

Л.П. АБАШЕВА, И. И. ЗУЕВА

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ
ПОКРЫТИЙ ИЗ КРУГЛЫХ ТРУБ**

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пермский государственный технический университет»

Л.П. Абашева, И. И. Зуева

**Проектирование и расчет стальных ферм
покрытий из круглых труб**

Методические указания
по курсу «Металлические конструкции»
для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 290300
«Промышленное и гражданское строительство»

Направление 653500 – Строительство
Специальность 290300 – Промышленное и гражданское строительство

Пермь 2009

УДК 624.014

A13

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Е.И.Новопашина

Абашева, Л.П.

A13 Проектирование и расчет стальных ферм покрытий из круглых труб: метод. указания / Л.П.Абашева, И.И.Зуева; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2009. – 44 с.

Настоящие методические указания написаны в развитие методических указаний по выполнению курсового проекта «Проектирование металлического каркаса одноэтажного производственного здания» по дисциплине «Металлические конструкции». Указания содержат основные положения по расчету и конструированию легких стальных стропильных ферм из круглых труб. Предназначены для студентов дневного, вечернего и заочного отделений.

© ГОУ ВПО «Пермский государственный
технический университет», 2009

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Современное развитие строительства требует применения экономичных, легких, долговечных, эстетически выразительных, надежных строительных конструкций. Традиционные фермы со стержнями из парных уголков и узловыми фасонками господствовали в строительстве длительный период, но стремление снизить расход металла привело к созданию ферм нового типа. Фермы из круглых электросварных труб по расходу стали относятся к числу наиболее эффективных конструкций.

Стропильные фермы из труб рекомендуется использовать в гражданских и промышленных зданиях с пролетами до 30 м в сочетании с легкими ограждающими конструкциями (стальной профилированный настил и др.). При больших нагрузках и пролетах их эффективность, учитывая повышенную стоимость профилей, снижается. Целесообразно применение ферм из круглых труб в зданиях с повышенной агрессивной средой, т.к. трубы более стойки к коррозии, доступны для осмотра и окраски.

Фермы из круглых электросварных труб весьма экономичны благодаря рациональной форме профиля и бесфасоночным соединениям элементов решетки с поясами. Круглая труба обладает наиболее благоприятным для сжатых элементов распределением материала относительно центра тяжести и большим радиусом инерции, одинаковым во всех направлениях, что обеспечивает, по сравнению с открытыми профилями той же площади, повышенную общую и местную устойчивость стержней, хорошую работу на кручение. К достоинствам этого типа ферм следует отнести и возможность использования высокопрочных сталей.

Однако конструктивные трудности сопряжения элементов из круглых труб, более высокая их стоимость по сравнению с другими типами профилей и дефицитность ограничивают применение таких ферм. При проектировании бесфасоночных соединений элементов решетки с поясами следует учитывать необходимость фигурной резки концов элементов, что практически возможно только на заводах, оснащенных специальным оборудованием.

В настоящих методических указаниях изложены основные положения по расчету и конструированию легких стропильных ферм из круглых труб.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Во втором курсовом проекте по металлическим конструкциям «Проектирование металлического каркаса одноэтажного производственного здания» исходные данные на проектирование стропильной фермы рекомендуется принимать по табл. 1 [13] в соответствии с порядковым номером букв фамилии студента. В курсовом проекте выполняется расчет и конструирование фермы первого пролета (пролет А – Б, наибольший).

В курсовом проекте решаются следующие вопросы:

1. Компоновка стропильной фермы покрытия.
2. Статический расчет фермы.
3. Конструктивный расчет фермы.
4. Расчет и конструирование узлов фермы.
5. Разработка рабочих чертежей.

В дипломном проекте исходными данными на проектирование является технологическое задание.

КОМПОНОВКА СТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ

На этапе компоновки необходимо выбрать статическую схему и очертание фермы, назначить вид решетки, определить генеральные размеры фермы.

В курсовом проекте предлагается принять типовые фермы с параллельными поясами: высота фермы на опоре по осям поясов 2900 мм, уклон по верхнему поясу 1,5 % обеспечивается за счет разной высоты опорных столиков; решетка – треугольная с дополнительными стойками; размер панели верхнего пояса 3 м; сечения элементов фермы – из круглых труб (серия 1.460.3 –17.1КМ [3]). Для трубчатых элементов конструкций следует применять преимущественно электросварные трубы по ГОСТ 10704–91. При соответствующем обосновании допускается применять и другие виды стальных труб.

Членение ферм по длине на отправочные марки производится согласно «Инструкции по поставке стальных конструкций заводами металлоконструкций» (ВСН-141-80/ ММСС СССР): фермы из круглых труб пролетами 24 м и 30 м поставляются двумя отправочными марками, пролетом 18 м – одной или двумя. Укрупнительные стыки в средних узлах для удобства сборки и изготовления необходимо проектировать так, чтобы правая и левая полуфермы были взаимозаменяемы.

Схемы типовых стропильных ферм из круглых труб представлены на рис. 1. В типовых решениях обычно предусмотрена узловая передача нагрузок, что дает возможность применять в покрытиях прогоны, стальные или железобетонные панели.

В курсовом проекте в зависимости от задания принимаются следующие системы покрытий:

– прогонные покрытия: по стропильным фермам с шагом 3 м устанавливают прогоны пролетом $l = 6$ или 12 м, на которые опирается стальной профилированный настил (теплые кровли) или стальной лист (холодные кровли);

– беспрогонные покрытия: на стропильные фермы укладывают стальные панели шириной 3 м, пролетом $l = 6$ или 12 м.

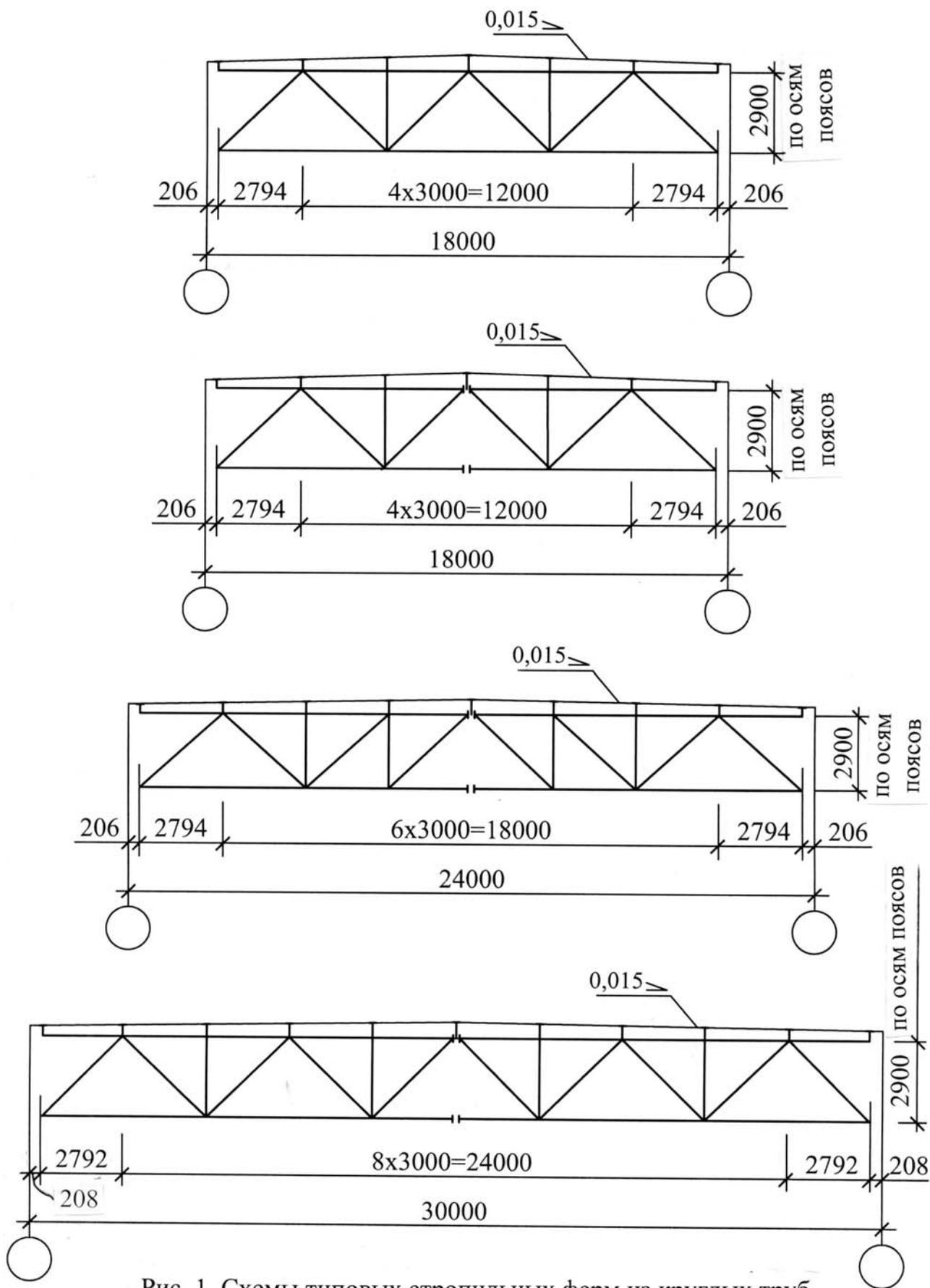


Рис. 1. Схемы типовых стропильных ферм из круглых труб

В курсовом проекте состав кровли и покрытия для беспрогонных кровель и кровель с прогонами можно принять по [7, 9].

В дипломном проекте при компоновке фермы необходимо исходить из технологического задания и требований унификации и модулирования геометрических размеров ферм. Компоновка ферм из круглых труб имеет свои особенности. В фермах из круглых труб особенно рациональны параллельные пояса, что упрощает соединение элементов. Тип решетки должен быть максимально простым, т.к. сопряжение пяти и более стержней существенно усложняет конструкцию узла. В связи с этим наиболее приемлемой решеткой является треугольная или треугольная с дополнительными стойками. Крайне нежелательно введение каких-либо шпренгельных элементов.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

Расчет ферм из круглых труб производится в соответствии с требованиями, изложенными в СНиП [1, 2] с учетом рекомендаций [11, 12, 15].

Цель статического расчета заключается в определении максимальных усилий в элементах фермы, необходимых для подбора сечений элементов, расчета узлов и сопряжений.

Статический расчет стропильной фермы включает три этапа:

1. Сбор нагрузок.
2. Разработка расчетной схемы.

В курсовом проекте рассчитывается стропильная ферма первого пролета. Для определения влияния опорного момента на усилия в элементах фермы предлагается принять жесткое сопряжение ригеля первого пролета с колонной.

3. Определение расчетных усилий в элементах фермы.

Сбор нагрузок на ферму

На стропильную ферму покрытия могут действовать следующие нагрузки:

1. Постоянные – от веса ограждающих (кровля) и несущих (фермы, связи, прогоны, фонари) конструкций.
2. Кратковременные – атмосферные (снеговые, ветровые), технологические (от подвесного подъемно-транспортного оборудования, подвесных коммуникаций, электроосветительных установок, вентиляторов, галерей) и др.

Основными при расчете стропильных ферм являются постоянная и снеговая нагрузки, поэтому в методических указаниях основное внимание уделено определению этих типов нагрузок.

Нагрузка от ветра вызывает в элементах фермы, как правило, усилия противоположного знака по сравнению с усилиями от веса покрытия и снега.

Поэтому при расчете ферм ветровую нагрузку следует учитывать в том случае, если ее значение превышает вес покрытия (при легких кровлях и в районах с повышенной ветровой нагрузкой), а также при угле кровли более 30°. При расчете ферм ветровая нагрузка на фонарь не принимается во внимание, т.к. оказывает незначительное влияние. В случае крепления стеновых панелей к опорной стойке ветровую нагрузку прикладывают к поясам ферм.

В курсовом проекте при расчете стропильной фермы ветровая нагрузка не учитывается.

Определение нагрузок на стропильную ферму от подвешенного подъемно-транспортного оборудования рассмотрено в [9, 10].

Постоянные нагрузки, действующие на ферму, складываются из веса кровли, стропильной фермы, связей по покрытию, прогонов и др.

Вес кровли определяется суммированием ее отдельных частей, которые приведены в справочных таблицах [7, табл.13.1; 9, табл. П 4.2; 13, табл. 3]. В таблицах приведен также вес металлических конструкций покрытий (стропильных и подстропильных ферм, связей, прогонов, фонарей) на 1 м² горизонтальной поверхности. В курсовом проекте собственный вес фермы (кН/м²) рекомендуется определять по формуле

$$q_{с.ф}^n = \left(\frac{q^n}{1000} + \frac{0,018}{B_{ф}} \right) \cdot \alpha_{ф} \cdot L_{ф} ,$$

где q^n – суммарная нормативная равномерно распределенная нагрузка от собственного веса покрытия и снега, технологического оборудования и др., кН/м²; $B_{ф}$ – шаг стропильных ферм, м; $L_{ф}$ – пролет стропильной фермы, м; $\alpha_{ф}$ – коэффициент, зависящий от типа ригеля и стали: $\alpha_{ф} = 1,4$ – для малоуглеродистых сталей, $\alpha_{ф} = 1,3$ – для низколегированных сталей.

Постоянные нагрузки рекомендуется приводить в табличной форме (табл.1).

Узловая постоянная нагрузка на ферму (кН) собирается с грузовой площади, равной расстоянию между фермами, умноженному на размер панели верхнего пояса

$$F_{пост} = (q_{ф} + \frac{q_{кр}}{\cos \alpha}) \cdot B_{ф} \cdot d ,$$

где $q_{ф}$ – вес фермы и связей, кН/м²; $q_{кр}$ – вес кровли, кН/м²; α – угол наклона верхнего пояса к горизонту, в курсовом проекте можно принять $\cos \alpha = 1$; d – длина панели верхнего пояса фермы.

Таблица 1

Постоянные нагрузки на ферму

Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка, кН/м ²	γ_f	Расчетная нагрузка, кН/м ²

Снеговая нагрузка зависит от снегового района, в котором проектируется здание, от профиля покрытия, наличия фонарей, количества пролетов, размера уклона кровли.

Расчетное значение снеговой нагрузки на 1 м^2 горизонтальной проекции покрытия определяется по формуле

$$S = S_g \mu ,$$

где μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие [1, прилож. 3]; S_g – расчетное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли, принимается по [1, табл. 4*] в зависимости от снегового района:

Снеговой район [1, карта №1]	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
S_g , кН/м ²	0,8	1,2	1,8	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6

Для зданий с односкатными и двускатными покрытиями без фонарей и перепадов высот при угле наклона кровли $\alpha \leq 25^\circ$ коэффициент $\mu = 1$, при $\alpha \geq 60^\circ$ $\mu = 0$, в интервале $25^\circ < \alpha < 60^\circ$ значения μ определяют линейной интерполяцией. Для двух- и многопролетных зданий с двускатными покрытиями без фонарей и перепадов высот при угле наклона кровли $\alpha \leq 15^\circ$ коэффициент $\mu = 1$.

Схемы распределения снеговой нагрузки принимаются по [1, прилож. 3]. В тех случаях, когда более неблагоприятные условия работы элементов фермы возникают при частичном загрузении, рассматривается схема снеговой нагрузки, действующей на части пролета. Так, при загрузении снегом одной половины фермы в средних раскосах может измениться знак усилия, и слабонагруженные растянутые элементы, имеющие большую гибкость, окажутся сжатыми.

Узловая расчетная снеговая нагрузка на ферму (кН) определяется по формуле

$$F_{сн} = S \cdot B_{\phi} \cdot d ,$$

где B_{ϕ} – шаг стропильных ферм, м; d – длина панели верхнего пояса фермы.

Разработка расчетной схемы

Расчетную схему стропильных ферм принимают в виде стержневой системы с шарнирными или жесткими узловыми соединениями. При расчете легких ферм предполагается, что оси всех стержней прямолинейны, расположены в одной плоскости и пересекаются в узле в одной точке (в центре узла).

Статический расчет ферм из труб имеет свои особенности, т.к. жесткое сопряжение стержней в узлах может создавать условия к появлению значительных изгибающих моментов. Шарнирные соединения стержней в узлах допускается принимать, если отношение высоты сечения к длине элемента $h / l \leq 1/10$ при эксплуатации ферм в районах с расчетной температурой наружного воздуха выше $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $h / l \leq 1/15$ – в районах с температурой наружного воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При превышении этих отношений необходимо учитывать дополнительные изгибающие моменты в стержнях от жесткости узлов. При этом осевые усилия можно определять по шарнирной схеме, а дополнительные моменты находить приближенными способами.

Если оси стержней фермы не пересекаются в одной точке, то элементы фермы следует рассчитывать с учетом соответствующих изгибающих моментов. Узловые моменты распределяют пропорционально погонной жесткости примыкающих к узлу элементов. Эксцентриситеты в узлах, за исключением опорных, допускается не учитывать, если они не превышают в фермах из трубчатых сечений 10 % высоты пояса с расположением эксцентриситетов по одну сторону его оси.

На рис. 2 показан пример расчетной схемы стропильной фермы пролетом 30 м с нумерацией узлов и элементов. В курсовом проекте при статическом расчете фермы принимаются шарнирные соединения стержней в узлах.

Определение расчетных усилий в элементах фермы

Статический расчет фермы выполняется на ЭВМ (программы «Ферма», «Лира», «SCAD») для каждого вида загрузки отдельно.

Нагрузка, действующая на ферму, обычно прикладывается к узлам фермы, к которым прикрепляются элементы поперечной конструкции (например, прогоны кровли или подвесного потолка, железобетонные панели и т.д.), передающие нагрузку на ферму. Если нагрузка приложена непосредственно в панели, то в основной расчетной схеме она распределяется между ближайшими узлами, но дополнительно учитывается местный изгиб пояса от расположенной на нем нагрузки. Пояс фермы при этом рассматривают как неразрезную балку, опирающуюся на узлы фермы. Значения моментов в поясах приближенно можно определить по формулам:

– при сосредоточенной нагрузке $M = \frac{F \cdot d}{4} \cdot 0,9$, где коэффициент 0,9

учитывает неразрезность пояса; F – значение сосредоточенной нагрузки;

– при равномерно распределенной нагрузке: пролетный момент в крайней панели $M = \frac{\bar{q} \cdot d^2}{10}$; пролетный момент в промежуточной панели

$M = \frac{\bar{q} \cdot d^2}{12}$; опорный момент $M = \frac{\bar{q} \cdot d^2}{18}$, где \bar{q} – распределенная нагрузка на ферму; d – длина панели.

При жестком сопряжении фермы с колонной в элементах фермы возникают также усилия от рамных моментов на опорах. Усилия в элементах фермы от опорных моментов можно получить, заменив моменты парами горизонтальных сил: $H_1 = M_1 / h_{\text{ф}}^{\text{оп}}$, $H_2 = M_2 / h_{\text{ф}}^{\text{оп}}$, где $h_{\text{ф}}^{\text{оп}}$ – расстояние между осями поясов фермы на опоре.

В курсовом проекте рекомендуется провести расчет стропильной фермы вначале на единичную узловую нагрузку $F = 1$ кН и на единичные моменты слева $M_1 = -1$ кНм и справа $M_2 = -1$ кНм. На рис. 3, 4 показаны схемы нагрузок на ферму пролетом 30 м.

От каждого вида нагрузки по любой из указанных выше программ определяются усилия в стержнях фермы. Для контроля обязательно распечатываются исходные данные, расчетные схемы с действующими нагрузками и усилия в элементах фермы. Расчет фермы в курсовом проекте выполняется только после статического расчета рамы в целом.

Результаты статического расчета фермы сводят в таблицу расчетных усилий (табл. 2). В курсовом проекте усилия в элементах фермы от различных нагрузок получают умножением усилий от единичных нагрузок на величины этих нагрузок ($F_{\text{пост}}$, $F_{\text{сн}}$, M_1 , M_2). Значение опорного момента M_1 ($M_{\text{лев}}$) определяется по результатам расчета поперечной рамы каркаса здания из таблицы расчетных усилий [13, табл. 8] при комбинации усилий $|M|_{\text{max}}$; $N_{\text{соотв}}$ (в курсовом проекте – для сечения 1–1 верхней части колонны). При этом, взяв момент для левой опоры, необходимо определить по эпюрам изгибающих моментов, построенных для поперечной рамы, момент для правой опоры M_2 ($M_{\text{пр}}$). Момент M_2 ($M_{\text{пр}}$) находится при той же комбинации нагрузок, что и $M_{\text{лев}}$, независимо от знака моментов. При этом, если кратковременных нагрузок больше чем одна, то моменты от этих нагрузок умножаются на коэффициент сочетания $\psi = 0,9$.

Для подбора сечений элементов ферм необходимо получить для каждого элемента максимально возможное усилие, т.е. найти наиболее невыгодное сочетание (табл. 2). Расчетные усилия в элементах фермы получают сложением усилий, определенных при расчете на вертикальную нагрузку ($F_{\text{пост}}$, $F_{\text{сн}}$), и усилий от опорных моментов. При этом соблюдают следующие правила:

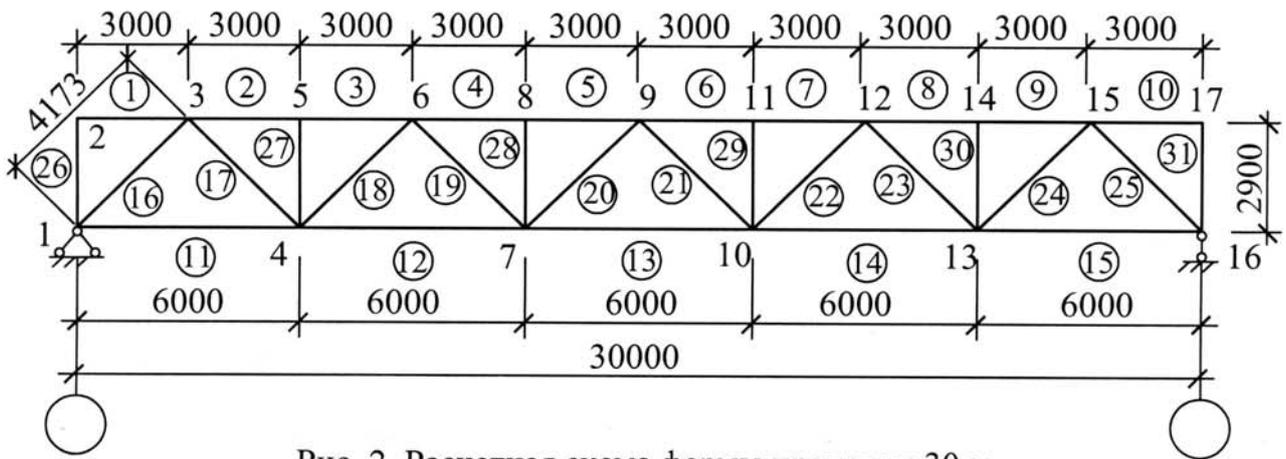


Рис. 2. Расчетная схема фермы пролетом 30 м

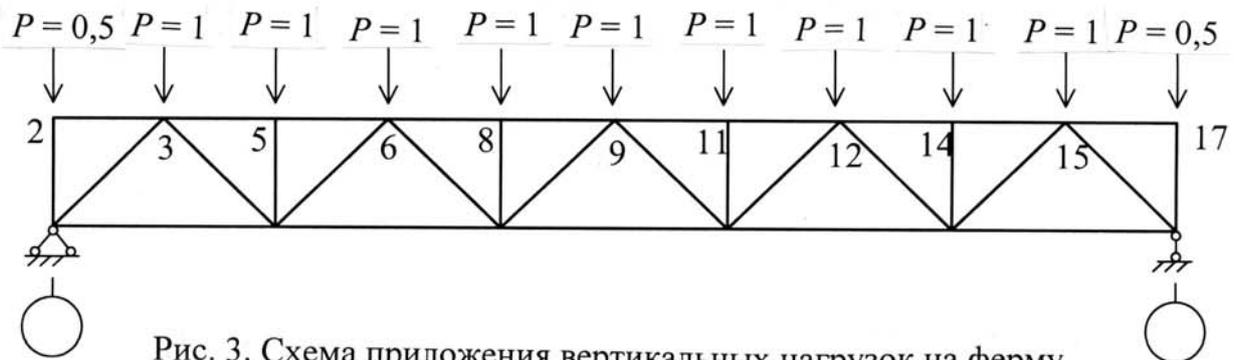


Рис. 3. Схема приложения вертикальных нагрузок на ферму

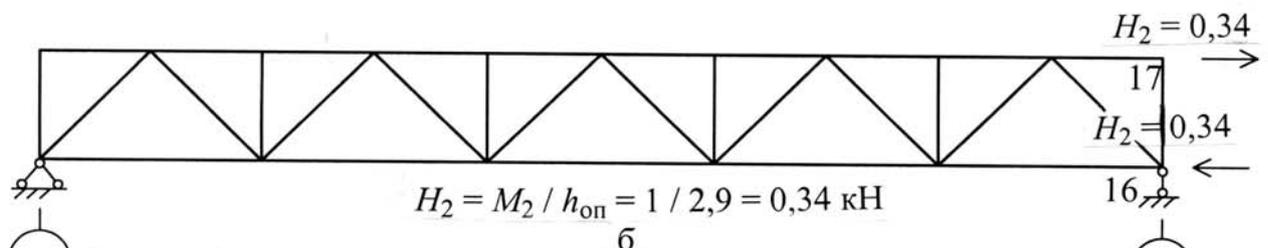
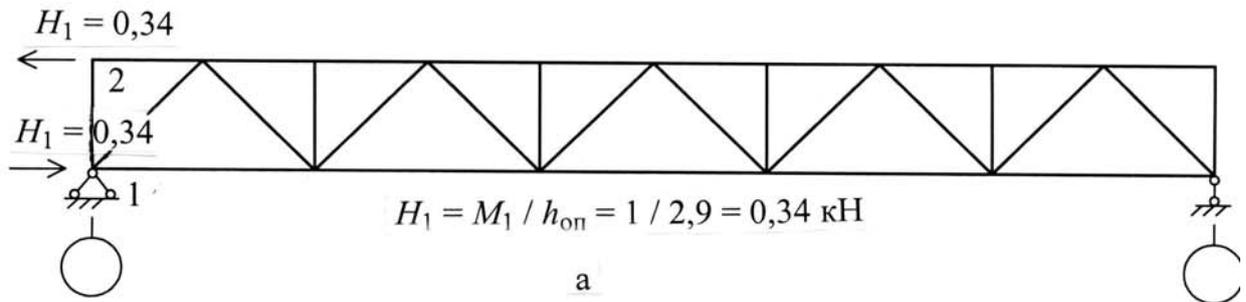


Рис. 4. Схемы приложения горизонтальных усилий от единичных опорных моментов слева (а) и справа (б)

Таблица 2

Расчетные усилия в элементах фермы

Элемент фермы	Номер элемента	Усилие от единичной нагрузки $F = 1$ кН	Усилие от постоянной нагрузки $F_{\text{пост}}$, кН	Усилие от снеговой нагрузки $F_{\text{сн}}$, кН		Усилие от опорных моментов M , кНм				Номер загрузки	Расчетное усилие N , кН
				$\psi = 1$	$\psi = 0,9$	$M_1 = -1$	$M_2 = -1$	$M_1 = \dots$	$M_2 = \dots$		
Верхний пояс	1										
	2										
	3										
	...										
Нижний пояс											
Раскосы											
Стойки											

1. Если знаки усилий от вертикальной нагрузки и моментов разные и усилия от моментов меньше по абсолютной величине, то за расчетное принимают усилие только от вертикальной нагрузки.

2. Если знаки усилий от вертикальной нагрузки и моментов разные, и усилия от моментов больше усилий от вертикальной нагрузки, то стержень должен быть проверен также на алгебраическую сумму этих усилий.

3. Если усилия от вертикальной нагрузки и опорных моментов одного знака, то за расчетное усилие принимают их сумму.

Если при составлении сочетаний учитывается опорный момент, то усилие от снеговой нагрузки принимается с коэффициентом сочетаний $\psi = 0,9$.

Для проверки нижнего пояса фермы на сжатие необходимо оценить комбинацию нагрузок, способных привести к появлению сжимающих усилий в крайней панели нижнего пояса.

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

Конструктивный расчет стропильной фермы включает три этапа:

1. Определение расчетных длин элементов фермы.
2. Подбор сечений элементов фермы.
3. Проектирование узлов фермы.

Расчетные длины элементов фермы

Расчетные длины элементов ферм из круглых труб в плоскости l_{efx} и из плоскости фермы l_{efy} определяются в соответствии с табл. 3 или [11, табл. 57]. Так как форма потери устойчивости поясов из плоскости фермы зависит от того, в каких точках пояса закреплены от смещения, то необходимо к моменту подбора сечений элементов фермы запроектировать системы вертикальных связей по фермам и связей по верхним и нижним поясам ферм [3, 9].

Расчетные длины заносят в таблицу подбора сечений элементов ферм (табл. 4).

Подбор сечений элементов фермы

После определения расчетных усилий производится подбор сечений элементов фермы. Компонуя сечения стержней ферм, необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

1. Сечения поясов следует выполнять постоянными или изменять не более одного раза в фермах пролетом 24 м и более, при меньших пролетах сечение поясов изменять не рекомендуется.

Расчетные длины элементов плоских ферм из круглых труб

Направление потери устойчивости	Расчетная длина l_{ef}		
	поясов	опорных раскосов и опорных стоек	прочих элементов решетки
Фермы с прикреплением элементов решетки к поясам впритык:			
а) в плоскости фермы	l	l	$0,85l$
б) из плоскости фермы	l_1	l_1	$0,85l_1$
- со сплющиванием одного или двух концов в разных плоскостях:			
а) в плоскости фермы	l	l	$0,9l$
б) из плоскости фермы	l_1	l_1	$0,9l_1$
- со сплющиванием двух концов в одной плоскости:			
а) в плоскости фермы	l	l	$0,95l$
б) из плоскости фермы	l_1	l_1	$0,95l_1$

П р и м е ч а н и е: l – геометрическая длина элемента (расстояние между центрами узлов); l_1 – расстояние между центрами узлов, закрепленных от смещения из плоскости фермы (поясами ферм, связями, плитами покрытия, прогонами и т.д.).

2. В фермах из круглых труб применяют в основном электросварные трубы диаметром от 40 до 530 мм. Во избежание продавливания диаметр трубы решетки d должен быть не меньше 0,3 диаметра трубы пояса D и не больше его диаметра: $0,3D \leq d \leq D$.

3. Для обеспечения качества сварки и повышения коррозионной стойкости наименьшую толщину стенок труб для поясов и опорных раскосов следует принимать равной 3 мм, для элементов решетки – 2,5 мм, за исключением стержней, выполняемых со сплющиванием концов в плоскости фермы.

4. В случае применения труб одного диаметра разница в толщинах стенок должна быть более 1,5 мм.

5. Нижний и верхний пояса рекомендуется проектировать из труб одинакового сечения и равной длины.

6. Для удобства комплектования металла количество калибров профилей, принимаемых в ферме, ограничивается: при пролете фермы $L \leq 36$ м

Таблица 4

Подбор сечений элементов ферм

Элемент фермы	Номер элемента	Расчетное усилие N , кН	Сечение	A , см^2	Расчетные длины, см				Радиусы инерции, см		Гибкость		φ_{\min}	γ_c	α [λ]	Напряжение $\text{кН}/\text{см}^2$		Сталь	
					$l_{\text{геом}}$	$l_{\text{эфx}}$	$l_{\text{эфy}}$	i_x	i_y	λ_x	λ_y	σ				$R_y \gamma_c$			
Верхний пояс	1																		
	2																		
	3																		
	...																		
Нижний пояс																			
Раскосы																			
Стойки																			

рекомендуется принимать 5-6 различных калибров, при пролете $L > 36$ м – 6-8 калибров.

7. Для снижения расхода стали целесообразно наиболее нагруженные элементы ферм (пояса, опорные раскосы) проектировать из стали повышенной прочности, а прочие элементы – из обычной стали. Именно замкнутая форма сечения позволяет эффективно использовать стали повышенной прочности. Для элементов ферм по сокращенному сортаменту рекомендуются электросварные трубы из стали марок Ст15, Ст20, ВСт3пс6, 09Г2С, 16Г2АФ, 14Г2 или 17Г1С.

В курсовом проекте марки сталей элементов фермы принимаются по заданию и при необходимости уточняются преподавателем.

Подбор сечений элементов ферм удобно оформлять в табличной форме (см. табл. 4).

Различают следующие виды напряженного состояния элементов ферм:

1. *Центрально-сжатые элементы.* При подборе сечения центрально-сжатых элементов предварительно задаются гибкостью: для поясов и опорных раскосов $\lambda_3 = 60 \dots 80$, для решетки $\lambda_3 = 100 \dots 120$. По заданной гибкости по [2, табл. 72] определяют коэффициент продольного изгиба φ_3 (в первом приближении можно задаться непосредственно $\varphi_3 = 0,7 \dots 0,8$ для поясов и $\varphi_3 = 0,4 \dots 0,6$ для элементов решетки). Требуемую площадь сечения находят из условия устойчивости

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{\varphi_3 R_y \gamma_c} ,$$

где R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести [2, табл. 51]; γ_c – коэффициент условий работы конструкций, принимаемый по табл. 5 в соответствии с рекомендациями [4, 11].

По требуемой площади $A_{\text{тр}}$ подбирают по сортаменту сечение трубы и определяют его фактические геометрические характеристики A , i_x , i_y . В прилож. 1 приведена выборка из сортамента электросварных труб. Для подобранного сечения определяют гибкости и сравнивают с предельным значением:

$$\lambda_x = \frac{l_{\text{efx}}}{i_x} < [\lambda] \quad ; \quad \lambda_y = \frac{l_{\text{efy}}}{i_y} < [\lambda] ,$$

где $[\lambda]$ – предельная гибкость (табл. 6). По большей гибкости уточняют коэффициент продольного изгиба φ по [2, табл. 72] и проверяют устойчивость элемента по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq R_y \gamma_c .$$

Если гибкость стержня предварительно была задана неправильно и проверка показала перенапряжение или значительное (больше 5...10 %) недонапряжение, то проводят корректировку сечения, принимая промежуточное значение гибкости между предварительно заданным и фактическим значением.

Коэффициенты условий работы γ_c

Элементы и соединения конструкций	Коэффициенты условий работы γ_c
1. Сжатые элементы ферм перекрытий под залами, трибунами, под помещениями магазинов, книгохранилищ, архивов и т.д. при весе перекрытий, равном или большем временной нагрузке	0,9
2. Растянутые элементы ферм в сварных конструкциях	0,95
3. Панели поясов трубчатых ферм диаметром D при наличии расцентровки стержней решетки в узлах с эксцентриситетами $e < 0,1D$ (при проверке прочности и устойчивости без учета изгибающих моментов)	0,9
4. Трубчатые элементы конструкций толщиной t , имеющие в торцах сварные крепления впритык (втавр) к другим трубчатым деталям толщиной $2t$ или к листовым деталям толщиной менее $4t$, за исключением креплений к фланцам, имеющим с противоположной стороны соосное крепление трубы или центрирующую прокладку	0,8
5. Элементы решетки (стойки) бесфасоночных ферм, прикрепленные в узлах к двум другим элементам решетки (раскосам), имеющим разные знаки усилий	0,85
6. Сжатые трубчатые элементы диаметром D и толщиной t , имеющие сплюсненные концы: а) со свободным формированием переходного участка от круглого сечения к сплюсненному (с неплавным переходом) б) с принудительным формированием переходного участка с уклоном 1 : 6 (с плавным переходом)	1 - $0,015 \frac{D}{t}$, но не более 0,7 и не менее 0,3 1,3 - $0,015 \frac{D}{t}$, но не более 1,0 и не менее 0,4
6. Сварные соединения трубчатых элементов без подкладного кольца: а) встык б) впритык (тавровое)	0,75 0,85

Примечание: 1) коэффициенты γ_c , установленные в п. 2 и 7, а также в п. 4 и 6 одновременно не учитываются; 2) коэффициент γ_c , установленный в п.6, не распространяется на крепления соответствующих элементов в узлах; 3) коэффициенты γ_c , установленные в п. 4 и 6, при проверке устойчивости сжатых стержней не учитываются; 4) в не оговоренных случаях $\gamma_c = 1$.

Предельные гибкости элементов плоских ферм из круглых труб

Наименование элементов и вид напряженного состояния	Предельная гибкость при работе на		
	статическую нагрузку	динамическую нагрузку	нагрузку от кранов режимов работы 7К, 8К
1. Пояса, опорные раскосы и стойки, передающие опорные реакции и работающие на а) растяжение б) сжатие	400	250	250
	180 – 60α		
2. Прочие элементы решетки, работающие на а) растяжение б) сжатие	400	350	300
	210 – 60α		

Примечание: $\alpha = \frac{N}{\varphi AR_{y\Gamma c}}$ – коэффициент, принимаемый не менее 0,5.

Для верхнего пояса фермы подбор сечения рекомендуется начинать с наиболее нагруженной панели. Если гибкость верхнего пояса превышает предельную, то можно либо увеличить сечение пояса, либо изменить схему связей по верхним поясам ферм.

2. *Центрально-растянутые элементы.* Требуемую площадь сечения центрально-растянутого элемента определяют по формуле

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{R_{y\Gamma c}} .$$

Затем по сортаменту по $A_{\text{тр}}$ подбирают сечение трубы и определяют его фактические геометрические характеристики A , i_x , i_y . Для подобранного сечения определяют гибкости и сравнивают с предельными:

$$\lambda_x = \frac{l_{\text{efx}}}{i_x} < [\lambda] \quad ; \quad \lambda_y = \frac{l_{\text{efy}}}{i_y} < [\lambda] .$$

Прочность принятого сечения проверяют по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \leq R_{y\Gamma c} .$$

Для нижнего растянутого пояса фермы подбор сечения рекомендуется начинать с наиболее нагруженной панели. Если гибкость нижнего пояса превышает предельную, то можно изменить схему связей по нижним поясам ферм постановкой дополнительных растяжек.

3. *Внецентренно сжатые элементы.* Предварительно задаются гибкостью элемента $\lambda_x^3 = 60 \dots 80$ и определяют отвечающие этой гибкости радиус инерции сечения $i_x^{\text{тр}} = l_{efy} / \lambda_x^3$, требуемую высоту сечения $h_{\text{тр}} = i_x^{\text{тр}} / \alpha_x$ и ядровое расстояние $\rho_x^{\text{тр}} = (i_x^{\text{тр}})^2 / z$, где для сечений из круглых труб $\alpha_x = 0,355$ и $z = 0,5h_{\text{тр}}$ (z – расстояние от центра тяжести до наиболее сжатого края сечения).

Определяют относительный и приведенный эксцентриситеты:

$$m_x^{\text{тр}} = \frac{M_x}{N \cdot c_x^{\text{тр}}} ; \quad m_{ef}^{\text{тр}} = m_x^{\text{тр}} \cdot \eta ,$$

где η – коэффициент влияния формы сечения [2, табл. 73].

По условной гибкости $\overline{\lambda}_x^3 = \lambda_x^3 \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ и приведенному эксцентриситету $m_{ef}^{\text{тр}}$ по [2, табл. 74] определяют коэффициент снижения несущей способности при внецентренном сжатии ϕ_e^3 и находят требуемую площадь сечения

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{\phi_e^3 \cdot R_y \cdot \gamma_c} .$$

По требуемой площади $A_{\text{тр}}$ подбирают по сортаменту сечение трубы и определяют его фактические геометрические характеристики A, i_x, i_y . Для подобранного сечения уточняют следующие величины:

$$\lambda_x = \frac{l_{efx}}{i_x} < [\lambda] ; \quad \overline{\lambda}_x = \lambda_x \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} ; \quad m_x = \frac{M_x \cdot A \cdot z}{N \cdot J_x} ; \quad m_{ef} = m_x \cdot \eta .$$

По точно вычисленным характеристикам $\overline{\lambda}_x$ и m_{ef} по [2, табл. 74] принимают коэффициент ϕ_e и проверяют устойчивость стержня в плоскости действия момента по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\phi_e \cdot A} \leq R_y \gamma_c .$$

Расчет на устойчивость при $m_x > 20$ не требуется.

Устойчивость стержня из плоскости действия момента проверяют по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\phi_y \cdot c \cdot A} \leq R_y \gamma_c ,$$

где c – коэффициент, учитывающий изгибно-крутильную форму потери устойчивости, принимается в соответствии с [2, п. 5.31]; ϕ_y – коэффициент продольного изгиба относительно оси $y - y$, определяют по [2, табл. 72] по

гибкости стержня $\lambda_y = \frac{l_{efy}}{i_y} < [\lambda]$.

4. *Внецентренно растянутые элементы.* Подбор сечения внецентренно растянутых элементов ферм можно проводить как центрально-растянутых стержней. Прочность подобранного сечения проверяют по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A_n} + \frac{M}{W_n} \leq R_y \gamma_c .$$

5. *Подбор сечений элементов ферм по предельной гибкости.* Ряд стержней легких ферм имеют незначительные усилия и, следовательно, небольшие напряжения. Сечения этих стержней подбирают по предельной гибкости. Зная расчетную длину l_{efx} и l_{efy} и значение предельной гибкости $[\lambda]$ (см. табл. 6), определяют требуемые радиусы инерции $i_x^{тр} = \frac{l_{efx}}{[\lambda]}$ и $i_y^{тр} = \frac{l_{efy}}{[\lambda]}$ и по сортаменту подбирают сечение, имеющее наименьшую площадь.

Особенности конструирования ферм из круглых труб. Конструирование фермы следует начинать с вычерчивания осевых линий элементов, сходящихся в узлах. Стержни центрируют по геометрическим осям труб. При наличии расцентровки стержней в узлах необходимо при расчете фермы учитывать дополнительные узловые моменты. При неполном использовании несущей способности поясной трубы допускается эксцентриситет не более 1/4 диаметра поясной трубы.

При бесфасоночных соединениях в узлах тонкостенность поясов из условия местной устойчивости рекомендуется принимать не более значений, приведенных в табл. 7, тонкостенность примыкающих элементов – по возможности максимальной, но также не более значений, приведенных в табл. 7.

Таблица 7

Тонкостенность элементов ферм из круглых труб

Предел текучести стали R_{yn} , кН/см ²	Тонкостенность		
	поясов $\delta = D / t$	примыкающих элементов $\delta_d = d / t_d$	
		сжатых	растянутых
До 30	30	90	90
Св. 30 до 40	35	80	90
Св. 40	40	70	90

Примечание: 1) указанные в табл. 7 значения δ для поясов являются ориентировочными и не исключают необходимости проверки прочности узлов; 2) для сжатых примыкающих элементов при указанных в табл. 7 значениях δ_d не требуется проверка их стенок на местную устойчивость.

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ УЗЛОВ ФЕРМЫ

Соединение трубчатых стержней в узлах фермы должно обеспечивать прочность узла и герметичность торцов труб, чтобы предотвратить возникновение коррозии с внутренней стороны полых элементов.

В трубчатых фермах наиболее рациональны бесфасоночные узлы с непосредственным примыканием стержней решетки к поясам. При выполнении фигурной резки концов специальными машинами такие узлы дают высококачественное соединение с минимальной затратой труда и материала. Если нет станков для фигурной обработки торцов труб, узлы трубчатых ферм выполняют со сплющиванием концов стержней решетки, а в исключительных случаях – на фасонках или с помощью цилиндрических и полукруглых вставок [6, 7, 14]. Сплющивание концов допустимо лишь для труб из малоуглеродистой или другой пластичной стали.

Характерные решения конструкции узлов стропильных ферм из круглых труб приведены на рис. 5.

В типовой серии [3] в фермах из круглых труб принимают бесфасоночные узлы сопряжения элементов решетки с поясами. Примыкание раскосов к поясам рекомендуется выполнять с разделкой кромок, а сварку в узловых соединениях труб производить с проплавлением стенки примыкающей трубы на всю ее толщину. Заводские сварные соединения элементов ферм рекомендуется выполнять полуавтоматической сваркой, на монтаже допускается применение ручной сварки. Материалы для сварки выбирают согласно [2, табл. 55*].

В курсовом проекте необходимо рассчитать все узлы для отправочного элемента фермы, включая опорные узлы и монтажные стыки отправочных элементов ферм. Расчет следует выполнить с вычерчиванием узлов в пояснительной записке.

Расчет узлового сопряжения с непосредственным примыканием стержней решетки к поясам (см. рис. 5, а) является теоретически сложной задачей, относящейся к области расчета пересекающихся цилиндрических оболочек. Напряжения по длине сварного шва, соединяющего трубу решетки с поясом, распределяются неравномерно и зависят от отношения диаметров соединяемых труб, толщины стенки и прочностных характеристик материала поясной трубы, угла сопряжения труб и т.п. Так как центр тяжести сварного шва обычно не совпадает с осью приложения усилия, то рекомендуется проверять отдельно несущую способность участков шва, лежащих по разные стороны от оси, принимая, что на каждый участок передается половина осевого усилия. Форма сварного шва без снятия фаски получается переменной по длине линии соединения труб: при остром угле примыкания шов приближается к угловому, при тупом – к стыковому.

В трубах без разделки кромок участок шва у тупого угла можно рассматривать как стыковой, остальные – как угловые. В этом случае прочность шва, прикрепляющего трубчатый стержень решетки, можно проверить в запас

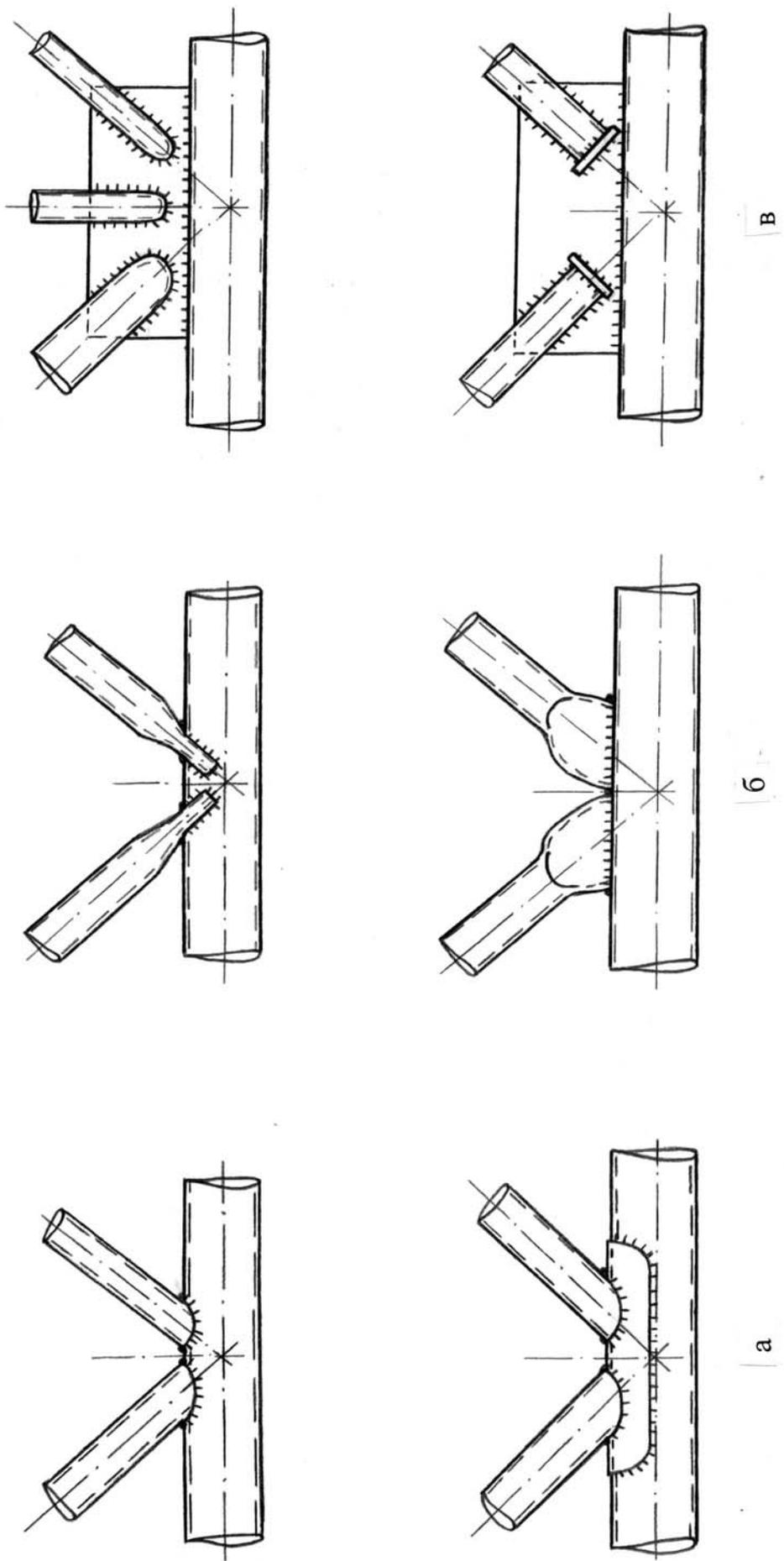


Рис. 5. Узлы ферм из труб: а – с непосредственным примыканием; б – со сплющиванием концов стержней;
в – на фасонках

несущей способности по формуле (расчет по металлу шва):

$$\sigma = \frac{N}{B f k_f l_w} \leq 0,85 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c ,$$

где 0,85 – коэффициент условия работы шва, учитывающий неравномерность распределения напряжений по длине шва; l_w – длина шва,

$$l_w = \frac{p d_0}{2} [1,5(1 + \operatorname{cosec} \alpha) - \sqrt{\operatorname{cosec} \beta}] .$$

Значения коэффициента ξ зависят от соотношения диаметров труб:

d/D	0,2	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
ξ	1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,08	1,12	1,22

Аналогичный расчет выполняют по металлу границы сплавления (β_z , R_{wz} , γ_{wz}). При непосредственном примыкании стержней решетки к поясам с обработкой кромок (со снятием фаски с переменным углом наклона) соединительные швы на большей части длины можно считать стыковыми. Прочность сварного шва в этом случае проверяется по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq 0,85 R_{wy} \gamma_c ,$$

где A – площадь сечения прикрепляемой трубы; R_{wy} – расчетное сопротивление сварного шва встык растяжению ($R_{wy} = 0,85 R_y$) или сжатию ($R_{wy} = R_y$).

Коэффициент 0,85 принимают для соединений впритык (тавровых) при угле раскрытия шва более 30° без подварки корня сварного шва.

Если в узлах трубчатые стержни решетки пересекаются между собой, растянутый раскос целесообразно приварить к поясу по всему контуру сечения, а сжатый раскос или стойку частично прирезать и приварить к растянутому.

Точнее узловое бесфасоночное прикрепление труб можно рассчитать по методике, предложенной в [11]. Пример расчета по данной методике представлен в прилож. 2.

Прочность стенки трубы пояса в местах примыкания к нему элементов решетки и опирания других элементов необходимо проверить на местный изгиб в соответствии с рекомендациями [11]. При недостаточной толщине пояса его можно усилить накладкой. Накладки вырезают из трубы того же диаметра, что и пояс, или изгибают из листа толщиной не менее одной и не более двух толщин стенки поясной трубы.

Соединять трубы одинакового диаметра рационально встык на остающемся подкладном кольце (рис. 6). Расчет такого соединения на растяжение и сжатие производят по формуле

$$\sigma = \frac{N}{p \cdot D_{cp} \cdot t} \leq R_{wy} \gamma_{wc} ,$$

где D_{cp} – средний диаметр трубы с меньшей толщиной стенки; t – меньшая

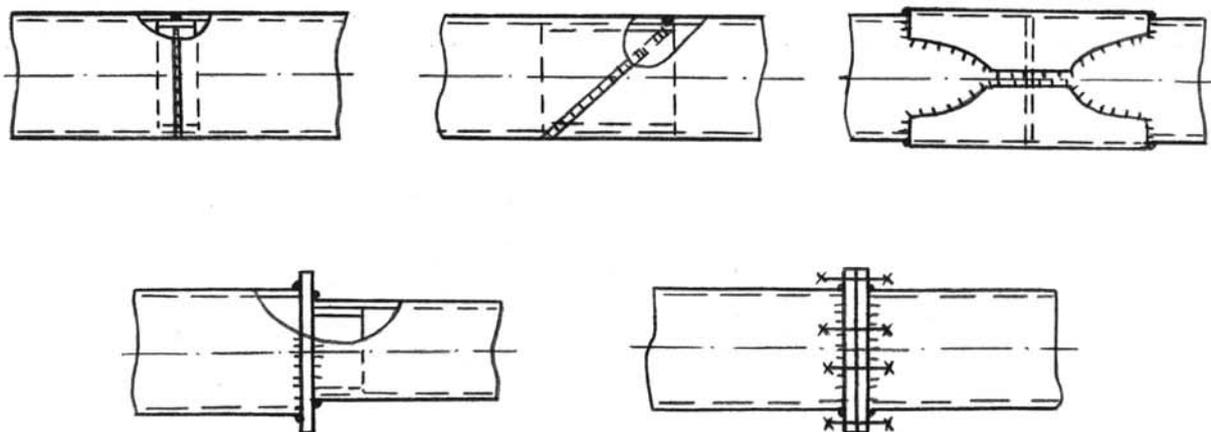


Рис. 6. Стыковые соединения труб

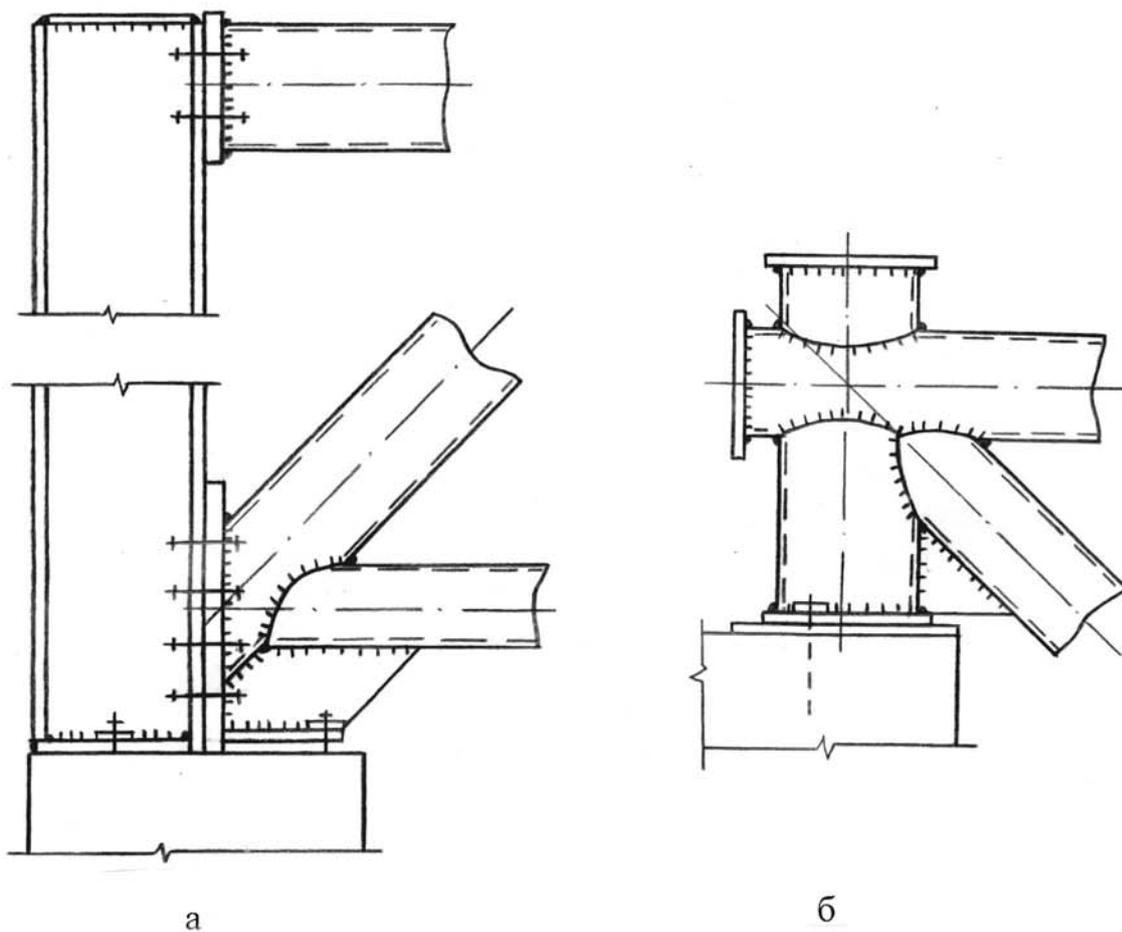


Рис. 7. Опорные узлы трубчатых ферм: а – опорная стойка из двутавра;
б – опорная стойка из обрезка трубы

толщина стенки соединяемых труб; γ_{wc} – коэффициент условий работы сварного стыкового соединения: при сварке на подкладном кольце $\gamma_{wc} = 1$, без него $\gamma_{wc} = 0,75$.

Стыковое соединение получается равнопрочным с основным металлом при расчетном сопротивлении наплавленного металла не ниже расчетного сопротивления материала труб для сталей, не разупрочняющихся при сварке. При более низком расчетном сопротивлении наплавленного металла стыковое соединение на подкладном кольце можно выполнить косым швом.

Если невозможно обеспечить достаточную точность подгонки труб для сопряжения встык и равнопрочность сварного шва, стыковые соединения труб равных диаметров выполняют с помощью парных кольцевых накладок, гнутых из листа или вырезаемых из трубы того же или несколько большего диаметра. Толщину накладок и сварного шва рекомендуется принимать на 20 % больше толщины стыкуемых труб. Длина сварного шва при накладках с фигурными вырезами приближенно определяется по формуле

$$l_w \approx 2n \sqrt{a^2 + \left(\frac{pD}{2n}\right)^2},$$

где n – число лепестков по периметру трубы; a – размер лепестка (глубина фигурного выреза вдоль оси трубы).

Стыковые соединения труб разных диаметров, работающие на сжатие, а также соединения в местах перелома оси пояса могут выполняться при помощи торцевых прокладок или фланцевых соединений.

В сварных соединениях трубчатых элементов расчетную толщину шва рекомендуется принимать равной меньшей толщине стенки соединяемых труб. Минимальное значение катета шва k_f^{\min} определяется по [2, табл. 38], максимальное значение составляет $k_f^{\max} = 1,2t_{\Pi}$, где t_{Π} – наименьшая толщина стенки соединяемых труб.

Для опирания панелей или прогонов на верхнем поясе фермы предусматриваются специальные столики из круглых труб (рис. 8, 9 прилож. 2).

Опорные узлы ферм. Конструкция опорных узлов ферм зависит от вида опор (металлические или железобетонные колонны, кирпичные стены и т.д.) и способа сопряжения ферм с колоннами (жесткое или шарнирное).

При шарнирном сопряжении наиболее простым является узел опирания фермы на колонну сверху с использованием дополнительной стойки (надколонника) [3, 7, 8]. Опорную стойку в зависимости от величины действующих на нее усилий можно запроектировать из прокатного или сварного двутавра (см. рис. 7, а) или из обрезка трубы (см. рис. 7, б).

В типовых конструкциях [3] нижние пояса ферм соединяют с опорной двутавровой стойкой болтами нормальной точности. Верхние пояса стропильных ферм прикрепляют к фасонке надколонника болтами нормальной точности. Подвижность этого крепления обеспечивается овальными

ми отверстиями в фасонках опорной стойки.

Опорное давление фермы F_R передается с опорного фланца фермы через строганные или фрезерованные поверхности на опорную плиту колонны. Опорный фланец для четкости опирания должен выступать на 10...20 мм ниже фасонки опорного узла. Площадь торца фланца определяют из условия смятия

$$A_{\text{тр}} \geq \frac{1,2F_R}{R_p},$$

где R_p – расчетное сопротивление стали смятию торцевой поверхности.

При жестком сопряжении стропильная ферма примыкает к колонне сбоку (рис. 11 прилож. 2) и устанавливается на опорный столик, а усилия от опорного момента воспринимаются фланцевым соединением на болтах.

В курсовом проекте для расчета опорных узлов из таблицы основных сочетаний нагрузок для сечения 1–1 выбирают расчетные усилия N_{1-1} , $M_{\text{max}}^{\text{лев}}$. Момент раскладывают на пару горизонтальных сил $H = M_{\text{max}}^{\text{лев}} / h_{\text{ф}}^{\text{оп}}$, которые воспринимаются узлами крепления нижнего и верхнего поясов фермы.

Нижний опорный узел. Опорное давление фермы $F_R = N_{1-1}$ передается с опорного фланца фермы через строганные или фрезерованные поверхности на опорный столик. Опорный фланец должен выступать на 10...20 мм ниже фасонки опорного узла. Опорный столик выполняют из листа $t = 30...40$ мм. Учитывая возможный эксцентриситет передачи нагрузки, возникающий из-за неплотного опирания фланца и его перекоса в своей плоскости, угловые швы крепления столика рассчитывают на усилие $1,2 F_R$. Высоту столика определяют из условия прочности сварного шва на срез

$$h_{\text{ст}} = \frac{1,2F_R}{2 \cdot v_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \Gamma_{wf} \cdot \Gamma_c} + 1...2 \text{ см}.$$

Опорный фланец прикрепляют к полке колонны на болтах грубой или нормальной точности, которые ставят в отверстия на 3...4 мм больше диаметров болтов, чтобы они не могли воспринять опорную реакцию фермы в случае неплотного опирания фланца на опорный столик. Для зданий, возводимых в районах с расчетной температурой наружного воздуха выше -40 °С, следует применять болты классов 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.6 и 8.8 по ГОСТ 15589–70*, ГОСТ 15591–70*, ГОСТ 7798–70*, ГОСТ 7796–70*.

В большинстве случаев опорный момент $M_{\text{max}}^{\text{лев}}$ имеет знак минус, т.е. направлен против часовой стрелки. В этом случае горизонтальная сила H прижимает фланец узла нижнего пояса к колонне и болты в узле ставятся конструктивно (обычно 6...8 болтов диаметром 20 или 24 мм). Болты в соединении устанавливаются в соответствии с [2, табл. 39].

Если в опорном узле возникает положительный момент $M_{\text{max}}^{\text{лев}}$ и усилие H отрывает фланец от колонны, то болты крепления фланца нижнего пояса к колонне работают на растяжение и их прочность следует проверить с учетом внецентренного приложения усилия (см. пример 4 прилож. 2).

Швы крепления нижнего пояса фермы к опорному фланцу работают в сложных условиях, т.к. воспринимают опорную реакцию фермы F_R и, как правило, внецентренно приложенную силу H . Под действием опорного давления F_R швы срезаются вдоль шва и в них возникают напряжения

$$\tau^F = \frac{F_R}{b_f \cdot k_f \cdot \Sigma l_w} .$$

Усилие H приводит к срезу шва в направлении, перпендикулярном оси шва, и появлению напряжений

$$\tau^H = \frac{H}{b_f \cdot k_f \cdot \Sigma l_w} .$$

Поскольку центр шва может не совпадать с осью нижнего пояса, то на шов действует момент $M = H \cdot e$, где e – эксцентриситет приложения усилия H . Под действием момента шов также работает на срез перпендикулярно оси шва и в нем возникают напряжения

$$\tau^M = \frac{M}{W_f} = \frac{6 \cdot H \cdot e}{b_f \cdot k_f \cdot \Sigma l_w^2} .$$

Прочность шва крепления фланца к фасонке проверяют в наиболее напряженной точке на действие результирующих напряжений

$$\tau = \sqrt{(\tau^F)^2 + (\tau^H + \tau^M)^2} \leq 0,85 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c .$$

Верхний опорный узел. При отрицательном знаке опорного момента $M_{\max}^{\text{лев}}$ горизонтальная сила H в узле крепления верхнего пояса стремится оторвать фланец от колонны и вызывает его изгиб. Напряжения во фланце определяют по формуле

$$\sigma = \frac{M_{\text{фл}}}{W_{\text{фл}}} = \frac{6 \cdot M_{\text{фл}}}{l \cdot t^2} \leq R_y \gamma_c ,$$

где l и t – соответственно длина и толщина фланца.

Желательно верхний опорный узел проектировать так, чтобы сила H проходила через центр фланца. В этом случае усилие растяжения во всех болтах будет одинаковым и необходимое число болтов можно определить по формуле

$$n = \frac{H}{[N_b]_{\Gamma c}} ,$$

где $[N_b]$ – несущая способность болта на растяжение, $[N_b] = R_{bt} \cdot A_{bn}$; R_{bt} – расчетное сопротивление болта растяжению [2, табл. 58*]; A_{bn} – площадь сечения болта нетто [2, табл. 62*].

Шов крепления верхнего пояса к фланцу работает на срез, и его прочность проверяют по формуле

$$\tau = \frac{H}{b_f \cdot k_f \cdot l_w} \leq 0,85 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c .$$

Если горизонтальная сила H не проходит через центр фланца, то швы и болты рассчитывают с учетом эксцентриситета.

Если в опорном узле возникает положительный момент $M_{\max}^{\text{лев}}$, то сила H в узле крепления верхнего пояса прижимает фланец к колонне и болты в узле ставятся конструктивно (обычно 4...6 болтов).

При обеспечении податливости верхнего опорного узла шарнирное сопряжение фермы с колонной может быть выполнено и при опирании сбоку [8].

Укрупнительные стыки ферм. Решение укрупнительных узлов ферм при их поставке из отдельных отправочных элементов показано на рис. 10, а также в [3, 5, 6, 7]. Приведенные решения обеспечивают сборку конструкции из двух симметричных взаимозаменяемых полуферм.

Укрупнительные соединения ферм из круглых труб в коньковом узле рекомендуется проектировать фланцевыми с использованием центрирующей прокладки. Монтажные стыки работающих на растяжение нижних поясов ферм проектируются фланцевыми на высокопрочных болтах, монтажные стыки сжатых верхних поясов – на обычных болтах. Высокопрочные болты для монтажных стыков нижних поясов принимаются по ГОСТ 22353-77*, ГОСТ 22356-77* из стали 40Х «селект».

Пример расчета укрупнительных узлов верхнего и нижнего поясов приведен в прилож. 2.

РАЗРАБОТКА РАБОЧИХ ЧЕРТЕЖЕЙ

Рабочие чертежи рассчитанной фермы выполняются на стадии КМД (конструкции металлические). В курсовом проекте графическая часть выполняется на листе формата А1 (лист № 2 проекта) и содержит:

1. Расчетно-геометрическую схему фермы, на которой указываются привязка к осям здания, размеры элементов фермы и расчетные усилия (в кН) в стержнях отправочного элемента. Рекомендуемый масштаб 1:100.

2. Изображение отправочного элемента фермы (левого), вид сверху и снизу, сечения. Рекомендуемые масштабы: схема осевых линий – масштабы 1:20, 1:25, 1:30, 1:50, поперечные размеры элементов – масштабы 1:10, 1:15.

3. Узлы и сопряжения: монтажные узлы для верхнего и нижнего поясов в сборе, узлы опирания фермы на колонну (в курсовом проекте опорные узлы можно привести на листе № 1). Рекомендуемые масштабы 1:10, 1:15.

4. Спецификацию на отправочный элемент фермы.

5. Примечания к чертежу, включающие указания о способах сварки, сварочных материалах, преобладающих и не проставленных на чертеже размерах сварных швов, болтов, отверстий и т.д.

ТРЕБОВАНИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ И МОНТАЖУ СТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ

Изготовление и монтаж стропильных ферм покрытия должны производиться в соответствии с требованиями СНиП III–18–75 «Металлические конструкции. Правила производства и приемки работ», СНиП 3.03.03–87 «Несущие и ограждающие конструкции».

Изготавливать фермы рекомендуется на специализированных предприятиях, оснащенных соответствующим оборудованием. Сборка конструкций и отдельных элементов должна выполняться в жестких кондукторах на специальных стендах.

При проектировании и изготовлении стропильных ферм из труб особое внимание следует уделять выбору стали для изготовления фланцев. Эта сталь должна поставляться в термически обработанном состоянии (нормализация или закалка с отпуском) и подвергаться на заводе – изготовителе металлоконструкций испытанию на статическое растяжение на образцах, вырезанных из листов в направлении поперек проката. Материал фланцев или готовые фланцы (до приварки к поясам ферм или после приварки) должны подвергаться ультразвуковому дефектоскопическому контролю на наличие внутренних расслоений, грубых шлаковых включений и т.п.

Защиту стальных ферм от коррозии следует производить в соответствии с требованиями СНиП 2.03.11–85 «Защита строительных конструкций от коррозии» и СНиП 3.04.03–85 «Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии».

Монтаж стропильных ферм покрытия рекомендуется выполнять поэлементно или блоками в соответствии с ППР, утвержденным в установленном порядке.

Допускаемые отклонения при монтаже ферм (регламентированы СНиП III–18–75):

Отклонение отметок опорных узлов ферм	±20 мм
Стрела прогиба (кривизна) между точками закрепления участков сжатого пояса из плоскости	1/750 величины закрепленного участка, но не более 15 мм
Отклонение расстояний между осями ферм по верхнему поясу	±15 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2003. – 44 с.
2. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 96 с.
3. Серия 1.460.3 –17.1КМ. Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий с применением ферм с поясами из труб.
4. Давыдов Е.Ю. Расчет и конструирование стержневых конструкций с применением круглых и прямоугольных труб: Учеб. пособие. – Минск, 1983. – 120 с.
5. Кузин Н.Я. Проектирование и расчет стальных ферм покрытий промышленных зданий: Учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 184 с.
6. Мандриков А.П. Примеры расчета металлических конструкций: Учеб. пособие для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 431с.
7. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов/ Под общ. ред. Е.И.Беленя. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 560 с.
8. Металлические конструкции: В 3 т. Т. 1. Элементы стальных конструкций: Учеб. пособие для строит. вузов/ Под ред. В.В.Горева. – М.: Высш.шк., 1997. – 527 с.
9. Металлические конструкции: В 3 т. Т. 2. Конструкции зданий: Учеб. пособие для строит. вузов/ Под ред. В.В.Горева. – М.: Высш.шк., 1999. – 528 с.
10. Мурашко Н.Н., Соболев Ю.В. Металлические конструкции производственных сельскохозяйственных зданий. – Минск: Высшая школа, 1987. – 278 с.
11. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*. Стальные конструкции)/ ЦНИИСК им.Кучеренко Госстроя СССР. – М., 1989. – 148 с.
12. Пособие по проектированию стальных конструкций из круглых труб/ ЦНИИСК им.Кучеренко Госстроя СССР. – М.: 1983. – 69 с.
13. Проектирование металлического каркаса одноэтажного производственного здания. Ч. 1. Сбор нагрузок / Сост.: И.И.Зуева, Б.И.Десятов; Перм.гос. техн.ун-т. – Пермь, 1998. – 47 с.
14. Расчет стальных конструкций: Справ. пособие/ Я.М.Лихтарников, Д.В.Ладыженский, В.М.Клыков. 2-е изд., перераб. и доп.– Киев: Будивельник, 1984.– 368 с.
15. Рекомендации по проектированию стальных конструкций с применением круглых труб/ ЦНИИСК им.Кучеренко Госстроя СССР. – М., 1973. – 95 с.
16. Руководство по проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций/ ВНИИПНПромстальконструкция. – М., 1988. – 48 с.

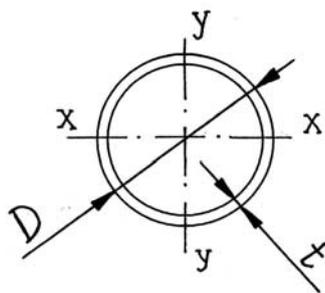


Таблица 8

Ограниченный сортамент электросварных
прямошовных труб по ГОСТ 10704 – 91

Размеры, мм		Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м трубы, кг
<i>D</i>	<i>t</i>			
63,5	3,5	6,6	2,1	5,2
	3,8	7,1	2,1	5,6
70	3,5	7,3	2,4	5,7
	3,8	7,9	2,4	6,2
	4,0	8,3	2,3	6,5
76	4,0	9,0	2,6	7,1
	4,5	10,1	2,5	7,9
	5,0	11,1	2,5	8,8
	5,5	12,2	2,3	9,6
83	3,5	8,74	2,82	6,86
	4,0	9,92	2,8	7,79
	4,5	11,1	2,78	8,71
	5,0	12,3	2,76	9,62
89	3,5	9,4	3,03	7,38
	4,0	10,7	3,01	8,38
	4,5	11,9	2,99	9,38
	5,0	13,2	2,97	10,36
102	3,5	10,8	3,49	8,5
	4,0	12,3	3,47	9,67
	4,5	13,8	3,46	10,82
	5,0	15,2	3,44	11,96
108	4,0	13,1	3,7	10,3
	4,5	14,6	3,7	11,5
	5,0	16,2	3,7	12,7
	5,5	17,7	3,6	13,9

Размеры, мм		Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м трубы, кг
<i>D</i>	<i>t</i>			
114	3,5	12,2	3,91	9,54
	4,0	13,8	3,89	10,85
	4,5	15,5	3,88	12,15
	5,0	17,1	3,86	13,44
127	4,0	15,5	4,35	12,13
	4,5	17,3	4,34	13,59
	5,0	19,2	4,32	15,04
	5,5	21	4,3	16,48
133	4,5	18,2	4,6	14,3
	5,0	20,1	4,5	15,8
	5,5	22	4,5	17,3
140	4,0	17,1	4,82	13,42
	4,5	19,2	4,8	15,04
	5,0	21,2	4,78	16,65
	5,5	23,2	4,76	18,24
152	4,0	18,6	5,24	14,6
	4,5	20,8	5,22	16,37
	5,0	23,1	5,2	18,13
	5,5	25,3	5,19	19,87
159	4,0	19,5	5,48	15,29
	4,5	21,8	5,47	17,15
	5,0	24,2	5,45	18,99
	6,0	28,8	5,42	22,64
168	4,5	23,1	5,78	18,14
	5,0	25,6	5,77	20,1
	6,0	30,5	5,74	23,97
	7,0	35,4	5,7	27,79
203	4,0	25	7,04	19,63
	5,0	31,1	7,01	24,41
	6,0	37,1	6,97	29,14
	7,0	43,1	6,94	33,83

Размеры, мм		Площадь сечения, см ²	Радиус инерции, см	Масса 1 м трубы, кг
<i>D</i>	<i>t</i>			
219	4,5	30,3	7,59	23,8
	5,0	33,6	7,57	26,39
	5,5	36,9	7,55	28,96
	6,0	40,2	7,54	31,52
	7,0	46,6	7,51	36,6
	8,0	53	7,47	41,63
273	5,0	42,1	9,48	33,04
	5,5	46,2	9,46	36,28
	6,0	50,3	9,45	39,51
	7,0	58,5	9,42	45,92
	8,0	66,6	9,38	52,82
325	5,0	50,3	11,3	39,46
	6,0	60,1	11,3	47,2
	7,0	69,9	11,2	54,89
	8,0	79,6	11,2	62,54
426	5,0	66,1	14,9	51,91
	6,0	79,2	14,9	62,14
	7,0	92,1	14,8	72,33
	8,0	105	14,8	82,46
	9,0	118	14,8	92,56
530	7,0	115	18,5	90,3
	8,0	131	18,5	103
	9,0	147	18,4	115,6
	10,0	163	18,4	128,2
	11,0	179	18,4	140,8
630	8,0	153	22,0	122,7
	9,0	175	22,0	137,8
	10,0	195	21,9	152,9
	11,0	214	21,9	167,9
	12,0	233	21,8	182,9

Примеры расчета узлов ферм из круглых труб

Пример 1. Рассчитать промежуточный бесфасоночный узел верхнего пояса (рис. 8). Материал труб – сталь С20. Сварка полуавтоматическая сварочной проволокой Св-08Г2С без разделки кромок сечения.

Проверяем сварные швы крепления раскосов к верхнему поясу.

1. Приближенный расчет (в запас несущей способности)

Раскос 1. Отношение диаметра трубы раскоса к диаметру трубы верхнего пояса $d/D = 127 / 140 = 0,907$. Коэффициент $\xi = 1,085$.

Длину кривой пересечения труб, равную длине шва, определяем по формуле

$$l_w = \frac{p d_0}{2} [1,5(1 + \operatorname{cosec} \alpha) - \sqrt{\operatorname{cosec}^2 \alpha}] =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 12,7 \cdot 1,085}{2} [1,5(1 + 1,4) - \sqrt{1,4}] = 52,4 \text{ см.}$$

Так как $\beta_f R_{wf} = 0,9 \cdot 21,5 = 19,35 \text{ кН/см}^2 < \beta_z R_{wz} = 1,05 \cdot 18,45 = 19,373 \text{ кН/см}^2$, то расчет ведем по металлу шва, где $R_{wz} = 0,45 \cdot 41 = 18,45 \text{ кН/см}^2$ для стали С20. Катет углового шва $k_f = 5 \text{ мм}$.

Прочность углового шва, прикрепляющего раскос 1 к верхнему поясу впритык при фигурной резке концов, проверяем по формуле

$$\sigma_{wf} = \frac{N_1}{\beta_f k_f l_w} = \frac{226}{0,9 \cdot 0,5 \cdot 52,4} = 9,6 \text{ кН/см}^2 < 0,85 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c =$$

$$= 0,85 \cdot 21,5 \cdot 1 \cdot 1 = 18,275 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность шва обеспечена.

Раскос 2. Отношение диаметра трубы раскоса к диаметру трубы верхнего пояса $d/D = 89 / 140 = 0,635$. Коэффициент $\xi = 1,023$.

Длина сварного шва

$$l_w = \frac{3,14 \cdot 8,9 \cdot 1,023}{2} [1,5(1 + 1,4) - \sqrt{1,4}] = 34,6 \text{ см.}$$

Прочность углового шва, прикрепляющего раскос 2 к верхнему поясу, проверяем по формуле

$$\sigma_{wf} = \frac{N_2}{\beta_f k_f l_w} = \frac{189}{0,9 \cdot 0,5 \cdot 34,6} = 12,2 \text{ кН/см}^2 < 0,85 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c =$$

$$= 0,85 \cdot 21,5 \cdot 1 \cdot 1 = 18,275 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность шва обеспечена.

2. Точный расчет по методике [11]

Раскос 1. Отношение внутреннего диаметра прикрепляемой трубы к наружному диаметру верхнего пояса $\beta_{in} = d_{in} / D = (127 - 5,5) / 140 = 0,87$.

По [11, рис. 34] определяем относительные размеры полной длины шва:

$$\frac{l_{wh}}{d_{in}} = 2,5 ; l_{wh} = 2,5 \cdot 121 = 303 \text{ мм} ;$$

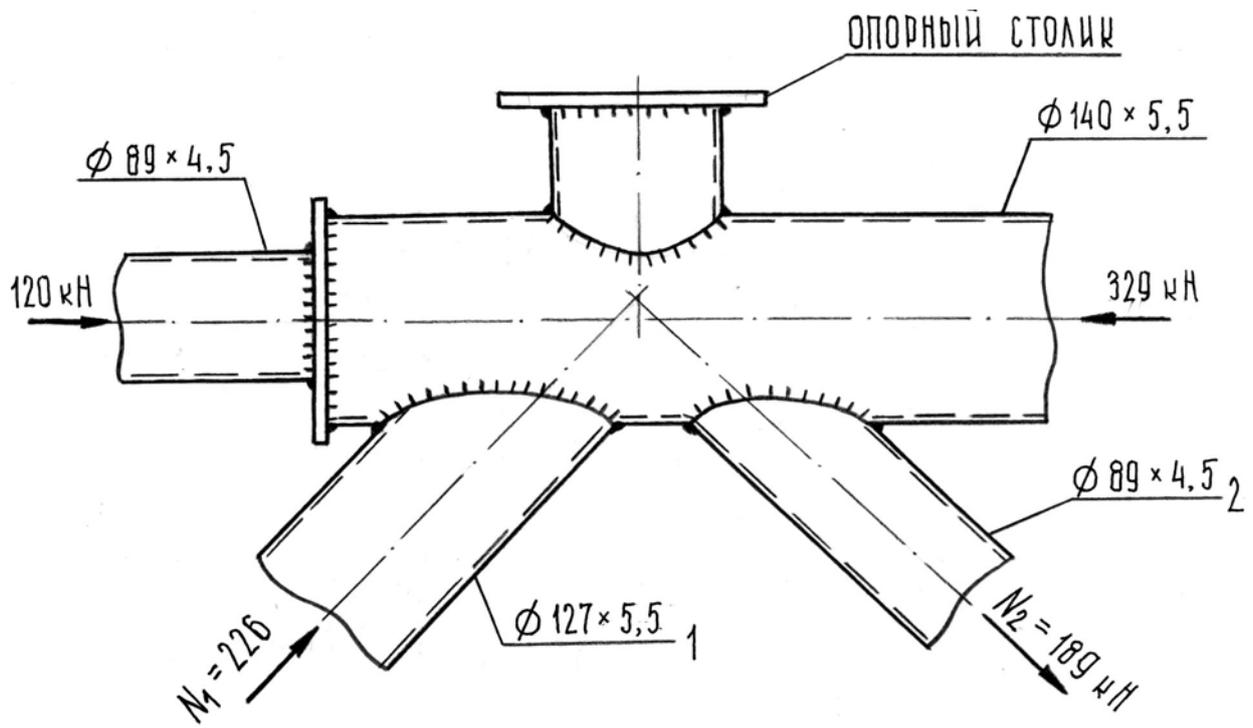


Рис. 8. Узел сопряжения верхнего пояса с раскосами (пример 1)

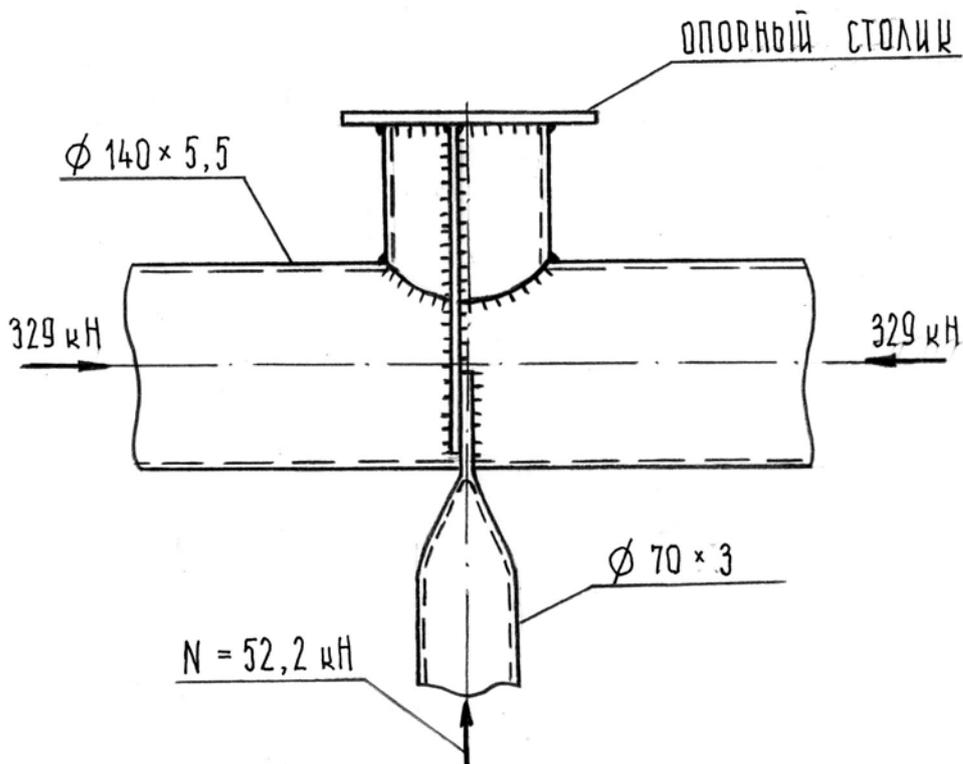


Рис. 9. Узел сопряжения верхнего пояса со стойкой (пример 2)

$$\frac{l_{wt}}{d_{in}} = 1,5 ; l_{wt} = 1,5 \cdot 121 = 182 \text{ мм} .$$

По [11, рис. 34] определяем относительные длины участков углового шва (по скосам кромки):

$$\frac{l_{wfh}}{d_{wh}} = 0,3 ; l_{wfh} = 0,3 \cdot 303 = 91 \text{ мм} ;$$

$$\frac{l_{wft}}{d_{wt}} = 0,31 ; l_{wft} = 0,31 \cdot 182 = 56 \text{ мм} .$$

Длины участков стыкового шва:

$$l_{wah} = l_{wh} - l_{wfh} = 303 - 91 = 212 \text{ мм} ; l_{wat} = l_{wt} - l_{wft} = 182 - 56 = 126 \text{ мм} .$$

Определяем расчетные параметры для расчета несущей способности пяточной и носковой частей шва. Для сжатого элемента расчетное сопротивление сварного стыкового соединения $R_{wy} = R_y = 22,5 \text{ кН/см}^2$; для растянутого элемента $R_{wy} = 0,85R_y = 0,85 \cdot 22,5 = 19,125 \text{ кН/см}^2$.

Расчетное сопротивление срезу соответственно по металлу шва и по металлу границы сплавления:

$$R_{wf} = 21,5 \text{ кН/см}^2 ; R_{wz} = 0,45 \cdot 41 = 18,45 \text{ кН/см}^2 .$$

Определяем R_{wd} – меньшее из двух значений: $0,7 R_{wf}$ или R_{wz}

$$R_{wd} = 0,7 R_{wf} = 0,7 \cdot 21,5 = 15,05 \text{ кН/см}^2 ,$$

Катет углового шва $k_f = 5 \text{ мм}$. Коэффициент условий работы сварного соединения $\gamma_{wc} = 0,75$.

Несущая способность соответственно пяточной и носковой частей сварного шва равна:

$$S_{wh} = (t_d l_{wah} R_{wy} \gamma_{wc} + k_f l_{wfh} R_{wd}) \gamma_c = (0,55 \cdot 21,2 \cdot 22,5 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 9,1 \cdot 15,05) \cdot 1 = 265,23 \text{ кН} ;$$

$$S_{wt} = (t_d l_{wat} R_{wy} \gamma_{wc} + k_f l_{wft} R_{wd}) \gamma_c = (0,55 \cdot 12,6 \cdot 22,5 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 5,6 \cdot 15,05) \cdot 1 = 159,14 \text{ кН} .$$

Проверяем прочность сварного шва:

$$N = 226 \text{ кН} < 2 S_{wh} = 2 \cdot 265,23 = 530,46 \text{ кН} ;$$

$$N = 226 \text{ кН} < 2 S_{wt} = 2 \cdot 159,14 = 318,28 \text{ кН} .$$

Прочность обеспечена.

Пример 2. Выполнить расчет сварного шва крепления к верхнему поясу стойки со сплюсненными концами (рис. 9). Материал труб – сталь С20. Сварка полуавтоматическая сварочной проволокой Св-08Г2С без разделки кромок сечения.

Фактическая длина шва

$$l_w = \frac{pD}{2} = \frac{3,14 \cdot 140}{2} = 220 \text{ мм} .$$

Несущая способность швов определяется прочностью по металлу шва, т.к. выполняется условие $\beta_f R_{wf} = 0,9 \cdot 21,5 = 19,35 \text{ кН/см}^2 < \beta_z R_{wz} = 1,05 \cdot 18,45 = 19,373 \text{ кН/см}^2$. Катет шва $k_f = 4 \text{ мм}$.

Требуемая длина шва

$$l_w^{\text{тп}} = \frac{N}{2 \cdot \beta_f k_f R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c} + 1,5 = \frac{52,2}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 21,5 \cdot 1 \cdot 1} + 1,5 = 5 \text{ см};$$

$$l_w^{\text{тп}} = 50 \text{ мм} < l_w = 220 \text{ мм}.$$

Несущая способность сварного шва обеспечена.

Пример 3. Рассчитать монтажные стыки фермы из круглых труб (рис. 10). Материал труб – сталь С20, фланцев верхнего пояса – сталь С245, фланцев нижнего пояса – сталь С345. Сварка полуавтоматическая в среде углекислого газа проволокой Св-08Г2С диаметром $d = 2 \text{ мм}$ без разделки кромок сечения.

Верхний монтажный узел. Верхний монтажный стык работает на сжатие. Принимаем фланцы толщиной $t = 20 \text{ мм}$ из стали С245, болты – нормальной точности М20 класса 5.6, диаметр отверстий $d_{\text{отв}} = 24 \text{ мм}$. Болты размещаем так, чтобы соблюдались конструктивные требования расположения. Диаметр шайб принимаем $d_{\text{ш}} = 40 \text{ мм}$.

Проверяем конструктивные условия размещения болтов:

$$b_1 = 45 \text{ мм} > \frac{d_{\text{ш}}}{2} + k_f + 2 \text{ мм} = \frac{40}{2} + 7 + 2 = 29 \text{ мм};$$

$$b_1 = 45 \text{ мм} < 3,5 d = 3,5 \cdot 20 = 70 \text{ мм};$$

$$a = 50 \text{ мм} \geq 0,8 d_{\text{ш}} = 0,8 \cdot 40 = 32 \text{ мм};$$

$$a = 50 \text{ мм} \geq 50 \text{ мм};$$

$$b_1 = 45 \text{ мм} < a = 50 \text{ мм} \leq 1,4 b_1 = 1,4 \cdot 45 = 63 \text{ мм};$$

$$w = \frac{220}{2} = 110 \text{ мм} \leq 1,4 b = 4(b_1 - k_f) = 4 \cdot (45 - 7) = 152 \text{ мм},$$

где b_1 – расстояние от грани пояса до оси болта; $d_{\text{ш}}$ – наружный диаметр шайбы; a – расстояние от грани фланца до оси болта; w – ширина фланца на один болт.

Выполняем расчет сварного шва верхнего пояса.

Расчетное усилие

$$N_{\text{ст}} = N_1 + N_2 \cdot \cos \alpha = -412,2 - 59,5 \cdot 0,71 = -454,3 \text{ кН}.$$

Так как $\beta_f R_{wf} = 0,9 \cdot 21,5 = 19,35 \text{ кН/см}^2 > \beta_z R_{wz} = 1,05 \cdot 16,65 = 17,48 \text{ кН/см}^2$, то расчет ведем по металлу границы сплавления, где $R_{wz} = 0,45 \cdot 37 = 16,65 \text{ кН/см}^2$ для стали С245 (материал фланца верхнего пояса); $R_{wz} = 0,45 \cdot 41 = 18,45 \text{ кН/см}^2$ для стали С20 (материал труб).

Проверяем прочность шва:

$$\sigma_{wz} = \frac{N_{\text{ст}}}{\beta_z l_w k_f} = \frac{454,3}{1,05 \cdot 43 \cdot 0,7} = 14,4 \text{ кН/см}^2 < R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c = 16,65 \text{ кН/см}^2,$$

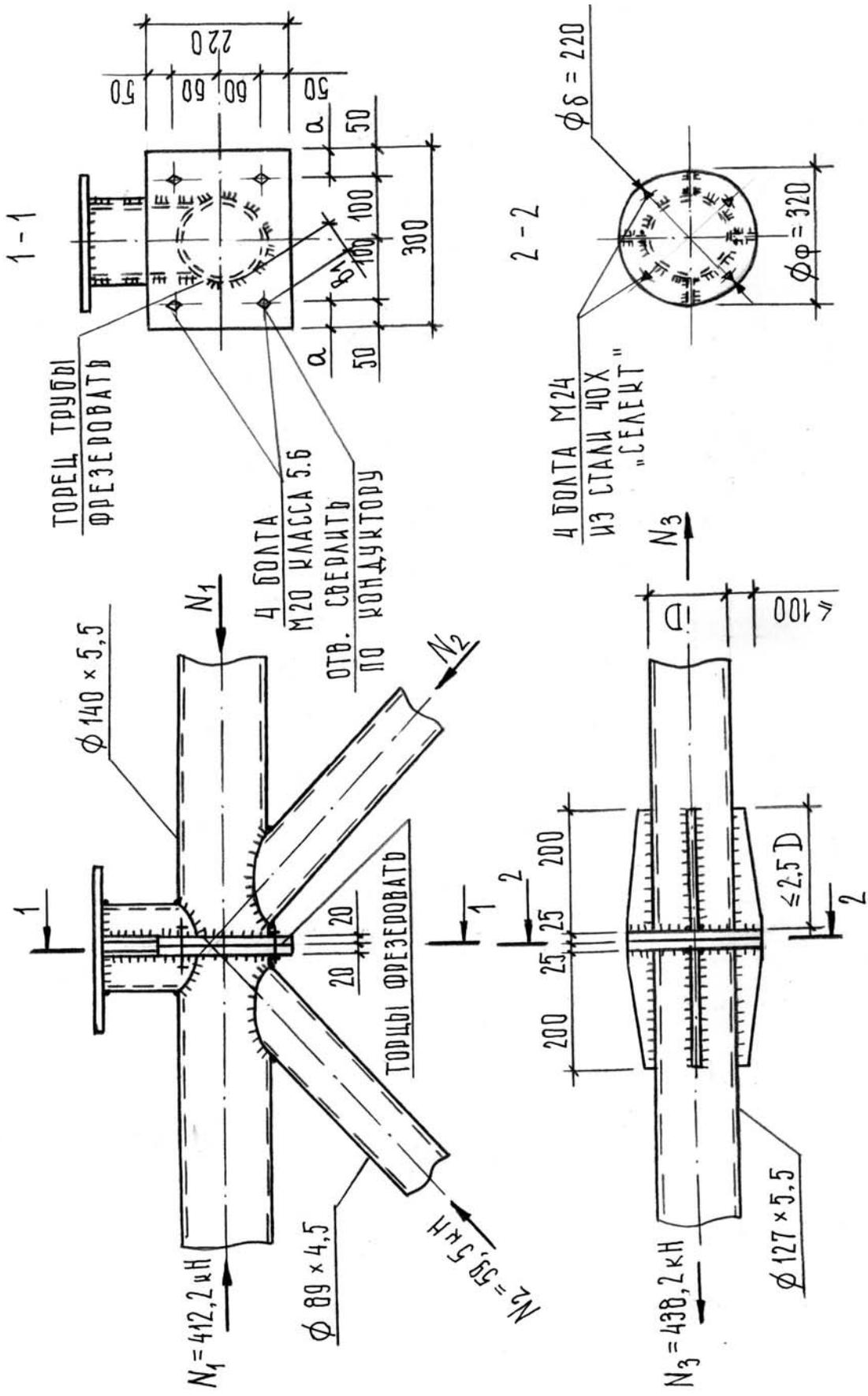


Рис. 10. Монтажный узел фермы (пример 3)

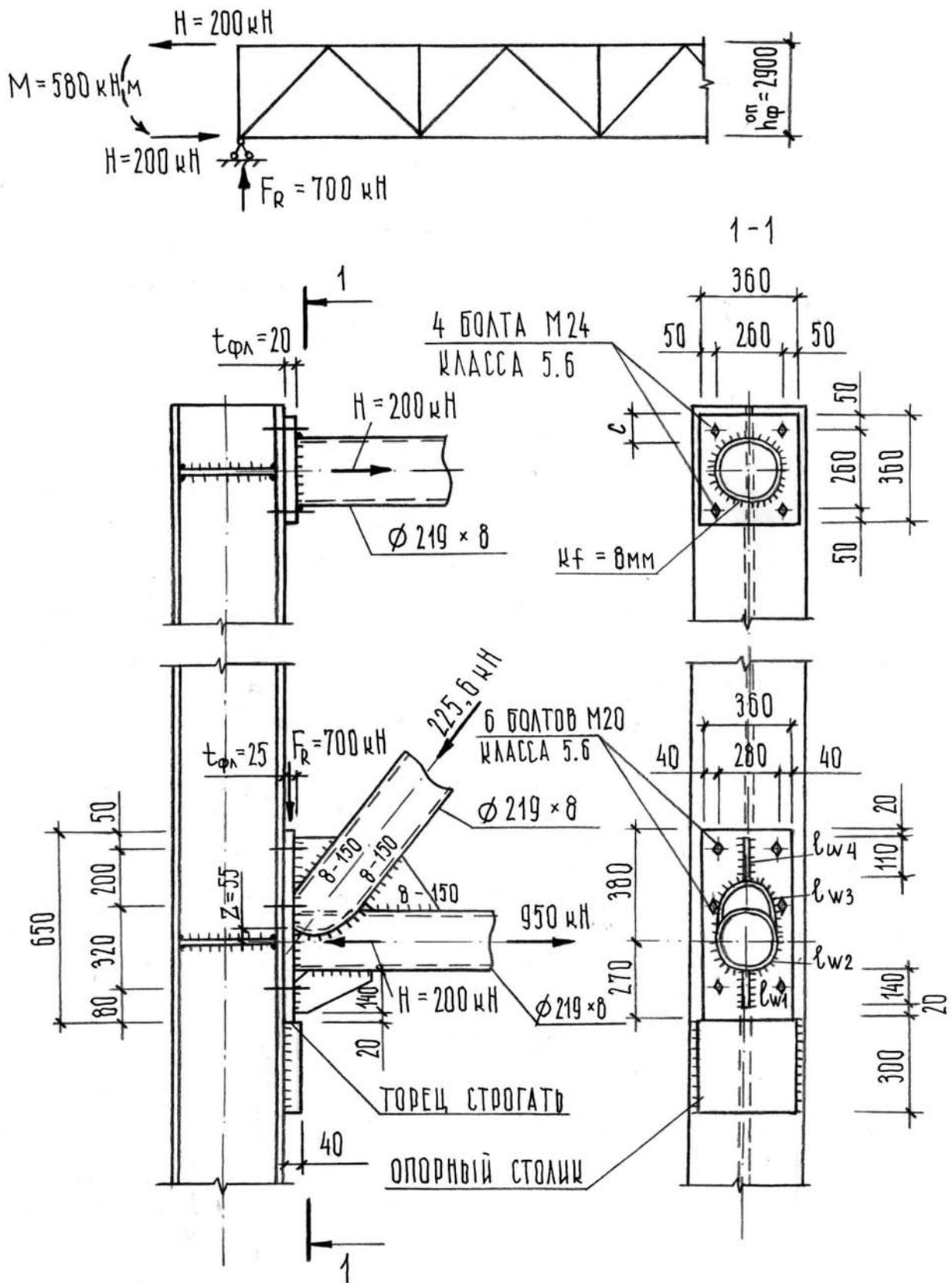


Рис. 11. Опорный узел фермы (пример 4)

где $l_w = \pi D_{в.п} - 1 \text{ см} = 3,14 \cdot 14 - 1 = 43 \text{ см}$.

Прочность шва обеспечена.

Нижний монтажный узел. Рассчитываем фланцевое соединение нижнего пояса. Растягивающее усилие $N_3 = 438,2 \text{ кН}$. Принимаем высокопрочные болты М24 из стали 40Х «селект» (ГОСТ 22356–77*), диаметр отверстий $d_{отв} = 27 \text{ мм}$, диаметр шайб $d_{ш} = 44 \text{ мм}$. Толщина фланца $t_{фл} = 25 \text{ мм}$.

Выполняем расчет сварного шва нижнего пояса.

Расчетное усилие: $N = 438,2 \text{ кН}$.

Проверяем прочность шва (в первом приближении сварное соединение ребер жесткости с поясом не учитываем):

по металлу шва

$$\sigma_{wf} = \frac{N_3}{b_f l_w (k_f + 2\text{мм})} = \frac{438,2}{0,9 \cdot 38,9 \cdot (0,6 + 0,2)} = 15,7 \text{ кН/см}^2 < R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c = 21,5 \text{ кН/см}^2,$$

где $l_w = \pi D_{н.п} - 1 \text{ см} = 3,14 \cdot 12,7 - 1 = 38,9 \text{ см}$.

по металлу границы сплавления

$$\sigma_{wz} = \frac{N_3}{b_z l_w k_f} = \frac{438,2}{1,05 \cdot 38,9 \cdot 0,6} = 17,9 \text{ кН/см}^2 < R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c = 18,45 \text{ кН/см}^2,$$

где $R_{wz} = 0,45 \cdot 46 = 20,7 \text{ кН/см}^2$ для стали С345 (материал фланца нижнего пояса); $R_{wz} = 0,45 \cdot 41 = 18,45 \text{ кН/см}^2$ для стали С20 (материал труб).

Условие прочности выполняется.

Проверяем прочность фланца на отрыв в околошовной зоне:

$$\sigma_z = \frac{N_3}{1,4 \cdot b_f k_f l_w} = \frac{438,2}{1,4 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 38,9} = 14,9 \text{ кН/см}^2 < R_{th} \gamma_c = 22,5 \text{ кН/см}^2,$$

где $R_{th} = 0,5 R_u = 0,5 \cdot 45 = 22,5 \text{ кН/см}^2$ – растяжение в направлении толщины проката.

Прочность обеспечена.

Расчетное сопротивление растяжению высокопрочного болта

$$R_{bh} = 0,7 R_{bun} = 0,7 \cdot 110 = 77 \text{ кН/см}^2,$$

где R_{bun} – нормативное временное сопротивление стали болтов [2, табл. 61].

Проверяем прочность фланцевого соединения:

$$N_3 = 438,2 \text{ кН} < n \cdot \kappa_2 \cdot R_{bh} \cdot A_{bn} = 4 \cdot 0,85 \cdot 77 \cdot 3,52 = 921,5 \text{ кН},$$

где A_{bn} – площадь сечения болта нетто [2, табл. 62*]; n – количество болтов в соединении; κ_2 – коэффициент, равный $\kappa_2 = 0,8$ при $t_{фл} = 20 \text{ мм}$, $\kappa_2 = 0,85$ при $t_{фл} = 25 \dots 40 \text{ мм}$ [16].

Размеры размещения болтов во фланце проверяются аналогично верхнему монтажному узлу.

Проверяем фланцевое соединение на сдвиг. Контактное усилие для замкнутых сечений $V = 0,1 \cdot R_{bh} \cdot A_{bn} = 0,1 \cdot 77 \cdot 3,52 = 27,1 \text{ кН}$.

$$\text{Условная поперечная сила } Q_{ef} = 0,1 \cdot \mu \cdot N_3 = 0,1 \cdot 0,25 \cdot 438,2 = 10,88 \text{ кН},$$

где $\mu = 0,25$ – коэффициент трения [2, табл. 36].

Проверку проводим по формуле

$$Q = Q_{ef} = 10,88 \text{ кН} < \mu \cdot n \cdot V = 0,25 \cdot 4 \cdot 27,1 = 27,1 \text{ кН.}$$

Условие соблюдается.

Пример 4. Рассчитать опорные узлы фермы из круглых труб. Материал труб – сталь С20, фланцев верхнего пояса – сталь С245, фланцев нижнего пояса – сталь С345. Сварка полуавтоматическая проволокой Св-08Г2С без разделки кромок сечения.

Опорная реакция фермы $F_R = 700$ кН, опорный момент $M = -580$ кНм. Момент раскладываем на пару горизонтальных сил $H = M/h_{\phi}^{\text{оп}} = 580/2,9 = 200$ кН.

Нижний опорный узел (рис. 11). Опорное давление передается на колонну через фрезерованный торец фланца. Опорный фланец принимаем толщиной 25 мм и шириной 360 мм.

Проверяем напряжение смятия торца фланца от опорной реакции:

$$\sigma = \frac{1,2F_R}{A_{\text{фл}}} = \frac{1,2 \cdot 700}{36 \cdot 2,5} = 9,4 \text{ кН/см}^2 < R_p \gamma_c = 44,87 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обеспечена.

Проверяем напряжения в сварных швах, прикрепляющих нижний пояс к опорному фланцу, при катете шва $k_f = 8$ мм, на усилие:

$$N = -225,6 \cdot \cos 50^\circ + 950 = 805 \text{ кН.}$$

Расчет ведем по металлу шва, т.к. $\beta_f R_{wf} = 0,9 \cdot 21,5 = 19,35 \text{ кН/см}^2 < \beta_z R_{wz} = 1,05 \cdot 18,45 = 19,373 \text{ кН/см}^2$.

$$\begin{aligned} \sigma_{wf} &= \frac{N}{\beta_f \Sigma l_w k_f} = \frac{805}{0,9 \cdot 148,2 \cdot 0,8} = 7,55 \text{ кН/см}^2 < 0,85 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c = \\ &= 0,85 \cdot 21,5 = 18,275 \text{ кН/см}^2, \end{aligned}$$

где $\Sigma l_w = l_{w2} + 2l_{w1} + l_{w3} + 2l_{w4} = 68,7 + 2 \cdot 10 + 39,5 + 2 \cdot 10 = 148,2$ см;

$$l_{w2} = \pi D_{\text{нп}} = 3,14 \cdot 21,9 = 68,7 \text{ см};$$

$$l_{w1} = 14 - 1 - 3 = 10 \text{ см}; l_{w4} = 11 - 1 = 10 \text{ см};$$

l_{w3} – длина шва по торцу реза раскоса, примыкающего к фланцу (примерно половина от полного сечения), определяемая по формуле

$$l_{w3} = 0,5(a + b + 3\sqrt{a^2 + b^2}) = 0,5(14,3 + 10,9 + 3\sqrt{14,3^2 + 10,9^2}) = 39,5 \text{ см},$$

где $a = d / (2 \sin \alpha) = 21,9 / (2 \cdot 0,766) = 14,3$ см; $b = d / 2 = 21,9 / 2 = 10,9$ см.

Суммарное напряжение в швах от совместного действия опорной реакции $F_R = 700$ кН и внецентренно приложенной горизонтальной силы $H = 200$ кН (эксцентриситет приложения силы H равен $z = 5,5$ см):

$$\phi_{F_R} = \frac{F_R}{\beta_f \Sigma l_w k_f} = \frac{700}{0,9 \cdot 148,2 \cdot 0,8} = 6,6 \text{ кН/см}^2;$$

$$\tau_H = \frac{H}{\beta_f \Sigma l_w k_f} = \frac{200}{0,9 \cdot 148,2 \cdot 0,8} = 1,88 \text{ кН/см}^2;$$

$$\tau_M = \frac{H \cdot z \cdot 6}{v_f \gamma_l w^2 k_f} = \frac{200 \cdot 5,5 \cdot 6}{0,9 \cdot 148,2^2 \cdot 0,8} = 0,42 \text{ кН/см}^2;$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\phi_{FR}^2 + (\phi_H + \phi_M)^2} = \sqrt{6,6^2 + (1,88 + 0,42)^2} = \\ &= 7,0 \text{ кН/см}^2 < 0,85 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c = 0,85 \cdot 21,5 = 18,275 \text{ кН/см}^2. \end{aligned}$$

Прочность швов обеспечена.

Принимаем конструктивно толщину опорного столика 40 мм, ширину 380 мм. Определяем высоту опорного столика из условия прочности сварного шва на срез (сварка ручная электродом Э42):

$$h_{ст} = l_w = \frac{1,2 F_R}{2 \cdot v_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c} + 2 \text{ см} = \frac{1,2 \cdot 700}{2 \cdot 0,7 \cdot 1,2 \cdot 18 \cdot 1 \cdot 1} + 2 \text{ см} = 30 \text{ см}.$$

Принимаем высоту столика 300 мм.

Так как опорный момент M имеет знак минус, то сила H прижимает фланец узла нижнего пояса к колонне и болты в узле ставятся конструктивно (в примере – шесть болтов нормальной точности М24 класса прочности 5.6).

При действии положительного опорного момента усилие H будет отрывать фланец от колонны, поэтому дополнительно необходимо выполнить расчет болтов на растяжение. Например, принимаем условно $M = +580$ кНм, тогда горизонтальная сила $H = M/h_{\phi}^{оп} = 580/2,9 = 200$ кН.

Центр тяжести болтового соединения от верхней кромки

$$y_0 = \frac{\sum y_i}{n_b} = \frac{5 + 25 + 57}{3} = 29 \text{ см}.$$

Расстояние от верха фасонки до места приложения нагрузки $y_c = 380$ мм. Эксцентриситет $e = y_c - y_0 = 38 - 29 = 9$ см.

Максимальное усилие растяжения в крайнем болте опорного узла

$$N_{\max} = \frac{1}{n} \left(\frac{H}{n_b} + \frac{H \cdot e \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{200}{3} + \frac{200 \cdot 9 \cdot 57}{5^2 + 25^2 + 57^2} \right) = 47 \text{ кН}.$$

Несущая способность на растяжение одного болта М20 класса 5.6

$$N_{bt} = A_{bn} \cdot R_{bt} = 2,45 \cdot 21 = 51,45 \text{ кН} > N_{\max} = 47 \text{ кН}.$$

Условие прочности соблюдается.

Требуемая толщина опорного фланца из условия работы на изгиб при $M = +580$ кНм

$$t_{\text{фл}}^{\text{тр}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3b'H}{l_{\text{фл}} R_y}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3 \cdot 28 \cdot 200}{65 \cdot 31,5}} = 1,42 \text{ см} = 14,4 \text{ мм} < t_{\text{фл}} = 25 \text{ мм}.$$

Принятая толщина фланца достаточна.

Верхний опорный узел (рис. 11). Так как момент M имеет знак минус, то сила H в верхнем опорном узле стремится оторвать фланец от колонны и вызывает его изгиб. Изгибающий момент во фланце определяется как в консольном элементе пролетом s . Для вычисления размера s диаметр трубы

заменяем квадратом со стороной $d_1 \approx 0,9 D_{\text{вп}} = 0,9 \cdot 21,9 = 19,6$ см, тогда $c = 0,5(36 - 19,6) = 8,2$ см. Момент во фланце

$$M_{\text{фл}} = 0,5H(c - a) = 0,5 \cdot 200(8,2 - 5) = 320 \text{ кНсм.}$$

Требуемая толщина фланца

$$t_{\text{фл}}^{\text{тр}} = \sqrt{\frac{6M_{\text{фл}}}{l_{\text{фл}} R_{y\Gamma c}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 320}{36 \cdot 24 \cdot 1}} = 1,5 \text{ см.}$$

Принимаем толщину фланца $t = 20$ мм.

Так как сила H стремится оторвать фланец, то количество болтов в соединении определяем расчетом на растяжение:

$$n = \frac{H}{N_{bt} \cdot \Gamma c} = \frac{200}{73,92 \cdot 1} = 2,7,$$

где $N_{bt} = A_{bn} \cdot R_{bt} = 3,52 \cdot 21 = 73,92$ – несущая способность болта М24 на растяжение.

Принимаем четыре болта.

Проверяем напряжение в сварном шве, прикрепляющем фланец к верхнему поясу. Расчет ведем по металлу границы сплавления, т.к. $\beta_f R_{wf} = 0,9 \cdot 21,5 = 19,35 \text{ кН/см}^2 > \beta_z R_{wz} = 1,05 \cdot 16,65 = 17,48 \text{ кН/см}^2$.

$$\begin{aligned} \tau_w &= \frac{H}{\nu_f \cdot k_f \cdot l_w} = \frac{200}{1,05 \cdot 0,8 \cdot 68,7} = 3,5 \text{ кН/см}^2 < 0,85 R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c = \\ &= 0,85 \cdot 16,65 = 14,15 \text{ кН/см}^2, \end{aligned}$$

где $l_w = \pi D_{\text{вп}} = 3,14 \cdot 21,9 = 68,7$ см.

Прочность сварного шва обеспечена.

Если в опорном узле возникает положительный момент $M_{\text{max}}^{\text{лев}}$, то сила H в узле крепления верхнего пояса прижимает фланец к колонне и болты в узле ставятся конструктивно.

Составители Л.П.Абашева, И.И.Зуева
Сдано в печать 20.03.09
формат 60 x 84/16. Объем 2,75 п.л.
Тираж 200. Заказ

Отпечатано с авторского макета лабораторией ИСТ СТФ ПГТУ