

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»
ПРИВОЛЖСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) МАДИ**

Строительная механика и металлические конструкции подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин

Методические указания
по выполнению курсовой работы
для студентов специальности 23.05.01 Наземные транспортно-
технологические средства

Чебоксары, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	3
1.	Выбор прототипа конструкции и расчётная схема стрелы	6
1.1.	Конструкции балочных стрел	6
1.2.	Расчётная схема стрелы	8
1.3.	Определение веса стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы	12
1.4.	Схемы запасовки канатов	13
2.	Расчёт нагрузок в вертикальной плоскости	16
2.1.	Расчётный режим	16
2.2.	Собственный вес стрелы	18
2.3.	Сосредоточенные подвижные нагрузки от давления ходовых колёс грузовой тележки	18
2.4.	Составляющие от усилий в канатах подъёма груза, перемещения грузовой тележки и расчала	20
2.5.	Линии влияния в стержнях ферм стрелы	22
3.	Расчёт нагрузок в горизонтальной плоскости	32
3.1.	Расчёт ветровых нагрузок	32
3.2.	Расчёт инерционных нагрузок	35
3.3.	Суммарные горизонтальные нагрузки	36
4	Определение максимальных усилий в расчётных стержнях стрелы	39
5	Подбор сечений элементов стрелы	43
5.1	Расчёт элементов, работающих на растяжение	43
5.2	Расчёт элементов, работающих на сжатие	44
6	Расчет и конструирование узлов ферм	49
7	Расчет элементов стыков секций	53
8	Нанесение размеров и допуски на размеры	56
9	Условные обозначения швов сварных соединений	60
10.	Варианты заданий для выполнения курсовой работы	63
	Список рекомендуемой литературы	66
	Приложение А. Сортамент. Трубы стальные бесшовные горячекатаные по ГОСТ 8732–80	67
	Приложение Б. Сортамент. Сталь угловая неравнобокая по ГОСТ 8510–86	70

Введение

При изучении дисциплины «Строительная механика и металлические конструкции подъемно транспортных и дорожно-строительных машин» студентами, обучающимися по специальности: 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства, выполняется курсовую работу по расчёту и проектированию металлических конструкций машин. Проект имеет цель закрепить полученные теоретические знания и приобрести навыки самостоятельного расчёта и конструирования элементов и узлов металлоконструкций строительных машин.

Курсовая работа предусматривает выполнение расчёта и проектирования какой-либо металлической конструкции строительных машин – горизонтальной балочной или подъёмной стрелы башенного крана, главных балок или ферм мостовых и козловых кранов, телескопических стрел самоходных кранов и др. В настоящей работе изложены методика, порядок расчёта и проектирования балочной стрелы башенного крана.

Работа состоит из расчетно-пояснительной записки объемом 20–25 страниц формата А4 с пояснительными расчетными схемами и графической части, выполняемой на одном листе формата А1 или А2 – сборочный чертёж секции стрелы. Оценивается курсовая работа дифференцированно с учетом следующих основных требований:

- точность расчётов и содержательность пояснений к ним;
- качество выполнения графической части;
- качество защиты курсовой работы.

Все расчёты в пояснительной записке следует иллюстрировать расчётными схемами с указанием на них принятых условных обозначений и фактического значения определяемых величин. Пояснения к расчётам должны быть достаточно подробными и понятными. При использовании формул и таблиц необходимо давать ссылки на соответствующие литературные источники. Формулы должны иметь экспликацию, то есть вхо-

дящие в них обозначения следует расшифровать.

Все листы записки оформляются согласно требованиям ЕСКД, нумеруются, сброшюровываются и снабжаются титульным листом установленной формы.

Расчётно-пояснительная записка должна содержать:

- титульный лист;
- исходные;
- выбор прототипа конструкции и расчётную схему стрелы;
- расчёт нагрузок;
- определение усилий в элементах стрелы;
- подбор сечений элементов стрелы;
- расчёт соединений – проверку прочности сварных швов в узлах ферм;
- расчёт болтовых и шарнирных соединений секций стрелы;
- список использованной литературы;
- спецификацию на сборочный чертеж.

Графическая часть проекта должна содержать сборочный чертеж секции стрелы в масштабе 1:25, 1:40, 1:50. При этом допускается один или два разрыва. На чертеже должны быть даны поперечный разрез стрелы, конструкции двух-трех узлов стрелы в одной-двух проекциях в масштабе 1:1–1:5, монтажная (геометрическая) схема ферм стрелы (развертка) с указанием на ней размеров – длины стержней ферм по центрам тяжести узлов. В узлах фермы кроме размеров должна быть дана характеристика сварных швов. Спецификация на сборочный чертеж секции стрелы выполняется на отдельном листе формата А4 согласно требованиям ЕСКД и подшивается в конце пояснительной записки. На чертеже секции стрелы должны быть указаны общие габаритные размеры в трех плоскостях, размеры ее характерных участков. При вычерчивании только сборочного чертежа отдельной секции стрелы в пояснительной записке должен быть дан эскиз стрелы с разбивкой ее на отдельные секции с указанием длины каждой. На чертеже с помощью выносок отдельных сечений должны быть даны тип и

размеры прокатных профилей отдельных элементов стрелы – поясов, стоек, раскосов, соединений сборочных фланцев секций с поясами стрелы. Замена чертежей схемами с изображением стержней в одну линию не допускается. В поперечном разрезе стрелы должны быть вычерчены, кроме попавших в разрез поясов стрелы, элементы решетки и диафрагмы жесткости, указаны размеры сечений всех элементов. При вычерчивании узлов фермы стержни, не лежащие в плоскости чертежа, условно не показываются.

1. Выбор прототипа конструкции и расчетная схема стрелы

1.1. Конструкции балочных стрел

Балочные горизонтальные стрелы из-за наличия консольной части и подвижной нагрузки воспринимают при эксплуатации большие изгибающие моменты. Они выполняются в виде пространственных трех- или четырехгранных ферм. Основные типы поперечных сечений стрел показаны на рис. 1.1.

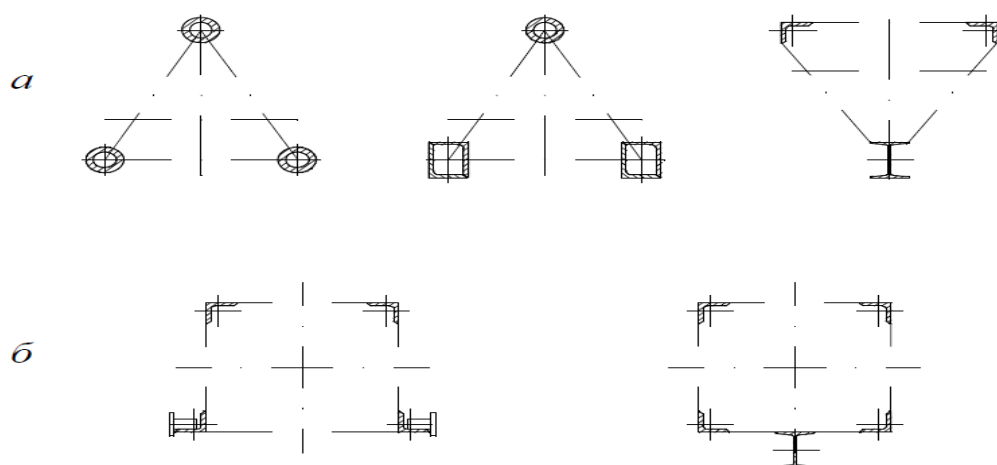


Рисунок 1.1 - Типы поперечных сечений балочных стрел:

а – трёхгранные; *б* – четырёхгранные

Трёхгранные стрелы обычно имеют меньший вес, чем четырёхгранные. Особое предпочтение следует отдавать трёхгранным стрелам, выполненным из труб, которые в основном и применяются на современных строительных башенных кранах.

Основная часть стрелы, между точкой крепления расчала и осью пяты, работает на изгиб и сжатие. Консольная часть стрелы работает в основном на изгиб. Решетку вертикальных ферм в консольной части в силу этого иногда выполняют раскосной с тем, чтобы все раскосы работали на растяжение. Применяется и раскосная решетка в двух направлениях. Однако чаще в

вертикальных фермах применяется треугольная решетка без стоек или со стойками с перемещением грузовой каретки по нижнему поясу рис. 1.2.

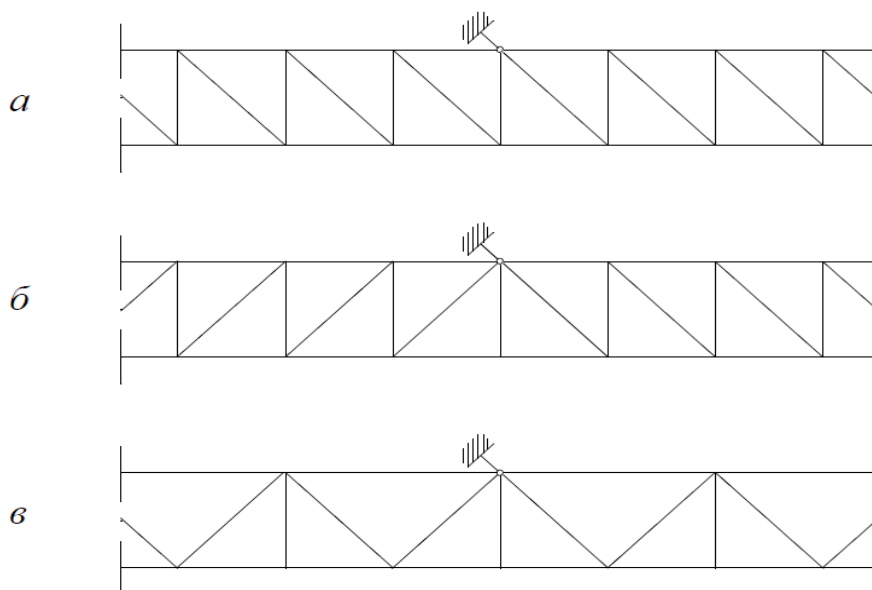


Рисунок 1.2 - Типы соединительных решеток вертикальных ферм балочных стрел:

a – раскосная; *б* – раскосная двух направлений; *в* – треугольная без стоек или со стойками

При конструировании решетки следует учитывать, что подвижная сосредоточенная нагрузка от давления ходовых колес грузовой тележки может быть приложена в любой точке нижнего пояса стрелы. Вследствие этого стержни нижнего пояса выполняют двойную функцию: работают на сжатие-растяжение, как элементы ферм и, как многоопорные неразрезные балки воспринимают местный изгиб от давления ходовых колёс грузовой тележки.

Элементы стрел изготавливают из прокатных профилей – труб, составными из уголков и др.

В целях уменьшения напряжений от местного изгиба стержней нижнего пояса от давления ходовых колёс грузовой тележки целесообразно длину панелей стрелы выбирать возможно меньшей. Для этого треугольная решетка вертикальных ферм может дополняться стойками, уменьшающими в два раза длину панели нижнего пояса стрелы.

При выборе прототипа конструкции стрелы следует основываться на уже существующих моделях и руководствоваться следующим:

- сечение стрелы углом вверх (рис. 1.3, тип А) предпочтительнее для кранов любых грузоподъемностей;
- сечение стрелы углом вниз (рис. 1.3, тип Б) применялось обычно в кранах грузоподъемностью до 5 т, например в кране БКСМ-5-5М и др.;
- в кранах грузоподъемностью до 5 т, как правило, применяется раскосная решетка двух направлений (в консольной части – ниспадающая, в пролете – противоположного направления) с совмещенными узлами;
- в кранах грузоподъемностью более 5 т применяется треугольная решетка или треугольная со стойками;
- длина панели назначается в зависимости от её высоты и типа соединительной решётки;
- стрелы длиной более 10 м собираются из отдельных секций – корневой, головной и промежуточных.

1.2. Расчётная схема стрелы

При составлении расчётной схемы геометрическими размерами стрелы и точек ее крепления относительно башни необходимо предварительно задаться, основываясь на существующих типах конструкций и исходя из следующих эмпирических соотношений, которые получены на основании статистической обработки размеров выпускаемых типов кранов (рис. 1.3):

- поперечное сечение башни (квадрат):
поворотной

$$a_6 = (0,9-1,1) \cdot \frac{H}{19}, \text{ м}; \quad (1.1)$$

неповоротной

$$a_6 = (0,9-1,1) \cdot \frac{H}{16}, \text{ м}; \quad (1.2)$$

– высота оголовка башни от шарнира пяты стрелы

$$h_r = (0,8-1,2) \cdot \frac{R}{3,6}, \text{ м}; \quad (1.3)$$

– расстояние от оси башни до оси пяты стрелы

$$x_c = 0,5 \cdot a_6 + 0,2, \text{ м}; \quad (1.4)$$

– расстояние от оси вращения крана с поворотной башней до оси пяты стрелы

$$x_n = (0,55-0,6) \cdot a_6 + x_c, \text{ м}; \quad (1.5)$$

– высота вертикальной фермы стрелы

$$h = (0,9-1,1) \cdot \frac{R}{22}, \text{ м}. \quad (1.6)$$

В вышеприведенных соотношениях приняты следующие условные обозначения:

H – максимальная высота подъема груза, м;

L – длина стрелы, м;

R – максимальный вылет груза, м.

В кранах с неповоротной башней ось вращения крана совпадает с осью башни.

Ширину горизонтальной фермы у пяты стрелы необходимо принять равной по размеру башни – $b_1 = a_6$. На практике применяются два типа горизонтальных ферм – с параллельными поясами на всей длине ($b_1 = b$) и с трапецеидальной частью у пяты стрелы (рис. 1.3.). Во втором случае стрела и металлоконструкции грузовой тележки получаются более компактными и обладают меньшей массой, а ширину стрелы в горизонтальной плоскости b принимают равной

$$b = (0,65-0,8) \cdot b_1, \text{ м}. \quad (1.7)$$

Стрела состоит из пролетной части b и консольной l_1 (рис. 1.3). Длина консольной части стрелы назначается в зависимости от длины стрелы и максимальной грузоподъемности крана по графику грузоподъемности в техническом задании на проектирование – в пролётной части и на конце стрелы. Для существующих типов кранов она колеблется в пределах

$$l_1 = (0,3-0,5) L. \quad (1.8)$$

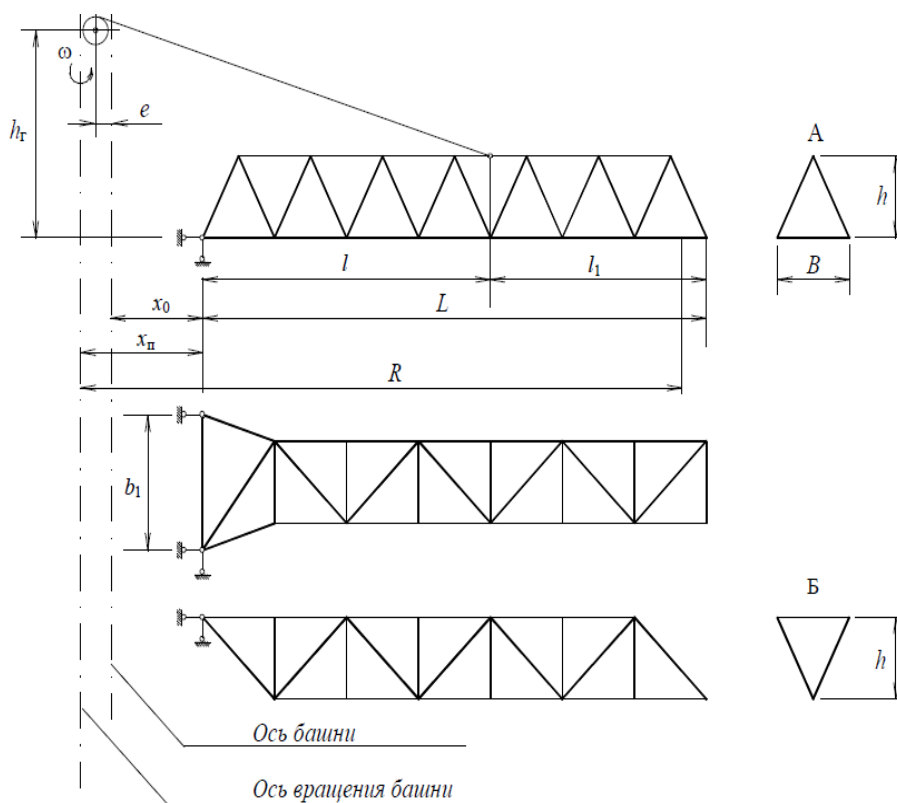


Рисунок 1.3. - Схема к расчёту геометрических размеров стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях

При увеличении длины стрелы (вылета груза) могут назначаться две точки её подвеса к башне крана.

Окончательный выбор длины консольной части стрелы производится из условия, чтобы максимальные значения изгибающего момента в середине пролётной части (от оси пяты стрелы до точки крепления расчала) и в точке крепления расчала имели бы примерно одинаковую величину при различных положениях грузовой тележки и массах поднимаемых грузов.

Точку крепления расчала назначают в узлах ферм по верхнему поясу (одному или двум) или в середине панели фермы с назначением дополнительной стойки, связывающей пояса стрелы.

С целью обеспечения технологичности изготовления стрелы длина всех панелей ферм должна быть одинаковой. Число панелей ферм и их длина будут зависеть от требуемого вылета груза – длины стрелы.

Необходимая длина стрелы для крана с поворотной башней будет равна, м:

$$L = R - x_{\Pi} + a_{\Gamma}. \quad (1.9)$$

Для крана с неповоротной башней длина стрелы для обеспечения заданного вылета груза будет равна, м:

$$L = R - x_{\Gamma} + a_{\Gamma}, \quad (1.10)$$

где $a_{\Gamma} = 1,6\text{--}2$ м – расстояние от центра подвеса груза (центра грузовой тележки) при максимальном вылете до центра последнего шарнира фермы.

В то же время длина стрелы будет определяться как произведение числа панелей ферм на их длину:

$$L = n \cdot a, \quad (1.11)$$

где n – число панелей фермы; a – длина панелей.

Длиной панелей ферм необходимо предварительно задаться в пределах 1,4–2,5 м. Большие значения следует принимать для треугольной соединительной решётки со стойками. Длину панели фермы необходимо также увязать с её высотой таким образом, чтобы угол наклона раскосов находился в пределах 35–60°. При угле наклона раскоса, равном 45°, высота фермы h будет равна половине длины панели a .

Задавшись предварительно длиной панели фермы, определяют число панелей исходя из требуемой длины стрелы. Округляя полученное число панелей в большую или меньшую сторону до целого числа, находят длину панели. Все округления числа и длины панелей в небольших пределах необходимо свести к длине a_{Γ} , которую окончательно следует определить по формуле, м:

$$a_{\Gamma} = L - R + x_{\Pi}. \quad (1.12)$$

Расстояние от центра грузовой тележки (каретки) до центра последнего шарнира ферм a_{Γ} необходимо также увязывать с её размерами – базой, расстоянием между ходовыми колёсами d . Базой 4-опорной грузовой тележки предварительно также следует задаться в пределах 1–1,4 м.

1.3. Определение веса стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы

Усилия в элементах стрелы будут возникать также от её собственного веса, веса грузовой тележки и крюковой обоймы. Их величиной при эскизном проектировании необходимо предварительно задаться, основываясь на уже существующих конструкциях кранов. Для существующих моделей кранов вес одного метра стрелы колеблется в довольно широких пределах –

$$q_c = (0,8-3), \text{ кН/м.}$$

Предварительно массу указанных узлов крана определяют в долях от массы (веса) крана, величина которой зависит от его грузоподъёмности, грузового момента и высоты подъёма груза.

Массу крана с поворотной башней ориентировочно можно определить по формуле

$$M_k = 0,35 \cdot T_{гр} \cdot \left(\frac{H}{m_q}\right)^{0,34}, \quad (1.13)$$

где $T_{гр} = m_q \cdot R$ – грузовой момент, т·м; R – максимальный вылет груза, м; m_q – грузоподъёмность крана на максимальном вылете, т; H – максимальная высота подъёма груза, м.

Массу крана с неповоротной башней ориентировочно можно определить по формуле

$$M_k = 0,36 \cdot T_{гр} \cdot \left(\frac{H}{m_q}\right)^{0,34}. \quad (1.14)$$

Вес крана будет равен $G_k = g \cdot M_k = 9,81 \cdot M_k$, кН, где $g = 9,81 (\approx 10)$ – ускорение свободного падения, м/с².

Вес стрелы можно принять равным $G_c = 0,05 \cdot G_k$. Равномерно распределённая нормативная нагрузка от собственного веса стрелы будет равна

$$q_{сн} = G_c / L, \text{ кН/м.} \quad (1.15)$$

Вес грузовой тележки ориентировочно можно принять равным $G_T = 0,01 \cdot G_k$, а вес крюковой обоймы $G_o = 0,005 \cdot G_k$.

При расчёте сил инерции, возникающих в периоды разгона и торможения механизмов крана, необходимо использовать величину массы стрелы m_c , грузовой тележки m_T и крюковой обоймы m_o , которые определяются в долях от массы крана по тем же соотношениям.

1.4. Схемы запасовки канатов

При работе крана элементы стрелы будут воспринимать составляющие усилий от канатов механизмов подъёма груза и перемещения грузовой тележки. Величина и направление действия составляющих усилий от них при различных вариантах запасовки канатов будут несколько отличаться друг от друга. Поэтому при проектировании стрелы необходимо выбрать схему запасовки канатов механизма подъёма груза. Запасовка канатов механизма подъёма груза в кранах с балочными стрелами может осуществляться по двум вариантам.

В первом варианте конец каната крепится за металлоконструкцию стрелы у её основания – пяты стрелы. После прохождения по блокам полиспаста, находящимся на грузовой тележке и крюковой обойме, он огибает направляющие блоки на конце стрелы и оголовке башни и закрепляется затем на барабане грузоподъёмной лебёдки. Такая схема запасовки каната применяется при относительно коротких стрелах. Её недостаток заключается в значительном провисании каната между стрелой и оголовком башни, что приводит к неравномерности работы механизма подъёма груза. Достоинством данного варианта запасовки каната подъёма груза является некоторое уменьшение усилия в расчале подвеса стрелы при подъёме грузов (рис. 1.4).

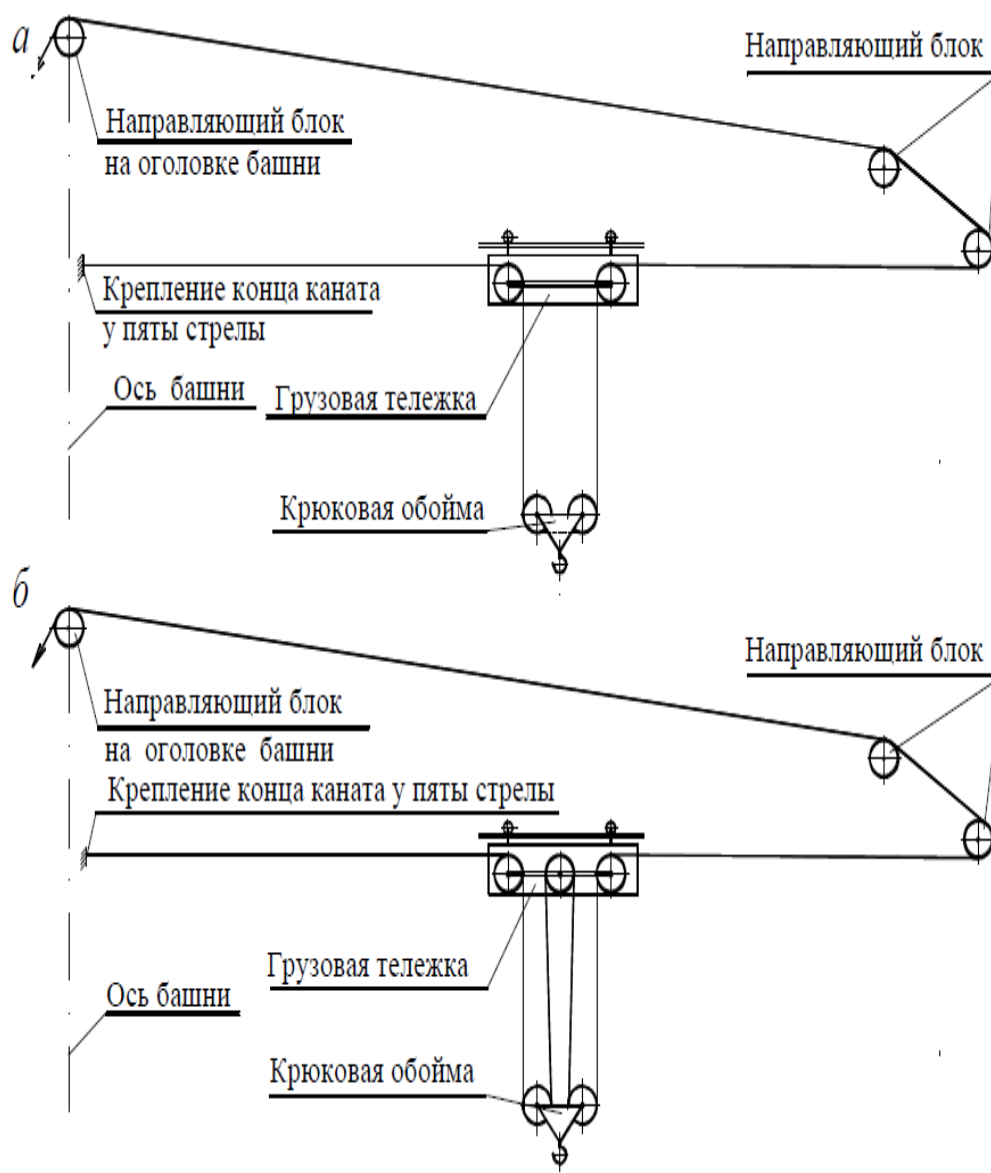


Рисунок 1.4 - Схема запасовки каната подъёма груза при закреплении его конца у пята стрелы:

a – 2-кратная; *б* – 4-кратная

Второй вариант запасовки каната подъёма груза заключается в том, что конец каната крепится к металлоконструкциям наконце стрелы. После прохождения по блокам полиспаста он огибает направляющие блоки, находящиеся у основания стрелы и на оголовке башни, и затем крепится на барабане грузоподъёмной лебёдки. Такая схема запасовки каната механизма подъёма груза может применяться при стрелах любой длины (рис. 1.5).

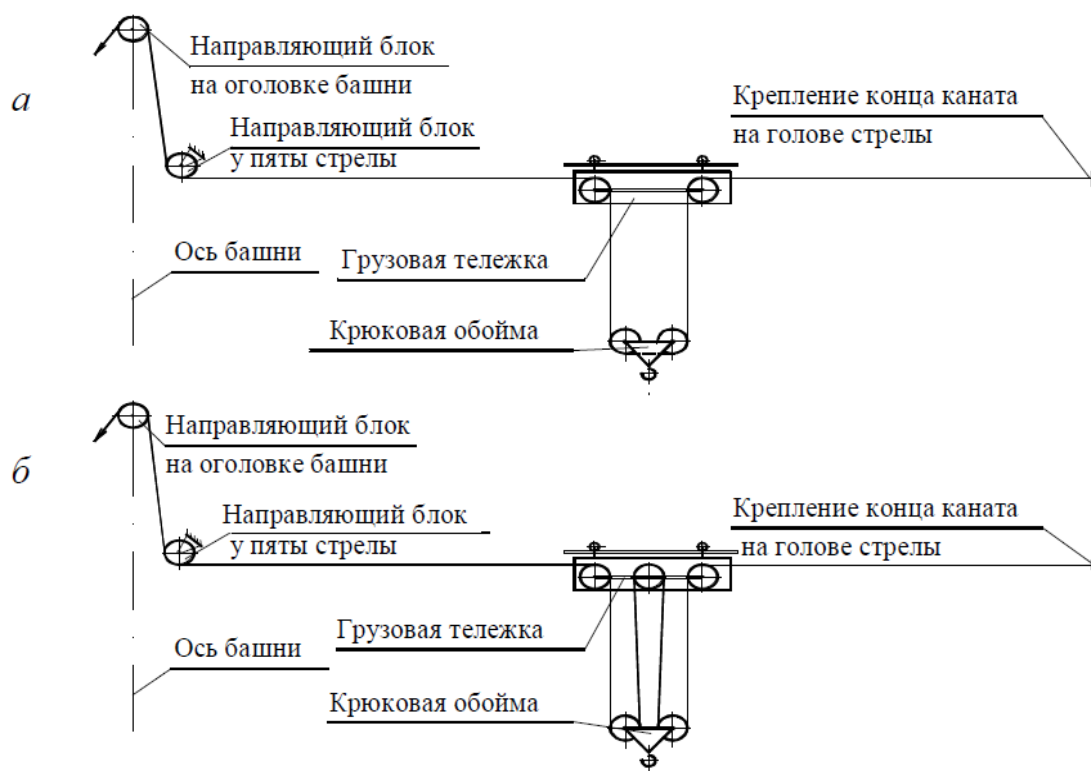


Рисунок 1.5 - Схема запасовки каната механизма подъёма груза при закреплении его конца на голове стрелы:

a – 2-кратная; *б* – 4-кратная

Схема запасовки каната механизма передвижения грузовой тележки показана на рис. 1.6.

Через обводные блоки или закрепления, находящиеся на голове стрелы, она будет воспринимать сжимающие усилия от канатов механизмов подъёма груза и передвижения грузовой тележки.

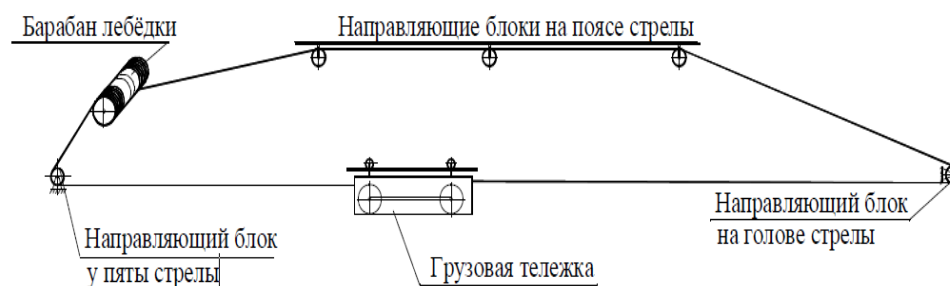


Рисунок 1.6 - Схема запасовки каната механизма передвижения грузовой тележки

2. Расчет нагрузок в вертикальной плоскости

Горизонтальная балочная стрела башенного крана воспринимает нагрузки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом расчетные схемы стрелы и действующие нагрузки будут различны.

2.1. Расчётный режим

Определение расчетных нагрузок, действующих на стрелу, производится при таком режиме работы крана, при котором они достигают наибольших величин при самом неблагоприятном их сочетании. Такое сочетание внешних нагрузок возникает при разгоне (торможении) механизма вращения крана с одновременным торможением опускающегося груза. Масса груза принимается максимальной для данного вылета. При этом на стрелу и груз действует допустимое для рабочего состояния крана давление ветра.

В указанном режиме работы крана расчётные элементы стрелы воспринимают наибольшие усилия при нахождении грузовой тележки с максимальным грузом, согласно графику его грузоподъёмности, в двух положениях – в середине пролётной части и на конце стрелы (рис. 2.1).

При таких положениях грузовой тележки на стреле наибольшие изгибающие моменты будут возникать в середине пролётной части и в точке крепления расчала.

С целью технологичности изготовления стрелы её пояса и соединительную решётку изготавливают из одного типа профильного проката. Из этого следует, что нет необходимости определять усилия во всех стержнях ферм стрелы, а только в таких, в которых усилия от всех нагрузок достигают максимального значения. По этим усилиям и производится подбор сечений поясов и соединительной решётки ферм стрелы.

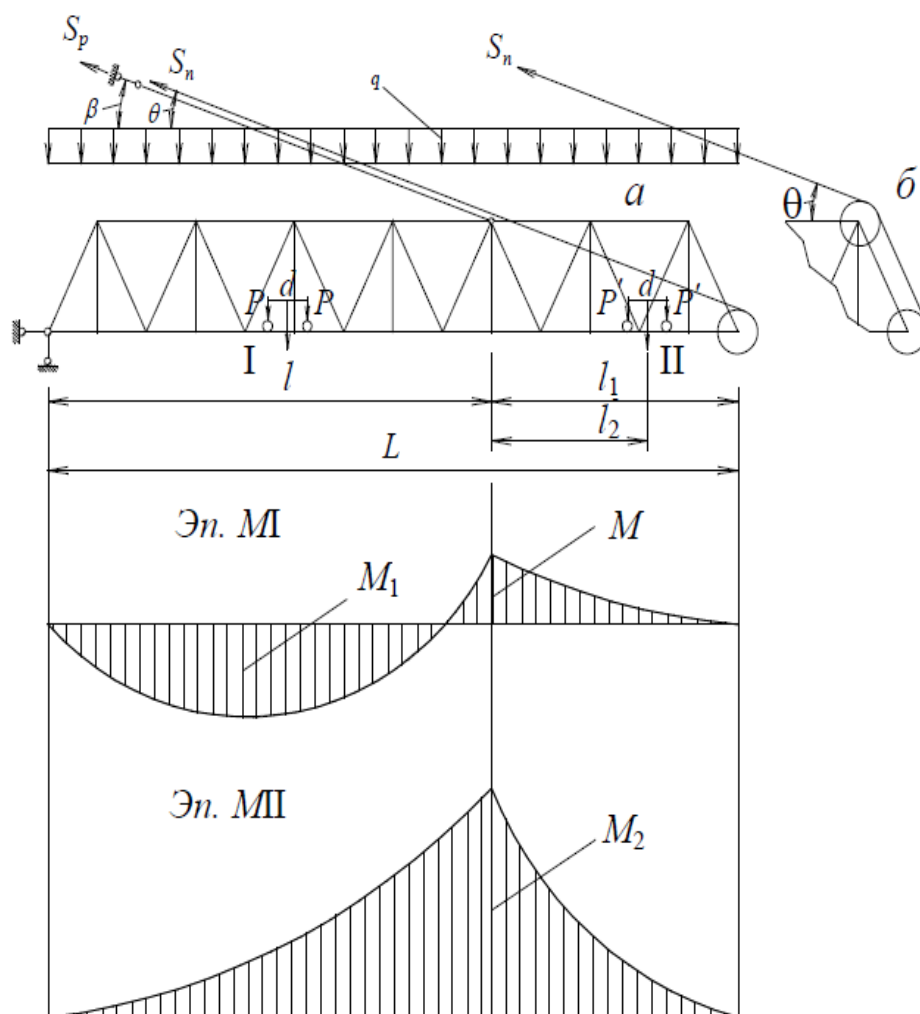


Рисунок 2.1 - Схема к расчёту нагрузок на стрелу и эпюры изгибающих моментов в вертикальной плоскости:

a – вариант без обводного блока на верхнем поясе стрелы; $б$ – вариант с дополнительным обводным блоком на верхнем поясе стрелы

На стрелу крана в вертикальной плоскости действуют следующие нагрузки:

- от собственного веса;
- давления ходовых колёс грузовой тележки;
- составляющих от усилий в канатах подъёма груза, перемещения грузовой тележки и расчала подвеса стрелы.

Так как усилия в элементах ферм от давления ходовых колёс грузовой тележки изменяются как по величине, так и по знаку при её перемещении, их

следует определять по *линиям влияния усилий* в этих стержнях. По ним же определяются усилия в стержнях от собственного веса стрелы.

2.2. Собственный вес стрелы

Расчёт металлоконструкций кранов выполняется по методу предельных состояний. Расчётная величина нагрузки от собственного веса стрелы определится как произведение нормативного её значения, умноженного на коэффициент надёжности по нагрузке (перегрузке) для собственного веса конструкций:

$$q_v = k_g \cdot q_{сн}, \quad (2.1)$$

где $k_g = 1,1$ – коэффициент надёжности по нагрузке для собственного веса конструкций.

2.3. Сосредоточенные подвижные нагрузки от давления ходовых колес грузовой тележки

Грузовая тележка (каретка) перемещается по нижнему поясу стрелы и имеет 4 ходовых колеса при грузоподъемности крана до 10 т. При массе поднимаемого груза свыше 10 т, как правило, устанавливают 8 ходовых колёс по 4 с каждой стороны с целью уменьшения местного давления на нижние пояса.

Давление ходового колеса на пояс стрелы будет суммироваться от веса поднимаемого груза Q , грузовой тележки G_t , крюковой обоймы с полиспастом G_o и инерционных нагрузок $P_{ин}$, возникающих при подъеме груза.

Расчётная нагрузка от давления ходового колеса на пояс стрелы будет равна:

$$P = \frac{1}{n} [Q \cdot k_q + (G_o + G_t) \cdot k_g + P_{ин}], \quad (2.2)$$

где Q – вес поднимаемого груза, кН; n – число ходовых колёс тележки; k_q – коэффициент надёжности по нагрузке для массы поднимаемого груза (коэффициент перегрузки).

Его значение принимается в зависимости от режима работы крана и грузоподъемности по таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Значения коэффициента перегрузки

Масса груза	Режим работы крана		
	A1–A3	A4–A5	A6–A8
До 1,5	1,2	1,4	1,5
1,5–10	1,15	1,25	1,35
Свыше 10	1,1	1,2	1,3

Масса поднимаемого груза у свободностоящих башенных кранов зависит от вылета, в соответствии с графиком грузоподъемности, поэтому при расчете стрелы это необходимо учитывать. При нахождении грузовой каретки в пролетной части стрелы в расчет берется нормативное значение массы груза $Q_1 = Q_{\max}$ – максимальное, а при нахождении на конце стрелы – $Q_2 = Q_{\min}$ – минимальное. Это значит, что и различные будут расчетные значения давления ходовых колес грузовой каретки – P_1 и P_2 , то есть их необходимо рассчитать дважды.

Инерционная нагрузка, возникающая при резком подъеме (торможении) груза, определяется исходя из условия постоянства ускорения по известной формуле

$$P_n = M \cdot a = M \cdot \frac{V_n}{t_p} \quad (2.3)$$

где M – масса поднимаемого груза и крюковой обоймы, (кг, т); V_n – скорость подъема груза, м/с; t_p – время разгона (торможения) груза, с.

Рекомендуемое значение $t_n = 1–3$ с. Большие значения – при больших поднимаемых массах.

Стержни нижних поясов подвержены также местному изгибу от давления ходовых колес грузовой тележки. Момент изгибающий определится по формуле при $d \geq a/2$

$$M_n = 0,5 \cdot 0,7 \cdot P \cdot a = 0,35 \cdot P \cdot a, \quad (2.4)$$

где P – нагрузка на ходовое колесо, Н; 0,7 – коэффициент учета жесткости узла; a – длина панели фермы, м; d – расстояние (база) между колесами грузовой тележки.

2.4. Составляющие от усилий в канатах подъема груза, перемещения грузовой тележки и расчала

Их численные значения следует определять для двух положений грузовой каретки и соответственно различных масс поднимаемого груза Q_1 и Q_2 в соответствии с графиком грузоподъемности крана.

Усилие в канате механизма подъема груза определяется по формуле

$$S_n = \frac{Q \cdot k_q + G_o \cdot k_g + P_n}{i \cdot \eta} \quad (2.5)$$

где i – кратность полиспаста механизма подъема груза; η – к.п.д. полиспаста, значение которого можно принять равным 0,9–0,92.

Кратность полиспаста механизма подъёма груза необходимо принять в пределах 2–4 в зависимости от массы поднимаемого груза.

Усилие в канате перемещения грузовой каретки S_t определяется при расчёте канатного механизма передвижения грузовой каретки. Предварительно его можно принять в пределах 2–4 кН.

Усилие в расчале стрелы S_p определится из суммы моментов всех нагрузок и усилия S_b , вертикальной составляющей от усилия в канате подъёма груза S_n , относительно пяты стрелы по уравнению

$$S_p = \eta \{ [Q \cdot k_q + (G_o + G_T) \cdot k_g + P_n] \cdot X + 0,5 \cdot q_b \cdot L^2 - S_b \cdot L \}, \quad (2.6)$$

где X – координата положения центра тяжести грузовой тележки относительно пяты стрелы; η – коэффициент, определяемый по формуле

$$\eta = \frac{1}{l \cdot \sin \beta + h \cdot \cos \beta}$$

При расположении обводных блоков грузового каната на конце стрелы на неё будет действовать вертикальная составляющая от каната подъёма груза $S_v = S_n \cdot \sin \theta$. Она несколько уменьшит усилие в расчале и изгиб консольной части стрелы.

Для башенных кранов, у которых схема запасовки грузоподъемного каната предусматривает закрепление свободного конца на голове стрелы, составляющая « $S_v \cdot L$ » в уравнении (2.6) будет равна нулю (см. рис. 1.5).

Усилие в расчале также необходимо определять для двух положений грузовой тележки: 1 – в середине пролётной части стрелы при $X = 1/2 \cdot l$ и весе груза $Q = Q_1$ и 2 – на конце стрелы при $X = L - a_T$ и весе груза $Q = Q_2$ (см. рис. 1.7 и 2.1).

Составляющая от усилия в расчале

$$N_v = S_p \cdot \cos \beta \quad (2.7)$$

воспринимается как сжимающее усилие верхним и нижним поясами стрелы – от точки крепления расчала до пяты стрелы. Его необходимо определять для двух расчётных положений грузовой тележки. На один нижний пояс стрелы H_1 будет приходиться половина составляющей от расчала N_v .

Продольные усилия от канатов механизма подъема груза S_n и перемещения грузовой каретки S_T через обводные блоки воспринимаются как сжимающая нагрузка элементами нижнего пояса.

$$N_k = 2S_T + S_n \cdot (1 + \cos \theta), \quad (2.8)$$

где θ – угол наклона грузоподъемного каната.

На один нижний пояс стрелы будет приходиться усилие, равное

$$N = S_T + 0,5 \cdot S_n (1 + \cos \theta). \quad (2.9)$$

При расположении на верхнем поясе стрелы дополнительного направляющего блока каната подъёма груза, во избежание его трения о металлоконструкции, угол его наклона несколько изменится. Однако в данном случае этим можно пренебречь. На верхний пояс стрелы в этом случае будет

действовать незначительное поперечное усилие. Это усилие будет восприниматься раскосами вертикальных наклонных ферм.

При схеме запасовки канатов подъёма груза, в которой один конец каната крепится на голове стрелы, нижние пояса будут воспринимать сжимающее усилие, равное $N_k = 2S_T + S_n$. На один пояс будет приходиться половина усилия

$$N = S_T + 0,5 \cdot S_n. \quad (2.10)$$

Эпюры изгибающих моментов, действующих на стрелу при различных положениях грузовой тележки, представлены на рис. 2.1.

Изгибающий момент при нахождении тележки в середине пролетной части стрелы и подъеме максимального груза будет равен

$$M_1 = 0,25 \cdot q_b \cdot l \cdot \left[0,5 \cdot l - \frac{l_1^2}{l} \right] + 0,25 \cdot l \cdot [Q_1 \cdot k_q + (G_0 + G_T) \cdot k_g + P_{\text{И}}], \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

а в точке крепления расчала стрелы

$$M_1 = 0,25 \cdot q_b \cdot l_1^2 \quad \text{кН} \cdot \text{м}. \quad (2.12)$$

При нахождении грузовой тележки на конце стрелы и подъёме Q_2 изгибающий момент в точке крепления расчала будет равен

$$M_2 = 0,5 \cdot q_b \cdot l_1^2 \cdot [Q_2 \cdot k_q + (G_0 + G_T) \cdot k_g + P_{\text{И}}] \cdot l_2, \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.13)$$

При конструировании равнопрочной конструкции стрелы необходимо, чтобы моменты изгибающие M_1 и M_2 были примерно равны, а следовательно, и усилия в поясах стрелы. Этого можно добиться соответствующим назначением размеров пролётной l и консольной части стрелы l_1 .

2.5. Линии влияния в стержнях ферм стрелы

Усилия в стержнях ферм стрелы будут зависеть от положения грузовой тележки на стреле. При этом они будут изменяться как по величине, так и по знаку (плюс – растяжение, минус – сжатие), характеризующему вид деформации данного стержня фермы. В зависимости от этого по-разному производится подбор сечений стержней фермы.

При перемещении по конструкции подвижной нагрузки опорные реакции и внутренние усилия (*усилия в стержнях ферм стрелы, моменты изгибающие и поперечные силы в балках*) определяют по методу линий влияния, которые показывают изменение их величины в зависимости от её положения. По ним также определяют положение нагрузки на конструкции, при котором они достигают максимального значения.

Таким образом, линия влияния какого-либо силового фактора представляет собой график его изменения в зависимости от положения подвижной сосредоточенной нагрузки на конструкции. Она строится от подвижной единичной нагрузки $P = 1$ и действительна только для того силового фактора и элемента или сечения конструкции, для которого построена.

Величина силовых факторов будет измеряться в долях «единицы» или в относительных единицах. Для построения линии влияния необходимо составить аналитическое уравнение, которое бы характеризовало в общем виде изменение силового фактора в зависимости от положения подвижной нагрузки на конструкции.

Рассмотрим построение линий влияния опорных реакций и усилий в стержнях вертикальных ферм стрелы (рис. 2.2).

Линии влияния опорных реакций

Составим аналитические уравнения для их определения. Для этого составим сумму моментов сил относительно опор стрелы.

$$\Sigma M_B = 0. R_A \cdot l - P(l - x) = 0. R_A = \frac{l-x}{l}, \quad (2.14)$$

$$\Sigma M_A = 0. P \cdot x - R_B \cdot l = 0. R_B = \frac{x}{l}. \quad (2.15)$$

По полученным уравнениям, задаваясь различными значениями « X », найдём ординаты линий влияния опорных реакций для характерных точек. Из полученных зависимостей следует, что они являются уравнениями прямой

линии. Следовательно, для её построения достаточно найти две точки и соединить их прямой линией.

Опорная реакция R_A :

1. При $X = 0$ $R_A = 1$.
2. При $X = l$ $R_A = 0$.
3. При $X = L$ $R_A = -l_1/l = \frac{-10a}{16a} = -0,63$.

Знак «минус» в данном случае показывает изменение направления действия опорной реакции при нахождении подвижной нагрузки на консольной части стрелы. Но в любом сечении стрелы сумма опорных реакций равна внешней нагрузке, то есть в данном случае «1».

Опорная реакция R_B :

1. При $X = 0$ $R_B = 0$.
2. При $X = l$ $R_B = 1$.
3. При $X = L$ $R_B = \frac{L}{l} = \frac{26a}{16a} = 1,63$.

По полученным ординатам построенные линии влияния опорных реакций приведены на рис. 2.2.

Рассмотрим построение линий влияния усилий в расчётных стержнях стрелы. Для этого вертикальную ферму стрелы условно рассекаем на две части – левую и правую, проведя сечения 1-1 и 2-2. То есть там, где под действием внешних нагрузок в стреле возникают максимальные изгибающие моменты, о чём говорилось выше.

В эти сечения должны попасть стержни фермы, в которых возникнут максимальные усилия и линии влияния для которых необходимо построить.

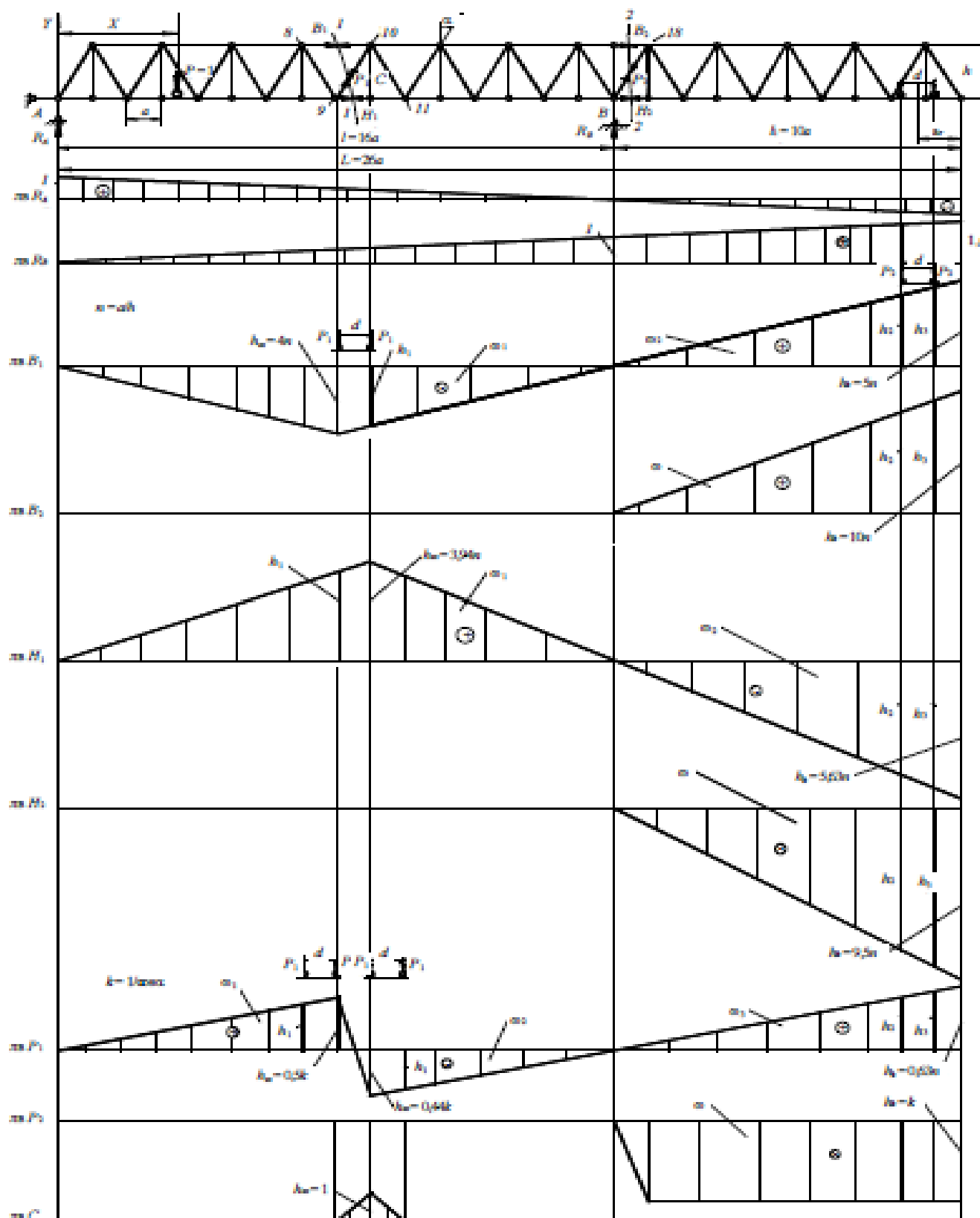


Рисунок 2.2 - Линии влияния в стержнях фермы стрелы

Принцип построения линий влияния усилий в стержнях стрелы заключается в следующем. Рассматривается равновесие одной части фермы при подвижной нагрузке $P = 1$, находящейся на второй её части, но строится линия влияния под той частью фермы, на которой в этот момент находилась подвижная нагрузка. Эта часть линии влияния называется *действительной*, а остальная – *фиктивной*.

При построении линий влияния в стержнях ферм за основу принимаются аналитические уравнения опорных реакций, приведенные выше, а также общие методы статики, применяемые при расчёте ферм на неподвижную нагрузку.

Линия влияния усилия в стержне B_1

Рассмотрим равновесие левой части фермы. Подвижная нагрузка $P = 1$ будет находиться справа от сечения 1-1, то есть на правой части фермы. В сечение 1-1 попадают три неизвестных нам усилия, два из которых – P_1 и H_1 не должны входить в уравнение равновесия, так как в данный момент они нас не интересуют. Для этого воспользуемся так называемой «моментной точкой Риттера». Для стержня B_1 такой точкой будет являться узел фермы нижнего пояса «9», в котором пересекаются усилия стержней P_1 и H_1 , раскоса и нижнего пояса.

Воспользуемся третьим уравнением статики. Сумма моментов всех сил, действующих на левую часть фермы относительно этой точки, должна быть равна нулю.

$$\Sigma M_9 = 0. R_A \cdot 8a + B_1 h = 0,$$

$$B_1 = -R_A \cdot \frac{8a}{h} = -\frac{l-x}{l} \cdot \frac{8a}{h} = -\frac{16a-x}{16a} \cdot 8n$$

где

$n = \frac{a}{h}$ – отношение длины панели фермы к высоте.

Задаваясь значениями « x » для характерных точек, найдём ординаты линии влияния усилия B_1 .

1. При $x = 8a$ $B_1 = -\frac{16a-8a}{16a} \cdot 8n = -0,5 \cdot 8n = -4n$.
2. При $x = 16a$ $B_1 = 0$.
3. При $x = L = 26a$ $B_1 = -\frac{16a-26a}{16a} \cdot 8n = 5n$.

По этим ординатам строим правую часть линии влияния, для построения левой прямой достаточно соединить нулевую ординату под опорой «А» и ординату h_m под узлом фермы «9». Ординаты линии влияния усилий измеряются в относительных единицах.

Линия влияния для стержня вертикальной фермы B_1 построена на рис. 2.2. Она показывает, что стержень B_1 будет испытывать как сжимающее, так и растягивающее усилие при нахождении грузовой тележки на конце стрелы. Максимальные их значения от давления ходовых колёс грузовой тележки определяются посредством перемножения и суммирования внешних нагрузок на ординаты под ними на линии влияния по формулам:

$$\begin{aligned} & - \text{усилие сжатия} - B_{1P} = -2P_1(h_T + h_1); \\ & - \text{усилие растяжения} B_{1P} = 2P_2(h_2 + h_3). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ординаты h_1 , h_2 и h_3 определяются из подобия треугольников линии влияния по соотношениям

$$\begin{aligned} h_1 &= h_T \cdot \frac{8 \cdot a - d}{8 \cdot a}, \\ h_2 &= h_K \cdot \frac{l_1 - a_T - 0,5 \cdot d}{l_1}, \\ h_3 &= h_K \cdot \frac{l_1 - a_T + 0,5 \cdot d}{l_1}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

В формулах (2.17) d – принятое расстояние (база) между ходовыми колёсами грузовой тележки. Усилие в стержне B_1 от собственного веса стрелы определяется по формуле

$$B_{1g} = q_B(-\omega_1 + \omega_2), \quad (2.18)$$

где ω_1 , ω_2 – площади, описываемые линией влияния усилия, взятые со своими знаками, которые покажут, сжимается или растягивается стержень от собственного веса стрелы; q_B – расчётная равномерно распределённая нагрузка от собственного веса стрелы.

Линия влияния усилия в стержне B_2

Усилие в стержне фермы B_2 возникнет только в том случае, когда подвижная нагрузка будет находиться на консольной части стрелы. Составим уравнение равновесия консольной части стрелы.

$$\Sigma M_B = 0. P \cdot l_1 - B_2 \cdot h = 0,$$

$$B_2 = \frac{l_1}{h} = \frac{10a}{h} = 10n.$$

Это значит, что стержень B_2 верхнего пояса всегда растянут, а усилия в нём определяются по формулам (2.16), (2.17) и (2.18)

$$B_{2P} = 2 \cdot P_2(h_2 + h_3), B_{2g} = q_v \cdot \omega.$$

Линия влияния усилия в стержне H_1

Для построения линии влияния в стержне H_1 нижнего пояса стрелы рассмотрим равновесие левой части фермы при нагрузке $P = 1$, находящейся на правой части. Из условия её равновесия следует, что сумма моментов всех сил относительно узла фермы «10» равна нулю.

$$\Sigma M_{10} = 0. R_A \cdot 9a - H_1 \cdot h = 0, H_1 = R_A \cdot \frac{9a}{h} = \frac{l-x}{l} = \frac{16a-x}{16a} \cdot 9n.$$

1. При $x = 9a$ $H_1 = \frac{7a}{16a} \cdot 9n = 3,94 \cdot n.$

2. При $x = 16a$ $H_1 = 0.$

3. При $x = L = 26a$ $H_1 = \frac{16a-26a}{16a} \cdot 9n = -\frac{10}{16} \cdot 9n = -5,63n.$

По этим данным строим правую часть линии влияния, а левую прямую проводим, соединяя нулевую ординату под опорой «А» и ординату под узлом фермы «10».

Усилия в стержне H_1 определяем по вышеприведенным формулам (2.16) – (2.18), но с учётом того, что нижних пояса два:

$$H_{1P} = P_1(h_m + h_1); -H_{1P} = P_2(h_2 + h_3), \quad (2.19)$$

$$H_{1g} = 0,5q_v(\omega_1 - \omega_2). \quad (2.20)$$

Линия влияния усилия в стержне H_2

Уравнение для построения линии влияния стержня H_2 получим из рассмотрения равновесия консольной части стрелы относительно узла фермы «18», где пересекаются усилия стержней верхнего пояса и раскоса – B_2 и P_2

$$\Sigma M_{18} = 0. P \cdot 9a + H_1 \cdot h = 0. H_2 = -h \frac{9a}{h} = -9a.$$

Стержни нижнего пояса в консольной части стрелы работают только на сжатие. Усилия в них от внешних нагрузок определяем аналогичным образом, как и выше:

$$-H_{2P} = P_2 (h_2 + h_3), -H_{2q} = 0,5q_B \cdot \omega.$$

Линия влияния усилия в стержне P_1

При построении линии влияния в раскосах воспользуемся первым уравнением статики $\Sigma Y = 0$. В этом случае в уравнение равновесия не будут входить усилия в стержнях верхнего и нижнего поясов. Рассмотрим равновесие левой части фермы. $P = 1$ будет находиться на правой части фермы.

$$\Sigma Y = 0. R_A + P_1 \cdot \cos \alpha = 0,$$

$$P_1 = -R_A \cdot \frac{1}{\cos \alpha} = -\frac{l-x}{l_1} \cdot k = -\frac{16a-x}{16a} \cdot k.$$

$$k = \frac{1}{\cos \alpha}.$$

Угол наклона раскоса α будет равен:

$$\alpha = \arctg \frac{0,5 \cdot a}{h}.$$

1. При $x = 9a$ – конец рассечённой панели фермы

$$P_1 = -\frac{16a-9a}{16a} \cdot k = -\frac{7}{16} \cdot k = -0,44k$$

2. При $x = 0$ $P_1 = 0$.

3. При $x = L = 26a$ $P_1 = -\frac{16a-26a}{16a} \cdot k = \frac{10}{16} \cdot k = 0,63k$

По этим данным строим правую часть линии влияния.

Рассмотрим равновесие правой части фермы при $P = 1$, находящейся на левой части.

$$\Sigma Y = 0. R_B - P_1 \cdot \cos \alpha = 0,$$

$$P_1 = R_B \cdot \frac{1}{\cos \alpha} = \frac{x}{l} \cdot k = \frac{x}{16a} \cdot k.$$

1. При $x = 0$ $P_1 = 0$.

2. При $x = 8a$ – начало рассечённой панели фермы

$$P_1 = \frac{8a}{16a} \cdot k = 0,5 \cdot k.$$

По полученным ординатам строим левую прямую линии влияния. Ординаты под узлами фермы «9» и «10» соединяем переходной прямой, которая должна быть направлена примерно перпендикулярно раскосу (рис. 2.2).

Так как в данном случае раскос испытывает растягивающее усилие дважды – при нахождении грузовой тележки на левой и консольной части стрелы, его необходимо определять для двух положений тележки. В дальнейший расчёт принимается наибольшее его значение по абсолютной величине.

Усилия в раскосе определяются по формулам (2.19), (2.20) и будут равны:

- усилие растяжения $P_{1P} = P_1(h_m + h_1)$ и $P_{1P} = P_2(h_2 + h_3)$;
- усилие сжатия $-P_{1P} = -P_1(h_m + h_1)$;
- усилие от собственного веса стрелы $P_{1g} = 0,5q_v(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$.

Линия влияния в раскосе P_2

Усилия в раскосе P_2 будут возникать только в случае нахождения подвижной нагрузки $P = 1$ на консольной части стрелы. Из условия её равновесия найдём

$$\Sigma Y = 0. P + P_2 \cdot \cos \alpha = 0.$$

$$P_2 = -\frac{1}{\cos \alpha} = -k.$$

Линия влияния будет представлять собой прямоугольник и на длине одной панели – треугольник с ординатой, равной k . Раскос всегда будет работать только на сжатие (рис. 2.2). Максимальные усилия в нём будут равны:

$$-P_{2P} = -2 \cdot P_2 \cdot k, \quad -P_{2g} = -0,5q_6 \cdot \omega.$$

Линия влияния в стойке С

Стойка в данной соединительной решётке представляет собой одиночный стержень, работающий только на местную нагрузку, то есть когда подвижная нагрузка $P = 1$ будет находиться в пределах двух соседних панелей фермы. При «езде» по нижнему поясу стрелы она будет работать только на растяжение. Максимальное усилие в стойке будет равно $C = 1$. При нахождении подвижной нагрузки за пределами двух смежных панелей усилие в стойке будет равно нулю (рис. 2.2).

3. Расчет нагрузок в горизонтальной плоскости

Нагрузки в горизонтальной плоскости возникают вследствие ветрового давления и сил инерции стрелы с грузом во время разгона или торможения при

повороте крана. Расчетная схема стрелы в горизонтальной плоскости и действующие на неё нагрузки, а также эпюры изгибающих моментов приведены на рис. 3.1.

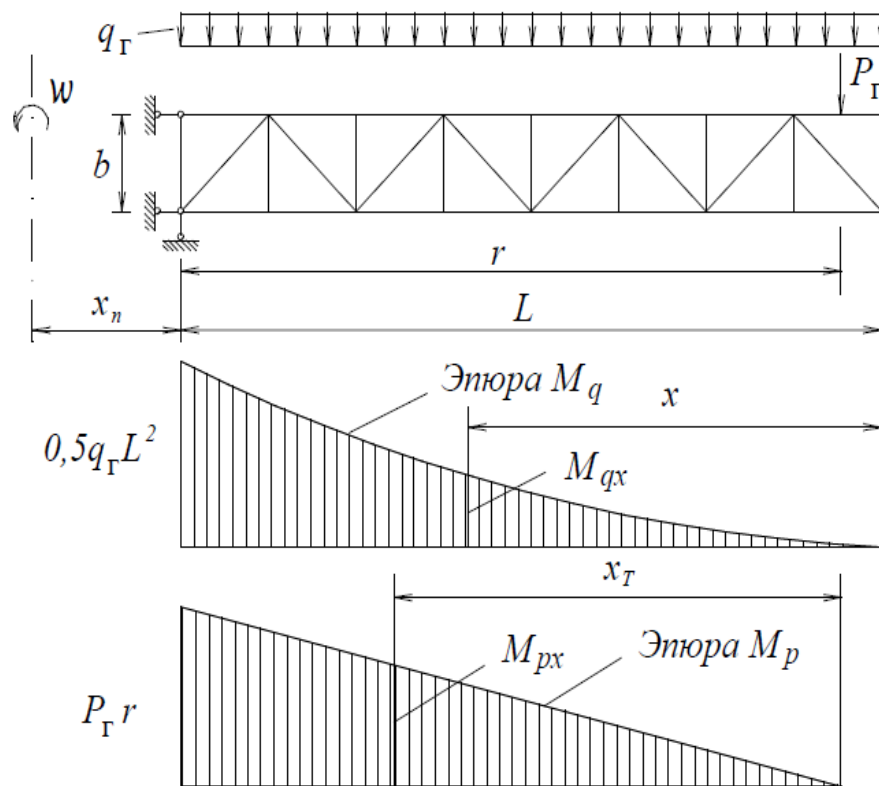


Рисунок 3.1 - Схема нагрузок на стрелу и эпюры изгибающих моментов в горизонтальной плоскости

3.1. Расчёт ветровых нагрузок

Ветровые нагрузки определяют на основании нормативного давления ветра по ГОСТ 1451–77

$$W = p \cdot F, \quad (3.1)$$

где F – наветренная площадь стрелы или груза, м²; p – скоростной напор или динамическое давление ветра, Па.

$$p = 0,5\rho\vartheta^2,$$

где $\rho = 1,23$ – плотность воздуха, кг/м³; ϑ – скорость воздуха, м/с.

Скорость воздуха при ветре непостоянна и характеризуется пиковыми значениями, что предопределяет динамичность ветрового воздействия. Метод расчета давления ветра на объект основывается на учете кинетической энергии движущегося воздуха (скоростного напора), который определяет наибольшее возможное давление в движущемся с некоторой скоростью воздушном потоке в точках, где скорость обращается в нуль.

Так как в различных географических пунктах ветер неодинаков, вся территория России разбита на *семь* ветровых районов с различными предельными скоростями воздуха на высоте до 10 м над уровнем земли. Основная территория страны относится к I–III районам, горные районы и побережья морей – к IV–V районам, северные и северо-восточные побережья – к VI–VII районам.

Расчётная удельная ветровая нагрузка определяется по формуле

$$p = p_v \cdot k \cdot c \cdot n, \quad (3.2)$$

где k – коэффициент возрастания скоростного напора в зависимости от высоты над поверхностью земли; c – аэродинамический коэффициент, учитывающий характер обтекания объекта воздушным потоком; p_v – нормативное давление ветра для данного района.

Коэффициент перегрузки n для ветровых нагрузок рабочего состояния кранов принимается равным 1, для нерабочего – 1,1.

Таблица 3.1 - Значения высотного коэффициента k

Высота над уровнем земли, м	10	20	40	60	100
Значение k	1	1,25	1,55	1,75	2,1

Примерные значения аэродинамического коэффициента c для решетчатых конструкций:

из труб 0,8–1,2

из уголков 15–19

Нормативное динамическое давление ветра « p_v » на высоте до 10 м над поверхностью земли для всех типов кранов принимают равным 125 Па, а при

установке кранов в портах – 250 Па. Для нерабочего состояния крана скоростной напор ветра принимается в зависимости от района установки крана. Для I–III ветровых районов 270–450 Па.

Наветренная площадь стрелы определяется по формуле

$$F = F_k \cdot \phi, \quad (3.3)$$

где F_k – площадь стрелы по ее контуру, м²; ϕ – коэффициент заполнения, равный 0,2–0,4 для ферм из труб, 0,2–0,6 для ферм из прямоугольных профилей.

Для конструкций из труб расчетная наветренная площадь может быть уменьшена умножением на поправочный коэффициент 0,75.

Площадь груза определяется в зависимости от грузоподъемности крана по формуле

$$F_q = 3,2 Q \quad (3.4)$$

или по следующим данным:

Масса груза, т	3,2	5	10	16	20	25
Площадь груза, м ²	5,6	7,1	10	14	16	18

Ветровую нагрузку на груз необходимо определять для груза Q_2 , расположенного в крайнем положении на конце стрелы, так как в этом случае радиус её приложения будет наибольшим, а следовательно, и моменты изгибающие.

3.2. Расчёт инерционных нагрузок

Инерционные нагрузки, действующие на стрелу, возникают во время разгона или торможения её при повороте с грузом. Величина их будет зависеть от углового ускорения, вращаемых масс и радиусов поворота.

Касательная сила инерции от массы стрелы является равномерно распределенной нагрузкой по ее длине с меньшей интенсивностью у её основания и большей в голове стрелы. Однако её можно заменить эквивалентной сосредоточенной равнодействующей силой инерции, величина которой определяется по формуле, кН

$$P_{и.с} = \frac{m_c \cdot \omega}{t_B} \cdot (x_{\pi} \cdot 0,5 \cdot L), \quad (3.5)$$

а точка ее приложения равна:

$$l_c = \frac{1}{3} L \left[\frac{3X_n + 2L}{2X_n + L} \right], \quad (3.6)$$

где $m_c = G_c/g$ – масса стрелы, т; G_c – вес стрелы, кН; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; L – длина стрелы, м; X_n – расстояние от оси вращения крана до оси пяты стрелы, м; $\omega = (\pi \cdot n)/30$ – угловая скорость, с^{-1} (радиан в секунду); n – частота вращения поворотной части, об/мин; t_B – время разгона поворотной части крана, с.

Время разгона (торможения) определяется из расчета механизма поворота крана. Нормативное его значение составляет 5–10 с.

В случае приведения касательной силы инерции к голове стрелы ее величина определяется по формуле

$$P_{и.с} = \frac{m_c \cdot \omega}{3 \cdot t_B} \left[\frac{X_n^2 + X_n \cdot L + L^2}{X_n + L} \right], \quad (3.7)$$

а момент изгибающий от неё в этом случае определяется как от сосредоточенной силы.

Касательные силы инерции от массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы определяются по формуле, кН

$$P_{иг} = (m_g + m_0 + m_t) \cdot \frac{\omega}{t_B} \cdot (X_{\pi} + r), \quad (3.8)$$

где r – расстояние от оси пяты стрелы до грузовой тележки на стреле; m_g , m_0 , m_t – масса груза Q_2 , крюковой обоймы и грузовой тележки, т.

Наибольшие изгибающие моменты в расчётных сечениях стрелы возникнут при нахождении грузовой тележки в крайнем положении на стреле и подъёме максимального груза Q_2 .

В этом случае

$$r = L - a_{\Gamma}, \quad (3.9)$$

где L – длина стрелы; a_{Γ} – расстояние от центра грузовой тележки при её крайнем положении до конца стрелы.

Нагрузки, действующие в горизонтальной плоскости, воспринимаются только двумя нижними поясами горизонтальной фермы. Это связано с треугольной формой поперечного сечения стрелы.

3.3. Суммарные горизонтальные нагрузки

Суммарная равномерно распределенная нагрузка в горизонтальной плоскости (рис. 3.1) будет равна:

$$q_{\Gamma} = \frac{W_c + P_{и.с}}{L}, \quad (3.10)$$

где W_c – ветровая нагрузка на стрелу; $P_{и.с}$ – инерционная нагрузка от массы стрелы; L – длина стрелы.

Момент изгибающий от нагрузки q_{Γ} в расчетном стержне панели будет равен:

$$M_{q,x} = 0,5q_{\Gamma} \cdot X^2, \quad (3.11)$$

где X – расстояние от головы стрелы до конца панели фермы, в стержнях которой определяются усилия.

Для стержня нижнего пояса H_1 (сечение 1-1) оно будет равно:

$$X_1 = l_1 + a \cdot n, \quad (3.12)$$

где l_1 – длина консольной части стрелы; a – длина панели фермы; n – число панелей фермы от точки крепления расчала до конца рассечённой панели (включая и её).

Для стержня нижнего пояса H_2 (сечение 2-2)

$$X_2 = l_1. \quad (3.13)$$

Для основания стрелы $X_o = L$. (3.14)

По этим данным определяются изгибающие моменты для различных сечений и строится эпюра изгибающих моментов от равномерно распределённой нагрузки q_r .

Сосредоточенная горизонтальная нагрузка на стрелу будет равна:

$$P_r = W_r + P_{и.г}, \quad (3.15)$$

где W_r – ветровая нагрузка на груз, кН; $P_{и.г}$ – инерционная нагрузка от массы, крюковой обоймы и грузовой тележки, кН.

Момент изгибающий от нагрузок P_r будет равен:

$$M_{p.x} = P_r \cdot X_r, \quad (3.16)$$

где X_r – расстояние от центра тяжести грузовой каретки до конца панели, в стержнях которой определяются усилия.

Для сечения 1-1 оно будет равно

$$X_{r1} = l_1 - a_r + a \cdot n. \quad (3.17)$$

Для сечения 2-2 оно будет равно

$$X_{r2} = l_1 - a_r. \quad (3.18)$$

Для сечения у основания стрелы

$$X_{ro} = L - a_r. \quad (3.19)$$

По определённым моментам изгибающим для трёх сечений стрелы от нагрузки P_r строится эпюра изгибающих моментов (рис. 3.1).

Усилия в стержнях нижних поясов от нагрузок (моментов изгибающих) в горизонтальной плоскости будут равны:

$$H_{q1} = \pm \frac{M_{q1}}{b}, \quad S_{rp} = \pm \frac{M_p}{b} \quad (3.20)$$

где M_q , M_p – изгибающие моменты от равномерно распределенной и сосредоточенной нагрузок, определённых для той панели фермы, усилия в стержнях которой определяются; b – ширина горизонтальной фермы по центрам поясов.

Знак « $\pm$ » в данном случае означает, что стержень нижнего пояса стрелы будет испытывать растягивающее или сжимающее усилие в зависимости от направления вращения крана.

4. Определение максимальных усилий в расчетных стержнях стрелы

Максимальное усилие в расчётном стержне фермы будет равно сумме усилий от всех нагрузок: *составляющих от усилий в канатах, собственного веса, подвижных, горизонтальных.*

Суммирование производится только при одновременном их действии, то есть с учётом режима работы крана и положения грузовой тележки на стреле при подъёме максимального груза для данного вылета. Таким режимом будет являться подъём груза с одновременным его поворотом в ту или другую сторону.

Для стержней пролётной части стрелы (*сечение 1-1*) суммарные усилия в них необходимо определять для двух положений грузовой тележки – в середине пролётной части стрелы и на консольной в крайнем положении. Согласно построенным линиям влияния усилий для этой группы стержней, они испытывают от подвижной нагрузки деформацию как растяжения, так и сжатия. А так как подбор сечений элементов в зависимости от вида деформации производится по-разному, то это значит, что для каждого стержня фермы необходимо знать максимально возможные усилия как растяжения, так и сжатия, которые он будет воспринимать при работе крана.

В стержнях консольной части стрелы максимальные усилия будут возникать при крайнем положении грузовой тележки. Они будут испытывать только один вид деформации – сжатие или растяжение.

Определенные усилия в каждой группе стержней от всех нагрузок удобнее свести в таблицу и подсчитать суммарные.

Рассмотрим суммирование усилий в стержнях фермы от внешних нагрузок. При этом определяющим будет являться усилие, возникающее от давления ходовых колёс грузовой тележки P в каждом стержне фермы.

Таблица 4.1 - Суммарные усилия в расчётных стержнях стрелы

Номер	Усилия от нагрузок, кН				Суммарные		$M_{п},$ кН·м
	канатов $S_p, S_{п},$	собств. веса	подвижных P	горизонталь- ных	«-»	«+»	

	S_T	q_B	«-»	«+»	q_Γ	P_Γ			
B_1	$-N_{B1}$ $-N_{B2}$	$-B_{1g}$	$-B_{1P}$	B_{1P}	-	-	$-B_1$	B_1	-
B_2	0	B_{2g}	0	B_{2P}	-	-	0	B_2	-
H_1	$-N_1$	H_{1g}	$-H_{1P}$	H_{1P}	$\pm H_{q1}$	$\pm H_{p1}$	$-H_1$	H_1	M_Π
H_2	$-0,5N_{B1}$ $-N_2$ $-0,5N_{B2}$	$-H_{2g}$	$-H_{2P}$	0	$\pm H_{q2}$	$\pm H_{p2}$	$-H_2$	0	M_Π
P_1	0	P_{1g}	$-P_{1P}$	P_{1P}	-	-	$-P_1$	P_1	-
P_2	0	$-P_{2g}$	$-P_{2P}$	0	-	-	$-P_2$	0	-
C	0	C_g	0	C_p	-	-	0	C	-

Стержень верхнего пояса B_1

Максимальное *сжимающее* усилие возникнет при нахождении грузовой тележки в середине пролётной части стрелы и будет равно сумме усилий от давления ходовых колёс, собственного веса стрелы и составляющей от усилия в расчале

$$-B_1 = -(B_{1P} + B_{1g} + N_{B1}). \quad (4.1)$$

Максимальное *растягивающее* усилие стержень испытывает при нахождении грузовой тележки на конце стрелы. Однако в это же время он будет испытывать усилия от собственного веса и составляющей от расчала стрелы

$$B_1 = B_{1P} - B_{1g} - N_{B2}. \quad (4.2)$$

Соотношение этих усилий по абсолютной величине покажет вид деформации – сжатие или растяжение будет испытывать стержень B_1 .

Стержень верхнего пояса B_2

Стержень при работе крана испытывает только *растягивающее* усилие, которое будет равно:

$$B_2 = B_{2P} + B_{2g}. \quad (4.3)$$

Стержень нижнего пояса H_1

Максимальное *растягивающее* усилие стержень будет испытывать при нахождении грузовой тележки в середине пролётной части фермы. Оно будет равно:

$$H_1 = H_{1P} + H_{1g} - N_1 - 0,5N_{B1} + H_{q1}. \quad (4.4)$$

Максимальное *сжимающее* усилие он будет воспринимать при нахождении грузовой тележки на конце стрелы, которое будет равно:

$$-H_1 = -H_{1P} + H_{1g} - N_2 - 0,5N_{B2} - H_{q1} - H_{P1}. \quad (4.5)$$

Стержень нижнего пояса H_2

Стержень при работе крана будет воспринимать максимальное *сжимающее* усилие только при расположении грузовой тележки на конце стрелы. Оно будет равно:

$$-H_2 = -(H_{2P} + H_{2g} + N_2 + 0,5N_{B2} + H_{q2} + H_{P2}). \quad (4.6)$$

Раскос соединительной решётки P_1

Особенностью работы раскоса в пролётной части фермы является то, что в зависимости от его направления к оси стрелы при перемещении грузовой тележки он будет испытывать дважды деформацию – или *растяжения*, или *сжатия*. Для дальнейших расчётов необходимо определить максимальное его значение по абсолютной величине от подвижной нагрузки из двух возможных.

Максимальное *растягивающее* усилие будет равно:

$$P_1 = P_{1P} + P_{1g}. \quad (4.7)$$

Максимальное *сжимающее* усилие будет равно:

$$-P_1 = -P_{1P} + P_{1g}. \quad (4.8)$$

Раскос соединительной решётки P_2

Раскос относится к консольной части стрелы и будет испытывать только *сжимающее* усилие при расположении грузовой тележки на консольной части стрелы, которое будет равно:

$$-P_2 = -(P_{2P} + P_{2g}). \quad (4.9)$$

При изменении его направления к оси стрелы на $\sim 90^\circ$ раскос будет испытывать только деформацию растяжения.

Стойка С

Суммарное усилие в *стойке С* будет равно сумме усилий от собственного веса стрелы и давления ходовых колёс грузовой тележки.

$$C = C_P + C_q. \quad (4.10)$$

При «езде» по нижнему поясу стрелы стойка будет работать только на *растяжение*.

5. Подбор сечений элементов стрелы

При проектировании стрелы, как уже говорилось ранее, стремятся применить не более трех-четырёх типов различных по параметрам сечений прокатных профилей: верхний и нижний пояс, элементы решетки.

Для изготовления крановых стрел обычно применяют прокатный профиль из малоуглеродистых сталей марки Ст.3 группы В (сталь класса С245), сталь 10, сталь 20, а также низколегированные стали. Выбор марки стали определяется её механическими и технологическими характеристиками, а также минимальной температурой эксплуатации крана. Допустимая температура эксплуатации малоуглеродистой стали Ст.3 составляет – 40 °С.

5.1. Расчёт элементов, работающих на растяжение

Подбор сечения растянутых элементов производится из условия прочности. Минимальная площадь сечения элемента определяется по формуле

$$F_{\min} = \frac{S}{m \cdot R}, \quad (5.1)$$

где S – максимальное усилие растяжения, принимаемое из таблицы разд. 4 для однотипных элементов; R – предельное сопротивление стали несущей способности при расчёте конструкций по методу предельных состояний, МПа; m – коэффициент условий работы.

Предельное расчетное сопротивление углеродистой стали несущей способности ВСт.3сп (пс) равно 210 МПа (21 кН/см²), для низколегированной 10ХСНД, 15ХСНД – 310 МПа (31 кН/см²) при действии осевых сил (сжатие, растяжение).

По полученному значению площади сечения и принятого типа прокатного профиля по сортаменту подбирают его размеры. Выбранное сечение прокатного профиля проверяется по напряжению

$$\sigma = \frac{S}{F} \leq m \cdot R \quad (5.2)$$

Если полученные напряжения в стержне не отвечают этому условию при принятом значении площади F выбранного прокатного профиля, то выбирают большее или меньшее значение F по сортаменту прокатного профиля и снова производят проверку напряжений. Такую проверку и подбор площади сечения прокатного профиля следует производить до тех пор, пока не получат приемлемое соотношение напряжений.

Коэффициент условий работы принимается в пределах 0,75–1. Для стержней, потеря прочности которых вызывает разрушение всей конструкции, – 0,8–0,9, из одиночных уголков – 0,75, для раскосов из труб – 1.

5.2. Расчёт элементов, работающих на сжатие

Подбор сжатых элементов ферм производится из условия *устойчивости*. Для этого предварительно определяют минимальное значение площади сечения сжатого элемента по формуле

$$F_{\min} \geq \frac{S}{\varphi \cdot m \cdot R}, \quad (5.3)$$

где φ – коэффициент продольной устойчивости или понижения несущей способности сжатого элемента.

Коэффициент φ определяется по специальным таблицам в зависимости от *гибкости стержня и марки стали*. Величина его меньше 1. Предварительно его можно принять равным 0,7–0,8 – для элементов поясов и 0,5–0,6 – для элементов соединительной решётки. Или задаться гибкостью, которая бы находилась в пределах 40–60 – для элементов поясов и 80–120 – для элементов решетки, и по таблице для принятой марки стали предварительно определить коэффициент φ_n .

Зная требуемое значение площади, выбирают сечение прокатного профиля по сортаменту и производят определение фактических напряжений. Для этого сначала определяют гибкость сжатого стержня по формуле

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{r_{\min}}, \quad (5.4)$$

где μ – коэффициент приведения длины, учитывающий условия закрепления концов стержня; l – геометрическая длина стержня по осям узлов ферм; $r_{\min}$ – радиус инерции сечения, см.

Радиус инерции сечения для прокатного профиля указан в сортаменте. Для труб радиус инерции сечения можно приближенно принимать равным

$$r_{\min} = \frac{\sqrt{2}}{4} (D_H - \delta) \cong 0,354(D - \delta), \quad (5.5)$$

где D_H и δ – наружный диаметр и толщина стенки трубы.

Для сложных составных сечений радиус инерции определяют по формуле

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{I}{F}}, \quad (5.6)$$

где I – момент инерции сечения относительно одной из осей симметрии (x или y), определяемый по известным формулам курса сопротивления материалов, см^4 ; F – площадь сечения элемента, см^2 .

Моменты инерции для труб определяются по уравнению

$$I_x = I_y = \frac{\pi}{64} (D_H^4 - D_B^4),$$

где D_H , D_B – наружный и внутренний диаметры трубы.

Для составного коробчатого элемента нижнего пояса стрелы (рисунок) моменты инерции определяются по уравнениям

$$I_x = 2 \left[\frac{\delta \cdot (h - \delta)}{12} + \frac{b \cdot \delta^3}{12} + \left[\frac{h}{2} \right]^2 \cdot b \cdot \delta \right] \text{ см}^4,$$

$$I_y = 2 \left[\frac{\delta \cdot b^3}{12} + \frac{(h - b) \cdot \delta^3}{12} + (h - \delta) \cdot \delta \cdot [b_n - \delta]^2 \right] \text{ см}^4, \quad (5.7)$$

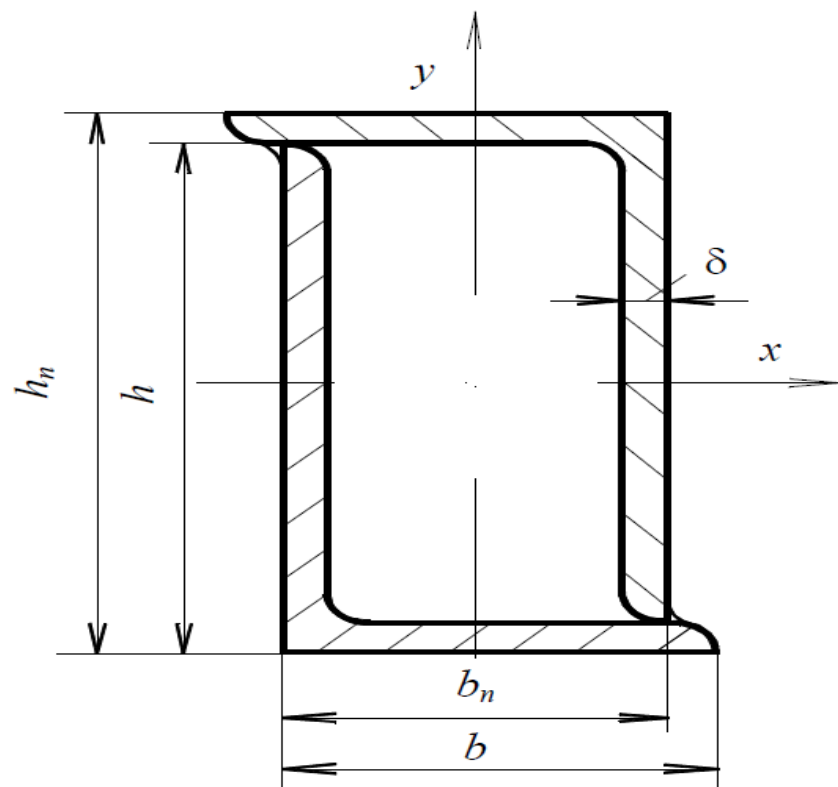


Рисунок 1.1 - Схема сечения нижнего пояса стрелы

При расчёте стержней ферм считается, что они в узлах закреплены шарнирно. Коэффициент приведения длины для стержней поясов стрелы принимается равным $\mu = 1$, для стоек решетки $\mu = 0,8$, для раскосов в зависимости от отношения погонных жесткостей стержней пояса и раскоса – по табл. 5.1.

Таблица 5.1 - Значения коэффициента приведения длины

	Значения μ при отношениях $E_n = l_p/r_{\min}$						
E_n	80	100	120	140	160	180	200
$K_n \leq 2$	0,98	0,89	0,83	0,77	0,74	0,72	0,70
$K_n \geq 6$	0,92	0,84	0,78	0,74	0,70	0,70	0,70

Примечание. l_p и $r_{\min}$ – длина и радиус инерции раскоса.

$$K_n = \frac{I_n \cdot l_p}{l_p \cdot a}, \quad (5.8)$$

где a – длина стержня пояса; I_n, I_p – минимальные моменты инерции сечений стержней пояса и раскоса.

Определив коэффициент продольной устойчивости в зависимости от гибкости и марки стали (табл. 5.2), находят фактические напряжения в рассчитываемом элементе по формуле $\max S m R$,

$$\sigma_{\max} = \frac{S}{\varphi \cdot F} \leq m \cdot R \quad (5.9)$$

где S – максимальное сжимающее усилие для рассчитываемой группы стержней по таблице разд. 4.

Если при фактическом φ площадь сечения элемента такова, что требуется переход к профилю с другими параметрами, то расчет следует повторить. При этом для раскосов и стоек по условию предельной гибкости при сжатии не следует применять уголки с шириной полки менее 1/35 (40×40×4) и трубы диаметром менее 1/50 максимальной длины, а также толщиной стенки менее 4 мм.

Стержни нижнего пояса выполняют двойную функцию: они работают на растяжение-сжатие как стержни ферм и на местный изгиб как балки на двух опорах при перемещении по ним подвижной нагрузки. При расчёте их на прочность или устойчивость это должно быть учтено.

Таблица 5.2 - Коэффициенты продольного изгиба центрально-сжатых элементов

Гибкость элемента	Ст.3	ЮХСНД	Гибкость элемента	Ст.3	ЮХСНД
0	1	1	90	0,69	0,50
10	0,99	0,98	100	0,60	0,43
20	0,97	0,95	110	0,52	0,36
30	0,95	0,92	120	0,45	0,31
40	0,92	0,89	130	0,40	0,27
50	0,89	0,82	140	0,36	0,23
60	0,86	0,77	150	0,32	0,20
70	0,81	0,68	160	0,29	0,18
80	0,75	0,59	170	0,26	0,16

Для стержней нижнего пояса, подверженных действию изгибающего момента от давления ходовых колёс грузовой тележки, проверку устойчивости проводят по уравнению

$$\sigma_{\max} = \frac{S}{\varphi \cdot F} + \frac{M_n}{W_x} \leq m \cdot R \quad (5.10)$$

где W_x – момент сопротивления сечения пояса, см^3 ; M_n – момент изгибающий, определённый выше.

В том случае, когда элемент фермы испытывает как сжимающие, так и растягивающие усилия, подбор сечения производят в зависимости от их соотношения. При равенстве усилий сжатия и растяжения – из условия сжатия. Если усилие растяжения в 1,5 и более раз превышает усилие сжатия – из условия растяжения, и проводят дополнительную проверку напряжений по усилию сжатия.

6. Расчет и конструирование узлов ферм

Узлы ферм стрелы проектируются на основании известных конструкций в зависимости от формы поперечных сечений соединяемых стержней.

Соединение раскосов и стоек с поясами осуществляется угловыми сварными швами, работающими на деформацию среза. Расчет узлов сводится в основном к расчету на прочность сварных швов, прикрепляющих стержни к поясу или косынке (фасонке). С целью уменьшения веса стрелы стремятся не применять в узлах косынки, но при этом должно обеспечиваться центрирование осей поясов и раскосов соединительной решётки.

В том случае, когда по условию прочности соединения узла и невозможности обеспечения центрирования осей элементов применение косынки необходимо, производится ее расчет на прочность.

Прочность угловых швов для стержней из уголков проверяется по напряжениям среза. Минимальная длина шва определяется по формуле

$$l_{\min} = \frac{S_p}{\beta \cdot \Delta \cdot R_{св}} \quad (6.1)$$

где S_p – усилие в стержне, кН; $R_{св}$ – предельное сопротивление для наплавленного материала шва, МПа; Δ – катет или толщина шва, см; β – поправочный коэффициент, учитывающий способ сварки, равный 0,7 – для ручной сварки, 0,85 – для однопроводной полуавтоматической сварки, 1 – для автоматической.

Расчетное сопротивление углового шва на срез для конструкций из сталей ВСт 3 – 130 МПа, 09Г2С, 10Г2СІ – 170 МПа, 10ХСНД, 15ХНСД – 200 МПа.

Катет шва обычно назначается равным толщине полки уголка или стенки трубы, но не менее 4 мм. Фактическая длина шва должна быть больше не менее чем на 1 см расчетной. Но обычно стремятся к тому, чтобы напряжения в сварном шве были значительно ниже предельных. Поэтому при

расчете соединения сначала назначают катет шва, определяют минимальную его длину, а затем назначают конструктивно.

Уголки решетки привариваются к поясу двумя фланговыми швами l_1 и l_2 , суммарная длина которых должна быть равна $l_{св}$ (рис. 6.1). Длину каждого шва находят из пропорциональной зависимости его расстояния от оси уголка

$$l_1 = l_{св} \cdot \frac{b - z_0}{b}. \quad (6.2)$$

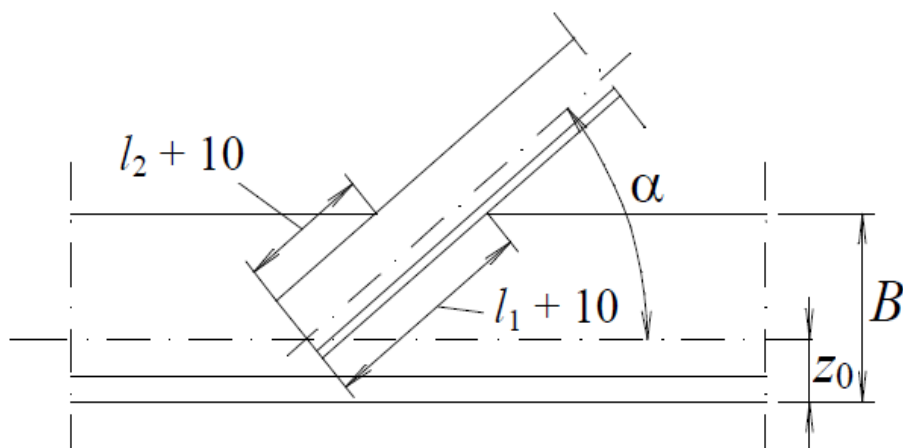


Рисунок 6.1 - Схема к определению длины сварных швов при соединении уголков решетки с поясом

Фактические напряжения в сварном шве определяют по формуле

$$\tau_c = \frac{S_p}{F} = \frac{S_p}{\beta \cdot \Delta \cdot l} \leq m \cdot R_{св}, \quad (6.3)$$

где F – суммарная площадь среза шва, см^2 ; l – конструктивная длина шва; m – коэффициент условий работы.

Расчет соединений из трубчатого профиля также ведется из условия среза, однако при этом следует иметь в виду, что при приварке необжатых труб с фигурной разделкой кромок такой расчет является условным, так как отдельные участки такого соединения приближаются к стыковым. В таких соединениях, как правило, сварные швы располагаются симметрично относительно оси центра тяжести сечения. Если они не располагаются симметрично, то рекомендуется проверять отдельно швы, лежащие по разные стороны от оси центра тяжести стержня, принимая, что каждый из них воспринимает половину усилия.

Длина замкнутого шва при приварке необжатых труб с фигурной обрезкой к трубам (рис. 6.2, а) определяется по формуле

$$l_{\text{св}} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d \cdot k_1 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot (1 - \cos \alpha) + \sqrt{\cos \alpha} \right], \quad (6.4)$$

где k_1 – коэффициент, принимаемый в зависимости от отношения d/D по табл. 6.1.

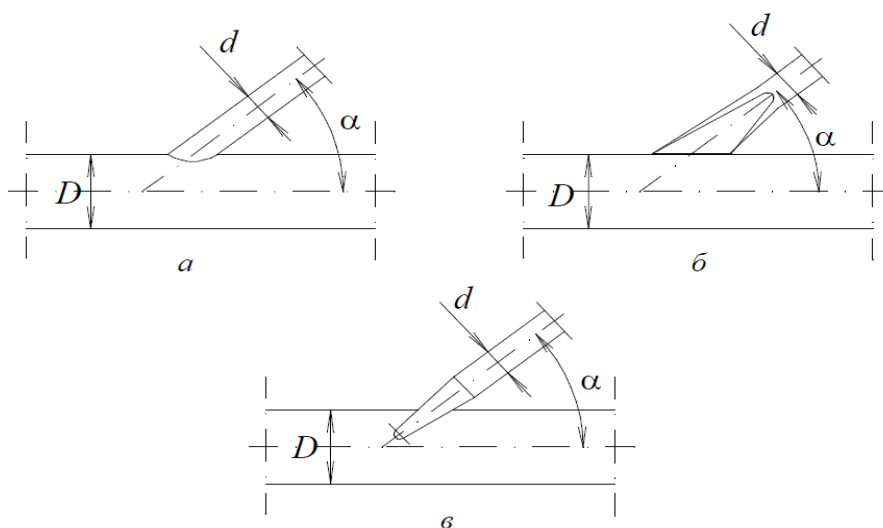


Рисунок 6.2 - Схемы сварных соединений между трубчатыми раскосами и поясами

Длину шва необжатых труб решетки можно также определить по следующей формуле:

$$l_{\text{св}} = a + b + 3\sqrt{a^2 + b^2}, \quad (6.5)$$

где

$$a = \frac{d}{2 \cdot \sin \lambda}, \quad b = \frac{b}{3} \cdot \frac{3 - \left[\frac{d}{D}\right]^2}{2 - \left[\frac{d}{D}\right]^2}.$$

Таблица 6.1 - Значения коэффициента k_1

d/D	k_1	d/D	k_1	d/D	k_1
0,2	1	0,7	1,03	0,85	1,06
0,5	1,01	0,75	1,04	0,9	1,08
0,6	1,02	0,8	1,05	0,95	1,12
				1,0	1,22

При обжатии концов трубчатых элементов решетки в осевой плоскости пояса (рис. 6.2, б), длина шва будет равна:

$$l_{св} = \frac{\pi \cdot B}{\sin \alpha}. \quad (6.6)$$

При обжатии концов трубчатых элементов решетки в плоскости, перпендикулярной к плоскости соединяемых стержней (рис. 6.2, в), длина шва будет равна:

$$l_{св} = \pi \cdot d + 1,3 \frac{d^3}{D^2} \quad (6.7)$$

При других схемах соединения труб – по фактическим данным (рис. 6.3).

Наибольшая высота углового шва в зависимости от толщины соединяемых элементов может быть принята $h_{ш} = 1,2\delta$, где δ – наименьшая из толщин свариваемых элементов.

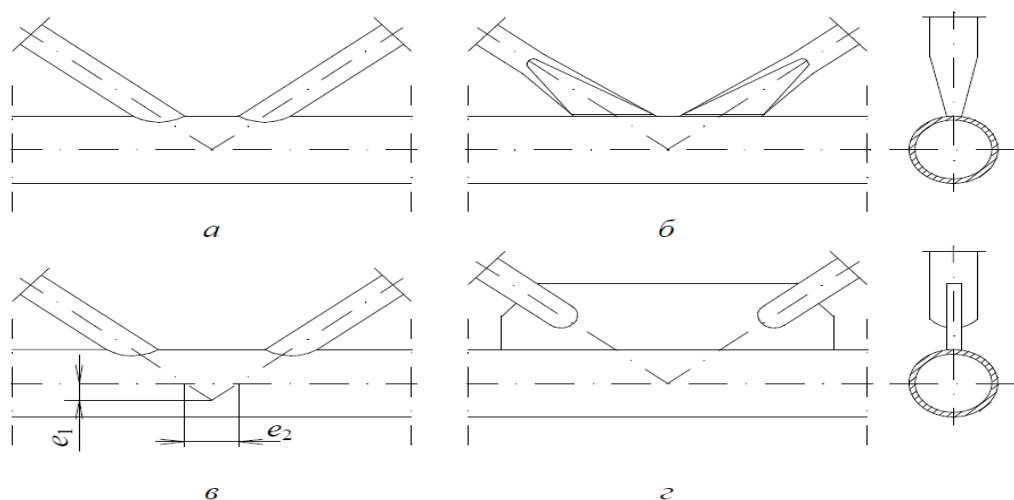


Рисунок 6.3 - Узловые соединения трубчатых решетчатых конструкций

Наибольший катет угловых швов у пера уголков следует принимать согласно соотношениям, приведенным в табл. 6.2.

Таблица 6.2 - Катет сварных угловых швов

Катет шва, мм	Толщина полки, стенки, мм	Катет шва, мм	Толщина полки, стенки, мм
4	4	8	10
4	6	10	12
6	8	12	14

Катет шва следует принимать наименьшим из всех возможных, так как с уменьшением высоты шва уменьшаются сварочные остаточные напряжения

и деформации. В секции стрелы желательно иметь не более 2–3 различных высот.

Наименьшая расчетная длина шва должна быть больше 10Δ , или не менее 40 мм. Наибольшая расчётная длина флангового шва – не более 60Δ . Расчётная длина углового шва принимается на 10 мм меньше конструктивной длины, то есть длины, указанной на чертеже. По возможности, следует стремиться к тому, чтобы расстояние между соседними швами было не менее 20 мм. Следует избегать также пересечений швов.

7. Расчет элементов стыков секций

Стрела крана разбивается на отдельные секции в местах, где, по возможности, действуют наименьшие изгибающие моменты в вертикальной плоскости. Она состоит из коренной, головной и промежуточных секций. Конструкция стыков секций стрел должна обеспечивать равнопрочность стыка по отношению к соединяемым стержням. Для предотвращения неравномерного нагружения соединительных элементов целесообразно располагать их симметрично оси центра тяжести соединяемых стержней. В современных конструкциях стрел применяют в основном два вида быстромонтируемых стыковых соединений: фланцевое соединение на болтах и соединения на пальцах (рисунок 7.1).

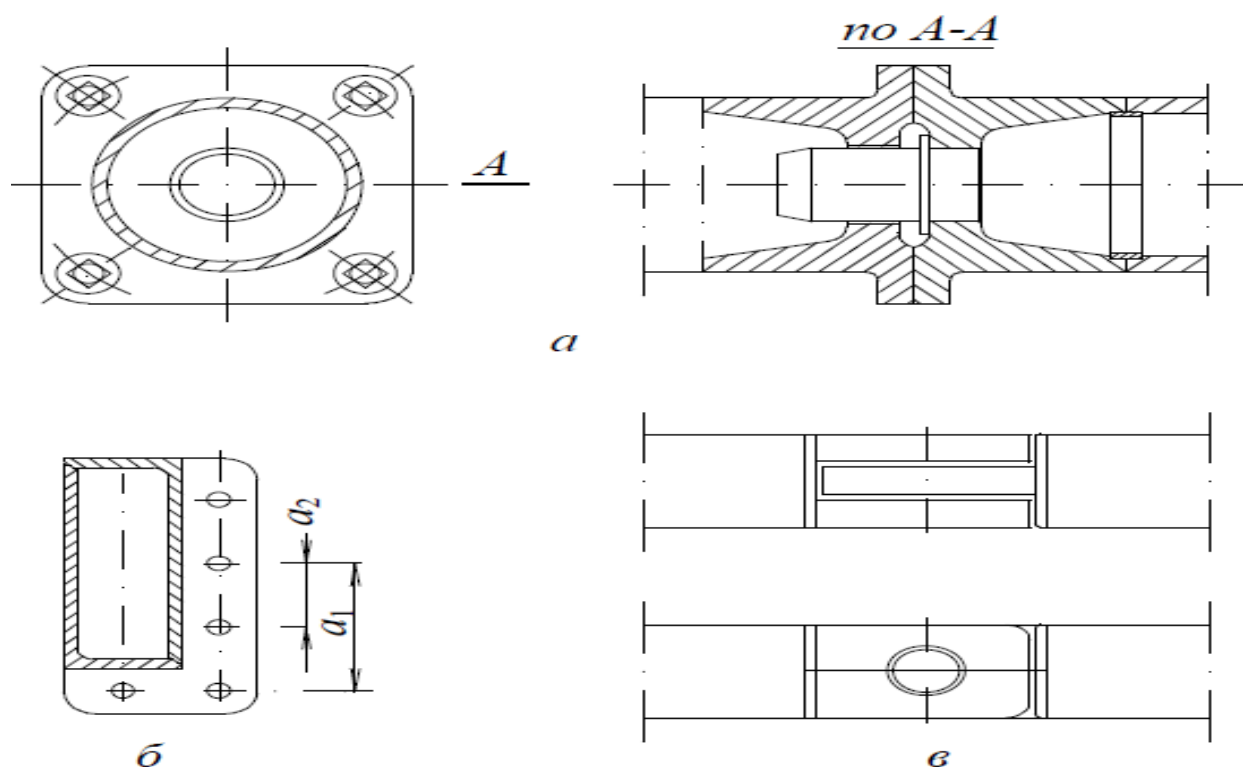


Рисунок 7.1 - Разъемные стыки поясов стрелы:

a, б – фланцевые; *в* – шарнирные

Площадь поперечного сечения одного болта фланцевого стыка, передающего только нормальные усилия (без подвижной нагрузки), из условия равнопрочности определяется по уравнению

$$F_6 = F_c \cdot \frac{R}{z \cdot R_6} \quad (7.1)$$

где F_c – площадь поперечного сечения стыкуемого стержня; z – число болтов; R – предельное сопротивление материала стыкуемого стержня; R_6 – предельное сопротивление материала болта на растяжение.

В качестве материала для изготовления болтов применяют углеродистые стали ВСт3 с расчетным сопротивлением $R_6 = 165$ МПа (16,5 кН/см²); ВСт.4, ВСт5 с $R_6 = 185$ МПа и низколегированные 14Г2, 16ГС, 15ХСНД и др. с $R_6 = 225$ МПа, а также легированные термически обработанные стали, например, 40Х, 40ХН.

В шарнирных стыковых соединениях на пальцах, воспринимающих и подвижную нагрузку, диаметр пальца из условия его равнопрочности предварительно определяется по формуле

$$d = 2,8 \cdot \sqrt[4]{F_c \cdot \frac{R}{R_{\text{и}}} \cdot \sqrt{l}} \quad (7.2)$$

где l – расстояние между средними плоскостями проушин; $R_{\text{и}}$ – предельное сопротивление материала на изгиб.

Принятый диаметр пальца следует проверить на равнопрочность по формуле

$$F \sqrt{\left[\frac{l}{0,4 \cdot d^3}\right]^2 + 3 \left[\frac{2}{\pi \cdot d^2}\right]^2} \leq \frac{R}{R_{\text{и}}} \quad (7.3)$$

Прочность проушин проверяется с использованием формулы Ламе

$$\frac{F}{2 \cdot d \cdot S} \cdot \frac{\left[r + \frac{d}{2}\right]^2 + d^2}{\left[r + \frac{d}{2}\right]^2 - d^2} \leq \frac{R_{\text{пр}}}{R} \quad (7.4)$$

где F – площадь сечения пальца; S – толщина проушины; r – наружный радиус проушины; $R_{\text{пр}}$ – предельное сопротивление материала проушины.

Эта формула используется при посадках, зазор в которых не превышает поля допуска посадки $H_{\text{н}}/d_g$ в системе ISA, рекомендуемой для подобных соединений.

Стыки поясов-рельсов коробчатого сечения со вставными стыковочными элементами по торцам выполняются на высокопрочных болтах, усилие затяжки которых должно быть таким, чтобы сила трения по плоскостям соединения элементов не была меньше сдвигающих усилий, при этом необходимо учесть также отрывающее усилие на болты, вызываемое действием момента изгибающего в месте стыка.

Для стыков фланцевого типа предварительно конструктивно назначают количество болтов и их расположение относительно центра стыкуемых поясов, а затем определяют требуемую минимальную площадь болта по формуле

$$F_6 \geq \frac{1}{0,65 \cdot \sigma_B} \left[\frac{M}{\sum \frac{a_i^2}{a_1}} + \frac{N}{z} + \frac{Q}{f \cdot z \cdot k_y} \right] \quad (7.5)$$

где M , N , Q – соответственно момент изгибающий, нормальное и поперечное усилие в поясе в месте стыка; a_i – расстояние от горизонтальной оси поперечного сечения стыка до оси болта; a_1 – расстояние от горизонтальной оси поперечного сечения стыка до оси наиболее удаленного болта; $f = 0,25$ – коэффициент трения для необработанных поверхностей; z – число болтов в стыке; $k_y = 0,9$ – коэффициент условий работы; σ_B – временное сопротивление разрыву материала высокопрочного болта после термической обработки, принимаемое равным 800 МПа для стали 35; 1100 МПа для стали 40Х и 1350 МПа для стали 40ХФА и 30ХГС.

При совпадении центра стыка с центром узла болтового соединения можно приближенно принять момент M равным нулю, а поперечную силу равной усилию давления колеса грузовой тележки.

8. Нанесение размеров и допуски на размеры

Нанесение размеров следует производить по определённом образцу. При этом следует иметь в виду, что обязательно указываемыми размерами являются на основных видах расстояние между точками пересечения осей стержней и габаритные размеры, а также все размеры, необходимые для сборки и сварки секции стрелы из заготовок, указанных в спецификации.

На дополнительных видах обязательно приводятся расстояния между кромками стержней решетки и осью, проходящей через центр узла, и другие размеры. В качестве справочных размеров могут приводиться расстояния между осями поясов (они даются на геометрической схеме ферм стрелы), расстояния от кромок стержня до центра узла и другие размеры.

Допуски на линейные размеры следует принимать согласно 14 качеству системы ISA, используя выражение

$$\Delta = 0,4(0,45 \sqrt{L} + 0,001L), \quad (8.1)$$

где L – номинальный линейный размер, мм.

Отклонения, в мм, размеров должны приводиться при постановке размеров. Шарнирные соединения выполняются с посадкой $\frac{H_{11}}{d_9}$, поля допуска которой приведены в табл. 8.1.

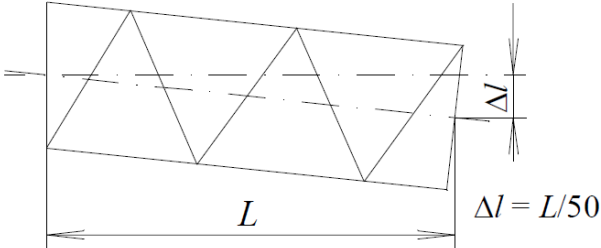
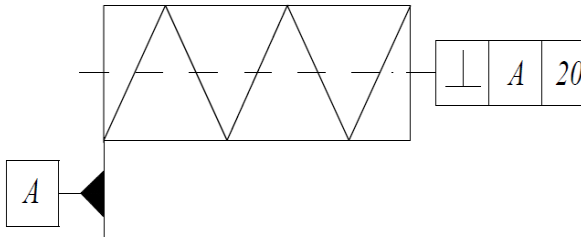
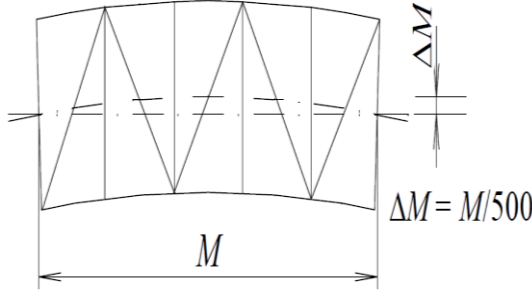
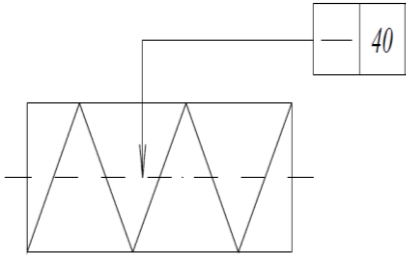
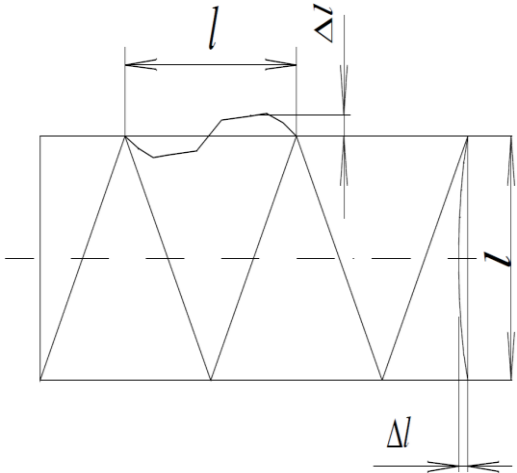
Таблица 8.1 - Поля допусков посадки

Обозначение поля допуска	Отклонения для номинальных размеров, мм					
	10-18	19-30	31-50	51-80	81-120	121-160
H_{11}	+0,110	+0,130	+0,160	+0,190	+0,220	+0,250
	0	0	0	0	0	0
d_9	-0,050	-0,065	-0,080	-0,100	-0,120	-0,145
	-0,093	-0,117	-0,142	-0,174	-0,207	-0,245

Допустимые отклонения формы секции и её элементов определяются согласно ГОСТ 13556–85 «Краны башенные строительные. Технические

требования». Величины допустимых отклонений формы сечения стрелы применительно к указанному стандарту приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2 - Предельные значения и обозначения отклонений формы на чертеже

Вид отклонения и предельно допустимая величина	Условное обозначение
Неперпендикулярность оси сечения стрелы к плоскости стыка  $\Delta l = L/500$	
Непрямолинейность оси сечения стрелы  $\Delta M = M/500$	
Непрямолинейность оси пояса, стойки или раскоса  Δl	Целесообразно заменить записью в технических требованиях с указанием вида отклонений, типов стержней и соответствующих предельных значений отклонений в мм

Обозначение перпендикулярности производится согласно ГОСТ 2.308–79. Примеры условных обозначений отклонений приведены в табл. 8.2.

Допустимая несоосность и непараллельность осей отверстий, например пальцев стыков секций и пяты стрелы, определяется исходя из допусков отверстий и пальцев.

9. Условные обозначения швов сварных соединений

Шов сварного соединения изображают: видимый – сплошной основной линией, невидимый – штриховой линией.

Условные обозначения шва наносят на полке линии-выноски, проведенной от изображения шва с лицевой и под полкой линии-выноски, проведенной от изображения шва с обратной стороны.

Согласно ГОСТ 2.312–72 за лицевую сторону одностороннего сварного шва принимают сторону, с которой производят сварку, а для двухстороннего с несимметрично подготовленными кромками принимают сторону, с которой производят сварку основного шва.

По ГОСТ 2.312–72 приняты следующие условные обозначения вспомогательных знаков для обозначения сварных швов:

о – усиление шва снять;

ω – наплывы и неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу;

† – шов выполнять при монтаже изделия;

/ – шов прерывистый или точечный с цепным расположением;

Z – шов прерывистый или точечный с шахматным расположением;

о – шов по замкнутой линии;

] – шов по незамкнутой линии (применяется, если расположение шва неясно из чертежа).

Условные знаки выполняются сплошными тонкими линиями, высота их должна быть такой же, как высота цифр, входящих в обозначение шва. Схема структурного обозначения стандартного шва приведена на рисунке.

Знак Δ и размер катета приводятся для угловых швов. При наличии одинаковых сварных швов обозначения наносят у одного из изображений, а от остальных швов проводят линии-выноски, на которые наносят порядковый номер шва.

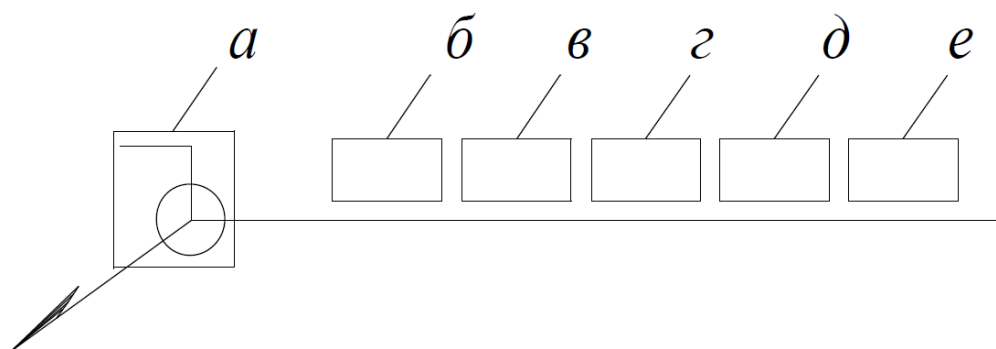


Рисунок 9.1 - Схема структурного обозначения сварного шва:

a – вспомогательные знаки шва по замкнутой линии или монтажного;
б – обозначение стандарта на типы и конструктивные элементы швов сварных соединений; *в* – буквенно-цифровое обозначение шва по стандарту;
г – знак Δ и размер катета шва согласно стандарту для угловых, тавровых и соединений внахлест (У, Т и Н); *д* – для прерывистого шва размер длины провариваемого участка, знак / или Z и размер шага; *е* – вспомогательные знаки (кроме знаков группы *a*)

Если все швы на чертеже выполнены по одному стандарту, то его обозначение указывается в технических требованиях или в таблице сварных швов. В первом случае на линиях-выносках указываются все группы вспомогательных знаков, кроме обозначения стандарта. Во втором случае на линиях-выносках указывается только номер шва и знак $\circ$ или $(\dagger)$, а все остальные обозначения указываются в таблице.

Сварочные материалы указываются на чертеже либо в таблице, либо в технических требованиях с записью типа «Сварку производить электродом Э46 ГОСТ 9467–75».

Сварные швы в сечениях не зачерняются, а наносят границы свариваемых деталей.

Таблица 9.1 - Условные обозначения швов сварных соединений

№ пп	Шов	Номер	Сварочный
	Условное обозначение	стандарта	материал
1	C10 (C19)	ГОСТ 5264–80	электрод
2	У4 Δ4		типа Э-46
3	T1 Δ5(T3)		ГОСТ 9467–75
4	H1 Δ3 (H2)		

10. Варианты заданий для выполнения курсовой работы

По государственному образовательному стандарту студенты, обучающиеся по специальности 23.05.01 должны выполнить и защитить курсовую работу до сдачи экзамена. Тема курсовой работы – расчёт и проектирование какой-либо конструкции рабочего оборудования строительных машин, в которой бы наиболее полно отражались основные темы. Такой конструкцией является балочная стрела башенного крана.

Поэтому темой курсовой работы является «Расчёт и проектирование балочной стрелы башенного крана». Исходными данными для её выполнения являются:

- тип башенного крана: с поворотной или неповоротной башней;
- грузоподъёмность: максимальная и на конце стрелы;
- вылет груза;
- высота подъёма груза;
- скорости механизмов – подъёма груза и поворота;
- режим работы крана.

Порядок выполнения проекта:

- по исходным данным необходимо предварительно задаться размерами стрелы, основываясь на прототипах, и составить её расчётную схему;
- задаться по имеющимся рекомендациям массой стрелы, крюковой обоймы, грузовой тележки; рассчитать нагрузки, действующие на стрелу в вертикальной плоскости – от собственного веса, давления ходовых колёс грузовой тележки, канатов расчала, подъёма груза и перемещения грузовой тележки;
- построить линии влияния усилий для наиболее нагруженных стержней вертикальной фермы стрелы – в середине пролётной части и около точки крепления расчала;
- определить по ним усилия в стержнях стрелы от собственного веса и давления ходовых колёс грузовой тележки;

- определить усилия в тех же стержнях стрелы от нагрузок в горизонтальной плоскости – давления ветра и сил инерции при повороте стрелы с грузом;
- найти наибольшие суммарные усилия в каждом стержне фермы – сжимающие и растягивающие;
- подобрать сечения стержней ферм стрелы, задавшись их формой: верхний пояс и раскосы, стойки – труба цельнокатаная, нижний пояс – прямоугольник, составленный из двух неравнобоких уголков;
- рассчитать сварное соединение раскоса с поясом стрелы или фланцевого соединения с поясом;
- разбить стрелу на секции, рассчитать болтовое соединение стыков стрелы;
- разработать сборочный чертёж любой секции стрелы, который бы содержал три проекции, монтажную или геометрическую схему ферм стрелы с размерами по центрам стержней, одно из фланцевых соединений, узлы ферм с условным изображением сварки;
- составить спецификацию на сборочные единицы и детали секции стрелы.

Варианты заданий представлены ниже в таблице.

Варианты заданий для выполнения курсовой работы

Вариант	Тип башни	Q, т	R, м	H, м	Режим работы	V, м/мин.	N, об/мин
01	П	5-3	18	27	A5	18	0,9
02	П	5-3	23	28	A4	16	0,9
03	П	5-3	27	30	A3	23	0,8
04	НП	5-3	30	34	A2	26	0,7
05	НП	6,3-3,2	32	35	A3	30	0,6
06	П	6,3-3,2	36	36	A5	25	0,8
07	НП	6,3-3,2	40	45	A4	16	0,6
08	П	6,3-3,2	43	50	A3	25	0,6
09	НП	6,3-3,2	24	35	A5	24	0,9
10	П	8-3,6	26	46	A3	27	0,9
11	П	8-3,6	29	28	A4	35	0,9
12	П	8-3,6	34	32	A3	30	0,8
13	П	8-3,6	40	34	A5	28	0,6

14	НП	8-3,6	43	40	A4	24	0,6
15	П	25-10	50	45	A2	12	0,6
16	П	25-10	45	46	A4	14	0,6
17	НП	25-10	40	28	A2	16	0,6
18	П	25-10	35	30	A5	18	0,7
19	П	25-10	30	34	A2	20	0,7
20	НП	10-4,8	28	36	A4	22	0,9
21	НП	10-4,8	30	38	A3	23	0,8
22	П	10-4,8	26	40	A5	24	0,9
23	П	10-4,8	34	45	A3	26	0,7
24	П	16-8	38	46	A4	27	0,7
25	НП	16-8	32	50	A5	35	0,8
26	НП	16-8	35	35	A3	24	0,7
27	НП	16-8	30	37	A4	18	0,8
28	НП	12,5-6,3	40	30	A2	24	0,6
29	П	12,5-6,3	36	34	A5	23	0,7
30	П	12,5-6,3	30	28	A3	20	0,8

Примечание к таблице заданий:

Q – грузоподъёмность крана (берётся по его графику грузоподъёмности) – максимальная 1 Q в пролётной части стрелы и 2 Q в крайнем положении грузовой тележки на конце стрелы;

R – максимальный вылет груза;

H – высота подъёма груза (крюковой обоймы);

V – скорость подъёма груза;

n – частота вращения поворотной части крана (угловая скорость);

П – поворотная башня;

НП – неповоротная башня.

Вариант задания выбирается по последним двум цифрам шифра зачётной книжки студента.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература.

1. Дарков, А.В. Строительная механика: учебник / А.В. Дарков, Н.Н. Шапошников. - СПб.: Лань, 2010. - 656с.
2. Елизаров, С. В. Строительная механика в статических и динамических расчетах транспортных сооружений учебное пособие / С.В. Елизаров. - М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. – 344 с.
3. Зузов, В. Н. Механика наземных транспортно-технологических средств: учебное пособие / В. Н. Зузов. - Москва: МГТУ им. Баумана, 2015. - 187 с.
4. Смирнов, В.А. Строительная механика: учебник для вузов / В.А. Смирнов, А.С. Городецкий; под редакцией В. А. Смирнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 423 с
5. Соколов, С. А. Строительная механика и металлические конструкции машин: учебник / С.А. Соколов. - СПб: Политехника, 2012. – 422 с.

СОРТАМЕНТ

Трубы стальные бесшовные горячекатаные по ГОСТ 8732–80

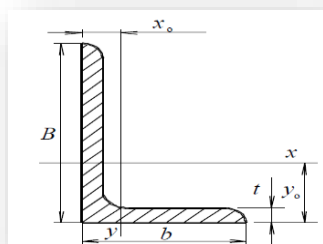
D_n , мм	S , мм	Площ. сечения, см ²	Радиус инерц., см	Масса, кг/м	D_n , мм	S , мм	Площ. сечения, см ²	Радиус инерц., см	Масса, кг/м
45	4	5,15	1,45	4,04	68	14	23,75	1,98	18,64
	5	6,28	1,42	4,93		16	26,15	1,93	20,52
50	4	5,78	1,64	4,54	70	6	12,06	2,28	9,47
	4,5	6,43	1,62	5,05		8	15,59	2,21	12,23
	5	7,07	1,60	5,55		10	18,85	2,15	14,80
	5,5	7,69	1,59	6,04		12	21,88	2,10	17,16
54	4	6,28	1,78	4,93	73	4	8,67	2,45	6,81
	5	7,69	1,74	6,04		5	10,69	2,41	8,38
	6	9,05	1,71	7,10		6	12,63	2,38	9,91
	7	10,33	1,68	8,11		8	16,33	2,32	12,82
	8	11,56	1,65	9,08		10	19,79	2,26	15,54
	9	12,72	1,63	9,99		12	23,01	2,20	18,05
	10	13,83	1,59	10,85		14	25,94	2,15	20,37
	11	14,85	1,57	14,85		16	28,66	2,10	22,49
57	4	6,66	1,88	5,23	83	4	9,92	2,82	7,79
	5	8,17	1,85	6,41		5	12,26	2,77	9,62
	6	9,62	1,82	7,55		6	14,52	2,74	11,39
	7	10,99	1,79	8,63		7	16,72	2,70	13,12
	8	12,32	1,76	9,67		8	18,86	2,67	14,80
	9	13,57	1,73	10,65		9	20,93	2,64	16,42
	10	14,76	1,68	10,65		10	22,95	2,61	18,00
	11	15,90	1,67	12,46		11	24,87	2,51	19,53
	12	16,98	1,65	13,32		12	26,75	2,55	21,01
60	4	7,04	1,99	5,52	89	4	10,68	3,01	8,38
	5	8,64	1,96	6,78		5	13,20	2,98	10,36
	6	10,18	1,92	7,99		6	15,65	2,95	12,28
	7	11,65	1,89	9,15		8	20,36	2,88	15,98
	8	13,07	1,86	10,26		10	24,83	2,82	19,48
	9	14,42	1,83	11,32		12	29,02	2,76	22,79
	10	15,72	1,81	12,33		14	33,00	2,70	25,89
	11	16,94	1,78	13,29		16	36,68	2,65	28,80
	12	18,10	1,75	14,21		18	40,16	2,59	31,52
	14	20,24	1,70	15,88		20	43,34	2,54	34,03
68	4	8,04	2,27	6,31	95	4	11,44	3,23	8,98
	5	9,89	2,24	7,77		5	14,43	3,19	11,10
	6	11,69	2,21	9,17		6	16,78	3,16	13,17
	7	13,41	2,17	10,53		7	19,35	3,12	15,19
	8	15,07	2,14	11,84		8	21,87	3,09	17,16
	9	16,69	2,11	13,10		9	24,31	3,06	19,09
	10	18,22	2,08	14,30		10	26,71	3,03	20,96
	11	19,69	2,05	15,46		12	31,30	2,97	24,56
	12	21,12	2,03	16,57		14	35,62	2,91	27,97

95	16	39,73	2,86	31,17	114	12	38,46	3,64	30,19
	17	41,66	2,83	32,70		14	43,97	3,57	34,53
	18	43,57	2,80	34,18		16	49,26	3,52	38,67
	20	47,10	2,75	36,99		20	59,09	3,40	46,36
	22	50,43	2,70	39,61		22	63,58	3,35	49,91
102	4	12,32	3,49	9,67	121	4	14,71	4,14	11,54
	5	15,24	3,44	11,69		5	18,23	4,11	14,30
	6	18,09	3,41	14,21		6	21,67	4,07	17,02
	7	20,88	3,37	16,40		7	25,07	4,04	19,68
	8	23,64	3,34	18,55		8	28,40	4,01	22,29
	9	26,30	3,31	20,64		10	34,36	3,95	27,37
	10	28,91	3,28	22,69		12	41,10	3,89	32,36
	11	31,44	3,24	24,69		14	47,05	3,82	36,94
	12	33,92	3,21	26,63		16	52,79	3,76	41,48
	14	38,72	3,16	30,38		17	55,58	3,73	43,60
	16	43,22	3,09	33,93		18	58,23	3,70	45,72
	17	45,38	3,07	35,64		20	63,41	3,65	49,82
	18	47,53	3,04	37,29		22	68,41	3,59	53,71
	20	51,23	2,99	40,44		25	75,36	3,51	59,19
	22	55,27	2,94	43,40		28	81,85	3,44	64,22
108	4	13,07	3,69	10,26	127	5	19,17	4,33	15,04
	5	16,19	3,56	12,70		6	22,81	4,29	17,90
	6	19,22	3,62	15,09		7	26,39	4,26	20,72
	7	22,21	3,58	17,44		8	29,91	4,22	23,43
	8	25,14	3,55	19,73		9	33,36	4,19	26,19
	9	28,00	3,52	21,97		10	36,75	4,15	28,85
	10	30,77	3,49	24,17		11	40,07	4,12	31,47
	11	33,52	3,46	26,31		12	43,38	4,10	34,03
	12	36,20	3,43	28,41		14	49,71	4,03	39,01
	14	41,33	3,36	32,45		16	55,79	3,97	43,80
	16	46,25	3,31	36,30		17	58,74	3,94	46,12
	17	48,62	3,28	38,15		18	61,62	3,91	48,39
	18	50,87	3,25	39,95		20	67,27	3,85	52,78
	20	55,31	3,19	43,40		22	72,59	3,80	56,97
	22	59,42	3,14	46,66		25	80,10	3,72	62,89
	25	65,23	3,07	51,17		28	87,14	3,65	68,36
	28	70,40	3,00	55,24		30	91,45	3,59	71,76
114	4	13,82	3,89	10,85	133	8	31,42	4,44	24,66
	5	17,12	3,86	13,44		10	38,65	4,37	30,33
	6	20,35	3,83	15,95		14	52,35	4,24	41,00
	7	23,54	3,80	18,47		18	65,06	4,12	51,65
	8	26,65	3,77	20,91		22	76,76	4,01	60,22
	9	29,69	3,73	23,31		25	84,82	3,93	66,59
	10	32,66	3,70	25,65		30	97,02	3,80	76,20
	11	35,61	3,67	27,94		32	101,48	3,75	79,71
140	6	25,26	4,75	19,83	159	8	37,96	5,35	29,79
	8	33,18	4,68	26,04		9	42,39	5,31	33,29
	10	40,84	4,62	32,06		10	46,80	5,29	36,75
	11	44,56	4,58	34,99		11	51,15	5,26	40,15
	12	48,24	4,55	37,88		12	55,45	5,22	43,50
	14	55,42	4,49	43,50		14	63,78	5,16	50,06
	16	62,35	4,43	48,93		16	77,05	5,09	56,43

	17	65,72	4,40	51,57		17	75,83	5,06	59,53
	18	68,96	4,36	54,16		18	79,75	5,03	62,59
	20	75,39	4,31	59,19		20	87,32	4,97	68,56
	22	81,57	4,25	64,02		22	94,73	4,91	74,33
	25	90,27	4,16	70,90		25	105,27	4,82	86,62
	28	95,83	4,11	77,34		28	115,27	4,75	90,46
	30	103,71	4,04	81,38		30	121,53	4,68	95,44
	32	106,51	3,99	85,23		32	127,72	4,64	100,22
	36	117,54	3,90	92,23		36	139,18	4,54	109,20
146	6	26,39	4,96	20,72	168	8	40,20	5,67	31,57
	8	34,68	4,89	27,23		10	49,61	5,60	38,97
	9	38,72	4,86	30,41		11	54,28	5,57	42,59
	10	42,75	4,83	33,54		12	58,84	5,54	46,17
	11	46,67	4,80	36,62		14	67,76	5,48	53,17
	12	50,63	4,76	39,96		16	76,42	5,41	59,98
	14	58,05	4,70	45,57		17	80,66	5,38	63,31
	16	65,32	4,64	51,30		18	84,84	5,35	66,50
	17	68,93	4,61	54,08		20	93,00	5,29	73,00
	18	72,41	4,57	56,82		22	100,30	5,23	79,21
	20	79,17	4,52	62,15		25	112,29	5,14	88,16
	22	85,87	4,46	64,28		30	129,99	5,00	102,10
	25	95,06	4,37	74,68		36	149,94	4,85	117,19
	30	109,79	4,24	85,82		40	160,87	4,75	126,27
	36	124,34	4,09	97,66		45	173,85	4,64	136,50
152	6	27,53	5,18	21,60	194	6	35,43	6,66	27,82
	8	36,18	5,11	28,41		7	41,13	6,62	31,28
	9	40,44	5,07	31,74		8	46,76	6,58	36,70
	10	44,60	5,00	35,02		9	52,33	6,56	41,06
	11	48,75	5,01	38,25		10	57,78	6,52	45,38
	12	52,78	4,97	41,43		11	63,22	6,48	49,64
	14	60,70	4,91	47,65		12	68,60	6,46	53,86
	16	68,38	4,85	53,66		14	79,18	6,39	62,15
	18	75,81	4,79	59,48		16	89,52	6,33	70,24
	20	82,90	4,72	65,11		17	94,49	6,29	74,21
	25	99,80	4,58	78,30		18	99,50	6,26	78,13
	30	115,04	4,46	90,26		20	109,34	6,20	85,28
	32	120,70	4,40	94,70		25	132,71	6,04	104,19
	36	131,17	4,30	102,99		30	154,50	5,90	121,33

СОРТАМЕНТ

Сталь угловая неравнобокая по ГОСТ 8510–86

 B – ширина большей пол b – ширина меньшей полки t – ширина полки

Номер профиля, см	B , мм	b , мм	t , мм	Площадь сечения, см ²	I_x , см ⁴	i_x , см	I_y , см ⁴	i_y , см	X_0 , см	Y_0 , см
6,3 / 4	63	40	5	4,98	19,9	2,00	6,26	1,12	0,95	2,08
			6	5,90	23,3	1,99	7,28	1,11	0,99	2,12
			8	7,68	29,6	1,96	9,15	1,09	1,07	2,20
7 / 4,5	70	45	4,5	5,07	25,3	2,23	8,25	1,28	1,03	2,25
			5	5,59	27,8	2,23	9,05	1,27	1,05	2,28
7,5 / 5	75	50	5	6,11	34,8	2,39	12,5	1,43	1,17	2,39
			6	7,25	40,9	2,38	14,5	1,42	1,21	2,44
			8	9,47	52,4	2,35	18,5	1,40	1,29	2,52
9 / 5,6	90	56	5,5	7,86	65,3	2,88	19,7	1,58	1,26	2,92
			6	8,54	70,6	2,88	21,2	1,58	1,29	2,95
			8	11,20	90,9	2,85	27,1	1,56	1,36	3,04
10 / 6,3	100	63	6	9,59	98,3	3,20	30,6	1,79	1,42	3,23
			7	11,10	113,0	3,19	35,0	1,78	1,46	3,28
			8	12,00	127,0	3,18	39,2	1,77	1,50	3,32
			10	15,50	154,0	3,15	47,1	1,75	1,58	3,40
11 / 7	110	70	6,5	11,4	142,0	3,53	45,6	2,00	1,58	3,55
			7	12,3	152,0	3,52	48,7	1,99	1,60	3,57
			8	13,9	172,0	3,51	54,6	1,98	1,64	3,61
12,5 / 8	125	80	7	14,1	227,0	4,01	73,7	2,29	1,80	4,01
			8	16,0	256,0	4,00	83,0	2,28	1,84	4,05
			10	19,7	312,0	3,98	100	2,26	1,92	4,14
			12	23,4	365,0	3,95	177	2,24	2,00	4,22
14 / 9	140	90	8	18,0	364,0	4,49	120	2,58	2,03	4,49
			10	22,2	444,0	4,47	146	2,56	2,12	4,58
16 / 10	160	100	9	22,9	606,0	5,15	186	2,85	2,23	5,19
			10	25,3	667,0	5,13	204	2,84	2,28	5,23
			12	30,0	784,0	5,11	239	2,82	2,36	5,32
			14	34,7	897,0	5,08	272	2,80	2,43	5,40
18 / 11	180	110	10	28,3	952,0	5,80	276	3,12	2,44	5,88
			12	33,7	1123	5,77	324	3,10	2,52	5,97
20 / 12,5	200	125	11	34,9	1449	6,45	446	3,58	2,79	6,50
			12	37,9	1568	6,43	482	3,57	2,83	6,54
			14	43,9	1801	6,41	551	3,54	2,91	6,62
			16	49,8	2026	6,31	617	3,52	2,99	6,71
25 / 16	250	160	12	48,3	3147	8,07	1032	4,62	3,58	7,97
			16	63,6	4091	8,02	1333	4,58	3,69	8,14