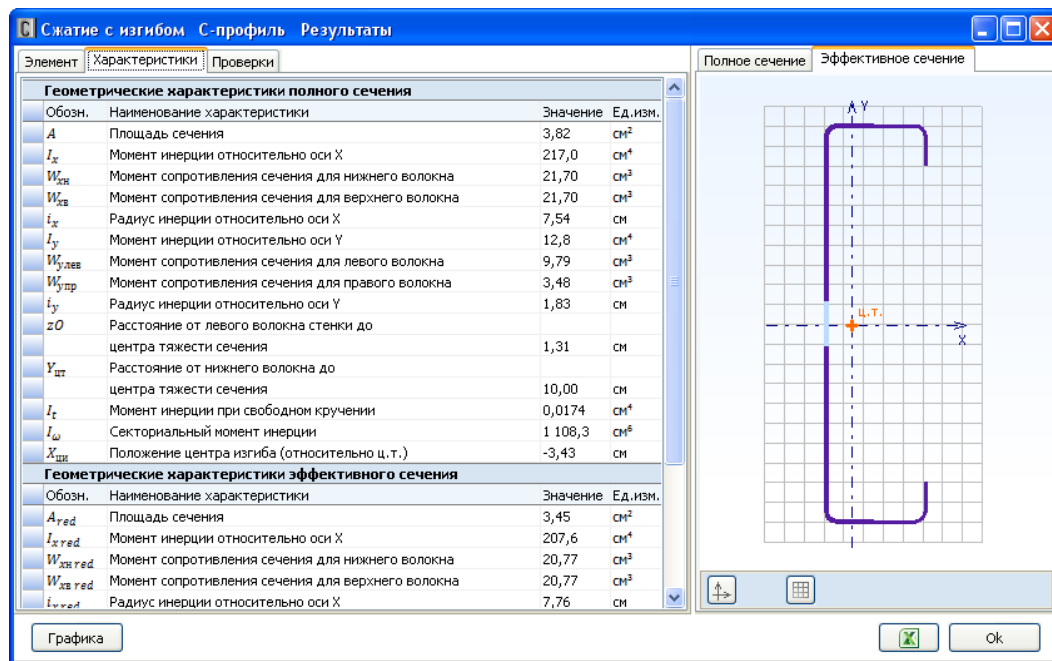


Рисунок 2.24 - Результаты расчёта по заданию 2.5 (Характеристики - Эффективное сечение)

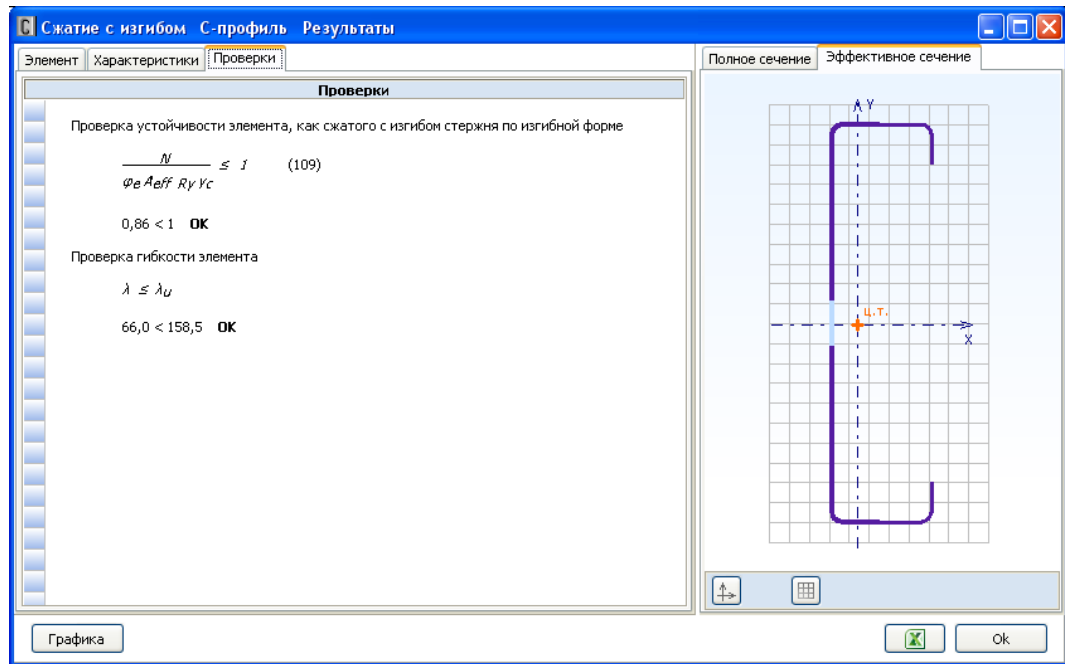


Рисунок 2.25 - Результаты расчёта по заданию 2.5 (Проверки - Эффективное сечение)

В таблице 2.4 приведено сопоставление результатов, полученных выше для задания 2.5 с результатами вычислений по программе CFSteel.

Таблица 2.4 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.5

Параметр	Обозн.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Гибкость относительно оси X	λ_x	15,46	15,46	0,0
Гибкость относительно оси Y	λ_y	65,93	66,04	0,2
Условная гибкость относительно оси Y	$\overline{\lambda}_y$	2,64	2,64	0,0
Относительный эксцентриситет	m	2,22	2,23	0,5
Коэффициент влияния формы сечения	η	1,131	1,131	0,0
Приведённый относительный эксцентриситет	m_{ef}	2,511	2,517	0,2
Коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии	φ_e	0,308	0,307	0,3
Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня по формуле (109)		0,856	0,858	0,2
Значение предельной гибкости	λ_u	158,7	158,5	0,1

Задание 2.6: Выполнить расчёт сжато-изгибаемого элемента С-образного сечения с исходными данными: $N=49$ кН; $l_{efx}=100$ см; $l_{efy}=100$ см; расчётный изгибающий момент для расчёта на устойчивость и расчёта эффективных характеристик $M_{yct}=M_{eff}=0,88$ кНм; расчётный изгибающий момент для расчёта на прочность $M_{прочн}=0,88$ кНм; предельная гибкость $\lambda_u=210-60\alpha$; $R_y=350$ МПа. Коэффициент условий работы для расчётов на устойчивость $\gamma_c=0,95$; коэффициент условий работы для расчётов на прочность $\gamma_c=1$; Размеры сечения: $h=200$ мм, $t=1,5$ мм, $b_{f1}=b_{f2}=50$ мм, $c_1=c_2=20$ мм, $\alpha_1=\alpha_2=90^\circ$, $r=3$ мм, $t_{coat}=0,04$ мм.

Расчёт: Геометрические характеристики полного и эффективного сечений определяются программно по CFSteel. Характеристики полного сечения: $A=4,78 \text{ см}^2$, $I_x=270,62 \text{ см}^4$, $I_y=15,84 \text{ см}^4$, $i_x=7,52 \text{ см}$, $i_y=1,82 \text{ см}$, $W_{yлев}=10,11 \text{ см}^3$, $W_{yпр}=4,30 \text{ см}^3$.

Редуцированные характеристики эффективного сечения, вычисленные с учётом потери устойчивости формы сечения: $A_{eff}=4,24 \text{ см}^2$, $I_{xeff}=261,25 \text{ см}^4$, $I_{yeff}=14,15 \text{ см}^4$, $i_{xeff}=7,85 \text{ см}$, $i_{yeff}=1,83 \text{ см}$, $W_{yлевeff}=10,35 \text{ см}^3$, $W_{yпрeff}=3,91 \text{ см}^3$, эксцентриситет $e_{eff}=0,054 \text{ см}$.

Гибкости элемента

$$\lambda_x = l_{efx} / i_{xeff} = 100 / 7,85 = 12,74 \quad \lambda_y = l_{efy} / i_{yeff} = 100 / 1,83 = 54,64$$

Условные гибкости элемента

$$\overline{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 0,525$$

$$\overline{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 2,240$$

Эксцентриситет

$$e = M_{yсм} / N - e_{eff} = 1,742 \text{ см}$$

Относительный эксцентриситет

$$m = e \frac{A_{eff}}{W_{yпрeff}} = 1,742 \frac{4,24}{3,91} = 1,889$$

Коэффициент влияния формы сечения определяется по интерполяции

$$\eta = 1,169$$

Приведённый относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta m = 1,169 * 1,889 = 2,208$$

Коэффициент устойчивости при сжатии с изгибом

$$\varphi_e = 0,360$$

Проверка устойчивости элемента по формуле (109) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{49}{0,36 \cdot 4,24 \cdot 35 \cdot 0,95} = 0,965 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Проверка прочности по формуле (106) [1]:

$$\left(\frac{N}{A_{eff}} + \frac{M_{yпроч}}{W_{yпрeff}} \right) / (R_y \gamma_c) = \left(\frac{49}{4,24} + \frac{88}{3,91} \right) / (35 \cdot 1) = 0,973 < 1$$

Проверка элемента по предельной гибкости:

$$\lambda \leq \lambda_u$$

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_e A R_y \gamma_c} = \frac{49}{0,36 \cdot 4,24 \cdot 35 \cdot 0,95} = 0,965$$

$$\lambda_u = 210 - 60\alpha = 210 - 60 * 0,965 = 152,1$$

$$54,64 < 152,1 - \text{условие выполняется.}$$

В таблице 2.5 приведено сопоставление результатов, полученных выше для задания 2.6, с результатами вычислений по программе CFSteel.

Таблица 2.5 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.6

Параметр	Обозн.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Гибкость относительно оси X	λ_x	12,74	12,75	0,08
Гибкость относительно оси Y	λ_y	54,64	54,76	0,2
Условная гибкость относительно оси X	$\overline{\lambda}_x$	0,525	0,525	0
Условная гибкость относительно оси Y	$\overline{\lambda}_y$	2,240	2,257	0,8
Относительный эксцентриситет	m	1,889	1,891	0,1
Коэффициент влияния формы сечения	η	1,169	1,170	0,1
Приведённый относительный эксцентриситет	m_{ef}	2,208	2,214	0,3
Коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии	φ_e	0,360	0,358	0,6
Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня по формуле (109)		0,965	0,969	0,4
Проверка прочности по формуле (106)		0,973	0,973	0
Значение предельной гибкости	λ_{li}	152,1	151,9	0,1

2.4. Расчёт внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов составного сечения

2.4.1. Ввод данных

Для расчёта сжатых с изгибом элементов составного сечения необходимо в главном меню выбрать **Элемент**, затем **Сжатие с изгибом** и далее тип сечения. Для составных профилей появляется окно ввода исходных данных (рисунок 2.26).

Центральное сжатие, Сжатие с изгибом Составные профили

Двойной Сигма-профиль | Расчётная схема (Дополнительно)

Расчётная схема | Двойной С-профиль | Двойной С-профиль с рифом

Наименование элемента: Элемент № 10

Тип расчёта:

- ☐ Центально-сжатый элемент
- ☒ Внецентренно-сжатый элемент
- ☐ Сжато-изгибаемый элемент

Настройки расчёта:

- ☒ Всегда Meff=Myst
- ☐ Определять mef по табл. Д.5 (п.9.2.3)
- ☐ Выполнить проверку прочности
- ☒ Учесть потерю устойчивости формы сечения

Расчётная длина элемента относительно оси X: 300 см

Расчётная длина элемента относительно оси Y: 100 см (Для расчёта по формуле (111))

Расчётная продольная сила N: 50 кН

GammaC: 1

Внецентренно-сжатый элемент

Эксцентриситет e = 4 см (в направлении оси Y)

GammaC: 1

Сжато-изгибаемый элемент

Расчётный момент для определения редуцированных характеристик сечения Meff: 0 кНм

Расчётный момент Mx для расчёта на устойчивость (п.9.2.3): 0 кНм

GammaC: 1

Расчётный момент Mx для расчёта на прочность: 0 кНм

GammaC: 1

Сталь

Наименование:

Расчётное сопротивление Ry: 250 МПа

Предельная гибкость элемента: 180-60alfa

Рассчитать | Отмена

Рисунок 2.26 - Окно ввода исходных данных для составных профилей

На вкладке **Расчётная схема** вводятся общие параметры расчёта.

Наименование элемента, где пользователь может ввести название рассчитываемого элемента, наименование конструкции, название проекта или другую информацию (данное поле необязательно для заполнения).

На панели *Тип расчёта* в зависимости от характера работы элемента необходимо выбрать либо **Внецентренно-сжатый элемент**, либо **Сжато-изгибаемый элемент**.

Далее вводятся: **Расчётная длина элемента относительно оси X**, **Расчётная длина элемента относительно оси Y**, **Расчётная продольная сила N**.

Если рассчитывается внецентренно-сжатый элемент, необходимо ввести эксцентриситет приложения сжимающей силы e и **Коэффициент условий работы γ_c** , который будет учитываться при расчёте элемента на устойчивость. В CFSteel рассчитываются составные профили, сжатые с эксцентриситетом в направлении оси Y.

Если в рассчитываемом элементе действует осевая сила и изгибающий момент M_x , то необходимо ввести расчётное значение последнего учитывая указания п.9.2.3 [1] и **Коэффициент условий работы γ_c** , который будет учитываться при расчёте элемента на устойчивость. В программе предусмотрен случай, когда изгибающий момент для расчёта редуцированных характеристик сечения не совпадает по значению или/и знаку с моментом для расчёта на устойчивость. Если это так, то на панели *Настройки расчёта* необходимо сбросить флажок в пункте *Всегда $M_{eff} = M_{yсм}$* и затем ввести **Расчётный момент для определения редуцированных характеристик сечения M_{eff}** . В противном случае программа вычисляет характеристики эффективного сечения по продольной силе N и изгибающему моменту для расчёта на устойчивость.

Если установлен флажок в пункте **Выполнить проверку прочности** панели *Настройки расчёта*, выполняется проверка прочности элемента. В противном случае проверка не выполняется. При расчёте сжато-изгибаемых элементов необходимо ввести **Расчётный момент M_x для расчёта на прочность** и **Коэффициент условий работы γ_c для расчёта на прочность**.

В соответствии с п.9.2.3 [1] для сжатых стержней с шарнирно-опёртыми концами и сечениями, имеющими две оси симметрии, расчётные значения эксцентриситетов m_{ef} следует определять по табл. Д.5 [1]. Для реализации этого положения норм на панели *Настройки расчёта* необходимо установить флажок в соответствующем пункте.

Также необходимо ввести данные о стали и значение предельной гибкости элемента.

На вкладке **Расчётная схема (Дополнительно)** (рисунок 2.27) вводятся:

Рисунок 2.27 – Вкладка «Расчётная схема (Дополнительно)»

Расчётный момент M_x для определения относительного эксцентриситета m_x по п.9.2.6 [1]; значения концевых моментов M_1 и M_2 для определения m_{ef} по табл. Д.5; данные для расчёта коэффициента φ_b (п.8.4.1, 8.4.2, Приложение Ж [1]).

Далее выбирается вкладка с нужным типом сечения и вводятся его размеры.

При нажатии на кнопку **Рассчитать** выполняется расчёт и на экран выводится окно результатов расчёта. Если выбрана кнопка **Отмена**, то происходит возврат в главное меню.

2.4.2. Методика расчёта

В программе рассматриваются сжатые с изгибом в плоскости Y элементы составного сечения из Швеллеров, С-образных, С-образных с рифом на стенке и Сигма-образных профилей. Профили симметричны относительно оси X.

Для внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов выполняются следующие расчёты:

- проверка на устойчивость в плоскости изгиба;
- проверка на устойчивость из плоскости изгиба;
- проверка прочности;
- проверка по предельной гибкости.

Расчёт на устойчивость в плоскости изгиба выполняется по формуле (109) [1]:

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

где φ_e определяется по редуцированным геометрическим характеристикам эффективного сечения по п. 9.2.2. Эксцентриситет e вычисляется с учётом дополнительного

эксцентриситета e_{eff} , который возникает в результате редуцирования сечения. При определении коэффициента влияния формы сечения η в таблице Д.2 [1] рассматривается сечение в виде двутавра (отгибы не учитываются). A' – площадь полного или редуцированного сечения.

Расчёт на устойчивость из плоскости изгиба при изгибе в плоскости наибольшей жёсткости (изгибно-крутильная форма потери устойчивости) выполняется по формуле (111) [1]:

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

где c – коэффициент, определяемый по п.9.2.5 [1]; φ_y – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, определяемый по п.7.1.3 [1]. A' – площадь полного или редуцированного сечения.

При $I'_x < I'_y$ и $\lambda_y > \lambda_x$ выполняется проверка устойчивости элемента из плоскости изгиба как центрально-сжатого стержня по формуле (115) [1]:

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

В случае внецентренно-сжатого элемента проверка прочности выполняется в предположении отсутствия бимоментов в соответствии с формулой (106) [1]:

$$\left(\frac{N}{A'} + \frac{e \cdot N}{W_{xc}} \right) / (R_y \gamma_c) \leq 1,$$

где e – эксцентриситет, вычисляемый с учётом дополнительного эксцентриситета e_{eff} , который возникает в результате редуцирования сечения; A' – площадь полного или редуцированного сечения; W'_{xc} – минимальный момент сопротивления сечения относительно оси X полного или редуцированного сечения.

Если рассчитывается сжато-изгибаемый элемент, то проверка прочности выполняется по формуле

$$\left(\frac{N}{A'} + \frac{M_x^{прочн}}{W_{xc}} + \frac{e_{eff} \cdot N}{W_{xc}} \right) / (R_y \gamma_c) \leq 1,$$

где $M_x^{прочн}$ – введённый пользователем расчётный момент M_x для расчёта на прочность, e_{eff} – эксцентриситет от смещения центра тяжести сечения в результате редуцирования. Если редукция не выполняется, последнее слагаемое в первых скобках отсутствует.

Гибкость элемента должна удовлетворять условию

$$\lambda \leq \lambda_u,$$

где λ – максимальная гибкость элемента. λ_u – предельная гибкость, вводимая пользователем. Параметр α вычисляется в соответствии с таблицей 32 [1] для эффективного сечения.

2.4.3. Вывод результатов

Вывод результатов расчёта осуществляется в окно вывода и, при необходимости, в Excel аналогично ранее приведённым расчётам.

2.4.4. Верификация расчёта

Задание 2.7: Выполнить расчёт внецентренно-сжатого элемента составного сечения из спаренных С-образных профилей (рисунок 2.28) с исходными данными: $N=50$ кН; $e_N=4$ см; $l_{efx}=300$ см; $l_{efy}=100$ см; предельная гибкость $\lambda_u=180-60\alpha$; $R_y=250$ МПа. Коэффициент условий работы для расчётов на устойчивость $\gamma_c=1,0$. Размеры сечения: $h=150$ мм, $t=1,2$ мм, $b_f=40$ мм, $c=12$ мм, $\alpha=90^\circ$, $r=3$ мм, $t_{coat}=0,04$ мм. Расстояние между профилями $S=4$ мм.

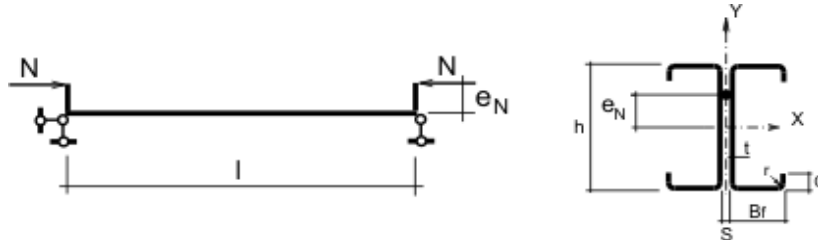


Рисунок 2.28 - Расчётная схема и сечение элемента

Расчёт: Геометрические характеристики полного и эффективного сечений определяются программно по CFSteel. Характеристики полного сечения: $A=5,64$ см², $I_x=180,31$ см⁴, $I_y=19,01$ см⁴, $i_x=5,66$ см, $i_y=1,84$ см.

Редуцированные характеристики эффективного сечения, вычисленные с учётом потери устойчивости формы сечения: $A_{eff}=3,95$ см², $I_{xeff}=167,31$ см⁴, $I_{yeff}=17,65$ см⁴, $i_{xeff}=6,51$ см, $i_{yeff}=2,11$ см, $W_{xeff}=21,02$ см³, эксцентриситет в результате редуцирования $e_{eff}=0,461$ см.

Гибкости элемента

$$\lambda_x = l_{efx} / i_{xeff} = 300 / 6,51 = 46,08 \quad \lambda_y = l_{efy} / i_{yeff} = 100 / 2,11 = 47,39$$

Условные гибкости элемента

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 1,60$$

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 1,65$$

Эксцентриситет

$$e = e_N + e_{eff} = 4 + 0,461 = 4,461 \text{ см}$$

Относительный эксцентриситет

$$m = e \frac{A_{eff}}{W_{xeff}} = 4,461 \frac{3,95}{21,02} = 0,84$$

Коэффициент влияния формы сечения

$$\eta = (1,45 - 0,05m) - 0,01(5 - m) \bar{\lambda}_x = 1,341$$

Приведённый относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta m = 1,341 * 0,84 = 1,126$$

Коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии

$$\varphi_e = 0,559$$

Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня по формуле (109) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{50}{0,559 \cdot 3,95 \cdot 25 \cdot 1} = 0,906 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Коэффициент c

$$c = \beta / (1 + \alpha m_x) = 1 / (1 + 0,7 \cdot 0,84) = 0,632,$$

где $\alpha=0,7$; $\beta=1$.

При вычислении коэффициента устойчивости при центральном сжатии тип сечения – b, следовательно $\alpha=0,04$ и $\beta=0,09$ (табл.7 [1]).

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \overline{\lambda}_y) + \overline{\lambda}_y^2 = 13,67.$$

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии относительно оси Y

$$\varphi_y = 0,5(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \overline{\lambda}_y^2}) / \overline{\lambda}_y^2 = 0,874.$$

Проверка устойчивости из плоскости изгиба (изгибно-крутильная форма потери устойчивости) по формуле (111) [1]:

$$\frac{N}{c \varphi_y A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{50}{0,632 \cdot 0,874 \cdot 3,95 \cdot 25 \cdot 1} = 0,917 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Проверка элемента по предельной гибкости:

$$\lambda \leq \lambda_u$$

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_y A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{50}{0,874 \cdot 3,95 \cdot 25 \cdot 1} = 0,579$$

$$\lambda_u = 180 - 60\alpha = 180 - 60 \cdot 0,579 = 145,3$$

$$47,39 < 145,3 - \text{условие выполняется.}$$

Вид окон ввода общих исходных данных в CFSteel по заданию 2.7 показан на рисунках 2.26 и 2.27. В таблице 2.6 приведено сопоставление результатов, полученных выше для задания 2.7, с результатами вычислений по программе CFSteel.

Таблица 2.6 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.7

Параметр	Обозн.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Гибкость относительно оси X	λ_x	46,08	46,09	0,02
Гибкость относительно оси Y	λ_y	47,39	47,31	0,2
Условная гибкость относительно оси X	$\overline{\lambda}_x$	1,60	1,61	0,6
Условная гибкость относительно оси Y	$\overline{\lambda}_y$	1,65	1,66	0,6
Относительный эксцентриситет	m	0,84	0,84	0,0
Коэффициент влияния формы сечения	η	1,341	1,354	1,0
Приведённый относительный эксцентриситет	m_{ef}	1,126	1,135	0,8
Коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии	φ_e	0,559	0,557	0,4
Проверка устойчивости элемента как внецентренно-сжатого стержня по формуле (109)		0,906	0,909	0,3
Коэффициент c	c	0,632	0,630	0,3
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ_y	0,874	0,875	0,1
Проверка устойчивости по формуле (111)	-	0,917	0,918	0,1

Значение предельной гибкости	λ_u	145,3	145,3	0,0
------------------------------	-------------	-------	-------	-----

Задание 2.8: Выполнить расчёт сжато-изгибаемого элемента составного сечения из спаренных С-образных профилей с исходными данными: осевая сила $N=27$ кН; изгибающий момент для расчёта устойчивости элемента и вычисления характеристик эффективного сечения $M_{хуст}=4,1$ кНм; изгибающий момент для расчёта прочности $M_{хпрочн}=4,1$ кНм; коэффициент условий работы для расчёта устойчивости $\gamma_c=1$; коэффициент условий работы для расчёта прочности $\gamma_c=1$; $l_{efx}=350$ см; $l_{efy}=100$ см; предельная гибкость $\lambda_u=210-60\alpha$; $R_y=250$ МПа. Размеры сечения: $h=150$ мм, $t=1,2$ мм, $b_f=40$ мм, $c=12$ мм, $\alpha=90^\circ$, $r=3$ мм, $t_{coat}=0,04$ мм. Расстояние между профилями $S=4$ мм.

Расчёт: Геометрические характеристики полного и эффективного сечений определяются программно по CFSteel. Характеристики полного сечения: $A=5,64$ см², $I_x=180,31$ см⁴, $I_y=19,01$ см⁴, $i_x=5,66$ см, $i_y=1,84$ см.

Редуцированные характеристики эффективного сечения, вычисленные с учётом потери устойчивости формы сечения: $A_{eff}=5,50$ см², $I_{xeff}=175,63$ см⁴, $I_{yeff}=18,23$ см⁴, $i_{xeff}=5,65$ см, $i_{yeff}=1,82$ см, $W_{xeff}=22,99$ см³, эксцентриситет в результате редуцирования $e_{eff}=0,138$ см.

Гибкости элемента

$$\lambda_x = l_{efx} / i_{xeff} = 350 / 5,65 = 61,95 \quad \lambda_y = l_{efy} / i_{yeff} = 100 / 1,82 = 54,95$$

Условные гибкости элемента

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 2,16$$

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 1,91$$

Относительный эксцентриситет

$$m = \left(\frac{M_{хуст}}{N} + e_{eff} \right) \frac{A_{eff}}{W_{xeff}} = \left(\frac{410}{27} + 0,138 \right) \frac{5,5}{22,99} = 3,666$$

Коэффициент влияния формы сечения

$$\eta = (1,45 - 0,05m) - 0,01(5 - m) \bar{\lambda}_x = 1,238$$

Приведённый относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta m = 1,238 \cdot 3,666 = 4,539$$

Коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии

$$\varphi_e = 0,232$$

Проверка устойчивости элемента в плоскости изгиба по формуле (109) [1]:

$$\frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{27}{0,232 \cdot 5,5 \cdot 25 \cdot 1} = 0,846 > 1 - \text{условие выполняется.}$$

Коэффициент c

$$c = \beta / (1 + \alpha m_x) = 1 / (1 + 0,833 \cdot 3,666) = 0,247,$$

где $\alpha = 0,65 + 0,05 \cdot 3,666 = 0,833$; $\beta = 1$.

При вычислении коэффициента устойчивости при центральном сжатии тип сечения – б, следовательно $\alpha = 0,04$ и $\beta = 0,09$ (табл. 7 [1]).

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}_y) + \bar{\lambda}_y^2 = 14,82.$$

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии относительно оси Y

$$\varphi_y = 0,5(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48\bar{\lambda}_y^2}) / \bar{\lambda}_y^2 = 0,840.$$

Проверка устойчивости из плоскости изгиба (изгибно-крутильная форма потери устойчивости) по формуле (111) [1]:

$$\frac{N}{c\varphi_y A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{27}{0,247 \cdot 0,84 \cdot 5,5 \cdot 25 \cdot 1} = 0,946 > 1 - \text{условие выполняется.}$$

Проверка прочности

$$\left(\frac{N}{A'} + \frac{M_x^{прочн}}{W_{xc}} + \frac{e_{eff} \cdot N}{W_{xc}} \right) / (R_y \gamma_c) = \left(\frac{27}{5,5} + \frac{410}{22,99} + \frac{0,138 \cdot 27}{212,99} \right) / (25 \cdot 1) = 0,916 \quad - \quad \text{условие}$$

выполняется.

Проверка элемента по предельной гибкости:

$$\lambda \leq \lambda_u$$

$$\alpha = \frac{N}{\varphi_e A_{eff} R_y \gamma_c} = \frac{27}{0,232 \cdot 5,5 \cdot 25 \cdot 1} = 0,846$$

$$\lambda_u = 210 - 60\alpha = 210 - 60 \cdot 0,846 = 159,2$$

$$61,95 < 159,2 - \text{условие выполняется.}$$

В таблице 2.7 приведено сопоставление результатов, полученных выше для задания 2.8, с результатами вычислений по программе CFSteel.

Таблица 2.7 – Сопоставление результатов расчёта по заданию 2.8

Параметр	Обозн.	Ручной расчёт	CFSteel	Расхождение, %
Гибкость относительно оси X	λ_x	61,95	61,96	0,0
Гибкость относительно оси Y	λ_y	54,95	54,95	0,0
Условная гибкость относительно оси X	$\bar{\lambda}_x$	2,16	2,16	0,0
Условная гибкость относительно оси Y	$\bar{\lambda}_y$	1,91	1,91	0,0
Относительный эксцентриситет	m	3,666	3,668	0,05
Коэффициент влияния формы сечения	η	1,238	1,244	0,5
Приведённый относительный эксцентриситет	m_{ef}	4,539	4,561	0,5
Коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии	φ_e	0,232	0,232	0,0
Проверка устойчивости элемента в плоскости изгиба по формуле (109)		0,846	0,848	0,2
Коэффициент c	c	0,247	0,247	0,0
Коэффициент устойчивости при центральном сжатии	φ_y	0,840	0,839	0,1
Проверка устойчивости по формуле (111)	-	0,946	0,949	0,3
Проверка прочности	-	0,916	0,916	0,0
Значение предельной гибкости	λ_u	159,2	159,1	0,06

2.5. Расчёт изгибаемых элементов

2.5.1. Ввод данных

Для расчёта изгибаемых элементов необходимо в главном меню выбрать **Элемент**, затем **Изгиб**. В появившемся окне (рисунок 2.29) на вкладке *Расчётная схема* следует ввести значения **Изгибающего момента M_x** , **Коэффициента условий работы γ_c** . На панели *Сталь* ввести её **Наименование** (необязательно) и **Расчётное сопротивление стали R_y** . В поле **Наименование элемента** можно вводить название рассчитываемого элемента, наименование конструкции, название проекта или другую информацию (данное поле необязательно для заполнения). Далее следует выбрать вкладку с нужным типом сечения и ввести информацию о нём.

Рисунок 2.29 – Окно ввода данных для расчёта на изгиб

При нажатии на кнопку **Рассчитать** выполняется расчёт и на экран выводится окно результатов расчёта. Если выбрана кнопка **Отмена**, то происходит возврат в главное меню.

2.5.2. Методика расчёта

В программе рассматривается плоский изгиб относительно оси X. Проверка прочности по нормальным напряжениям выполняется в упругой стадии работы стали по формуле (41) [1]

$$\frac{M_x}{W'_x R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где M_x – расчётный изгибающий момент относительно оси X, W'_x – минимальный момент сопротивления сечения относительно оси X. Если для введённых значений изгибающего

момента и размеров сечения редукции последнего не требуется, в формулу подставляется момент сопротивления полного сечения W_x , если необходима редукция, то учитывается редуцированный момент сопротивления эффективного сечения W_{xeff} . Редукция сечения выполняется по методике ЕС3 [3].

2.5.3. Верификация расчёта

Задание 2.9: Выполнить проверку прочности балки Б-8 перекрытия составного сечения из оцинкованных С-образных профилей на действие изгибающего момента $M_x=6,445$ кНм. Высота сечения профиля $h=180$ мм, толщина стали $t=1$ мм, ширина поясов $b_f=45$ мм, ширина отгибов $c=15$ мм, радиус закругления $r=3$ мм, расстояние между профилями $S=6$ мм. Сталь 350 по ГОСТ Р 52246 с $R_y=330$ МПа, коэффициент условий работы $\gamma_c=1$, $t_{coat}=0,04$ мм.

Расчёт: Геометрические характеристики полного и эффективного сечений определяются программно по CFSteel. Характеристики полного сечения: $A=5,57$ см², $I_x=255,51$ см⁴, $I_y=25,36$ см⁴, $i_x=6,77$ см, $i_y=2,13$ см.

Редуцированные характеристики эффективного сечения, вычисленные с учётом потери устойчивости формы сечения: $A_{eff}=4,56$ см², $I_{xeff}=211,56$ см⁴, $I_{yeff}=21,82$ см⁴, $i_{xeff}=6,81$ см, $i_{yeff}=2,19$ см, $W_{xeff}=20,63$ см³.

Проверка прочности

$$\frac{M_x}{W_{xeff} R_y \gamma_c} = \frac{644,5}{20,63 \cdot 33 \cdot 1} = 0,947 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Вычисление по CFSteel приводит к такому же результату (рисунок 2.32).

На рисунке 2.29 приведён ввод исходных данных (*расчётная схема*) по заданию 2.9. Результаты расчёта приведены на рисунках 2.30 - 2.32.

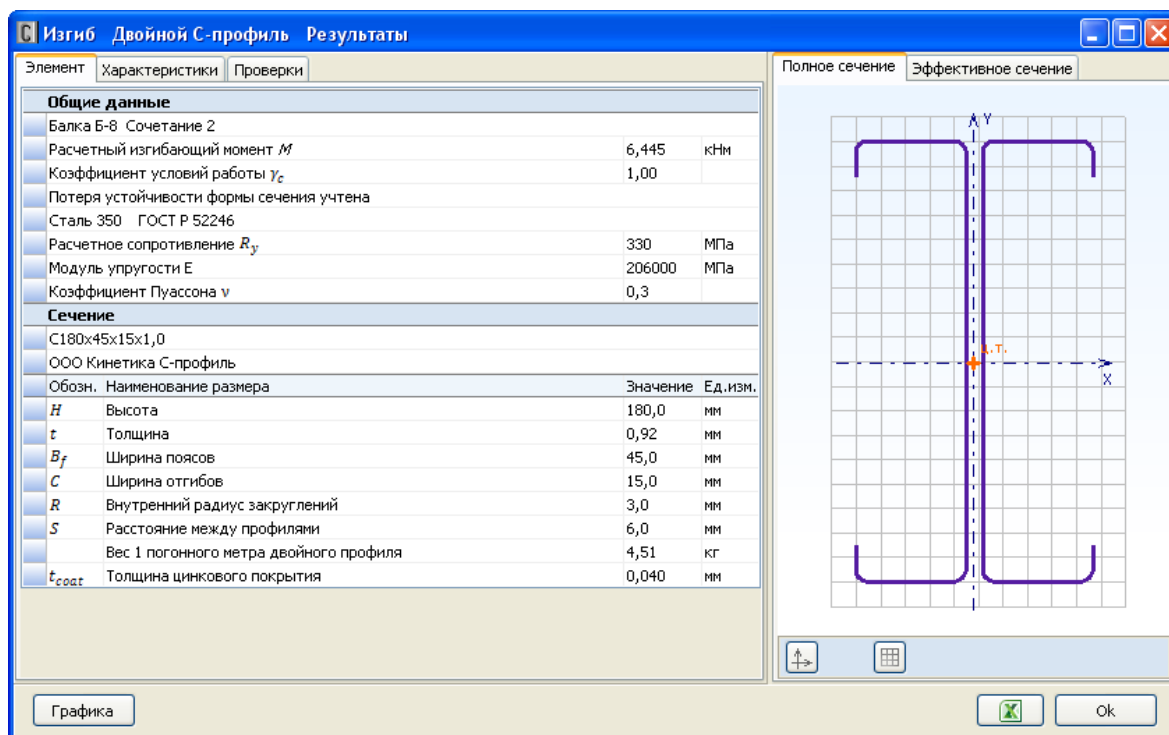


Рисунок 2.30 - Результаты расчёта по заданию 2.9 (Элемент - Полное сечение)

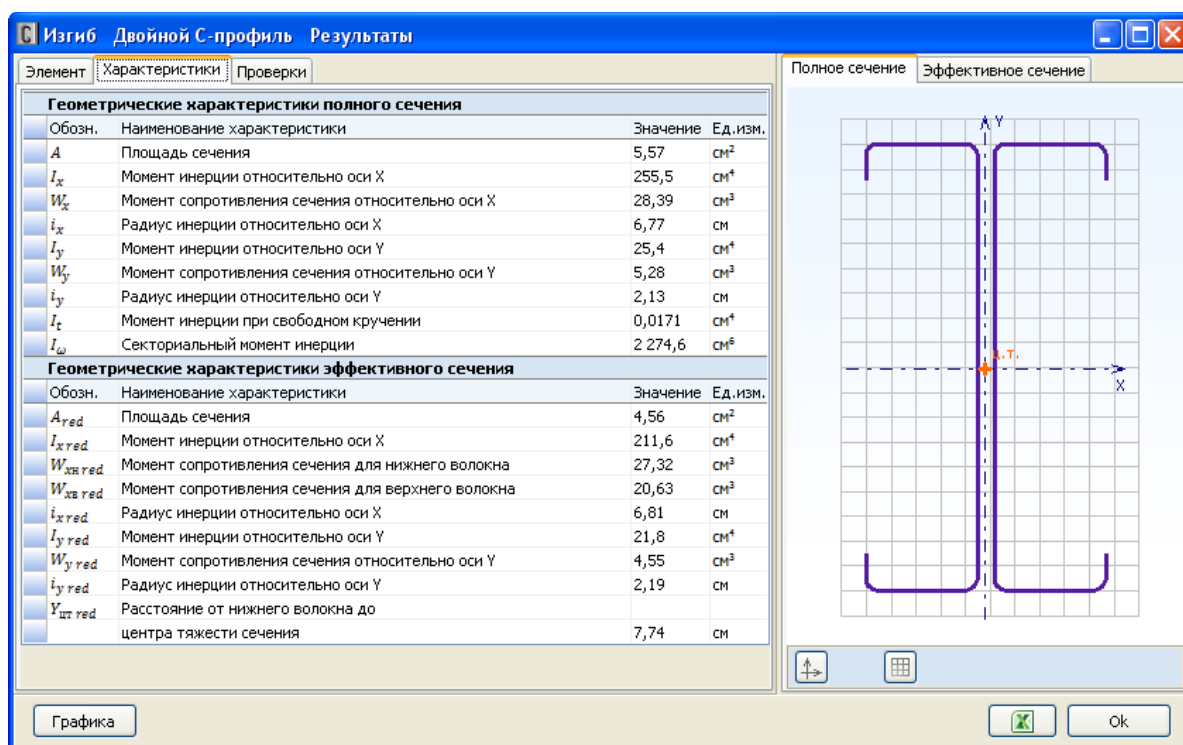


Рисунок 2.31 - Результаты расчёта по заданию 2.9 (Характеристики - Полное сечение)

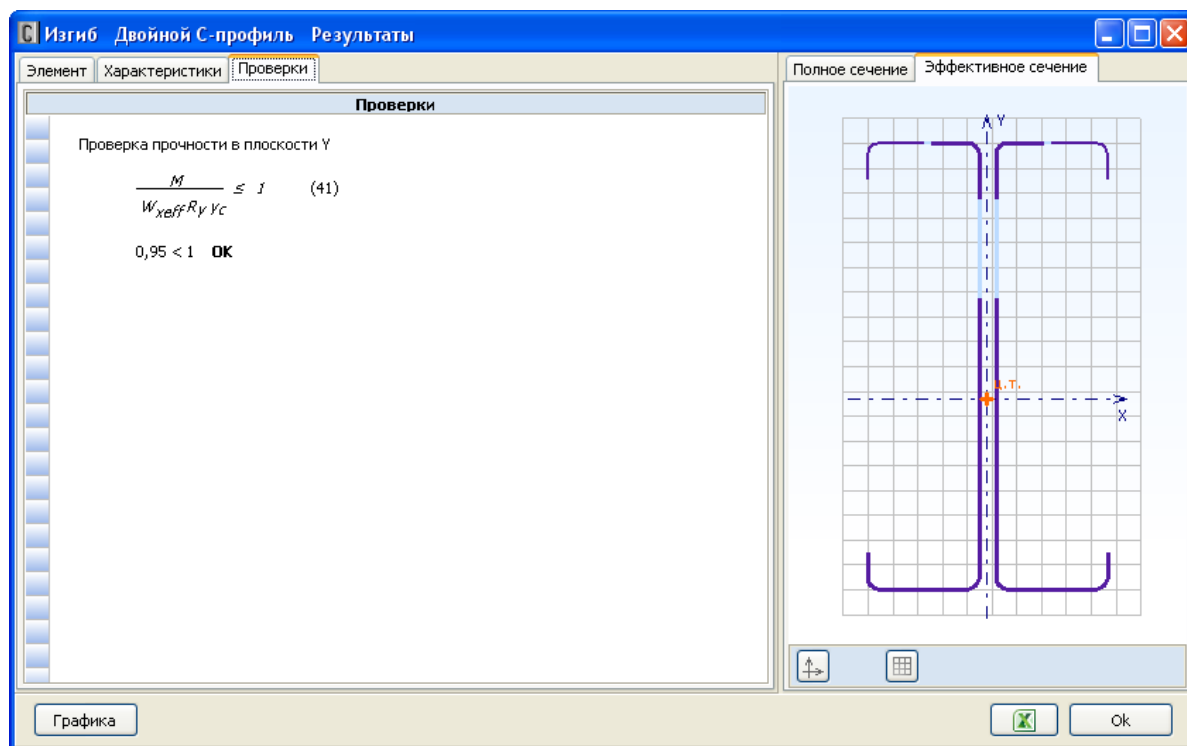


Рисунок 2.32 - Результаты расчёта по заданию 2.9 (Проверки - Эффективное сечение)

3. РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

3.1. Общие замечания

В версии v.3.1 программы CFSteel предусмотрена возможность расчёта двух видов конструкций из стальных тонкостенных холодногнутых профилей: балок и прогонов покрытия.

В обоих случаях полагается, что на верхний пояс конструкций опирается (и надёжно прикрепляется к нему) жёсткий горизонтальный диск из профилированного настила, который обеспечивает общую устойчивость балок или прогонов, а также в случае с прогонами воспринимает и передаёт на опоры скатную составляющую нагрузки.

Рассматриваются одно-, двух- и трёхпролётные балки с консолью и без консоли. В двух- и трёхпролётных балках величины пролётов могут быть различны. Предусмотрен расчёт балок из спаренных С-образных, С-образных профилей с двойными отгибами и Сигма-образных профилей, которые или выбираются из предустановленных разработчиком ПО при покупке лицензии сортаментов или размеры профилей вводятся пользователем непосредственно в ходе сеанса работы с программой. Нагрузка – равномерно-распределённая и неравномерно-распределённая, приложенная на части длины балки или по всей длине. Выполняются расчёты прочности по нормальным напряжениям, по несущей способности при действии локальной поперечной силы на опоре, а также по прогибам.

Расчёт прогонов покрытия выполняется в соответствии с Разделом 10 EN 1993-1-3 [3] и в предположении допущений, принятых в данной Главе.

Для расчёта прогонов предусмотрены разнообразные расчётные схемы: одно-, двух- и трёхпролётные балочные системы с консолью и без консоли. Величины пролётов в многопролётных прогонах одинаковые. Также на опорах могут быть предусмотрены перехлёсты прогонов. Их изгибная жёсткость может быть как бесконечной (неразрезной прогон), так и конечной упругой, моделирующей некоторую податливость в реальных конструкциях. Закрепление нижних поясов прогонов из плоскости может отсутствовать или в зависимости от количества пролётов в прогоне достигать трёх закреплений, равномерно расположенных по длине пролёта. Прогон могут выполняться из Z-образных, С-образных и Сигма-образных одиночных профилей. Ввод сечений осуществляется либо путём выбора из предустановленных сортаментов, либо введением индивидуальных размеров непосредственно в ходе сеанса работы с программой. Нагрузка – равномерно-распределённая по всей длине прогона. В том числе предусмотрен вариант подъёмной ветровой нагрузки. Также предусмотрена возможность приложения осевых сжимающих усилий в прогоне, в том числе, различных в разных пролётах. Производятся расчёты прочности по нормальным напряжениям, устойчивости свободного пояса из плоскости прогона, несущей способности прогона на опоре, в том числе с учётом

совместного действия осевых усилий и изгибающих моментов в опорном сечении, а также проверка прогибов прогона.

3.2. Определение усилий и прогибов в балках и прогонах покрытия

Определение деформаций и внутренних усилий в конструкциях выполняется методом конечных элементов (МКЭ), для чего в программе реализован специальный расчётный модуль.

Консоль и каждый пролёт конструкции разбиваются на n стержневых конечных элементов (КЭ), в которых учитываются осевые и изгибные деформации. Значение n изменяется в пределах от 30 до 60 *шт.* в зависимости от величины пролёта, что обеспечивает длину каждого КЭ от 6,67 *см* при пролёте 2 *м* до 20 *см* при пролёте 12 *м*. В интервале наиболее часто встречаемых для таких конструкций пролётов от 3 *м* до 6 *м* длины КЭ лежат в интервале от 7,5 до 15 *см*. Консоли разбиваются на 20...30 КЭ, что приводит к длине каждого конечного элемента от 2 *см* (при минимальной длине консоли) до 6,67 *см* при длине консоли 2 *м*.

Для каждого КЭ внутренние усилия вычисляются в трёх поперечных сечениях: в начале, середине и в конце конечного элемента.

Статический расчёт выполняется на каждое *Сочетание* загрузжений, заранее определяемое пользователем. Причём, вначале каждому КЭ присваивается жёсткость, соответствующая жёсткости полного сечения профиля. По полученным из данного расчёта изгибающим моментам, соответствующим значениям в средней точке, вычисляются редуцированные геометрические характеристики каждого КЭ. Редуцирование (если оно необходимо для того или иного КЭ) выполняется по Eurocode [3,7]. Далее снова выполняется статический расчёт схемы, где каждому КЭ присвоена своя жёсткость, в зависимости от степени редукции как это показано на рисунке 3.2.1. Далее по вновь полученным изгибающим моментам вычисляются новые характеристики сечений КЭ и с этими жесткостями производится новый статически расчёт. Процесс повторяется до тех пор, пока максимальная разница между соответствующими вертикальными перемещениями узлов на предыдущей и на текущей итерации не будет меньше заранее заданного значения [22]. В общем случае в стержневых системах значения деформаций и усилий зависят от распределения жесткостей отдельных стержней, которые в данном случае изменяются.

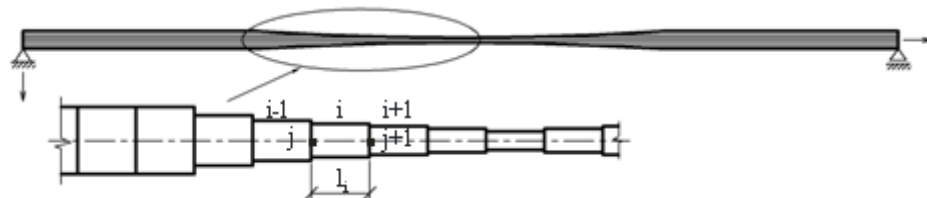


Рисунок 3.2.1 – Изменение жёсткости отдельных КЭ в результате редуцирования сечений в однопролётной балочной конструкции

Для КЭ, расположенных в местах перехлёстов в прогонах, учитывается удвоенная жёсткость. Это также учитывается и при вычислении редуцированных характеристик (при этом толщины элементов сечения не суммируются).

Важно: В CFSteel следует вводить вертикальные нагрузки. В зависимости от угла наклона кровли (для прогонов) они программно приводятся к нагрузкам, действующим в плоскости стенки профиля. Скатную составляющую воспринимает жёсткий диск настила и передаёт на опоры прогонов.

Приведённый выше расчёт выполняется в плоскости стенки сечения конструкции. Для прогонов кроме этого выполняется аналогичный статический расчёт в плоскости, перпендикулярной стенке от нагрузок, вызванных кручением. При этом расчётным сечением является полное сечение нижнего пояса с прилегающей частью стенки (Раздел 10 [3]). Поскольку учитывается всегда полное сечение пояса, итерационный процесс в данном случае отсутствует. Кроме того, в зависимости от наличия или отсутствия боковых закреплений нижнего пояса прогона, в расчётную схему включаются или не включаются дополнительные шарнирно подвижные горизонтальные опоры.

Ниже для целей верификации модуля статического расчёта приведён ряд тестовых примеров.

Задание 3.1: Вычислить значения изгибающих моментов, поперечных сил, прогибов и углов поворота опорных сечений в однопролётной свободно опёртой балке с расчётной схемой, показанной на рисунке 3.2.2, при $l=2$ м, $q=10$ кН/м. Сечение: С-образный холодногнутый профиль С200х50х20х2 с $A=6,5$ см² и $I_x=365$ см⁴. $E=20600$ кН/см².

Источник: [18].

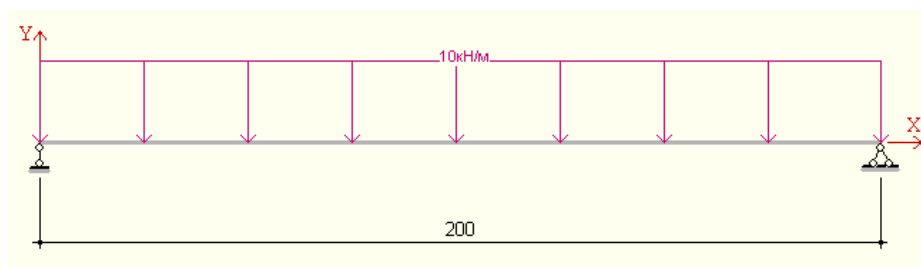


Рисунок 3.2.2 – Расчётная схема балки по Заданию 3.1

Решение: Эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и прогибов, полученные в CFSteel, приведены на рисунке 3.2.3. В таблице 3.2.1 представлены численные значения искомых величин, вычисленные по [18] и в CFSteel.

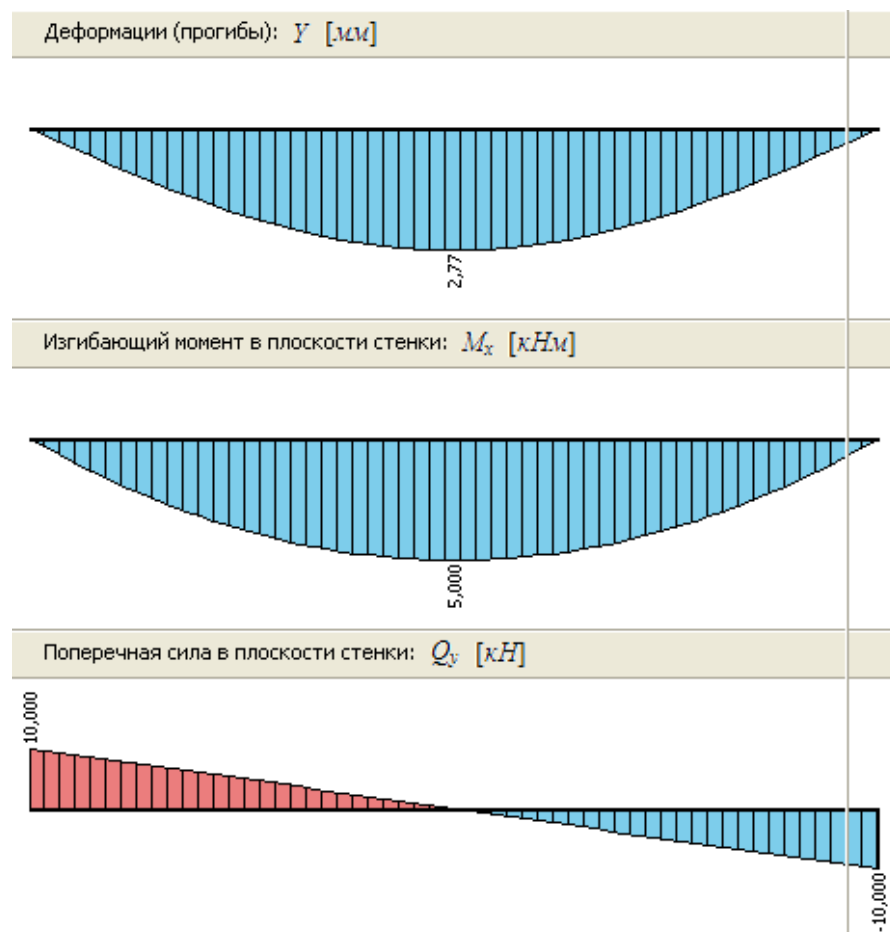


Рисунок 3.2.3 – Эпюры прогибов, изгибающих моментов и поперечных сил, полученные в CFSteel

Таблица 3.2.1 – Сопоставление результатов по [18] и CFSteel по Заданию 3.1

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Значение		Расхождение, %
			[18]	CFSteel	
Максимальный изгибающий момент в середине пролёта	M_{max}	кНм	5,000	5,000	0
Максимальная поперечная сила на опорах	Q_{ymax}	кН	10,000	10,000	0
Максимальный прогиб в середине пролёта	Y_{max}	мм	2,7708	2,7706	0,007
Угол поворота оси балки на опорах	θ	рад	0,004433	0,004433	0

Задание 3.2: Вычислить значения изгибающих моментов и поперечных сил в трёхпролётной балке с расчётной схемой, показанной на рисунке 3.2.4, при длине каждого пролёта $l=4$ м, $q=10$ кН/м. Сечение: С-образный холодногнутый профиль С200х50х20х2 с $A=6,5$ см² и $I_x=365$ см⁴. $E=20600$ кН/см².

Источник: [19].

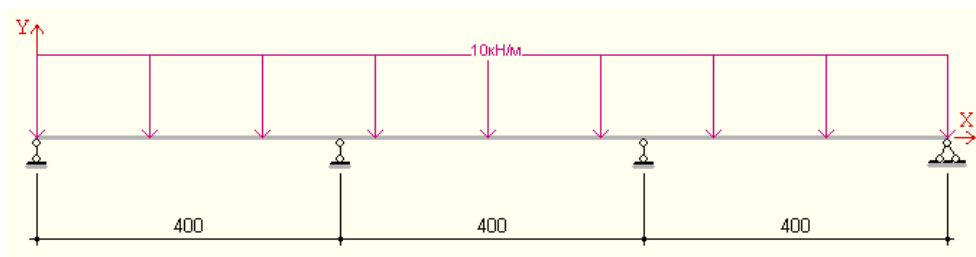


Рисунок 3.2.4 – Расчётная схема балки Заданию 3.2

Решение: Эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и прогибов, полученные в CFSteel, приведены на рисунке 3.2.5. В таблице 3.2.2 представлены численные значения искомых величин.

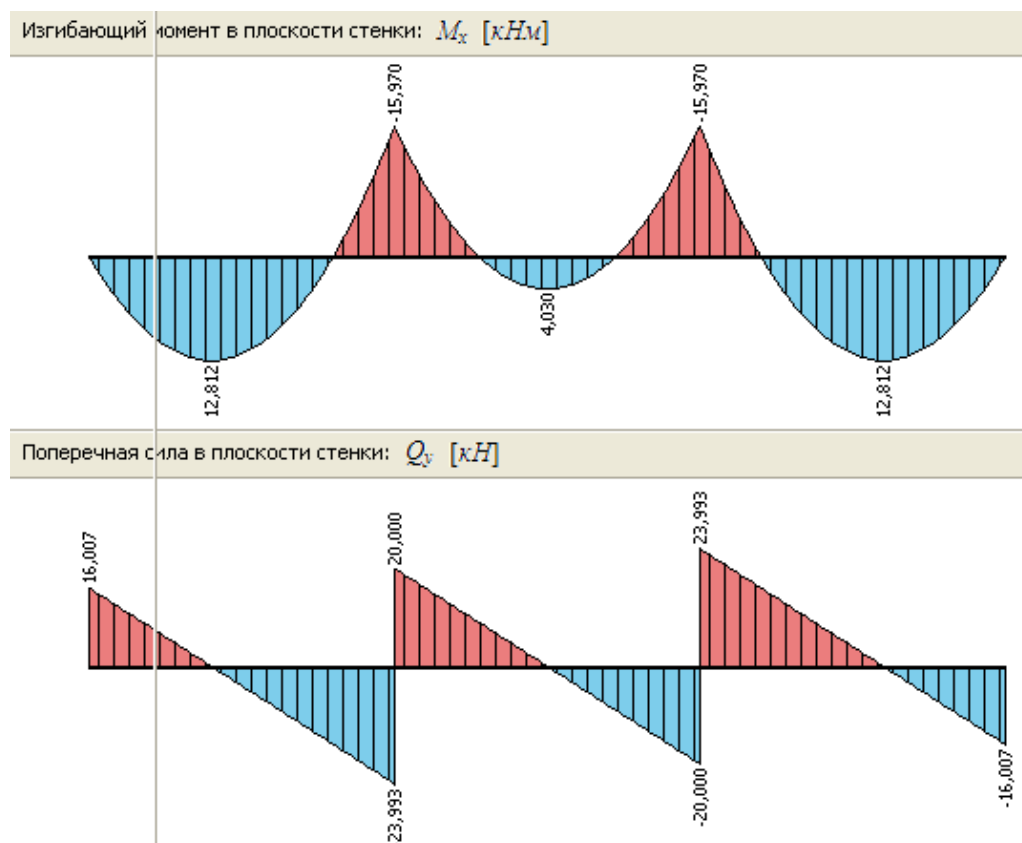


Рисунок 3.2.5 – Эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и прогибов, полученные в CFSteel

Таблица 3.2.2 – Сопоставление результатов по [19] и CFSteel по Заданию 3.2

Наименование	Обозн.	Ед.изм.	Значение		Расхождение, %
			[19]	CFSteel	
Максимальный изгибающий момент в крайнем пролёте	M_{1max}	кНм	12,800	12,812	0,09
Изгибающий момент на опоре	M_{max}	кНм	16,000	15,970	0,2
Максимальный изгибающий момент в среднем пролёте	M_{2max}	кНм	4,000	4,030	0,7
Поперечная сила на левой опоре	Q_A	кН	16,000	16,007	0,04
Поперечная сила на средней опоре слева	$Q_{Влев}$	кН	24,000	23,993	0,03
Поперечная сила на средней опоре справа	$Q_{Вправ}$	кН	20,000	20,000	0

Задание 3.3: Вычислить значения изгибающих моментов, поперечных сил, прогибов и углов поворота опорных сечений в однопролётной свободно опёртой балке с расчётной схемой, показанной на рисунке 3.2.6, при $l=2$ м, $q_{прав}=20$ кН/м. Сечение: спаренный С-образный холодногнутый профиль 2С200х50х20х2 с $A=13$ см² и $I_x=730$ см⁴. $E=20600$ кН/см².
Источник: [20].

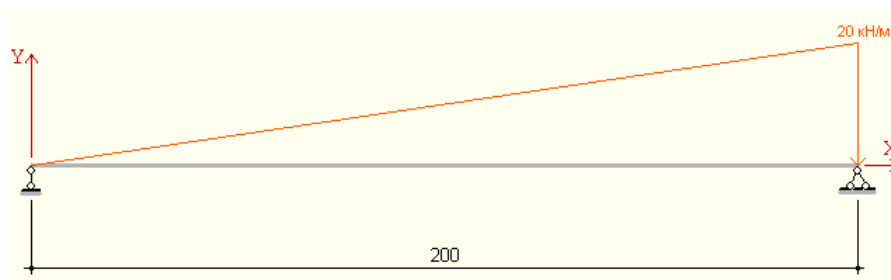


Рисунок 3.2.6 – Расчётная схема балки к заданию 3.3

Решение: Эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и прогибов, полученные в CFSteel, приведены на рисунке 3.2.7. В таблице 3.2.3 представлены численные значения искомых величин, вычисленные по [20] и в CFSteel.

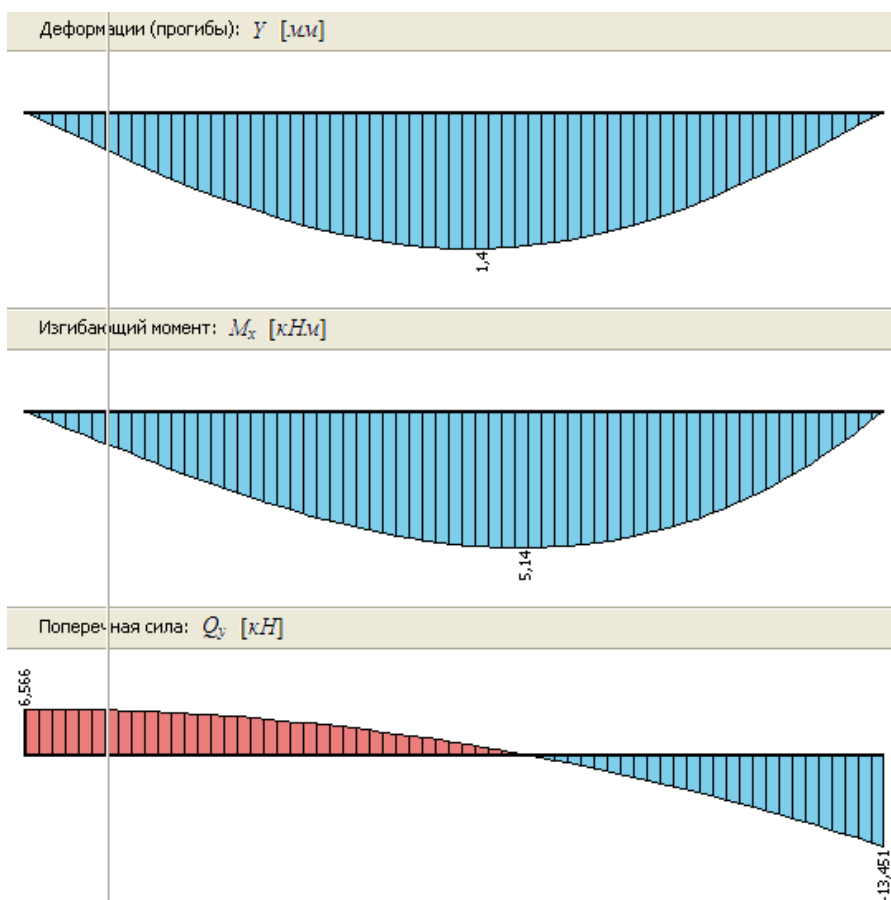


Рисунок 3.2.7 – Эпюры прогибов, изгибающих моментов и поперечных сил, полученные в CFSteel

Таблица 3.2.3 – Сопоставление результатов по [20] и CFSteel по Заданию 3.3

Наименование	Обозн.	Ед.изм.	Значение		Расхождение, %
			[20]	CFSteel	
Максимальный изгибающий момент	M_{\max}	кНм	5,130	5,140	0,2
Поперечная сила на левой опоре	$Q_{\text{лев}}$	кН	6,667	6,566	1,5
Поперечная сила на правой опоре	$Q_{\text{прав}}$	кН	13,333	13,451	0,9
Максимальный прогиб	Y_{\max}	мм	1,3878	1,3876	0,01
Угол поворота оси балки на левой опоре	$\theta_{\text{лев}}$	рад	0,00207	0,00206	0,5
Угол поворота оси балки на правой опоре	$\theta_{\text{прав}}$	рад	0,00237	0,00237	0

Задание 3.4: Вычислить значения изгибающих моментов, поперечных сил, прогибов и углов поворота опорных сечений в однопролётной свободно опёртой балке с расчётной схемой, показанной на рисунке 3.2.8, при $l=5,33$ м, $q=9,38$ кН/м. Расстояние от левой опоры до нагрузки $l,21$ м; длина равномерно-распределённой нагрузки $l,73$ м. Сечение: спаренный С-образный холодногнутый профиль 2С250х70х22х3,5 с $A=28,83$ см² и $I_x=2563,88$ см⁴. $E=20600$ кН/см².
Источник: [19].

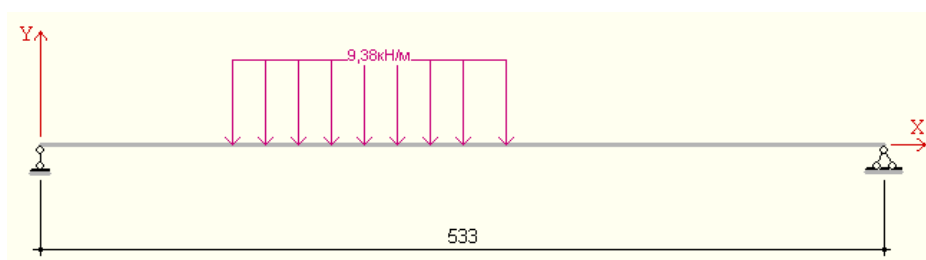


Рисунок 3.2.8 – Расчётная схема балки Заданию 3.4

Решение: Эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и прогибов, полученные в CFSteel, приведены на рисунке 3.2.9. В таблице 3.2.4 представлены численные значения искомых величин, вычисленные по [19] и в CFSteel.

Таблица 3.2.4 – Сопоставление результатов по [19] и CFSteel по Заданию 3.4

Наименование	Обозн.	Ед.изм.	Значение		Расхождение, %
			[19]	CFSteel	
Максимальный изгибающий момент	M_{\max}	кНм	17,226	17,210	0,09
Поперечная сила на левой опоре	$Q_{\text{лев}}$	кН	9,910	9,952	0,4
Поперечная сила на правой опоре	$Q_{\text{прав}}$	кН	6,317	6,296	0,3
Прогиб в середине длины нагрузки (координата $x = 207,5$ см)	Y_{\max}	мм	8,27	8,30	0,35
Угол поворота оси балки на левой опоре	$\theta_{\text{лев}}$	рад	0,00534	0,00534	0

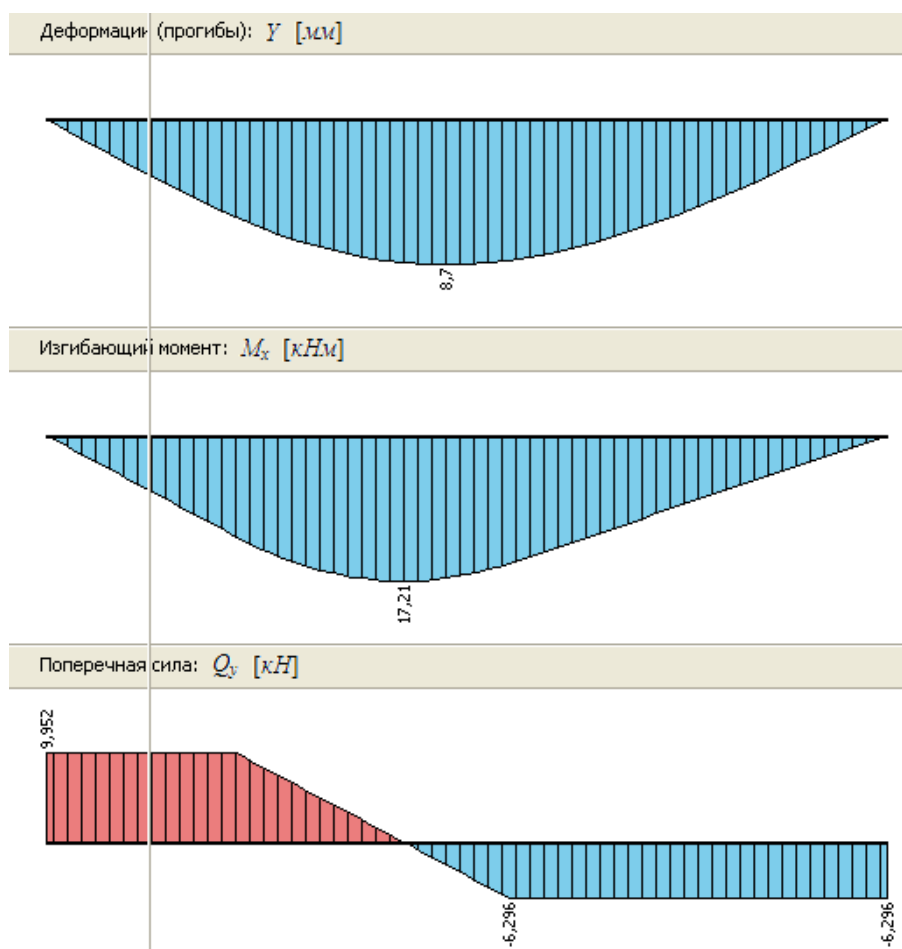


Рисунок 3.2.9 – Эпюры прогибов, изгибающих моментов и поперечных сил, полученные в CFSteel

3.3. Расчёт балок

3.3.1. Ввод данных

Для расчёта балок, необходимо в главном меню программы выбрать пункт **Конструкция**, затем **Балка**. Появляется окно расчёта балок (рисунок 3.3.1).

Рисунок 3.3.1 – Окно расчёта балок

На вкладке **Общие данные** вводятся следующие параметры расчёта балки:

Наименование расчёта, а также **Комментарии**, где пользователь может ввести название расчёта, наименование конструкции, название проекта и/или другую текстовую информацию (данные поля необязательны для заполнения).

Коэффициент условий работы для расчётов на прочность γ_c (принимается одинаковым для всех расчётов на прочность данной балки), выбирается из списка или вводится в строку ввода.

Коэффициент условий работы для расчётов на устойчивость γ_c (принимается одинаковым для всех расчётов на устойчивость данной балки), выбирается из списка или вводится в строку ввода.

Коэффициент надёжности по ответственности γ_n (выбирается из списка или вводится в строку ввода). Коэффициент γ_n учитывается при проверке прогибов балок, которая в программе выполняется следующим образом:

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

где f_{max} - максимальный прогиб в балке от нагрузок для расчётов по второй группе предельных состояний без учёта коэффициента надёжности по ответственности. Если в нагрузках, применяемых для расчёта по прогибам уже учтён коэффициент γ_n , то при вводе его значения в программу следует принять $\gamma_n = 1,0$.

f_u – предельный прогиб, значение которого вводится пользователем на вкладке **Общие данные**.

Важно: В CFSteel считается, что значения нагрузок, применяемые для расчётов по первой группе предельных состояний, определены с учетом коэффициентов надёжности по нагрузке для соответствующей нагрузки, а также с учётом коэффициента надёжности по ответственности γ_n .

Наименование стали (выбирается из списка или вводится в строку ввода: не обязательно для ввода).

Расчётное сопротивление стали R_y в кН/см^2 (выбирается из списка или вводится в строку ввода).

Также на данной вкладке для указан путь к папке, в которой хранится информация о данном расчёте балки.

На вкладке **Расчётная схема** (рисунок 3.3.2) вводятся следующие данные:

Рисунок 3.3.2 – Вкладка «Расчётная схема»

Схема. Для расчёта балок реализованы следующие расчётные схемы (рисунок 3.3.3):

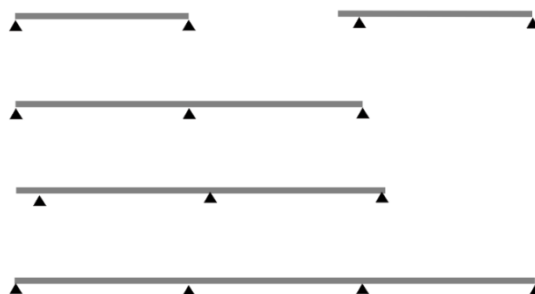


Рисунок 3.3.3 – Расчётные схемы балок

Длины пролётов (в двух- и трёхпролётных балках могут быть различны) в см. Значения длин пролётов должны лежать в интервале от 200 до 2000 см.

Длина консоли в см. Значение должно находиться в интервале от 30 см до 1/5 части соседнего с консолью пролёта.

Сечение. Для балок предусмотрено три типа сечений: спаренный С-образный профиль, спаренный С-образный профиль с двойными отгибами и спаренный Сигма-образный профиль. Указания по вводу сечения см. п. 1.3.

Важно: Выход из вкладки *Расчётная схема* осуществляется только по кнопке *Применить*.

На вкладке **Нагрузки** (рисунок 3.3.4) вводятся:

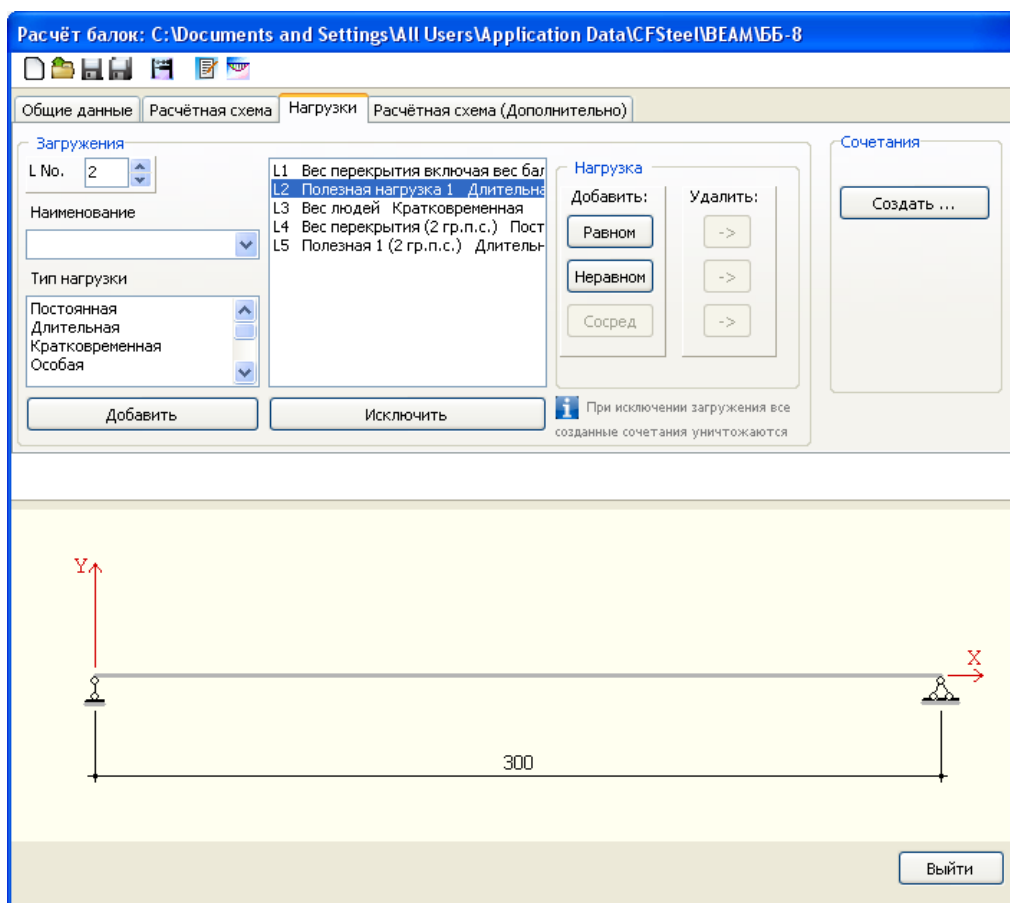


Рисунок 3.3.4 – Вкладка «Нагрузки»

Загрузки: Порядковый номер *Загрузки*; *Наименование Загрузки* и *Тип нагрузки Загрузки*. Номера *Загрузок* должны следовать по порядку без пропуска номеров. Контроль за данным требованием возлагается на пользователя. Максимальное количество *Загрузок* – 11. *Наименование Загрузки* выбирается из уже имеющихся в выпадающем списке, или вводится пользователем в строку ввода по своему усмотрению. Тип нагрузки для каждого *Загрузки* выбирается из списка: Постоянная, Длительная, Кратковременная или Особая в соответствии с [21]. После ввода всех трёх перечисленных параметров *Загрузки* необходимо нажать **Добавить** и данное *Загрузка* отобразится в общем списке *Загрузок*. Перемещаясь по списку, можно проконтролировать нагрузки

для каждого *Загружения*. Также имеется возможность исключить какое-либо *Загружение* их списка. Для этого необходимо выделить данное *Загружение* в списке и нажать **Исключить**.

Нагрузка. В каждом *Загружении* может быть одна *равномерно-распределённая* нагрузка и одна *неравномерно-распределённая* нагрузка. Ввод значений нагрузок производится по нажатию соответствующей кнопки **Добавить**, после чего появляется окно ввода значений нагрузок (рисунок 3.3.5).

Рисунок 3.3.5 – Диалоговое окно «Добавить нагрузку»

В случае *равномерно-распределённой* нагрузки вводится её значение q в кН/м , а также расстояние от начала балки (включая консоль) до начала действия нагрузки – величина A в см и длина приложения нагрузки – величина B в см . При *неравномерно-распределённой* нагрузке необходимо ввести её значение в начале q_1 и в конце q_2 в кН/м , а также значения A и B .

На вкладке **Нагрузки** имеется возможность **Удалить** ту или иную нагрузку из текущего *Загружения*.

Сосредоточенные нагрузки при расчёте балок не предусмотрены. Поэтому в диалоговом окне эта группа нагрузок не активна.

Расчёт балок производится только на *Сочетания Загружений*. Максимальное количество *Сочетаний* - 11. *Сочетания* формируются пользователем самостоятельно. При этом необходимо помнить, что расчёты по первой и второй группам предельных состояний могут выполняться на разные *Сочетания Загружений*. Кроме того, значения нагрузок в *Загружениях*, из которых состоят *Сочетания* для первой и второй групп, как правило, различны. Поэтому при вводе *Загружений* целесообразно предусмотреть отдельно *Загружения* для первой и второй групп предельных состояний. Если необходим простой расчёт на одну нагрузку (*Загружение*), всё равно необходимо сформировать *Сочетание*, которое в данном случае будет иметь в своём составе только одно *Загружение*.

Формирование *Сочетаний* производится по кнопке *Сочетания Создать ...* на вкладке **Нагрузки**. После чего появляется окно **Сочетания Загружений**, в котором уже имеется список сформированных *Загружений* (рисунок 3.3.6).

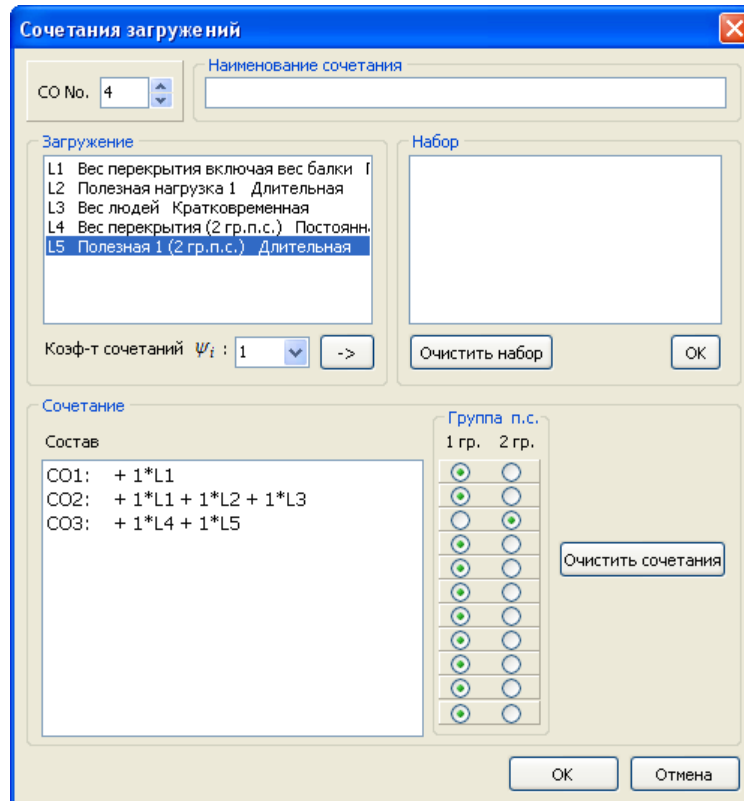


Рисунок 3.3.6 – Диалоговое окно формирования *Сочетаний Загружений*

Номера *Сочетаний* должны следовать по порядку без пропуска номеров. *Сочетанию* может быть присвоено **Наименование** (необязательно). Выбирая из списка поочерёдно *Загружение* и присваивая ему коэффициент сочетаний ψ_i , пользователь вначале формирует промежуточный набор будущего *Сочетания*. Убедившись в правильности набранного из *Загружений* *Сочетания*, необходимо нажать кнопку **ОК**. После чего текущее *Сочетание* появится в общем списке сформированных *Сочетаний*. Если набор выполнен неправильно, имеется возможность его очистить по кнопке **Очистить набор**. Также имеется возможность удалить сформированные *Сочетания* по кнопке **Очистить сочетания** (удаляется весь список сформированных *Сочетаний*). Здесь же в окне **Сочетаний** необходимо отметить, какое сочетание относится к расчёту по первой группе предельных состояний, а какое к расчёту по второй группе (по прогибам).

На вкладке **Расчётная схема (Дополнительно)** (рисунок 3.3.7) вводятся данные для расчёта местной несущей способности на опорах по [3]:

Ширина опоры в мм. Имеется возможность отказаться от выполнения данного расчёта.

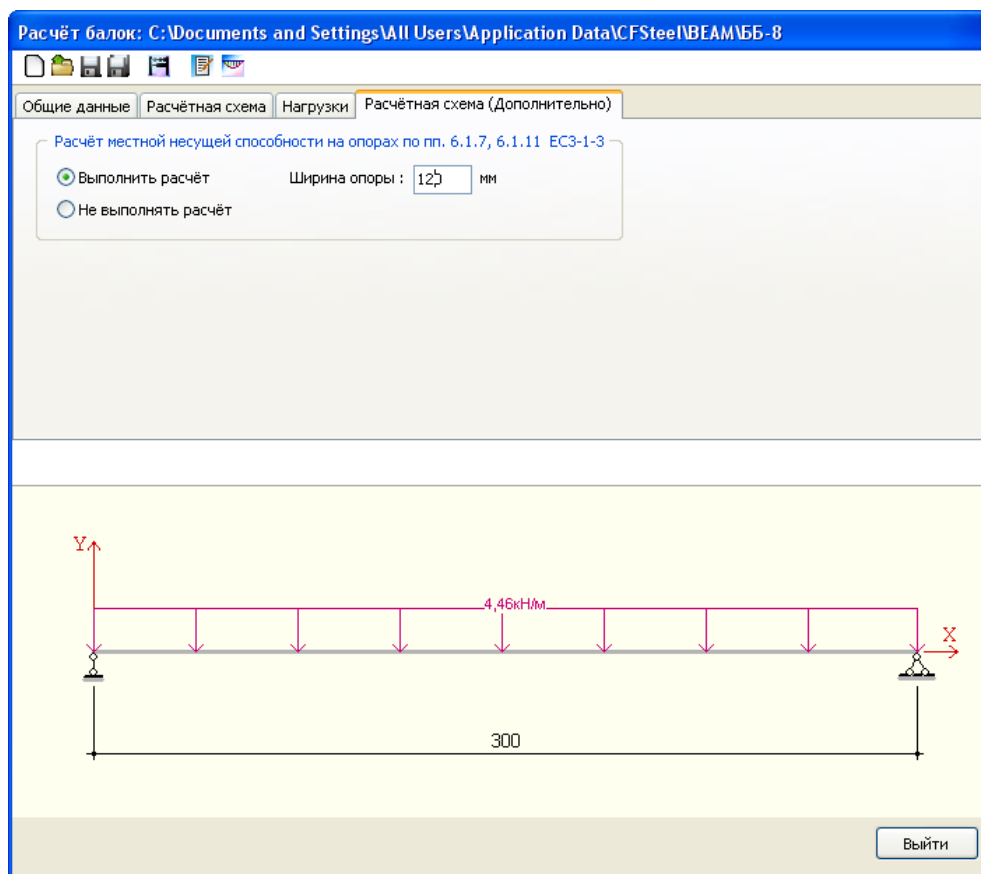







Рисунок 3.3.7 – Вкладка «Расчётная схема (Дополнительно)»

На панели инструментов окна расчёта балок имеются стандартные кнопки команд: Новый расчёт , Загрузить данные , Сохранить данные , Сохранить данные как ... . По этим кнопкам выполняются стандартные действия с данными проекта (расчёта).

3.3.2. Выполнение расчёта

Чтобы выполнить расчёт, необходимо на панели инструментов окна расчёта балок выбрать . После чего выполняется расчёт с введёнными исходными данными или загруженными из файла проекта данными. При этом осуществляется индикация выполнения расчёта. Поскольку в программе реализуются итерационные процессы, иногда включающие несколько уровней вложенности, расчёт может занять некоторое время.

3.3.3. Методика расчёта балок

Определение внутренних усилий (изгибающих моментов и поперечных сил), а также прогибов с учётом возможного изменения жесткости по длине балки от редуцирования сечений производится в модуле, реализующем МКЭ, как показано в п. 3.2. После чего выполняются проверки введённого пользователем сечения: проверка на прочность по нормальным напряжениям, проверка несущей способности на сдвиг и проверка местной несущей способности на опорах балки. Данные проверки производятся

для *Сочетаний* первой группы предельных состояний. Для *Сочетаний* второй группы производится проверка по прогибам.

3.3.3.1. Проверка прочности по нормальным напряжениям

Проверка прочности по нормальным напряжениям выполняется по формуле

$$\frac{|\sigma_{max}|}{R_y \gamma_c} \leq 1, \quad 3.3.1$$

где σ_{max} – максимальное нормальное напряжение в балке, которое определяется следующим образом. Для каждого конечного элемента, на которые разбита балка (см. п. 3.2), определяется M_i . По M_i для каждого КЭ по [3] вычисляется $W_{xeff\ i}$ – минимальный редуцированный момент сопротивления эффективного сечения относительно оси x . Далее определяются $\sigma_i = M_i / W_{xeff\ i}$ для каждого из трёх расчётных сечений каждого КЭ. После чего среди σ_i находится максимальное значение σ_{max} .

R_y – расчётное сопротивление стали; γ_c – коэффициент условий работы для расчётов на прочность.

3.3.3.2. Проверка несущей способности на сдвиг

Проверка несущей способности на сдвиг на опорах производится по формуле [3]

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1, \quad 3.3.2$$

где V_{Ed} – расчётная поперечная сила, определяемая из статического расчёта. На промежуточных опорах проверка выполняется дважды: на поперечную силу слева и справа от опоры.

$V_{b,Rd}$ – несущая способность поперечного сечения на сдвиг. Определяется по п. 6.1.5 [3] по формуле

$$V_{b,Rd} = 2 h_w t f_{bv} \gamma_c, \quad 3.3.3$$

где h_w – высота стенки сечения профиля между срединными плоскостями поясов; t – толщина стенки профиля; f_{bv} – критическое напряжение при сдвиге, учитывающее возможную потерю устойчивости стенки (табл. 6.1 [3]). f_{bv} определяется в зависимости от условной гибкости стенки $\bar{\lambda}_w$, которая определяется следующим образом [3]

- для С-образных профилей

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad 3.3.4, a$$

- для Сигма-образных профилей

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_d}{t} \sqrt{\frac{5,34 R_y}{k_t E}}, \quad 3.3.4, b$$

где s_w – высота стенки между средними точками закруглений между стенкой и поясом; s_d – суммарная высота стенки Сигма-образного профиля (с учётом длины уступов);

$$k_t = 5,34 + \frac{2,1}{t} \sqrt{\frac{2I_s}{s_d}},$$

где I_s – момент инерции каждого уступа на стенке (как элемента жёсткости) с прилегающей частью стенки относительно его центральной оси, параллельной плоскости стенки (п. 6.1.5(2), рисунок 6.5 [3]).

3.3.3.3. Проверка местной несущей способности на опорах

Проверка местной несущей способности на опорах производится в соответствии с п.6.1.7 [3] по формуле

$$F_{Ed} \leq R_{w,Rd}, \quad 3.3.5$$

где F_{Ed} – величина опорной реакции, определяемая из статического расчёта; $R_{w,Rd}$ – несущая способность стенки при местном поперечном воздействии, определяемая в зависимости от места расположения опоры по отношению к торцу балки по формулам

$$R_{w,Rd} = 2 k_7 \left[8,8 + 1,1 \sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 R_y \gamma_c, \quad 3.3.5, \text{ а}$$

$$R_{w,Rd} = 2 k_5 k_6 \left[13,2 + 2,87 \sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 R_y \gamma_c, \quad 3.3.5, \text{ б}$$

где k_5 , k_6 , k_7 – коэффициенты, определяемые по п.6.1.7.2(4) [3]; s_s – ширина опоры.

В случае Сигма-образного сечения соответствующая несущая способность $R_{w,Rd}$ в соответствии с п. 6.1.7.4 [3] домножается на коэффициент $k_{a,s}$, вычисляемый по формуле (6.22) [3].



3.3.3.4. Проверка по прогибам

Проверка по прогибам производится по формуле


$$f_{max} \leq \frac{f_u}{\gamma_n}, \quad 3.3.6$$

где f_{max} – максимальный прогиб в балке от *Сочетания* нагрузок для расчётов по второй группе предельных состояний без учёта коэффициента надёжности по ответственности. Если в нагрузках, применяемых для расчёта по прогибам уже учтён коэффициент γ_n , то при вводе его значения в программу следует принять $\gamma_n=1,0$; f_u – предельный прогиб, вводимый пользователем.

3.3.4. Результаты расчёта

Результаты расчёта могут быть показаны на экране и/или переданы в Microsoft Excel для дальнейшей обработки, например, печати. Для этого на панели инструментов окна расчёта балок размещена кнопка , по которой можно посмотреть полный Отчёт, и кнопка , по которой на экран выводятся Эпюры усилий, напряжений и прогибов.

3.3.4.1. Просмотр Отчёта

Посмотреть отчёт о выполненных расчётах можно щёлкнув на кнопке *Показать результаты расчёта*  на панели инструментов. После чего на экране появляется информационное окно с пятью вкладками, на которых показываются: введённые пользователем исходные данные (вкладка *Общие данные*), параметрический чертёж сечения с геометрическими характеристиками полного сечения (вкладка *Сечение*), информация о нагрузках (вкладка *Нагрузки*), результаты проверочных расчётов (вкладка *Проверки*) и эпюры (вкладка *Эпюры*).

На рисунке 3.3.8 показано окно **Результаты расчёта** с активной вкладкой *Общие данные*.

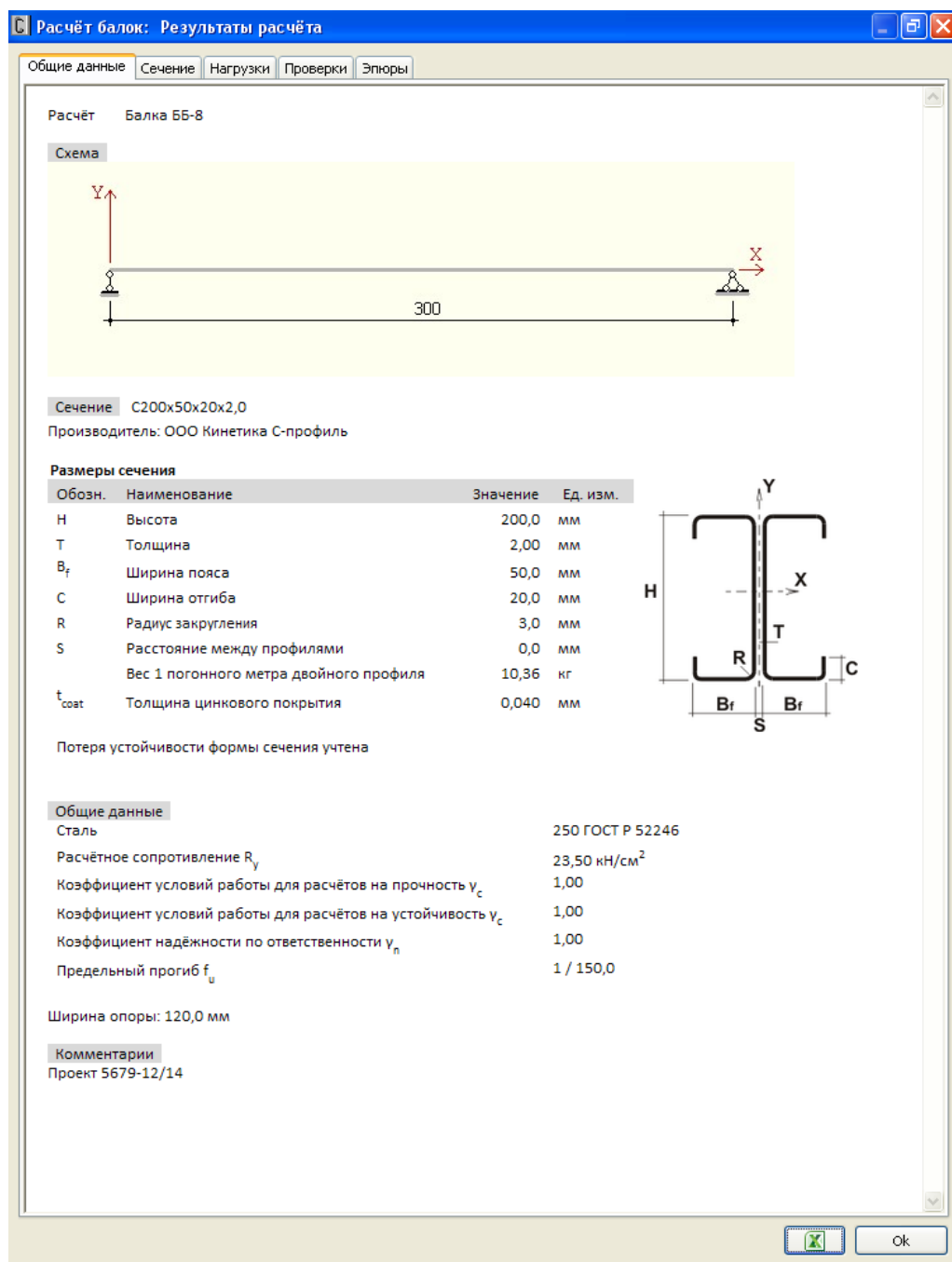


Рисунок 3.3.8 – Вкладка «Общие данные» окна Результаты расчёта

На рисунке 3.3.9 показано окно **Результаты расчёта** с активной вкладкой *Сечение*.

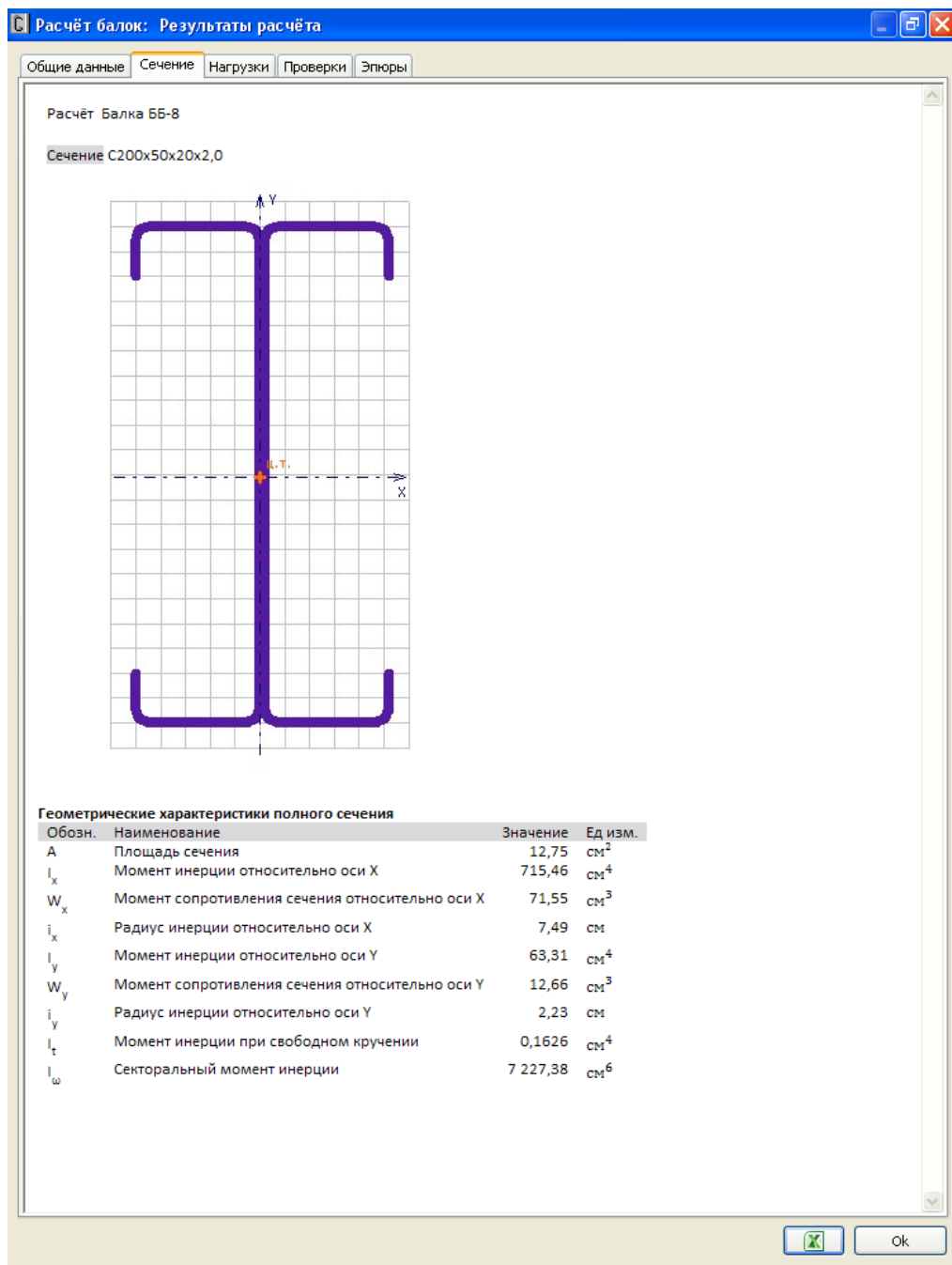


Рисунок 3.3.9 – Вкладка «Сечение» окна **Результатов расчёта**

На рисунке 3.3.10 показано начало вкладки *Нагрузки* окна **Результаты расчёта**.

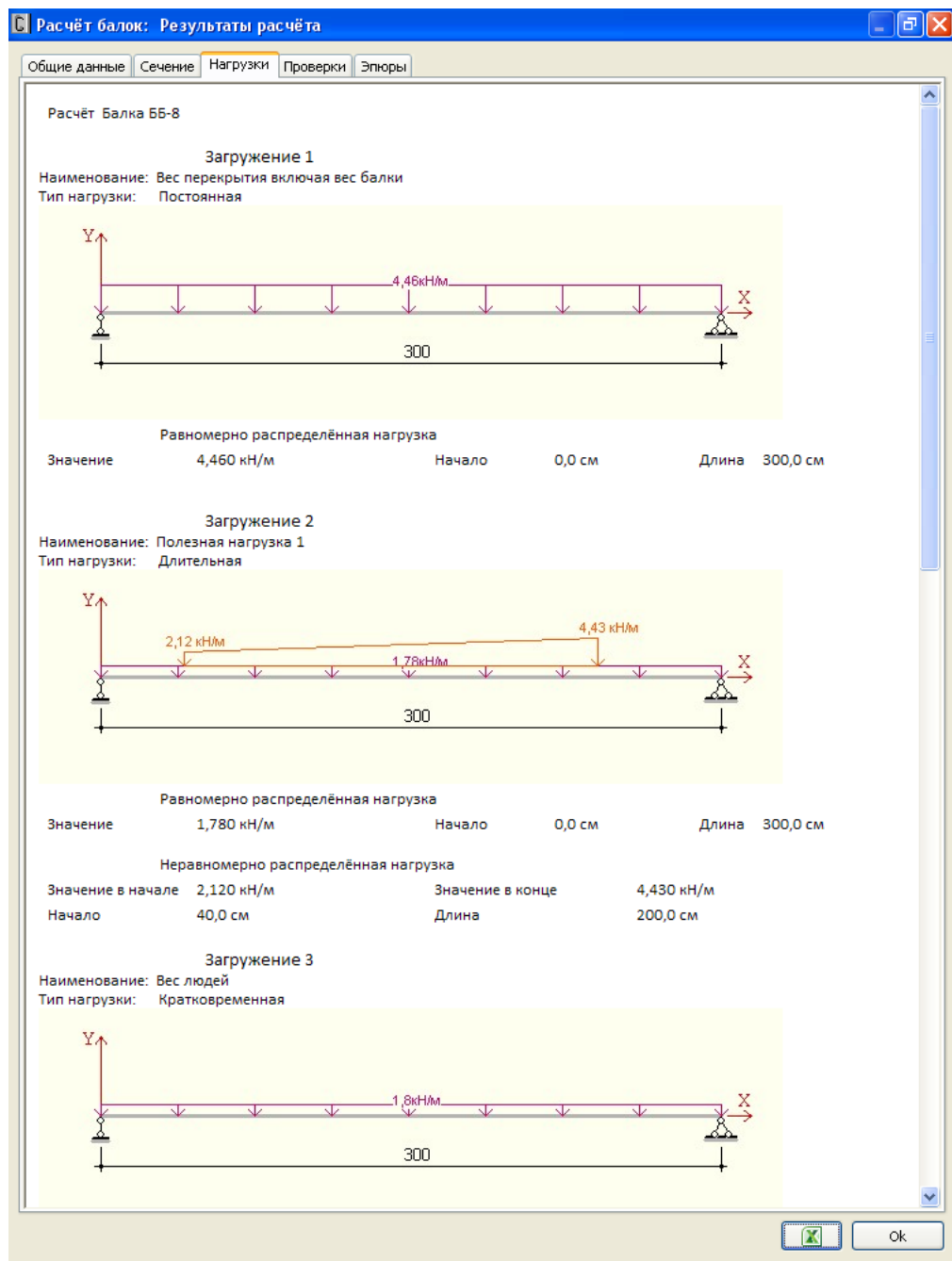


Рисунок 3.3.10 – Начало вкладки «Нагрузки» окна **Результатов расчёта**

На рисунке 3.3.11 показано окончание вкладки *Нагрузки* окна **Результаты расчёта**.

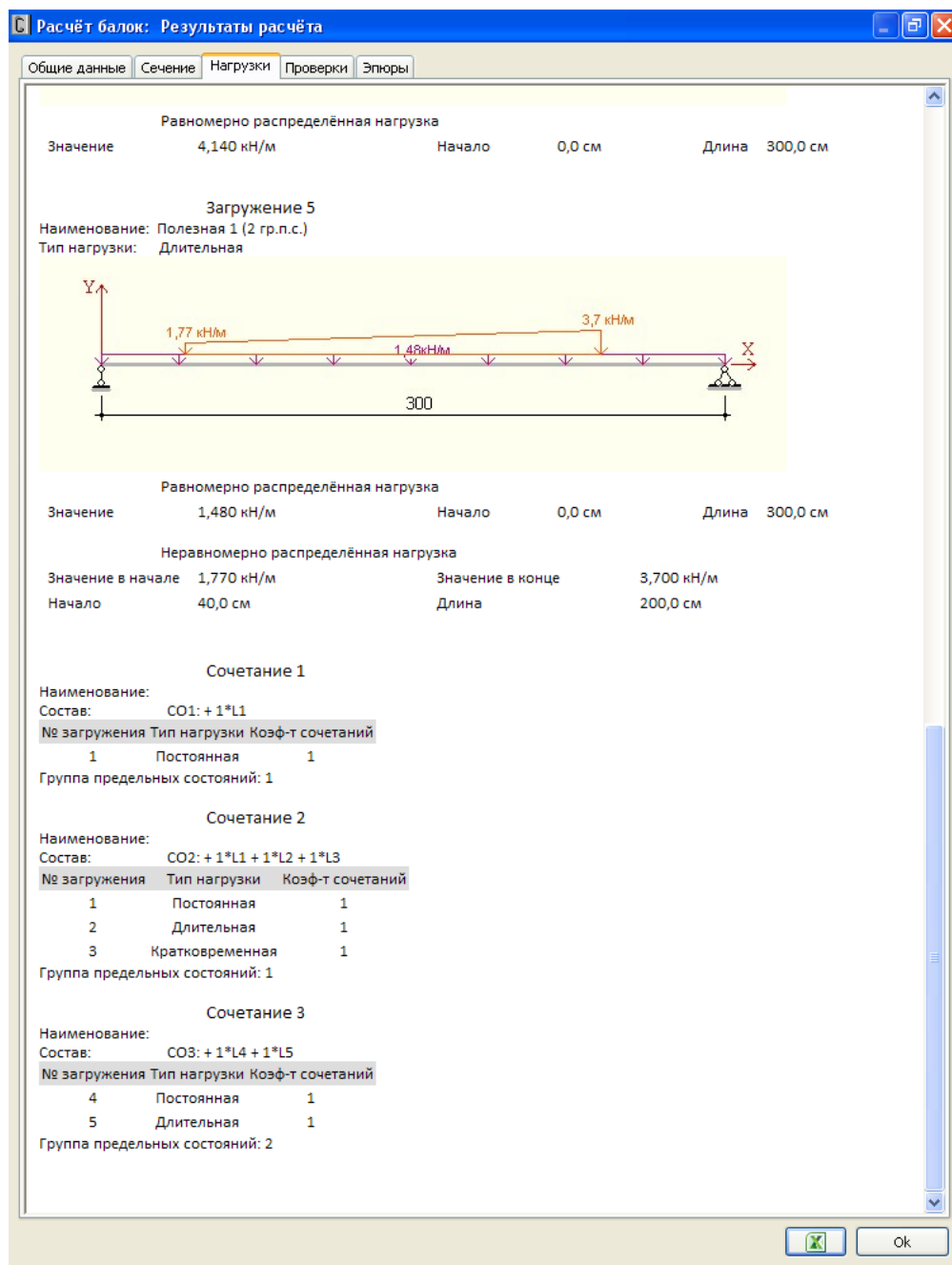


Рисунок 3.3.11 – Окончание вкладки «Нагрузки» окна **Результатов расчёта**

На рисунке 3.3.12 показана вкладка *Проверки* окна **Результаты расчёта** с активной вкладкой проверок для *Сочетания № 2*.

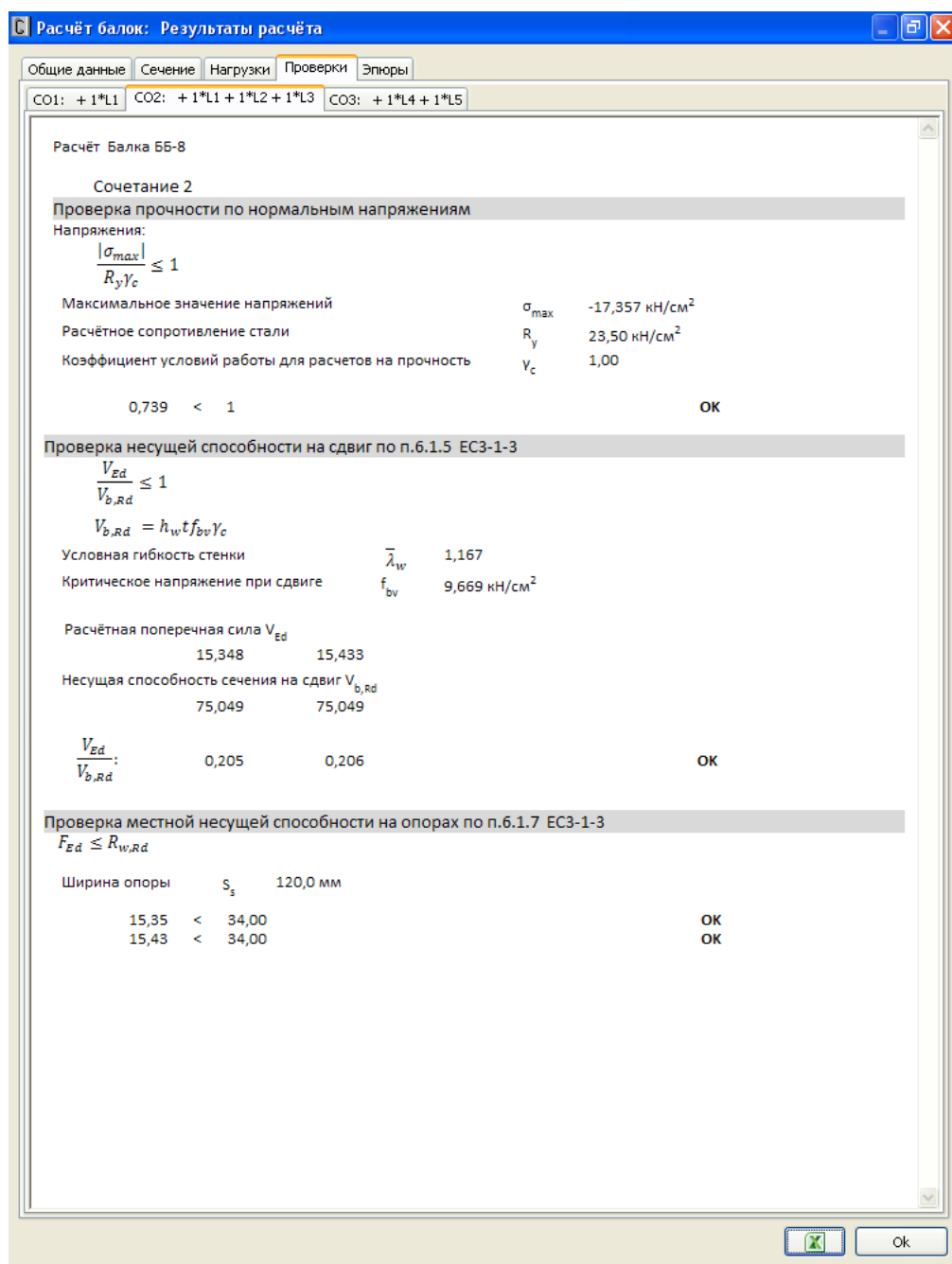


Рисунок 3.3.12 – Вкладка «Проверки» окна **Результатов расчёта**

Результаты проверки несущей способности на сдвиг, выполняемой на каждой опоре балки, приводятся в одной строке в соответствии с местом расположением опоры на балке.

Результаты проверки местной несущей способности на опорах приводятся построчно: в первой строке – для крайней левой опоры; во второй строке – для второй слева опоры (в случае однопролётной балки – для правой опоры), и т.д.

На рисунке 3.3.13 показана вкладка *Эпюры* окна **Результаты расчёта** с активной вкладкой эпюр для *Сочетания № 2*.

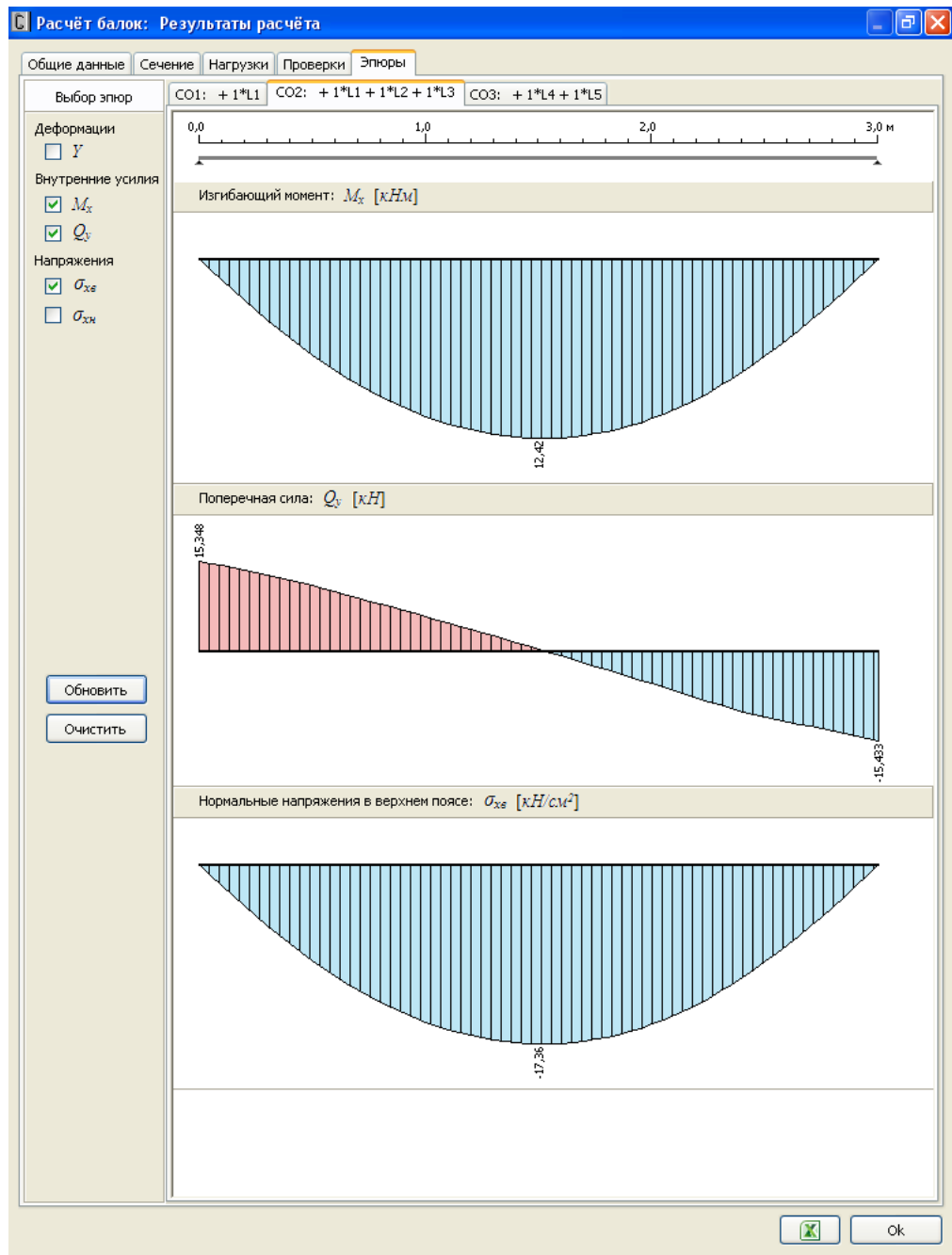



Рисунок 3.3.13 – Вкладка «Эпюры» окна **Результатов расчёта**

Данная вкладка предназначена для формирования списка эпюр, которые будут переданы в Excel для дальнейшей печати. В левой части окна необходимо выбрать те эпюры, которые должны быть переданы в Excel и нажать **Обновить**. Чтобы изменить состав эпюр, следует нажать **Очистить** и набрать новый состав.

В нижней части окна **Результаты расчёта** имеется кнопка , при нажатии которой данные, выводимые в окно **Результаты расчёта**, передаются в Excel и происходит его запуск. Структура книги Excel схожа со структурой окна **Результаты расчёта**. На рисунках 3.3.14 ... 3.3.16 приведены некоторые страницы результатов, так как они выглядят после распечатки из Excel.

	ДЕЛЬТА Инжиниринг Deltaing@mail.ru	CFSteel v.3.1 Пользователь	06.06.2014
	Расчёт балок		

Расчёт Балка ББ-8

Схема

Сечение C200x50x20x2,0
Производитель ООО Кинетика С-профиль

Размеры сечения

Обозн.	Наименование	Значение	Ед. изм.
H	Высота	200,0	мм
T	Толщина	2,00	мм
B _f	Ширина пояса	50,0	мм
C	Ширина отгиба	20,0	мм
R	Радиус закругления	3,0	мм
S	Расстояние между профилями	0,0	мм
	Вес 1 погонного метра двойного профиля	10,36	кг
t _{zinc}	Толщина цинкового покрытия	0,040	мм

Потеря устойчивости формы сечения учтена

Общие данные

Сталь 250 ГОСТ Р 52246

Расчётное сопротивление R_y	23,50	кН/см ²
Коэффициент условий работы для расчётов на прочность γ_c	1,00	
Коэффициент условий работы для расчётов на устойчивость γ_c	1,00	
Коэффициент надёжности по ответственности γ_n	1,00	
Предельный прогиб $f_{\text{пр}}$	1 / 150,0	
Ширина опоры	120,0	мм

Комментарии

Проект 5679-12/14

Рисунок 3.3.14 – Лист «Общие данные» книги Excel



ДЕЛЬТА
Инжиниринг
deltaing@mail.ru

CFSteel v.3.1

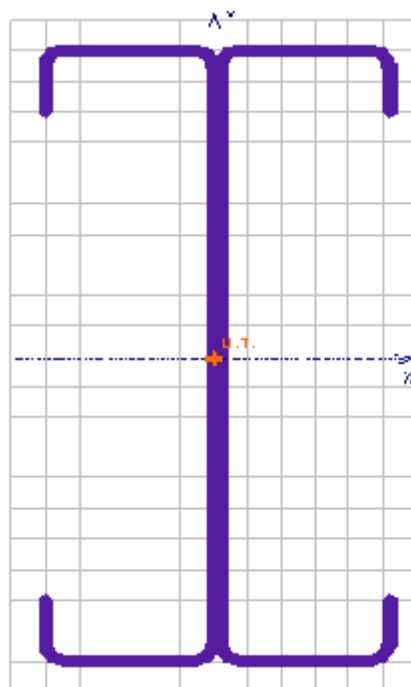
Пользователь

06.06.2014

Расчёт балок

Расчёт Балка ББ-8

Сечение C200x50x20x2,0



Геометрические характеристики полного сечения

Обозн.	Наименование	Значение	Ед. изм.
A	Площадь сечения	12,75	см ²
I_x	Момент инерции относительно оси X	715,46	см ⁴
W_x	Момент сопротивления сечения относительно оси X	71,55	см ³
i_x	Радиус инерции относительно оси X	7,49	см
I_y	Момент инерции относительно оси Y	63,31	см ⁴
W_y	Момент сопротивления сечения относительно оси Y	12,66	см ³
i_y	Радиус инерции относительно оси Y	2,23	см
I_z	Момент инерции при свободном кручении	0,1626	см ⁴
I_ω	Секторальный момент инерции	7227,38	см ⁶

Лист "Сечение" Страница 1 из 1

Рисунок 3.3.15 – Лист «Сечение» книги Excel

	ДЕЛЬТА Инжиниринг Deltaing@mail.ru	CFSteel v.3.1 Пользователь	06.06.2014
	Расчёт балок		
Расчёт Балка ББ-8			
Сочетание 2			
Проверка прочности по нормальным напряжениям			
Напряжения:			
$\frac{ \sigma_{max} }{R_y \gamma_c} \leq 1$			
Максимальное значение напряжений	σ_{max}	-17,357 кН/см ²	
Расчётное сопротивление стали	R_y	23,50 кН/см ²	
Коэффициент условий работы для расчетов на прочность	γ_c	1,00	
0,739 < 1			OK
Проверка несущей способности на сдвиг по п.6.1.5 EC3-1-3			
$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1$			
$V_{b,Rd} = h_w t f_{bv} \gamma_c$			
Условная гибкость стенки	$\bar{\lambda}_w$	1,167	
Критическое напряжение при сдвиге	f_{bv}	9,669 кН/см ²	
Расчётная поперечная сила V_{Ed}			
15,348	15,433		
Несущая способность сечения на сдвиг $V_{b,Rd}$			
75,049	75,049		
$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}}$	0,205	0,206	OK
Проверка местной несущей способности на опорах по п.6.1.7 EC3-1-3			
$F_{Ed} \leq R_{w,Rd}$			
Ширина опоры	S_s	120,0 мм	
15,35 < 34,00			OK
15,43 < 34,00			OK

Лист "Проверки CO2" Страница 1 из 1

Рисунок 3.3.16 – Лист «Проверки» для Сочетания №2 книги Excel

3.3.4.2. Просмотр Эпюр

Посмотреть эпюры изгибающего момента, поперечной силы, нормальных напряжений в крайних верхних и крайних нижних фибрах сечения, а также прогибов балки можно щёлкнув на кнопке *Показать эпюры* на панели инструментов. На рисунке 3.3.17 показан общий вид окна **Расчёт балок: Эпюры**.

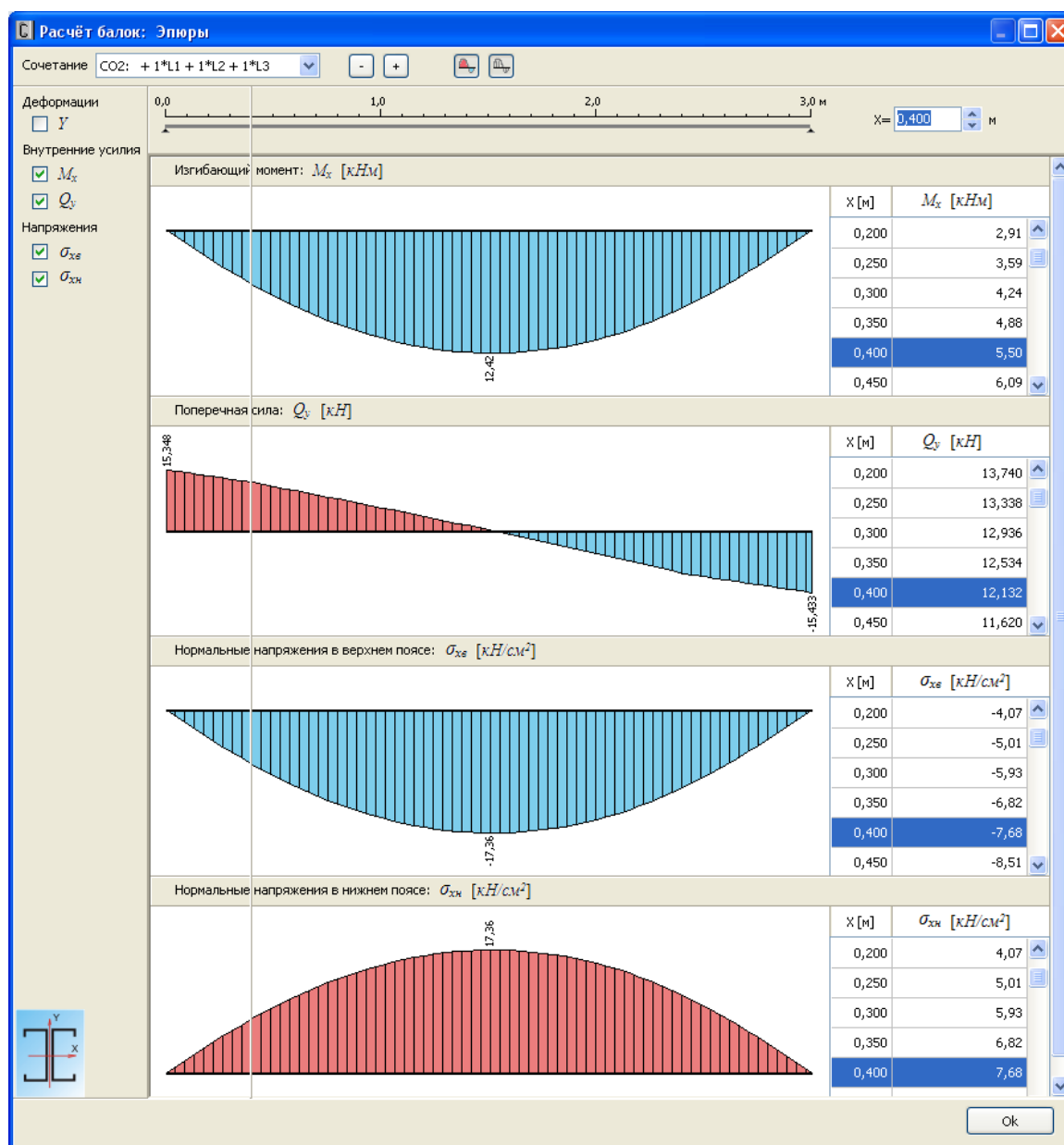




Рисунок 3.3.17 – Общий вид окна «Расчёт балок: Эпюры»

Кроме эпюр в данном окне в табличной форме показываются численные значения выбранных для просмотра величин (изгибающий момент, поперечная сила, напряжения, прогибы). Значения момента, поперечной силы и напряжений выводятся с учётом разбиения балки на конечные элементы (п.3.2) в узлах и в середине каждого КЭ. Значения прогибов показываются в узлах разбиения балки на КЭ.

На эпюрах указаны максимальные положительные и отрицательные значения параметров в пределах пролёта. Посмотреть значения, отличающиеся от максимальных можно разными способами: кликнуть левой кнопкой мыши на линейке сверху окна в ту точку, где необходимо посмотреть значение параметра, либо ввести координату точки в окно ввода $x=$ м. Введённые таким образом координаты «притягиваются» к узлам разбиения балки на КЭ.

Номер *Сочетания* выбирается из выпадающего списка. Выбрать эпюры для показа можно на панели слева.

Кнопками  и  можно изменять масштаб эпюр.

Кнопки  и  включают/отключают заливку эпюр цветом и штриховку соответственно. Этими же кнопками можно менять вид эпюр, передаваемых в Excel, а следовательно, и выводимых на печать.

3.4. Расчёт прогонов покрытия

3.4.1. Ввод данных

Для расчёта прогонов покрытия, необходимо в главном меню программы выбрать пункт **Конструкция**, затем **Прогон**. Появляется окно расчёта прогонов покрытия.

Вкладка **Общие данные** окна аналогична соответствующей для расчёта балок (п.3.3.1).

На вкладке **Расчётная схема** (рисунок 3.4.1) вводятся следующие данные:

Схема. Для расчёта прогонов покрытия реализованы расчётные схемы, приведённые на рисунке 3.4.2. Расчётные схемы с перехлёстами реализованы для прогонов с Z-образным сечением.

Длины пролётов в см (в двух- и трёхпролётных прогонах пролёты должны быть одинаковые). Значения длин пролётов должны лежать в интервале от 2 до 20 м.

Длина консоли в см. Значение должно находиться в интервале от 30 см до 1/5 длины пролёта.

Закрепление из плоскости. На данной панели вводится количество закреплений нижнего свободного пояса из плоскости прогона. Для однопролётных прогонов предусмотрено до трёх закреплений включительно, которые автоматически располагаются регулярно. Для двух- и трёхпролётных прогонов предусмотрено максимум одно закрепление, которое располагается по середине каждого пролёта. Значение количества закреплений, равное нулю, означает отсутствие закреплений нижнего пояса прогона.

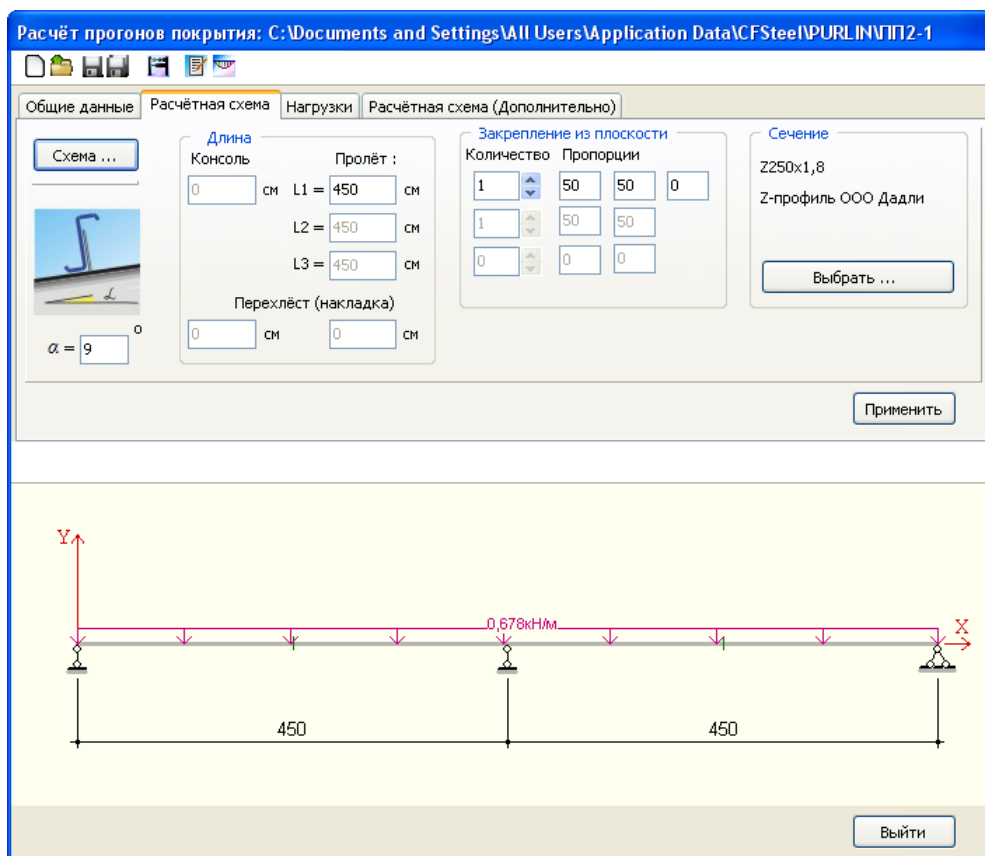
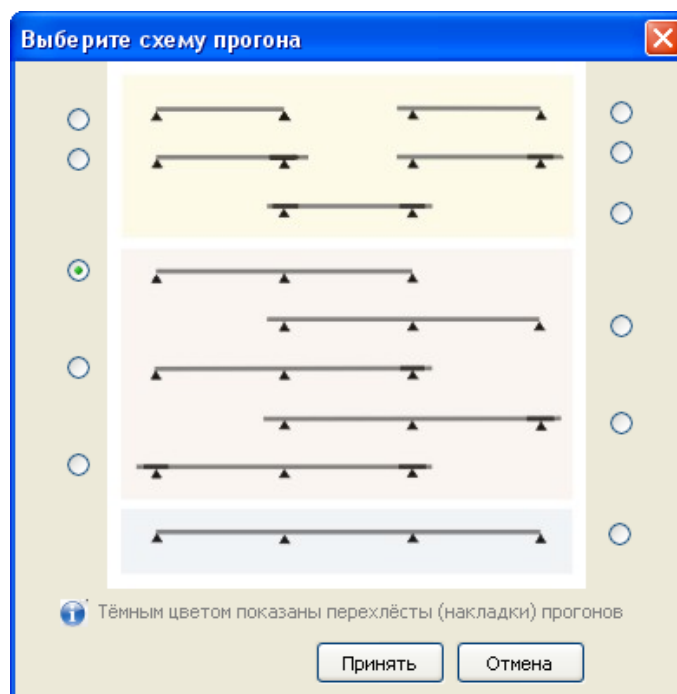
Рисунок 3.4.1 – Окно расчёта прогонов покрытия (вкладка **Расчётная схема**)

Рисунок 3.4.2 – Расчётные схемы прогонов покрытия

Окна **Пропорции** не являются редактируемыми и служат только для информации.

Сечение. Для прогонов покрытия предусмотрено три типа сечений: Z-, С- и Сигма-образный профили. Указания по вводу сечения см. п. 1.3. Особенностью Z-образных профилей является возможность наличия поясов разной ширины. В предустановливаемых

базах считается, что более широким является верхний пояс. Для того, чтобы пользователь имел возможность варьировать положением поясов (широкий пояс вверху или широкий пояс внизу) в окне ввода сечений предусмотрена панель **Размеры поясов**, на которой выбрав вариант **Наоборот**, можно поменять положение поясов на противоположное.

Важно: Выход из вкладки **Расчётная схема** осуществляется только по кнопке **Применить**.

На вкладке **Нагрузки** (рисунок 3.4.3) вводятся:

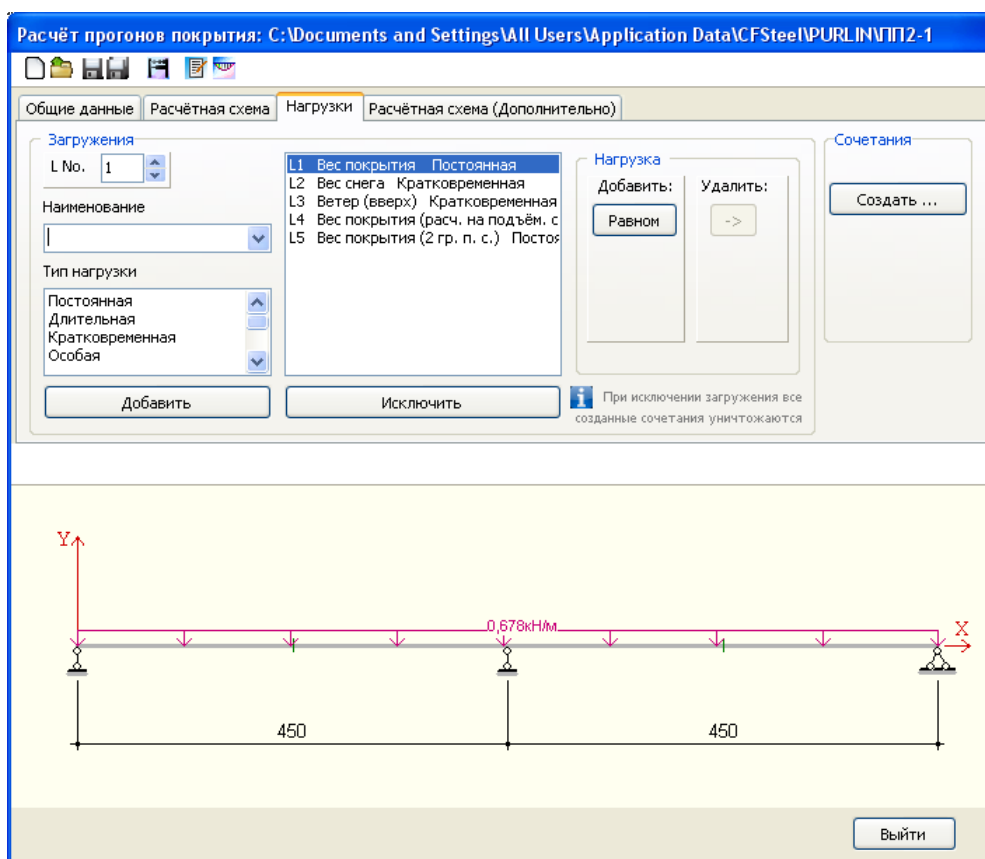


Рисунок 3.4.3 – Вкладка «Нагрузки»

Загрузки: Порядковый номер *Загрузки*; *Наименование Загрузки* и *Тип нагрузки Загрузки*. Номера *Загрузок* должны следовать по порядку без пропуска номеров. Контроль за данным требованием возлагается на пользователя. Максимальное количество *Загрузок* – 11. Наименование *Загрузки* выбирается из уже имеющихся в выпадающем списке, или вводится пользователем в строку ввода по своему усмотрению. Тип нагрузки для каждого *Загрузки* выбирается из списка: Постоянная, Длительная, Кратковременная или Особая в соответствии с [21]. После ввода всех трёх перечисленных параметров *Загрузки* необходимо нажать **Добавить** и данное *Загрузка* отобразится в общем списке *Загрузок*. Перемещаясь по списку, можно визуально проконтролировать нагрузки для каждого *Загрузки*. Также имеется возможность **Исключить** какое-либо *Загрузка* из списка.

Нагрузка. В каждом *Загрузке* может быть одна *равномерно-распределённая* нагрузка. Ввод значений нагрузок производится по нажатию соответствующей кнопки **Добавить**, после чего появляется окно ввода значений нагрузок (рисунок 3.4.4).

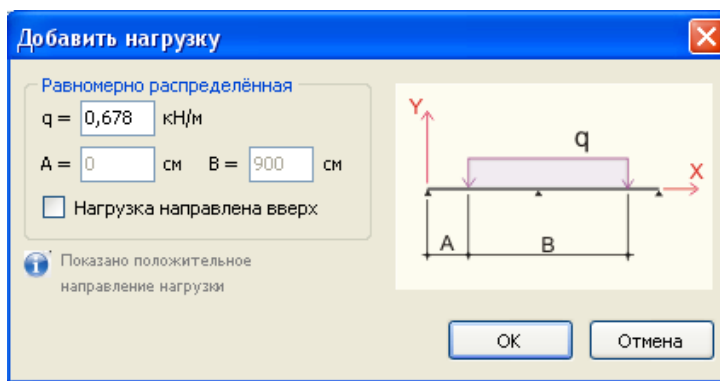


Рисунок 3.4.4 – Диалоговое окно «Добавить нагрузку»

Значение равномерно распределённой нагрузки вводится в поле ввода $q =$ в кН/м.

Важно: Вводится значение вертикальной нагрузки

В программе предусмотрено приложение равномерно распределённой нагрузки по всей длине прогона. Поэтому поля ввода $A =$ и $B =$ являются неактивными. Если нагрузка направлена вверх (например, подъёмная ветровая нагрузка), необходимо установить метку в поле **Нагрузка направлена вверх**.

На вкладке **Нагрузки** имеется возможность **Удалить** нагрузку из текущего *Загружения*.

Расчёт прогонов покрытия производится на *Сочетания Загружений*. Максимальное количество *Сочетаний* - 11. Сочетания формируются пользователем самостоятельно. При этом необходимо помнить, что расчёты по первой и второй группам предельных состояний могут выполняться на разные *Сочетания Загружений*. Кроме того, значения нагрузок в *Загружениях*, из которых состоят *Сочетания* для первой и второй групп, как правило, различны. Поэтому при вводе *Загружений* целесообразно заранее предусмотреть отдельно *Загружения* для первой и второй групп предельных состояний. Кроме того, если планируется расчёт прогона на подъёмную нагрузку, рекомендуется предусмотреть *Загружение* с пониженной постоянной нагрузкой от веса кровли, а также *Загружение*, представляющее собой подъёмную ветровую нагрузку.

Формирование *Сочетаний* производится по кнопке *Сочетания Создать ...* на вкладке **Нагрузки**. После чего появляется окно **Сочетания загружений**, в котором уже имеется список сформированных *Загружений* (рисунок 3.4.5).

Сочетания загрузок

CO No. 5 Наименование сочетания

Загрузка

L1 Вес покрытия Постоянная
 L2 Вес снега Кратковременная
 L3 Ветер (вверх) Кратковременная
 L4 Вес покрытия (расч. на подъём. сост.)
 L5 Вес покрытия (2 гр. п. с.) Постоянная
 L6 Ветер в торец здания Кратковременная

Кэф-т сочетаний ψ_i : 1 ->

Набор

Очистить набор ОК

Сочетание

Состав

CO1: + 1*L1 + 1*L2
 CO2: + 1*L1 + 1*L2 + 0,9*L6
 CO3: + 1*L3 + 1*L4
 CO4: + 1*L5

Группа п.с.
 1 гр. 2 гр.

Очистить сочетания

Осевые силы, кН

CO No.	Консоль	Пролёт 1	Пролёт 2	Пролёт 3
1	0	0	0	0
2	0	0,648	0,141	0
3	0	0	0	0

Осевые силы являются сжимающими

Подъёмная нагрузка

Но. CO: 3

a : 0,5 bf

ОК Отмена

Рисунок 3.4.5 – Диалоговое окно формирования *Сочетаний Загрузок*

Номера *Сочетаний* должны следовать по порядку без пропусков. Выбирая из списка поочерёдно *Загрузку* и присваивая ему коэффициент сочетаний ψ_i , пользователь вначале формирует промежуточный набор будущего *Сочетания*. Здесь же *Сочетанию* может быть присвоено **Наименование** (необязательно). Убедившись в правильности набранного из *Загрузок* *Сочетания*, необходимо нажать кнопку **ОК**. После чего текущее *Сочетание* появится в общем списке сформированных *Сочетаний*. Если набор выполнен неправильно, имеется возможность его очистить по кнопке **Очистить набор**. Также имеется возможность удалить сформированные *Сочетания* по кнопке **Очистить сочетания** (удаляется весь список сформированных *Сочетаний*). Здесь же в окне **Сочетаний** необходимо отметить, какое сочетание относится к расчёту по первой группе предельных состояний, а какое к расчёту по второй группе (по прогибам).

При расчёте прогонов покрытия предусмотрена возможность учёта осевых сжимающих сил, возникающих, например, от ветра в торец здания. Для этого на панели **Осевые силы** (см. рисунок 3.4.5) необходимо для соответствующего *Сочетания* ввести ненулевые значения усилий (в кН) для каждого пролёта прогона. В дальнейшем эти усилия непосредственно участвуют в вычислении напряжений и расчёте устойчивости свободного нижнего пояса (п. 10.1.4.2 [3]).

Важно: Положительные значения осевых сил соответствуют сжимающим усилиям

На панели **Подъёмная нагрузка** вводится номер *Сочетания* с подъёмной ветровой нагрузкой. Если таких *Сочетаний* нет, в выпадающем списке выбирается ноль. В текущем

расчёте прогона может быть только одно *Сочетание* с подъёмной нагрузкой. В его составе должно быть два *Загружения*: собственный вес кровли (как минимум, вес прогона и вес профилированного настила) и подъёмная ветровая нагрузка. Подъёмная ветровая нагрузка должна быть больше веса кровли. Иначе при запуске программы на счёт будет выведено сообщение о невыполнении данного условия. При появлении такого сообщения пользователь должен либо откорректировать нагрузки, либо выбрать «0» в окне ввода номера подъёмной нагрузки отказавшись таким образом от наличия *Сочетания* с подъёмной нагрузкой. Здесь же вводится расстояние a от метиза крепления настила к прогону (п. 10.1.5.1 (4) [3]). Расстояние вводится в долях от ширины пояса прогона и может варьироваться в интервале $0 < a < 1$.

На рисунке 3.4.6 представлена вкладка **Расчётная схема (Дополнительно)**.

Рисунок 3.4.6 – Вкладка «Расчётная схема (Дополнительно)»

На панели **Коэффициент поворота C_{100}** , **Положение настила на прогоне** и **Параметры настила** вводятся данные, необходимые для вычисления жёсткости угловой связи $C_{D,A}$ (п. 10.1.5.2 [3]).

В соответствии с п. 10.1.5.2(8) при определении общей жёсткости угловой связи C_D жёсткость $C_{D,C}$ не учитывается.

По умолчанию значение $C_{D,A}$ в программе рассчитывается по методике, приведённой в п. 10.1.5.2(5) [3], и далее определяется C_D . Также предусмотрена возможность непосредственного ввода пользователем значения C_D , как это отмечается в п. 10.1.5.2(2) [3]. Для этого надо отметить поле **Ввести значение C_D** (рисунок 3.4.6) и далее ввести значение общей жёсткости угловой связи C_D в кН/м.

Также по умолчанию в программе принято, что сопряжение прогонов в местах перехлёста на опорах являются абсолютно жёсткими на поворот. Это показано на панели **Жёсткость перехлёстов** на рисунке 3.4.6. Однако имеется возможность учёта конечной

упругой жёсткости перехлёстов на поворот в плоскости стенки прогона (п. 3.4.2). Для ввода необходимо отметить «Конечная жёсткость» и ввести её значение в кНм/рад .

3.4.2. Статический расчёт прогонов

Рассматриваются одно-, двух- и трёхпролётные прогоны с одинаковой величиной пролётов. В одно- и двухпролётных прогонах могут быть консоли с одной стороны (рисунок 3.4.7).

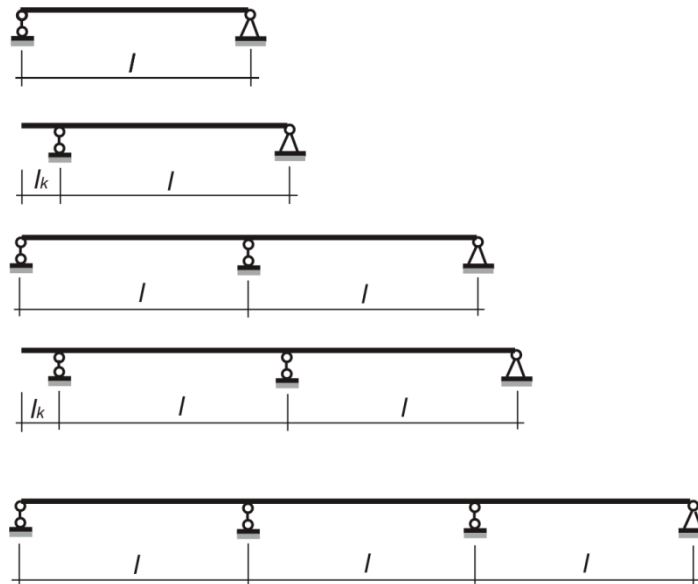


Рисунок 3.4.7 – Расчётные схемы одно-, двух- и трёхпролётных прогонов без перехлёстов

Определение деформаций и внутренних усилий в прогонах выполняется с помощью МКЭ (п.3.2).

В практике строительства нередко прогоны покрытия размещаются по длине здания в виде непрерывных неразрезных (квaziнеразрезных) цепочек, что обеспечивается перехлёстами прогонов или специальными накладками на опорах. В CFSteel предусмотрена возможность перехлёста на опорах прогонов Z-образного сечения (см. рисунок 3.4.2).

С тем, чтобы смоделировать такой характер работы в программе предусмотрены варианты расчётных схем одно- и двухпролётных прогонов с заделками на одном или обоих концах. Заделка может быть как абсолютно жёсткой на поворот, так и конечной жёсткости, т.е. упруго-податливой (рисунок 3.4.8). В первом случае может быть смоделирован бесконечно длинный неразрезной прогон. Во втором случае моделируется некоторая податливость перехлёстов на опорах.

Упругая жёсткость пружины, работающей на поворот, представляет собой изгибающий момент M , который соответствует повороту упругой заделки на угол $\theta = 1$.

$$r = \frac{M}{\theta}, \text{ [кНм / рад]}. \quad (3.4.1)$$

Введённое пользователем значение жёсткости учитывается в модуле расчёта МКЭ программы.

В любом случае считается, что соседние прогоны имеют одинаковые параметры. В местах перехлёстов учитывается двойная жёсткость прогона.

С одной стороны, данный подход позволяет смоделировать большинство схем прогонов, применяемых на практике, с другой стороны, не абсолютно точно представляет истинное распределение перемещений, моментов и поперечных сил в реальном неразрезном прогоне с перехлёстами.

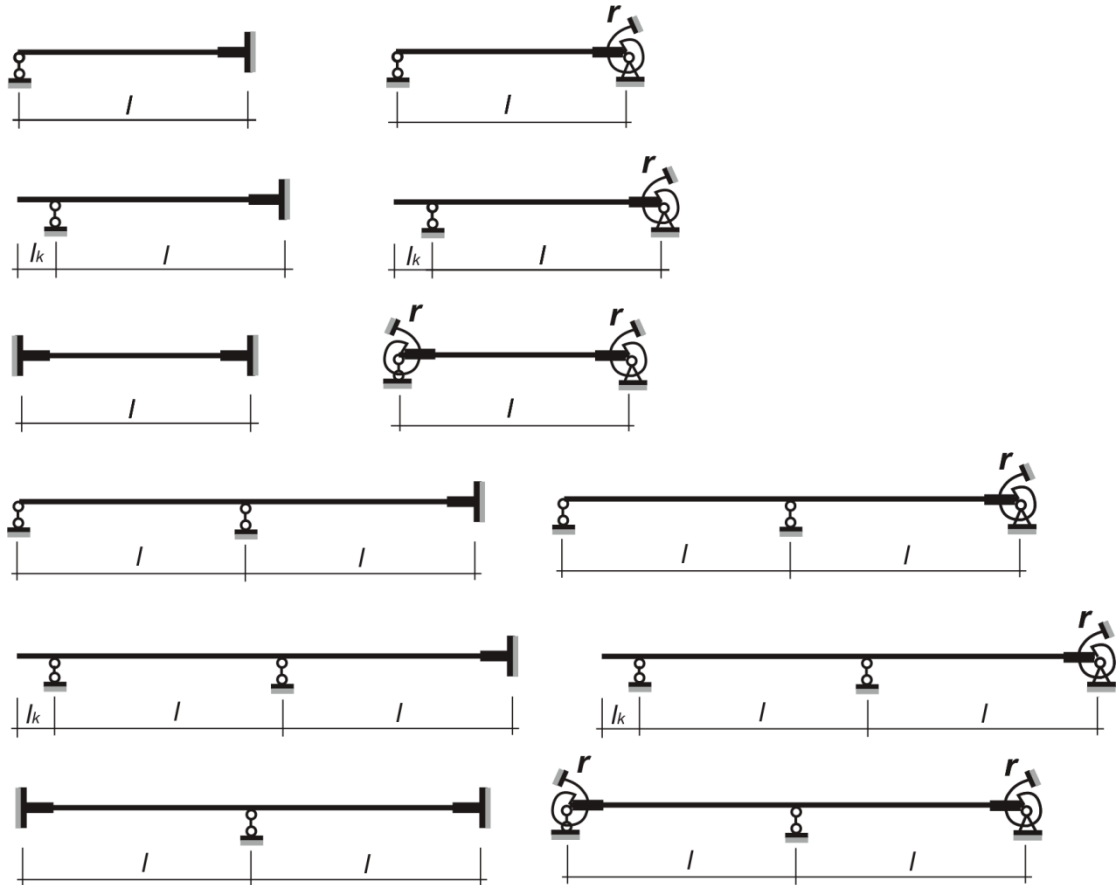


Рисунок 3.4.8 - Расчётные схемы прогонов с заделками (слева)
и упруго-податливыми на поворот связями (справа)

На рисунке 3.4.9 приведён пример расчёта, позволяющий оценить погрешность такого подхода. Два двухпролётных прогона за счёт перехлёста образуют четырёхпролётный прогон. Считаем, что перехлёст абсолютно жёсткий на поворот. Длина перехлёста принята $0,1l$, что довольно часто встречается в практических решениях. Выполнено сравнение результатов по четырёхпролётной схеме (расчёты проводились по [25]) и результатов по двухпролётной схеме с заделкой (CFSteel).

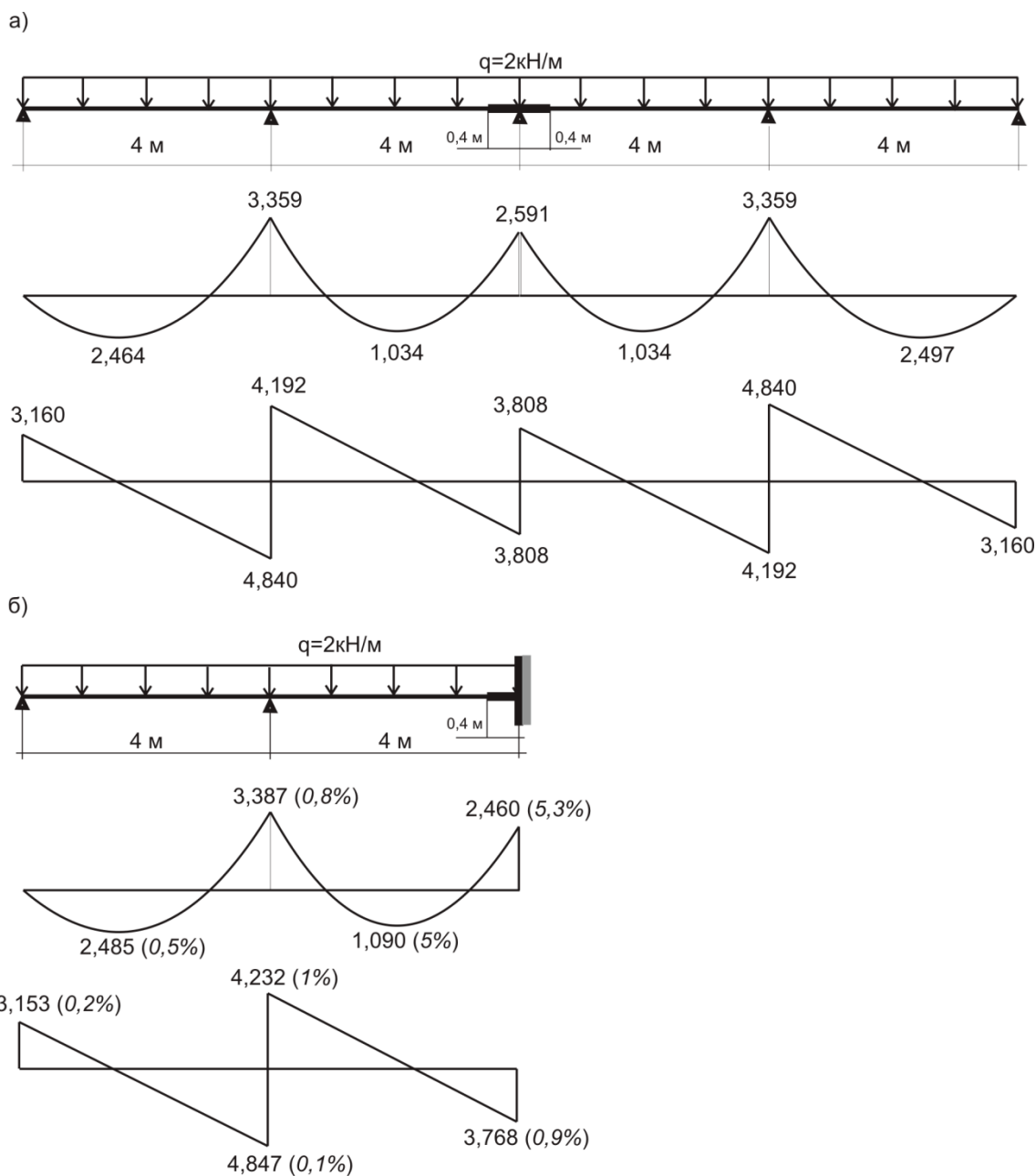


Рисунок 3.4.9 – Замена четырёхпролётного неразрезного прогона с перехлёстом на средней опоре двухпролётным с заделкой:

- а) – четырёхпролётный прогон (усилия вычислены методом КЭ по [25]),
 б) – соответствующий двухпролётный прогон (CFSteel)

На рисунке 3.4.10 приведены результаты тестового расчёта по верификации программы CFSteel при использовании опоры с упругой конечной жёсткостью на поворот. Сравнение выполнено с результатами аналогичных расчётов по [25].

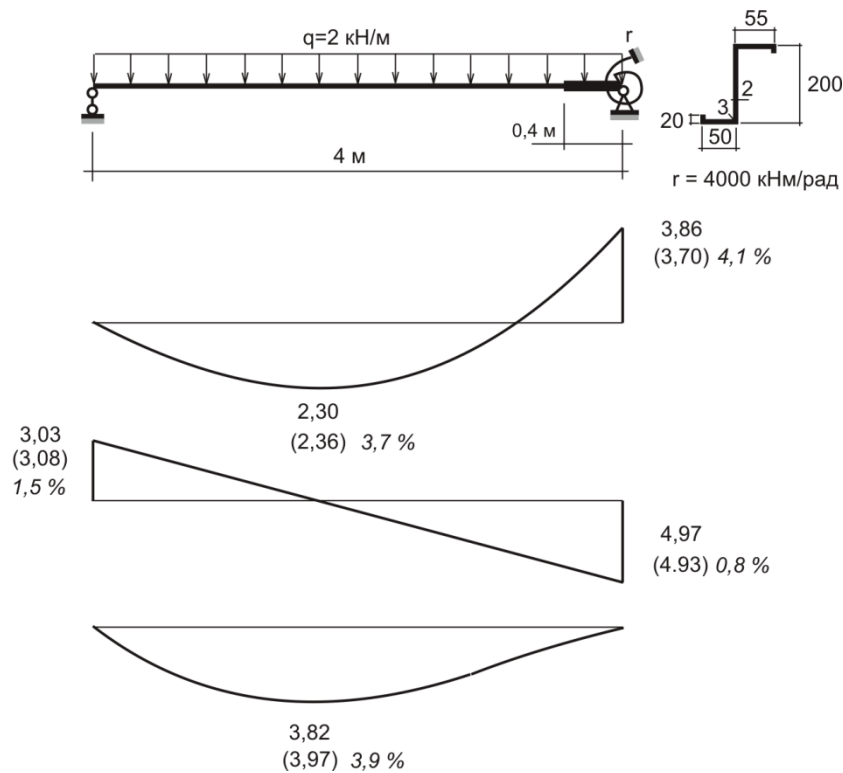


Рисунок 3.4.10 – Сопоставление результатов расчёта однопролётного прогона с опорой с упругой конечной жёсткостью на поворот (верхний результат по [25]; результат в скобках по CFSteel)

3.4.3. Конструктивный расчёт прогонов

Расчёт прогонов выполняется по ЕС3-1-3 [3] (Раздел 10). Учитывается гравитационная нагрузка и возможность возникновения подъёмной нагрузки от ветра.

Считается, что в уровне верхнего пояса прогон раскреплён из плоскости профилированным настилом, прикрепленным к прогону должным образом. Также полагается, что опорные крепления прогонов обеспечивают отсутствие на опоре кручения и бокового смещения прогона, а также смятие и потерю устойчивости стенки на опорах. Скатная составляющая нагрузки воспринимается жёстким диском настила и передаётся через опоры прогонов на стропильные конструкции [3].

Работа прогона в соответствии с [3] моделируется как показано на рисунке 3.4.11. Частичное закрепление прогона от поворота, создаваемое соединением его с настилом моделируется угловой упругой связью жёсткостью C_D (рисунок 3.4.12).

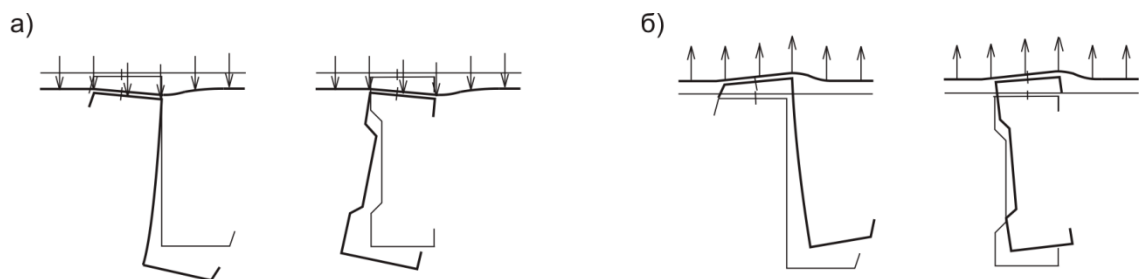


Рисунок 3.4.11 – Моделирование работы прогонов:

а) - при гравитационной нагрузке; б) - при подъёмной нагрузке

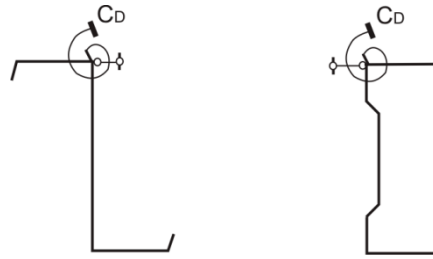


Рисунок 3.4.12 – Модель прогона, раскреплённого из плоскости настилом, с угловой связью C_D , создаваемой настилом

Напряжения в нижнем поясе вычисляются как сумма напряжений от изгиба прогона в плоскости стенки, и изгиба пояса из плоскости. Последние возникают как результат кручения прогона (в том числе учитываются напряжения от деформации поперечного сечения) (рисунок 3.4.13). В соответствии с п.10.1.2 [3] нижний пояс при изгибе из плоскости прогона рассматривается как балка, подверженная действию боковой распределённой нагрузки $q_{h,Ed}$. Величина бокового перемещения нижнего пояса зависит в том числе от жёсткости C_D . Угловая связь заменяется эквивалентной боковой линейной упругой связью жёсткостью K . При определении K учитывается деформация сечения. Нижний пояс представляется как сжатый стержень, подверженный действию боковой распределённой нагрузки $q_{h,Ed}$ и неравномерно распределённой осевой нагрузки с распределённой боковой упругой опорой жёсткостью K (рисунок 3.4.14).

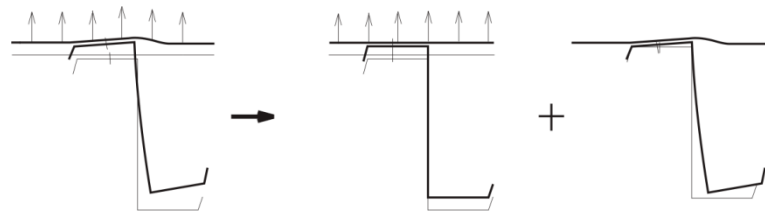


Рисунок 3.4.13 – Полная деформация, разделённая на две части: изгиб в плоскости и кручение с деформацией

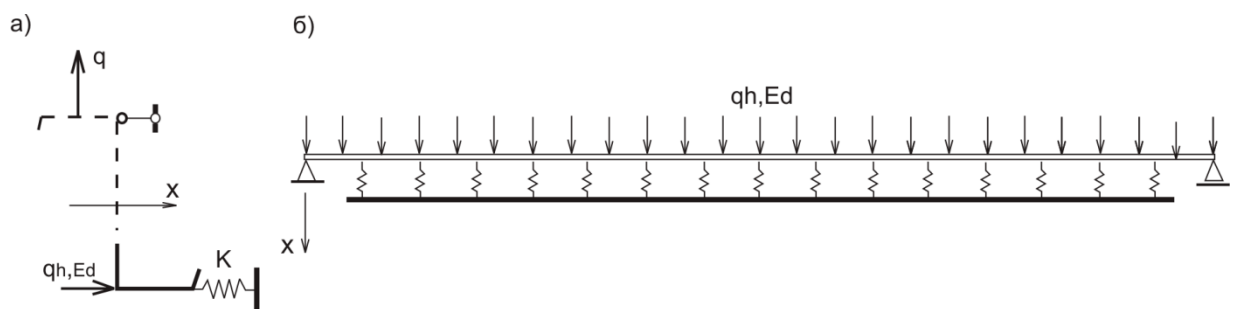


Рисунок 3.4.14 – Расчётная схема нижнего пояса при изгибе из плоскости прогона:

- а) – замена угловой связи жёсткостью C_D на боковую линейную связь с эквивалентной по действию жёсткостью K ;
- б) – нижний пояс прогона, как балка на упругом основании (для однопролётного прогона при подъёмной нагрузке; возможные сжимающие усилия условно не показаны)

Расчёт производится по двум группам предельных состояний: по несущей способности (I группа п. с.) и по эксплуатационной пригодности (II группа п. с.).

3.4.3.1. Расчёт по несущей способности

При расчёте по несущей способности выполняются проверки введённого пользователем сечения прогона на прочность по нормальным напряжениям, устойчивость свободного нижнего пояса из плоскости прогона а также несущая способность сечения на опорах.

3.4.3.1.1. Проверка прочности поперечного сечения по нормальным напряжениям

Напряжения в верхнем поясе прогонов в общем случае вычисляются на совместное действие поперечной нагрузки в плоскости стенки и осевой силы по формулам (рисунки 3.4.15, 3.4.16):

для точек 1 и 2

$$\sigma_{1,2} = -\frac{M_x}{W_{x12eff}} - \frac{N}{A_{eff}}, \quad (3.4.2, а)$$

для точки 0 (только Z-образное сечение)

$$\sigma_0 = -\frac{M_x}{W_{x0eff}} - \frac{N}{A_{eff}}, \quad (3.4.2, б)$$

где M_x – изгибающий момент в плоскости стенки прогона (определяется от нагрузки q , действующей параллельно стенке, как указано в п. 3.4.2); W_{x12eff} и W_{x0eff} – редуцированные (или полные) моменты сопротивления сечения для соответствующих точек (в местах перехлёста Z-образных прогонов учитывается двойной момент сопротивления сечения (полного или эффективного); N – осевая сжимающая сила в соответствующем пролёте прогона (вводится пользователем (см. п. 3.4.1), может быть различна в зависимости от пролёта, кН; A_{eff} – редуцированная (или полная) площадь поперечного сечения (в местах перехлёста учитывается двойная площадь сечения (полного или эффективного).

Напряжения в нижнем поясе прогонов в общем случае вычисляются на совместное действие поперечной нагрузки q , осевой силы N с учётом бокового изгиба пояса от нагрузки $q_{h,Ed}$ (п. 3.4.3) в зависимости от места расположения рассматриваемого КЭ по формулам (рисунки 3.4.15, 3.4.16):

для точки 3

$$\sigma_3 = \pm \frac{M_x}{W_{x3eff}} - \frac{N}{A_{eff}} \pm \frac{M_{fy,Ed}}{W_{f3y}}, \quad (3.4.3, а)$$

для точки 4

$$\sigma_4 = \frac{M_x}{W_{x4eff}} - \frac{N}{A_{eff}} + \frac{M_{fy,Ed}}{W_{f4y}}, \quad (3.4.3, б)$$

для точки 5 (только Z-образное сечение)

$$\sigma_5 = \frac{M_x}{W_{x5eff}} - \frac{N}{A_{eff}} + \frac{M_{fy,Ed}}{W_{f5y}}, \quad (3.4.3, в)$$

где W_{x3eff} , W_{x4eff} и W_{x5eff} – редуцированные (или полные) моменты сопротивления сечения для соответствующих точек (в местах перехлёста Z-образных прогонов учитывается двойной момент сопротивления сечения (полного или эффективного); M_{fy} – изгибающий момент в нижнем поясе от боковой нагрузки $q_{h,Ed}$; W_{f3y} , W_{f4y} и W_{f5y} – моменты сопротивления сечения полного нижнего пояса с примыкающей частью стенки относительно его собственной центральной оси, параллельной плоскости стенки прогона (для Z- и С-образного сечения высота примыкающей части стенки, учитываемой при вычислении W_{fy} , равна 1/5 её высоты, для Сигма-образного сечения – 1/6; в местах перехлёста Z-образных прогонов учитывается суммарный момент сопротивления сечения узкого и широкого поясов).

Правило знаков: Положительное направление боковой нагрузки $q_{h,Ed}$ показано на рисунке 3.4.15. Изгибающий момент $M_{fy,Ed}$ положителен, если растягивает часть пояса, примыкающую к стенке.

Боковая нагрузка $q_{h,Ed}$ на нижний пояс принимается равной (п. 10.1.4.1 [3])

$$q_{h,Ed} = k_h q. \quad (3.4.4)$$

Для Z-образного сечения прогона при гравитационной нагрузке (рисунок 3.4.17, а) коэффициент k_h определяется:

- для симметричного сечения (рисунок 3.4.18, а)

$$k_h = \frac{h t(b^2 + 2 c b - 2 \frac{c^2 b}{h})}{4 I_x}, \quad (3.4.5, a)$$

- для несимметричного сечения (рисунок 3.4.18, б)

$$k_h = \frac{I_{xy}}{I_x} \cdot \frac{g_s}{h}. \quad (3.4.5, b)$$

Для Z-образного сечения при подъёмной нагрузке (рисунок 3.4.17, б) коэффициент k_h определяется:

- для симметричного сечения (рисунок 3.4.18, а)

$$k_h = \frac{h t(b^2 + 2 c b - 2 \frac{c^2 b}{h})}{4 I_x} - \frac{a}{h}, \quad (3.4.6, a)$$

- для несимметричного сечения (рисунок 3.4.18, б)

$$k_h = \frac{I_{xy}}{I_x} \cdot \frac{g_s}{h} - \frac{a}{h}. \quad (3.4.6, b)$$

Для С- и Сигма-образного сечения прогона при гравитационной нагрузке коэффициент k_h определяется:

$$k_h = \frac{I_{xy}}{I_x} \cdot \frac{g_s}{h} + \frac{e}{h}, \quad (3.4.7)$$

при действии подъёмной нагрузки

$$k_h = \frac{I_{xy}}{I_x} \cdot \frac{g_s}{h} - \frac{f}{h}. \quad (3.4.8)$$

Расчётный изгибающий момент из плоскости прогона $M_{fy,Ed}$, действующий в поясе, определяется по формуле (п. 10.1.4.1(5) [3])

$$M_{fy,Ed} = k_R M_{ofy}. \quad (3.4.9)$$

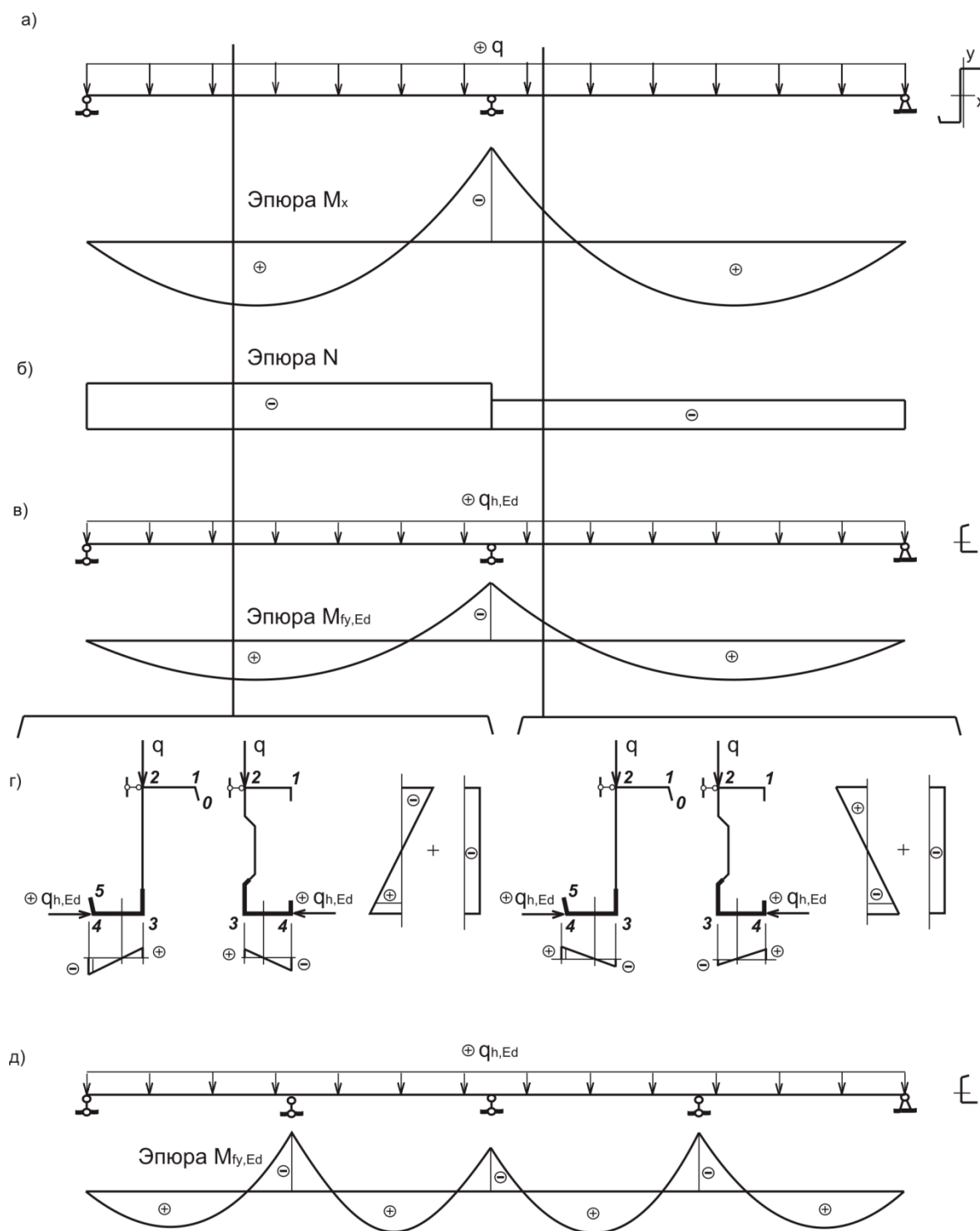


Рисунок 3.4.15 – Вычисление напряжений при гравитационной нагрузке:

- а) – загрузка вертикальной нагрузкой и эпюра моментов M_x ; б) – эпюра осевых сил N ;
 в) – загрузка нижнего пояса боковой нагрузкой и эпюра моментов $M_{fy,Ed}$ в поясе;
 г) – напряжения в сечениях прогона Z- и Сигма-образного сечения; д) – расчётная схема, загрузка и эпюра изгибающих моментов $M_{fy,Ed}$ в нижнем поясе при его боковом закреплении в середине каждого пролёта

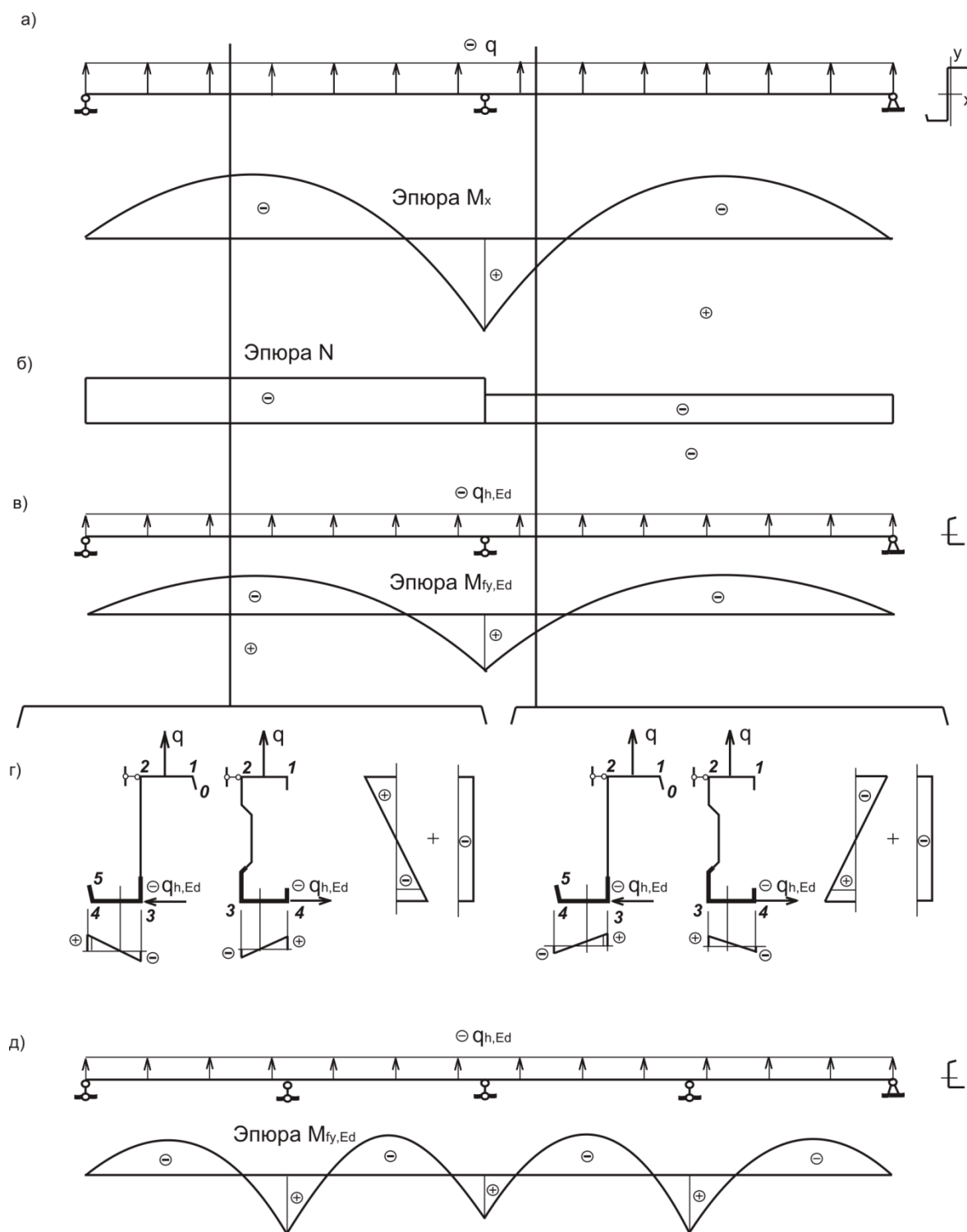


Рисунок 3.4.16 – Вычисление напряжений при подъёмной нагрузке:

- а) – загрузка вертикальной нагрузкой и эпюра моментов M_x ; б) – эпюра осевых сил N ;
 в) – загрузка нижнего пояса боковой нагрузкой и эпюра моментов $M_{fy,Ed}$ в поясе;
 г) – напряжения в сечениях прогона Z- и Сигма-образного сечения; д) – расчётная схема, загрузка и эпюра изгибающих моментов $M_{fy,Ed}$ в нижнем поясе при его боковом закреплении в середине каждого пролёта

M_{ofy} – изгибающий момент в нижнем поясе из плоскости прогона. Определяется по методике п. 3.2 с учётом дополнительных шарнирно-подвижных опор в местах закрепления нижнего пояса из плоскости прогона. Поперечным сечением балки при его определении является полное сечение пояса с примыкающей частью стенки. Изгиб происходит относительно оси пояса, параллельной плоскости стенки прогона, от боковой нагрузки $q_{h,Ed}$ без учёта упругой опоры K .

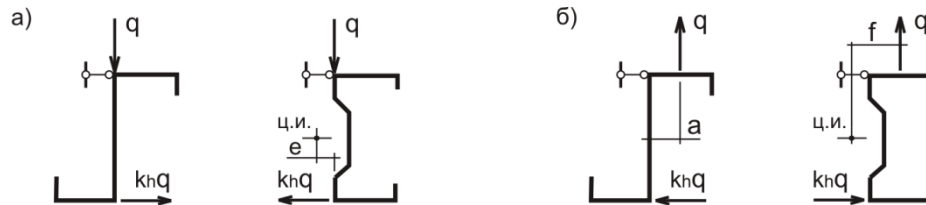


Рисунок 3.4.17 – Загружение прогонов:

а) – гравитационной нагрузкой; б) – подъёмной нагрузкой

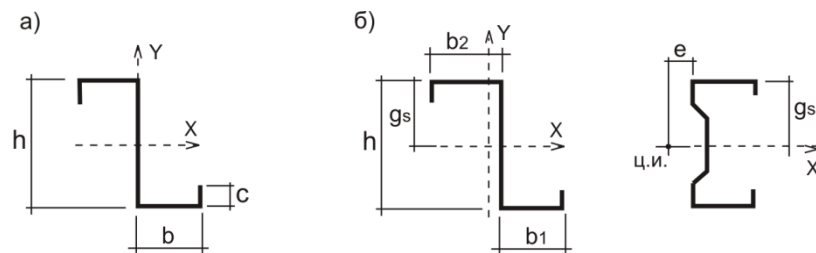


Рисунок 3.4.18 – Размеры сечений прогонов:

а) – симметричное Z-образное сечение;

б) – несимметричное Z- С- и Сигма-образные сечения

Поправочный коэффициент k_R , учитывающий действие упругой опоры K , для характерных точек прогона определяется по таблице 10.1 [3]. Значение коэффициента R при этом определяется по формуле (п. 10.1.4.1(7) [3])

$$R = \frac{K L_a^4}{\pi^2 E I_{fy}}, \quad (3.4.10)$$

где L_a – расстояние между раскреплениями нижнего пояса из плоскости прогона; I_{fy} – момент инерции поперечного сечения пояса относительно центральной оси, параллельной плоскости стенки прогона.

Промежуточные значения k_R (для КЭ, расположенных между характерными точками, указанными в таблице 10.1 [3]) определяются путём линейной интерполяции.

В соответствии с п.10.1.5.1[3] упругая жёсткость боковой связи K определяется по формуле

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d + a)}{Et^3} + \frac{h^2}{C_D}, \quad (3.4.11)$$

где h_d – развёрнутая высота стенки сечения; a – расстояние от плоскости стенки сечения до метиза, прикрепляющего профилированный настил к прогону. Значение a вводится

пользователем и может принимать любое значение в пределах ширины пояса. По умолчанию принято крепление в середине ширины пояса.

Общая жёсткость угловой связи C_D определяется в соответствии с п.10.1.5.3 [3] с учётом п.10.1.5.3(8)

$$C_D = \frac{1}{1/C_{D,A}}, \quad (3.4.12)$$

где C_{DA} – жёсткость угловой связи, создаваемая соединением между настилом и прогоном. Определяется в предположении, что крепление настила к прогону располагается в середине ширины полки прогона, по формуле (10.17 [3])

$$C_{D,A} = C_{100} k_{ba} k_t k_{bR} k_A k_{bT}, \quad (3.4.13)$$

где C_{100} – коэффициент поворота, определяемый по таблице 10.3 [3] полагая, что прогон и профилированный настил непосредственно соприкасаются друг с другом; k_{ba} , k_t , k_{bR} , k_A , k_{bT} – коэффициенты, определяемые по п. 10.1.5.2(5) [3].

Кроме вычисления значения C_{DA} пользователю предоставляется возможность непосредственно ввести его значение в программу (п. 3.4.1).

Значения напряжений вычисляются в трёх точках (начале, середине и конце) каждого КЭ, на которые разбит прогон (п. 3.2). Они могут быть просмотрены пользователем по пункту меню **Показать эпюры** (п. 3.4.4.2). Возможен просмотр напряжений в верхнем и нижнем поясе прогона только от изгиба в плоскости стенки, напряжений только от осевого сжатия прогона и напряжений от суммарного действия изгиба в плоскости стенки, осевого сжатия и бокового изгиба свободного нижнего пояса.

Также определяются максимальные (по модулю) напряжения в прогоне и выполняется проверка прочности по нормальным напряжениям в форме (п. 3.4.4.1)

$$\frac{|\sigma_{max}|}{R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (3.4.14)$$

3.4.3.1.2. Проверка устойчивости свободного нижнего пояса

В местах, где свободный нижний пояс сжат, выполняется проверка его устойчивости из плоскости прогона по формуле [3]

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_x}{W_{xeff}} + \frac{N}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fy,Ed}}{W_{fy}} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.4.15)$$

где χ_{LT} – коэффициент устойчивости для нижнего пояса, определяемый по п. 6.3.2.3 [24] для кривой устойчивости b с $\alpha_{LT} = 0,34$, $\overline{\lambda_{LT,0}} = 0,4$ и $\beta = 0,75$.

Учитывается как гравитационная нагрузка, так и подъёмная (если имеется).

Условная гибкость $\overline{\lambda_{fy}}$ определяется по формуле

$$\overline{\lambda_{fy}} = \frac{1}{\pi} \frac{l_{fy}}{i_{fy}} \sqrt{\frac{E}{R_y}}, \quad (3.4.16)$$

где i_{fy} – радиус инерции полного сечения пояса с примыкающей частью стенки относительно его центральной оси, параллельной плоскости стенки прогона.

Значение момента сопротивления сечения нижнего свободного пояса W_{fy} в (3.4.15) аналогично [23, 26] принимается $W_{fy} = \min(W_{fy3}, W_{fy4(5)})$.

Расчётная длина l_{fy} свободного нижнего пояса определяется по методике п. 10.1.4.2(3)-(7) с учётом таблицы 10.2 [3]. При действии подъёмной нагрузки когда раскрепления не применяются в соответствии с п.10.1.4.2(6) [3] l_{fy} вычисляется по формуле (10.10 а) [3]; при наличии раскреплений применяется альтернативная методика вычисления расчётной длины по формуле (10.9) [3] в сочетании с таблицей 10.2 б [3].

Для случаев, когда при гравитационной нагрузке проверяется устойчивость свободного нижнего пояса у средних опор с наличием перехлёстов, производятся две проверки: для сечения на опоре и для сечения у границы перехлёста с соответствующими усилиями. В *Результатах* приводится одно (максимальное из двух) значение левой части формулы (3.4.15).

В схемах с консолью проверяется устойчивость нижнего свободного пояса консоли при гравитационной нагрузке. При этом расчётная длина принимается равной длине консоли (предполагается, что на конце консоли прогон закреплён из плоскости). В *Результатах расчёта* данная проверка показывается на первом месте. Затем следует результат проверки устойчивости нижнего пояса справа от левой опоры. Далее слева от второй опоры, далее справа от второй опоры, и т.д.

3.4.3.1.3. Проверка несущей способности сечения прогона на опорах

Проверка несущей способности поперечного сечения прогона на сдвиг на опорах и вблизи опор в месте обрыва перехлёста (только для расчётных схем с перехлёстами и Z-образным сечением) производится по формуле

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1, \quad (3.4.17)$$

где V_{Ed} – расчётная поперечная сила на опоре (или в месте обрыва перехлёста), кН.

Несущая способность поперечного сечения $V_{b,Rd}$ определяется по формуле

$$V_{b,Rd} = \frac{h_w}{\sin \phi} \cdot t f_{bv} \gamma_c, \quad (3.4.18)$$

где h_w – высота стенки профиля между средними плоскостями поясов, ϕ – угол наклона стенки относительно поясов ($\phi = 90^\circ$); f_{bv} – критическое напряжение при сдвиге, с учётом возможности потери устойчивости стенки – определяется по таблице 6.1 [3]; γ_c – коэффициент условий работы для расчётов на прочность (вводится пользователем).

Условная гибкость стенки, при этом, определяется следующим образом:

- для стенок Z- и С-образных профилей

$$\overline{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (3.4.19,a)$$

где s_w – высота стенки между средними точками закруглений между стенкой и поясом.

- для стенок Сигма-образных профилей

$$\overline{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_d}{t} \cdot \sqrt{\frac{5,34 R_y}{k_t E}}. \quad (3.4.19,b)$$

$$k_t = 5,34 + \frac{2,1}{t} \sqrt{\frac{2I_s}{s_d}},$$

где I_s – момент инерции каждого уступа на стенке (как ребра жёсткости) с прилегающей частью стенки относительно его центральной оси, параллельной плоскости стенки (рисунок 6.5 [3]); s_d – суммарная высота стенки с учётом уступов.

На опорах, где имеется перехлёст, учитывается удвоенная несущая способность поперечного сечения.

Для сечений, в которых $V_{Ed} / V_{b,Rd} \geq 0,5$ в соответствии с п. 6.1.10 [3] производится проверка прочности сечения на совместное действие осевой силы (если имеется), изгибающего момента и поперечной силы по формуле

$$\left(\frac{N}{N_{Rd}} + \frac{M_x}{M_{x,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \cdot \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1 \right)^2 \right) / \gamma_c \leq 1, \quad (3.4.20)$$

где N_{Rd} – несущая способность поперечного сечения при осевом сжатии: $N_{Rd} = A_{eff} R_y$ (A_{eff} – редуцированная площадь эффективного поперечного сечения при условии равномерного сжатия сечения напряжением, равным R_y ; в местах перехлёста Z-образных прогонов учитывается удвоенная A_{eff}); $M_{x,Rd}$ – несущая способность поперечного сечения на изгиб: $M_{x,Rd} = W_{effRy} R_y$ (W_{effRy} – минимальный редуцированный момент сопротивления эффективного сечения относительно оси X при условии максимального напряжения в сечении, равного R_y ; в местах перехлёста Z-образных прогонов учитывается удвоенный W_{effRy}); $M_{f,Rd}$ – несущая способность при изгибе сечения, состоящего только из поясов: $M_{f,Rd} = W_f R_y$ (W_f – момент сопротивления сечения, которое состоит из двух полных поясов); $M_{pl,Rd}$ – несущая способность поперечного сечения на изгиб $M_{pl,Rd} = W_{eff} R_y$ (W_{eff} – минимальный редуцированный момент сопротивления эффективного сечения относительно оси X, вычисленный при действующем в данном сечении изгибающем моменте M_x ; в местах перехлёста Z-образных прогонов учитывается удвоенный W_{eff}); $V_{w,Rd}$ – несущая способность стенки на сдвиг: $V_{w,Rd} = h_w t f_{bv}$.



3.4.3.2. Расчёт по эксплуатационной пригодности

Расчёт по эксплуатационной пригодности выполняется в форме проверки прогибов по формуле


$$f_{max} \leq \frac{f_u}{\gamma_n}, \quad (3.4.21)$$

где f_{max} – максимальный прогиб в плоскости стенки прогона от *Сочетаний* нагрузок для расчётов по второй группе предельных состояний без учёта коэффициента надёжности по ответственности. Если в нагрузках, применяемых для расчёта по прогибам уже учтён коэффициент γ_n , то при вводе его значения в программу следует принять $\gamma_n=1,0$ (f_{max} вычисляется методом конечных элементов с учётом редуцирования сечений КЭ (пп. 3.2 и 3.4.2)); f_u – предельный прогиб, вводимый пользователем.

3.4.4. Результаты расчёта

Результаты расчёта прогонов могут быть показаны на экране и/или переданы в Microsoft Excel для дальнейшей обработки, например, печати. Для этого на панели инструментов главного окна расчёта прогонов размещена кнопка , по которой можно посмотреть полный Отчёт, и кнопка , по которой на экран выводятся Эпюры усилий, напряжений и прогибов.

3.4.4.1. Просмотр Отчёта

Посмотреть отчёт о выполненных расчётах можно щёлкнув на кнопке *Показать результаты расчёта*  на панели инструментов. После чего на экране появляется информационное окно с пятью вкладками, на которых показываются: введённые пользователем исходные данные (вкладка *Общие данные*), параметрический чертёж сечения с геометрическими характеристиками полного сечения (вкладка *Сечение*), информация о нагрузках (вкладка *Нагрузки*), результаты проверочных расчётов (вкладка *Проверки*) и эпюры (вкладка *Эпюры*).

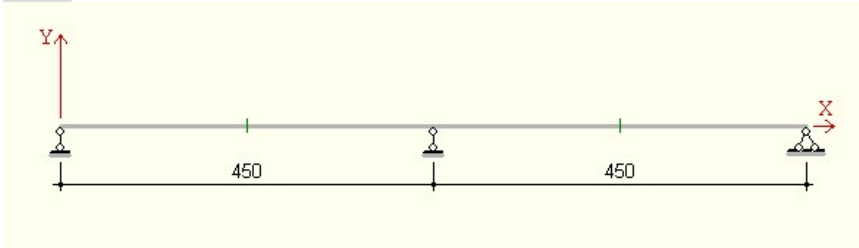
На рисунке 3.4.19 показано окно **Результаты расчёта** с активной вкладкой *Общие данные*. На рисунке 3.4.20 показано окно **Результаты расчёта** с активной вкладкой *Сечение*. На рисунке 3.4.21 показано начало вкладки *Нагрузки* окна **Результаты расчёта**, а на рисунке 3.4.22 окончание вкладки. На рисунке 3.4.23 показано окно **Результаты расчёта** с активной вкладкой *Проверки* для *Сочетания №1*. На рисунке 3.4.24 показано окно **Результаты расчёта** с активной вкладкой *Эпюры* для *Сочетания № 1*. (верхняя часть), а на рисунке 3.4.25 нижняя часть вкладки. Данная вкладка предназначена для формирования списка эпюр, которые будут переданы в Excel. В левой части окна следует выбрать необходимые эпюры и нажать **Обновить**. Чтобы изменить состав эпюр, необходимо нажать **Очистить** и набрать новый состав.

Расчёт прогонов покрытия: Результаты расчёта

Общие данные | Сечение | Нагрузки | Проверки | Эпюры

Расчёт: Расчёт прогона ПП2-1

Схема

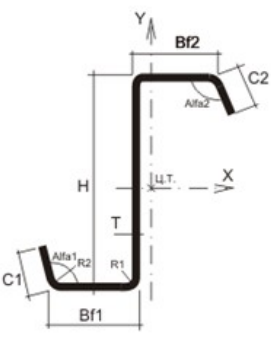


Уклон покрытия $\alpha = 9,0^\circ$

Сечение Z250x1,8
Производитель: Z-профиль ООО Дадли

Размеры сечения

Обозн.	Наименование	Значение	Ед. изм.
H	Высота	250,0	мм
t	Толщина	1,80	мм
B _{f1}	Ширина нижнего пояса	60,0	мм
B _{f2}	Ширина верхнего пояса	65,0	мм
C ₁	Ширина нижнего отгиба	22,0	мм
C ₂	Ширина верхнего отгиба	22,0	мм
α_1	Угол наклона нижнего отгиба	90,0	°
α_2	Угол наклона верхнего отгиба	90,0	°
R ₁	Внутренний радиус закругления стенка-отгиб	3,0	мм
R ₂	Внутренний радиус закругления пояс-отгиб	3,0	мм



Потеря устойчивости формы сечения учтена

Ориентация профиля: так

Общие данные

Сталь 350 ГОСТ Р 52246

Расчётное сопротивление R_y 33,50 кН/см²

Коэффициент условий работы для расчётов на прочность γ_c 1,00

Коэффициент условий работы для расчётов на устойчивость γ_{cr} 0,90

Коэффициент надёжности по ответственности γ_n 1,00

Предельный прогиб f_u 1 / 175,0

Коэффициент поворота C_{100} по табл. 10.3 EC3-1-3

Нагрузка направлена вниз $C_{100} : 5,2$ кНм/м $b_{tmax} : 40,0$ мм

Нагрузка направлена вверх $C_{100} : 2,6$ кНм/м $b_{tmax} : 40,0$ мм

Профилированный настил

168,0 мм

Ok

Рисунок 3.4.19 – Вкладка «Общие данные» окна Результаты расчёта

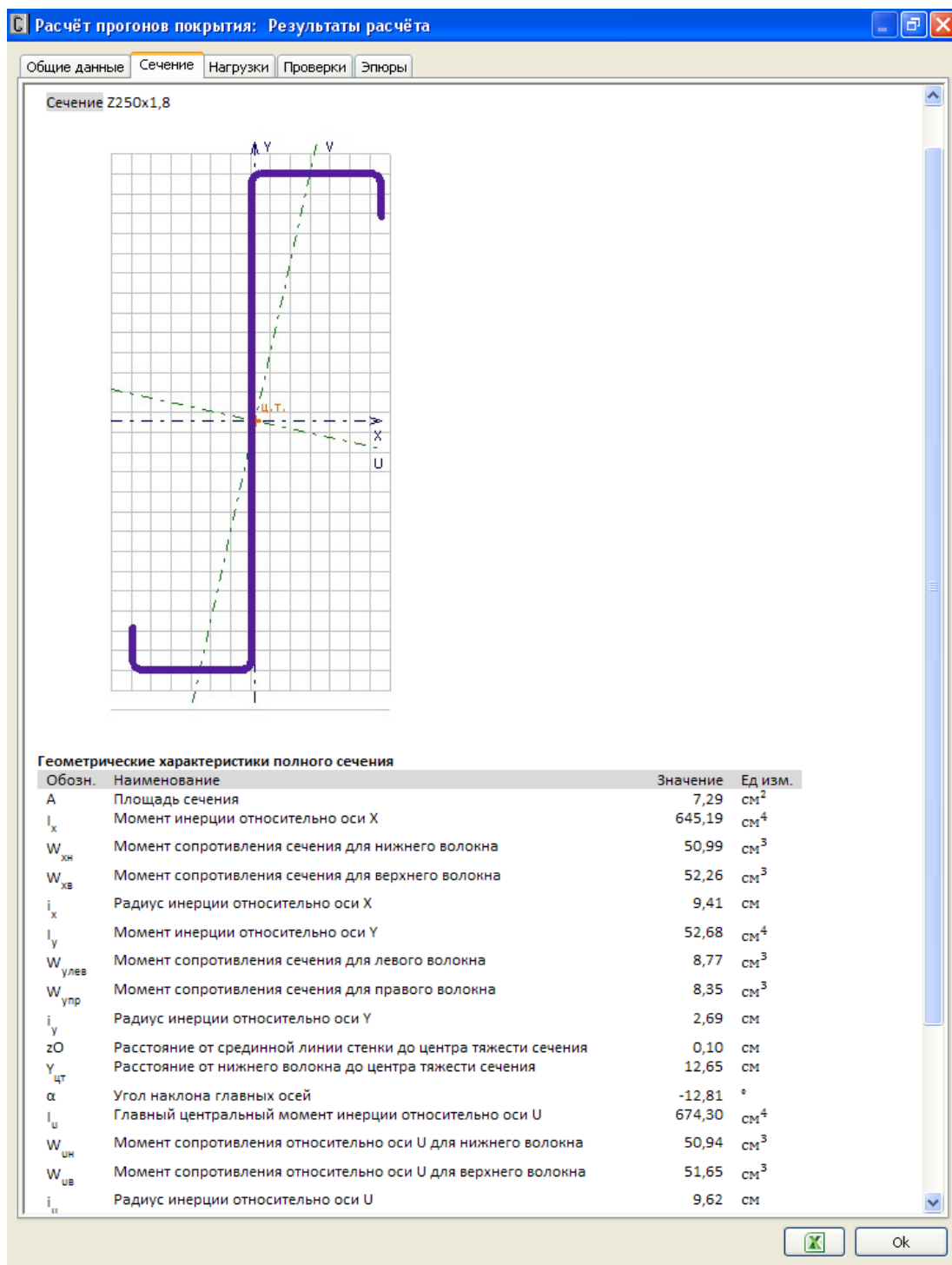


Рисунок 3.4.20 – Вкладка «Сечение» окна Результаты расчёта

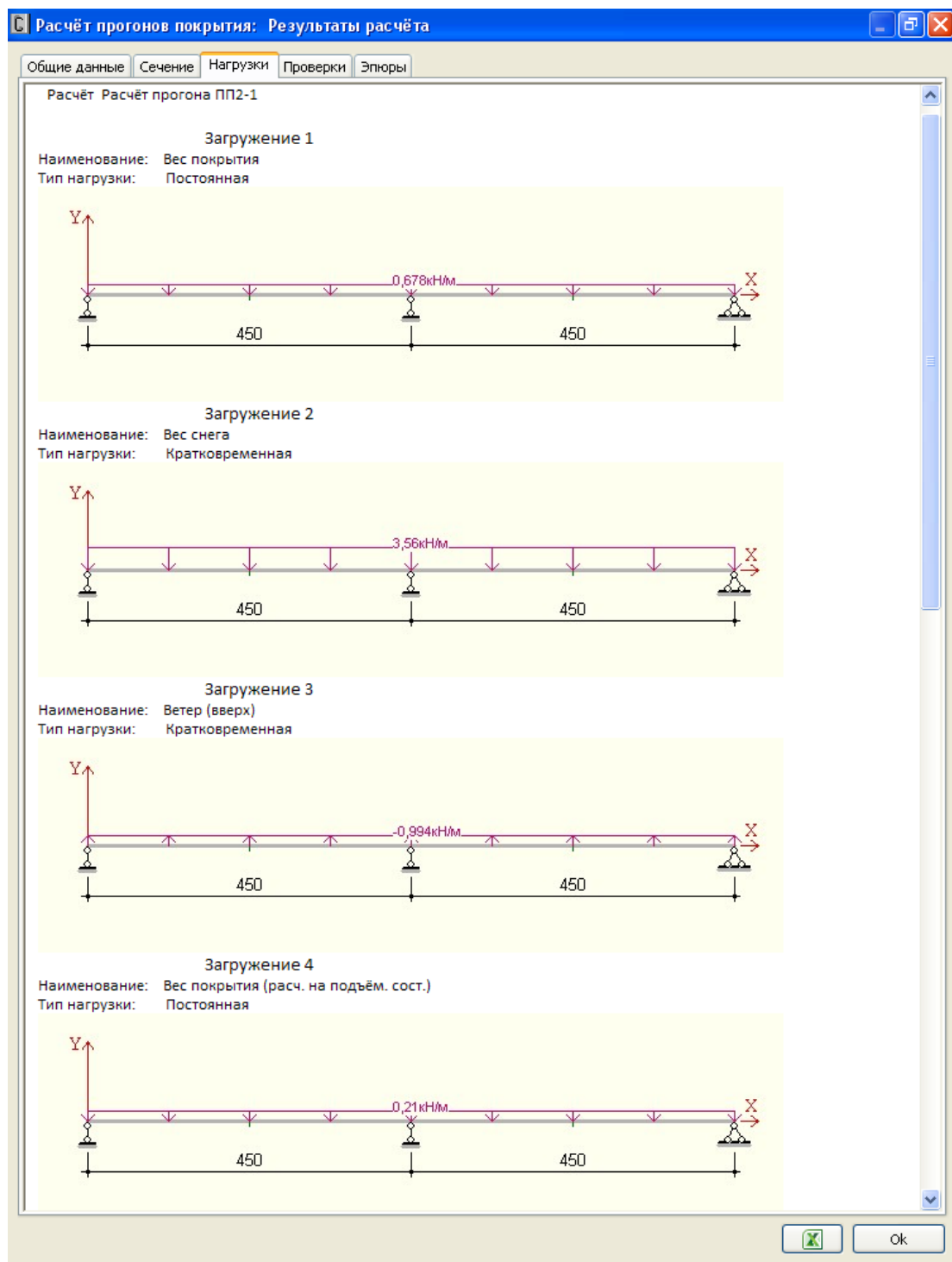


Рисунок 3.4.21 – Вкладка «Сечение» окна Результаты расчёта (начало)

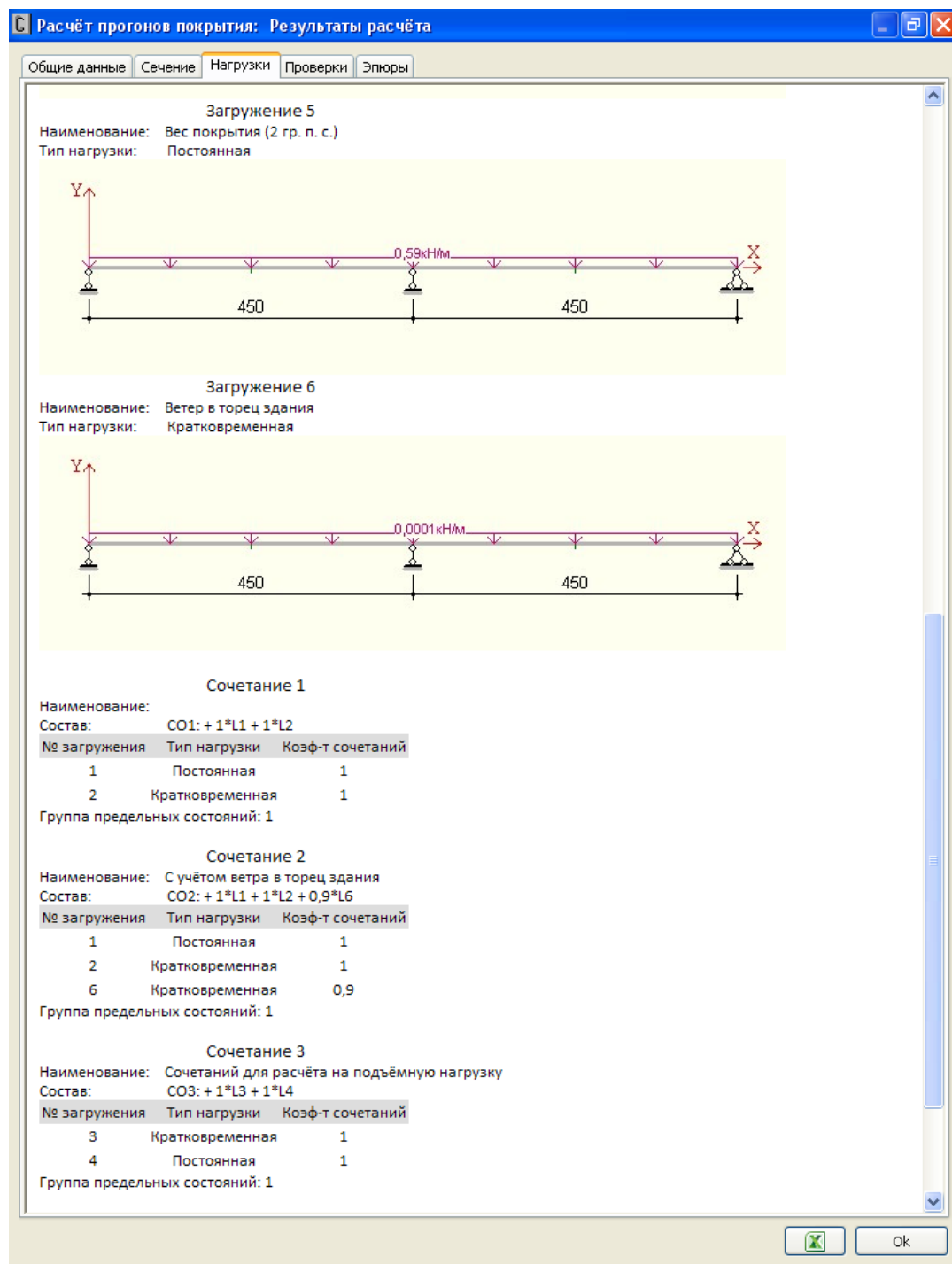


Рисунок 3.4.22 – Вкладка «Сечение» окна Результаты расчёта (окончание)

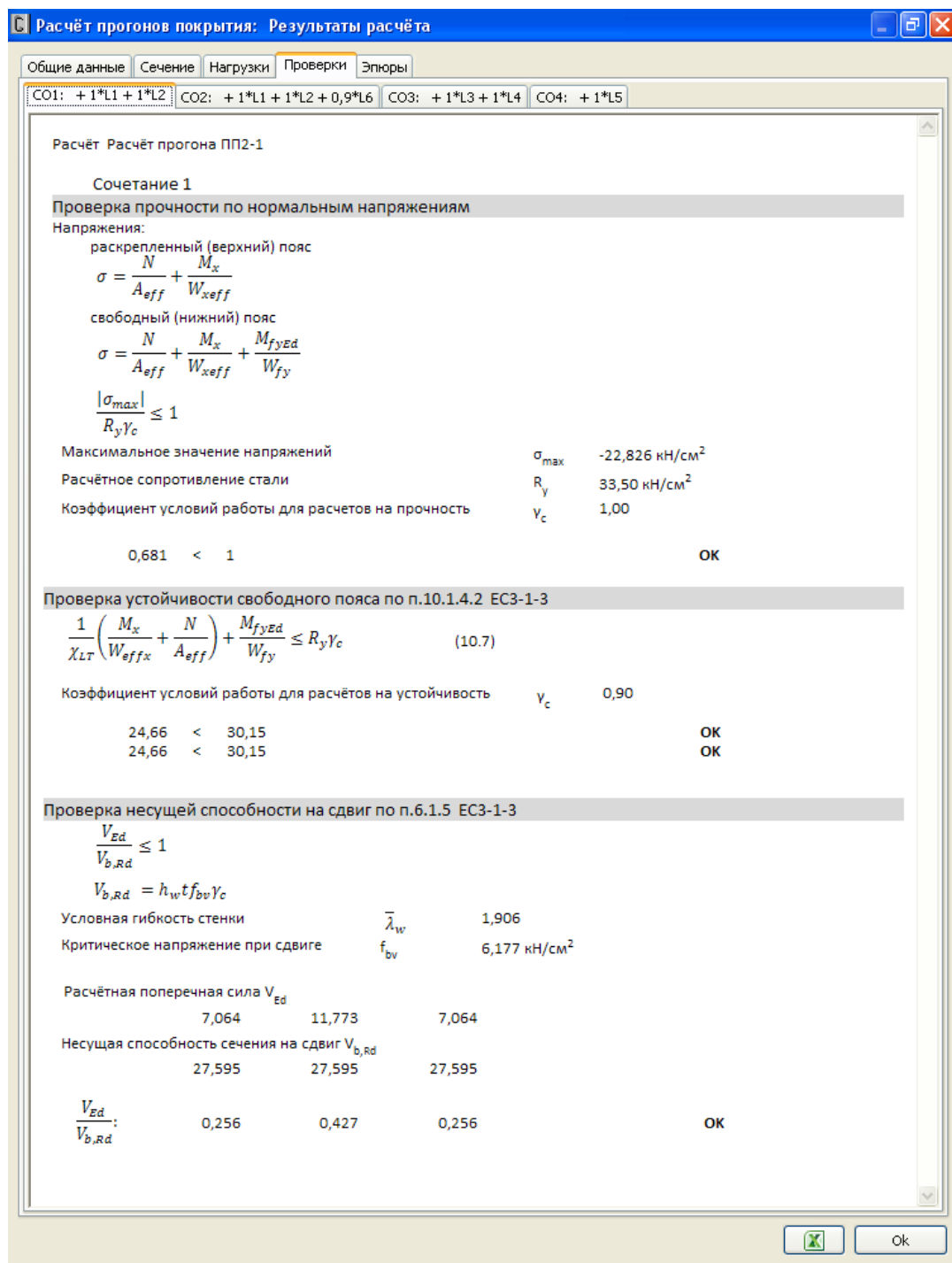


Рисунок 3.4.23 – Вкладка «Проверки» окна Результаты расчёта

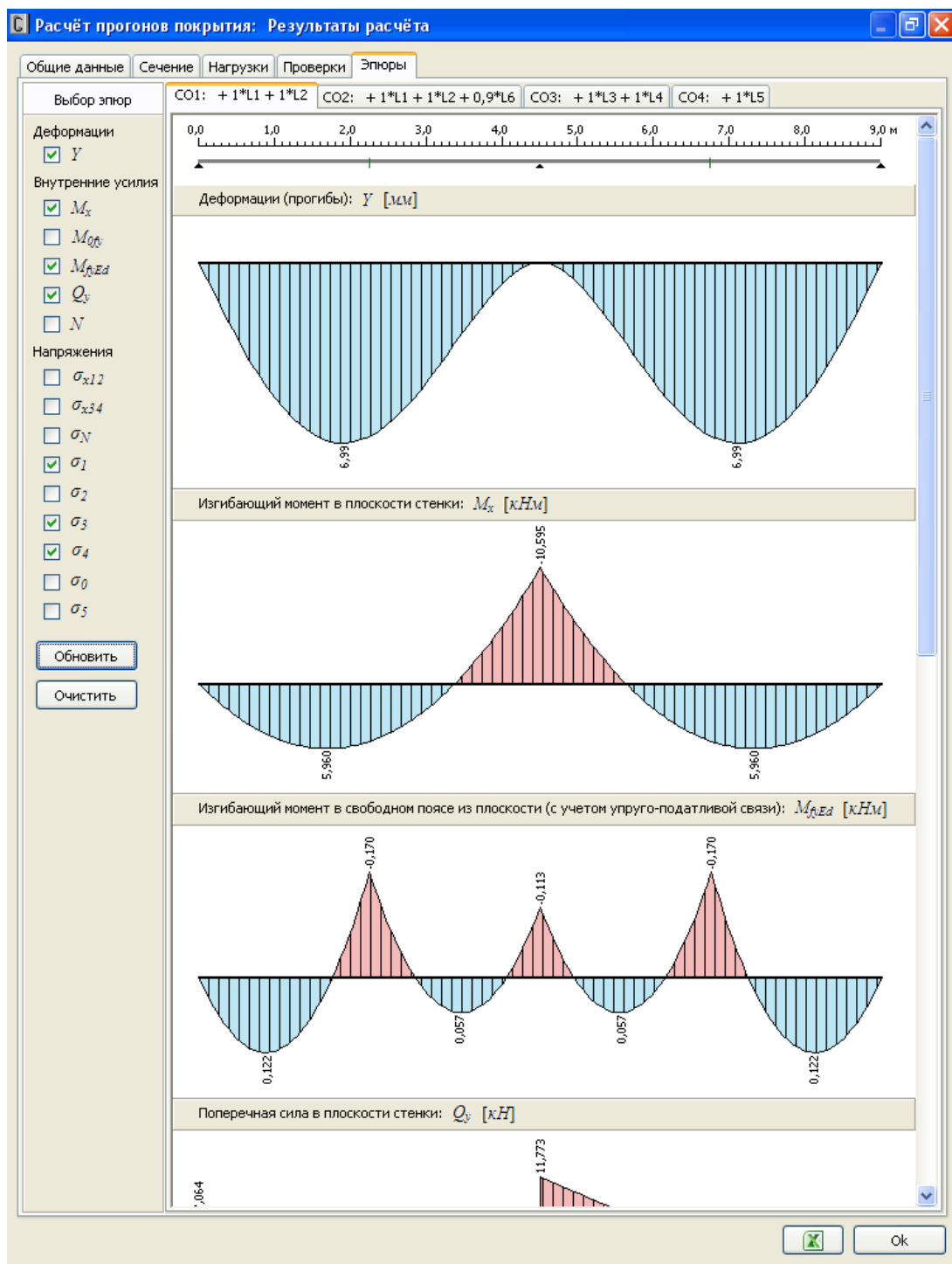


Рисунок 3.4.24 – Вкладка «Эпюры» окна Результаты расчёта (верхняя часть)

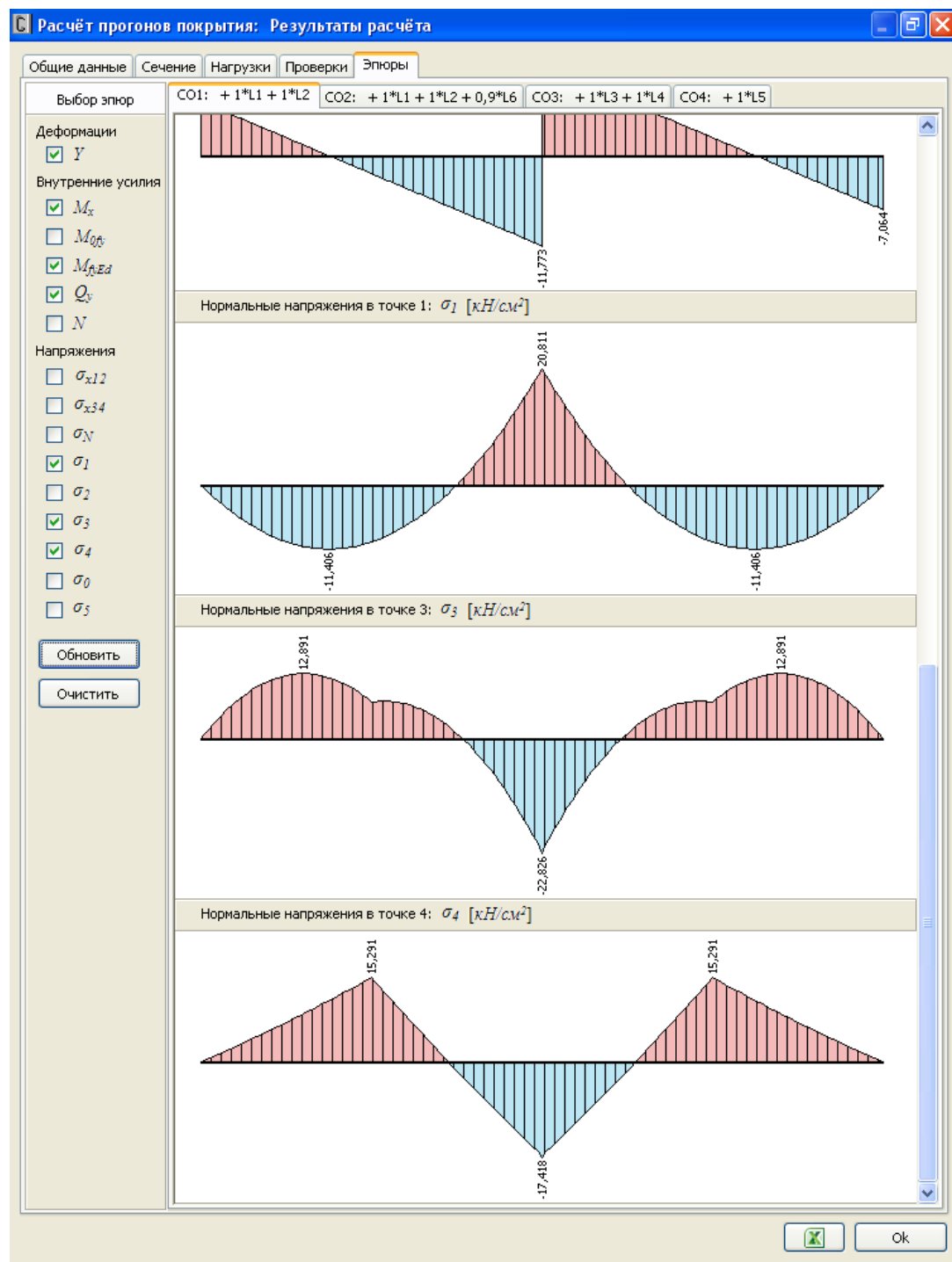



Рисунок 3.4.25 – Вкладка «Эпюры» окна Результаты расчёта (нижняя часть)

В нижней части окна **Результаты расчёта** имеется кнопка , при нажатии которой, данные, выводимые в окне **Результаты расчёта**, передаются в Excel и происходит его запуск. Структура книги Excel схожа со структурой окна **Результаты расчёта**. На рисунках 3.4.26 ... 3.4.28 приведены некоторые страницы результатов, так как они выглядят после распечатки из Excel.



ДЕЛЬТА
Инжиниринг
Deltaing@mail.ru

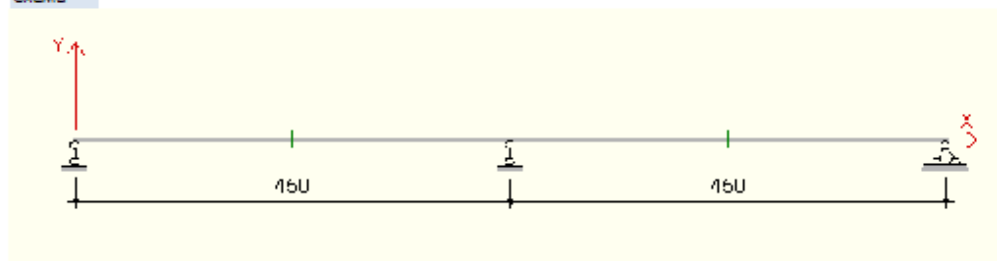
CFSteel v.3.0

Пользователь

Расчёт прогонов покрытия

Расчёт Расчёт прогона ПП2-1

Схема

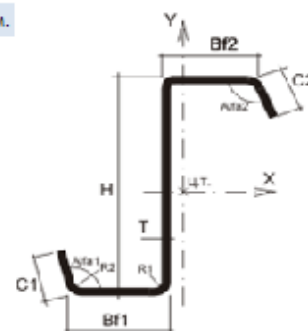
Уклон покрытия $\alpha = 9,0^\circ$

Сечение Z250x1,8

Производитель Z-профиль ООО Дадли

Размеры сечения

Обозн.	Наименование	Значение	Ед. изм.
H	Высота	250,0	мм
t	Толщина	1,80	мм
B ₁	Ширина нижнего пояса	60,0	мм
B ₂	Ширина верхнего пояса	65,0	мм
C ₁	Ширина нижнего отгиба	22,0	мм
C ₂	Ширина верхнего отгиба	22,0	мм
α_1	Угол наклона нижнего отгиба	90,0	°
α_2	Угол наклона верхнего отгиба	90,0	°
R ₁	Внутр. радиус закругления стенка-отгиб	3,0	мм
R ₂	Внутр. радиус закругления пояс-отгиб	3,0	мм



Потеря устойчивости формы сечения учтена

Ориентация профиля: так

Общие данные

Сталь 350 ГОСТ Р 52246

Расчётное сопротивление R_y 33,50 кН/см²Коэффициент условий работы для расчётов на прочность γ_c 1,00Коэффициент условий работы для расчётов на устойчивость γ_{cr} 0,90Коэффициент надёжности по ответственности γ_n 1,00Предельный прогиб $f_{\text{пр}}$ 1 / 175,0Коэффициент поворота C_{120} по табл. 10.3 ЕС3-1-3

Нагрузка направлена вниз	C_{120}	5,2 кНм/м	$b_{\text{см.кст}}$	40,0 мм
Нагрузка направлена вверх	C_{120}	2,6 кНм/м	$b_{\text{см.кст}}$	40,0 мм

Лист "Общие данные" Страница 1 из 2

Рисунок 3.4.26 – Лист «Общие данные» Страница 1

	ДЕЛЬТА Инжиниринг Deltaing@mail.ru	CFSteel v.3.0 Пользователь
Профилированный настил		
Ширина волны b_r	168,0 мм	
Ширина полки крепления к прогону b_t	55,0 мм	
Толщина настила t	0,90 мм	
Положение настила	узкие полки на прогоне	
Комментарии		

Лист "Общие данные" Страница 2 из 2

Рисунок 3.4.27 – Лист «Общие данные» Страница 2



ДЕЛЬТА
Инжиниринг
www.CFSteel.ru

CFSteel v.3.0

Пользователь

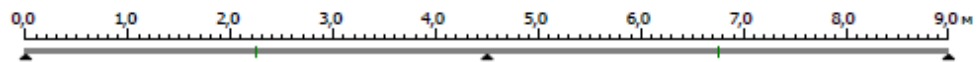
Расчёт прогонов покрытия: Эпюры

Расчёт Расчёт прогона ПП2-1

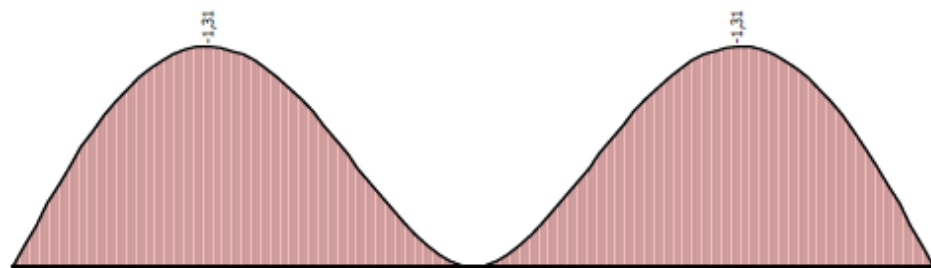
Сочетание 3

Наименование: Сочетаний для расчёта на подъёмную нагрузку

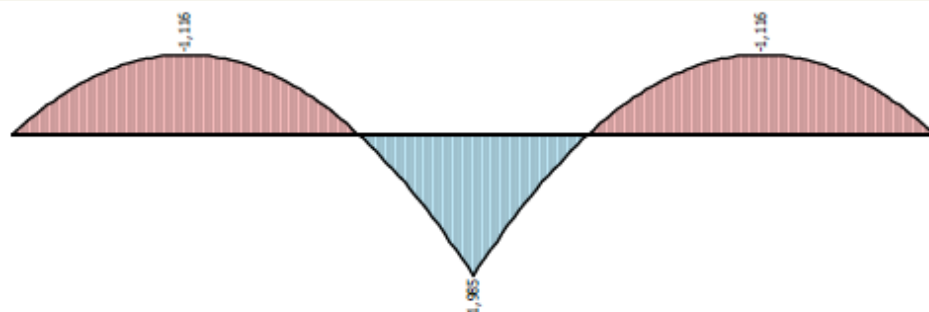
Состав: СОЗ: +1*L3 + 1*L4



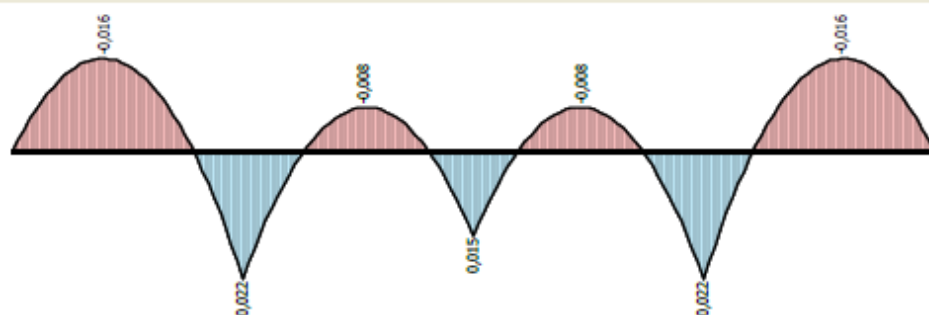
Деформации (прогибы):



Изгибающий момент в плоскости стенки:

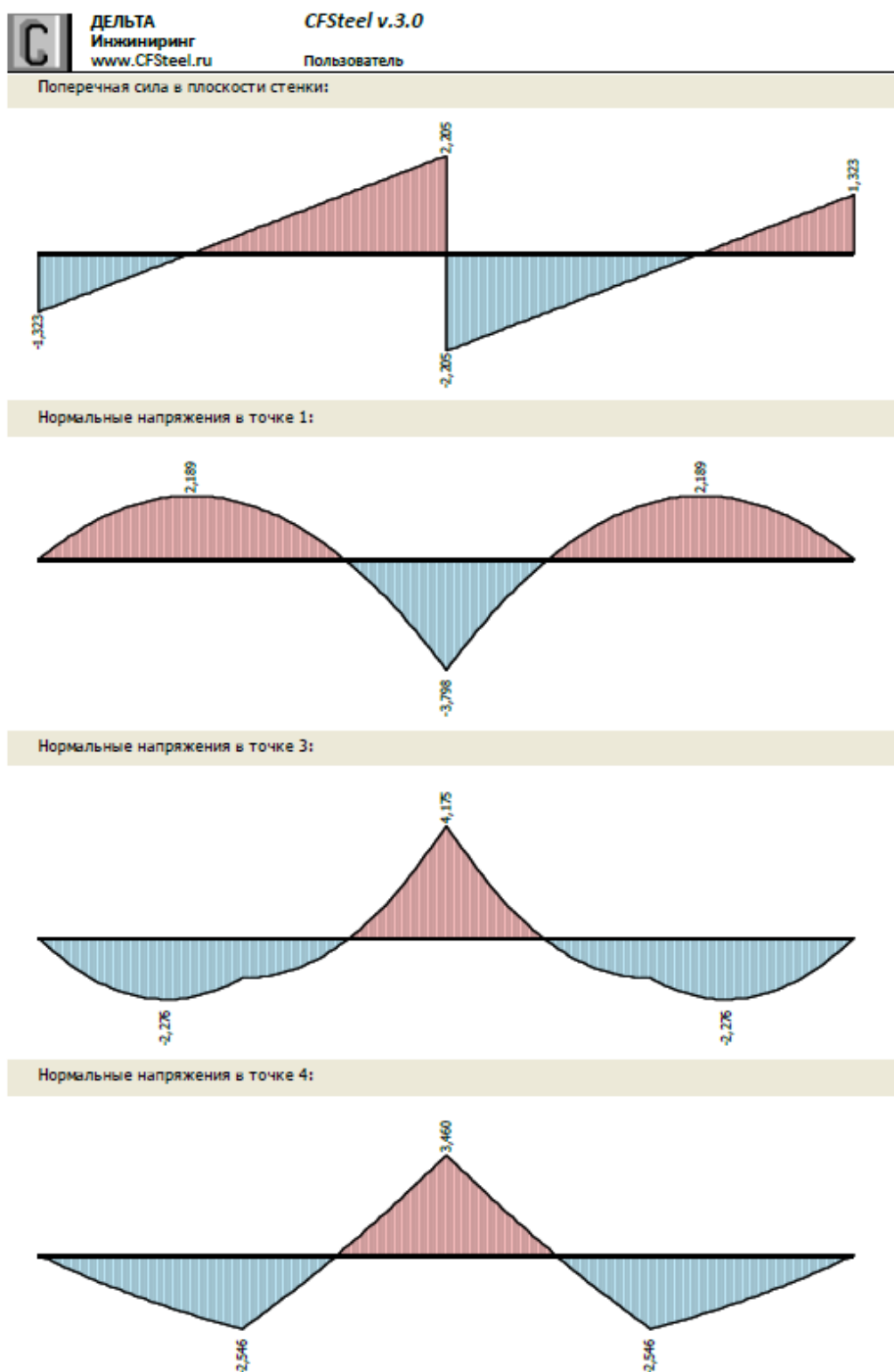


Изгибающий момент в свободном поясе из плоскости (с учетом упруго-податливой связи):



Лист "Эпюры СОЗ" Страница 1 из 3


Рисунок 3.4.28 – Лист «Эпюры СОЗ» (подъёмная нагрузка) Страница 1

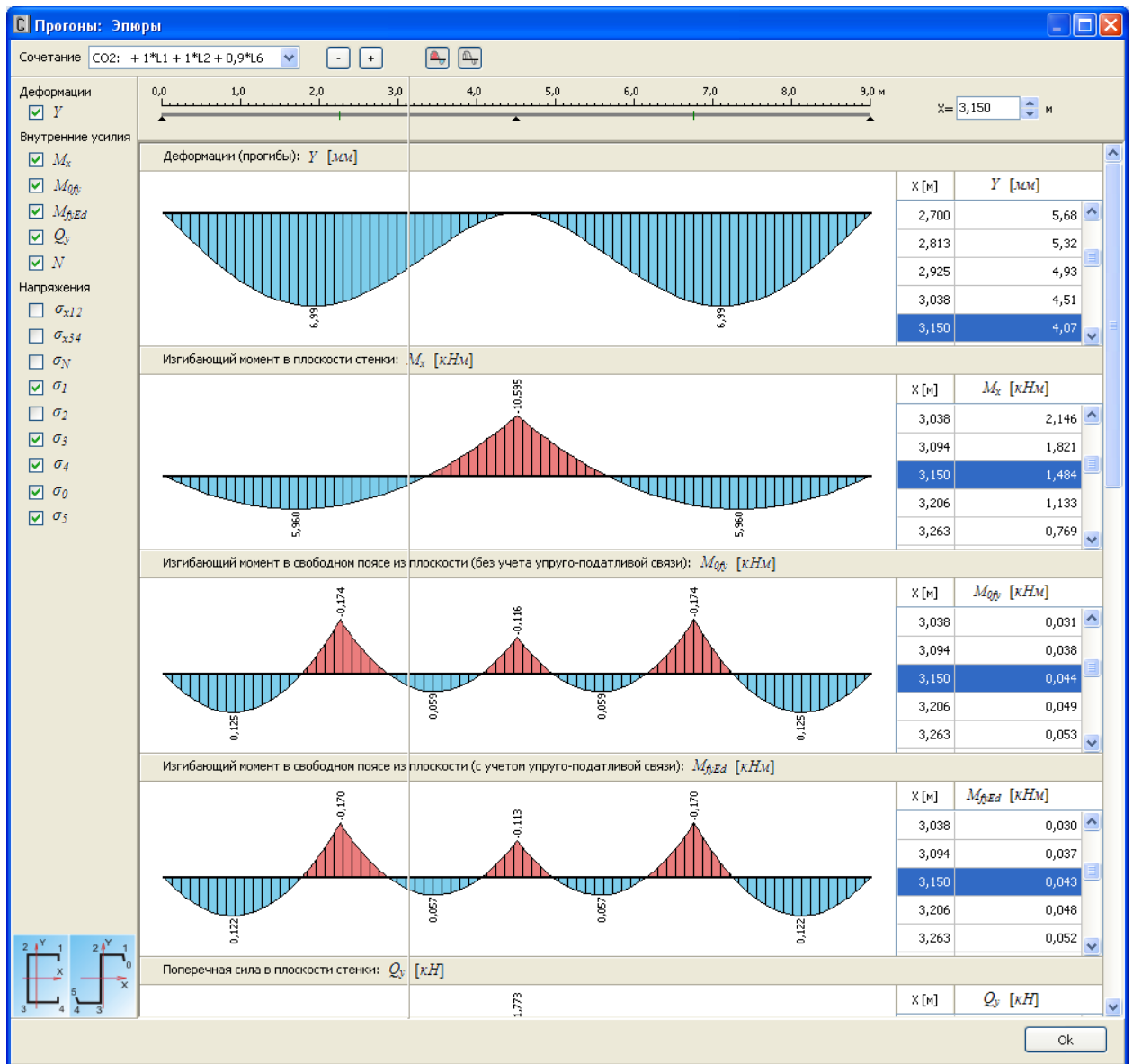


Лист "Эпюры CO3" Страница 2 из 3

Рисунок 3.4.29 – Лист «Эпюры CO3» (подъёмная нагрузка) Страница 2

3.4.4.2. Просмотр Эпюр

Посмотреть эпюры можно щёлкнув на кнопке *Показать эпюры*  на панели инструментов. На рисунке 3.4.30 показан общий вид окна **Расчёт балок: Эпюры**.

Рисунок 3.4.30 – Общий вид окна **Расчёт прогонов: Эпюры**



В окне могут быть показаны (по выбору пользователя) эпюры прогибов Y , изгибающих моментов в плоскости стенки прогона M_x , изгибающих моментов в нижнем поясе из плоскости прогона без учёта угловой связи (без учёта упругой опоры K) M_{ofy} , изгибающих моментов в нижнем поясе из плоскости прогона с учётом угловой связи (с учётом упругой опоры K) $M_{fy,Ed}$, эпюра поперечных сил Q_y , осевых сжимающих сил N , эпюры напряжений в верхнем и нижнем поясе от изгиба только в плоскости стенки σ_{12} , σ_{34} , напряжения от осевой сжимающей силы σ_N , а также напряжения в характерных точках сечения от совместного действия изгиба в плоскости прогона (M_x), осевой сжимающей силы (N) и бокового изгиба нижнего пояса ($M_{fy,Ed}$) σ_0 , σ_1 , σ_2 , σ_3 , σ_4 , σ_5 . Нумерация точек сечений показана в левом нижнем углу окна.

Кроме эпюр в окне в табличной форме показываются численные значения выбранных для просмотра величин. Эти значения выводятся с учётом разбиения прогона на конечные элементы (п.3.2) в узлах и в середине каждого КЭ. Значения прогибов показываются в узлах разбиения прогона на КЭ.

На эпюрах указаны максимальные положительные и отрицательные значения параметров в пределах пролёта. Посмотреть значения, отличающиеся от максимальных можно разными способами: кликнуть левой кнопкой мыши на линейке сверху окна в ту точку, где необходимо посмотреть значение параметра, либо ввести координату точки в окно ввода $x=0,800$ м. Введённые таким образом координаты «притягиваются» к узлам разбиения балки на КЭ.

Номер Сочетания выбирается из выпадающего списка. Выбрать эпюры для показа можно на панели слева.

Кнопками  и  можно изменять масштаб эпюр.

Кнопки  и  включают/отключают заливку эпюр цветом и штриховку соответственно. Этими же кнопками можно менять вид эпюр, передаваемых в Excel, а следовательно, и выводимых на печать.

3.4.5. Тестовые расчёты прогонов покрытия

Задание 3.5: Данный верификационный расчёт взят из [23] (Example C).

Рассматривается двухпролётный прогон с одинаковыми пролётами $l=4,5$ м. Уклон кровли $\alpha=11,31^\circ$. Нижний пояс прогона закреплён из плоскости в середине каждого пролёта. Предполагается, что стальной профилированный настил, опирающийся на прогон, является абсолютно жёсткой диафрагмой. Скатная составляющая нагрузок воспринимается опорными устройствами в местах опирания прогона. Сечение прогона – Сигма-образный профиль. На Рисунке 3.4.31 показаны размеры по срединной плоскости сечения. Значения размеров: $h=148$ мм, $t=1,5$ мм, $b=54$ мм, $h_1=34$ мм, $h_2=20$ мм, $h_3=40$ мм, $c=14$ мм, $r=4$ мм, $t_{coat}=0,04$ мм. Гарантированный предел текучести стали $f_y=35,5$ кН/см². Вертикальная гравитационная нагрузка от собственного веса покрытия и снега составляет $q_s = 1,70$ кН/м. Подъёмная нагрузка от ветра, перпендикулярная плоскости покрытия, $q_w = -0,87$ кН/м. Расчёт по второй группе предельных состояний выполняется на нагрузку $q_{ss} = 0,87$ кН/м.

Расчёт: Примем $R_y=f_y$. Принятый в [23] модуль упругости стали $E=2,1 \cdot 10^4$ кН/см². В CFSteel в соответствии с [1] принят $E=2,06 \cdot 10^4$ кН/см². Но для данного верификационного примера в программе применён модуль упругости, равный принятому в источнике, откуда взят расчёт [23].

Соответствующие размеры сечения согласно Рисунку 1.6 настоящего Руководства: $h=149,5$ мм; $t=1,5$ мм; $b=55,5$ мм; $h_1=78,5$ мм; $h_2=40$ мм; $d=25$ мм; $c=14,75$ мм; $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$; $r=3,25$ мм, $t_{coat}=0,04$ мм. Геометрические характеристики полного сечения по [23] и вычисленные по программе CFSteel приведены в Таблице 3.4.1.

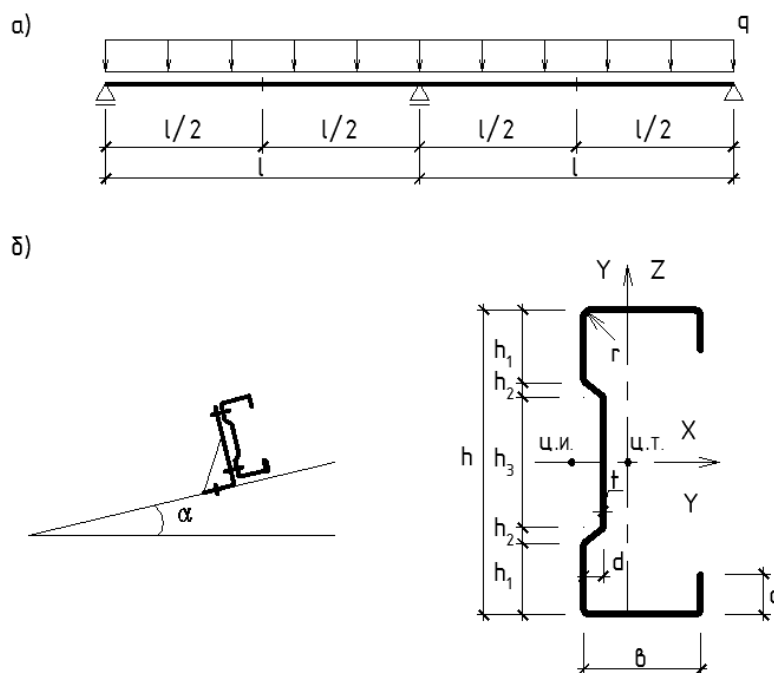


Рисунок 3.4.31 – Исходные данные для Задания 3.5 (на изображении сечения справа и внизу соответствующих осей показаны обозначения осей как в источнике [23])

Таблица 3.4.1 – Геометрические характеристики полного сечения (Задание 3.5)

Наименование характеристики	Обозн.	Ед. изм.	Значение по [23]	Значение по CFSteel	Расхождение, %
Площадь сечения	A	см^2	-	4,394	-
Положение центра тяжести:					
- расстояние от срединной плоскости стенки (у поясов) до Ц.Т. вдоль оси X	$X_{цт}$	см	-	1,998	-
- расстояние от срединной плоскости нижнего пояса до Ц.Т.	$Y_{цт}$	см	7,4	7,4	0
Момент инерции относительно оси X (с учётом закругления углов)	I_x	см^4	140,54	141,76	0,9
Момент инерции относительно оси X («острые» углы)	I_x	см^4	147,48	-	-
Момент инерции относительно оси Y	I_y	см^4	-	13,641	-
Радиус инерции относительно оси X	i_x	см	-	5,68	-
Радиус инерции относительно оси Y	i_y	см	-	1,76	-
Момент сопротивления сечения относительно оси X	W_x	см^3	19,93	18,97	4,8
Момент сопротивления сечения относительно оси Y для крайнего левого волокна	$W_{ул}$	см^3	-	6,59	-
Момент сопротивления сечения относительно оси Y для крайнего правого волокна	$W_{упр}$	см^3	-	3,93	-

Примечание: Геометрические характеристики в [23] вычислены в предположении «острых» углов, за исключением момента инерции I_x (отмечено в таблице). Геометрические характеристики в CFSteel вычислены с учётом закругления углов

Эпюры изгибающих моментов от перпендикулярной покрытию составляющей гравитационной нагрузки ($q = q_s \cdot \cos \alpha = 1,67 \text{ кН/м}$) и подъёмной нагрузки показаны на Рисунке 3.4.32. Значения некоторых усилий и обозначенных на рисунке величин представлены в Таблице 3.4.2.

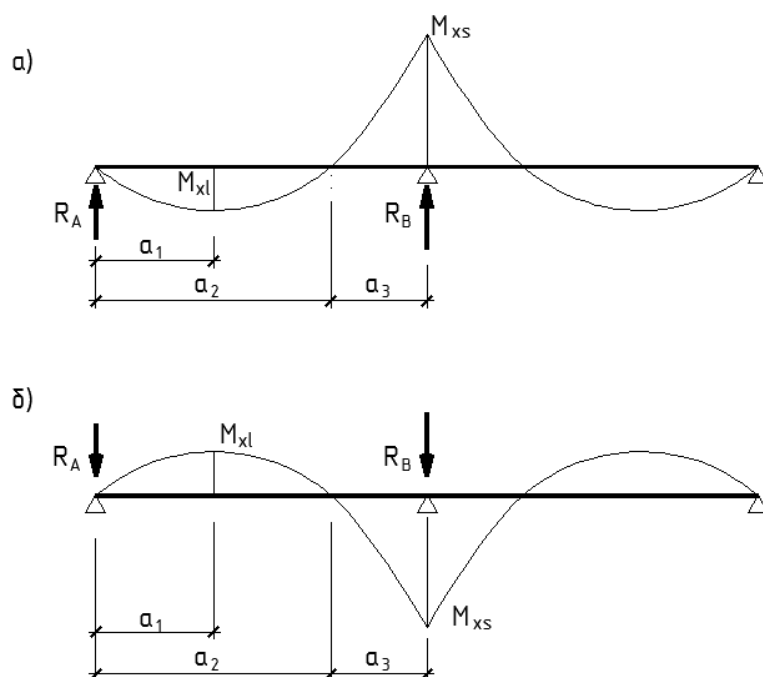


Рисунок 3.4.32 – Эпюры изгибающих моментов: а) - от перпендикулярной покрытию составляющей гравитационной нагрузки; б) - от подъёмной ветровой нагрузки

Таблица 3.4.2 – Значения усилий и обозначенных на Рисунке 3.4.2 величин

Наименование	Обозн.	Ед.изм.	Значение по [23]	Значение по CFSteel	Расхождение, %
перпендикулярная покрытию составляющая гравитационной нагрузки					
Пролётный изгибающий момент	M_{xl}	кНм	-	2,38	-
Опорный изгибающий момент	M_{xs}	кНм	4,23	4,22	0,2
Опорная реакция на крайней опоре	R_A	кН	-	2,82	-
Опорная реакция на средней опоре	R_B	кН	9,39	9,39	0
Максимальная поперечная сила на средней опоре	V_B	кН	4,695	4,694	0,1
Расстояние a_1		м	1,6875	1,6875	0
Расстояние a_2		м	3,375	3,375	0
Расстояние a_3		м	1,125	1,125	0
подъёмная нагрузка					
Пролётный изгибающий момент	M_{xl}	кНм	1,24	1,24	0
Опорный изгибающий момент	M_{xs}	кНм	2,2	2,2	0
Расстояние a_1		м	1,6875	1,6875	0

Размеры по срединным плоскостям элементов свободного пояса прогона с примыкающей частью стенки приведены на Рисунке 3.4.33. Геометрические характеристики пояса приведены в Таблице 3.4.3. Следует отметить, что в источнике [23] геометрические характеристики вычисляются в предположении «острых» углов. В то время, как в CFSteel учитываются реальные закругления в местахгиба. Этим объясняется некоторое расхождение в результатах.

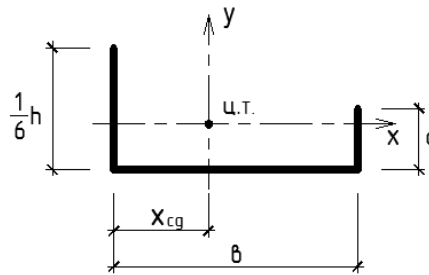


Рисунок 3.4.33 – Размеры нижнего свободного пояса

Таблица 3.4.3 – Геометрические характеристики свободного пояса прогона

Наименование характеристики	Обозн.	Ед. изм.	Значение по [23]	Значение по CFSteel	Расхождение, %
Площадь поперечного сечения	A_f	$см^2$	1,36	1,28	5,8
Расстояние от срединной плоскости стенки до центра тяжести	X_{cg}	$см$	2,381	2,414	1,4
Момент инерции относительно оси Y	I_{fy}	$см^4$	5,93	5,59	5,7
Момент сопротивления сечения относительно оси Y для правого волокна в предположении сечения, состоящего из срединных плоскостей (Рисунок 3.4.33)	W_{fy}	$см^3$	1,963	-	-
Момент сопротивления сечения относительно оси Y для крайнего левого волокна стенки с учётом реальной толщины и закругления углов	$W_{fyлев}$	$см^3$	-	2,25	-
Момент сопротивления сечения относительно оси Y для крайнего правого волокна отгиба с учётом реальной толщины и закругления углов	$W_{fyпр}$	$см^3$	-	1,826	-
Радиус инерции относительно оси Y	i_{fy}	$см$	2,089	2,092	0,1

Общая жёсткость боковой связи на единицу длины (п.10.1.5.1 [3]) в источнике [23] определяется как (формула 10.12 [3]):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B}},$$

что соответствует представлению в CFSteel.

$$\frac{1}{K_A} = \frac{h^2}{C_D}$$

Жёсткость угловой связи C_D в [23] принята по результатам испытаний $C_D = 0,59 \text{ кНсм/см}$. Тогда $1/K_A = 371,2 \text{ см}^2/\text{кН}$.

$$\frac{1}{K} = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h^2 \cdot (h_d + e)}{E \cdot t^3} + \frac{h^2}{C_D},$$

где h_d – развёрнутая высота стенки; $h_d = 172$ мм; для вертикальной нагрузки, направленной вниз, $e = 0,5b = 27$ мм.

$$\frac{1}{K_B} = \frac{4(1 - 0,3^2) \cdot 148^2(172 + 27)}{210000 \cdot 1,46^2} = 24,27 \text{ мм} \cdot \text{мм/Н}.$$

Тогда

$$K = \frac{1}{37,12 + 24,27} = 0,00163 \text{ Н/мм}^2.$$

Что касается жёсткости угловой связи C_D , в CFSteel предусмотрены два варианта: ввод значения C_D непосредственно пользователем и вычисление значения C_D по п.10.1.5.2 [3]. В данном случае выбираем на вкладке **Расчётная схема (Дополнительно)** - *Ввести значение C_D* , введём значение как в [23] $C_D = 0,59$ кНм/м.

Гравитационная нагрузка

При действии гравитационной нагрузки поперечное сечение согласно [23] полностью эффективно, следовательно в дальнейших расчётах участвуют геометрические характеристики полного сечения. Согласно CFSteel при максимальном изгибающем моменте на средней опоре M_{xs} сечение также полностью эффективно.

На Рисунке 3.4.34 приведены расчётная схема нижнего пояса при изгибе под действием равномерно-распределённой боковой нагрузки $q_h = k_h \cdot q$, эпюра изгибающих моментов в поясе из плоскости прогона и напряжённое состояние сечения прогона на средней опоре, вблизи которой, выполняется проверка устойчивости пояса из плоскости прогона. Дальнейшие расчёты сведены в Талицу 3.4.5.

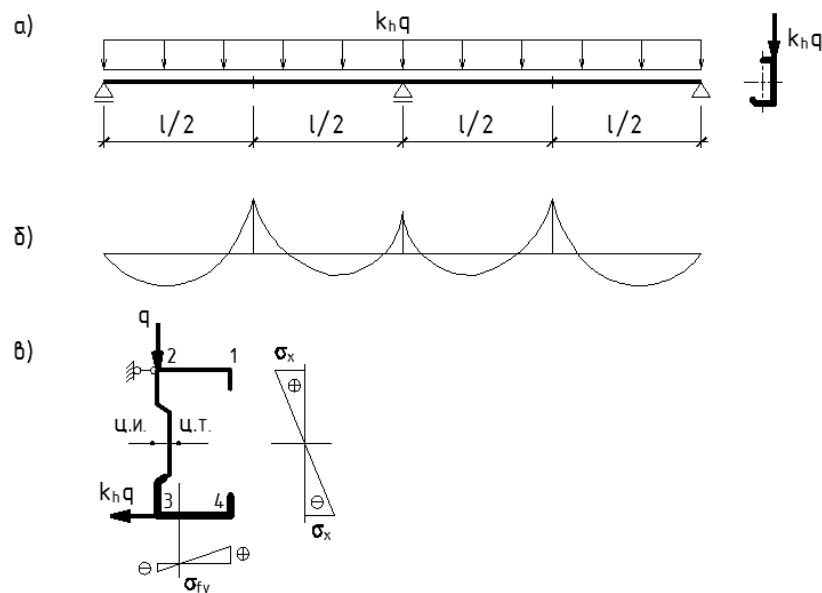


Рисунок 3.4.34 – Расчётная схема нижнего пояса при изгибе под действием равномерно-распределённой боковой нагрузки (вертикальная нагрузка направлена вниз) (а); эпюра изгибающих моментов в поясе из плоскости прогона (б); напряжённое состояние сечения на средней опоре (в)

Таблица 3.4.5 – Сопоставление результатов расчётов для гравитационной нагрузки

Наименование	Обозн	Ед. изм.	Пункт EN1993-1-3	Значение по [23]	Значение по CFSteel	Расхождение, %
Расчёт устойчивости нижнего свободного пояса у средней опоры						
Боковая равномерно-распределённая нагрузка на нижний свободный пояс	q_{hEd}	кН/см	10.1.4.1(3)	0,00009	0,00018*	-
Жёсткость угловой связи	C_D	кНсм/см	10.1.5.2	0,59	0,59	0
Общая жёсткость боковой связи	K	кН/см ²	10.1.5.1	0,00163	0,00160	1,8
Коэффициент упруго-податливой опоры	R	-	10.1.4.1(7)	0,3446	0,3687**	7,0
Поправочный коэффициент для внутренних боковых опор	k_R	-	табл. 10.1 (строка 5)	0,944	0,940	0,4
Изгибающий момент из плоскости на средней опоре	M_{fy}	кНсм	10.1.4.1(5)	0,360	0,613*	-
Условная гибкость нижнего пояса при расчётах его на устойчивость у средней опоры	$\overline{\lambda}_y$	-	10.1.4.2(2)	0,658	0,656	0,3
Расчётная длина свободного пояса	l_{eff}	см	10.1.4.2(3)	105	105	0
Коэффициент устойчивости свободного пояса	χ_{LT}	-	10.1.4.2(1)	0,890	0,891	0,1
Левая часть проверки устойчивости свободной полки	-	кН/см ²	10.1.4.2(1)	24,32	25,34***	4,2
Несущая способность поперечного сечения по сдвигу на опоре						
Момент инерции одного продольного элемента жёсткости	I_s	см ²	6.1.5(2)	1,08	1,10	1,8
Общая высота стенки	s_d	см	6.1.5(2)	17,2	17,3	0,6
Коэффициент k_t	-	-	6.1.5(2)	12,55	12,44	0,9
Условная гибкость стенки	$\overline{\lambda}_w$	-	6.1.5(2)	1,093	1,072	1,9
Критическое напряжение при сдвиге	f_{yb}	кН/см ²	6.1.5(1)	15,59	15,89	1,9
Несущая способность поперечного сечения по сдвигу на опоре	$V_{b,Rd}$	кН	6.1.5(1)	33,648	34,330	2,0

Примечания: * - расхождение за счёт несовпадения положения центра изгиба; в [23] этот параметр равен -0,8 мм, в CFSteel -1,6 мм (разница составляет 0,8 мм); был выполнен контрольный расчёт сечения в [25] – результат: -1,3 мм, разница ([25] – CFSteel) составляет 0,3 мм, что говорит о близости результатов этих расчётов;

** - расхождение за счёт того, что в источнике [23] учитывается момент инерции свободного пояса относительно оси Y I_{fy} , вычисленный в предположении «острых» углов, а в CFSteel учитываются закругления в местахгиба (см. Таблицу 3.4.3); как известно, значение момента сопротивления сечения зависит от момента инерции;

*** - смотри *, **.

Левая часть неравенства проверки устойчивости (3.4.15) по [23] выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_x}{W_{xeff}} + \frac{N}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fy,Ed}}{W_{fy}} = \frac{1}{0,8901} \cdot \frac{423}{19,685} + \frac{0,3595}{1,963} = 24,32 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

В CFSteel данное выражение выглядит так:

$$\frac{1}{0,890} \cdot \frac{422}{18,97} + \frac{0,613}{1,826} = 25,34 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Как видно из сравнения выражений, значения M_x и χ_{LT} практически совпадают. Значения M_{fy} различаются из-за разных значений положения центра изгиба сечения прогона (смотри Примечание 1 к таблице 3.4.5). Причиной различия в значениях моментов сопротивления

W_x и W_{fy} является вычисление геометрических характеристик сечения в [23] в предположении «острых углов»; в то время как в CFSteel учитываются закругления.

Подъёмная нагрузка

В данном случае сжатие в свободном поясе возникает не на опоре, а в пролёте (Рисунок 3.4.32).

При действии подъёмной нагрузки поперечное сечение согласно [23] полностью эффективно, следовательно в дальнейших расчётах участвуют геометрические характеристики полного сечения. По CFSteel сечение также полностью эффективно. На Рисунке 3.4.35 приведены расчётная схема нижнего пояса при изгибе под действием равномерно-распределённой боковой нагрузки $q_h = k_h \cdot q$, эпюра изгибающих моментов в поясе из плоскости прогона и напряжённое состояние сечения прогона в пролёте, где выполняется проверка устойчивости свободного пояса из плоскости прогона. Расчёты сведены в Таблицу 3.4.6.

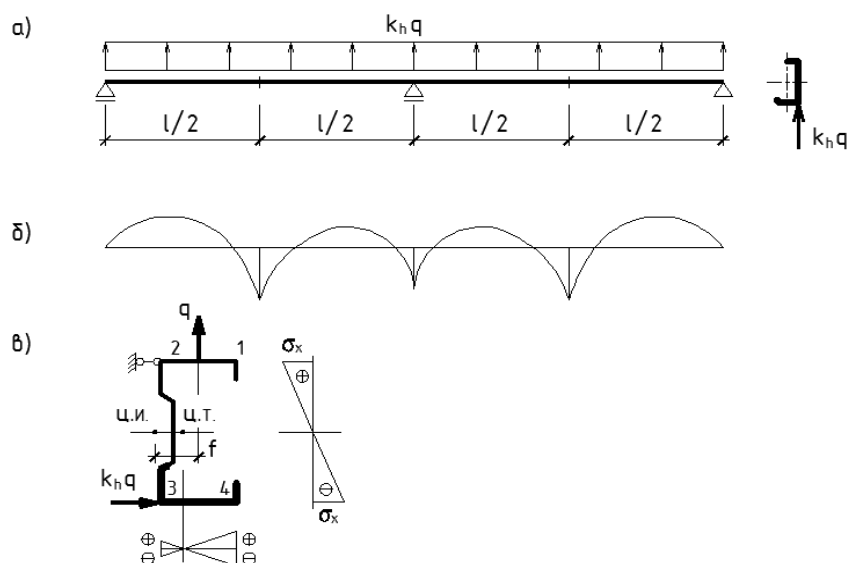


Рисунок 3.4.35 – Расчётная схема нижнего пояса при изгибе под действием равномерно-распределённой боковой нагрузки (вертикальная нагрузка направлена вверх) (а);
эпюра изгибающих моментов в поясе из плоскости прогона (б);
напряжённое состояние сечения на средней опоре (в)

Таблица 3.4.6 – Сопоставление результатов расчётов для нагрузки, направленной вверх

Наименование	Обозн	Ед. изм.	Пункт EN1993-1-3	Значение по [23]	Значение по CFSteel	Расхождение, %
Расчёт устойчивости нижнего свободного пояса в пролёте						
Коэффициент k_h	k_h	-	10.1.4.1(3)	0,188	0,198*	5,3
Боковая равномерно-распределённая нагрузка на нижний свободный пояс	q_{hEd}	кН/см	10.1.4.1(3)	0,00163	0,00173	6,1
Жёсткость угловой связи	C_D	кНсм/см	10.1.5.2	0,59	0,59	0
Общая жёсткость боковой связи	K	кН/см ²	10.1.5.1	0,00163	0,00159	2,4
Коэффициент упруго-податливой опоры	R	-	10.1.4.1(7)	0,3446	0,3687**	7,0
Поправочный коэффициент для внутренних боковых опор	k_R	-	табл.10.1 (строка 5)	-	0,940	-
Изгибающий момент из плоскости в	M_{fyI}	кНсм	10.1.4.1(5)	***	8,82	-

пролёте						
Условная гибкость нижнего пояса при расчётах его на устойчивость в пролёте	$\overline{\lambda}_y$	-	10.1.4.2(2)	0,9858	0,9800	0,6
Расчётная длина свободного пояса	l_{ef}	см	10.1.4.2(3)	157,4	156,6	0,5
Коэффициент устойчивости свободного пояса	χ_{LT}	-	10.1.4.2(1)	0,708	0,712	0,6
Левая часть проверки устойчивости свободной полки прогона	-	$\kappa H/\text{см}^2$	10.1.4.2(1)	***	14,217	-

Примечания: * - расхождение за счёт несовпадения положения центра изгиба; в [23] этот параметр равен -0,8 мм, в CFSteel -1,6 мм (разница составляет 0,8 мм); был выполнен контрольный расчёт сечения в [25] – результат: -1,3 мм, разница ([25] – CFSteel) составляет 0,3 мм, что говорит о близости результатов этих расчётов;

** - расхождение за счёт того, что в источнике [23] учитывается момент инерции свободного пояса относительно оси Y_{Iy} , вычисленный в предположении «острых» углов, а в CFSteel учитываются закругления в местахгиба (см. Таблицу 3.4.3);

*** - в [23] допущена досадная техническая ошибка: при определении изгибающего момента для точки e по табл.10.1 [3] $M_{0,Ed} = q_{h,Ed} \cdot L_a^2/8$ вместо нагрузки $q_{h,Ed}$, равной 0,00163 подставлено значение коэффициента k_h , равное 0,00188; поэтому в таблице значения изгибающего момента из плоскости в пролёте и, соответственно, левой части проверки устойчивости свободной полки прогона по [23] не приведены.

Прочность по нормальным напряжениям в [23] не проверялась.

Максимальный прогиб от нагрузки $q_{ss}=0,87 \text{ кН/м}$ составил: по [23] 6,53 мм, по CFSteel 6,49 мм. Расхождение составляет 0,6%.

Задание 3.6: Данный верификационный расчёт взят из [26] (Example 4.5).

Рассматривается двухпролётный прогон с одинаковыми пролётами $l=5 \text{ м}$ с перехлёстом на средней опоре общей длиной $l \text{ м}$ (рисунок 3.4.36). Уклон кровли $\alpha=8^\circ$. Шаг прогонов $s=1,2 \text{ м}$. Нижний пояс прогона закреплён из плоскости в середине каждого пролёта. Предполагается, что стальной профилированный настил, опирающийся на прогон, является абсолютно жёсткой диафрагмой. Скатная составляющая нагрузок воспринимается опорными устройствами в местах опирания прогона. Также конструктивное решение опор обеспечивает несущую способность по смятию и устойчивости стенки на опоре. Сечение прогона – Z-образный профиль с размерами: $h=200 \text{ мм}$, $t=1,5 \text{ мм}$, $b_1=6 \text{ мм}$, $b_2=74 \text{ мм}$, $c=21,2 \text{ мм}$, $r=3 \text{ мм}$, $t_{coat}=0,04 \text{ мм}$. Гарантированный предел текучести стали $f_y=35 \text{ кН/см}^2$.



Рисунок 3.4.36 – Схема прогона

Нагрузки:

- собственный вес покрытия (вертикальная гравитационная нагрузка):

нормативное значение $q_{nG}=0,10 \text{ кН/м}^2 \cdot 1,2 \text{ м} = 0,12 \text{ кН/м}$;

расчётное значение $q_G=0,12 \text{ кН/м} \cdot 1,35=0,162 \text{ кН/м}$;

- вес снега (вертикальная гравитационная нагрузка):

нормативное значение $q_{ns}=1,2 \text{ кН/м}^2 \cdot 1,2 \text{ м} \cdot \cos 8^\circ = 1,426 \text{ кН/м}$;

расчётное значение $q_s=1,426 \text{ кН/м}^2 \cdot 1,5 = 2,138 \text{ кН/м}$.

Подъёмная нагрузка от ветра (вертикальная составляющая):

нормативное значение $q_{nw}=-0,3 \text{ кН/м}^2 \cdot 1,2 \text{ м} / \cos 8^\circ = -0,364 \text{ кН/м}$;

расчётное значение $q_w=-0,364 \text{ кН/м}^2 \cdot 1,5 = -0,545 \text{ кН/м}$.

Расчёт: Примем $R_y=f_y$. Принятый в [26] модуль упругости стали $E=2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$. В CFSteel в соответствии с [1] принят $E=2,06 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$. Но для данного верификационного примера в программе применён модуль упругости, равный принятому в источнике, откуда взят расчёт [26].

Эпюры усилий в левом пролёте двухпролётного прогона от гравитационной нагрузки для *Сочетания* нагрузок №1 (собственный вес покрытия + вес снега) приведены на рисунке 3.4.37; от подъёмной нагрузки для *Сочетания* №2 (собственный вес покрытия + ветер) – на рисунке 3.4.38. Значения изгибающего момента M_x и поперечной силы Q_y в характерных точках прогона по [26] и CFSteel приведены в таблице 3.4.7.

В [26] выполнена проверка по несущей способности прогона в пролёте в виде $M_x / M_{c,Rd} = 0,442 < 1$. В CFSteel производится проверка прочности по нормальным напряжениям в форме $\sigma_{max} / R_y \gamma_c < 1$. В результате расчёта получено максимальное напряжение в пролёте $\sigma_{max}=16,809 \text{ кН/см}^2$. Отношение $\sigma_{max} / R_y \gamma_c = 0,480 < 1$.

В таблице 3.4.8 приведены геометрические характеристики свободного пояса прогона с прилегающей частью стенки ($1/5 h_w$) по [26] и CFSteel. В таблице 3.4.9 приведено сопоставление результатов расчётов на устойчивость нижнего свободного пояса и несущую способность сечения прогона по сдвигу для гравитационной нагрузки.

На рисунке 3.4.39 приведены результаты расчёта: вкладка *Проверки* для *Сочетания* №1.

Таблица 3.4.7 – Значения M_x и Q_y по [26], [25] и CFSteel

Усилие	Ед. изм.	Значение			Расхождение CFSteel, %	
		[26]	[25]	CFSteel	с [26]	с [25]
Гравитационная нагрузка						
Изгибающий момент в пролёте	кНм	3,67	3,68	3,69	0,5	0,3
Изгибающий момент на средней опоре	кНм	8,09	8,03	7,98	1,4	0,6
Изгибающий момент в месте окончания перехлёста	кНм	4,69	4,66	4,62	1,5	0,9
Поперечная сила на левой опоре	кН	4,13	4,10	4,10	0,7	0
Поперечная сила на средней опоре	кН	7,37	7,31	7,29	1,1	0,2
Поперечная сила в месте окончания перехлёста	кН	6,22	6,17	6,15	1,1	0,2
Подъёмная нагрузка						
Изгибающий момент в пролёте	кНм	0,61	-	0,62	1,6	-
Изгибающий момент на средней опоре	кНм	1,34	-	1,35	0,7	-
Изгибающий момент в месте окончания перехлёста	кНм	0,78	-	0,78	0	-
Поперечная сила на левой опоре	кН	0,68	-	0,69	1,4	-
Поперечная сила на средней опоре	кН	1,22	-	1,23	0,8	-
Поперечная сила в месте окончания перехлёста	кН	1,03	-	1,04	1,0	-

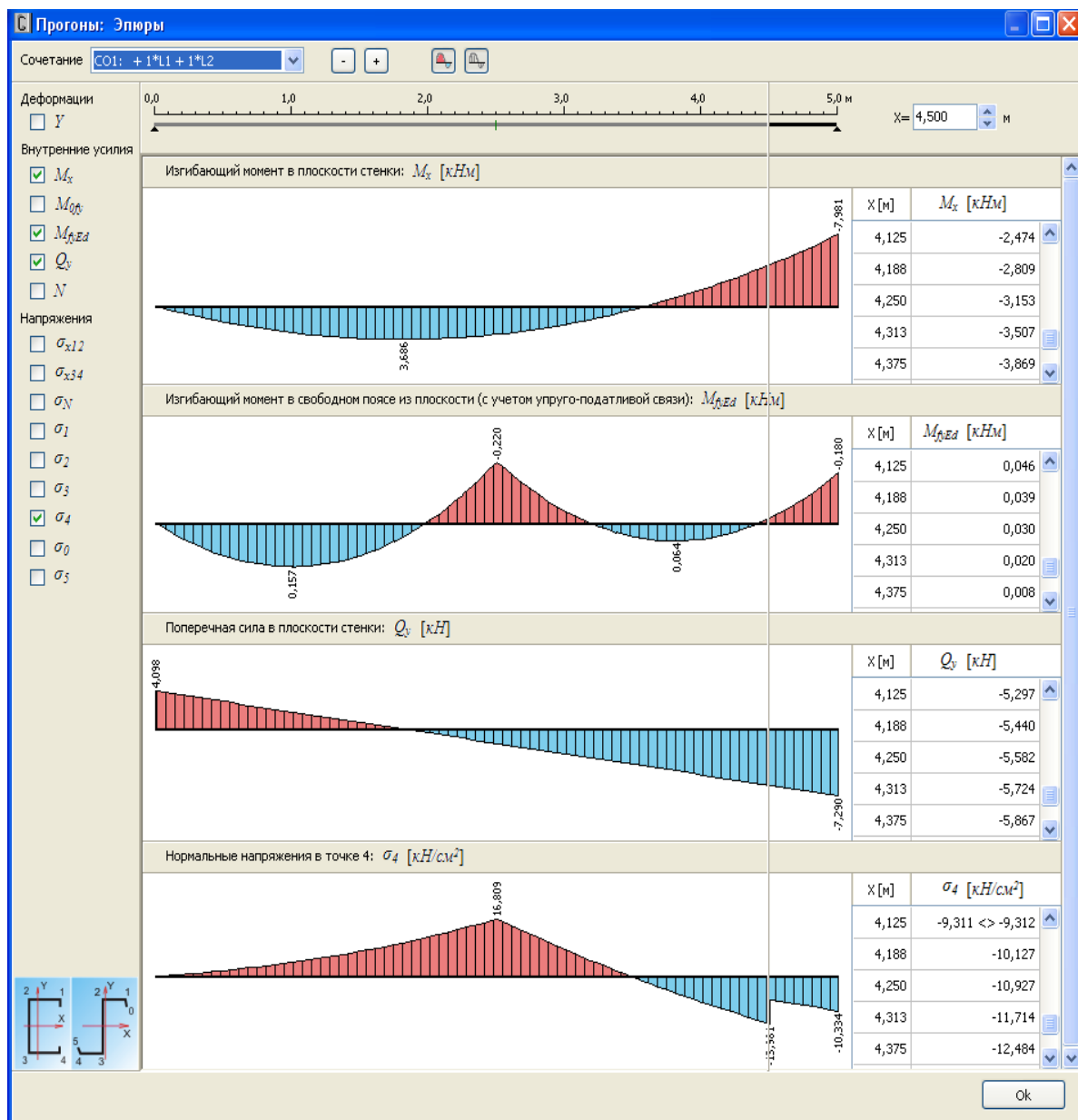


Рисунок 3.4.37 – Эпюры усилий для Сочетания №1 (гравитационная нагрузка)

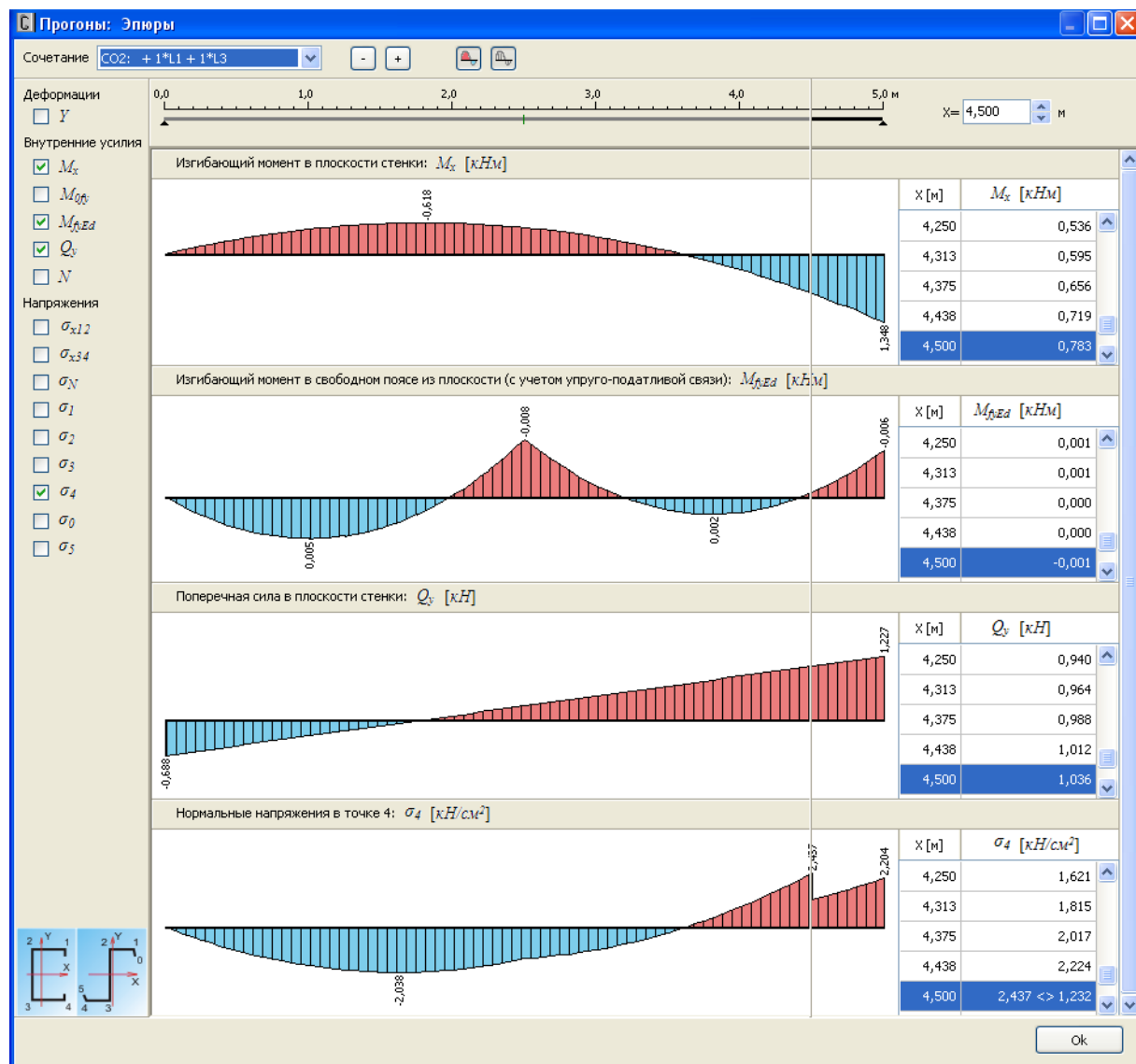


Рисунок 3.4.38 – Эпюры усилий для Сочетания №2 (подъёмная нагрузка)

Таблица 3.4.8 – Геометрические характеристики свободного пояса прогона с прилегающей частью стенки ($1/5 h_w$)

Наименование характеристики	Обозн.	Ед. изм.	Значение по [26]	Значение по CFSteel	Расхождение, %
Площадь поперечного сечения	A_f	см ²	1,857*	1,749	5,8*
Расстояние от срединной плоскости стенки до центра тяжести	X_{cg}	см	2,812	2,824	0,4
Момент сопротивления сечения относительно оси Y для правого волокна в предположении сечения, состоящего из срединных плоскостей (Рисунок 3.4.33)	W_{fy}	см ³	3,38	-	-
Момент сопротивления сечения относительно оси Y для крайнего правого волокна отгиба с учётом реальной толщины и закругления углов	W_{fy}	см ³	-	3,08	-
Радиус инерции относительно оси Y	i_{fy}	см	2,624	2,578	1,8

Примечания: * - в [26] геометрические характеристики сечений вычислены в предположении «острых» углов, в то время как, в CFSteel – с учётом реального закругления углов

Таблица 3.4.9 – Сопоставление результатов расчётов для гравитационной нагрузки

Наименование	Обозн	Ед. изм.	Пункт EN1993-1-3	Значение по [26]	Значение по CFSteel	Расхождение, %
Расчёт устойчивости нижнего свободного пояса на средней опоре						
Момент инерции относительно оси X	I_x	$см^4$	-	330,8	330,1	0,2
Коэффициент k_h	k_h	-	10.1.4.1(4)	0,163	0,155	4,9
Боковая равномерно-распределённая нагрузка на нижний свободный пояс	q_{hEd}	$кН/см$	10.1.4.1(3)	0,00371	0,00352	4,6
Жёсткость угловой связи (в [26] принята по результатам испытаний; в CFSteel – такой же)	C_D	$кНсм/см$	10.1.5.2	0,7	0,7	0
Общая жёсткость боковой связи	K	$кН/см/см$	10.1.5.1	0,0016	0,0016	0
Коэффициент упруго-податливой опоры	R	-	10.1.4.1(7)	0,104	0,109	4,8*
Поправочный коэффициент для внутренних боковых опор	k_R	-	табл.10.1	0,982	0,975	0,2
Расчётная длина свободного пояса	l_{ef}	$см$	10.1.4.2(3)	123,8	123,6	0,2
Условная гибкость нижнего пояса при расчётах его на устойчивость у средней опоры	$\overline{\lambda}_y$	-	10.1.4.2(2)	0,580	0,597	2,9
Элементы левой части формулы проверки устойчивости нижнего пояса (3.4.15)						
Коэффициент устойчивости свободного нижнего пояса	χ_{LT}	-	10.1.4.2(1)	0,926	0,919	0,8
Расчётный изгибающий момент в плоскости прогона	M_x	$кНсм$	10.1.4.4(1)	809	798	1,4
Расчётный изгибающий момент в нижнем поясе из плоскости прогона	M_{fyEd}	$кНсм$	10.1.4.4(1)	18,9	18,0	4,7
Суммарный момент сопротивления нижнего пояса относительно его центральной оси, параллельной плоскости стенки двойного профиля	W_{fy}	$см^3$	10.1.4.4(1)	6,91	6,34	8,2*
Левая часть формулы проверки устойчивости нижнего пояса	-	$кН/см^2$	10.1.4.4(1)	-**	15,99	-
Расчёт устойчивости нижнего свободного пояса в месте обрыва перехлёста средней опоры						
Общая жёсткость боковой связи	K	$кН/см^2$	10.1.5.1	0,000901	0,00091	1,0
Коэффициент упруго-податливой опоры	R	-	10.1.4.1(7)	0,136	0,149	9,5*
Расчётная длина свободного пояса	l_{ef}	$см$	10.1.4.2(3)	122,6	122,2	0,3
Условная гибкость нижнего пояса при расчётах его на устойчивость у средней опоры	$\overline{\lambda}_y$	-	10.1.4.2(2)	0,607	0,616	1,5
Элементы левой части формулы проверки устойчивости нижнего пояса (3.4.15)						
Коэффициент устойчивости свободного пояса	χ_{LT}	-	10.1.4.2(1)	0,915	0,910	0,5
Расчётный изгибающий момент в плоскости прогона	M_x	$кНсм$	10.1.4.4(1)	469	462	1,5
Расчётный изгибающий момент в нижнем поясе из плоскости прогона	M_{fyEd}	$кНсм$	10.1.4.4(1)	18,88***	1,87***	-
Момент сопротивления нижнего пояса относительно его центральной оси, параллельной плоскости стенки профиля	W_{fy}	$см^3$	10.1.4.4(1)	3,38	3,08	8,8*
Левая часть формулы проверки устойчивости нижнего пояса	-	$кН/см^2$	10.1.4.4(1)	-****	16,64	-
Несущая способность поперечного сечения по сдвигу						
Условная гибкость стенки	$\overline{\lambda}_w$	-	6.1.5(2)	1,92	1,90	1,0
Критическое напряжение при сдвиге	f_{yb}	$кН/см^2$	6.1.5(1)	6,361	6,501	2,2
Несущая способность поперечного сечения по сдвигу	$V_{b,Rd}$	$кН$	6.1.5(1)	18,435	18,841	2,2
Несущая способность поперечного сечения из двух профилей по сдвигу	$2V_{b,Rd}$	$кН$	6.1.5(1)	36,87	37,68	2,2
Проверка по несущей способности поперечного сечения на сдвиг на левой опоре	$V_{Ed}/V_{b,Rd}$	-	-	-	0,217	-

Проверка по несущей способности поперечного сечения на сдвиг в месте обрыва перехлёста	$V_{Ed}/V_{b,Rd}$	-	-	0,337	0,326	3,2
Проверка по несущей способности поперечного сечения на сдвиг на опоре	$V_{Ed}/2V_{b,Rd}$	-	-	0,200	0,193	3,5

Примечания: * - в [26] геометрические характеристики сечений вычислены в предположении «острых» углов, в то время как, в CFSteel – с учётом реального закругления углов;

** - в [26] момент сопротивления сечения W_{xeff} в формуле (3.4.15) вычислен для редуцированного сечения в предположении, что максимальные напряжения от изгиба равны пределу текучести материала $f_y=350$ МПа; в то время, как размеры сечения и действующий изгибающий момент в сечении таковы, что редукция по [3] *не требуется*, поэтому в CFSteel принимается $W_{xeff} = W_x$;

*** - в [26] боковой момент у обреза перехлёста средней опоры вычисляется по формуле $M_{fyEd} = 1/12 q_{hEd} L^2 k_R = 18,88$ кНсм (таблица 10.1 [3]), т.е. как на самой *опоре*, но со своим k_R ; в CFSteel принимается реальное значение момента в месте *обреза перехлёста* $M_{ofy} k_R = 1,87$ кНсм (значение момента на опоре в программе $M_{fyEd} = 18$ кНсм);

**** - из-за различий в принятии в расчёт значений W_{xeff} и M_{fyEd} в [26] и CFSteel сравнение результатов не приводится

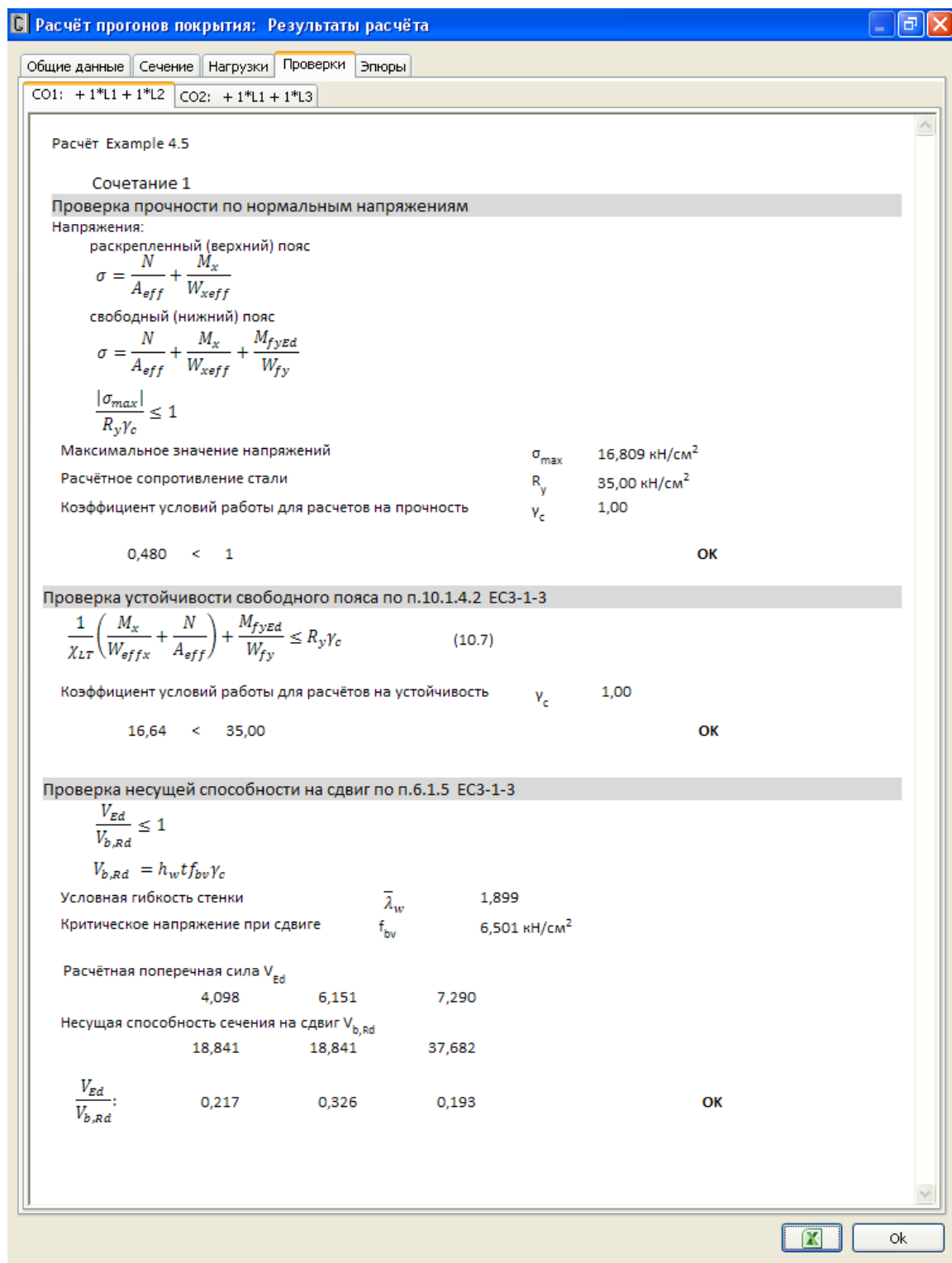


Рисунок 3.4.39 – Результаты расчёта прогона покрытия по Заданию 3.6:
вкладка Проверки (Сочетание №1)

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 16.13330.2011: Актуализированная редакция СНиП II-23-81* Стальные конструкции / Минрегион России.– 2011.- 171 с.
2. СП 53-102-2004 Общие правила проектирования стальных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко. 2004.- 193 с.
3. EN 1993-1-3:2004 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2004.- 125 p.
4. NAS 2001 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members / American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., AISI/COS/NASPEC, 2004
5. AS/NZS 4600:2005 Cold-Formed Steel Structures. Australian/New Zealand Standard, Australia, Sydney, 2006
6. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт-Профиль» / ЦНИИПСК им. Мельникова – М.: 2004.- 69 с.
7. EN 1993-1-5:2003 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-5: Plated structures elements / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2003.- 52 p.
8. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.- 148 с.
9. Marino Ware Cold Formed Steel Framing Systems / Catalog, 2009
10. The Steel Network, Inc. Product Information, 2009
11. Clark Western Building Systems, Inc. Catalog CW-SSFS-TI 01/08
12. Southeastern Stud & Components, Inc., 2009, www.southeasterstud.com
13. A Nucor Steel: Technical Manual, 2009, www.nucunsteel.com
14. SSMA: Steel Stud Manufactures Association. ICBO ER-4943P. Product Technical Information, 2009
15. Heinisuo, M. Design of Cold-Formed Members Following New EN 1993-1-3 / M. Heinisuo, J. Kukkonen // Tampere University of Technology, - 2005,- 21 p.
16. Kalpinis-N.Simos S.A. Product Technical Information, 2009, www.elastron.gr
17. BlueScope Steel Limited. LYSAGHT Zed & Cee Purlins & Girts. Users guide, 2009
18. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988.- 736 с.
19. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчётно-теоретический. В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. А.А. Уманского – Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1972.- 600 с.
20. Александров А.В. Сопротивление материалов: учеб. для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин – М.: Высш. шк., 1955.- 560 с.
21. СП 20.13330.2011: Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия / Минрегион России.– 2011.- 80 с.

22. Кикоть А.А. Определение прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей / А.А. Кикоть, Е.В. Мурзин // Известия вузов. Строительство. – 2011. – № 2. – С. 99-108.
23. Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3 / ECCS TC 7, № 123, 2008.- 235 p.
24. EN1993-1-1:2005 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2005.
25. Карпиловский С.В., Крискунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 592 с.
26. Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R. Design of Cold-formed Steel Structures / ECCS, 2012.- 654 p.