

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию
для студентов специальности
6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование
и производство материалов и изделий из них»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 621.791
ББК 30.4
П79

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства»
«16» сентября 2025 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук, доц. Д. Н. Юманов

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

Методические рекомендации к курсовому проектированию по дисциплине «Проектирование сварных конструкций» предназначены для студентов специальности 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать	. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л.	. Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

1 Цели и задачи курсового проекта.....	4
2 Тематика курсовых проектов.....	4
3 Содержание и объем проекта.....	4
4 Особенности и последовательность проектирования различных металлоконструкций.....	8
5 Защита курсового проекта.....	26
Список литературы.....	26

1 Цели и задачи курсового проекта

Курсовой проект по дисциплине «Проектирование сварных конструкций» служит для получения практических навыков в конструктивно-технологическом проектировании конструкций, а также проверки знаний студентов и их умений самостоятельно решать комплексные задачи по расчету сварных металлоконструкций.

При выполнении курсового проекта необходимо учитывать требования по снижению металлоемкости конструкций, трудоемкости изготовления, общей стоимости, сокращению сроков монтажа и повышению их надежности и долговечности.

Сварная конструкция должна быть спроектирована на высоком инженерном уровне и предусматривать применение современных методов сборки, сварки и монтажа. Предпочтение должно отдаваться индустриальным методам изготовления.

Работая над курсовым проектом, необходимо использовать знания по общетехническим и специальным дисциплинам, а также показать навыки применения вычислительной техники при решении типовых проектных задач и работы с технической и справочной литературой, ТНПА.

2 Тематика курсовых проектов

Объектом курсового проекта выступают разнообразные строительные и машиностроительные конструкции. В качестве примера можно привести разработку проекта следующих сварных конструкций: резервуар с плоским дном для хранения нефтепродуктов, сферический резервуар, сварная мостовая ферма, цилиндрический газгольдер и др.

3 Содержание и объем проекта

Курсовой проект содержит расчетно-пояснительную записку и графическую часть. Объем расчетно-пояснительной записки составляет 20–30 страниц. Расчетно-пояснительная записка оформляется на листах формата А4. На каждом листе оставляются поля следующих размеров: слева – 30 мм, сверху и снизу – 20 мм, справа – 10 мм. Все страницы записки нумеруются порядковым номером и подшиваются в обложку из плотной бумаги.

Основные надписи для текстовой документации (пояснительной записки) выполняются в соответствии с требованиями ЕСКД. При оформлении сборочных чертежей сварных конструкций следует обратить внимание на условное изображение и обозначение сварных соединений по ГОСТ 2.312–72. Расчетные формулы должны иметь сквозную нумерацию.

В расчетах и описаниях необходимо давать ссылки на использованную литературу по тексту пояснительной записки. Список литературных источников оформляется по ГОСТ 7.1–2003.

3.1 Структура пояснительной записки

1 Техническое задание на проектирование.

2 Содержание.

3 Общая часть.

4 Расчетная часть.

5 Технологическая часть.

6 Контроль качества.

7 Охрана труда.

Заключение.

Список использованных источников.

Приложение А. Спецификации чертежей курсового проекта.

Приложение Б. Результаты компьютерных расчетов элементов конструкции.

3.2 Содержание и последовательность выполнения разделов пояснительной записки

Преподаватель выдает студенту техническое задание на проектирование, которое включает основные характеристики и условия работы конструкции.

В общей части дается описание конструкции, ее назначение, выбор и обоснование материала. Выбор материала производится исходя из климатических условий, а также из соображений снижения массы и общей себестоимости конструкции.

Расчетная часть включает выбор расчетной схемы и определение геометрических размеров элементов заданной конструкции. В первую очередь производится выбор и обоснование метода расчета элементов конструкции (по допускаемым напряжениям или по предельному состоянию), определяется порядок выполнения расчетов.

Выбор марки стали для элементов конструкций должен производиться с учетом требуемых показателей и характеристик: гарантированного минимального предела текучести, временного сопротивления, ударной вязкости, необходимой хладостойкости, толщины проката, а в случае повышенной коррозионной активности хранимого продукта – по коррозионной стойкости. Исходя из места установки конструкции, по СНиП 23-01–99 *Строительная климатология* определяется температура воздуха наиболее холодных суток, по которой осуществляется выбор марки стали.

Прежде чем приступить к составлению схемы нагружения конструкции, необходимо определить основные геометрические параметры конструкции и обосновать их (высота и диаметр резервуара, схема решетки ферм и вышек, соотношение пролета и высоты ферм, соотношение высоты и ширины опорной части у вышек и т. д.). На практике все геометрические размеры конструкций следует увязывать с габаритами транспортных средств. При перевозке по железной дороге наибольший размер конструкции по вертикали равен 3,8, по горизонтали – 3,2, а по длине – 13 м для одной четырехосной платформы.

При подборе расчетных сечений конструкции обеспечение несущей

способности должно сочетаться с оптимальной унификацией, направленной на сокращение номенклатуры профилей проката и конструктивных элементов (косынок, фасонки, ребер и т. д.). В целях экономии металла расчетное напряжение в элементах не должно отличаться от допускаемых напряжений или расчетных сопротивлений более чем на 5 %...7 %.

Все сварные соединения должны быть рассчитаны на равнопрочность с основным металлом. В проекте необходимо стремиться к максимальному снижению массы наплавленного металла, т. к. от этого фактора зависят такие технико-экономические показатели, как трудоемкость, расход сварочных материалов и электроэнергии. Расчетные сопротивления сварных соединений следует определять по СНиП II–23 [10].

Все сварные соединения сводятся в таблицу 3.1, которая должна быть представлена на листе графической части.

Таблица 3.1 – Сводная таблица сварных швов

Номер шва	Обозначение шва на чертеже	Сварное соединение		Длина шва, м	Масса наплавленного металла, кг
		Подготовка кромок	Эскиз шва		
1	ГОСТ 5264-80-T1-Δ5				
...					
n					
Масса наплавленного металла на сварную конструкцию, кг					

В технологической части проекта излагаются принципиальные решения конструктивно-технологического плана, направленные на применение прогрессивных технологических процессов сборки, сварки и монтажа изделия, при этом предпочтение отдается индустриальным методам изготовления.

В данном разделе делается выбор и обоснование способа изготовления заготовок, методов раскроя. Исходный материал должен подбираться из расчета получения минимальных отходов металла и максимального сокращения протяженности сварных швов (например, формат листового проката, применение гнутого профиля и т. п.).

Должна быть тщательно продумана и описана технология поузловой и общей сварки как в стационарных условиях, так и в условиях монтажа. Прогрессивным является применение индустриальных методов изготовления конструкций с максимальным переносом работ в стационарные производственные условия, например метода рулонирования листовых конструкций.

При этом излагаются требования, которые были выполнены в проекте для обеспечения применения индустриального метода изготовления.

Производится выбор и обоснование способа сварки, сварочного оборудования, сварочных материалов и режимов сварки как в стационарных условиях, так и в условиях монтажа. Сварная конструкция должна быть отработана на технологичность. Комплекс мероприятий по получению необходимого уровня

технологичности конструкции должен обеспечивать технологичность по изготовлению, транспортабельности и эксплуатации.

В разделе «Контроль качества» описываются методы контроля, применяемые при изготовлении данной конструкции. Необходимо описать методы, используемые в стационарных и монтажных условиях при изготовлении данной конструкции (визуальный контроль, проверка герметичности, физические методы для определения внутренних дефектов, проверка механических свойств сварных соединений).

В разделе «Охрана труда» следует изложить требования по охране труда при выполнении сборочно-сварочных и контрольных работ, а также этих работ в условиях монтажа.

В разделе «Заключение» следует отразить соответствие содержания проекта полученному заданию. Отмечаются основные положительные перемены и показатели, которые осуществлены в проекте. Здесь же приводятся следующие показатели: масса металлоконструкции, общая масса наплавленного металла, удельная масса металлоконструкции, т. е. масса, отнесенная к показателям объема, высоты, длины пролета и т. д., протяженность сварных швов, выполненных на заводе и на монтаже.

3.3 Графическая часть проекта

Данная часть проекта содержит:

- 1) расчетную схему конструкции, выполненную на одном листе формата А1 (841 × 594 мм), с указанием основных геометрических размеров и полученных расчетных нагрузок (в некоторых проектах эта схема может быть представлена в пояснительной записке);
- 2) общий вид конструкции с разрезами, сечениями, выносными элементами, поясняющими конструктивную особенность изделия и сопряжения отдельных элементов, – 1–2 листа;
- 3) сводную таблицу сварных швов объекта проектирования с указанием их геометрических размеров, – 1 лист;
- 4) технологический лист, поясняющий технологию сборки и сварки или монтажа изделия, – 1 лист;
- 5) результаты прочностных расчетов, выполненных с применением вычислительной техники (выполняется по согласованию с руководителем), – 1 лист.

Расчетная схема конструкции может содержать схему нагружения, эпюры внутренних силовых факторов и напряжений, необходимых впоследствии для расчета, графическое или аналитическое определение усилий в элементах конструкции, схему грузовых площадей для определения ветровых нагрузок, таблицы расчетных величин.

Сводная таблица сварных швов составляется в соответствии с требованиями ГОСТов и СТБ на данный вид сварного соединения и должна содержать чертежи сварных соединений на этапе подготовки к сварке и после выполнения сварных швов.

На технологическом листе может быть представлен чертеж общего вида

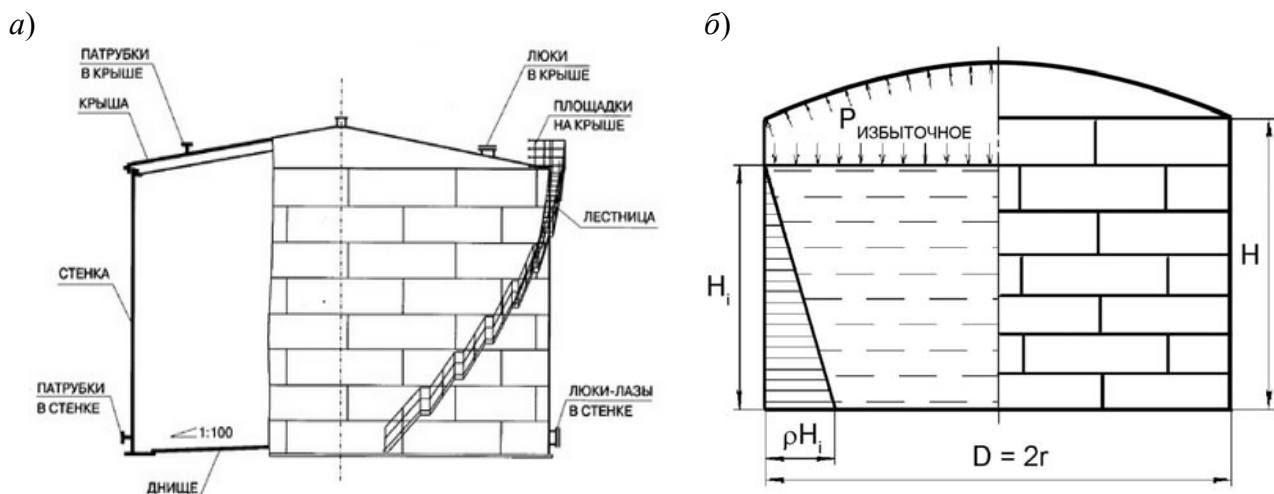
приспособления (установки) для сборки или сварки изделия, а также схемы, показывающие последовательность операций сборки и сварки отдельных элементов конструкции.

Графическая часть выполняется на четырех листах формата А1 в соответствии с требованиями ЕСКД.

4 Особенности и последовательность проектирования различных металлоконструкций

4.1 Вертикальный цилиндрический резервуар с плоским днищем

Резервуар вертикальный стальной (РВС) цилиндрический – объемное, наземное сооружение в форме стоящего цилиндра, со своими установочными характеристиками, предназначенное для приема, хранения, измерения объема и выдачи нефти и нефтепродуктов. Основными составными частями резервуара являются основание, днище, стенка и крыша (рисунок 4.1).



а – общий вид резервуара; б – схема нагружения резервуара внутренним давлением

Рисунок 4.1 – Резервуар вертикальный стальной цилиндрический

В зависимости от объема и места расположения резервуары подразделяются на четыре класса по степени опасности: класс I – резервуары объемом более 50 000 м³; класс II – резервуары объемом от 20 000 до 50 000 м³, а также резервуары объемом от 10 000 до 50 000 м³, расположенные непосредственно по берегам рек, крупных водоемов и в черте городской застройки; класс III – резервуары объемом от 1000 до 20 000 м³; класс IV – резервуары объемом менее 1000 м³. Класс опасности должен учитываться при назначении специальных требований к материалам, методам изготовления, объемам контроля качества, коэффициентов надежности по ответственности.

Резервуары объемом 5000 м³ и более должны проектироваться как резервуары, изготавливаемые методом полистовой сборки. Резервуары объемом до 5000 м³ могут проектироваться как резервуары, изготавливаемые методом полистовой или рулонной сборки. Конструктивное исполнение резервуаров и их элементов рекомендуется принимать по таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Конструктивное исполнение резервуаров

Объем резервуара, м ³	Днище	Стенка		Крыша			Лестница		
	полистовое	рулонная	полистовая	сферическая	каркасная	плавающая	кольцевая	шахтная	маршевая
2000	+	+	+	+	+	—	+	+	—
3000	+	+	+	+	+	—	+	+	—
5000	+	—	+	+	+	—	+	—	+
10 000	+	—	+	+	—	—	+	—	+
20 000	+	—	+	+	—	—	+	—	+
30 000	+	—	+	+	—	—	+	—	+

Геометрические размеры резервуара назначают по рекомендациям таблицы 4.2 исходя из объема хранимой жидкости V . Например, для резервуара объемом $V = 20000$ м³ по таблице 4.2 принимаем номинальную высоту резервуара $H_{ном} = 16$ м.

Наиболее часто в резервуарах применяют листы размерами 1500 × 6000, 1800 × 8000 и 2000 × 8000 мм. С учетом обработки кромок листов путем обрезки на гильотинных ножницах или строжкой на 10 мм на кромкострогательных станках высоту резервуаров следует принимать кратной 1490, 1790 или 1990 мм в зависимости от принятого типоразмера листов, а длину окружности – кратной, соответственно, 5990 или 7990 мм. При необходимости разрешается принимать длину окружности кратной половине длины листов. С учетом обработки кромок листа при дальнейших расчетах принимаются следующие его размеры: 1990 × 7990 мм. Соответственно, количество поясов в резервуаре будет равно восьми ($N_n = 8$). Точная высота резервуара $H = 1990 \cdot 8 = 15920$ мм.

Радиус резервуара определяется из формулы для объема цилиндра

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H, \quad (4.1)$$

где r – радиус резервуара, м;

H – высота стенки резервуара, м.

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi H}} = \sqrt{\frac{20000 \cdot 10^3}{\pi \cdot 15920}} = 20002 \text{ мм.}$$

Таблица 4.2 – Объемы резервуаров рекомендуемого параметрического ряда

Высота стенки, м	Внутренний диаметр стенки, м														
	10,43	12,33	15,18	18,98	20,92	22,80	28,50	34,20	39,90	45,60	50,70	55,80	60,70	66,00	71,10
6,0	513	716	1086	1698	2062	2450									
7,5	641	896	1357	2122	2578	3062									
9,0	769	1075	1629	2546	3094	3675									
10,5	897	1254	1900	2971	3609	4287									
12,0	1025	1433	2172	3395	4125	4899	7655	11024	15004	19598	24226	29345	34726	41054	47644
13,5	1153	1612	2443	3820	4640	5512	8612	12402	16880	22047	27255	33014	39066	46186	53600
14,0							8931	12861	17505	22864	28264	34236	40513	47897	
15,0	1282	1791	2715	4244	5156	6124	9569	13779	18755	24497	30283	36682	43407	51318	
16,0							10207	14698	20006	26130	32302	39127	46301		
16,5	1410	1970	2986	4668	5671	6737	10526	15157	20631	26947	33311	40350	47748		
18,0	1538	2149	3258	5093	6187	7349	11483	16535	22507	29396	36339	44018	52088		
19,5	1666	2328	3529	5517	6703	7961	12440	17913	24382	31846	39368	47686			
20,0	1709	2388	3620	5659	6875	8166	12759	18373	25007	32663	40377	48909			
21,0	1794	2507	3801	5942	7218	8574	13397	19291	26258	34296	42396	51354			
22,0	1880	2627	3982	6225	7562	8982	14035	20210	27508	35929	44415				
23,0							14673	21129	28758	37562	46434				
24,0							15311	22047	30009	39195	48453				
25,0							15948	22966	31259	40828	50471				

Периметр резервуара L_n и число листов в поясе N_n

$$L_n = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 20002 = 125613 \text{ мм}; \quad (4.2)$$

$$N_n = \frac{L_n}{L} = \frac{125613}{7990} = 15,7, \quad (4.3)$$

где L – длина листа пояса резервуара, м.

Предпочтительней округлять число листов в поясе до целого или выбирать последний лист равным половине длины листа.

Принимаем число листов в поясе $N_n = 8$. Тогда периметр резервуара

$$L_n = 16 \cdot 7990 = 127840 \text{ мм},$$

а окончательный радиус

$$r = \frac{L_n}{2 \cdot \pi} = \frac{127840}{2 \cdot \pi} = 20346 \text{ мм}.$$

Уточненный объем резервуара

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H = \pi \cdot 20,346^2 \cdot 15920 \approx 20704 \text{ м}^3.$$

Выбор марки стали для всех элементов конструкции проводится по [12, п. 5.8].

Номинальная толщина каждого пояса стенки резервуара t_U рассчитывается по формуле

$$t_U = (\rho g (H_i - \theta_L) + 1,2p) \frac{r}{R} + \Delta t_{cU} + \Delta t_{mU}, \quad (4.4)$$

где $\theta_L = \sqrt{r \cdot (t_L - \Delta t_{cU} - \Delta t_{mU})}$;

t_L – назначенная номинальная толщина пояса стенки, примыкающего снизу к i -му стыку, м;

Δt_{cU} – припуск на коррозию пояса стенки, примыкающего к i -му стыку снизу, м;

Δt_{mU} – минусовой допуск на прокат пояса стенки, примыкающего к i -му стыку снизу, м;

R – расчетное сопротивление материала пояса стенки по пределу текучести, Па;

ρ – плотность нефтепродукта, кг/м³;

p – нормативное избыточное давление в газовом пространстве, МПа;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$;

H_i – расстояние от зеркала продукта до i -го стыка поясов при эксплуатации, м.

Расчетное сопротивление материала стенки резервуаров по пределу текучести определяется по формуле

$$R = \frac{R_{yn} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_t}{\gamma_m \cdot \gamma_n}, \quad (4.5)$$

где R_{yn} – нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла стенки, равное минимальному значению предела текучести, принимаемому по государственным стандартам на листовую прокат;

γ_c – коэффициент условий работы. Для нижнего пояса $\gamma_c = 0,7$, для остальных поясов $\gamma_c = 0,8$;

γ_t – температурный коэффициент, $\gamma_t = 1$;

γ_m – коэффициент надежности по материалу, $\gamma_m = 1,025$ [12, таблица 2];

γ_n – коэффициент надежности по ответственности. Для I класса опасности $\gamma_n = 1,2$, для II класса $\gamma_n = 1,1$, для III класса $\gamma_n = 1,05$, для IV класса $\gamma_n = 1$.

Результаты расчета толщины t_u каждого пояса стенки следует округлить до целого числа в большую сторону в соответствии со значениями толщины проката по ГОСТ 19903, сравнить с минимальной толщиной стенки (таблица 4.3) и свести все данные в таблицу 4.4.

Таблица 4.3 – Минимально допустимая толщина листов стенки резервуара

Диаметр резервуара, м	Минимально допустимая толщина листов стенки, мм
До 15 включ.	5
Св. 15 до 25	6
Св. 25 до 40	8
Св. 40 до 65	10

Таблица 4.4 – Номинальная толщина стенки резервуара

Номер пояса	Номинальная толщина пояса t_u , мм	Δt_{cU} , мм	Δt_{mU} , мм	$t_u + \Delta t_{cU} + \Delta t_{mU}$	Минимальная толщина стенки t_{\min} , мм	Принятая толщина пояса t , мм
1					По таблице 16 [11]	
2						
...						
n						

После расчета толщин поясов приступают к проектированию кровли резервуара. Исходными данными для расчета служат диаметр резервуара и снеговая нагрузка, которая связана с месторасположением резервуара. Для проектирования кровля разбивается на ряд монтажных щитов, представляющих собой

секторы круга. Их размеры и количество назначают из соображений рационального раскроя металла. Элементы жесткости щита кровли рассчитывают, рассматривая щит как балку, опирающуюся одним концом на центральную стойку, другим – на стенку резервуара.

Следующим этапом проектирования является расчет центральной стойки. Нагрузкой для нее служит 33 % нагрузки, создаваемой снеговой нагрузкой, а также массой кровли. Стойку рассчитывают, рассматривая ее как жестко заделанную нижним и шарнирным верхним концами.

В курсовом проектировании для упрощения расчетной схемы принимают центрально-нагруженную стойку, воспринимающую 33 % нагрузки на кровлю.

Нагрузку на стойку в этом случае определим по формуле

$$N = 0,33 \cdot N, \quad (4.6)$$

где N – общая нагрузка, действующая на крышку.

Требуемая площадь поперечного сечения стойки

$$F_{mp} = \frac{N_{cm}}{\varphi} \cdot [\sigma], \quad (4.7)$$

где $[\sigma]$ – допустимые напряжения, Па;

φ – коэффициент продольного изгиба (таблица 4.5).

Днище резервуара состоит из четного числа полотен (для возможности создания уклона), каждое из которых обычно не превышает 12 м по ширине. Полотна сваривают из листов размерами 1500 × 6000 мм или 2000 × 8000 мм толщиной 5 мм – при вместимости до 10000 м³ и толщиной 6 мм – при больших объемах. Соединение листов полотнищ производят двусторонней автоматической сваркой плотнопрочными швами с полным проваром по толщине свариваемого металла. При монтаже центральной части днища полистовым методом применяются нахлесточные и стыковые соединения на остающейся подкладке.

Помимо перечисленных расчетов, необходимо рассчитать сварные соединения резервуара. Резервуар необходимо оснастить лестницей и ограждением кровли.

При проектировании цилиндрического резервуара рассчитывается шов, связывающий боковую стенку резервуара с днищем.

Тип сварных швов – угловые, по замкнутому контуру. Поэтому расчёт сварных соединений сводится к определению катетов швов.

Расчёт производится по максимальным допустимым напряжениям для соединений, работающих на срез (по касательным напряжениям).

Способы сварки различных элементов резервуара рекомендуется выбирать в соответствии с таблицей [11, п. 6.15]. Максимальные катеты угловых сварных швов не должны превышать 1,2 толщины более тонкой детали в соединении. Для деталей толщиной 4...5 мм катет углового сварного шва должен быть равен 4 мм. Для деталей большей толщины катет углового шва определяется расчетом или конструктивно, но должен быть не менее 5 мм.

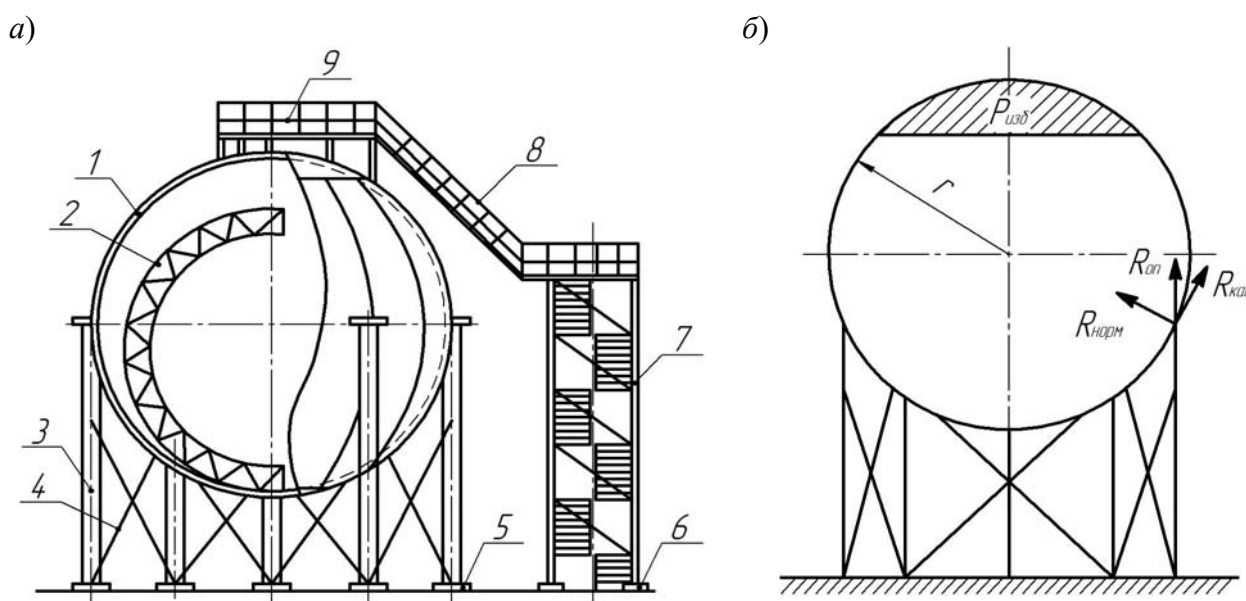
4.2 Сферический резервуар

Элементами резервуара, подлежащими расчету, являются сферическая оболочка и стойки резервуара (рисунок 4.2). Объем сферического резервуара вычисляют по формуле

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3, \quad (4.8)$$

где r – радиус внутренней поверхности резервуара, м;

Тогда внутренний диаметр резервуара $D = 2r = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}}$.



a – общий вид; b – расчетная схема; 1 – оболочка резервуара; 2 – смотровая лестница; 3 – опорная стойка; 4 – диагональные связи; 5 – фундамент стоек; 6 – фундамент шахтной лестницы; 7 – шахтная лестница; 8 – переходная площадка; 9 – площадка обслуживания

Рисунок 4.2 – Резервуар сферический

Расчетное давление определяют как сумму гидростатического и избыточного давлений:

$$p = 1,1p_{гидростат} + 1,2p_{изб} = 1,1\rho \cdot g \cdot D + 1,2p_{изб}, \quad (4.9)$$

где ρ – плотность хранимого вещества, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с².

Расчетную толщину оболочки определяют согласно СТБ ЕН 13445 *Сосуды, работающие под давлением*:

$$t = \frac{p \cdot D}{4\varphi \cdot [\sigma] - p}, \quad (4.10)$$

где φ – коэффициент снижения допускаемых напряжений на сварные соединения по сравнению с допускаемым напряжением на основной металл, $\varphi = 1$;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа.

Допускаемое напряжение можно найти по следующей зависимости:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n}, \quad (4.11)$$

где σ_B – минимально гарантированный предел прочности выбранной марки стали, МПа;

n – коэффициент запаса прочности сферических резервуаров, $n = 3,5$.

Окончательная толщина стенки резервуара t_o принимается с учетом технологической прибавки на вытяжку металла при вальцовке или штамповке $\Delta t_m = 0,4 + 0,015t \geq 0,5$ мм и припуска на коррозию $\Delta t_c = 0,4 + 0,05t \geq 1$ мм:

$$t_o = t + \Delta t_c + \Delta t_m. \quad (4.12)$$

Следующим этапом является расчет стоек резервуаров. Для этого назначают их количество (как правило, кратное шести), а нагрузку, созданную массой резервуара и хранимой жидкости, делят на количество стоек. Стойку рассматривают с жестко заделанным нижним концом, шарнирным верхним концом и нагруженную внецентренно.

Общая нагрузка на стойки определяется по формуле

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{ж}} + P_{\text{рез}}. \quad (4.13)$$

Затем подбираем число стоек n . Нагрузка на одну стойку

$$N_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{общ}}}{n}. \quad (4.14)$$

Обычно стойки изготавливаются из трубы.

Осевой момент инерции одиночной стойки

$$J_x = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4), \quad (4.15)$$

где D – наружный диаметр трубы, мм;

d – внутренний диаметр трубы, мм.

Площадь сечения стойки определяется по формуле

$$F = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2). \quad (4.16)$$

Меньший радиус инерции стойки

$$r_x = \sqrt{\frac{J_x}{F}}. \quad (4.17)$$

Обычно высота h_{cm} стойки выбирается в пределах от 600 до 1200 мм. Тогда гибкость стойки

$$\lambda = \frac{h_{cm}}{r_x}. \quad (4.18)$$

По таблице 4.5 в зависимости от гибкости вычисляем коэффициент продольного изгиба φ .

Таблица 4.5 – Коэффициенты φ

Гибкость элемента λ	Марка стали		
	Ст3	09Г2С	10ХСНД
0	1	1	1
10	0,988	0,986	0,985
20	0,97	0,965	0,962
30	0,943	0,932	0,927
40	0,905	0,888	0,878
50	0,867	0,837	0,823
60	0,82	0,78	0,764
70	0,77	0,71	0,682
80	0,715	0,637	0,604
90	0,655	0,563	0,523
100	0,582	0,482	0,437
110	0,512	0,413	0,37
120	0,448	0,35	0,315
130	0,397	0,302	0,264
140	0,348	0,256	0,228
150	0,305	0,226	0,198
160	0,27	0,2	0,176
170	0,24	0,178	0,156
180	0,216	0,16	0,139
190	0,196	0,142	0,126
200	0,175	0,129	0,112
210	0,16	0,118	0,102
220	0,146	0,108	0,093

Определяем напряжения в стойке как

$$\sigma = \frac{P_{общ}}{\varphi \cdot F \cdot n} \leq [\sigma], \quad (4.19)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа.

Если условие прочности выполняется, то количество и сечение стоек подобрано верно.

После расчета стоек рассчитываются швы, связывающие резервуар со стойками. Тип сварных швов – угловые, по замкнутому контуру. Поэтому расчёт сварных соединений сводится к определению катетов швов.

Расчёт производится по максимальным допустимым напряжениям для соединений, работающих на срез (по касательным напряжениям):

$$\tau = \frac{N_{см}}{\beta \cdot k \cdot L} \leq [\tau], \quad (4.20)$$

где $N_{см}$ – нагрузка на одну стойку, Н;

β – коэффициент для определения расчётной толщины углового шва;

k – катет шва, м.

Преобразовав выражение (4.20), получим

$$k \geq \frac{N_{см}}{\beta \cdot [\tau] \cdot L}.$$

Нагрузка на стойку определяется по формуле

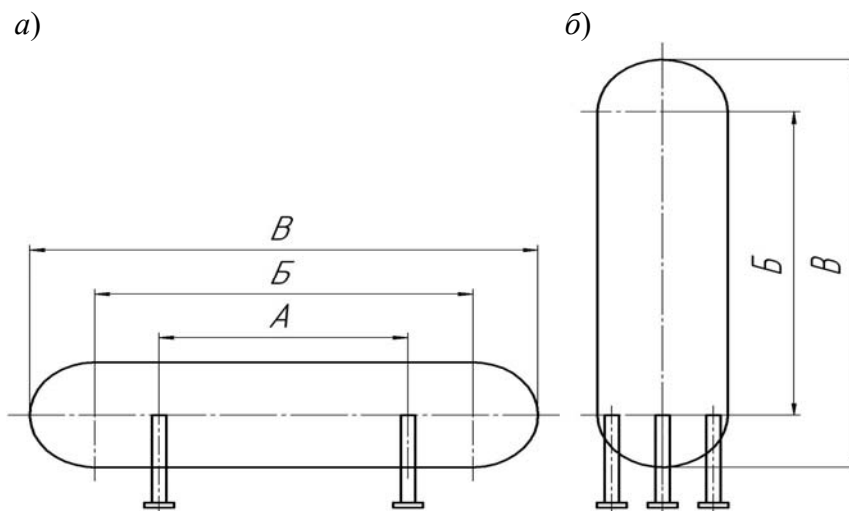
$$N_{см} = \frac{P_{общ} \cdot \cos 45^\circ}{n}, \quad (4.21)$$

где n – количество стоек;

$P_{общ}$ – общая нагрузка от веса резервуара и хранимой жидкости.

4.3 Цилиндрический газгольдер (ресивер)

Сосуды постоянного геометрического объема, предназначенные для хранения под давлением газов (азота, аммиака и др.), не вызывающих интенсивной коррозии, называются газгольдерами постоянного объема (рисунок 4.3), а при хранении в них воздуха – ресиверами. Геометрические размеры стальных горизонтальных (ГГ) и вертикальных (ВГ) газгольдеров постоянного объема высокого давления приведены в таблице 4.6.



a – горизонтальное расположение; *б* – вертикальное расположение

Рисунок 4.3 – Общий вид газгольдеров постоянного объема

Таблица 4.6 – Геометрические размеры газгольдеров

Номинальный объем, м ³	Размер, мм					
	Диаметр <i>D</i>	Расстояние между опорами <i>A</i>	Длина цилиндрической части <i>B</i>		Общая длина резервуара <i>B</i>	
			а*	б**	а*	б**
	Горизонтальные газгольдеры (ГГ)					
50	3200	3400	4000	4800	7200	8000
100	3200	7800	10000	12000	13200	15200
175	3200	11400	20000	19200	23200	22400
270		18000	32000	31200	35200	34400
Вертикальные газгольдеры (ВГ)						
50	3200	—	4000	4800	7200	8000
100	3200	—	10000	12000	13200	15200
175	3200	—	20000	19200	23200	22400
<i>Примечание</i> —* случай «а» относится к давлению газа 0,25; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,25 и 1,6 МПа , когда для цилиндрической части применяются листы шириной 2 м; ** слу- чай «б» относится к давлению газа 1,6; 1,8; 2 МПа , когда для цилиндрической части приме- няются листы шириной 2,4 м						

Внутренний диаметр цилиндрической части *D* устанавливается 3200 мм, внутренний радиус полусферических днищ *r* – 1600 мм. Для изготовления цилиндрической части газгольдеров применяют стальные листы шириной 2000 или 2400 мм.

Для цилиндрической и сферической частей сосуда могут быть применены стали следующих марок: при толщине до 12 мм – сталь ВСтЗсп; при толщине более 12 мм – стали низколегированные 15ХСНД, 09Г2С.

Расчетную толщину цилиндрической оболочки определяют согласно СТБ ЕН 13445 *Сосуды, работающие под давлением*:

$$t = \frac{P \cdot D}{2\varphi[\sigma] - p}, \quad (4.22)$$

где p – расчетное давление, Па;

D – внутренний диаметр цилиндрической оболочки, м;

ϕ – коэффициент снижения допускаемых напряжений на сварные соединения по сравнению с допускаемым напряжением на основной металл, $\phi = 1$;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа.

Допускаемое напряжение определяют по формуле (4.11); расчетную толщину сферической оболочки – по формуле (4.10). Окончательная толщина стенки сосуда t_o принимается с учетом технологической прибавки на вытяжку металла при вальцовке или штамповке Δt_m и припуска на коррозию Δt_c по формуле (4.12).

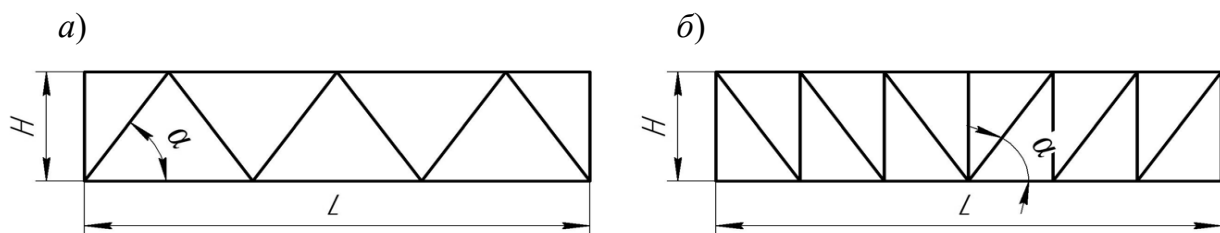
После этого производят проверку оболочки на устойчивость. Если по расчету на устойчивость толщина стенки получается больше, чем по расчету на прочность, то принимают толщину, полученную по расчету на устойчивость. Если газгольдер расположен горизонтально, необходимо проверить прочность его кольцевых швов, рассматривая газгольдер как балку, лежащую на двух опорах. Следующим этапом расчета является расчет стоек газгольдера. При этом стойка рассматривается как внецентренно сжатая с жестко заделанным нижним шарнирным верхним концом. Нагрузкой для нее является масса газгольдера и хранимого сжиженного газа. Расчет производится по формулам (4.13)–(4.19).

Расчет сварных соединений, связывающих резервуар со стойками, производится по формулам (4.20) и (4.21).

4.4 Сварные фермы

Фермами называют решетчатые конструкции, работающие на изгиб. Элементы фермы (пояса, раскосы, стойки и т. д.) испытывают только продольные растягивающие или сжимающие нагрузки. По схемам решетки различают фермы с треугольной (рисунок 4.4, а) и раскосной (рисунок 4.4, б) решетками. Эти решетки являются основными.

Исходными данными для проектирования являются пролет фермы и нагрузки. Проектирование начинают с определения высоты фермы и геометрической системы. Оптимальную высоту фермы устанавливают в зависимости от ее пролета и типа решетки. Для стропильных ферм характерно отношение $L/H = 6 \dots 8$. Угол наклона раскосов $\alpha = 45^\circ$ для конструкций с треугольной решеткой и $33^\circ \dots 55^\circ$ с раскосной.



a – ферма с треугольной решеткой; b – ферма с раскосной решеткой; L – длина пролета фермы; H – высота фермы; α – угол наклона раскосов

Рисунок 4.4 – Основные параметры плоских ферм

На практике высоту фермы следует увязывать с габаритами транспортных средств. При перевозке по железной дороге наибольший размер конструкции по вертикали равен 3,8 м, по горизонтали – 3,2 м, а по длине – 13 м для одной четырехосной платформы. Фермы длиной пролета 18 м поставляются на монтаж целиком; при пролетах 24 и 30 м – в виде двух отправочных частей длиной 12 и 15 м; при пролетах 36 м – в виде трех частей длиной 12 м.

Последовательность расчета ферм.

1 Составление расчетной схемы с приведением распределенных нагрузок к сосредоточенным в узлах (рисунок 4.5):

$$P = q \cdot d, \quad (4.23)$$

где q – счетная погонная нагрузка, Н/м;

d – расстояние между узлами верхнего пояса, м.

Дополнительные усилия, действующие на ферму, принимают в соответствии с техническим заданием (снеговая, нагрузка от веса подъемно-транспортного оборудования, собственный вес и т. д.).

2 Определение реакции в опорах фермы. При этом ферму рассматривают как балку, расположенную на двух опорах: шарнирно-неподвижной и шарнирно-подвижной.

3 Определение усилий в стержнях фермы с предположением, что узлы представляют собой шарниры. Для этого используют несколько методов: аналитические (метод вырезания узлов, метод сечений) и графический (диаграмма Максвелла – Кремоны). Графический метод более удобен для ферм с наклонными поясами.

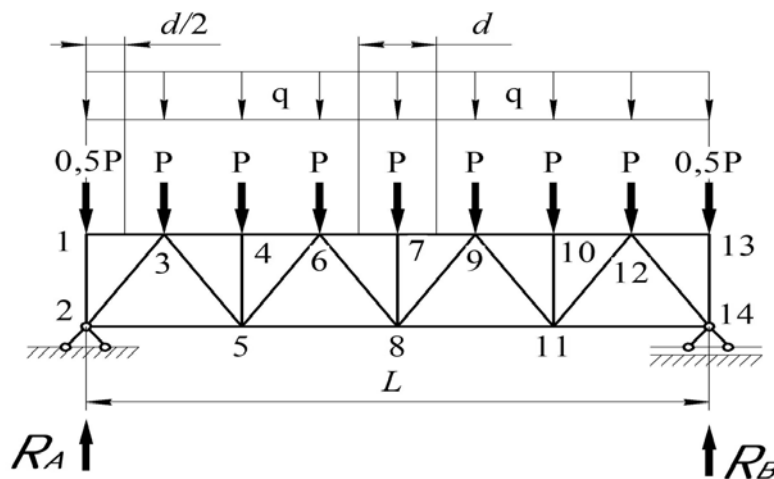


Рисунок 4.5 – Расчетная схема фермы

Метод вырезания узлов удобно использовать, когда надо найти усилия во всех стержнях фермы. Он сводится к последовательному рассмотрению условий равновесия сил, сходящихся в каждом из узлов, определению усилий в стержнях фермы. При решении задач способом вырезания узлов необходимо соблюдать следующие правила: первым выделяют тот узел, в котором находится минимальное число стержней с неизвестными усилиями (см. рисунок 4.5, узел 1); внутренние силы в стержнях заменяют внешними и направляют

их от узла, предполагая, что все стержни растянуты; определяют усилия в стержнях из условий равновесия. Если при расчете значение усилия получается со знаком минус, то стержень на самом деле сжат; если в узле сходятся два стержня и нагрузки в нем нет, то оба стержня не работают; если в узле сходятся два стержня и нагрузка направлена вдоль одного из них, то второй стержень не работает; переходя от узла к узлу, рассматривают аналогично равновесие каждого узла.

Например, для фермы на рисунке 4.5 для определения усилий в стержнях 1–2, 1–3 вырезают узел 1, отбрасывают всю ферму со всеми действующими усилиями, кроме узла 1. Внутренние силы в стержнях 1–2 и 1–3 заменяют внешними и направляют их от узла (рисунок 4.6).

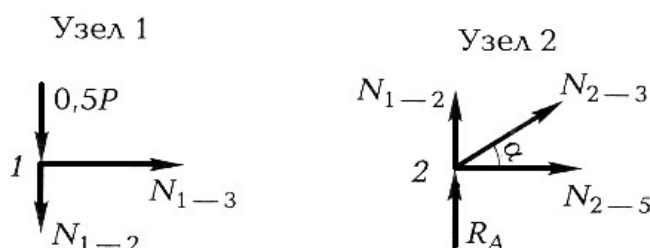


Рисунок 4.6 – Метод вырезания узлов

Записывают условия равновесия. Сумма проекций на ось y

$$\sum P_y = -0,5P - N_{1-2} = 0,$$

откуда

$$N_{1-2} = -0,5P.$$

Знак минус показывает, что стержень 1–2 работает на сжатие.

Стержень 1–3 не работает, т. к. $\sum P_x = N_{1-3} = 0$.

Для определения усилий в стержнях 2–3 и 2–5 вырезают узел 2 (см. рисунок 4.6). С учетом того, что $\sum P_y = R_A + N_{1-2} + N_{2-3} \sin \alpha = 0$, $N_{1-2} = -0,5P$.

Получают

$$N_{2-3} = \frac{0,5P - R_A}{\sin \alpha}.$$

Так как реакция опоры $R_A > 0,5P$, то стержень 2–3 работает на сжатие.

Из условия $\sum P_x = 0$.

$$\sum P_x = N_{2-3} \cos \alpha + N_{2-5} = 0.$$

Откуда

$$N_{2-5} = \frac{(R_A - 0,5P) \cos \alpha}{\sin \alpha}.$$

Стержень 2–5 работает на растяжение.

Правильность всех расчетов подтверждает выполнение условий равновесия в последнем узле 14.

4 Подбор сечения элементов фермы. Все стержни ферм должны удовлетворять условиям прочности, сжатые элементы дополнительно должны удовлетворять условию устойчивости.

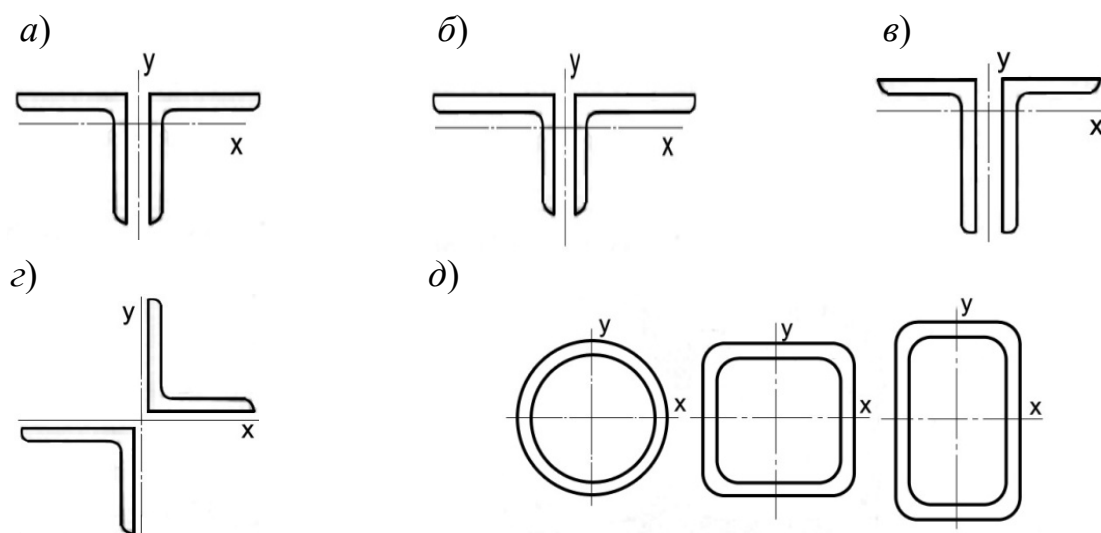
Подбор сечения растянутых стержней начинают с определения требуемой площади поперечного сечения стержня $F_{тр}$, используя формулу

$$F_{тр} = N/[\sigma], \quad (4.24)$$

где N – усилие в стержне, Н;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа.

Основные типы сечений сварных ферм приведены на рисунке 4.4.



а – для сжатых и растянутых стержней решетки (раскосов, стоек), растянутых поясов; *б* – для сжатых и растянутых поясов; *в* – для сжатых опорных раскосов; *г* – для стоек, к которым привариваются вертикальные связи; *д* – трубы различного сечения

Рисунок 4.4 – Виды поперечных сечений элементов легких ферм

При определении усилий в стержнях может возникнуть вариант, когда в некоторых стержнях усилие мало или вовсе отсутствует. В этом случае размеры сечения стержней определяют по предельно допустимой гибкости (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Предельные гибкости сжатых и растянутых элементов ферм и связей

Элемент конструкции	Сжатый стержень	Растянутый стержень	
		Статическая нагрузка	Динамическая нагрузка
Пояса, опорные раскосы и стойки, передающие опорные реакции	120	400	250
Прочие элементы ферм	150	400	350
Связи	200	400	400

Подбор сечения сжатых стержней начинают с определения требуемой площади поперечного сечения стержня F_{mp} , используя формулу

$$F_{mp} = N/\varphi[\sigma], \quad (4.25)$$

где φ – коэффициент продольного изгиба.

В формуле (4.25) две неизвестные: F_{mp} и φ , следовательно, задачу необходимо решать методом последовательных приближений. В первом приближении задают гибкость λ : для поясов, опорных раскосов и стоек $\lambda = 80 \dots 100$, для остальных сжатых стержней решетки $\lambda = 100 \dots 120$.

Коэффициент φ определяют по таблице 4.5 (например, для значения $\lambda_0 = 80$ коэффициент продольного изгиба $\varphi = 0,715$). Затем находят F_{mp0} для первого приближения и вычисляют радиусы инерции сечения по следующим формулам:

$$r_{x0} = l_x/\lambda_0; \quad (4.26)$$

$$r_{y0} = l_y/\lambda_0, \quad (4.27)$$

где l_x, l_y – расчетные длины стержня в главных плоскостях.

Чтобы подобрать сечение сжатых элементов ферм, необходимо определить расчетные длины стержней в плоскости фермы l_x и расчетные длины сжатых стержней из плоскости фермы l_y . Для верхнего пояса l_x будет равно расстоянию между центрами узлов $l_x = l$, для опорного раскоса $l_x = 0,5l_1$, для остальных сжатых раскосов и стоек $l_x = 0,8l_1$ (рисунок 4.8). Связи по верхним поясам фермы уменьшают расстояние между узлами, закрепленными от горизонтального смещения, поэтому $l_y = 2d$, т. е. расстоянию между закрепленными от горизонтального смещения точками.

По значению площади и радиусов инерции r_{x0} и r_{y0} выбирают наиболее подходящее сечение из сортамента. По наибольшей гибкости из λ_x и λ_y , которая не должна превышать значений таблицы 4.5, находят минимальный коэффициент продольного изгиба φ_{min} . Если он существенно отличается от первоначального, то производят перерасчет и корректировку сечения.

Толщину фасонки определяют конструктивно, исходя из усилия в опорном раскосе, по таблице 4.8. Толщина фасонки обычно принимается одинаковой во всех узлах.

Таблица 4.8 – Рекомендуемая толщина фасонки

Усилие в опорном раскосе, кН	<150	160...250	260...400	410...600	610...1000	1010...1400	1410...1800	>1800
Толщина фасонки, мм	6	8	10	12	14	16	18	20

Результаты подбора сечений представляют по форме, указанной в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Пример подбора сечений стержней

Элемент	Обозначение стержня	Расчетное усилие, кН	Принятое сечение	Площадь, см ²	Расчетные длины, см		Радиус инерции, см		Толщина фасонки, мм	Гибкость		φ_{min}	Напряжение, МПа
					l_x	l_y	r_x	r_y		λ_x	λ_y		
Верхний пояс	6–7	+734	Г Г 125×8	39,4	252	252	3,87	5,6	14	65	45	–	+186
	...												
Нижний пояс	2–5	+660	Г Г 110×8	36	600	1200	2,58	6,86	14	233	175	–	+184
	...												
Раскосы	2–3	–362	Г Г 125×8	39,4	354	443	3,87	5,6	14	88	148	0,314	–21
	...												

Стержни решетки из уголков прикрепляются к узловым фасонкам угловыми швами по обушку и по перу (рисунок 4.9). Величина усилий по перу N_n и по обушке $N_{об}$ определяется по формулам

$$N_n = \gamma N; \quad (4.28)$$

$$N_{об} = (1 - \gamma)N, \quad (4.29)$$

где N – расчетное усилие, Н;

γ – коэффициент, характеризующий несимметричность сечения, $\gamma = z_0/b$ (см. рисунок 4.9).

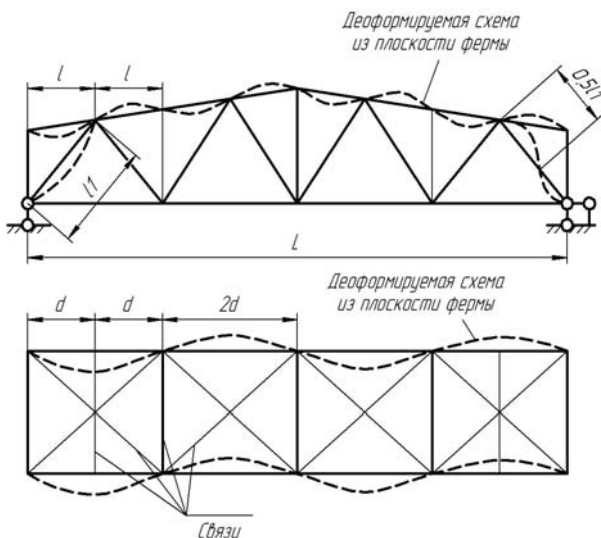


Рисунок 4.8 – Схема определения расчетных длин элементов фермы

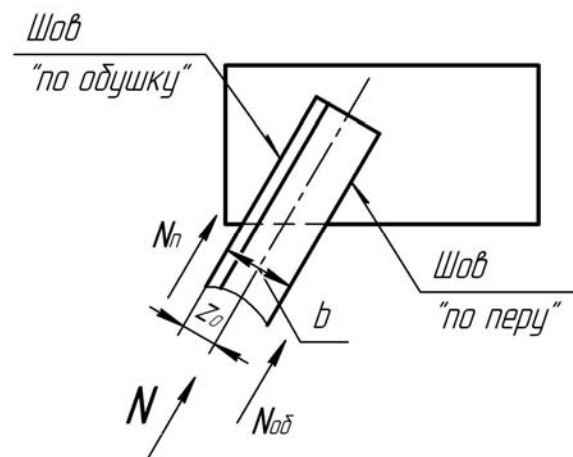


Рисунок 4.9 – Расчетная схема сварного узла

Для равнополочных уголков принимают $\gamma = 0,3$, для неравнополочных прикрепленных узкой полкой $\gamma = 0,25$, для неравнополочных прикрепленных широкой полкой $\gamma = 0,35$.

Требуемую длину сварных швов определяют исходя из условия прочности угловых швов на условный срез:

$$l_{шва по обушке} = N_{об}/(\beta k_{об} R_{wf}); \quad (4.30)$$

$$l_{шва по перу} = N_n/(\beta k_n R_{wf}), \quad (4.31)$$

где $k_{об}$, k_n – катеты сварных швов по обушке и по перу, м;

R_{wf} – расчетное сопротивление углового шва. Для стали Ст3 $R_{wf} = 180$ МПа;

β – коэффициент формы шва. Для ручной дуговой сварки $\beta = 0,7$, для механизированной сварки $\beta = 0,8$, для автоматической сварки $\beta = 0,9$.

Катеты угловых швов не должны превышать минимальной толщины металла полок уголка и фасонки. Результаты расчета сварных швов сводятся в таблицу 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты расчета сварных швов

Номер стержня	Сечение	N, кН	Шов по обушке			Шов по перу		
			$N_{об}$, кН	$k_{об}$, мм	$L_{шва}$, мм	N_n , кН	k_n , мм	$L_{шва}$, мм
1–2	160×100×9	780	585	8	220	195	6	110
...								

4.5 Применение вычислительной техники в проекте

Объем применения вычислительной техники для решения задач проектирования согласовывается с руководителем курсового проекта. Как правило, студентам предлагается повести расчеты на основе метода конечных элементов с целью проверки несущей способности сечений или оценки предельных состояний конструкции, связанных с потерей устойчивости.

На рисунке 4.10 показаны результаты проверки устойчивости сегмента кровли цилиндрического резервуара. При помощи расчетной модели определены толщина сегмента кровли и коэффициент критической продольной нагрузки, при которых прогнозируется потеря устойчивости.

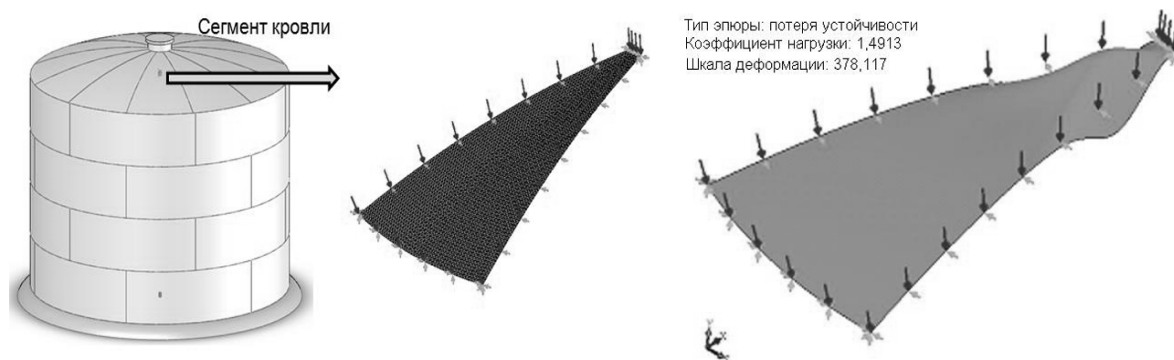


Рисунок 4.10 – Проверка устойчивости сегмента кровли цилиндрического резервуара

5 Защита проекта

Законченный проект студент представляет на рецензию руководителю и при его положительной оценке защищает перед комиссией в составе двух-трех преподавателей кафедры. К защите представляется полностью законченный проект, подписанный его автором и руководителем. Общее время, отводимое для приема проекта, – 20...25 мин, из которых 8...10 мин предоставляются студенту для доклада, остальное время – для ответа на вопросы.

Запись студентов на защиту производится заблаговременно в соответствии с графиком работы комиссии.

При оценке проекта учитываются: полнота, качество и самостоятельность выполнения пояснительной записки; оформление графической части (соответствие ГОСТам) и расчетно-пояснительной записки (наличие пояснительных схем и эскизов, правильность расчетов, грамотность и стиль изложения); четкость доклада, сделанного студентом, и точность ответов на вопросы; объем и результативность применения вычислительной техники; работа с литературой.

Список литературы

1 **Николаев, Г. А.** Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Г. А. Николаев, В. А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1990. – 448 с.

2 **Николаев, Г. А.** Сварные конструкции. Технология изготовления, механизация, автоматизация и контроль качества / Г. А. Николаев, С. А. Куркин. – М. : Высш. шк., 1991. – 398 с.

3 **Николаев, Г. А.** Сварные конструкции. Технология изготовления, автоматизация производства и проектирование сварных конструкций / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высш. шк., 1983. – 344 с.

4 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 5264–80. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 33 с.

5 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 11534–75. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 25 с.

6 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 14771–76. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 24 с.

7 Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 23518–79. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 24 с.

8 Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 8713–79. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 24 с.

9 Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07–85. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 118 с.

10 Стальные конструкции: СНиП II-23–81. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 125 с.

11 Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства: ТКП 45-5.04-172–2010. – Мн. : Стройтехнорм, 2010. – 148 с.

12 **Катаев, Р. Ф.** Технология конструкционных материалов: теория и технология контактной сварки : учебник / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник ; под науч. ред. М. П. Шалимова. – М. : Юрайт, 2025. – 146 с.