

30

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ

Кафедра «Металлические и деревянные конструкции»

Е.Ю. Давыдов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФЕРМ ИЗ КРУГЛЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ

Учебное пособие

по разделу «Расчет и конструирование стержневых конструкций
с применением круглых и прямоугольных труб»
курса «Металлические конструкции»

Минск 2000

УДК 624.014.27.04 (0.75.8)

ББК 38756

Д 13

Автор Е.Ю. Давыдов

Рецензенты:

И.В. Зенкевич, Г.Д. Машковцев

Е.Ю. Давыдов

Д 13 Проектирование ферм из круглых и прямоугольных труб: Учеб. пособие по разделу «Расчет и конструирование стержневых конструкций с применением круглых и прямоугольных труб» курса «Металлические конструкции». - Мн.: БГПА, 2000. - 128 с.

JSBN 985-6529-23-9

В пособии рассмотрены вопросы, касающиеся проектирования стержневых конструкций (ферм) из круглых и прямоугольных труб: подбор сечений стержней, конструирование и расчет узлов. Сечения стержней определяются с учетом решений оптимизационных задач. Изложенный материал сопровождается примерами.

УДК 624.014.27.04 (0.75.8)

ББК 38756

Введение

Прогресс в области металлических конструкций неразрывно связан с уменьшением металлоемкости и снижением трудоемкости изготовления и монтажа. Одним из направлений для достижения этой цели является применение рациональных профилей в виде круглых и прямоугольных труб, позволяющее уменьшить металлоемкость ферм на 15-20% по сравнению с фермами из спаренных уголков при прочих равных условиях. Использование труб уменьшает также трудоемкость изготовления конструкций, так как в 2-2,5 раза сокращается количество сборочных деталей и объем сварочных работ. Кроме того, в связи с уменьшением поверхности, подверженной коррозии, трубчатые профили повышают долговечность конструкций.

Конструктивные решения, изложенные в данном пособии, имеют широкое применение при проектировании зданий и сооружений как промышленного, так и общественного назначения. Все представленные узловые сопряжения проверены в лабораторных условиях и внедрены при строительстве многочисленных объектов.

Методика расчета отдельных конструктивных элементов основана на решениях оптимизационных задач, адаптированных к профилям, рассматриваемым в настоящей работе. Расчет узловых сопряжений базируется на разработках, выполненных специализированными научно-исследовательскими организациями и широко используемых в практике проектирования.

Изложенные в данной работе конструктивные и расчетные материалы иллюстрируются примерами по расчету и проектированию ферм из круглых и прямоугольных труб.

В настоящем учебном пособии использованы результаты теоретических исследований, приведенных в предыдущем издании: «Расчет и конструирование стержневых конструкций с применением круглых и прямоугольных труб».

JSBN 985-6529-23-9

© Давыдов Е.Ю., 2000

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФЕРМ ИЗ КРУГЛЫХ ТРУБ

1.1. Подбор сечений стержней ферм

Расчетные усилия в стержнях ферм определяются согласно прил. 1 и представляются в табличной форме (см. табл. П.1.1).

Стержни ферм рекомендуется проектировать из электросварных или бесшовных горячекатаных труб.

1.1.1. Подбор сечений центрально-растянутых стержней

Требуемая площадь и радиус инерции центрально-растянутых стержней определяются по формулам:

$$A = \frac{N \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c}; \quad i = \frac{l_{ef}}{\lambda_{np}}, \quad (1.1)$$

где N – расчетное усилие в стержне;

R_y – расчетное сопротивление стали при растяжении и сжатии, назначенное по пределу текучести;

γ_n – коэффициент надежности по назначению (для большинства объектов промышленного назначения $\gamma_n = 0,95$);

γ_c – коэффициент условий работы (см. табл. 1.1);

l_{ef} – при динамической нагрузке это наибольшая расчетная длина: в плоскости (l_x) или из плоскости (l_y) фермы, при статической нагрузке l_{ef} – расчетная длина в плоскости фермы (l_x) (при статической нагрузке гибкость из плоскости фермы не ограничивается). Значения расчетных длин приведены в табл. 1.2;

λ_{np} – предельная гибкость (см. табл. 1.3).

Зная требуемые площадь и радиус инерции, по сортаменту (см. прил. 2) принимают трубу, площадь сечения и радиус инерции которой равны или в наименьшей степени превышают требуемые значения. При этом диаметры поясных труб с целью уменьшения гибкости следует принимать наибольшими, а диаметры труб для элементов решетки должны находиться в пределах 0,33...1 диамет-

ра поясных труб. Толщина стенок труб также ограничивается и не должна быть меньше 3 мм для поясов и опорных элементов решетки и 2,5 мм – для остальных элементов решетки. Кроме того, отношение диаметра трубы к толщине (Π) с целью обеспечения местной устойчивости следует принимать не больше величин, приведенных в табл. 1.4.

Таблица 1.1

Коэффициенты условий работы

№ пп	Элементы и соединения конструкций	γ_c
1	2	3
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 менее $2t$ 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, прикрепленных в узлах к двум другим элементам решетки (раскосам), имеющим разные знаки усилий (рис. 1.3, д)	0,85
6	Сжатые трубчатые элементы диаметром D и толщиной t , имеющие сплюсненные концы:	

Окончание табл. 1.1

1	2	3
	а) со свободным формированием переходного участка от круглого сечения к сплюсненному;	$1 - 0,015 \frac{D}{t}$, но не более 0,8 и не менее 0,3
	б) с принудительным формированием переходного участка с уклоном 1:6	$1,3 - 0,015 \frac{D}{t}$, но не более 1 и не менее 0,4
7	Сварные соединения трубчатых элементов без подкладного кольца: а) встык (рис. 1.4, в); б) впритык (тавровое)	0,75 0,85

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Коэффициенты условий работы, установленные в п. 2 и 7, 4 и 6 одновременно, не учитываются.
2. Коэффициент условий работы, установленный в п. 6, не распространяется на крепления соответствующих элементов в узлах.
3. Коэффициенты условий работы, установленные в п. 4 и 6, при проверке устойчивости сжатых стержней не учитываются.

Таблица 1.2

Расчетные длины элементов бесфасоночных ферм из круглых и прямоугольных труб

Направление продольного изгиба	Расчетная длина				
	поясов	опорных раскосов и опорных стоек	прочих элементов решетки		
			без сплюсчивания концов	со сплюсненными концами	
			из прямоугольных труб	из круглых труб	
В плоскости ферм	l	l	0,9 l	l	0,95 l
Из плоскости ферм	l_1	l	0,9 l	l	0,95 l

Обозначения:

l – геометрическая длина элемента (расстояние между центрами узлов);

l_1 – расстояние между узлами, закрепленными от смещений из плоскости фермы (для нижнего пояса l_1 – расстояние между растяжками по нижнему поясу фермы; для верхнего пояса l_1 – шаг вертикальных связей между фермами или расстояние между узлами горизонтальных связей по верхним поясам ферм).

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Если в пределах длины l_1 нормальная сила имеет неодинаковое значение (N_1 и N_2), то расчетная длина определяется по формуле $l_{ef} = l_1 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot N_2 / N_1)$, где $N_1 > N_2$, расчет при этом выполняется на силу N_1 .

2. Для беспрогонных покрытий расчетная длина элементов верхнего пояса из прямоугольных труб определяется по формуле (2.2).

Таблица 1.3

Предельные гибкости растянутых элементов ферм из круглых и прямоугольных труб

Условия работы ферм	Пояса и опорные элементы решетки	Прочие элементы решетки
Ферма подвергается непосредственному воздействию динамических нагрузок	250	350
Здание оборудовано мостовыми кранами тяжелого режима работы ($n \geq 2 \cdot 10^6$)	250	300

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. В конструкциях, не подвергающихся динамическим воздействиям, гибкость растянутых элементов следует проверять только в вертикальной плоскости (к динамическим воздействиям относятся нагрузки, учитываемые с коэффициентом динамичности или при расчетах на выносливость).

2. n – количество циклов загрузки фермы в течение всего срока эксплуатации.

Во всех остальных случаях предельная гибкость растянутых элементов равна 400. Предельные гибкости сжатых элементов определяются по формуле $B - 60\alpha$, где $B = 180$ для сжатых стержней поясов опорных раскосов и опорных стоек; $B = 210$ для остальных стержней решетки; $\alpha = N / \varphi A R_y \gamma_c$, но не менее 0,5.

1.1.2. Подбор сечений центрально-сжатых стержней

Подбор сечений центрально-сжатых стержней ферм осуществляется в следующей последовательности.

Вначале определяется диаметр трубы

$$D_1 = 0,12 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{N\Pi}{\sqrt{R_y \gamma_c}} \right)^3 l_{ef}^2}, \quad (1.2)$$

где l_{ef} – наибольшая расчетная длина (l_x или l_y);

Π – предельное отношение диаметра трубы к толщине стенки (принимается по табл. 1.4).

Формула (1.2) является полуэмпирической, и поэтому значения величин N , R_y и l_{ef} необходимо подставлять соответственно в МН, МПа и м.

Затем определяется толщина трубы

$$t = D_1 / \Pi. \quad (1.3)$$

Подобранное таким образом сечение является оптимальным по расходу металла и служит ориентиром при выборе размеров трубы стержня по сортаменту (прил. 2): диаметр и толщина стенки трубы, принятой по сортаменту, должны иметь минимальные отклонения от соответствующих величин, полученных по формулам (1.2) и (1.3).

При назначении сечений сжатых элементов ферм по сортаменту следует руководствоваться теми же требованиями, что и для растянутых элементов (см. с. 4, 5).

Принятая по сортаменту труба проверяется на предельную гибкость и на общую устойчивость:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} \leq \lambda_{np}; \quad \sigma = \frac{N}{\varphi_x A} \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (1.4)$$

где φ_x – коэффициент продольного изгиба, определяемый по формулам 8,9,10 или по табл. 72, приведенным в [1];

i – радиус инерции.

Таблица 1.4

Предельные отношения диаметров труб к толщинам стенок (Π)

Предел текучести R_{ym} , МПа	Предельное отношение диаметра к толщине стенки трубы Π		
	поясов	элементов решетки	
		сжатых	растянутых
≤ 295	40	90	90
$295 < R_{ym} \leq 390$	35	80	90
> 390	30	70	90

1.1.3. Подбор сечений внецентренно сжатых стержней

Подбор сечений внецентренно сжатых элементов производится в той же последовательности, что и центрально-сжатых. При этом внецентренное приложение усилия учитывается коэффициентом приведения (n_1):

$$n_1 = \sqrt{1 + \frac{130M}{Nl_x}}. \quad (1.5)$$

В качестве M принимается наибольший момент в пределах средней трети длины панели пояса, вычисленный, как для упругой неразрезной балки согласно прил. 1. В формуле (1.5) и далее циф-

ровой индекс при буквенном символе указывает номер приближения, на котором получено данное значение.

Диаметр трубы в первом приближении определяется по формуле (1.2). Для внецентрично сжатых стержней в этой и других формулах в качестве l_{ef} принимается наибольшее значение: l_y или l_{xnp} , где

$$l_{xnp} = l_x \sqrt{n_1^3} \quad (1.6)$$

Полученное по формуле (1.2) значение диаметра трубы можно уточнить на втором цикле вычислений. Для этого необходимо вычислить и уточнить следующие параметры:

гибкость и коэффициент продольного изгиба

$$\lambda = l_{ef} / 0,353D_1 \rightarrow \varphi ;$$

уточненное значение коэффициента приведения

$$n_2 = \varphi_x / \varphi_e ,$$

где φ_x определяется в зависимости от гибкости (λ_x) в плоскости фермы:

$$\lambda_x = l_x / 0,353D_1 , \quad (1.7)$$

а коэффициент снижения расчетных сопротивлений при внецентричном сжатии (φ_e) определяется по табл. 74 [1] в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{R_y / E}$ и приведенного эксцентриситета, равного

$$m_{ef} = \frac{4M}{N \cdot D_1} \cdot \eta , \quad (1.8)$$

где η - коэффициент влияния формы, определяется по табл. 73 [1].

Уточнение диаметра трубы (D) производится по формуле

$$D_2 = 7D_1 \sqrt[8]{\left(\frac{n_2}{\varphi \sqrt{R_y} \cdot n_1}\right)^3 \cdot \frac{1}{\lambda^2}} , \quad (1.9)$$

где R_y измеряется в МПа.

Толщина стенки трубы будет равна $t = D_2 / \Pi$.

По значениям D_2 и t принимается труба по сортаменту (прил. 2). При этом необходимо учитывать требования, приведенные на с. 4, 5.

Проверка устойчивости стержня принятого сечения производится в плоскости и из плоскости фермы по формулам:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e A} \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} ; \quad \sigma = \frac{N}{\varphi_y A} \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} , \quad (1.10)$$

где A , φ_e и φ_y определяются по геометрическим характеристикам принятого по сортаменту сечения трубы. Определение φ_y , φ_e производится по соответствующим таблицам в [1].

Подбор сечений стержней фермы представляется в табличной форме (см. табл. 2.1).

1.2. Расчет сопряжений стержней ферм

Узлы сопряжений элементов ферм из круглых труб следует проектировать бесфасоночными, как менее трудоемкие и металлоемкие. При этом концы элементов решетки должны иметь фигурную форму, выполняемую фрезой, термической резкой или электроконтактным способом. При проектировании ферм следует стремиться к тому, чтобы элементы решетки не пересекались между собой в узлах примыкания к поясам (см. рис. 1.1, а, в, г). С этой целью нужно отдавать предпочтение схемам, при которых в узлах ферм к поясам примыкает не более двух стержней решетки при прочих равных условиях. Если выполнение этого условия оказывается нецелесообразным, то узлы могут быть запроектированы со взаимным пересечением элементов ре-

шетки (рис. 1.1, д, е). В этом случае «пропускаемым» является стержень большего диаметра, сварку которого к поясу на участке, перекрытом смежным элементом решетки, допускается не производить (это учитывается методикой расчета узлов).

Для устранения неблагоприятного влияния на поясные трубы сосредоточенной узловой нагрузки рекомендуется в узлах устраивать распределительные элементы в виде отрезков труб или швеллеров (рис. 1.1, а, б, г), передающих поперечную нагрузку на боковые участки поясных труб. Для увеличения местной несущей способности поясных труб в узлах могут быть использованы также цилиндрические накладки (рис. 1.1, ж).

Бесфасоночные узлы рассчитываются:

- на продавливание стенки пояса от совокупности воздействий, передаваемых примыкающими элементами решетки;
- на прочность примыкания каждого элемента решетки к поясу и смежным элементам решетки;
- на прочность сварных швов, прикрепляющих элементы из труб к другим трубчатым элементам или плоским листам.

1.2.1. Расчет стенки поясной трубы на местный изгиб (продавливание)

Расчет поясной трубы на местный изгиб производится в зоне примыкания каждого элемента решетки по следующим формулам:

$$\left| \sum \varepsilon_{ij} \cdot \mu_i \cdot N_i \cdot \frac{\sin \alpha_i}{\psi_i} \right| \leq \gamma_{Dj} \cdot S ; \quad (1.11)$$

$$\left| N_j \right| \cdot \frac{\sin \alpha_j}{\psi_j} \leq 2S , \quad (1.12)$$

где i – номер примыкающего элемента решетки;

j – номер рассматриваемого примыкающего элемента решетки;

N_i – продольное усилие в примыкающем элементе (при растяжении это усилие берется со знаком «плюс», при сжатии – со знаком «минус»);

μ_i – коэффициент, принимаемый равным 1, если $i \neq j$. В противном случае, т.е. при $i = j$, этот коэффициент определяется по формуле

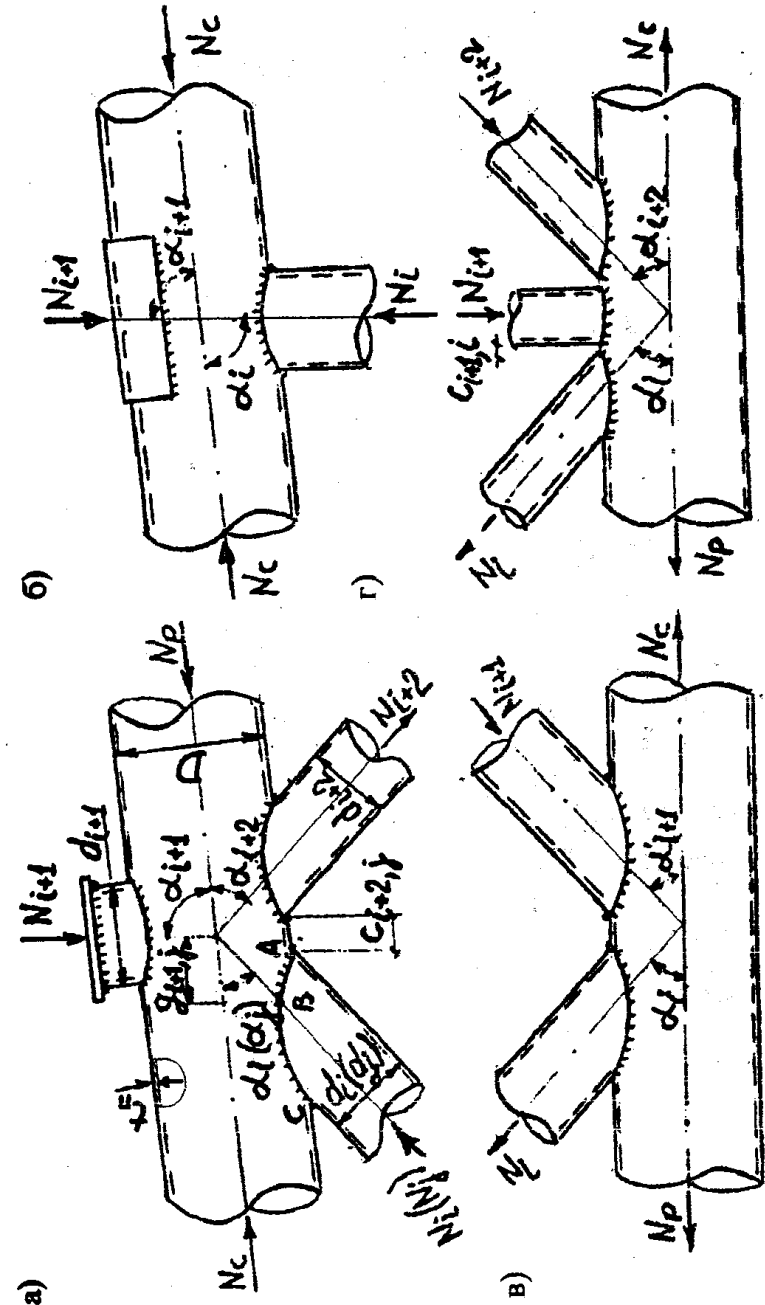


Рис. 1.1. Бесфасоночные узлы ферм из круглых труб

$$\mu_j = \gamma_{dj} + \frac{1,7 \cdot M_j}{N_j \cdot d_j},$$

где $\gamma_{dj} = 0,8$ при растяжении в рассматриваемом примыкающем элементе и $\gamma_{dj} = 1$ – при сжатии;

N_j, M_j – продольное усилие и изгибающий момент в рассматриваемом примыкающем элементе в плоскости фермы в месте примыкания этого элемента к поясной трубе;

$d_i(d_j)$ – диаметры труб примыкающих элементов.

В большинстве случаев $M_j = 0$, и тогда $\mu_j = 0,8$ при растяжении и $\mu_j = 1$ при сжатии;

α_i – угол между осью пояса и осями примыкающих элементов решетки;

$\psi_i = 1,05 \cdot \beta_i$, если $\beta_i \leq 0,7$; $\psi_i = 1,05 \cdot \beta_i \cdot (1 + 0,15\beta_i)$, если $\beta_i > 0,7$, где $\beta_i = d_i / D$;

D – диаметр поясной трубы;

ε_{ij} – коэффициент влияния расположения каждого элемента решетки по отношению к рассматриваемому. При $i = j$ $\varepsilon_{ij} = 1$. При расположении смежного и рассматриваемого элемента с одной стороны пояса этот коэффициент определяется по формуле

$$\varepsilon_{ij} = 1 - \frac{1,3\zeta_{ij}(1 + 0,02\delta)}{1 + 0,04\delta}, \quad (1.13)$$

где $\delta = D / t_n$; t_n – толщина стенки поясной трубы;

$\zeta_{ij} = 0,6$ при $c_{ij} \leq 0$; $\zeta_{ij} = 1 - 0,4 \cdot (1 - c_{ij} / D)^4$ при $0 < c_{ij} < D$; $\zeta_{ij} = 1$ при $c_{ij} > D$;

c_{ij} – наименьшее расстояние вдоль оси пояса между сварными швами, прикрепляющими к поясу рассматриваемый и смежный элементы решетки.

При расположении смежного и рассматриваемого элементов с разных сторон пояса коэффициент ε_{ij} определяется по другой формуле:

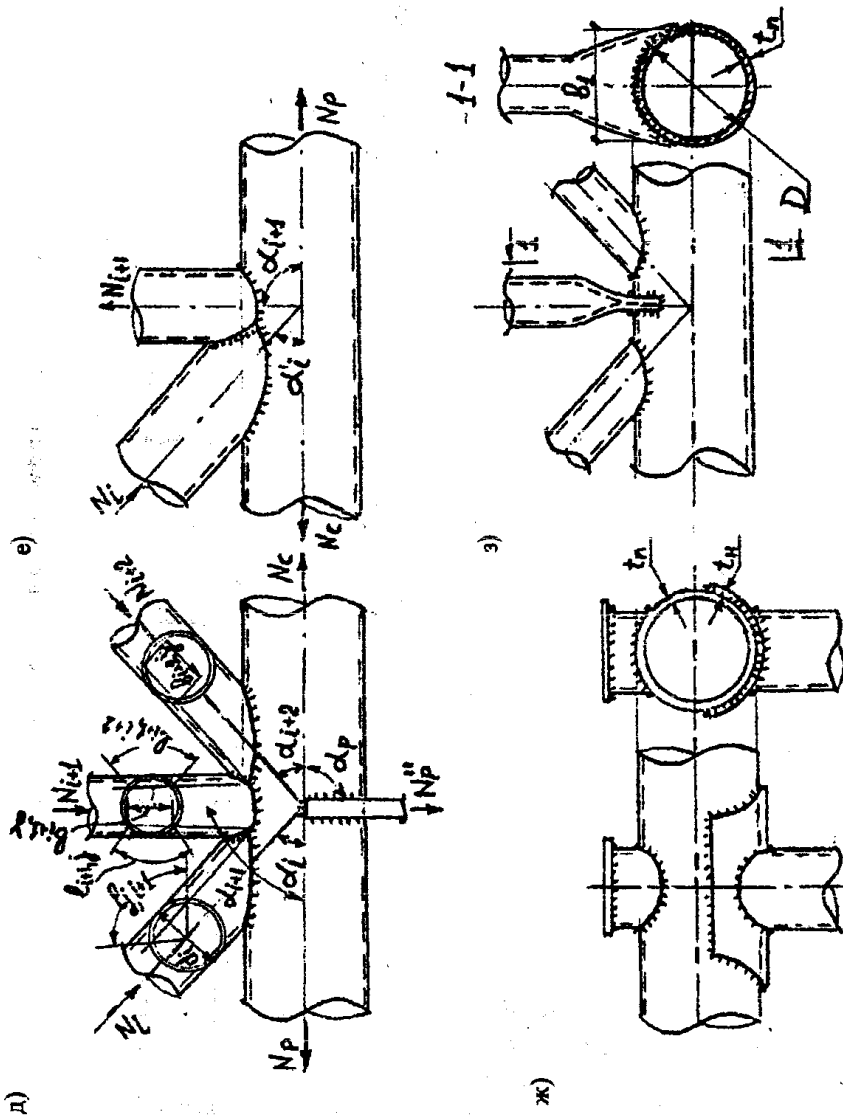


Рис. 1.1 (окончание). Бесфасончатые узлы ферм из круглых труб

$$\varepsilon_{ij} = \cos^2 \left(\frac{\pi g_{ij}}{2D} \right) \cdot \left[\frac{3\psi_i(1+0,02\delta)}{1+5,4\beta_i+5,6\beta_i^8} - 1 \right], \quad (1.14)$$

где g_{ij} – расстояние вдоль оси пояса между бортами рассматриваемого и смежного элементов (см. рис. 1.1, а). Это расстояние может быть определено как графически, так и аналитически:

$$g_{ij} = \frac{D}{2} \left(\operatorname{ctg} \alpha_j \cdot \sqrt{1 - \beta_j^2} \pm \operatorname{ctg} \alpha_i \cdot \sqrt{1 - \beta_i^2} \right) \pm z_{ij},$$

z_{ij} – наименьшее расстояние вдоль оси пояса от центра узла до сварного шва.

γ_{Dj} – коэффициент влияния продольной силы в поясе. При растяжении $\gamma_{Dj} = 1$. При сжатии $\gamma_{Dj} = 1 - 0,5(F_j / A \cdot R_y)^2$;

F_j – наибольшее значение продольной силы в поясе от «носки до пятки» рассматриваемого примыкающего элемента (к носковой части относится половина сечения раскоса со стороны тупого угла к пяточной, соответственно, – со стороны острого угла);

A – площадь сечения пояса.

Расстояния c_{ij} , g_{ij} , z_{ij} допускается определять графически.

Характеристику несущей способности стенки пояса S можно определить по формуле

$$S = 13(1+0,02\delta) \cdot t_n^2 \cdot R_y \cdot \gamma_c, \quad (1.15)$$

где γ_c – коэффициент условий работы, равный 1 при расчетном сопротивлении $R_y < 375$ МПа и равный 0,9 при $R_y > 375$ МПа.

При расчете опорных узлов (см. рис. 1.2) в качестве пояса рассматривается элемент, примыкающий к опорному ребру по всему контуру своего сечения.

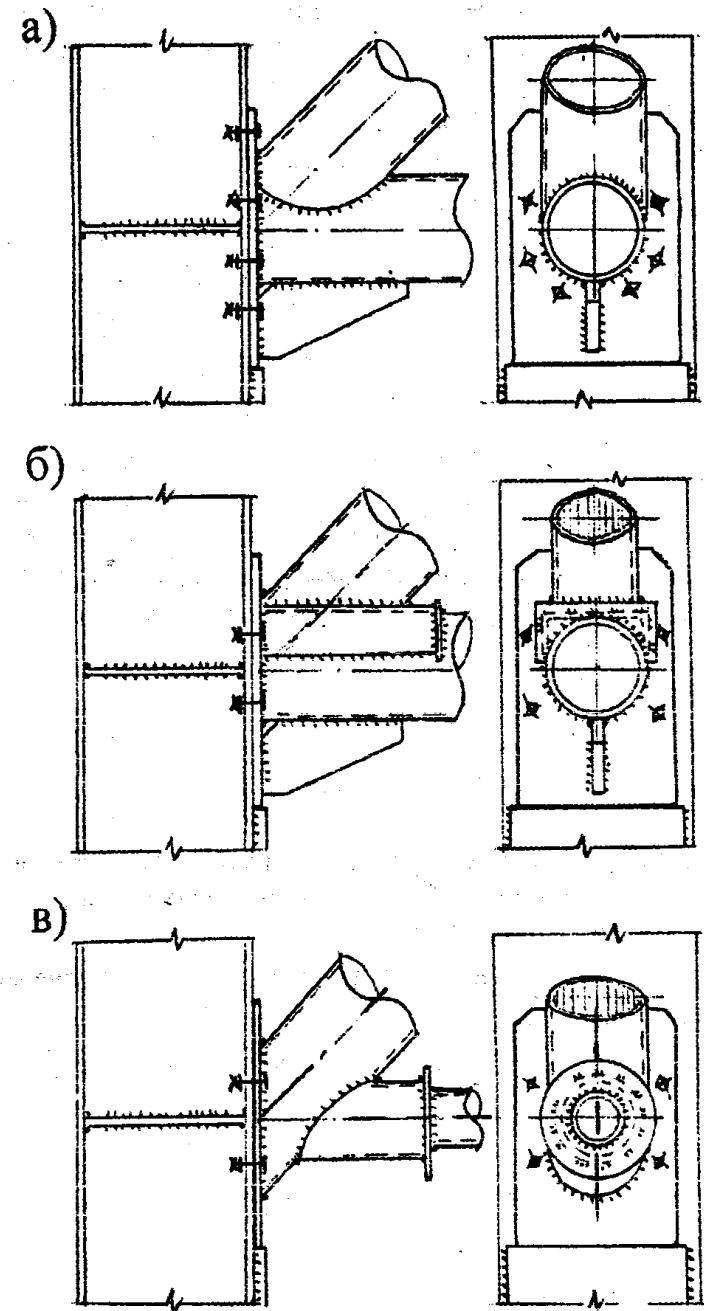


Рис. 1.2. Опорные узлы ферм из круглых труб

Если в узле в месте примыкания рассматриваемого элемента имеется накладка (см. рис. 1.1, ж), то при определении несущей способности поясной трубы (S) следует при растяжении в рассматриваемом элементе вместо толщины стенки пояса (t_n) использовать толщину накладки (t_n) и приведенную толщину (t_{ef}), если рассматриваемый элемент сжат. Приведенная толщина принимается равной $t_{ef} = t_{max} + 0,25t_{min}$, где t_{max} – большая и t_{min} – меньшая из толщин t_n и t_n . Длина накладки назначается таким образом, чтобы она выступала на 40...50 мм за пределы узла, а в поперечном направлении накладка должна охватывать половину периметра поясной трубы. При расчете узла с накладкой используется расчетное сопротивление металла накладки.

В случае если рассматриваемый элемент пересекается с другими стержнями решетки (см. рис. 1.1, д, е), то следует производить корректировку усилий, передающихся с элементов решетки на пояс в месте их контакта. При этом предполагается, что контакт имеет место только в местах приварки элемента решетки к поясу. Для рассматриваемого элемента в формулы (1.11), (1.12) вместо $N_j \cdot \sin \alpha_j$ следует подставлять приведенное усилие

$$P_{eff} = N_j \cdot \sin \alpha_j + \sum \xi_{ij} \cdot N_i \cdot \sin \alpha_i, \quad (1.16)$$

где N_i – усилия в стержнях, пересекающихся с рассматриваемым элементом (усилия подставляются со знаком «плюс» при растяжении и «минус» при сжатии);

$\xi_{ij} = l_{ij} / l_i$; l_{ij} – длина участка периметра сечения смежного элемента, пересекаемого рассматриваемым элементом (см. рис. 1.1, д, е);

l_i – длина участка периметра сечения смежного элемента, соответствующая суммарной длине сварного шва. Если сварной шов выполнен по всему контуру, то $l_i = \pi \cdot d_i$, где d_i – наружный диаметр смежного элемента;

i – номер смежного элемента, пересекаемого с рассматриваемым.

Для смежных элементов в формулу (1.11) вместо $N_i \cdot \sin \alpha_i$ следует подставлять $(1 - \xi_{ij}) \cdot N_i \cdot \sin \alpha_i$.

Если элемент решетки не приваривается к поясу, а только к другим стержням решетки или если длина приварки является незначительной ($l/\pi d_i < 0,25$), то данный элемент в расчете узла не учитывается, а усилие в этом элементе распределяется между смежными стержнями решетки, с которыми данный элемент пересекается. Распределение усилия производится пропорционально длине пересечения (l_{ji}).

В узлах, где стержни решетки пересекаются между собой, кроме указанных выше проверок, следует проверять совокупную прочность стенок всех пересекающихся элементов: сумма соответствующих частей несущей способности всех стержней, включая пояс пересекаемых рассматриваемым элементом решетки, должна быть не меньше усилия в этом элементе (N_j). Соответствующая часть несущей способности определяется пропорционально длине пересечения рассматриваемого элемента со смежным элементом (с элементом решетки и с поясом). Проверка проводится по формуле

$$N_j \leq 1,5 \cdot \gamma_{d_j} \cdot \sum \frac{\xi_{ij} \cdot \psi_i \cdot S_i \cdot \gamma_i}{\sin \alpha_{ij}}, \quad (1.17)$$

где S_i – характеристика несущей способности пересекаемого стержня, определяемого по формуле (1.15);

$\xi_{ij} = l_{ji} / \pi d_j$; l_{ji} – длина участка периметра сечения рассматриваемого элемента, соответствующая длине пересечения его со смежным стержнем (см. рис. 1.1, д);

γ_i – определяется так же, как γ_{D_i} (см. с. 16) с подстановкой соответствующих характеристик пересекаемого стержня;

$\psi_{ij} = 1,05 \beta_{ij}$, если $\beta_{ij} \leq 0,7$; $\psi_{ij} = 1,05 \beta_{ij} (1 + 0,15 \beta_{ij})$, где $\beta_{ij} = b_{ij} / D_i$; b_{ij} – ширина охвата рассматриваемым элементом пересекаемого стержня (см. рис. 1.1, д);

D_i – диаметр пересекаемого смежного стержня;

α_{ij} – угол примыкания рассматриваемого элемента к пересекаемому стержню.

Если проверка по формулам (1.11), (1.12), (1.17) не получается, то возможны три варианта:

1. Применить накладку (см. рис. 1.1, ж). В этом случае требуемая толщина накладки (t_n) может быть определена из уравнения

$$t_{ef} \geq t_n \cdot \sqrt{P / (\gamma_{Dj} \cdot S)}, \quad (1.18)$$

где P – значение левой части проверочной формулы;

$t_{ef} = t_n$ при растяжении в рассматриваемом элементе и $t_{ef} = t_{max} + 0,25 t_{min}$ при сжатии (t_{max} и t_{min} соответственно большая и меньшая величины из t_n и t_n).

2. Увеличить диаметр рассматриваемого элемента (этот вариант не применяем, если не получается проверка по формуле (1.12)).

3. Увеличить толщину стенки поясной трубы. Требуемую толщину стенки поясной трубы можно определить с помощью следующей формулы:

$$t_n \geq D \cdot \left[\sqrt{0,0001 + (1 + 0,02 \cdot \delta) \cdot P / \gamma_{Dj} \cdot S \delta^2} - 0,01 \right]. \quad (1.19)$$

Как правило, наиболее экономичным оказывается 1-й вариант.

1.2.2. Расчет на прочность элементов решетки в местах их примыкания к поясу фермы

Расчет на прочность производится в поперечном сечении, проходящем через «пятку». Для проверки прочности используется следующая формула:

$$N(1 + \chi \cdot \delta) / A_d \leq \gamma_d \cdot \gamma_{cd} \cdot R_y, \quad (1.20)$$

где N – продольная сила в проверяемом элементе;

χ – коэффициент, равный 0,008, если $\zeta < 0,85$ и $\chi = 0,015$ при $\zeta \geq 0,85$ (определение ζ см. выше);

A_d – площадь сечения рассматриваемого элемента;

$\gamma_{cd} = 0,85$, если рассматриваемый элемент пересекается в узле с двумя элементами решетки, один из которых сжат, а другой растянут. В остальных случаях $\gamma_{cd} = 1$;

$\gamma_d = 0,8$ при растяжении и $\gamma_d = 1$ при сжатии.

1.2.3. Расчет сварных соединений

Сварные швы, соединяющие элементы решетки с поясами, могут быть как стыковые, так и угловые (см. рис. 1.3). В случае резки трубы со скосом кромки (рис. 1.3, г) сварной шов по всему периметру примыкания можно считать стыковым. При скосе кромок (рис. 1.3, д), а также в соединениях с пропуском примыкающего элемента через отверстие в поясе (рис. 1.3, е) сварной шов по всему периметру можно считать угловым. При резке труб без скоса кромки (рис. 1.3, в) сварной шов вдоль периметра примыкания решетки к поясу изменяется по конструктивному признаку и может быть угловым или стыковым.

Расчет сварных швов в узловых соединениях труб согласно [2] производится по следующим формулам:

$$N \leq 0,85(S_{wh} + S_{wt});$$

$$N \leq 2S_{wh};$$

$$N \leq 2S_{wt};$$

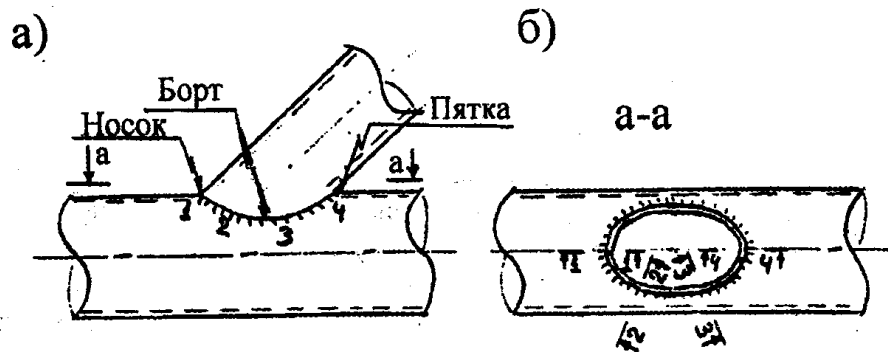
где S_{wh} и S_{wt} – несущая способность соответственно пяточной и носковой частей сварного шва. К пяточной части относится сварной шов со стороны острого угла примыкания раскоса к поясной трубе, а к носковой, соответственно, – со стороны тупого угла. Длина сварного шва пяточной и носковой частей одинакова и составляет половину общей длины.

Несущая способность пяточной и носковой частей сварного шва определяется по формулам:

$$S_{wh} = (0,85 \cdot t_p \cdot l_{yh} \cdot R_{wy} + K_f \cdot l_{fh} \cdot R_{wd}) \cdot \gamma_c;$$

$$S_{wt} = (0,85 \cdot t_p \cdot l_{yt} \cdot R_{wy} + K_f \cdot l_{ft} \cdot R_{wd}) \cdot \gamma_c,$$

где R_{wy} – расчетное сопротивление сварного шва ($R_{wy} = R_y$ при сжатии, $R_{wy} = R_y$ при растяжении, но только в случае применения физических методов контроля качества, в противном случае при растяжении $R_{wy} = 0,85R_y$);



1-1 2-2 3-3 4-4

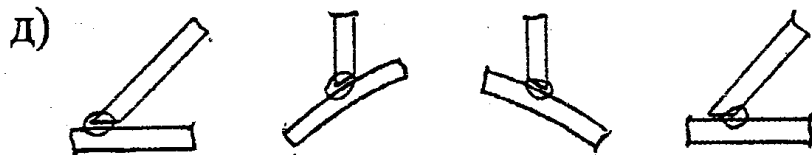
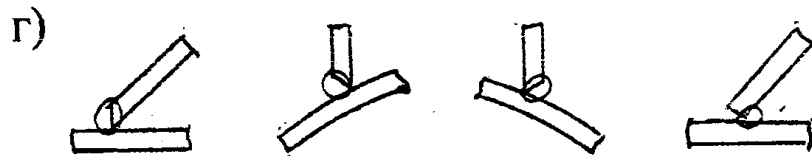
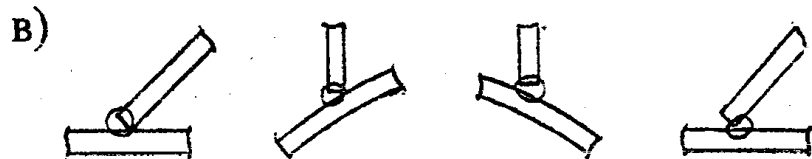


Рис. 1.3. Сечения сварного шва в узловых соединениях

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

R_{wd} , R_{wf} и R_{wz} – расчетное сопротивление углового сварного шва, соответственно, по металлу шва и по металлу границы сплавления;

t_p – толщина стенки прикрепляемой трубы;

K_f – катет углового шва;

l_{yh} и l_{yh} – суммарные длины участков сварного шва, рассматриваемых как стыковые швы, соответственно в пяточной и носковой частях шва;

l_{fh} и l_{fh} – суммарные длины участков сварного шва, рассматриваемых как угловые, соответственно в пяточной и носковой частях шва.

Из-за громоздкости определения указанных выше длин в проверочных расчетах прочности сварных соединений труб может быть использована упрощенная формула

$$N \leq 0,85 \beta_f K_f l_w R_{wf} \gamma_c / \gamma_n, \quad (1.21)$$

где β_f – коэффициент, определяемый в зависимости от катета сварного шва, вида сварки, диаметра сварочной проволоки и положения при сварке (см. табл. 34 [1]). При ручной сварке $\beta_f = 0,7$;

l_w – длина сварного шва (внешний периметр примыкания трубы решетки к трубе пояса).

Длина сварного шва может быть определена по приближенной формуле

$$l_w = 2d / \sin \alpha + 1,3d \cdot \sin \alpha.$$

1.3. Конструирование и расчет заводских и монтажных стыков труб

Заводские стыки труб одинакового внешнего диаметра, отличающиеся толщиной стенки не более чем на 2 мм, могут быть выполнены на остающемся подкладном кольце (рис. 1.4, а) или с парными полукольцевыми накладками (рис. 1.4, б). Подкладочное кольцо рекомендуется изготавливать толщиной 3-4 мм и шириной 50-60 мм. Толщину полукольцевых накладок рекомендуется принимать в 1,2 раза больше толщины стенок стыкуемых труб. При расположении стыков в местах

неполного использования несущей способности сечения (до 50%) допускаются соединения труб без подкладного кольца (рис. 1.4, в).

Стыковые соединения труб разных диаметров могут быть выполнены с использованием сплошных или кольцевых фланцев (рис. 1.4, г), а при малой разнице в диаметрах (до 2 мм) – телескопическими (рис. 1.4, д). Заводские стыки трубчатых поясов в местах перелома их осей могут быть выполнены на цилиндрических (рис. 1.5, а) и бочкообразных (рис. 1.5, б) подкладках или без подкладки (рис. 1.5, в), а также с применением фланцев (рис. 1.5, г). Для фланцев при наличии растягивающих усилий рекомендуется применять сталь класса прочности С345 с гарантированной прочностью в направлении толщины проката.

Монтажные стыки трубчатых элементов рекомендуется выполнять с применением кольцевых или сплошных фланцев (рис. 1.5, д). В первом случае труба приваривается к фланцу двумя кольцевыми швами и предусматриваются заглушки для предотвращения коррозии внутренней поверхности трубы (см. рис. 1.5, д, сечение 1-1, I вариант). Во втором случае (см. рис. 1.5, д, сечение 1-1, II вариант) труба приваривается втавр одним кольцевым швом.

Соединения труб с использованием стыковых швов (рис. 1.4, а, в; рис. 1.5, а, б, в) рассчитываются по формуле

$$\frac{N}{\pi D t} \leq R_{wy} \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (1.22)$$

где N – продольная сила, действующая на соединение;

D – диаметр трубы с меньшей толщиной стенки;

t – меньшая толщина стенки соединяемых труб.

Соединения труб с использованием угловых швов (рис. 1.4, б, г, д; рис. 1.5, г, д) рассчитываются по формулам:

по сечению шва

$$\frac{N}{n\beta_f K_f l_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \frac{\gamma_c}{\gamma_n}; \quad (1.23)$$

по границе сплавления

$$\frac{N}{n\beta_z K_z l_w} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

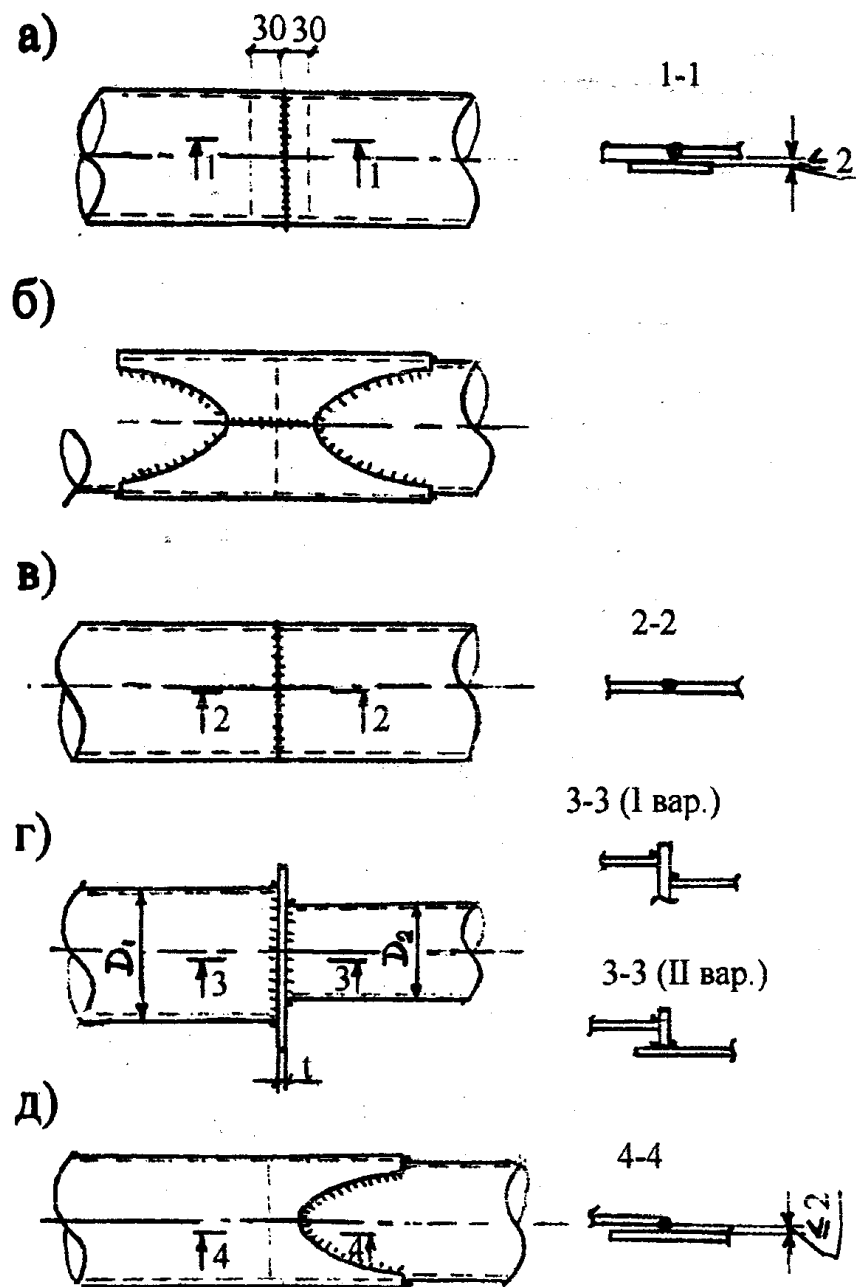


Рис. 1.4. Стыки труб

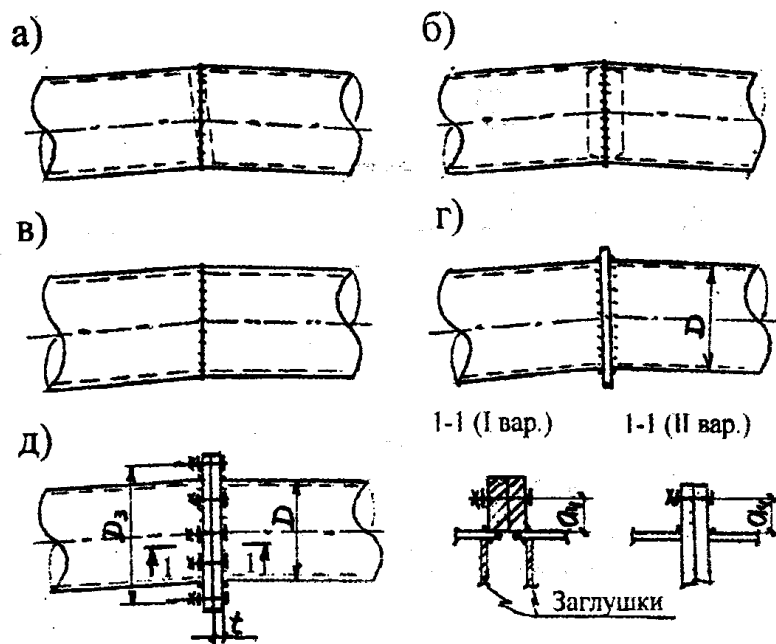


Рис.1.5. Стыки труб в коньковом узле

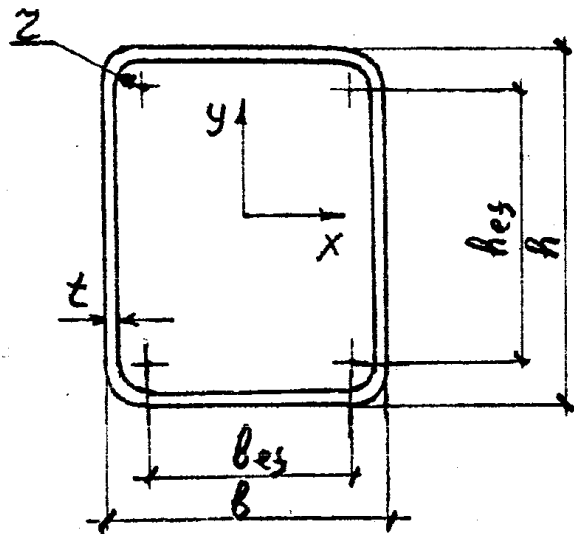


Рис.1.6. Сечение стержня из прямоугольной трубы

где n – количество кольцевых швов;

β_f и β_z – коэффициенты, принимаемые по табл. 34* [1];

R_{wf} – расчетное сопротивление угловых швов срезу по металлу шва, принимаемое согласно табл. 56 [1];

R_{wz} – расчетное сопротивление угловых швов срезу по границе сплавления:

$$R_{wz} = 0,45 R_{un},$$

где R_{un} – временное сопротивление металла трубы, определяемое по табл. 51* [1];

γ_{wf} и γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва, равные 1 во всех случаях, кроме конструкций, возводимых в районах с расчетной температурой ниже -40°C , для которых $\gamma_{wf} = 0,85$ для металла с $R_{wun} = 410$ МПа и $\gamma_{wz} = 0,85$ для всех сталей (R_{wun} – нормативное сопротивление металла сварного шва, определяемое по табл. 56 [1]);

l_w – расчетная длина шва, принимаемая равной πD ;

K_f – катет углового шва.

В дальнейшем расчетные формулы для расчета угловых швов приводятся только для сечений по шву.

При наличии в месте стыка нормальной силы и изгибающего момента проверка прочности сварного соединения производится по формуле

$$\frac{N}{n\beta_f K_f l_w} + \frac{M}{nW_f} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (1.24)$$

где $W_f = 0,785 D^2 \beta_f K_f$.

В соединении на рис. 1.4, г, кроме расчета сварного шва, следует определить также толщину фланца исходя из его работы на изгиб:

$$t = \sqrt{\frac{3N(D_1 - D_2)}{R_y \pi D_2}}, \quad (1.25)$$

где D_1 и D_2 – внешние диаметры сопрягаемых труб ($D_1 > D_2$).

Толщину фланцев рекомендуется принимать в интервале 20...40 мм.

При растяжении прочность фланцев в узлах на рис. 1.4, г и 1.5, г) проверяется еще в направлении толщины проката:

$$\frac{N}{\pi D \beta_f K_f} \leq R_{th}, \quad (1.26)$$

где R_{th} – расчетное сопротивление растяжению в направлении толщины проката (см. табл. 1 [1]).

В узле на рис. 1.5, д при растягивающих усилиях следует считать также болтовое соединение, где рекомендуется использовать предварительно напряженные высокопрочные болты диаметром 16...27 мм. Количество болтов определяется по формуле

$$n \geq \frac{N}{0,7 R_{суп} A_{ен}}, \quad (1.27)$$

где N – усилие растяжения в соединяемых элементах;

$R_{суп}$ – временное сопротивление металла болта (см. табл. 61 [1]);

$A_{ен}$ – площадь сечения болта «нетто» (см. табл. 62 [1]).

При окончательном назначении количества болтов следует учитывать требования по их размещению (см. табл. 39 [1]) и размер a_4 (см. рис. 1.5, д), который должен быть не менее $2d_b$, где d_b – диаметр болта. Последнее условие продиктовано удобством закручивания гайки. Усилие предварительного натяжения болтов следует назначать равным $0,63 R_{суп} A_{ен}$.

Толщина фланца назначается из условия прочности при его работе на изгиб:

$$t \geq \sqrt{\frac{3N}{nR_y}}. \quad (1.28)$$

Если $a_4 > \frac{\pi D}{2n}$, то используется другая формула:

$$t \geq \sqrt{\frac{6Na_4}{\pi D_3 R_y}}, \quad (1.29)$$

где D_3 – диаметр окружности, на которой расположены болты.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФЕРМ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ

2.1. Подбор сечений стержней ферм

Расчетные усилия в стержнях ферм определяются согласно прил. 1 и представляются в табличной форме (см. табл. П.1.1). Требуемая площадь и радиусы инерции центрально-растянутых стержней определяются по формулам (1.1).

При назначении размеров труб растянутых элементов по сортаменту необходимо учитывать следующие требования:

- площадь сечения и радиусы инерции должны быть равны требуемым значениям, найденным по формулам (1.1), или превышать их;
- из условий сварки и коррозии толщина стенки трубы должна быть не меньше 3 мм.

Для элементов решетки исходя из условия сварки и местной устойчивости должно соблюдаться условие

$$0,6b_n \leq b_p - 2(t_n + t_p), \quad (2.1)$$

где b_p и t_p – соответственно ширина сечения и толщина стенки трубы элемента решетки;

b_n и t_n – то же, пояса.

Расчетная длина стержней из прямоугольных труб определяется по табл. 1.2. Для беспрогонных покрытий расчетная длина верхнего пояса в плоскости фермы определяется по формуле

$$l_x = \mu l, \quad (2.2)$$

где

$$\mu = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{n \cdot 10^3 + 1}{n \cdot 10^3 + 0,65}}$$

Здесь n – безразмерный параметр: $n = qh / 2N$,
где q – погонная нагрузка на пояс;

N – продольная сила в элементе пояса;

h – высота сечения поясной трубы.

Предельная гибкость элементов ферм определяется по табл. 1.3.

Подбор сечений центрально-сжатых стержней выполняется в следующей последовательности:

определяются отношение сторон трубы α и параметр m :

$$\alpha = \sqrt[3]{(l_x / l_y)^4}; \quad m = \frac{2}{3}(\alpha + 1)^2(3\alpha + 1); \quad (2.3)$$

назначается отношение b/t . В дальнейшем это отношение будет обозначаться через Π . Для поясов $\Pi \leq 45$, для элементов решетки $\Pi \leq 60$;

определяется размер трубы из плоскости фермы

$$b = 0,15 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{N\Pi}{\sqrt{R_y}}\right)^3 \cdot \frac{l_y^2}{m}}, \quad (2.4)$$

где N – расчетное усилие в стержне, определяемое согласно прил. 1.

Единицы измерения в формуле (2.4): усилие – в МН, расчетное сопротивление – в МПа, длина – в м.

Второй размер сечения трубы и толщина стенки будут равны

$$h = \alpha \cdot b; \quad t = b / \Pi. \quad (2.5)$$

Полученное таким образом сечение является оптимальным по расходу металла и служит ориентиром при выборе трубы по сортаменту – внешние габариты и толщина стенки трубы должны иметь минимальные отклонения от соответствующих величин, полученных по формулам (2.4) и (2.5).

При выборе сечений элементов решетки ферм по сортаменту (прил. 3) необходимо учитывать ограничения по формуле (2.1).

После назначения сечения центрально-сжатого стержня производится проверка местной и общей устойчивости. Местная устойчивость считается обеспеченной, если выполняются следующие условия:

$$\frac{h_{ef}}{t} \leq \left| \frac{h_{ef}}{t} \right|, \quad (2.6)$$

где предельное отношение $|h_{ef}/t|$ принимается равным $1,2\sqrt{E/R_y}$ при $\bar{\lambda} < 1$ и $(1 + 0,2\bar{\lambda}) \cdot \sqrt{E/R_y}$ при $\bar{\lambda} \geq 1$,

где $\bar{\lambda}$ – наибольшая условная гибкость стержня $\left(\bar{\lambda} = \lambda_{max} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \right)$;

h_{ef} – наибольшая ширина прямолинейного участка горизонтальной или вертикальной стенки трубы (на рис. 1.6 это b_{ef} и h_{ef}).

В случае недонапряжения стержня, например, при назначении размеров трубы из обеспечения предельной гибкости отношение $|h_{ef}/t|$ следует увеличить в $\sqrt{R_y \varphi A / N}$, но не более чем в 1,25 раза.

При невыполнении условия (2.6) необходимо соответствующим образом изменить сечение трубы: уменьшить h_{ef} или увеличить t .

Проверка общей устойчивости производится, как для центрально-сжатого стержня:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (2.7)$$

где φ – коэффициент продольного изгиба, определяемый по табл. 72 [1].

Гибкость стержня в плоскости и из плоскости фермы (λ_x и λ_y) не должна превышать предельных значений, приведенных в табл. 1.3.

Подбор сечений внецентренно сжатых стержней производится в следующей последовательности:

по формуле (1.5) определяется коэффициент приведения в первом приближении (η_1) и по формуле (1.6) вычисляется приведенная расчетная длина в плоскости действия изгибающего момента;

определяются параметры α_1 и m_1 :

$$\text{если } l_{xnp} > l_y, \text{ то } \alpha_1 = \sqrt[3]{(l_y / l_{xnp})^4}; \quad (2.8)$$

$$\text{если } l_{xnp} \leq l_y, \text{ то } \alpha_1 = \sqrt[3]{(l_{xnp}/l_y)^4}; \quad (2.9)$$

$$m_1 = \frac{2}{3}(\alpha_1 + 1)^2(3\alpha_1 + 1); \quad (2.10)$$

вычисляется размер трубы в плоскости наибольшей расчетной длины:

$$S_1 = 0,15 \cdot 8 \sqrt[3]{\left(\frac{N\Pi}{\sqrt{R_y} \cdot \gamma_c}\right)^3 \cdot \frac{l_{ef}^2}{m_1}}, \quad (2.11)$$

где $\Pi = 45$ для поясов и $\Pi = 60$ для элементов решетки;

l_{ef} – наибольшая расчетная длина l_y или l_{xnp} .

В формуле (2.11) следует использовать те же единицы измерения, что и в формуле (2.4).

Полученное значение S_1 можно уточнить. С этой целью следует вычислить следующие параметры:

гибкость в плоскости наибольшей расчетной длины и соответствующий ей коэффициент продольного изгиба, как при центральном сжатии:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{S_1} \cdot \sqrt{\frac{12(\alpha_1 + 1)}{3\alpha_1 + 1}} \rightarrow \varphi; \quad (2.12)$$

скорректированное значение коэффициента приведения

$$n_2 = \varphi_x / \varphi_e, \quad (2.13)$$

где φ_x – определяется как для центрально-сжатого стержня, в зависимости от гибкости стержня в плоскости фермы (λ_x):

$$\lambda_x = \frac{l_x}{S_1} \sqrt{\frac{12(\alpha_1 + 1)}{3\alpha_1 + 1}}, \text{ если } l_{xnp} > l_y; \quad (2.14)$$

$$\lambda_x = \frac{l_x}{\alpha_1 S_1} \sqrt{\frac{12(\alpha_1 + 1)}{\alpha_1 + 3}}, \text{ если } l_{xnp} \leq l_y; \quad (2.15)$$

φ_e определяется по табл. 74 [1] в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{R_y/E}$ и приведенного эксцентриситета, равного

$$m_{ef} = \frac{M}{N} \cdot \frac{\eta}{\rho}, \quad (2.16)$$

где M, N – соответственно наибольший момент в пределах средней трети длины стержня и сжимающее усилие, определяемые согласно прил. 1;

η – коэффициент влияния формы, определяется по табл. 73 [1].

Если $l_{xnp} > l_y$, то

$$\rho = \frac{S_1(3\alpha_1 + 1)}{6(\alpha_1 + 1)} - 0,3, \text{ см.} \quad (2.17)$$

Если $l_{xnp} \leq l_y$, то

$$\rho = \frac{\alpha_1 S_1(\alpha_1 + 3)}{6(\alpha_1 + 1)} - 0,3, \text{ см.} \quad (2.18)$$

Корректировка размера S производится по формуле

$$S_2 = 7S_1 \cdot 8 \sqrt[3]{\left(\frac{\Pi_2}{\varphi \Pi_1 \sqrt{R_y}}\right)^3 \cdot \frac{m_1}{\lambda^2 m_2}}, \quad (2.19)$$

где m_2 – определяется, как и m_1 , по формуле (2.10), но с заменой α_1 на α_2 . В свою очередь, α_2 вычисляется по формулам (2.8) или (2.9), где

$$l_{xnp} = l_x \sqrt{n_2^3}.$$

После корректировки назначаются размеры трубы.

$$\text{Если } l_{xnp} \geq l_y, \text{ то } h = S_2, b = \alpha_2 S_2. \quad (2.20)$$

$$\text{Если } l_{xnp} < l_y, \text{ то } h = \alpha_2 S_2, b = S_2, t = S_2 / \Pi.$$

По найденным величинам b , t и h принимается сечение трубы по сортаменту (прил. 2).

Принятая труба проверяется на местную и общую устойчивость. При $I_x > I_y$ проверка местной устойчивости делается для полки и для стенки:

$$\frac{b_{ef}}{t} \leq \left| \frac{h_{ef}}{t} \right|; \quad \frac{h_{ef}}{t} \leq \left| \frac{h_{ef}}{t} \right|, \quad (2.21)$$

где b_{ef} и h_{ef} – размеры прямолинейных участков сечения трубы (см. рис. 1.6):

$$b_{ef} = b - 6t, \quad h_{ef} = h - 6t.$$

Предельное отношение $\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|$ для горизонтального участка трубы (полки) определяется по формуле (2.6). Предельное отношение для стенки трубы $\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|_1$ зависит от относительного эксцентриситета:

$m = \frac{MA}{NW_x}$. При $m \geq 1$ предельное отношение $\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|_1$ определяется по следующим формулам:

$$\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|_1 = (1,3 + 0,15 \bar{\lambda}_x^2) \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}} \quad \text{при } \bar{\lambda}_x < 2 \quad (2.22)$$

и

$$\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|_1 = (1,2 + 0,35 \bar{\lambda}_x^2) \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}} \quad \text{при } \bar{\lambda}_x \geq 2, \quad (2.23)$$

но не более $3,1 \sqrt{E/R_y}$.

Если $0 < m < 1$, то предельное отношение определяется интерполяцией между $\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|$ и $\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|_1$.

При $I_x \leq I_y$ проверка местной устойчивости стенки не делается. Также не делается проверка местной устойчивости стенки, если соотношение крайних напряжений (α_n) равно или больше единицы:

$$\alpha_n = (\sigma - \sigma_1) / \sigma, \quad (2.24)$$

где
$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{Mh_{ef}}{Wh}; \quad \sigma_1 = \frac{N}{A} - \frac{Mh_{ef}}{Wh} \quad (2.25)$$

В случае недонапряжения стержня предельное отношение $\left| \frac{h_{ef}}{t} \right|$

следует увеличить в $\sqrt{R_y \varphi_e A / N}$, но не более чем в 1,25 раза.

Проверка общей устойчивости принятого сечения в плоскости действия момента производится по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e A} \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (2.26)$$

где φ_e – определяется по табл. 74 [1] в зависимости от приведенного эксцентриситета (m_{ef}) и условной гибкости ($\bar{\lambda}_x$):

$$m_{ef} = \frac{MA}{NW_x} \eta; \quad \bar{\lambda}_x = \frac{l_x}{i} \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (2.27)$$

где M – наибольший момент в пределах средней трети длины панели пояса.

Из плоскости действия момента (из плоскости фермы) проверка производится при $I_x > I_y$ по формуле

$$\sigma = \frac{N}{c \varphi_y A} \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (2.28)$$

где φ_y – коэффициент продольного изгиба, определяемый в зависимости от гибкости из плоскости фермы (λ_y).

Коэффициент (c) определяется в зависимости от относительного эксцентриситета (m_x): $m_x = \frac{MA}{NW_x}$.

При $m_x \leq 5$
$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m_x} \quad (2.29)$$

При $m_x \geq 10$
$$c = \frac{\beta}{1 + m_x / \varphi_y} \quad (2.30)$$

При $5 < m_x < 10$
$$c = c_5(2 - 0,2m_x) + c_{10}(0,2m_x - 1). \quad (2.31)$$

В приведенных формулах α и β – коэффициенты, принимаемые по табл. 10 [1];

c_5, c_{10} – коэффициенты, определяемые соответственно по формулам (2.29) и (2.30) при $m_x = 5$ и $m_x = 10$.

Если $I_x \leq I_y$, то проверка устойчивости из плоскости действия момента (из плоскости фермы) производится только при $\lambda_x < \lambda_y$ по формуле (2.28), где $c = 1$.

Подбор сечений стержней фермы представляется в табличной форме (см. табл. 2.2).

2.2. Расчет сопряжений стержней ферм

Сопряжения элементов ферм рекомендуется выполнять бесфасоночными (см. рис. 2.1). Бесфасоночные узлы, состоящие из пояса и примыкающих к нему элементов решетки, проверяются следующими расчетами:

а) на продавливание (вырывание) участка горизонтальной стенки трубы пояса, контактирующего с элементом решетки;

б) на несущую способность участка вертикальной стенки трубы пояса в месте примыкания сжатого элемента решетки;

в) на прочность элементов решетки в зоне примыкания к поясу;

г) на прочность сварных швов, прикрепляющих элементы решетки к поясу.

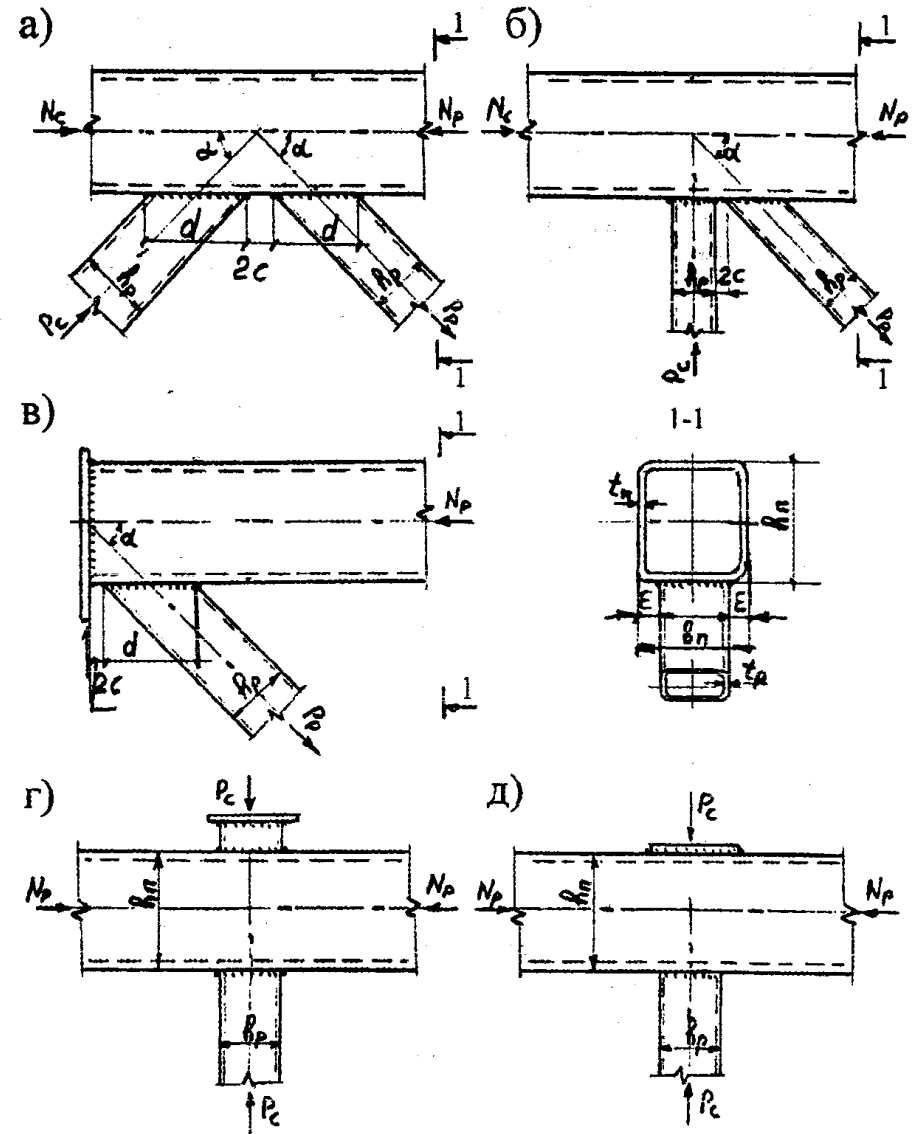


Рис. 2.1. Типы бесфасоночных узлов ферм из прямоугольных труб

При расчете ферм из прямоугольных труб различают два типа узлов. К первому типу относятся узлы, представленные на рис. 2.1, а, б, в, при отношении $c/d \leq 0,25$ и при угле наклона раскосов α в интервале $40 \dots 50^\circ$. Ко второму типу относятся узлы, представленные на рис. 2.1, а, б, в, но при отношении $c/d > 0,25$, а также узлы, представленные на рис. 2.1, г, д (угол наклона равен $\approx 90^\circ$).

2.2.1. Расчет на продавливание (вырывание)

Расчет на продавливание (вырывание) участка горизонтальной стенки сечения трубы пояса производится от каждого элемента решетки отдельно. Этот расчет производится только при $b_p/b_n \leq 0,9$. Проверочная формула имеет следующий вид:

$$P \leq \frac{\gamma_c \gamma_p \gamma_m R_y t_n^2 (d + c + n_1 \sqrt{2b_n \varepsilon})}{(n_2 + 1,8c/d) \varepsilon \cdot \sin \alpha}, \quad (2.32)$$

где P – усилие в рассматриваемом элементе решетки, определяемое согласно прил. 1;

γ_c – коэффициент условий работы ($\gamma_c = 0,9$);

$\gamma_p = 1,2$ при растяжении в примыкающем элементе и $\gamma_p = 1$ при сжатии;

$\gamma_m = 1$ при растяжении в поясе и $\gamma_m = 1,5 - \frac{F}{AR_y}$ при сжатии,

где F – усилие в поясе со стороны растянутого раскоса;

A – площадь пояса.

Для узлов 1-го типа $n_1 = 1, n_2 = 0,4$. Для узлов 2-го типа $n_1 = 2, n_2 = 1, c = 0$. Остальные обозначения приведены на рис. 2.1.

Если проверка на продавливание (вырывание) не удовлетворяется, то наиболее целесообразным является увеличение габаритов сечения рассматриваемого элемента решетки или увеличение толщины стенки поясной трубы, а также использование листовых прокладок (см. рис. 2.2). В последнем случае при расчете на продавливание в формулу (2.32) вместо толщины стенки поясной трубы (t_n) подставляется суммарная толщина ($t_n + t_n$), а при расчете на вырывание вместо (t_n) используется толщина накладки (t_n).

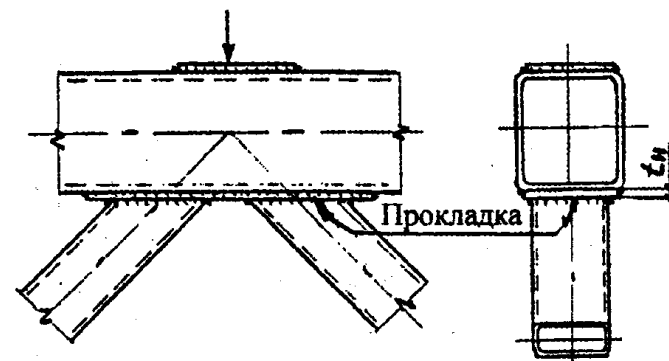


Рис. 2.2. Узел фермы с листовой прокладкой

2.2.2. Проверка несущей способности вертикальной стенки поясной трубы в месте примыкания сжатого элемента решетки

Эта проверка производится только при отношении $b_p/b_n > 0,85$. Проверочная формула имеет вид

$$P \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c \cdot t_n \cdot 2h_p}{\sin^2 \alpha} \cdot K \cdot m_2, \quad (2.33)$$

где P – сжимающее усилие в элементе решетки;

K – коэффициент, определяемый по рис. 2.3, где $h = h_n, t = t_n$;

$m_2 = 0,8$ при $h_n/t_n \geq 25$, в остальных случаях $m_2 = 1$.

2.2.3. Расчет на прочность элементов решетки в зоне примыкания к поясу

Расчет производится по формуле

$$P \leq \gamma_c \cdot \gamma_p \cdot K \cdot R_y \cdot A_p \cdot m', \quad (2.34)$$

где P – расчетное усилие в рассматриваемом элементе решетки;

A_p – площадь сечения элемента решетки;

K – коэффициент, определяемый по рис. 2.3 при $h = h_p$ и $t = t_p$.

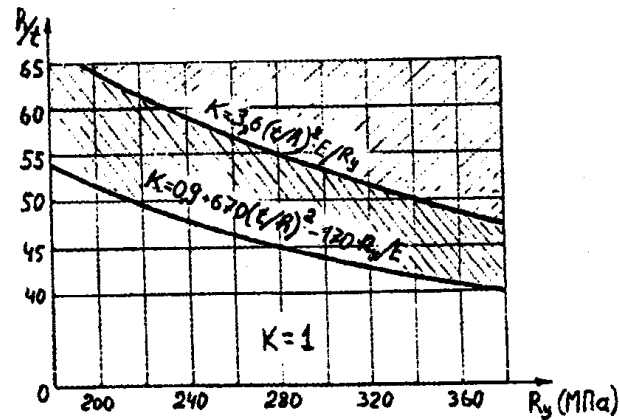


Рис. 2.3. Области значений коэффициента K

Для узлов 1-го типа

$$m' = \frac{1}{1 + 0,013b_n / t_n} \quad (2.35)$$

Для узлов 2-го типа

$$m' = \frac{1}{[1 + 0,01(3 + 5b_p / b_n - 0,1h_p / t_p) \cdot b_n / t_n] \cdot \sin \alpha} \quad (2.36)$$

Значения остальных символов, используемых в формуле (2.34), приведены выше.

Для элемента решетки неквадратного сечения ($b_p \neq h_p$) правая часть формулы (2.34) умножается для узлов 1-го типа на выражение $0,67 + 0,67 / (1 + b_p / h_p)$ и для узлов 2-го типа на выражение $2 / (1 + b_p / h_p)$.

2.2.4. Расчет сварных швов

Прочность сварных швов проверяется по формулам

$$\frac{P \cdot m_3}{\beta_f \cdot K_f \cdot l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \frac{\gamma_c}{\gamma_n}; \quad \frac{P \cdot m_3}{\beta_z \cdot K_f \cdot l_w} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (2.37)$$

где $l_w = 2d + b_p$ для узлов 1-го типа и $l_w = 4h_p$ для узлов 2-го типа;

R_{wf} , R_{wz} – расчетные сопротивления угловых швов соответственно по металлу шва и по металлу границы сплавления. Значения R_{wf} , R_{wz} , а также коэффициентов β_f , γ_{wf} , β_z и γ_{wz} приведены в [1].

Для узлов 1-го типа $m_3 = 0,75 + 0,01 b_n / t_n$, для узлов 2-го типа $m_3 = 1 / m'$, где m' определяется по формуле (2.36).

2.3. Конструирование и расчет стыков поясных труб

Конструирование и расчет стыков прямоугольных труб выполняется по аналогии с конструированием и расчетом стыков круглых труб (см. разд. 1).

Пример 1

Проектирование фермы из круглых труб. Исходные данные: место строительства г.Брест, климатический район – П5; размеры здания в плане 18x108 м (см. рис. 2.4); геометрические размеры фермы приведены на рис. 2.5; здание оборудовано мостовыми кранами среднего режима работы; здание относится ко II классу ответственности, т.е. $\gamma_n = 0,95$; особенность конструкции покрытия: стальной профилированный настил (Н80-674-1,0) укладывается непосредственно на верхний пояс фермы;

сопряжение ферм с колоннами – жесткое;

сварка производится полуавтоматом в среде углекислого газа.

Расчетная нагрузка на верхний пояс фермы:

от собственного веса покрытия $q_n = 5$ кН/м;

от веса снегового покрова $q_{сн} = 10$ кН/м.

Значения опорных моментов:

от собственного веса покрытия $M_n = -30$ кН·м (момент приложен к левой и правой опорам фермы);

от веса снегового покрова $M_{сн} = -60$ кН·м (момент приложен к левой и правой опорам фермы);

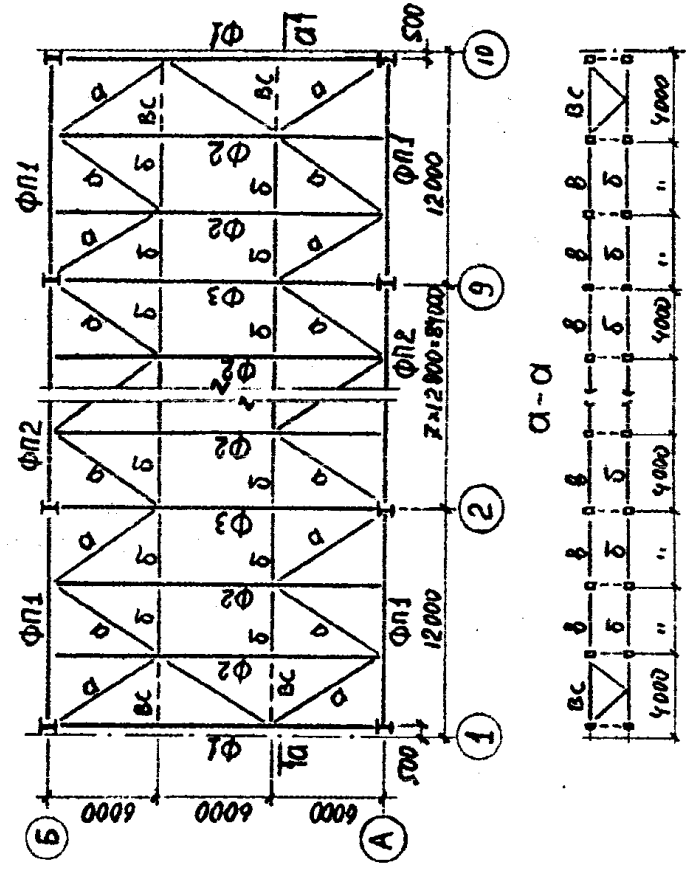


Рис. 2.4. План по нижним поясам ферм:
 Ф1, Ф2, Ф3 — стропильные фермы; ФП1, ФП2 — подстропильные фермы;
 в, в — вертикальные связи между фермами;
 а — раскосы связей; б, в — распорки

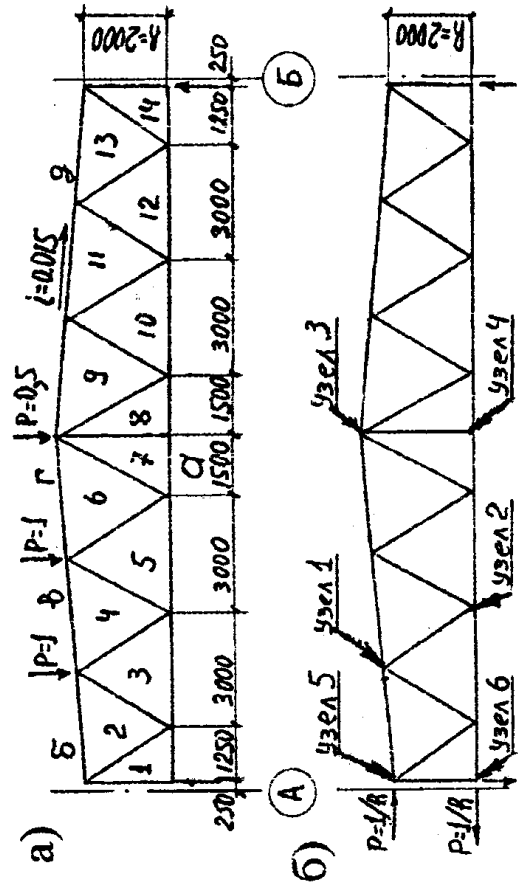


Рис. 2.5. Расчетные схемы:
 а) — при расчете на вертикальную нагрузку;
 б) — при расчете на действие опорного момента ($M=1$)

наибольший момент с положительным знаком, создаваемый нагрузками, действующими на поперечную раму здания, за исключением постоянной и снеговой: $M_{max} = 100 \text{ кН} \cdot \text{м}$ (для данного примера этот момент приложен к левой опоре фермы и создается одной временной нагрузкой – ветровой);

соответствующий момент, действующий на другую, в данном случае правую опору фермы: $M_{соот} = -75 \text{ кН} \cdot \text{м}$ (этот момент создается той же нагрузкой, что и M_{max});

наибольший момент с отрицательным знаком, создаваемый нагрузками, действующими на поперечную раму здания, за исключением постоянной и снеговой: $M_{min} = -125 \text{ кН} \cdot \text{м}$ (для данного примера этот момент приложен к левой опоре фермы и создается двумя временными нагрузками – крановой и ветровой);

соответствующий момент, действующий на другую, в данном случае правую опору фермы: $M_{соот} = 50 \text{ кН} \cdot \text{м}$ (этот момент создается теми же нагрузками, что и M_{min}).

Определение расчетных усилий

Расчетные схемы фермы приведены на рис. 2.5. Для определения осевых усилий в стержнях фермы вертикальная нагрузка на верхний пояс приведена к узловой ($P_n = 15 \text{ кН}$, $P_{сн} = 30 \text{ кН}$). Значения осевых усилий в стержнях фермы вычислены в прил. 1 (см. табл. П.1.1). В графе 3 табл. 2.1 представлены расчетные значения осевых усилий, используемые для подбора сечений стержней фермы. Обозначения стержней в тексте, а также в табл. 2.1, 2.2, П.1.1 приняты по символам «полей» (см. рис. 2.5, а), которые эти стержни разделяют.

В связи с тем, что постоянная и снеговая нагрузки являются равномерно распределенными по верхнему поясу фермы, в нем возникают изгибающие моменты, значения которых определены согласно прил. 1 и приведены в графе 4 табл. 2.1. При этом если нормальная расчетная сила для стержня (графа 3 табл. 2.1) определена с коэффициентом сочетаний $n_c = 0,9$, т.е. взята из графы 19 или 20 табл. П.1.1, то изгибающий момент от снеговой нагрузки для этого же стержня также вычисляется с коэффициентом сочетаний $n_c = 0,9$:

наибольший момент для стержней б-2 и д-13

$$M = \frac{(q_n + n_c q_{сн}) l^2}{10} = \frac{(5 + 0,9 \cdot 10) \cdot 2,75^2}{10} = 10,6 \text{ кН};$$

то же, для стержней в-4 и д-11

$$M = \frac{(q_n + n_c q_{сн}) l^2}{12} = \frac{(5 + 0,9 \cdot 10) \cdot 3^2}{12} = 10,5 \text{ кН};$$

то же, для стержней г-6 и д-9

$$M = \frac{(q_n + q_{сн}) l^2}{12} = \frac{(5 + 10) \cdot 3^2}{12} = 11,25 \text{ кН}.$$

Определение расчетных длин

Расчетные длины стержней фермы определены согласно табл. 1.2 при расположении связей по рис. 2.4 и приведены в графах 5 и 6 табл. 2.1. Значения расчетных длин стержней верхнего пояса из плоскости фермы были вычислены с учетом примечания к табл. 1.2. В табл. 1.3 расчетные длины растянутых элементов приведены только в вертикальной плоскости.

Подбор сечений стержней фермы

В качестве материала фермы принята сталь С245. Выбор стали осуществлен по табл. 50* СНиП П-23-81* в зависимости от группы конструкций (ферма отнесена ко II группе) и климатического района строительства. Расчетное сопротивление принятой стали $R_y = 240 \text{ МПа}$ при толщине в интервале 2...20 мм.

Нижний пояс

Стержни а-7 и а-8. Требуемая площадь и радиус инерции сечения равны

$$A = \frac{N\gamma_n}{R_y\gamma_c} = \frac{234 \cdot 0,95}{230 \cdot 10^{-1} \cdot 0,95} = 10,2 \text{ см}^2;$$

$$i = \frac{l_y}{\lambda_{np}} = \frac{150}{400} = 0,375 \text{ см.}$$

На данном этапе расчета коэффициент условий работы (γ_c) принят равным 0,95 согласно п. 2 табл. 1.1. В дальнейшем и, в частности, после конструирования узлов фермы, γ_c следует принимать с учетом п.3 табл. 1.1. Значение предельной гибкости (λ_{np}) принято по табл. 1.3 с учетом того, что здание оборудовано мостовыми кранами среднего режима работы.

По требуемым значениям площади и радиуса инерции, а также с учетом указаний, приведенных на с. 4, 5, принимается труба 102/4 (ГОСТ 8732-78, $A = 12,32 \text{ см}^2$, $i = 3,47 \text{ см}$). Усилия в стержнях а-5 и а-10 меньше усилий в стержнях а-7 и а-8 на незначительную величину, поэтому их сечения с целью унификации также принимаются из трубы 102/4. Сечения стержней а-3 и а-12 подбираются аналогично стержням а-7 и а-8.

Стержни а-1, а-4. Сечение определяется, как для центрально-сжатых элементов, по формуле (1.2).

$$D = 0,12 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{N\Pi}{\sqrt{R_y \cdot \gamma_c}}\right)^3 l_{ef}^2} = 0,12 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{0,098 \cdot 40}{\sqrt{240 \cdot 1}}\right)^3 \cdot 1,25^2} = 0,0765 \text{ м.}$$

Определяется толщина стенки

$$t = \frac{D}{\Pi} = \frac{7,65}{40} = 0,19 \text{ см.}$$

По сортаменту с учетом найденных значений, а также с учетом указаний на с. 4, 5 принимается труба 70/3 ($A = 6,32 \text{ см}^2$, $i = 2,37 \text{ см}$). Здесь диаметр трубы принят меньше найденного по формуле (1.2) в связи с тем, что толщину трубы исходя из указаний на с. 4, 5 приходится принимать больше найденного значения.

Таблица 2.1

Подбор сечений стержней фермы (к примеру 1)

Элементы фермы	Обозначение стержня	Расчетные усилия		Расчетная длина		Характеристики расчетного сечения			Гибкость		$\Phi_{\min}, c \cdot \Phi_y$	γ_c	σ , МПа	Принятое сечение стержня (после расчета узлов)
		N, кН	M, кН·м	l_x	l_y	D/t, мм	$A_1, \text{ см}^2$	i, см	λ_x	λ_y				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Нижний пояс	а-1	-98,0	-	125	125	70/3	6,32	2,37	52,7	52,7	0,853	1	140,5	70/3,5
	а-14	+140,3	-	300	-	60/4	7,04	1,99	150	-	-	1	199,3	70/3,5
	а-3	+214,6	-	300	-	102/4	12,32	3,47	86	-	-	1	176,0	102/4
	а-12	+234,0	-	150	-	102/4	12,32	3,47	43	-	-	1	190,0	102/4
	а-5	-64,6	10,6	275	425	146/4,5	20	5,01	55	97	0,207x0,178	1	182	146/4,5
	а-10	-177,5	10,5	300	600	160/4,5	23,1	5,78	52	104	0,465	1	165	180/8
Верхний пояс	а-7	-219,6	11,25	300	600	160/4,5	23,1	5,78	52	104	0,465	1	204	180/8
	а-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	д-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1-2 13-14	+137,8	-	236	-	70/3,5	7,31	2,36	100	-	-	0,8	188,5	70/3,5
	2-3 12-13	-143,9	-	215	215	70/6,5	12,97	2,26	95	95	0,589	0,8	188	70/6,6
	3-4 11-12	+88,3	-	215	-	70/2,5	5,3	2,39	90	-	-	0,8	208	70/3,5
	4-5 10-11	-84,1	-	218	218	95/2,5	7,26	3,27	66,7	66,7	0,787	0,8	183	95/2,5
	5-6 9-10	+41,9	-	218	-	60/2,5	4,52	2,03	108	-	-	0,8	115	70/3,5
	6-7 8-9	-44,9	-	221	221	70/2,5	5,3	2,39	92,5	92,5	0,636	0,8	164	70/3,5
Стойки	7-8	0	-	181	181	-	-	-	-	-	-	-	-	70/3,5

ПРИМЕЧАНИЕ. Расчетное усилие (N) принимается равным наиболее невыгоднейшему усилию, приведенному в табл. П.1.1 (графы 17, 18, 19, 20).

Проверка принятого сечения:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} = \frac{125}{2,37} = 52 < \lambda_{np} \text{ (см. табл. 1.3); } \varphi = 0,85 \text{ (по табл. 72(1));}$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{98,2 \cdot 10^{-3}}{0,85 \cdot 6,32 \cdot 10^{-4}} = 183 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 240 \cdot \frac{1}{0,95} = 252 \text{ МПа.}$$

Верхний пояс

На верхний пояс действует внеузловая нагрузка, поэтому в нем возникают как осевые усилия, так и изгибающий момент. В связи с этим стержни верхнего пояса рассчитываются как внецентренно сжатые.

Стержни г-б, д-9.

Определяются коэффициент приведения по формуле (1.5), приведенная расчетная длина (l_{xnp}) по формуле (1.6) и диаметр трубы по формуле (1.2):

$$n_1 = \sqrt{1 + \frac{130M}{Nl_x}} = \sqrt{1 + \frac{130 \cdot 1125}{219,6 \cdot 300}} = 1,84 ;$$

$$l_{xnp} = l_x \sqrt{n_1^3} = 300 \sqrt{1,84^3} = 749 \text{ см.}$$

Так как $l_{xnp} > l_y$, то в формулы в качестве l_{ef} подставляется значение l_{xnp} .

$$D_1 = 0,12 \cdot \sqrt[8]{\left(\frac{Nl}{\sqrt{R_y \cdot \gamma_c}}\right)^3} l_{ef}^2 = 0,12 \cdot \sqrt[8]{\left(\frac{0,2196 \cdot 40}{\sqrt{240 \cdot 1}}\right)^3} \cdot 7,49^2 = 0,166 \text{ м.}$$

После этого корректируются значения n и D :

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{0,353D_1} = \frac{749}{0,353 \cdot 16,6} = 128 \rightarrow \varphi = 0,38 ;$$

$$\lambda_x = \frac{l_x}{0,353D_1} = \frac{300}{0,353 \cdot 16,6} = 51 \rightarrow \varphi_x = 0,86 .$$

Значения φ и φ_x определены по табл. 72 [1].

Условная гибкость $\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{R_y / E} = 51 \sqrt{240 / 2,06 \cdot 10^5} = 1,7 .$

Приведенный эксцентриситет

$$m_{ef} = \frac{4M}{ND_1} \eta = \frac{4 \cdot 1125}{219,6 \cdot 16,6} \cdot 1,22 = 1,5 \rightarrow \varphi_e = 0,49 .$$

Значения η и φ_e определены соответственно по табл. 73 и 74 [1].

$$n_2 = \frac{\varphi_x}{\varphi_e} = \frac{0,86}{0,49} = 1,76 ;$$

$$D_2 = 7D_1 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{n_2}{\varphi \sqrt{Rn_1}} \right)^3 \frac{1}{\lambda^2}} = 7 \cdot 0,16 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{1,76}{0,38 \cdot \sqrt{240 \cdot 1,84}} \right)^3 \frac{1}{128^2}} = 0,1685 \text{ см} .$$

Толщина трубы $t = D_2 / \Pi = 16,85 / 40 = 0,42 \text{ см} .$

По сортаменту (прил. 2) принимается труба 168/4,5.

Характеристики принятого сечения: $A = 23,1 \text{ см}^2$; $W = 91,97 \text{ см}^3$; $i = 5,78 \text{ см} .$

Проверка устойчивости стержней г-6 и д-9 в плоскости действия изгибающего момента (в плоскости фермы):

$$\bar{\lambda} = \frac{l_x}{i} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{300}{5,78} \sqrt{\frac{240}{2,06 \cdot 10^5}} = 1,77 ;$$

$$m_{ef} = \frac{M \cdot A \cdot \eta}{NW} = \frac{1125 \cdot 23,1 \cdot 1,24}{219,6 \cdot 91,97} = 1,6 \rightarrow \varphi_e = 0,465 ,$$

где значения η и φ_e скорректированы по фактической гибкости.

Проверка:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e A} = \frac{219,6 \cdot 10^{-3}}{0,465 \cdot 23,1 \cdot 10^{-4}} = 204 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 252 \text{ МПа} .$$

Проверка устойчивости стержня г-6 из плоскости действия изгибающего момента (из плоскости фермы):

$$\lambda_y = \frac{l_y}{i} = \frac{600}{5,78} = 104 < \lambda_{np} \rightarrow \varphi_y = 0,517 ;$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_y A} = \frac{219,6 \cdot 10^{-3}}{0,517 \cdot 23,1 \cdot 10^{-4}} = 184 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 252 \text{ МПа} .$$

Усилия в стержнях в-4 и д-11 несколько меньше усилий в стержнях г-6 и д-9, а расчетные длины одинаковы, поэтому их сечения с целью унификации также принимаются из трубы 168/4,5.

Сечения стержней б-2 и д-13 подбираются по аналогии со стержнями г-6 и д-9 и приведены в табл. 2.1.

Раскосы

Стержни 2-3, 12-13. Наибольший диаметр этих стержней, согласно указаниям, приведенным на с. 4, 5, может быть равен 70 мм, т.е. меньшему диаметру поясной трубы, в данном случае нижнего пояса, к которой примыкают рассматриваемые стержни. Наименьшая толщина стенки трубы, согласно тем же указаниям, равна 2,5 мм, т.е. наибольшее отношение диаметра трубы к толщине стенки равно

$$\Pi = \frac{D}{t} = \frac{70}{2,5} = 28 .$$

Здесь же можно констатировать, что толщина стенки поясной трубы, в данном случае нижнего пояса, будет меньше двух толщин стенки трубы для рассматриваемых стержней, т.е. согласно пункту 4 табл. 1.1 коэффициент условий работы (γ_c) будет равен 0,8. В случае когда такая констатация невозможна, следует принимать γ_c равным 1 с последующей корректировкой. Диаметр трубы в первом приближении определяется по формуле (1.2) с подстановкой в качестве Π полученного выше значения. Если полученное значение параметра Π превысит предельное, указанное в табл. 1.4, то в формулу (1.2) следует подставить табличное значение.

$$D_1 = 0,12 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{N\Pi}{\sqrt{R_y \cdot \gamma_c}} \right)^3 l_{ef}^2} = 0,12 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{0,1439 \cdot 10^{-3} \cdot 28}{\sqrt{240 \cdot 0,8}} \right)^3 \cdot 2,15^2} = 0,095 \text{ м.}$$

Так как диаметр этих стержней не может быть больше 70 мм, то принимается труба 70/6,5 по ГОСТ 8732-78 ($A = 12,97 \text{ см}^2$; $i = 2,26 \text{ см}$). При выборе толщины трубы можно руководствоваться следующим положением: произведение площади на радиус инерции для трубы, вычисленной по формуле (1.2), и трубы принятой должно быть примерно одинаковым.

Проверка принятого сечения:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} = \frac{215}{2,26} = 95 < \lambda_{np} \rightarrow \varphi = 0,589 ;$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{143,9 \cdot 10^{-3}}{0,589 \cdot 12,97} = 188 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 240 \frac{0,8}{0,95} = 202 \text{ МПа.}$$

Сечения остальных сжатых стержней решетки (4-5, 10-11, 6-7, 8-9) подбираются аналогичным образом и приведены в табл. 2.1.

Стержни 1-2, 13-14. Требуемая площадь и радиус инерции сечения

$$A = \frac{N\gamma_n}{R_y\gamma_c} = \frac{137,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95}{1 \cdot 240 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} = 6,76 \text{ см}^2 ;$$

$$i_{np} = \frac{l_{ef}}{\lambda_{np}} = \frac{236}{400} = 0,59 \text{ см.}$$

Стержни 1-2, 13-14 примыкают к трубам 146/4,5 (верхний пояс) и 70/4 (нижний пояс). Согласно указаниям, приведенным на с. 4, 5, диаметр трубы для рассматриваемых стержней в этом случае должен быть в пределах 48...70 мм при толщине стенки трубы не менее 2,5 мм. С учетом этих требований, а также п. 2 и 4 табл. 1.1, согласно которым коэффициент условий работы принят равным $0,95 \cdot 0,8 = 0,76$, по сортаменту принимается труба 70/3,5 по ГОСТ 8732-78 ($A = 7,31 \text{ см}^2$; $i = 2,36 \text{ см}$).

Расчет узлов фермы (нумерацию узлов см. рис. 2.5, б)

УЗЕЛ 1. Геометрические параметры узла, усилия в стержнях, нумерация элементов приведены на рис. 2.6, а.

а). Расчет на местный изгиб

1). Проверка поясной трубы на местный изгиб в месте контакта с элементом 1 ($j = 1$).

Определение значений параметров, входящих в проверочные формулы (1.11) и (1.12):

$\gamma_{D1} = 1$; т.к. изгибающий момент отсутствует, то $\mu_1 = 1$; $\mu_2 = \mu_3 = 1$;

$$\beta_1 = 7/16,8 = 0,417; \beta_2 = \beta_3 = 0,417; \psi_1 = 1,05 \cdot 0,417 = 0,434;$$

$$\psi_2 = \psi_3 = 0,434; \varepsilon_{11} = 1; \delta = 16,8/0,45 = 37,3;$$

$$c_{31} = 36 \text{ мм (см. рис. 2.6, а); } \zeta_{31} = 1 - 0,4(1 - 3,6/16,8)^4 = 0,69;$$

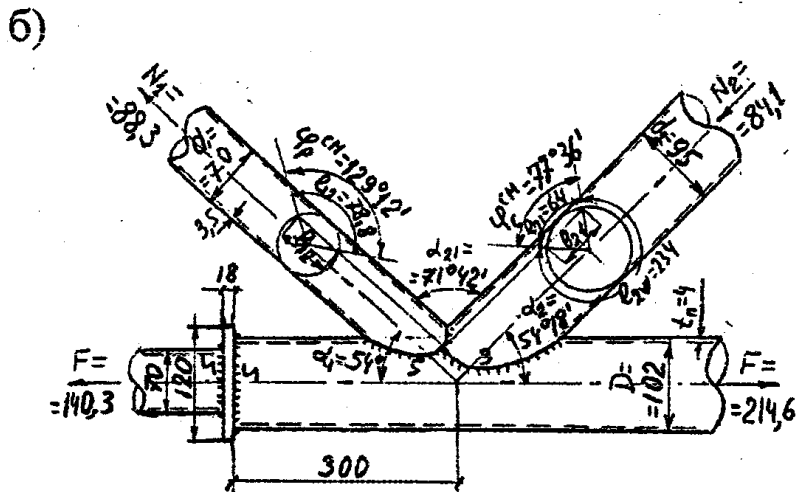
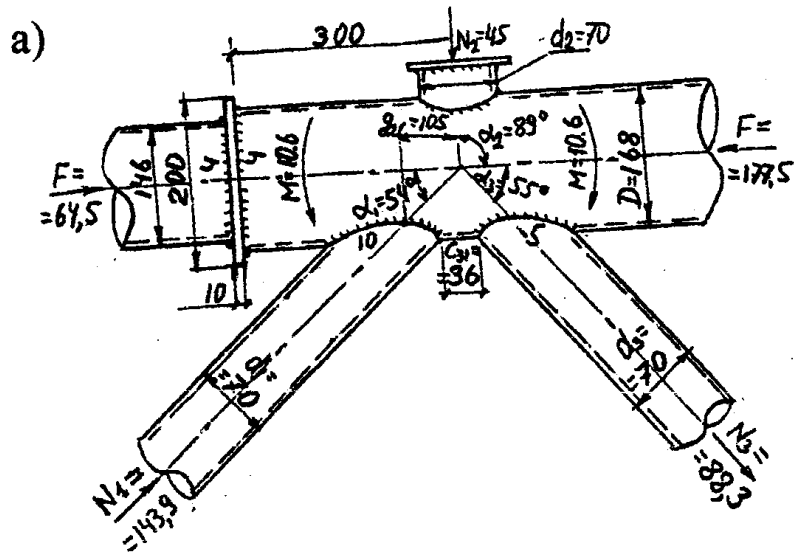


Рис. 2.6. Узлы фермы (к примеру 1):

а) – узел 1; б) – узел 2

$$\epsilon_{31} = 1 - 1,3 \cdot 0,69 \cdot (1 + 0,02 \cdot 37,3) / (1 + 0,04 \cdot 37,3) = 0,374;$$

$$\epsilon_{21} = \cos^2(3,14 \cdot 10,5/2 \cdot 16,8) [3 \cdot 0,434(1 + 0,02 \cdot 37,3) / (1 + 5,4 \cdot 0,417 + 5,6 \cdot 0,417^8) - 1] = -0,093;$$

$$\gamma_{D1} = 1 - 0,5(64,6/23,1 - 24)^2 = 0,99;$$

$$S = 13(1 + 0,02 \cdot 37,3) \cdot 0,45^2 \cdot 24 \cdot 1 = 110,3 \text{ кН.}$$

Проверка прочности по формуле (1.11):

$$\begin{aligned} & |\epsilon_{11} \cdot \mu_1 \cdot N_1 \cdot \sin \alpha_1 / \psi_1 + \epsilon_{21} \cdot \mu_2 \cdot N_2 \cdot \sin \alpha_2 / \psi_2 + \epsilon_{31} \cdot \mu_3 \cdot N_3 \cdot \sin \alpha_3 / \psi_3| = \\ & = |1 \cdot 1 \cdot (-143,9) \cdot 0,809/0,434 + (-0,093) \cdot 1 \cdot (-45) \cdot 0,9998/0,434 + \\ & + 0,374 \cdot 1 \cdot 88,3 \cdot 0,82/0,434| = 196,35 \text{ кН} > \gamma_{D1} \cdot S = \\ & = 0,99 \cdot 110,3 = 109,2 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Прочность не обеспечена. Для увеличения несущей способности узла можно использовать, как было сказано выше, три варианта:

- 1) поставить накладку;
- 2) увеличить диаметр рассматриваемого элемента;
- 3) увеличить толщину поясной трубы.

Второй вариант в данном примере может быть применен только при одновременном увеличении диаметра нижнего пояса. В данном примере второй и третий варианты, как менее экономичные, не рассматриваются.

Толщина накладки определяется из уравнения (1.18):

$$t_n + 0,25 \cdot 4,5 \geq 4,5 \sqrt{196,35 / 109,2} \rightarrow t_n = 5 \text{ мм.}$$

Приведенная толщина: $t_{ef} = t_{max} + 0,25 t_{min} = 5 + 0,25 \cdot 4,5 = 6,125 \text{ мм.}$

Тогда характеристика несущей способности пояса будет равна

$$\begin{aligned} \gamma_{D1} S &= 0,99 \cdot 13 \cdot (1 + 0,028) \cdot t_{ef}^2 \cdot R_y \cdot \gamma_c = 0,99 \cdot 13 \times \\ & \times (1 + 0,02 \cdot 37,3) \cdot 0,6125^2 \cdot 24 \cdot 1 = 0,99 \cdot 204,4 = \\ & = 202,3 \text{ кН} > 196,35 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Прочность обеспечена.
Проверка по формуле (1.12):

$$143,9 \cdot 0,809/0,434 = 268,2 < 2 \cdot 204,4 = 408,8 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

2). Проверка поясной трубы на местный изгиб в месте контакта с элементом 2 ($j = 2$).

$$\mu_i; \beta_i; \psi; \delta - \text{см. проверку при } j = 1. \varepsilon_{22} = 1; \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = -0,093; \\ \varepsilon_{32} = \varepsilon_{12}; \gamma_{D2} = 1 - 0,5(177,5/23,1 \cdot 2,4)^2 = 0,949.$$

Проверка прочности по формуле (1.11):

$$|-0,093 \cdot 1 \cdot (-143,9) \cdot 0,809/0,434 + 1 \cdot 1 \cdot (-45) \cdot 0,9998/0,434 + \\ + (-0,093) \cdot 1 \cdot 88,3 \cdot 0,82/0,434| = 92,1 \text{ кН} < 0,949 \cdot 110,3 = 104,7 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

Проверка прочности по формуле (1.12):

$$94,1 \cdot 0,9998/0,434 = 101,6 < 2 \cdot 110,3 = 220,6 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

3). Проверка поясной трубы на местный изгиб в месте контакта с элементом 3 ($j = 3$).

$$\beta_i; \psi; \delta - \text{см. выше. } \mu_1 = \mu_2 = 1; \gamma_{D3} = 0,8; \mu_3 = 0,8; \varepsilon_{33} = 1; \\ \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} = 0,69; \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = 0,126; \gamma_{D3} = \gamma_{D2} = 0,978.$$

Проверка по формуле (1.11):

$$|0,69 \cdot 1 \cdot (-143,9) \cdot 0,809/0,434 + (-0,126) \cdot 1 \cdot (-45) \cdot 0,9998/0,434 + \\ + 1 \cdot 0,8 \cdot 88,3 \cdot 0,82/0,434| = 38,8 \text{ кН} < 0,978 \cdot 204,4 = 200 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

Проверка по формуле (1.12):

$$88,3 \cdot 0,82/0,434 = 166,8 < 2 \cdot 204,4 = 408,8 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

б). Расчет на прочность элементов решетки в местах их примыкания к поясу фермы

1). Проверка прочности элемента 1 ($j = 1$).

Проверка производится по формуле (1.20), где при $\zeta_{31} = 0,69$ коэффициент $\chi = 0,008$:

$$143,9 \cdot (1 + 0,008 \cdot 37,3)/12,97 = 14,4 < 1 \cdot 1 \cdot 24 = 24 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обеспечена.

2). Проверка прочности элемента 2 ($j = 2$).

При $c_{ij} > D$ (смежные элементы отсутствуют) параметр $\zeta = 1$, и тогда $\chi = 0,015$:

$$45 \cdot (1 + 0,015 \cdot 37,3)/7,31 = 9,4 < 1 \cdot 1 \cdot 24 = 24 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обеспечена.

3). Проверка прочности элемента 3 ($j = 3$).

$\chi = 0,008$ (см. проверку элемента 1):

$$88,3 \cdot (1 + 0,008 \cdot 37,3)/7,31 = 15,68 < 0,8 \cdot 1 \cdot 24 = 19,2 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обеспечена.

в). Расчет сварных швов

Катет сварных швов принимается одинаковым для всех элементов в рассматриваемом узле: $K_f = 4$ мм. Сварка полуавтоматическая сварочной проволокой св.08Г2С в углекислом газе, диаметр проволоки 2 мм, тогда $\beta_f = 0,9$ (см. табл. 34 [1], $R_{wf} = 21,5 \text{ кН/см}^2$ (см. табл. 56 [1])).

Расчетная длина сварного шва для элемента 1:

$$l_w = \frac{2 \cdot 7}{0,809} + 1,3 \cdot 7 \cdot 0,809 = 24,66 \text{ см.}$$

Проверка прочности сварного шва для элемента 1:

$$143,9 < \frac{0/85 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 24,66 \cdot 21,5 \cdot 1}{1} = 162,24 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

Расчетная длина сварного шва для элемента 2:

$$l_w = 2 \cdot 7/0,9998 + 1,3 \cdot 7 \cdot 0,9998 = 23,1 \text{ см.}$$

Проверка прочности этого шва:

$$45 < 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 23,1 \cdot 21,5 \cdot 1/1 = 152 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

Расчетная длина сварного шва для элемента 3:

$$l_w = 2 \cdot 7/0,82 + 1,3 \cdot 7 \cdot 0,82 = 24,5 \text{ см.}$$

Проверка прочности этого шва:

$$88,3 < 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 24,5 \cdot 21,5 \cdot 1/1 = 161,2 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

УЗЕЛ 2. Геометрические параметры узла приведены на рис. 2.6, б.

Особенностью данного узла является то, что стержни решетки пересекаются между собой, при этом пропускаемым является стержень 2 (труба большего диаметра).

а). Расчет на местный изгиб

1). Проверка поясной трубы на местный изгиб в месте контакта с элементом 1 ($j = 1$).

Определение значений параметров, входящих в проверочные формулы (1.11), (1.12). Так как рассматриваемый элемент пересекается с другим элементом решетки, то в проверочную формулу подставляется приведенное усилие (см. формулу (1.16)):

$$P_{ef} = 88,3 \cdot 0,809 - 0,21 \cdot 84,1 \cdot 0,8121 = 57,1 \text{ кН,}$$

где $\xi_{21} = l_{21}/\pi d_2 = 64/3,14 \cdot 95 = 0,21$.

Для смежных элементов в проверочную формулу подставляется скорректированное значение усилия:

$$P_2 = (1 - 0,21) \cdot 84,1 \cdot 0,8121 = 54 \text{ кН.}$$

Значения других параметров:

$$\begin{aligned} \mu_2 &= 1; \text{ при } M = 0 \quad \mu_1 = 0,8; \quad \beta_1 = 7/10,2 = 0,686; \\ \beta_2 &= 9,5/10,2 = 0,93; \quad \psi_1 = 1,05 \cdot 0,686 = 0,72; \\ \psi_2 &= 1,05 \cdot 0,93 \cdot (1 + 0,15 \cdot 0,93) = 1,1; \quad \varepsilon_{11} = 1; \quad \delta = 10,2/0,4 = 25,5; \\ \zeta_{21} &= 0,6 \text{ (т.к. } c_{21} < 0); \quad \varepsilon_{21} = 1 - 1,3 \cdot 0,6 \cdot (1 + 0,02 \cdot 25,5) / (1 + \\ &\quad + 0,04 \cdot 25,5) = -0,18; \end{aligned}$$

при растяжении в поясе $\gamma_{D1} = 1$; $S = 13(1 + 0,02 \cdot 25,5) \cdot 0,4^2 \cdot 24 \cdot 1 = 75,38 \text{ кН.}$

Проверка прочности по формуле (1.11):

$$|1 \cdot 0,8 \cdot 57,1/0,72 + (-0,18) \cdot 1 \cdot 54/1,1| = 54,6 \text{ кН} < 1 \cdot 75,38 = 75,38 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

Проверка прочности по формуле (1.12):

$$52,7/0,72 = 73,2 < 2 \cdot 75,38 = 150,76 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

2). Проверка поясной трубы на местный изгиб в месте контакта с элементом 2 ($j = 2$). Определение параметров, входящих в проверочные формулы:

$$\xi_{12} = l_{12} / \pi d_1 = 78,8 / 3,14 \cdot 70 = 0,36;$$

длина пересечения l_{12} определена по рис. 2.6, б.

$$P_{e2} = -84,1 \cdot 0,8121 + 0,36 \cdot 88,3 \cdot 0,809 = -42,6 \text{ кН};$$

скорректированное значение усилия в смежном элементе: $P_1 = (1 - 0,36) \cdot 88,3 \cdot 0,809 = 45,7 \text{ кН}$; $\mu_1 = 1$; при $M = 0$ $\mu_2 = 1$; $\beta_1, \beta_2, \psi_1, \psi_2, \delta$ – см. предыдущий расчет; $\varepsilon_{22} = 1$; $\xi_{12} = \xi_{21}$; $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = -0,18$; при растяжении в поясе $\gamma_{D2} = 1$.

Проверка прочности по формуле (1.11):

$$|(-0,18) \cdot 1 \cdot 45,7 / 0,72 + 1 \cdot 1 \cdot (-42,6) / 1,1| = 50,2 \text{ кН} < 1 \cdot 75,38 = 75,38 \text{ кН}.$$

Прочность обеспечена.

Проверка прочности по формуле (1.12):

$$42,6 / 1,1 = 38,73 < 2 \cdot 75,38 = 150,76 \text{ кН}.$$

Прочность обеспечена.

Проверка совокупной прочности пересекающихся элементов.

Проверка прочности по формуле (1.17).

1). Рассматриваемым элементом является стержень 1 ($j = 1$).

Определение значений параметров, касающихся рассматриваемого элемента и смежного стержня ($i = 2$): $\xi_{12} = l_{12} / \pi d_1 = 7,88 / 3,14 \cdot 7 = 0,36$ (для данной проверки l_{12} определена в предыдущей проверке); $\gamma_2 = 1 - 0,5 \cdot (N_2 / A_{a2} \cdot R_y)^2 = 1 - 0,5 \cdot (84,1 / 7,26 \cdot 24)^2 = 0,88$;

$$D_i = d_2 = 9,5 \text{ см}; b_{21} = d_2 \cdot \sin(77^\circ 36' / 2) = 9,5 \cdot 0,6266 = 6,0 \text{ см};$$

$$\delta_2 = 9,5 / 0,25 = 3,8; \beta_{21} = \frac{6}{9,5} = 0,63; \psi_{21} = 1,05 \cdot 0,63 = 0,66.$$

$$S_2 = 13 \cdot (1 + 0,02 \cdot 38) \cdot 0,25^2 \cdot 24 \cdot 1 = 21 \text{ кН}; \sin \alpha_{21} = 0,9494.$$

Определение параметров, касающихся рассматриваемого элемента и пояса (для величин, относящихся к поясу, индекс (i) заменяется на (n)): $\xi_{1n} = l_{1n} / \pi d_1 = 14,1 / 3,14 \cdot 7 = 0,64$ (для данной проверки $l_{1n} = \pi \cdot d_1 - l_{12}$); т.к. пояс растянут, то $\gamma_n = 1$; $D_i = D = 10,2 \text{ см}$; $b_{n1} = d_1 = 7 \text{ см}$; $\beta_{n1} = 7 / 10,2 = 0,686$; $\psi_{n1} = 1,05 \cdot 0,686 = 0,72$; $S_n = S = 75,38 \text{ кН}$ (см. предыдущий расчет); $\alpha_{n1} = \alpha_1 = 54^\circ$; $\sin \alpha_1 = 0,809$.

Проверка совокупной прочности:

$$88,3 > 1,5 \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{0,36 \cdot 0,88 \cdot 0,66 \cdot 21}{0,9494} + \frac{0,64 \cdot 1 \cdot 0,72 \cdot 75,38}{0,809} \right) = 57 \text{ кН}.$$

Совокупная прочность для элемента решетки 1 не обеспечена. Для повышения совокупной прочности могут быть использованы три варианта, перечисленные выше. Однако наиболее экономичным для данного примера является применение накладки. Толщина накладки определяется из уравнения (1.18): $t_n = 5,07 \text{ мм}$.

Найденное значение округляется до значений, имеющих в сортаменте: $t_n = 6 \text{ мм}$. Расчетное сопротивление металла накладки – $R_y = 24 \text{ кН/см}^2$. Применение накладки изменяет только характеристику несущей способности пояса:

$$S_n = 13 \cdot (1 + 0,02 \cdot \delta) \cdot t_n^2 \cdot R_y \cdot \gamma_c = 13 \cdot (1 + 0,02 \cdot 25,5) \cdot 0,6^2 \cdot 24 \cdot 1 = 169,6 \text{ кН}.$$

Вторичная проверка совокупной прочности:

$$88,3 > 1,5 \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{0,36 \cdot 0,88 \cdot 0,66 \cdot 21}{0,9494} + \frac{0,64 \cdot 1 \cdot 0,72 \cdot 169,6}{0,809} \right) = 121,5 \text{ кН}.$$

Совокупная прочность обеспечена.

2). Рассматриваемым элементом является стержень 2 ($j = 2$).

Определение параметров, касающихся рассматриваемого элемента и смежного стержня ($i = 1$): $\xi_{21} = l_{21} / \pi d_2 = 6,4 / 3,14 \cdot 9,5 = 0,21$ (для данной проверки параметр l_{21} определяем по рис. 2.6, б); т.к. смежный стержень растянут, то $\gamma_n = 1$; $D_i = d_1 = 7,0 \text{ см}$; $b_{12} =$

$$= d_1 \cdot \sin(129^\circ/2) = 7 \cdot 0,926 = 6,3 \text{ см}; \beta_{12} = 6,3/7 = 0,9; \psi_{12} =$$

$$= 1,05 \cdot 0,9 \cdot (1 + 0,15 \cdot 0,9) = 1,07; \delta_1 = 7/0,35 = 20; S_1 = 13 \cdot (1 +$$

$$+ 0,02 \cdot 20) \cdot 0,35^2 \cdot 24 \cdot 1 = 53,5 \text{ кН}; \sin\alpha_{12} = \sin\alpha_{21} = 0,9494.$$

Определение значений параметров, касающихся рассматриваемого элемента и пояса: $\xi_{2n} = l_{2n}/\pi d_2 = 23,43/3,14 \cdot 9,5 = 0,785$ (для данной проверки $l_{2n} = \pi \cdot d_2 - l_{21}$); $\gamma_n = 1$; $b_{n2} = d_2 = 9,5 \text{ см}$; $\beta_{n2} =$

$$= 9,5/10,2 = 0,93; \psi_{n2} = 1,05 \cdot 0,93 \cdot (1 + 0,15 \cdot 0,93) = 1,1; S_n =$$

$$= 13 \cdot (1 + 0,02 \cdot \delta) \cdot t_{ef}^2 \cdot R_4 \cdot \gamma_c = 13 \cdot (1 + 0,02 \cdot 25,5) \cdot 0,7^2 \cdot 24 \cdot 1 =$$

$$= 230,8 \text{ кН},$$

где $t_{ef} = t_{max} + 0,25 \cdot t_{min} = 6 + 0,25 \cdot 4 = 7 \text{ мм}$;

$$\alpha_{n2} = \alpha_2 = 55^\circ 18'; \sin\alpha_{n2} = 0,8121.$$

Проверка совокупной прочности:

$$84,1 < 1,5 \cdot 1 \cdot (0,21 \cdot 1 \cdot 1,07 \cdot 53,5/0,9444 +$$

$$+ 0,785 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 230,8/0,8121) = 387 \text{ кН}.$$

Совокупная прочность обеспечена.

б). Расчет на прочность элементов решетки в местах их примыкания к поясу фермы

При $\zeta_{21} \leq 0,85$ коэффициент $\chi = 0,008$.

1). Проверка прочности элемента 1 ($j = 1$):

$$88,3 \cdot (1 + 0,008 \cdot 25,5)/7,31 = 14,54 < 0,8 \cdot 1 \cdot 24 = 19,2 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обеспечена.

2). Проверка прочности элемента 2 ($j = 2$):

$$84,1 \cdot (1 + 0,008 \cdot 25,5)/7,26 = 14,1 < 1 \cdot 1 \cdot 24 = 24 \text{ кг/см}^2.$$

Прочность обеспечена.

в). Расчет сварных швов

Вид сварки и сварного материала принимаются такими же, как и для узла 1. Расчетная длина сварных швов может быть определена без учета пересечений стержней. Проверка прочности сварного соединения стержня 1 была выполнена при расчете узла 1 (см. выше).

Расчетная длина сварного шва для элемента 2:

$$l_w = 2 \cdot 9,5/0,8121 + 1,3 \cdot 9,5 \cdot 0,8121 = 33,4 \text{ см}.$$

Проверка прочности сварного шва:

$$84,1 < 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 33,4 \cdot 21,5 \cdot 1/1 = 219,7 \text{ кН}.$$

Прочность обеспечена.

Расчет стыков поясных стержней

Заводской стык труб верхнего пояса (см. рис. 2.6, а).

Конструктивное решение узла принимается по рис. 1.4, г (1-й вариант). Толщина углового сварного шва принимается равной меньшей толщине стенки соединяемых труб, т.е. 4 мм.

При сварке полуавтоматом и при $K_f = 4 \text{ мм}$ согласно табл. 34 [1] сварочные коэффициенты равны $\beta_f = 0,9$; $\beta_z = 1,05$. При сварочной проволоке св. 08Г2С расчетное сопротивление по металлу шва равно $R_{wf} = 215 \text{ МПа}$ (см. табл. 56 [1]), то же, по границе сплавления $R_{wz} = 165 \text{ МПа}$ (см. табл. 3 [1]).

Проверка прочности сварного соединения по металлу границы сплавления производится по формуле (1.23):

$$\sigma = \frac{N}{n\beta_z K_f l_w} + \frac{M}{nW_z} = \frac{64,6 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 1,05 \cdot 0,4 \cdot 45,85 \cdot 10^{-4}} + \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{70,3 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 140 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 16,5 \cdot 1 \cdot \frac{1}{0,95} = 172 \text{ МПа},$$

где изгибающий момент принят равным

$$M = (q_n + q_{сн})l_m^2 / 18 = (5 + 10) \cdot 3^2 / 18 = 7,5 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$l_w = \pi D = 3,14 \cdot 14,6 = 45,85 \text{ см};$$

$$W_z = 0,785 D^2 \beta_z K_f = 0,785 \cdot 14,6^2 \cdot 1,05 \cdot 0,4 = 70,3 \text{ см}^3;$$

D – диаметр меньшей трубы;

n – количество сварных швов;

$$\gamma_{wz} = \gamma_{wf} = 1 \text{ (см. п. 11.2*[1])}.$$

В связи с тем, что стык труб осуществляется вблизи узла, в проверочную формулу в качестве M подставляется узловый момент.

Проверка прочности по металлу сварного шва не производится, так как для данного примера $\beta_f R_{wf} \gamma_{wf} > \beta_z R_{wz} \gamma_{wz}$.

Соединительный фланец принимается из стали С345, а его толщина определяется по формуле (1.25):

$$t = \sqrt{\frac{3N}{R_y} \cdot \frac{D-d}{\pi d}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 64,6}{31,5} \cdot \frac{16,8-14,6}{3,14 \cdot 14,6}} = 0,54 \text{ см}.$$

Принимается толщина фланца 2 см.

Заводской стык труб нижнего пояса (см. рис. 2.6, б). Конструктивное решение стыка аналогично решению стыка труб верхнего пояса. Проверка прочности по металлу сварного шва при $K_f = 4$ мм:

$$\sigma = \frac{N}{\beta_z K_f \pi d} = \frac{140,3 \cdot 10^{-3}}{1,05 \cdot 0,43 \cdot 3,14 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} = 152 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа}.$$

Толщина соединительного фланца

$$t = \sqrt{\frac{3N}{R_y} \cdot \frac{D-d}{\pi d}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 140,3}{23,0} \cdot \frac{10,2-7}{3,14 \cdot 7}} = 1,71 \text{ см}.$$

Принимается толщина фланца 2 см.

Проверка прочности фланца в направлении толщины проката производится по формуле (1.26):

$$\sigma = \frac{N}{\pi D \beta_f K_f} = \frac{140,3 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 7 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4}} = 177,3 < R_{th} = 230 \text{ МПа},$$

где R_{th} – расчетное сопротивление в направлении толщины проката ($R_{th} = 0,5 \cdot R_u = 0,5 \cdot 460 = 230$ МПа).

Монтажный стык труб нижнего пояса (см. рис. 2.8). Конструктивное решение узла принимается по рис. 1.5, д. Стык осуществляется на высокопрочных болтах точности В диаметром 16 мм из стали 40Х «Селект» (см. табл. 61 [1]).

Требуемое количество болтов определяется по формуле (1.27):

$$n \geq \frac{N}{0,7 R_{сун} A_{сн}} = \frac{234}{0,7 \cdot 110 \cdot 1,57} = 1,94.$$

Принимается 4 болта (n должно быть не меньше 4).

Наименьший диаметр окружности, на которой можно расположить 4 болта при $a_4 = 2d_b$, будет равен $D_3 = D + 4d_b = 102 + 4 \cdot 16 = 166$ мм.

Тогда расстояние между болтами будет $a_1 = \frac{\pi D_3}{4} = \frac{3,14 \cdot 166}{4} = 132$ мм.

Согласно требованиям, приведенным в [1] (см. табл. 39): $2,5d_{омс} \leq a_1 \leq 8d_{омс}$. При $d_{омс} = 19$ мм это требование удовлетворяется ($d_{омс}$ – диаметр отверстия под болты).

Так как $a_4 = 32 \text{ мм} < \pi D / 2n = 3,14 \cdot 102 / 2 \cdot 4 = 40 \text{ мм}$, то толщина соединительного фланца определяется по формуле (1.28):

$$t = \sqrt{\frac{3N}{nR_y}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 234}{4 \cdot 30}} = 2,4 \text{ см},$$

где R_y – расчетное сопротивление стали С345.

Принимается $t = 25$ мм.

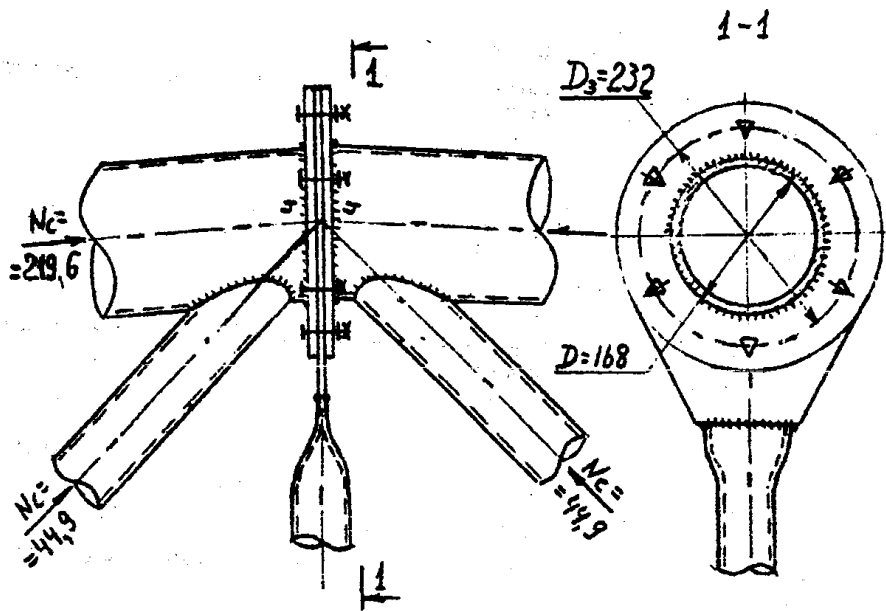


Рис. 2.7. Узел 3 (к примеру 1)

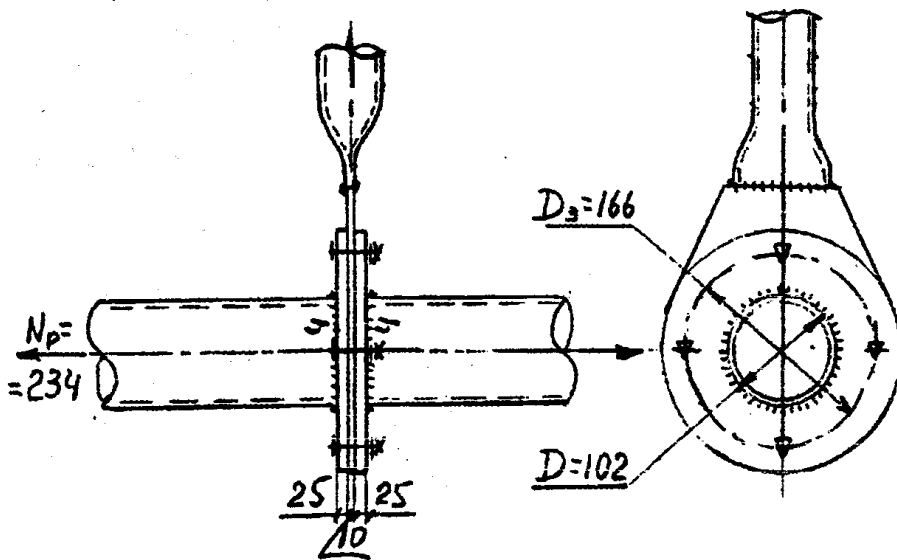


Рис. 2.8. Узел 4 (к примеру 1)

Сварные швы, прикрепляющие фланцы к трубам, принимаются с катетом, равным толщине трубы. Проверка прочности сварного шва (каждый фланец прикрепляется двумя кольцевыми швами) (см. рис. 1.5, д, I вар.) производится по формуле (1.23):

$$\sigma = \frac{N}{2\beta_z K_f \pi d} = \frac{234 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,05 \cdot 0,4 \cdot 3,14 \cdot 10,2 \cdot 10^{-4}} = 88 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Монтажный стык труб верхнего пояса (см. рис. 2.7). Конструктивное решение этого узла принимается по аналогии с узлом 4. В этом узле кроме сжимающей силы действует еще узловый изгибающий момент. Поэтому вначале следует проверить возможность появления в узле растягивающих напряжений:

$$\sigma = -\frac{N}{A} + \frac{M}{W} = -\frac{219,6}{23,1} + \frac{750}{91,97} = -1,32 \text{ кН/см}^2,$$

где A , W – площадь и момент сопротивления трубы.

Знак «минус» говорит о том, что стыковой узел работает только на сжатие и, следовательно, болты не включаются в работу и выполняют лишь конструктивные функции. Поэтому количество и диаметр болтов назначаются конструктивно ($d_b = 16 \text{ мм}$, $n = 6$).

Проверка прочности сварных швов производится по формуле (1.23) по границе сплавления:

$$\sigma = \frac{N}{n\beta_z K_f \pi D} + \frac{M}{nW} = \frac{219,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,05 \cdot 0,4 \cdot 3,14 \cdot 16,8 \cdot 10^{-4}} + \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 93 \cdot 10^{-6}} = 90 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа}.$$

Прочность сварного соединения обеспечена.

Нижний опорный узел.

Конструктивное решение узла приведено на рис. 2.10, при этом опорный фланец крепится к трубе двумя кольцевыми швами (см. рис. 1.5, д, I вар.). Наибольшее сжимающее и растягивающее усилия соответственно равны $N_c = 98,0$ кН; $N_p = 35,0$ кН (см. усилия для стержня а-1 в табл. П.1.1). Указанные усилия могут быть получены делением наибольшего опорного момента со знаком «+» и «-» на высоту фермы на опоре.

Толщина сварного углового шва принимается равной толщине стенки трубы – 4 мм. Тогда напряжение в шве будет

$$\sigma = \frac{N}{\beta_z K_f \pi D} = \frac{98,0 \cdot 10^{-3}}{1,05 \cdot 0,4 \cdot 3,14 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} = 124 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Здесь в качестве N принимается наибольшее по абсолютной величине значение N_p или N_c .

Болтовое соединение рассчитывается на растягивающее усилие. В целях унификации болты принимаются такими же, как и для оформления монтажного стыка (узел 4). Необходимое количество болтов определяется по формуле (1.27):

$$n = \frac{N}{0,7 R_{евп} A_{евп}} = \frac{35}{0,67 \cdot 110 \cdot 1,57} = 0,3.$$

Исходя из конструктивных требований (равномерной передачи усилия с трубы на фланец) количество болтов принимается равным четырем.

Наименьший диаметр окружности, на которой можно расположить болты при $a_4 = 2d_6$:

$$D_3 = D + 4d_6 = 70 + 4 \cdot 16 = 134 \text{ мм}.$$

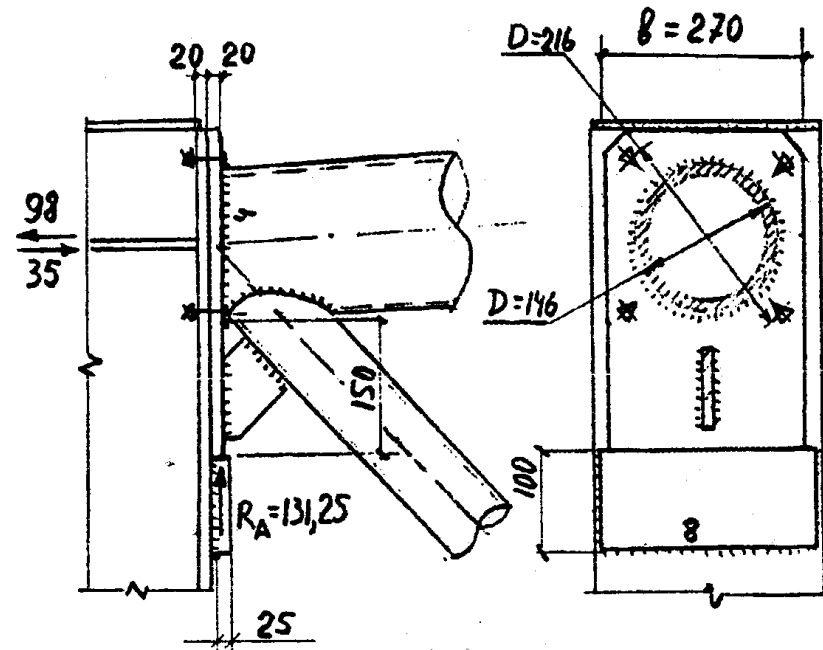


Рис. 2.9. Верхняя часть опорного узла (узел 5)

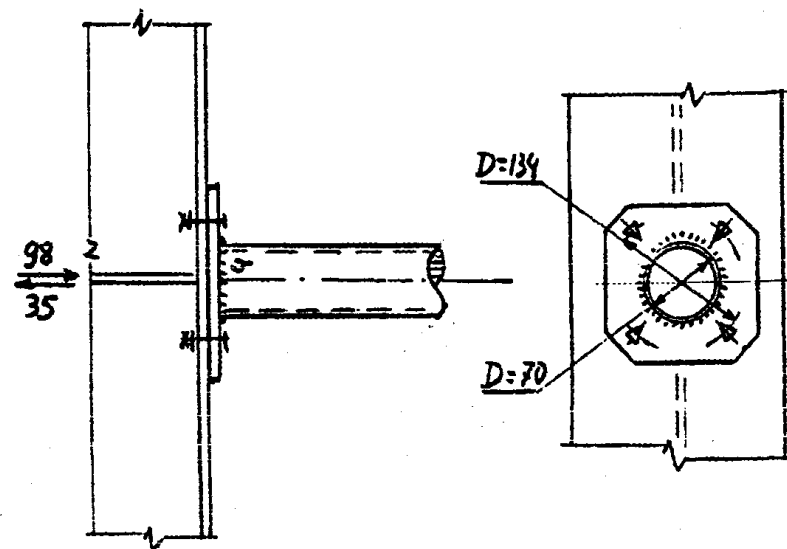


Рис. 2.10. Нижняя часть опорного узла (узел 6)

Так как $a_4 = 32 \text{ мм} > \pi D/2n = 3,14 \cdot 70/2 \cdot 4 = 27,5 \text{ мм}$, то толщина соединительного фланца определяется по формуле (1.29):

$$t > \sqrt{\frac{6Na_4}{nD_3R_y}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 35 \cdot 3,2}{3,14 \cdot 14,2 \cdot 30}} = 0,7 \text{ см.}$$

Принимается наименьшая из рекомендуемых толщин для фланцев $t = 2 \text{ см}$.

Верхний опорный узел (рис. 2.9).

Крепление фланца к трубе, сварные швы и болты принимаются такими же, что и для нижнего опорного узла. Горизонтальные усилия на верхний опорный узел (узел 5) равны усилиям на нижний опорный узел (узел 6), но противоположны по знаку. На узел 5, кроме того, действует вертикальная опорная реакция

$$R_A = (q_n + q_{сн}) \frac{l_\phi}{2} = (5 + 10) \frac{17,5}{2} = 131,25 \text{ кН.}$$

Проверка прочности сварных швов, прикрепляющих фланец к трубе:

$$\sigma = \frac{\sqrt{N^2 + R_A^2}}{\beta_z K_f \pi D} = \frac{\sqrt{98,0^2 + 131,25^2}}{1,05 \cdot 0,4 \cdot 3,14 \cdot 14,6} = 6,1 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 17,2 \text{ кН/см}^2.$$

Требуемое количество болтов

$$n = \frac{98,0}{0,9 \cdot 77 \cdot 1,57} = 0,9$$

Количество болтов принимается равным четырем.

Наименьший диаметр окружности, на которой можно расположить болты:

$$D_3 = D + 4d = 146 + 4 \cdot 16 = 210 \text{ мм.}$$

Так как $a_4 = 32 \text{ мм} < \pi D/2n = 3,14 \cdot 146/2 \cdot 4 = 57,3 \text{ мм}$, то толщина фланца будет равна (см. формулу (1.28))

$$t \geq \sqrt{\frac{3 \cdot 98,2}{4 \cdot 30}} = 1,57 \text{ см.}$$

Толщина фланца, исходя из его работы на смятие

$$t \geq \frac{R_A}{R_p b_\phi} = \frac{131,2}{33,6 \cdot 27} = 0,14 \text{ см,}$$

где b_ϕ – ширина опорного фланца (назначена исходя из условия размещения болтов): $b_\phi = D_3 + 2 \cdot 1,5d_{oms} = 210 + 2 \cdot 1,5 \cdot 19 \approx 270 \text{ мм}$;

$R_p = 336 \text{ МПа}$ (см. табл. 52* [1]).

Окончательная толщина фланца принимается равной 2,0 см.

Расчетная длина сварного шва, прикрепляющего опорный столик к колонне, при $K_f = 8 \text{ мм}$:

$$l_w = \frac{1,2 R_A \gamma_n}{\beta_z K_f R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c} = \frac{1,2 \cdot 131,25 \cdot 0,95}{1,05 \cdot 0,8 \cdot 165 \cdot 1,1} = 10 \text{ см.}$$

Значение катета шва принято в интервале $K_{fmin} = 8 \text{ мм}$ (см. табл. 38 [1]) и $K_{fmax} = 1,2t_{min} = 1,2 \cdot 20 = 24 \text{ мм}$, где в качестве t_{min} принята толщина полки колонны.

Пример 2

Запроектировать стропильную ферму из гнутосварных прямоугольных труб. Исходные данные, а также определение расчетных усилий приведены в примере 1.

Определение расчетных длин

Расчетные длины элементов фермы определяются по табл. 1.2 при расположении связей согласно рис. 2.4. Т.к. сечения стержней

фермы на этом этапе неизвестны, то расчетные длины верхнего пояса определены без учета примечания 2 к табл. 1.2. В связи с тем, что на ферму действуют статические нагрузки, значения расчетных длин для растянутых стержней определялись только в вертикальной плоскости (в плоскости фермы). Значения расчетных длин приведены в табл. 2.2.

Подбор сечений стержней ферм

В данном примере расчетное сопротивление стали (R_y) принято равным 230 МПа.

Нижний пояс

Стержни а-7, а-8. Требуемая площадь и радиус инерции сечения стержней вычисляются по формулам (1.1):

$$A_{\text{тп}} = \frac{N \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{234 \cdot 0,95}{230 \cdot 0,95} = 10,1 \text{ см}^2, \quad i_{\text{тп}} = \frac{l_x}{\lambda_{\text{тп}}} = \frac{150}{400} = 0,375 \text{ см}.$$

Здесь $\gamma_c = 0,95$ (см. табл. 1.1, п. 2).

По требуемым величинам и с учетом указаний, приведенных на с. 29, принимается прямоугольная труба 140x60x3 мм по сортаменту (прил. 2) Молодечненского завода легких металлоконструкций ($A = 11,3 \text{ см}^2$, $i_x = 2,47 \text{ см}$, $i_y = 4,89 \text{ см}$).

В целях унификации сечения стержней а-5, а-10 принимаются также из трубы 140x60x3 мм.

Стержни а-1, а-14. Сечения подбираются, как для центрально-сжатых элементов.

По формулам (2.3) при $l_x = l_y$ получим

$$\alpha = \sqrt[3]{(l_x / l_y)^4} = 1, \quad m = \frac{2}{3}(\alpha + 1)^2(3\alpha + 1) = 10,7.$$

Предельное отношение b/t : $\Pi = 45$ (см. с. 30).

По формуле (2.4):

$$b = 0,15 \cdot \sqrt[8]{\left(\frac{N \Pi_1}{\sqrt{R_y}}\right)^3 \cdot \frac{l_y^2}{m}} = 0,15 \cdot \sqrt[8]{\left(\frac{0,098 \cdot 45}{\sqrt{230}}\right)^3 \cdot \frac{125^2}{10,7}} = 0,0736 \text{ м}.$$

Другие размеры трубы:

$$h = \alpha b = 7,36 \text{ см}; \quad t = b/\Pi = 7,36/45 = 0,16 \text{ см}.$$

По сортаменту с учетом найденных значений принимается квадратная труба 63x3 мм по ГОСТ 12336-66 ($A = 6,81 \text{ см}^2$; $i = 2,41 \text{ см}$). Здесь принята труба с меньшими габаритными размерами в связи с тем, что исходя из указаний на с. 29 толщина принята больше найденного значения.

Проверка принятого сечения

Проверка местной устойчивости производится по формуле (2.6):

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{\text{ef}}}{i} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{125}{2,41} \sqrt{\frac{230}{2,06 \cdot 10^5}} = 1,72 > 1;$$

$$\frac{h_{\text{ef}}}{t} = \frac{6,3}{0,3} - 6 = 15 < \left| \frac{h_{\text{ef}}}{t} \right| = (1 + 0,2\bar{\lambda}) \sqrt{\frac{E}{R_y}} =$$

$$= (1 + 0,2 \cdot 1,72) \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^5}{230}} = 40,3.$$

Местная устойчивость обеспечена.

Проверка общей устойчивости при $\bar{\lambda} = 1,72 \rightarrow \varphi = 0,848$,

тогда

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{98 \cdot 10^{-3}}{0,848 \cdot 6,81 \cdot 10^{-4}} = 170 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 230 \cdot \frac{1}{0,95} = 242 \text{ МПа}.$$

Общая устойчивость обеспечена.

Стержни а-3 и а-12 рассчитываются как центрально-растянутые (см. выше), их сечение принято из трубы 63x63x3 мм.

Верхний пояс

Стержни г-6 и д-9. Сечения стержней подбираются, как для внецентренно сжатых элементов.

Определяются параметры n_1 , l_{xnp} , α_1 , m_1 по формулам (1.5), (1.6), (2.8) и (2.10):

$$n_1 = \sqrt{1 + \frac{130M}{Nl_x}} = \sqrt{1 + \frac{130 \cdot 1125}{219,6 \cdot 300}} = 1,84 ;$$

$$l_{xnp} = l_x \sqrt{n_1^3} = 300 \cdot \sqrt{1,84^3} = 749 \text{ см} ;$$

$$\alpha_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{l_y}{l_{xnp}}\right)^4} = \sqrt[3]{\left(\frac{600}{749}\right)^4} = 0,74 ;$$

$$m_1 = \frac{2}{3}(\alpha_1 + 1)^2(3\alpha_1 + 1) = \frac{2}{3}(0,74 + 1)^2(3 \cdot 0,74 + 1) = 6,55 .$$

После этого по формуле (2.11) вычисляется размер сечения трубы в плоскости наибольшей расчетной длины (в данном примере это будет размер трубы в плоскости фермы, так как $l_{xnp} > l_y$):

$$S_1 = 0,15 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{N\Pi}{\sqrt{R_y} \cdot \gamma_c}\right)^3 \cdot \frac{l_{xnp}^2}{m_1}} = 0,15 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{0,2136 \cdot 45}{\sqrt{230} \cdot 1}\right)^3 \cdot \frac{7,49^2}{6,55}} = 0,167 \text{ м} .$$

Для корректировки полученного размера вычисляются следующие параметры:

$$\lambda = \frac{l_{xnp}}{S_1} \sqrt{\frac{12(\alpha_1 + 1)}{3\alpha_1 + 1}} = \frac{749}{16,7} \sqrt{\frac{12(0,74 + 1)}{3 \cdot 0,74 + 1}} = 114 \text{ (см. формулу (2.12)).}$$

$$\text{Тогда } \varphi = 0,47 ; \lambda_x = \lambda \frac{l_x}{l_{xnp}} = 114 \cdot \frac{300}{749} = 45,66 \rightarrow \varphi_x = 0,88 ;$$

$$m_{ef} = \frac{M \cdot \eta}{N\rho} = \frac{1125 \cdot 1,25}{219,6 \cdot 5,15} = 1,24 ,$$

где $\rho = 5,15$ (см. формулу (2.17));

η - коэффициент влияния формы, определяемый по табл. 73 [1].

При $m_{ef} = 1,24$ и $\lambda_x = 45,66$ ($\bar{\lambda}_x = 1,5$) $\varphi_e = 0,55$. После этого корректируются значения следующих величин:

$$n_2 = \frac{\varphi_x}{\varphi_e} = \frac{0,88}{0,55} = 1,6 ; \quad l_{xnp} = l_x \sqrt{n_2^3} = 300 \cdot \sqrt{1,6^3} = 607 \text{ см} ;$$

$$\alpha_2 = \sqrt[3]{\left(\frac{l_y}{l_{xnp}}\right)^4} = \sqrt[3]{\left(\frac{600}{607}\right)^4} = 1 ;$$

$$m_2 = \frac{2}{3}(\alpha_2 + 1)^2(3\alpha_2 + 1) = \frac{2}{3}(1 + 1)^2(3 \cdot 1 + 1) = 10,7 .$$

Корректировка размера S производится по формуле (2.19):

$$S_2 = 7S_1 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{\Pi_2}{\varphi\Pi_1\sqrt{R_y}}\right)^3 \cdot \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{m_1}{m_2}} =$$

$$= 7 \cdot 16,7 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{1,6}{0,47 \cdot 1,84 \sqrt{230}}\right)^3 \cdot \frac{1}{114^2} \cdot \frac{6,55}{10,7}} = 15,3 \text{ см.}$$

Расчетные размеры сечения будут равны: $h = S_2 = 15,3 \text{ см.}$
 $b = \alpha_2 S_2 = 1 \cdot 15,3 = 15,3 \text{ см;}$ $t = S_2 / \Pi = 15,3 / 45 = 0,34 \text{ см.}$

По сортаменту, с учетом полученных значений b , h и t , принимается квадратная труба 160x4 мм по ГОСТ 12336-66 ($A = 24,3 \text{ см}^2$, $W = 121 \text{ см}^3$; $i = 6,32 \text{ см}$).

Проверка местной устойчивости. При $I_x \leq I_y$ производится проверка только полки сечения, которая выполняется по формуле (2.6), где $|h_{ef} / t|$ определяется в зависимости от условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_x}{i_x} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{300}{6,32} \sqrt{\frac{230}{2,06 \cdot 10^5}} = 1,58$$

Так как $\bar{\lambda}_x > 1$, то предельное отношение h_{ef} / t будет равно

$$|h_{ef} / t| = (1 + 0,2 \bar{\lambda}_x) \sqrt{\frac{E}{R_y}} = (1 + 0,2 \cdot 1,58) \cdot \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^5}{230}} = 39,39$$

Проверка: $\frac{b}{t} - 6 = \frac{160}{4} - 6 = 34 < \left| \frac{h_{ef}}{t} \right| = 39,39$

Местная устойчивость обеспечена.

Для проверки общей устойчивости в плоскости изгиба (в плоскости фермы) определяются относительный и приведенный эксцентриситеты:

$$m = \frac{MA}{NW} = \frac{1125 \cdot 24,3}{219,6 \cdot 121} = 1$$

Таблица 2.2

Подбор сечений стержней фермы (к примеру 2)

Элемент фермы	Обозначение стержня	Расчетные усилия		Характеристики расчетного сечения				Расчетная длина		Гибкость		φ_{min} , $\varphi_{с-ф,у}$	γ_c	σ , МПа	Принятое сечение стержня (после расчета узлов)
		N, кН	M, кН·м	$h \times b \times \delta$, мм	F, см ²	i_x , см	i_y , см	l_x	l_y	λ_x	λ_y				
Нижний пояс	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	а-1	-98,0		63x63x3	6,81	2,41	2,41	2,41	125	125	51,9	0,848	1	170	60x140x3
	а-3	+140,3		63x63x3	6,81	2,41	2,41	2,41	300	-	-	-	0,95	208,0	60x140x3
	а-5	+214,6		60x140x3	11,3	2,47	4,89	4,89	300	-	-	-	0,95	189,9	60x140x3
	а-10	+234,0		60x140x3	11,3	2,47	4,89	4,89	150	-	-	-	0,95	207,1	60x140x3
	а-7	-64,6	10,6	160x160x4	18,5	6,37	6,37	6,37	275	483	43	76	0,25	140	160x160x6
	а-8	-177,5	10,5	160x160x4	18,5	6,37	6,37	6,37	300	483	47,1	76	0,42	220	160x160x6
Верхний пояс	г-6	-219,6	11,25	160x160x4	18,5	6,37	6,37	6,37	300	600	47,1	94,2	1	241	160x160x6
	д-9														

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1-2 13-14	+137,8			50x100x3	8,25	2,06	3,52	221	-	107	-	-	0,95	177,0	50x100x3
2-3 12-13	-143,9			100x100x3	11,3	3,92	3,92	240	240	61	61	0,813	1	156,6	100x100x3
3-4 11-12	+88,3			50x100x3	8,25	2,06	3,52	234	-	114	-	-	0,95	113,0	50x100x3
4-5 10-11	-84,1			50x100x3	8,25	2,06	3,52	238	238	115	68	0,48	1	210	50x100x3
5-6 9-10	+41,9			50x100x3	8,25	2,06	3,52	238	-	115	-	-	0,95	53,5	50x100x3
6-7 8-9	-44,9			50x100x3	8,25	2,06	3,52	241	241	117	68	0,468	1	116,3	50x100x3
7-8	0			50x100x3	8,25	2,06	3,52	213	213	103	61	-	-	-	50x100x3
Стойки															

Раско-

сы

Стойки

По табл. 73 [1] $\eta = 1,52$ (при $m = 1$, $\bar{\lambda} = 1,58$), тогда $m_{ef} = m\eta = 1 \cdot 1,52 = 1,52$.

По табл. 74 [1] $\varphi_e = 0,492$,

тогда

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e A} = \frac{219,6 \cdot 10^{-3}}{0,492 \cdot 24,3 \cdot 10^{-4}} = 184 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 230 \cdot \frac{1}{0,95} = 242 \text{ МПа}.$$

Устойчивость обеспечена.

Проверка общей устойчивости из плоскости действия изгибающего момента (из плоскости фермы) при $I_x \leq I_y$ выполняется, как для центрально-сжатых стержней:

$$\lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{600}{6,32} = 95 \rightarrow \varphi = 0,618;$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{219,6 \cdot 10^{-3}}{0,618 \cdot 24,3 \cdot 10^{-4}} = 146 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 242 \text{ МПа}.$$

Устойчивость обеспечена.

В целях унификации сечения остальных стержней верхнего пояса принимаются также из квадратной трубы 160x4 мм.

Раскосы

Стержни 2-3, 12-13. Исходя из формулы (2.1) наибольший и наименьший размеры трубы из плоскости фермы могут быть

$$b_{max} \leq b_{n,min} - 2(t_n + t_p) = 63 - 2(3 + 3) = 51 \text{ мм};$$

$$b_{min} = 0,6 \cdot b_{n,max} = 0,6 \cdot 160 = 96 \text{ мм},$$

где предварительно толщина стенки трубы раскоса (t_p) принята наименьшей – 3 мм, а в качестве $b_{n,max}$ и $b_{n,min}$ подставляются соответ-

венно большая и меньшая ширина поясных труб, к которым примыкает рассматриваемый стержень.

В связи с тем, что при ширине нижнего пояса, равной 63 мм, не обеспечивается минимальный размер трубы рассматриваемого стержня ($b_{min} > b_{max}$), следует элементы нижнего пояса а-3, а-12 а-14 принять из трубы 60x140x3 мм, тогда

$$b_{max} = b_{n,min} - 2(t_n + t_p) = 140 - 2(3 + 3) = 128 \text{ мм}.$$

Размеры трубы определяются с помощью параметров, вычисляемых по формулам (2.3): при $l_x = l_y$, $\alpha = 1$, $m = 10,7$. Ширина трубы определится по формуле (2.4):

$$b = 0,15 \cdot 8 \cdot \sqrt{\left(\frac{NII_1}{\sqrt{R_y} \cdot \gamma_c}\right)^3 \cdot \frac{l_y^2}{m}} = 0,15 \cdot 8 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,1439 \cdot 60}{\sqrt{230} \cdot 1}\right)^3 \cdot \frac{2,4^2}{10,7}} = 0,11 \text{ м}.$$

Тогда высота и толщина стенки трубы будут равны

$$h = \alpha \cdot b = 11 \text{ см}; \quad t = \frac{b}{\Pi} = \frac{11}{60} = 0,18 \text{ см}.$$

По найденным параметрам сечения, а также с учетом b_{max} и b_{min} принимается труба 100x3 мм ($A = 11,3 \text{ см}^2$; $t = 3,92 \text{ см}$).

Проверка принятого сечения

Проверка местной устойчивости начинается с определения условной гибкости:

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{ef}}{i} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{240}{3,92} \sqrt{\frac{230}{2,06 \cdot 10^5}} = 2 > 1,$$

тогда предельное отношение

$$\left| \frac{h_{ef}}{t} \right| = (1 + 0,2\bar{\lambda}) \sqrt{\frac{E}{R_y}} = (1 + 0,2 \cdot 2) \cdot \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^5}{230}} = 42.$$

Проверка местной устойчивости:

$$\frac{h_{ef}}{t} = \frac{h}{t} - 6 = \frac{10}{0,3} - 6 = 27 < \left| \frac{h_{ef}}{t} \right| = 42.$$

Местная устойчивость обеспечена.

Проверка общей устойчивости: при $\bar{\lambda} = 2$ $\varphi = 0,813$, тогда

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{143,9 \cdot 10^{-3}}{0,813 \cdot 11,3 \cdot 10^{-4}} = 156,6 < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 242 \text{ МПа}.$$

Общая устойчивость обеспечена.

Сечения остальных сжатых стержней решетки (4-5, 10-11, 6-7, 8-9) подбираются аналогичным образом.

Стержни 1-2, 13-14.

Из условия (2.1) наибольшее и наименьшее значения размера трубы из плоскости фермы равны

$$b_{max} = b_{n,min} - 2(t_n + t_p) = 14 - 2(0,3 + 0,33) = 12,8 \text{ см};$$

$$b_{min} = 0,6 \cdot b_{n,max} = 0,6 \cdot 16 = 9,6 \text{ см}.$$

Требуемые значения площади трубы и радиуса инерции будут равны

$$A_{mp} = \frac{N\gamma_n}{R\gamma_c} = \frac{137,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95}{230 \cdot 10^{-4} \cdot 0,95} = 6 \text{ см}^2;$$

$$i_{хтр} = \frac{l_x}{\lambda_{нр}} = \frac{221}{400} = 0,55 \text{ см.}$$

По найденным параметрам сечения, а также с учетом b_{max} и b_{min} по сортаменту (прил. 2) принимается труба 50x100x3 мм ($A = 8,25 \text{ см}^2$; $i_x = 2,06 \text{ см}$; $i_y = 3,52 \text{ см}$).

Аналогично подбираются сечения остальных растянутых стержней решетки. Сечение стойки 7-8 конструктивно принимается из трубы 50x100x3 мм. Подбор сечений стержней представляется в табличной форме (табл. 2.2).

Расчет узлов фермы

УЗЕЛ 1. Геометрические параметры узла приведены на рис. 2.11.

а) Расчет на продавливание (вырывание) производится для обоих раскосов, так как отношение $b_p/b_n = 10/16 = 0,626 < 0,9$.

Для стержня 2-3 отношение $c/d = 1,3/12,6 = 0,1 < 0,25$, поэтому расчет производится по формуле (2.32), как для узлов 1-го типа.

$$P = 143,9 \text{ кН} > \frac{\gamma_c \gamma_p \gamma_m R_y t_n^2 (d + c + n_1 \sqrt{2b_n \epsilon})}{(n_2 + 1,8c/d) \epsilon \sin \alpha} =$$

$$= \frac{0,9 \cdot 1,0 \cdot 1,18 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 0,4^2 (12,6 + 1,3 + 1 \cdot \sqrt{2 \cdot 16 \cdot 3})}{(0,4 + 1,8 \cdot 0,1) \cdot 3 \cdot 0,7986} = 66,7 \text{ кН,}$$

где
$$\gamma_m = 1,5 - \frac{F}{R_y A} = 1,5 - \frac{177,5}{23 \cdot 24,3} = 1,18.$$

В связи с тем, что условие на продавливание не удовлетворяется, следует толщину стенки поясной трубы увеличить до 6 мм, тогда правая часть проверочной формулы увеличится в $(0,6/0,4)^2$ раз и составит 150 кН и условие прочности будет выполнено.

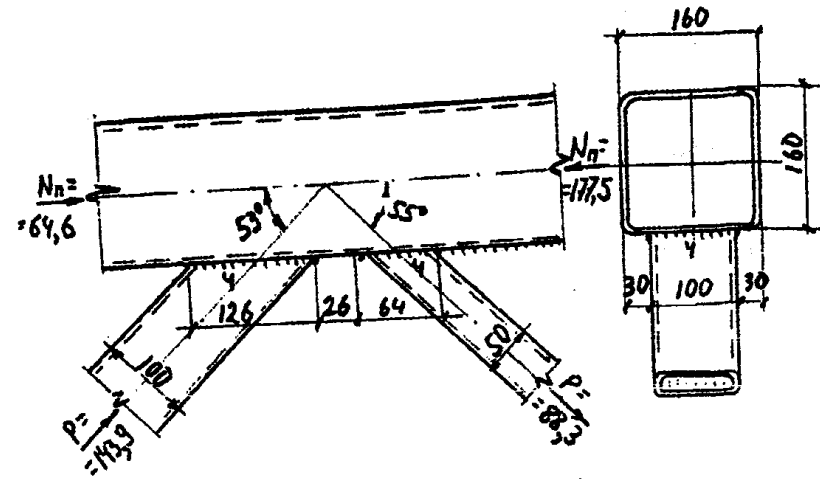


Рис. 2.11. Узел 1 (к примеру 2)

Для стержня 3-4 отношение $c/d = 1,3/8,8 = 0,15 < 0,25$, поэтому проверка на вырывание производится также по формуле (2.32):

$$P = 88,3 \text{ кН} < \frac{0,9 \cdot 1,2 \cdot 1,18 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 0,6^2 (8,8 + 1,3 + 1 \cdot \sqrt{2 \cdot 16 \cdot 3})}{(0,4 + 1,8 \cdot 0,15) \cdot 3 \cdot 0,8192} = 127,5 \text{ кН.}$$

Прочность на вырывание обеспечена.

б). Проверка несущей способности вертикальной стенки пояса не производится, так как для сжатого раскоса отношение $b_p/b_n = 10/16 = 0,626 < 0,85$.

в). Расчет на прочность элементов решетки в зоне примыкания к поясу производится по формуле (2.34).

Для стержня 2-3

$$P = 143,9 < \gamma_c \gamma_p K R_y A_p m' = 0,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 11,3 \cdot 0,743 = 173,8 \text{ кН,}$$

где при $c/d = 1,3/12,6 = 0,1 < 0,25$

$$m' = \frac{1}{1 + 0,013b_n/t_n} = \frac{1}{1 + 0,013 \cdot 16/0,6} = 0,743 ;$$

K – определяется по рис. 2.3.
Для стержня 3-4

$$P = 88,3 < 0,9 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 8,25 \cdot 0,743 = 152 \text{ кН.}$$

Прочность для обеих стержней обеспечена.

Расчет сварных швов

Сварка производится полуавтоматом в среде углекислого газа. По табл. 55, 56 [1] принимается соответственно сварочная проволока св. 08Г2С и расчетное сопротивление по металлу шва $R_{wf} = 215$ МПа. Наибольший катет сварного шва равен $1,2 t_{min} = 1,2 \cdot 3 = 3,6$ мм. Наименьший катет определяется по табл. 38 [1] и равен 5 мм. В связи с тем, что наибольший катет оказывается меньше наименьшего, то принимается сварной шов с разновеликими катетами: 4 и 5 мм. Первое значение для катета вдоль трубы раскоса, второе – для катета по поясной трубе. Расчет прочности сварного шва производится по меньшему катету.

По табл. 34 [1] $\beta_f = 0,9$, $\beta_z = 1,05$. Расчетное сопротивление по границе сплавления $R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un} = 0,45 \cdot 360 = 169$ МПа, где R_{un} определяется по табл. 51 [1]. Коэффициенты условий работы сварного соединения принимаются равными $\gamma_{wf} = \gamma_{wz} = 1$ (см. п. 11.2* [1]). Так как $R_{wf} \gamma_{wf} \beta_f > R_{wz} \gamma_{wz} \beta_z$, то расчет производится только по металлу границы сплавления.

Длина сварного шва для стержня 2-3 равна $l_w = 2d + b_p = 2 \cdot 12,6 + 10 = 35,2$ см. То же, для стержней 3-4 $l_w = 2d + b_p = 2 \cdot 6,4 + 10 = 22,8$ см.

Проверка прочности сварных соединений при $K_f = 0,4$ см для стержня 2-3:

$$\tau = \frac{P}{\beta_z K_f l_w} = \frac{143,9 \cdot 10^{-3}}{1,05 \cdot 0,4 \cdot 35,2 \cdot 10^{-4}} = 98 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} =$$

$$= 165 \cdot 1 \cdot \frac{1}{0,95} = 172 \text{ МПа.}$$

Та же проверка для стержня 3-4:

$$\tau = \frac{P}{\beta_z K_f l_w} = \frac{88,3 \cdot 10^{-3}}{1,05 \cdot 0,4 \cdot 22,8 \cdot 10^{-4}} = 92,5 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа.}$$

Прочность сварных соединений обеспечена.

УЗЕЛ 2. Геометрические параметры узла приведены на рис. 2.12.

а). Расчет на продавливание (вырывание) производится для обоих раскосов, так как отношение $b_p/b_n = 10/14 = 0,7 < 0,9$.

Для стержней 3-4 и 4-5 отношение $c/d = 0 < 0,25$, поэтому расчет производится по формуле (2.32), как для узлов 1-го типа.

Для стержня 3-4

$$P = 88,3 \text{ кН} > \frac{0,9 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 0,3^2 (8,8 + 0 + 1 \cdot \sqrt{2 \cdot 14 \cdot 2})}{(0,4 + 1,8 \cdot 0) \cdot 2 \cdot 0,809} =$$

$$= 56,25 \text{ кН.}$$

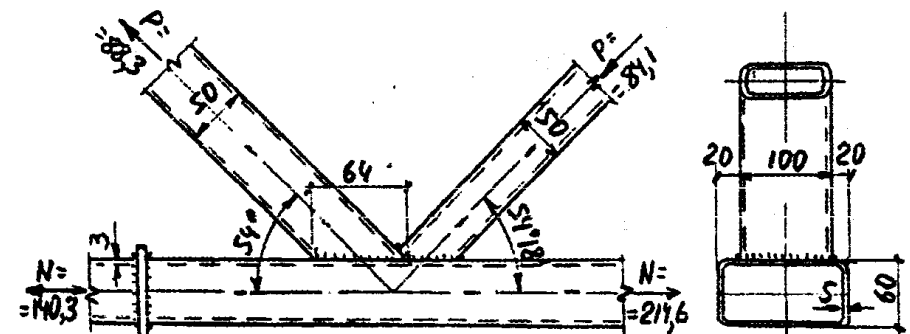


Рис. 2.12. Узел 2 (к примеру 2)

В связи с тем, что условие на вырывание не удовлетворяется, нужно увеличить толщину стенки поясной трубы до 5 мм. В этом случае правая часть проверочной формулы будет равна 156 кН, т.е. прочность на вырывание будет обеспечена.

Для стержня 4-5

$$P = 84,1 \text{ кН} < \frac{0,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 0,5^2 (6,4 + 0 + 1 \cdot \sqrt{2 \cdot 14 \cdot 2})}{(0,4 + 1,8 \cdot 0) \cdot 2 \cdot 0,8121} = 110 \text{ кН}.$$

Прочность на продавливание обеспечена.

б). Расчет на устойчивость вертикальной стенки пояса не производится, так как для сжатого раскоса этого узла отношение $b_p/b_n = 10/14 = 0,715 < 0,85$.

в). Расчет на прочность элементов решетки в зоне примыкания к поясу производится по формуле (2.34).

Для стержня 3-4

$$P = 88,3 < \gamma_c \gamma_p K R_y A_p m' = 0,9 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 8,25 \cdot 0,86 = 176 \text{ кН},$$

где при $c/d = 0 < 0,25$

$$m' = \frac{1}{1 + 0,013 b_n / t_n} = \frac{1}{1 + 0,013 \cdot 6 / 0,5} = 0,86.$$

Для стержня 4-5

$$P = 84,1 < 0,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 \cdot 10^{-1} \cdot 8,25 \cdot 0,86 = 147 \text{ кН}.$$

Прочность стержней 3-4 и 4-5 в зоне примыкания обеспечена.

Скорректированные в результате расчета узлов фермы сечения стержней приведены в графе 16 табл. 2.2.

Расчет сварных швов

Расчетная длина сварных швов для стержня 4-5 равна

$$l_w = 2d + b_p = 2 \cdot 6,4 + 10 = 22,8 \text{ см}.$$

Значение катета сварного шва принято таким же, как и для предыдущего узла, т.е. 0,4 см.

$$\frac{P}{\beta_z K_f l_w} = \frac{84,1 \cdot 10^{-3}}{1,05 \cdot 0,4 \cdot 22,8 \cdot 10^{-4}} = 102,5 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Проверка прочности сварного шва для стержня 3-4 сделана при расчете узла 1 (отношение c/d для узла 2 также меньше 0,25).

Расчет стыков поясных стержней

Заводской стык труб нижнего пояса (рис. 2.12). Так как внешние габариты стыкуемых труб одинаковы, то толщина фланца принимается конструктивно равной 20 мм из стали С345. Прочность сварных швов, прикрепляющих фланец к соединяемым трубам, при $K_f = 0,4$ см проверяется по формуле

$$\frac{N}{\beta_z K_f l_w} = \frac{140,3 \cdot 10^{-3}}{1,05 \cdot 0,4 \cdot 40 \cdot 10^{-4}} = 97,2 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 173 \text{ МПа},$$

где l_w – периметр трубы.

Проверка прочности фланца в направлении толщины производится по формуле (1.26):

$$\frac{N}{2(b_n + h_n) \beta_f K_f} = \frac{140,3}{2 \cdot (14 + 6) \cdot 0,9 \cdot 0,4} = 9,74 < R_{th} = 23 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обеспечена.

Монтажный стык труб нижнего пояса (рис. 2.14). Стык осуществляется на высокопрочных болтах диаметром 16 мм из стали 40Х «Селект» с временным сопротивлением $R_{вин} = 110 \text{ кН/см}^2$ (см. табл. 61 [1]).

Необходимое количество болтов определяется по формуле (1.27):

$$n \geq \frac{N}{0,7 R_{вин} A_{вин}} = \frac{234 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 110 \cdot 1,57} = 1,93 \text{ шт}.$$

Исходя из условия закручивания гаек расстояние от оси болта до внешней поверхности трубы (a_4) принимается равным 32 мм ($a_4 = 2d$). Тогда периметр, на котором следует разместить болты, будет равен

$$l = 2[(b_n + 2 \cdot 32) + (h_n + 2 \cdot 32)] = 648 \text{ мм}.$$

Исходя из требований по размещению болтов наибольшее расстояние между болтами (см. табл. 39 [1]) равно $a_{max} = 8d_{ome} = 8 \cdot 19 = 152$ мм. Тогда наименьшее количество болтов из конструктивных требований определится как частное от деления периметра на наибольшее расстояние между болтами:

$$n_{min} = l/a_{max} = 640/152 = 4,2.$$

Окончательно принимается 6 болтов (см. рис. 2.14). Предварительное натяжение болтов равно $0,63 \cdot R_{eun} \cdot A_{en} = 0,63 \cdot 110 \cdot 1,57 = 108,8$ кН.

Так как $a_4 = 32 \text{ мм} < \frac{l}{2n} = \frac{640}{2 \cdot 6} = 53,3 \text{ мм}$, то толщина фланца определяется по формуле (1.28):

$$t \geq \sqrt{\frac{3N}{nR_y}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 234}{6 \cdot 30}} = 1,97 \text{ см} \approx 2 \text{ см},$$

где R_y – расчетное сопротивление стали С345.

Катеты сварных швов, прикрепляющих фланцы к трубам, принимаются равными толщине стенки трубы – 0,4 см. Проверка прочности сварных швов:

$$\frac{N}{2(b+h)\beta_z K_f} = \frac{234 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (14+6) \cdot 1,05 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4}} = 162,6 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} =$$

$$= 172 \text{ МПа}.$$

Прочность сварных швов обеспечена.

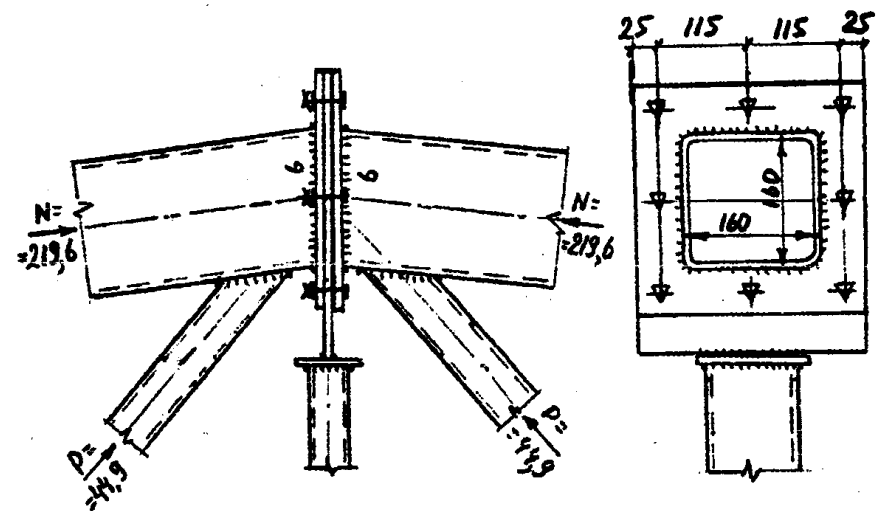


Рис. 2.13. Узел 3 (к примеру 2)

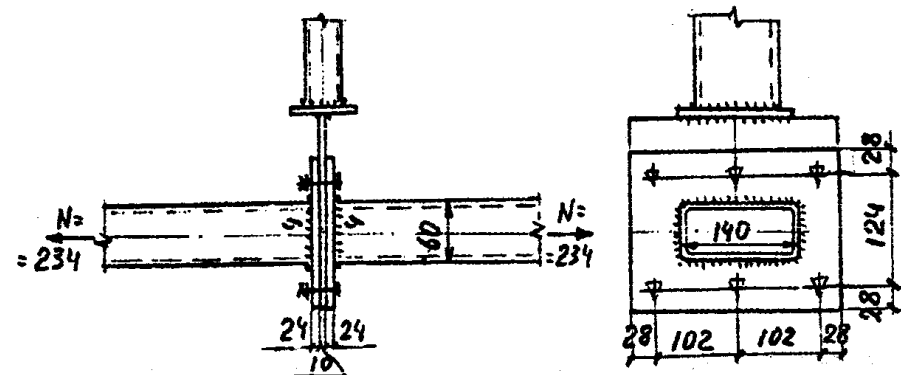


Рис. 2.14. Узел 4 (к примеру 2)

Монтажный стык верхнего пояса (рис. 2.13). В целях унификации диаметр болтов принимается таким же, как и для нижнего пояса. Количество болтов назначается исходя из конструктивных требований:

$$n_{min} = l/a_{max} = 896/152 = 5,8,$$

где l – периметр, на котором следует разместить болты:

$$l = 2[(b_n + 2a_4) + (h_n + 2a_4)] = 2[(160 + 2 \cdot 32) + (160 + 2 \cdot 32)] = 896 \text{ мм.}$$

Окончательно принимается 8 болтов.

В этом узле, кроме нормальной силы, будет действовать узловой изгибающий момент

$$M = \frac{(q_n + q_{сн})l^2}{18} = \frac{(5 + 10) \cdot 3^2}{18} = 7,5 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Проверка прочности болтового соединения с учетом изгибающего момента (за центр вращения принят нижний ряд болтов):

$$N_{b1} = -\frac{N}{n} + \frac{Ma_1}{\Sigma a_1^2} = -\frac{219,6}{8} + \frac{750 \cdot 22,4}{3 \cdot 22,4^2 + 2 \cdot 11,2^2} = -17,9 \text{ кН}.$$

Знак «минус» показывает, что болты не включаются в работу.

Проверка прочности сварных швов (высота катета принимается равной толщине стенки трубы, т.е. 6 мм):

$$\frac{N}{A_w} + \frac{M}{W_w} = \frac{219,6 \cdot 10^{-3}}{40,3 \cdot 10^4} + \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{214 \cdot 10^{-6}} = 134,6 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа.}$$

Прочность обеспечена.

Нижний опорный узел (рис. 2.16). Наибольшие сжимающее и растягивающее усилия на узел соответственно равны 98,0 кН и 35 кН (см. усилия для стержня а-1 в табл. П.1.1). Указанные усилия могут быть получены соответственно делением наибольшего опорного момента со знаком «+» и «-» на высоту фермы на опоре. Толщина сварного

шва принимается равной 0,3 см. Проверка прочности сварного соединения (в качестве усилия принимается наибольшее по абсолютной величине):

$$\frac{N}{2(b+h)\beta_z K_f} = \frac{980 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (14+6) \cdot 1,05 \cdot 0,3 \cdot 10^{-4}} = 91 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа.}$$

Прочность сварного соединения обеспечена.

В целях унификации болты принимаются такими же, как и для оформления монтажных стыков поясных труб. Необходимое количество болтов из условия прочности (в качестве усилия здесь принимается растягивающая сила):

$$n \geq \frac{N}{0,7 R_{сун} A} = \frac{35}{0,7 \cdot 110 \cdot 1,57} = 0,3 \text{ шт.}$$

Наименьшее количество болтов из конструктивных требований

$$n \geq \frac{l}{a_{max}} = \frac{648}{152} = 4,3.$$

С целью равномерной передачи усилия с фланца на полку колонны количество болтов принимается равным 6.

Требуемая толщина фланца из условия прочности

$$t \geq \sqrt{\frac{3N}{nR_y}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 35}{6 \cdot 230 \cdot 10^{-1}}} = 0,9 \text{ см}.$$

Принимается толщина фланца 20 мм.

Верхний опорный узел (рис. 2.15). Горизонтальные усилия на этот узел равны по величине, но противоположны по знаку усилиям на нижний опорный узел. Кроме горизонтальных усилий здесь будет действовать опорная реакция

$$R_A = (q_n + q_{сн}) \frac{l\phi}{2} = (5 + 10) \cdot \frac{17,5}{2} = 131,25 \text{ кН}.$$

Проверка прочности сварных швов, прикрепляющих фланец к трубе (толщина шва принимается равной 0,6 см):

$$\frac{\sqrt{N^2 + R_A^2}}{2(b+h)\beta_z K_f} = \frac{\sqrt{98,0^2 + 131,25^2} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (16+16) \cdot 1,05 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4}} = 40,7 < R_{wz} \gamma_{wz} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 172 \text{ МПа.}$$

Прочность сварного соединения обеспечена.
Требуемое количество болтов из условия прочности

$$n \geq \frac{N}{0,7 R_{сум} A} = \frac{98,0}{0,7 \cdot 110 \cdot 1,57} = 0,8 \text{ шт.}$$

Требуемое количество болтов из конструктивных требований

$$n \geq \frac{l}{a_{max}} = \frac{896}{152} = 5,8 .$$

Количество болтов принимается равным 8.

Ширина фланца (b_ϕ) – размер в горизонтальной плоскости исходя из размещения болтов и сварных швов назначается равным 284 мм: $b_\phi = 224 + 2a_3 = 224 + 2 \cdot 30 = 284$ мм. Тогда толщина фланца при его работе на смятие от опорной реакции будет

$$t \geq \frac{R_A}{R_p b_\phi} = \frac{131,25}{336 \cdot 10^{-1} \cdot 28,4} = 0,14 \text{ см,}$$

где R_p – расчетное сопротивление смятию торцевой поверхности (принимается по табл. 52*[1]).

Тот же размер из условия прочности при работе фланца на изгиб

$$t \geq \sqrt{\frac{3N}{nR_y}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 98,0}{8 \cdot 230 \cdot 10^{-1}}} = 1,26 \text{ см.}$$

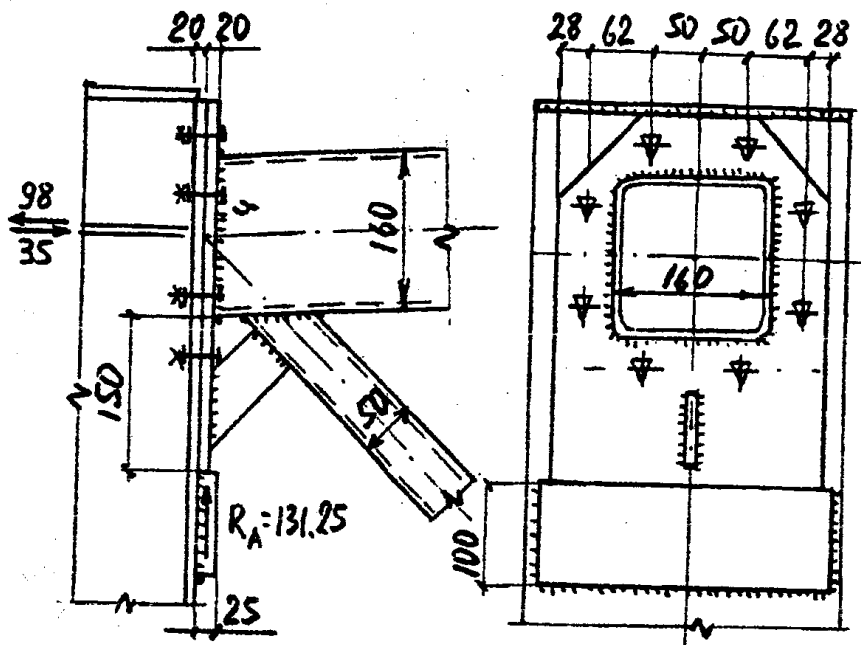


Рис. 2.15. Верхняя часть опорного узла (узел 5)

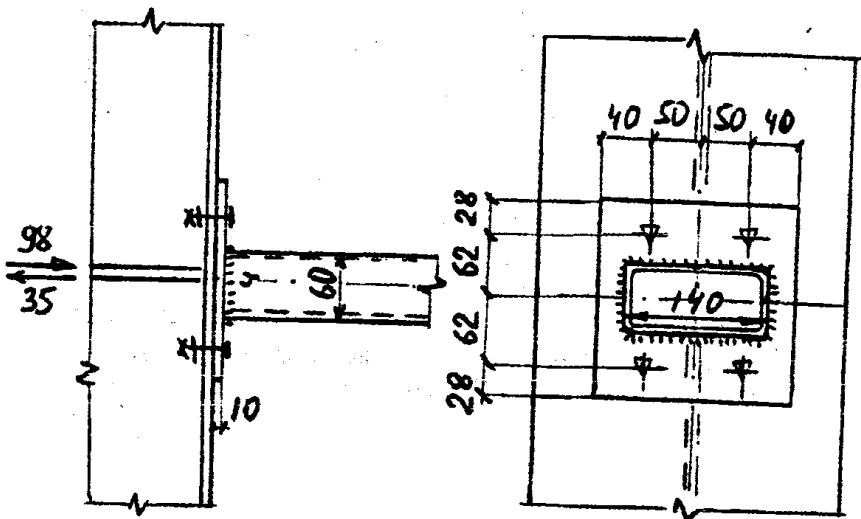


Рис. 2.16. Нижняя часть опорного узла (узел 6)

Принимается толщина фланца 2 см.
 Расчетная длина сварного шва, прикрепляющего опорный сто-
 лик к колонне, при $K_f = 8$ мм:

$$l_w = \frac{1,2R_A \gamma_n}{\beta_z K_f R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c} = \frac{1,2 \cdot 1312 \cdot 0,95}{1,05 \cdot 0,8 \cdot 165 \cdot 10^{-1} \cdot 1,1} = 10 \text{ см.}$$

Литература

1. СНиП П-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. – М.: Стройиздат, 1991.
2. Пособие по проектированию стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1989.
3. Д а в ы д о в Е. Ю. Расчет и конструирование стержневых конструкций с применением круглых и прямоугольных труб. – Мн.: БПИ, 1983.
4. Д а в ы д о в Е. Ю., Н е с т е р е н к о Н. Л. Оптимальное проектирование металлических конструкций. – Мн.: БГПА, 1993.

Составление расчетных комбинаций усилий в стержнях ферм

Комбинации расчетных усилий составляются в табличной форме (табл. П.1.1). В вертикальной графе 2 записываются условные обозначения стержней ферм (в табл. П.1.1 в этой графе записаны обозначения стержней, принятые при построении диаграммы Максвелла-Кремоны для фермы, расчетная схема которой приведена на рис. 2.5, а). В графе 3 приводятся продольные усилия в стержнях фермы от единичной вертикальной нагрузки, расположенной на левой половине фермы.

В графе 9 приводятся усилия в стержнях фермы от единичного момента, приложенного к левой опоре фермы (рис. 2.5, б). Знак момента принимается положительным (верхний пояс сжимается, нижний растягивается). Усилия в стержнях фермы определяются в предположении шарнирных сопряжений в узлах и могут быть определены любым методом строительной механики.

В графах 4 и 10 приводятся усилия соответственно от единичной вертикальной нагрузки, расположенной на правой половине фермы, и от единичного положительного момента, приложенного к правой опоре фермы. Усилия от этих загрузок равны соответственно значениям усилий, приведенным в графах 3 и 9, при их симметричном переносе. Например, усилие в стержне д-11 от единичной нагрузки, расположенной на правой половине фермы, равно усилию в стержне в-4 при единичной нагрузке, расположенной на левой половине, и т.д.

Значения усилий в остальных графах получаются по выражениям, приведенным ниже (все вычисления производятся с учетом знака усилия):

$[5] = ([3] + [4]) \times P_n$ – расшифровывается следующим образом: значение в графе 5 получается умножением алгебраической суммы значений в графах 3 и 4 на значение узловой постоянной нагрузки P_n . В дальнейшем зависимости подобного вида расшифровываются аналогично.

Продольные усилия в стержнях фермы, кН

Элемент фермы	Обозначение стержня	Усилия от узловой вертикальной нагрузки Р, кН						Усилия от	
		Р=1 слева	Р=1 справа	постоянная Р=Р _п =15	снеговая Р=Р _{сн} =30			M _{оп} =+1 слева	M _{оп} =+1 справа
					слева Р _{сн}	справа Р _{сн}	по всему пролету Р _{сн}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нижний пояс	а-1	0	0	0	0	0	0	+0,5	0
	а-3	+2,5	+1,0	+52,5	+75	+30	+105	+0,4	+0,06
	а-5	+3,5	+2,0	+82,5	+105	+60	+165	+0,3	+0,12
	а-7	+3,0	+3,0	+90,0	+90	+90	+180	+0,2	+0,2
	а-8	+3,0	+3,0	+90,0	+90	+90	+180	+0,2	+0,2
	а-10	+2,0	+3,5	+82,5	+60	+105	+165	+0,12	+0,3
	а-12	+1,0	+2,5	+52,5	+30	+75	+105	+0,06	+0,4
	а-14	0	0	0	0	0	0	0	+0,5
Верхний пояс	б-2	-1,1	-0,5	-24,0	-33	-15	-48,0	-0,45	-0,036
	в-4	-3,0	-1,5	-67,5	-90	-45	-135	-0,35	-0,09
	г-6	-3,2	-2,5	-85,5	-96	-75	-171	-0,25	-0,16
	д-9	-2,5	-3,2	-85,5	-75	-96	-171	-0,16	-0,25
	д-11	-1,5	-3,0	-67,5	-45	-90	-135	-0,09	-0,35
	д-13	-0,5	-1,1	-24,0	-15	-33	-48,0	-0,36	-0,45
Раскосы	1-2	+2,1	+0,85	+44,3	+63	+25,5	+88,5	-0,085	+0,073
	2-3	-2,2	-0,9	-46,5	-66	-27	-93,0	+0,085	-0,075
	3-4	+0,9	+0,9	+27,0	+27	+27	+54	-0,08	+0,075
	4-5	-0,85	-0,85	-25,5	-25,5	-25,5	-51	+0,08	-0,075
	5-6	-0,45	+0,85	+6,0	-13,5	+25,5	+12	-0,08	+0,07
	6-7	+0,4	-0,9	-7,5	+12,0	-27	-15	+0,08	-0,065
	8-9	-0,9	+0,4	-7,5	-27	+12,0	-15	-0,065	+0,08
	9-10	+0,85	-0,45	+6,0	+25,5	-13,5	+12	+0,07	-0,08
	10-11	-0,85	-0,85	-25,5	-25,5	-25,5	-51	-0,075	+0,08
	11-12	+0,9	+0,9	+27,0	+27	+27	+54	+0,075	-0,08
	12-13	-0,9	-2,2	-46,5	-27	-66	-93,0	-0,075	+0,085
	13-14	+0,85	+2,1	+44,3	+25,5	+63	+88,5	-0,073	-0,085
	Стойки	7-8	0	0	0	0	0	0	0

(к примерам 1, 2)

опорного момента M _{оп} , кН · м						Расчетные усилия			
M _{оп} =M _л =-30 слева и справа	M _{оп} =M _{сн} =-60 слева и справа	M _{оп} =M _{max} =+100	M _{оп} =M _{соот} =-75	M _{оп} =M _{min} =-125	M _{оп} =M _{соот} =+50	п _с =1		п _с =0,9	
						сжатие	растяжение	сжатие	растяжение
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
-15,0	-30,0	+50	0	-62,2	0	-45	+35	-98,0	+30
-13,8	-27,6	+40	-4,5	-50,0	+3,0	+116,1	-3,6	+140,31	
-12,6	-25,2	+30	-9,0	-37,5	+6,0	+209,7		+214,6	
-12,0	-24,0	+20	-15,0	-25,0	+10,0	+234,0		+222,9	
-12,0	-24,0	+20	-15,0	-25,0	+10,0	+234,0		+222,9	
-12,6	-25,2	+12	-22,5	-15,0	+15,0	+209,7		+186,2	
-13,8	-27,6	+6	-30,0	-7,5	+20,0	+116,1		+119,6	
-15,0	-30,0	0	-37,5	0	+25	-52,5		-75,7	+7,5
+14,58	+29,16	-45	+2,7	+56,2	-1,8	-51,8	+4,6	-64,614	+51,2
+13,2	+26,4	-35	+6,7	+43,7	-4,5	-162,9		-177,5	
+12,3	+24,6	-25	+12	+31,2	-8,0	-219,6		-216,66	
+12,3	+24,6	-16	+18,7	+20,0	-12,5	-219,6		-202,49	
+13,2	+26,4	-9	+26,2	+11,2	-17,5	-162,9		-157,7	
+14,58	+29,16	-3,6	+33,7	+4,5	-22,5	-28,46	+20,6	-42,7	+30,3
+0,36	+0,72	-8,5	-5,4	+10,6	+3,7		+133,88		+137,8
-0,3	-0,6	+8,5	+5,6	-10,6	-3,7	-140,4		-143,9	
+0,15	+0,3	-8	-5,6	+10,0	+3,7		+81,45		+88,35
-0,15	-0,3	+8	+5,6	-10,0	-3,7	-76,9		-84,1	
+0,3	+0,6	-8	-5,2	+10,0	+3,5	-6,6	+32,4	-17,24	+41,9
-0,45	-0,9	+8	+4,8	-10,0	-3,2	-35,8	+4,85	-44,9	+13,6
-0,45	-0,9	-6,5	-6,0	+8,1	+4,0	-35,8		-44,3	+12,9
+0,3	+0,6	+7	+6,0	-8,7	-4,0	-6,6	32,4	-16,7	+41,5
-0,15	-0,3	-7,5	-6,0	+9,4	+4,0	-76,9		-83,9	
+0,15	+0,3	+7,5	+6,0	-9,4	-4,0		+81,4		+88,27
-0,3	-0,6	-7,5	-6,3	+9,4	+4,2	-140,4		-143,5	
+0,36	+0,72	+7,3	+6,3	-9,4	-4,2		+133,88		+137,21
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

При наличии подвесного потолка величины в графе 5 должны включать также усилия от этого вида нагрузки.

$$[6]=[3] \times P_{сн};$$

$$[7]=[4] \times P_{сн};$$

$$[8]=([3]+[4]) \times P_{сн} \text{ или } [8]=[6]+[7];$$

$$[11]=([9]+[10]) \times M_n;$$

$$[12]=([9]+[10]) \times M_{сн},$$

где $M_n, M_{сн}$ – соответственно опорные моменты от постоянной и снеговой нагрузок.

Если опорные моменты на левой и правой опорах неодинаковы, то значения граф 11 и 12 вычисляются как сумма произведений:

$$[11]=[9] \times M_n^{сн} + [10] \times M_n^{np};$$

$$[12]=[9] \times M_{сн}^{сн} + [10] \times M_{сн}^{np},$$

где $M_n^{сн}, M_n^{np}$ – моменты на левой и правой опорах.

Здесь и далее знак момента принимается положительным, если он сжимает верхний пояс фермы.

Если M_{max} приложен к левой опоре, то

$$[13]=[9] \times M_{max};$$

$$[14]=[10] \times M_{соот}.$$

Если M_{max} приложен к правой опоре, то

$$[13]=[10] \times M_{max};$$

$$[14]=[9] \times M_{соот}.$$

Если M_{min} приложен к левой опоре, то

$$[15]=[9] \times M_{min};$$

$$[16]=[10] \times M_{соот}.$$

Если M_{min} приложен к правой опоре, то

$$[15]=[10] \times M_{min};$$

$$[16]=[9] \times M_{соот},$$

где M_{max}, M_{min} – соответственно наибольший положительный и наибольший отрицательный опорные моменты с учетом всех нагрузок, за исключением постоянной и снеговой;

$M_{соот}$ – момент, действующий на другой, по отношению к M_{max} или M_{min} , опоре и создаваемый теми же нагрузками.

Наибольшее сжимающее усилие, значение которого записывается в графу 17, определяется из следующих возможных сочетаний:

1) $[17]=[5]+[11]+[A]+[12]$ (в качестве $[A]$ подставляется наиболее невыгодное значение из граф 6, или 7, или 8);

2) $[17]=[5]+[11]+[B]$ (в качестве $[B]$ подставляется наиболее невыгодная сумма: $([13]+[14])$ или $([15]+[16])$).

Последнее сочетание может быть использовано лишь при условии, что момент M_{max} или M_{min} создается только одной временной нагрузкой.

Наибольшее растягивающее усилие (графа 18) определяется из тех же сочетаний, что и значение графы 17. При $n_c = 0,9$ наибольшее сжимающее усилие, значение которого записывается в графу 19, определяется из следующих возможных сочетаний:

$$1) [19]=[5]+[11]+0,9 \times ([A]+[12]+[B]);$$

$$2) [19]=[5]+[11]+0,9 \times [B].$$

Последнее сочетание может быть использовано лишь при условии, что момент M_{max} или M_{min} создается двумя или более временными нагрузками.

Наибольшее растягивающее значение, записываемое в графу 20, определяется из тех же сочетаний, что и значение графы 19.

Значения усилий в графах 17, 18, 19, 20 используются в дальнейшем для подбора сечений соответствующих стержней фермы.

При шарнирном сопряжении ферм с колоннами графы 9...16, 19 и 20 не заполняются. При наличии нагрузки на ферму от подвесного грузоподъемного транспорта в табл. П.1.1 необходимо ввести дополнительную графу усилий в стержнях фермы от этого вида нагрузки, которые должны быть учтены при определении суммарных усилий (при заполнении граф 17...20).

Если на верхний пояс фермы действует внеузловая нагрузка (например, при беспрогонном покрытии), то кроме продольных усилий при расчете верхнего пояса должны быть учтены изгибающие моменты, определяемые, как в многопролетной балке на упруго проседающих опорах. Допускается упрощенное определение изгибающих моментов:

$$\text{пролетный момент в крайней панели } M = ql_m^2 / 10;$$

$$\text{пролетный момент в промежуточных панелях } M = ql_m^2 / 12;$$

СОРТАМЕНТ

Таблица П.2.1

Трубы стальные бесшовные горячекатаные по ГОСТ 8732-70* (выписка)

узловые моменты $M = ql_m^2 / 18$,
 где q – распределенные нагрузки на верхний пояс;
 l_m – длина панели верхнего пояса.

При выполнении узлов с расцентровкой элементы ферм следует рассчитывать с учетом изгибающих моментов от расцентровки. Изгибающий момент от расцентровки допускается учитывать только при расчете поясов, при этом момент между смежными панелями пояса распределяется пропорционально погонным жесткостям.

$$M_1 = \frac{(N_2 - N_1)e}{1 + I_2 l_1 / I_1 l_2}; \quad M_2 = \frac{(N_2 - N_1)e}{1 + I_1 l_2 / I_2 l_1}$$

Следует учитывать также дополнительные изгибающие моменты от жесткости узлов, если отношение высоты сечения к длине элемента превышает 1/10 для ферм, эксплуатируемых при температуре не ниже -40°, и 1/15 для ферм, эксплуатируемых при температуре ниже -40°.

Наиболее невыгодные расчетные усилия (осевая сила и изгибающий момент), используемые для подбора сечений стержней фермы, записываются в графах 3 и 4 (табл. 2.1, 2.2). Симметрично расположенные стержни ферм должны иметь одинаковое сечение, поэтому для них принимается одно наиболее невыгодное сочетание расчетных усилий.

D, мм	t, мм	Масса 1м, кг	Площадь сеч., см ²	W, см ³	i, см	D, мм	t, мм	Масса 1м, кг	Площадь сеч., см ²	W, см ³	i, см		
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
57	4,5	5,83	7,42	9,04	1,86	63,5	5	7,21	9,19	12,5	2,08		
	5	6,41	8,17	9,78	1,85		5,5	7,87	10,02	13,5	2,06		
	5,5	6,99	8,9	10,5	1,83		6	8,51	10,83	14,3	2,04		
	6	7,55	9,61	11,1	1,82		7	9,75	12,43	15,8	2,01		
	7	8,63	10,99	12,3	1,79		8	10,59	13,95	17,3	1,98		
	8	9,67	12,32	13,3	1,76		9	12,1	15,41	18,5	1,95		
	9	10,65	13,57	14,2	1,73		10	13,9	16,82	19,6	1,93		
	10	11,59	14,76	15	1,7		11	14,24	18,14	20,6	1,9		
	11	12,48	15,9	15,6	1,67		12	15,24	19,41	21,4	1,87		
	12	13,32	16,96	16,1	1,65		14	17,09	21,78	22,7	1,82		
	60	3,5	4,88	6,21	8,3		2	68	3,5	5,57	7,09	10,9	2,28
		4	5,52	7,04	9,24		1,99		4	6,31	8,04	12,2	2,27
4,5		6,16	7,85	10,1	1,97	4,5	7,05		8,98	13,4	2,25		
5		6,78	8,64	11,1	1,95	5	7,77		9,9	14,5	2,23		
5,5		7,39	9,41	11,8	1,94	5,5	8,48		10,8	15,6	2,22		
6		7,99	10,18	12,5	1,92	6	9,17		11,69	16,7	2,2		
7		9,15	11,65	13,9	1,89	7	10,53		13,41	18,6	2,17		
8		10,26	13,07	15,1	1,86	8	11,84		15,08	20,3	2,14		
9		11,32	14,42	16,1	1,83	9	13,1		16,68	21,8	2,11		
10		12,33	15,71	17	1,8	10	14,3		18,22	23,2	2,08		
11		13,29	16,93	17,8	1,78	11	15,46		19,7	24,4	2,05		
12		14,21	18,1	18,5	1,75	12	16,57		21,11	25,5	2,03		
14		15,88	20,23	19,5	1,7	14	18,64		23,75	27,2	1,97		
63,5		3,5	5,18	6,6	9,38	2,12	70		16	20,52	26,14	28,4	1,92
	4	5,87	7,48	10,5	2,11	3,5		5,74	7,31	11,6	2,35		
	4,5	6,55	8,34	11,5	2,09	4		6,51	8,29	13,0	2,34		

Коэффициенты надежности по назначению

Класс ответственности зданий и сооружений		Коэффициент надежности по назначению γ_n
<i>Класс I</i>	Основные здания и сооружения объектов, имеющих особо важное народнохозяйственное и (или) социальное значение, такие как: главные корпуса ТЭС, АЭС, центральные узлы доменных печей, дымовые трубы высотой более 200 м, телевизионные башни, сооружения магистральной первичной сети ЕАСС, резервуары для нефти и нефтепродуктов емкостью более 10 тыс.м ³ , крытые спортивные сооружения с трибунами, здания театров, кинотеатров, цирков, крытых рынков, учебных заведений, детских дошкольных учреждений, больниц, родильных домов, музеев, государственных архивов и т.п.	1
<i>Класс II</i>	Здания и сооружения объектов, имеющих важное народнохозяйственное значение (или социальное): объекты промышленного, сельскохозяйственного, жилищно-гражданского назначения и связи, не вошедшие в I и III классы	0,95
<i>Класс III</i>	Здания и сооружения объектов, имеющих ограниченное народнохозяйственное и (или) социальное значение, такие как: склады без процессов сортировки и упаковки для хранения сельскохозяйственных продуктов, удобрений, химикатов, угля, торфа и др., теплицы, парники, одноэтажные жилые дома, опоры проводной связи, опоры освещения населенных пунктов, ограды, временные здания и сооружения и т.п. (для временных зданий и сооружений со сроком службы до 5 лет допускается принимать $\gamma_n = 0,8$)	0,9

- A – площадь сечения брутто;
- A_{en} – площадь сечения болта нетто;
- A_n – площадь сечения нетто;
- E – модуль упругости;
- I_x, I_y – моменты инерции сечения относительно осей соответственно $x-x$ и $y-y$;
- D – диаметр трубы;
- M – изгибающий момент;
- N, P – продольная сила;
- R_{bt} – расчетное сопротивление болтов растяжению;
- R_p – расчетное сопротивление стали смятию торцевой поверхности (при наличии пригонки);
- R_s – расчетное сопротивление стали сдвигу;
- R_u – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по временному сопротивлению;
- R_{un} – временное сопротивление стали разрыву, принимаемое равным минимальному значению σ_b по государственным стандартам и техническим условиям на сталь;
- R_{wf} – расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва;
- R_{wu} – расчетное сопротивление стыкового сварного соединения сжатию, растяжению, изгибу по временному сопротивлению;
- R_{wun} – нормативное сопротивление металла шва по временному сопротивлению;
- R_{ws} – расчетное сопротивление стыковых сварных соединений сдвигу;
- R_{wy} – расчетное сопротивление стыковых сварных соединений сжатию, растяжению и изгибу по пределу текучести;
- R_{wz} – расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу границы сплавления;
- R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести;
- R_{yn} – предел текучести стали, принимаемый равным значению текучести (σ_T) по государственным стандартам и техническим условиям на сталь;

W_x, W_y – моменты сопротивления сечения брутто относительно осей соответственно $x-x$ и $y-y$;

h_{ef} – расчетная высота стенки;

i – радиус инерции сечения;

i_x, i_y – радиусы инерции сечения относительно осей соответственно $x-x$ и $y-y$;

K_f – катет углового шва;

l_{ef} – расчетная длина;

l_w – длина сварного шва;

l_x, l_y – расчетные длины элемента в плоскостях, перпендикулярных осям соответственно $x-x$ и $y-y$;

m – относительный эксцентриситет ($m = \frac{M}{N} \cdot \frac{A}{W}$);

m_{ef} – приведенный относительный эксцентриситет ($m_{ef} = \frac{M}{N} \cdot \frac{A}{W} \cdot \eta$);

t – толщина стенки трубы;

β_f, β_z – коэффициенты для расчета углового шва соответственно по металлу шва и по металлу границы сплавления;

γ_b – коэффициент условий работы соединения;

γ_c – коэффициент условий работы;

γ_n – коэффициент надежности;

γ_m – коэффициент надежности по материалу;

η – коэффициент влияния формы сечения;

λ – гибкость ($\lambda = l_{ef} / i$);

$\bar{\lambda}$ – условная гибкость ($\bar{\lambda} = \lambda \cdot \sqrt{R_y / E}$);

σ_x, σ_y – нормальные напряжения, параллельные осям соответственно $x-x$ и $y-y$;

τ_{xy} – касательное напряжение;

φ – коэффициент продольного изгиба;

φ_e – коэффициент снижения расчетных сопротивлений при внецентренном сжатии.

Введение	3
1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФЕРМ ИЗ КРУГЛЫХ ТРУБ	4
1.1. Подбор сечений стержней ферм	4
1.2. Расчет сопряжений стержней ферм	11
1.3. Конструирование и расчет заводских и монтажных стыков труб	23
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФЕРМ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ	29
2.1. Подбор сечений стержней ферм	29
2.2. Расчет сопряжений стержней ферм	36
2.3. Конструирование и расчет стыков поясных труб	41
Пример 1	41
Пример 2	71
Литература	94
ПРИЛОЖЕНИЯ	95
Основные буквенные обозначения	125