

## Оптимизация конструктивного решения металлической стропильной фермы по критерию массы

*В.Е. Перков, Ю.В. Наумкина*

*Тюменский индустриальный университет*

**Аннотация:** При разработке выпускной квалификационной работы (далее ВКР) возникает проблема выбора оптимального конструктивного решения несущих и ограждающих конструкций. Для её решения могут использоваться нормативные технико-экономические показатели, вариантное сравнение (проектирование) и другие методы. Задачей данного исследования, которое проводится в рамках выполнения выпускной квалификационной работы, является поиск и разработка понятного для практического использования алгоритма выбора эффективного (по материалоемкости) конструктивного решения металлической стропильной фермы.

**Ключевые слова:** оптимизация, материалоемкость, себестоимость, металлическая ферма, проектирование стальных конструкций, STARK ES, расчет фермы, оптимальное конструктивное решение, изменение типа сечения, выбор эффективного конструктивного решения.

Оптимизация – это процесс максимизации выгодных характеристик. Задача оптимизации формулируется критерием оптимизации и варьируемыми параметрами, изменение которых влияет на эффективность процесса в целом. Проблема выбора и оптимизации конструктивных решений рассматривается в трудах современных ученых Герасимова Е.Н., Горохова Е.В., Я.И., Пермякова В.А., Рабиновича М.Г., Холопова Й.С. и зарубежных – Уайлд Д., Хог Э., Арора Я., Мажид К.И.

Оптимизация конструктивных решений технических объектов имеет широкое распространение и направлена на получение более экономичных решений [1]. Обоснование и принятие наиболее целесообразного (оптимального) решения на этапе проектирования позволит сократить расходы на остальных этапах жизненного цикла здания (возведение, эксплуатация и снос). Поэтому оптимизация конструктивных решений продолжает оставаться значимой для строительной отрасли, а постановка цели по экономически обоснованному производству реализуется в рамках федеральных проектов (Федеральный проект «Внедрение наилучших

---

доступных технологий». Регулирование на основе принципов НДТ (наилучших доступных технологий) означает постановку экономически обоснованных целей по внедрению ресурсосберегающих и безотходных производств).

Для того, чтобы принятое конструктивное решение было близко к оптимальному, инженеру необходимо рассмотреть множество вариантов, сравнить их, исходя из принятого критерия оптимизации [1], и после, согласно утвержденному решению, разрабатывать проект.

В данной работе реализуется оптимизация конструкции стропильной металлической фермы пролетом 24 м. Для этого предлагается следующий алгоритм поиска оптимального конструктивного решения:

1. Постановка критерия оптимизации;
2. Поиск возможных варьируемых параметров конструкции;
3. Выбор параметра (параметров) для дальнейшей оптимизации;
4. Расчет конструкции по 1 и 2 группам предельных состояний;
5. Определение технико-экономических показателей конструкции;
6. Вывод об эффективности принятого конструктивного решения.

Проведем апробацию разработанного алгоритма:

1. Критерием оптимизации принимаем минимальную массу конструкции, аналогично исследованиям [2, 3].

2. Значения возможных варьируемых параметров приведены в Таблице 1.

3. В рамках данной работы в качестве параметра оптимизации будем рассматривать тип сечения элементов.

4. Выполним сбор нагрузок для решения задачи. Для моделирования расчетной ситуации принимаем район строительства – г. Тобольск.

---

Таблица №1

## Значения параметров стропильной фермы

Варьируемые параметры (возможные)	Значения
Материал конструкции – класс стали	С345, С355, С390
Тип сечения элементов	Уголок горячекатаный равнополочный по ГОСТ 8509-93 (спаренный уголок)
	Труба стальная электросварная прямошовная по ГОСТ 10704-91 (круглая труба)
	Профиль стальной гнутый замкнутый сварной квадратный по ГОСТ 30245-94 (гнутой профиль) (далее ЗГСП)
Высота фермы	От 1,8 до 3,85 с шагом 0,1 м [4, 5, 6].

Таблица №2

Постоянные нагрузки на 1 м<sup>2</sup> покрытия

	Наименование нагрузки	$q_{н'}$ кгс/м <sup>2</sup>	$\gamma_f$	$q_{p'}$ кгс/м <sup>2</sup>
1	Полимерная мембрана «Plastfoil FL» - 1,2 мм	1,6	1,3	2,08
2	PIR- панели «PirroMembrane» - 120 мм	3,7	1,2	4,44
3	Технониколь «Паробарьер СФ-1000»	1	1,3	1,3
4	Профилированный лист НК 75-750-0.8	11,1	1,05	11,66
5	Металлический прогон: швеллер 27	6	1,05	6,3
Итого:		23,4		25,8

Погонная нагрузка от веса покрытия при шаге колонн  $B=6$  м:

$$q_{\text{пост}} = q_p \cdot B = 25,8 \cdot 6 = 155 \text{ кгс/м}$$

Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия:

$$S_0 = c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,55 = 1,55 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Расчетное значение снеговой нагрузки на покрытие:

$$S = S_0 \cdot \gamma_f = 1,55 \cdot 1,4 = 2,17 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Погонная снеговая нагрузка на ригель поперечной рамы:

$$q_{\text{снег}} = S \cdot B = 2,17 \cdot 6 = 13,02 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

*Составим схемы приложения нагрузок на поперечную раму каркаса*

Нагружение 1 – Постоянная нагрузка (собственный вес фермы)

Предварительно задаемся сечением элементов, статический расчет производим в программном комплексе STARK ES, производим конструктивный расчет, назначаем сечения элементам, далее окончательный статический расчет производим с учетом выбранных типоразмеров, собственный вес которых автоматически учтен в программе.

Нагружение 2 – Постоянная нагрузка (собственный вес конструкции кровли)

$$F_{\text{ряд}} = \frac{q_{\text{пост}} \cdot L_{\phi}}{n - 1} = \frac{1,55 \cdot 24}{9 - 1} = 4,65 \text{ кН}$$

$$F_{\text{кр}} = \frac{F_{\text{ряд}}}{2} = \frac{4,65}{2} = 2,325 \text{ кН}$$

Нагружение 3 – Снеговая нагрузка

$$F_{\text{ряд}} = \frac{q_{\text{снег}} \cdot L_{\phi}}{n - 1} = \frac{13,02 \cdot 24}{9 - 1} = 39,06 \text{ кН}$$

$$F_{\text{кр}} = \frac{F_{\text{ряд}}}{2} = \frac{39,06}{2} = 19,53 \text{ кН}$$

$$F_{\text{ряд}} = \frac{13,02 \cdot 24}{9 - 1} = 39,06 \text{ кН}$$

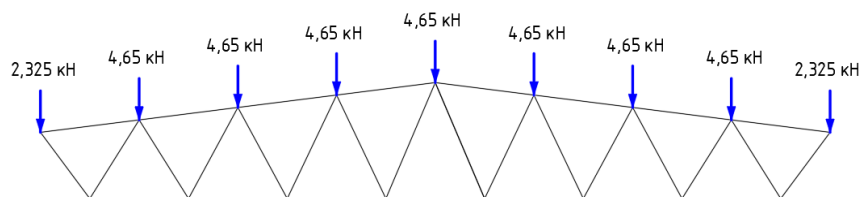


Рис. 1. – Нагружение 2

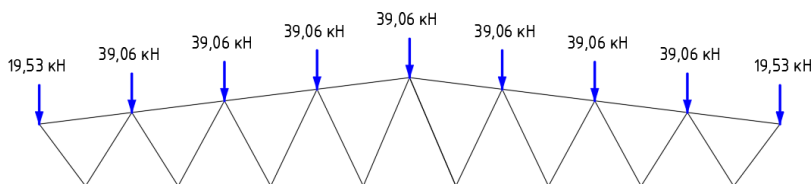


Рис. 2. – Нагрузка 3

*Расчет фермы из спаренных уголков*

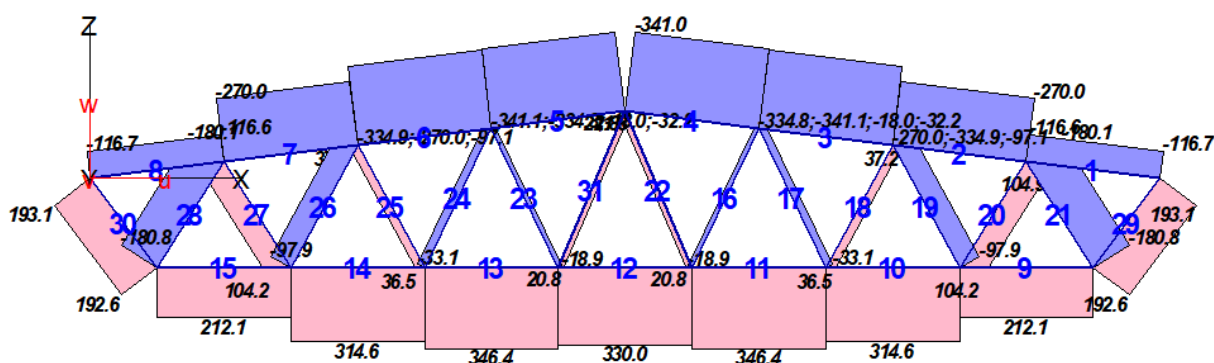


Рис. 3. – Эпюра продольных сил N для фермы из спаренных уголков (постоянная и снеговая нагрузки), полученная в ПК STARK ES, кН

Подбор сечений растянутых элементов

Подбор сечения выполняем по условию прочности для растянутых элементов (СП 16.13330.2017, ф-ла 5):

$$\frac{N}{A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1$$

Произведем подбор для самого нагруженного элемента (элементы № 11 и 13 – см. Рис. 3).

$$A_{тр} = \frac{N}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{34642}{3400 \cdot 0,9} = 11,32 \text{ см}^2$$

По требуемой площади  $A_{тр}$ , согласно ГОСТ 8509-93, назначаем сечение из 2L63x6 с  $A_{ф} = 11,44 \text{ см}^2$ . Проверяем по условию прочности:

$$\frac{34642}{11,44 \cdot 3400 \cdot 0,9} = 0,99 \leq 1, \text{ условие прочности выполняется.}$$

Выполним проверку по предельной гибкости, согласно (СП 16.13330.2017, п. 10.4.1):

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} \leq \lambda_u$$

$$\lambda_x = \frac{300}{2,6} = 115 \leq \lambda_u = 400$$

$$\lambda_y = \frac{300}{1,9} = 158 \leq \lambda_u = 400$$

Условие предельной гибкости в плоскости и из плоскости выполняется.

Расчет и его результаты по остальным растянутым элементам представим в табличном виде – см. Таблицу 6.

#### Подбор сечений сжатых элементов

Подбор сечения выполняем по условию устойчивости для сжатых элементов (СП 16.13330.2017, ф-ла 7):

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

Произведем расчет для элемента №4. Предварительно зададимся гибкостью  $\lambda = 70$ , тогда условная гибкость:

$$\bar{\lambda} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 70 \cdot \sqrt{\frac{3400}{2,1 \cdot 10^6}} = 2,81$$

$$\delta = 9,87 \cdot (1 - \alpha + \beta \cdot \bar{\lambda}) + \bar{\lambda}^2 = 9,87 \cdot (1 - 0,04 + 0,14 \cdot 2,81) + 2,81^2 = 21,25$$

$$\varphi = 0,5 \cdot \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \cdot \bar{\lambda}^2}}{\bar{\lambda}^2 \cdot 0,5} = \frac{21,25 - \sqrt{21,25^2 - 39,48 \cdot 2,81^2}}{2,81^2} = 0,59$$

$$A = \frac{N}{\varphi \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{34111}{0,59 \cdot 3400 \cdot 0,9} = 18,9 \text{ см}^2$$

По требуемой площади  $A_{тр}$ , согласно ГОСТ 8509-93, назначаем сечение из 2L90x7 с  $A_{ф} = 19,28 \text{ см}^2$ . Проверяем по условию устойчивости:

$$\frac{34111}{0,59 \cdot 24,4 \cdot 3400 \cdot 0,9} = 0,77 \leq 1$$

Определим фактическую гибкость:

$$\lambda_x = \frac{l_{ef}}{i} = \frac{303}{3,7} = 82$$

$$\lambda_y = \frac{l_{ef}}{i} = \frac{303}{2,8} = 108$$

Определим условную гибкость:

$$\bar{\lambda} = 108 \cdot \sqrt{\frac{3400}{2,1 \cdot 10^6}} = 4,35$$

$$\delta = 9,87 \cdot (1 - 0,04 + 0,14 \cdot 4,35) + 4,35^2 = 34,4$$

$$\varphi = 0,5 \cdot \frac{34,4 - \sqrt{34,4^2 - 39,48 \cdot 4,35^2}}{4,35^2} = 0,36$$

Предельная гибкость сжатых элементов:

$$\alpha = \frac{N}{\varphi \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{34111}{0,75 \cdot 19,28 \cdot 3400 \cdot 0,9} = 0,77 \geq 0,5$$

$$\lambda_u = 180 - 60 \cdot \alpha = 180 - 60 \cdot 0,75 = 134$$

$$\lambda_u = 180 - 60 \cdot 0,75 = 134$$

$\lambda_{max} = 108 \leq \lambda_u = 135$ , следовательно, условие по предельной гибкости выполняется.

Расчет и его результаты по остальным сжатым элементам представим в табличном виде – см. Рис. 4. Расчет фермы из круглой трубы и из ЗГСП

произведем аналогично, с учетом действующих в них усилий. Результаты расчета представим в табличной форме (Рис. 5-6).

Элемент	№ стержня	Усилие, кгс	Сечение	$\lambda$	$\bar{\lambda}$	$\varphi$	$\gamma_c$	$A, \text{см}^2$	Расчетная длина		Радиус инерции		$\lambda_{max}$	$\bar{\lambda}$	$\varphi$	$\lambda_{cr}$	Пр-ка		
									$l_x$	$l_y$	$i_x$	$i_y$					П	У	
Верхний пояс	1	11666	2L90x7	70	2,81	0,59	0,9	19,28	303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	150	+	+	
	2	27005		70	2,81	0,59			303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	143	+	+	
	3	33490		70	2,81	0,59			303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	135	+	+	
	4	34111		70	2,81	0,59			303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	137	+	+	
	5	34111		70	2,81	0,59			303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	137	+	+	
	6	33490		70	2,81	0,59			303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	135	+	+	
	7	27005		70	2,81	0,59			303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	143	+	+	
	8	11666		70	2,81	0,59			303	303	3,7	2,8	108	4,35	0,36	150	+	+	
Нижний пояс	9	21208	2L63x6	X	X	X	0,9	11,44	300	300	2,6	1,9	158	X	X	X	400	+	+
	10	31462		X	X	X			300	300	2,6	1,9	158	X	X	X	400	+	+
	11	34642		X	X	X			300	300	2,6	1,9	158	X	X	X	400	+	+
	12	33004		X	X	X			300	300	2,6	1,9	158	X	X	X	400	+	+
	13	34642		X	X	X			300	300	2,6	1,9	158	X	X	X	400	+	+
	14	31462		X	X	X			300	300	2,6	1,9	158	X	X	X	400	+	+
	15	21208		X	X	X			300	300	2,6	1,9	158	X	X	X	400	+	+
Раскосы сжатые	16	1886	2L80x5,5	70	2,81	0,59	0,9	13,56	347	347	3,3	2,5	139	5,59	0,24	150	+	+	
	17	3312		70	2,81	0,59			347	347	3,3	2,5	139	5,59	0,34	150	+	+	
	19	9791		70	2,81	0,59			313	313	3,3	2,5	125	5,03	0,29	150	+	+	
	21	18078		70	2,81	0,59			281	281	3,3	2,5	112	4,51	0,34	146	+	+	
	23	1886		70	2,81	0,59			347	347	3,3	2,5	139	5,59	0,34	150	+	+	
	24	3312		70	2,81	0,59			347	347	3,3	2,5	139	5,59	0,34	150	+	+	
	26	9791		70	2,81	0,59			313	313	3,3	2,5	125	5,03	0,29	150	+	+	
	28	18078		70	2,81	0,59			281	281	3,3	2,5	112	4,51	0,34	146	+	+	
Раскосы растянутые	18	3725	2L80x5,5	X	X	X	0,9	13,56	313	313	3,3	2,5	125	X	X	X	400	+	+
	20	10491		X	X	X			281	281	3,3	2,5	112	X	X	X	400	+	+
	22	2182		X	X	X			381	381	3,3	2,5	152	X	X	X	400	+	+
	25	3725		X	X	X			313	313	3,3	2,5	125	X	X	X	400	+	+
	27	10491		X	X	X			281	281	3,3	2,5	112	X	X	X	400	+	+
	29	19315		X	X	X			250	250	3,3	2,5	100	X	X	X	400	+	+
	30	19315		X	X	X			250	250	3,3	2,5	100	X	X	X	400	+	+
	31	2182		X	X	X			381	381	3,3	2,5	152	X	X	X	400	+	+

Рис. 4. – Результаты расчета элементов фермы из спаренных уголков

Элемент	№ стержня	Усилие, кгс	Сечение	$\lambda$	$\bar{\lambda}$	$\varphi$	$\gamma_c$	$A, \text{см}^2$	Расчетная длина		Радиус инерции		$\lambda_{max}$	$\bar{\lambda}$	$\varphi$	$\lambda_{cr}$	Пр-ка		
									$l_x$	$l_y$	$i_x$	$i_y$					П	У	
Верхний пояс	1	11071	219x2,8	70	2,81	0,59	0,9	19,0	303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	150	+	+	
	2	25638		70	2,81	0,59			303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	145	+	+	
	3	31784		70	2,81	0,59			303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	136	+	+	
	4	32365		70	2,81	0,59			303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	135	+	+	
	5	32365		70	2,81	0,59			303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	135	+	+	
	6	31784		70	2,81	0,59			303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	136	+	+	
	7	25638		70	2,81	0,59			303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	145	+	+	
	8	11071		70	2,81	0,59			303	303	7,65	7,65	40	1,6	0,81	150	+	+	
Нижний пояс	9	20195	159x2,5	X	X	X	0,9	12,3	300	300	5,53	5,53	54	X	X	X	400	+	+
	10	29916		X	X	X			300	300	5,53	5,53	54	X	X	X	400	+	+
	11	32917		X	X	X			300	300	5,53	5,53	54	X	X	X	400	+	+
	12	31352		X	X	X			300	300	5,53	5,53	54	X	X	X	400	+	+
	13	32917		X	X	X			300	300	5,53	5,53	54	X	X	X	400	+	+
	14	29916		X	X	X			300	300	5,53	5,53	54	X	X	X	400	+	+
	15	20195		X	X	X			300	300	5,53	5,53	54	X	X	X	400	+	+
Раскосы сжатые	16	1878	102x3	70	2,81	0,59	0,9	9,3	347	347	3,5	3,5	99	3,98	0,4	150	+	+	
	17	3209		70	2,81	0,59			347	347	3,5	3,5	99	3,98	0,4	150	+	+	
	19	9370		70	2,81	0,59			313	313	3,5	3,5	89	3,58	0,5	150	+	+	
	21	17267		70	2,81	0,59			281	281	3,5	3,5	80	3,22	0,52	131	+	+	
	23	1878		70	2,81	0,59			347	347	3,5	3,5	99	3,98	0,4	150	+	+	
	24	3209		70	2,81	0,59			347	347	3,5	3,5	99	3,98	0,4	150	+	+	
	26	9370		70	2,81	0,59			313	313	3,5	3,5	89	3,58	0,5	150	+	+	
	28	17267		70	2,81	0,59			281	281	3,5	3,5	80	3,22	0,52	131	+	+	
Раскосы растянутые	18	3385	102x3	X	X	X	0,9	9,3	313	313	3,5	3,5	89	X	X	X	400	+	+
	20	9819		X	X	X			281	281	3,5	3,5	80	X	X	X	400	+	+
	22	1932		X	X	X			381	381	3,5	3,5	109	X	X	X	400	+	+
	25	3385		X	X	X			313	313	3,5	3,5	89	X	X	X	400	+	+
	27	9819		X	X	X			281	281	3,5	3,5	80	X	X	X	400	+	+
	29	18305		X	X	X			250	250	3,5	3,5	71	X	X	X	400	+	+
	30	18305		X	X	X			250	250	3,5	3,5	71	X	X	X	400	+	+
	31	1932		X	X	X			381	381	3,5	3,5	109	X	X	X	400	+	+

Рис. 5. – Результаты расчета элементов фермы из круглой трубы



Элемент	№ стержня	Усилие, кгс	Сечение	$\lambda$	$\bar{\lambda}$	$\varphi$	$\gamma_c$	A, см <sup>2</sup>	Расчетная длина		Радиус инерции		$\lambda_{max}$	$\bar{\lambda}$	$\varphi$	$\lambda_u$	Пр-ка	
									$l_x$	$l_y$	$i_x$	$i_y$					П	У
Верхний пояс	1	11328	100x100x5	70	2,81	0,59	0,9	18,4	303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	150	+	+
	2	26229		70	2,81	0,59			303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	127	+	+
	3	32518		70	2,81	0,59			303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	115	+	+
	4	33113		70	2,81	0,59			303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	113	+	+
	5	33113		70	2,81	0,59			303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	113	+	+
	6	32518		70	2,81	0,59			303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	115	+	+
	7	26229		70	2,81	0,59			303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	127	+	+
	8	11328		70	2,81	0,59			303	303	3,84	3,84	79	3,2	0,53	150	+	+
Нижний пояс	9	20644	100x100x3				0,9	11,4	300	300	3,94	3,94	76			400	+	+
	10	30591							300	300	3,94	3,94	76			400	+	+
	11	33664							300	300	3,94	3,94	76			400	+	+
	12	32065							300	300	3,94	3,94	76			400	+	+
	13	33664							300	300	3,94	3,94	76			400	+	+
	14	30591							300	300	3,94	3,94	76			400	+	+
	15	20644							300	300	3,94	3,94	76			400	+	+
Раскосы сжатые	16	1900	70x70x5	70	2,81	0,59	0,9	12,36	347	347	2,62	2,62	132	5,31	0,26	150	+	+
	17	3266		70	2,81	0,59			347	347	2,62	2,62	132	5,31	0,26	150	+	+
	19	9566		70	2,81	0,59			313	313	2,62	2,62	119	4,79	0,31	132	+	+
	21	17639		70	2,81	0,59			281	281	2,62	2,62	107	4,31	0,36	113	+	+
	23	1900		70	2,81	0,59			347	347	2,62	2,62	132	5,31	0,26	150	+	+
	24	3266		70	2,81	0,59			347	347	2,62	2,62	132	5,31	0,26	150	+	+
	26	9566		70	2,81	0,59			313	313	2,62	2,62	119	4,79	0,31	132	+	+
	28	17639		70	2,81	0,59			281	281	2,62	2,62	107	4,31	0,36	113	+	+
Раскосы растянутые	18	3494	70x70x5				0,9	12,36	313	313	2,62	2,62	119			400	+	+
	20	10074							281	281	2,62	2,62	107			400	+	+
	22	2006							381	381	2,62	2,62	145			400	+	+
	25	3494							313	313	2,62	2,62	119			400	+	+
	27	10074							281	281	2,62	2,62	107			400	+	+
	29	18730							250	250	2,62	2,62	95			400	+	+
	30	18730							250	250	2,62	2,62	95			400	+	+
	31	2006							381	381	2,62	2,62	145			400	+	+

Рис. 6. – Результаты расчета элементов фермы из ЗГСП

*Расчет по второй группе предельных состояний*

Вертикальный предельный прогиб фермы  $f_u = l/250$

(СП 20.13330.2016, Табл. Д.1). Длина фермы  $l$  составляет 24 м,

следовательно,  $f_u = \frac{2400}{250} = 9,6$  см.

Величину прогиба определим в программном комплексе, основанном на методе конечных элементов, аналогично исследованиям [7, 8].

Прогиб фермы из спаренных уголков, согласно результату расчетной программы, составляет  $f = 2,07$  см, что меньше предельно допустимого:

$f = 2,07$  см  $\leq f_u = 9,6$  см, следовательно, проверка по второй группе предельных состояний выполняется.

Прогиб фермы из круглой трубы -  $f = 3,19$  см, что меньше предельно допустимого:  $f = 3,19$  см  $\leq f_u = 9,6$  см, следовательно, проверка по второй группе предельных состояний выполняется.

Прогиб фермы из ЗГСП -  $f = 2,12$  см, что меньше предельно допустимого:  $f = 2,12$  см  $\leq f_{\text{л}} = 9,6$  см, следовательно, проверка по второй группе предельных состояний выполняется.

#### 5. Определение массы конструкции

Масса фермы  $G$  состоит из массы основных деталей — стержней фермы  $G_o$  и массы вспомогательных деталей  $G_b$ . Основные элементы, их размеры и масса зависят от действующих усилий и определяются прочностным расчетом. Вспомогательные детали составляют конструктивное оформление фермы и непосредственно не зависят от силовых воздействий. Их назначение состоит в обеспечении устойчивости основных деталей (прокладки между уголками), в соединении основных деталей между собой (фасонки), компоновки опорных узлов и т.д. [1]

Масса вспомогательных деталей учитывается строительным коэффициентом  $\psi$  и может быть определена по формулам, которые предложил Я.М. Лихтарников, [9, стр. 57]:

- для ферм из уголков:  $\psi = 1,13 + \frac{64,5}{q \cdot L}$
- для круглых и прямоугольных труб:  $\psi = 1,03 + \frac{53,6}{q \cdot L}$

Таким образом, масса фермы определяется:  $G = G_o + G_b = \psi \cdot G_o$

Геометрические  
размеры фермы  
принимает в  
соответствии с Рис. 7.

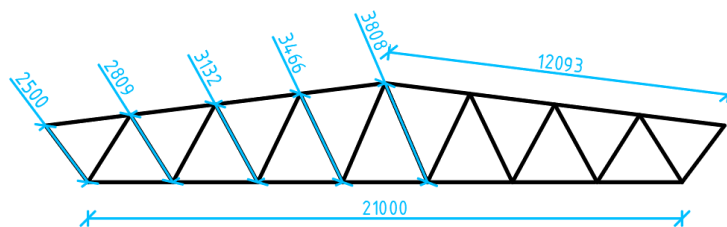


Рис. 7. – Геометрические размеры фермы

Таблица №3

Определение массы ферм

Элемент	Сечение	Вес 1 м.п., кг	Длина, м	$G_o$ , кг	$\psi$	$G$ , кг
<i>Ферма из спаренных уголков</i>						
верхний пояс	2L90x7	9,64	24,186	1387,85	1,307	1814
нижний пояс	2L63x6	5,72	21,000			
раскосы	2L80x5,5	6,78	50,244			
<i>Ферма из круглой трубы</i>						
верхний пояс	219x2,8	14,93	24,186	932,16	1,179	1099
нижний пояс	159x2,5	9,68	21,000			
раскосы	102x3	7,32	50,244			
<i>Ферма из ЗГСП</i>						
верхний пояс	100x100x5	18,57	24,186	1321,78	1,178	1557
нижний пояс	100x100x3	11,48	21,000			
раскосы	70x70x5	12,57	50,244			

Определение стоимости конструкций

Решение этого вопроса подразумевает известную долю приближенности, поскольку стоимость черных металлов может зависеть от рыночных колебаний. Кроме того, при определении действующих цен на металлопрокат наблюдался некоторый разброс цен у различных поставщиков, а также изменение стоимости для различных калибров сечений. Однако, поскольку целью настоящей работы является выявление общих зависимостей, мы считаем возможным использование усредненных значений стоимости металлопроката [10]. Уточним, что в данной работе будем рассчитывать только стоимость металлопроката, принимая ее за стоимость фермы. Согласно открытым данным компании «А ГРУПП», установлены цены металлопроката (см. Табл. 3). Результаты расчета стоимости ферм представлены в Таблице 4.

Таблица №4

Данные цен металлопроката

Сечение	Цена за 1 тонну	Сечение	Цена за 1 тонну	Сечение	Цена за 1 тонну
L90x90x7	68 800	o219x2,8	86 000	□100x100x5	81 000
L63x63x6	66 300	o159x2,5	86 000	□100x100x3	82 000
L80x80x5,5	63 800	o102x3	82 000	□70x70x5	83 500

6. Заключение

Таблица №5

Показатели массы и стоимости разных конструкций ферм

Сечение	Масса, кг			Стоимость, руб
	основных деталей	вспомогательных деталей	общая	
Уголок равнополочный	1387,85	426,15	1814 (G <sub>1</sub> )	91104,2 (F <sub>1</sub> )
Труба стальная круглая	932,16	166,84	1099 (G <sub>2</sub> )	78694,9 (F <sub>2</sub> )
ЗГСП	1321,78	235,22	1557 (G <sub>3</sub> )	108884,3 (F <sub>3</sub> )
Соотношения, %	$G_2/G_3$	71	$F_2/F_1$	14
	$G_2/G_1$	61	$F_1/F_3$	16
	$G_3/G_1$	86	$F_2/F_3$	28



Рис. 8. – Изменение массы фермы в зависимости от типа сечения

Рис. 9. – Изменение стоимости фермы в зависимости от типа сечения

#### Выводы:

1. Ферма из круглой трубы легче фермы из ЗГСП на 29 %;
2. Ферма из круглой трубы легче фермы из спаренного уголка на 39 %;
3. Ферма из ЗГСП легче фермы из спаренного уголка на 14 %;
4. Трубчатое сечение эффективнее гнутого профиля, что хорошо согласуется с теорией проектирования стальных конструкций;
5. Ферма из круглой трубы дешевле фермы из спаренных уголков на 14%;
6. Ферма из спаренных уголков дешевле фермы из ЗГСП на 16 %;
7. Ферма из круглой трубы дешевле фермы из ЗГСП на 28%;
8. Круглое сечение, как по материалоемкости, так и по себестоимости превосходит другие исследуемые типы сечений.

#### Основные результаты проведенного исследования:

1. Выполнен анализ проблематики, в рамках выполнения ВКР;
2. Предложен алгоритм поиска оптимального конструктивного решения;
3. Апробирован предложенный алгоритм и рекомендован к использованию в процессе выполнения ВКР.

#### Литература

1. Василькин А.А., Щербина С.В. Построение системы автоматизированного проектирования при оптимизации стальных стропильных ферм // Вестник МГСУ. 2015. №2. С. 21-37.
  2. Fedorik F. Efficient design of a truss beam by applying first order optimization method // 11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013, ICNAAM. 2013. Vol. 1558. Issue 1. pp. 2171—2174.
  3. Balling, R., Briggs R., Gillman K. Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm // Journal of Structural Engineering. – ASCE. –2006. – V. 132. – pp. 1158–1165.
-

4. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатъева В.С. и др. Металлические конструкции: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования под ред. Ю.И. Кудишина. – 13-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 688 с.

5. Василькин А.А., Щербина С.В. Автоматизированное решение задачи определения оптимальной высоты стальной фермы по критерию минимума массы при вариации высоты фермы // Сборник материалов Международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании». М.: ФГБОУ ВПО "МГСУ" (НИУ). С. 131-134.

6. Проектирование металлических конструкций / Под. ред. В.В. Бирюлева, М. Стройиздат, 1990. 432 с.

7. Никонова Е.В. Оптимизация размеров стенки гофробалок применяемых в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2022. №3. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_47\\_\\_3\\_Nikonova.pdf\\_58f4bcf6b1.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_47__3_Nikonova.pdf_58f4bcf6b1.pdf)

8. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента // Инженерный вестник Дона. 2019. №4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_32\\_skachkov\\_N2.pdf\\_57d57369eb.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_32_skachkov_N2.pdf_57d57369eb.pdf)

9. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. М.: Стройиздат, 1979. 319 с.

10. Василькин А.А. Оптимизация стальных конструкций с использованием САПР // Вестник ТГАСУ. 2016. №1. С. 116-124.

### References

1. Vasil'kin A.A., Shcherbina S.V. Vestnik MGSU. 2015. №2. pp. 21-37.

2. Fedorik F. 11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013, ICNAAM. 2013. Vol. 1558. Issue 1. pp. 2171-2174.

---



3. Balling, R., Briggs R., Gillman K. Journal of Structural Engineering. ASCE. 2006. V. 132. pp. 1158-1165.
4. Kudishin YU.I., Belenya E.I., Ignat'eva V.S. i dr. Metallicheskie konstrukcii: uchebnik dlya stud. uchrezhdenij vyssh. prof. obrazovaniya [Metal structures: a textbook for students. institutions of higher prof. education] M.: Publishing Center "Academy", 2011, 688 p.
5. Vasil'kin A.A., SHCHerbina S.V. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Integraciya, partnerstvo i innovacii v stroitel'noj nauke i obrazovanii». Moskva. 2013, pp. 131-134.
6. Birjuleva V.V. Proektirovanie metallicheskih konstruktsij [Design of metal structures]. Moskva. Strojizdat, 1990. 432 p.
7. Nikonova E.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №3. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_47\\_\\_3\\_Nikonova.pdf\\_58f4bcf6b1.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_47__3_Nikonova.pdf_58f4bcf6b1.pdf).
8. Ustimenko E.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_32\\_skachkov\\_N2.pdf\\_57d57369eb.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_32_skachkov_N2.pdf_57d57369eb.pdf).
9. Likhtarnikov Ya.M. Variantnoe proektirovanie i optimizatsiya stal'nykh konstruktsiy [Trial Design and Optimization of Steel Structures]. Moskva, Stroyizdat Publ., 1979, 319 p.
10. Vasil'kin A.A. Vestnik TGASU. 2016. №1. pp. 116-124.