

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	3
1. Порядок выполнения курсовой работы.....	3
2. Общие требования к оформлению расчётно-графических работ. .	4
3. Порядок получения индивидуального задания.....	5
4. Варианты заданий для выполнения курсовой работы.....	5
5. Список рекомендуемой литературы.....	6
<b>1. Расчётная схема стрелы башенного крана</b> .....	8
1.1. Конструкция балочных стрел.....	8
1.2. Выбор размеров расчётной схемы балочной стрелы башенного крана .....	11
1.3. Схемы запасовки канатов механизма подъёма груза .....	13
Составление расчётной схемы стрелы крана. Пример №1. ....	15
<b>2. Определение расчётных нагрузок на стрелу</b> .....	18
<b>2.1. Расчёт нагрузок в вертикальной плоскости</b> .....	18
2.1.1. Определение веса стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы.....	18
Пример определения веса стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы.....	19
2.1.2. Расчётный режим .....	20
2.1.3. Определение собственного веса .....	21
2.1.4. Определение сосредоточенной подвижной нагрузки $p$ от давления ходовых колёс грузовой тележки .....	22
2.1.5. Определение нагрузки от усилия в канате механизма подъёма груза $S_{\text{п}}$ .....	23
2.1.6. Определение нагрузки от усилия в канате механизма перемещения тележки $S_{\text{т}}$ .....	24
2.1.7. Определение нагрузки от усилия в расчале стрелы $S_{\text{р}}$ .....	24
Пример расчёта нагрузок для вертикальных ферм .....	25
<b>2.2. Линии влияния в стержнях ферм.</b> Определение усилий в стержнях ферм по линиям влияния. Пример построения линий влияния и определения усилий в стержнях вертикальных ферм (продолжение примера №1) .....	31
<b>2.3. Расчёт нагрузок в горизонтальной плоскости</b> .....	39
2.3.1. Расчёт ветровой нагрузки .....	39
2.3.2. Расчёт инерционных нагрузок .....	42
2.3.3. Расчёт суммарных нагрузок в горизонтальной плоскости..	43
Пример расчёта нагрузок в горизонтальной плоскости .....	44
<b>3. Определение расчётных (максимальных) усилий в</b>	

<b>расчётных стержнях стрелы</b> .....	47
Пример определения максимальных усилий в расчётных стержнях стрелы (продолжение примера №1) .....	51
<b>4. Подбор сечений в стержнях фермы (стрелы)</b> .....	48
Порядок подбора сечения стержня при расчёте на устойчивость .....	50
Пример подбора сечений стержней фермы (стрелы) (продолжение примера №1) .....	54
<b>5. Соединения стальных элементов стрелы</b> .....	57
<b>5.1. Расчёт сварных соединений</b> .....	60
5.1.1. Расчёт стыковых сварных швов.....	61
5.1.2. Расчёт угловых сварных швов.....	62
5.1.3. Расчёт сварного соединения из необжатых круглых труб .	62
Пример расчёта сварного соединения из необжатых круглых труб.....	63
5.1.4. Расчёт сварного соединения из обжатых круглых труб.	64
<b>5.2. Болтовые соединения элементов стрелы</b> .....	64
Пример определения количества болтов для фланцевого соединения труб верхнего пояса.....	67
Пример расчёта болтов во фланцевом соединении консольной части нижнего пояса.....	67
<b>5.3. Расчёт шарнирных стыковых соединений на пальцах</b> ... ..	68
 <b>Пример 2.</b> .....	 69
 <b>Приложение 1.</b> Коэффициенты продольного изгиба $\varphi$ для центрально-сжатых стержней.....	 95
<b>Приложение 2.</b> Сортамент. Трубы стальные бесшовные горячекатаные по ГОСТ 8732-80 .....	96
<b>Приложение 3.</b> Сортамент. Профили гнутые замкнутые стальные прямоугольного сечения для строительных конструкций ГОСТ 30245 – 2003 .....	99
<b>Приложение 4.</b> ЕСКД. Примеры нанесения основной надписи первого и последующих листов пояснительной записки.....	109

# Введение

Темой курсовой работы является расчёт и проектирование балочной стрелы башенного крана. Исходными данными для проектирования стрелы являются: грузоподъёмность – максимальная и минимальная, вылет груза, высота подъёма груза, скорости механизмов подъёма груза и поворота, режим работы крана.

## 1. Порядок выполнения курсовой работы

- По исходным данным задаться предварительными размерами стрелы, используя эмпирические формулы, полученные на основании опыта проектирования.
- Составить расчётную схему стрелы.
- По имеющимся рекомендациям задаться массой стрелы, крюковой обоймы и грузовой тележки.
- Рассчитать нагрузки, действующие на стрелу в вертикальной плоскости:
  - от собственного веса стрелы,
  - от давления ходовых колёс грузовой тележки,
  - от канатов расчала,
  - от канатов подъёма груза и перемещения грузовой тележки.
- Построить линии влияния усилий для наиболее нагруженных стержней вертикальной фермы, для чего, применив метод сечений, разрезать её в двух местах: в середине пролётной части и рядом с узлом, где крепится расчал со стороны консольной части.
- По линиям влияния определить усилия в расчётных стержнях от собственного веса и от давления ходовых колёс грузовой тележки.
- Вычислить нагрузки в горизонтальной плоскости от давления ветра и сил инерции при повороте стрелы с грузом.
- Определить усилия в расчётных стержнях фермы от нагрузок в горизонтальной плоскости.
- Составить таблицу расчётных усилий для каждого расчётного стержня от действия всех выявленных нагрузок, действующих на ферму.
- Определить наибольшие растягивающие и сжимающие усилия в расчётных стержнях фермы при наиболее неблагоприятном сочетании всех нагрузок, вертикальных и горизонтальных, действующих на ферму.

- Подобрать сечение расчётных стержней фермы на основании рекомендаций, представленных в данной работе:  
для верхнего пояса и решётки предполагается сечение из стальных бесшовных горячекатанных труб по ГОСТ 8732-80, для нижнего пояса – сечение из стального гнутого замкнутого профиля прямоугольного сечения по ГОСТ 30245-2003.
  - Рассчитать сварное соединение раскоса с верхним поясом стрелы.
  - Рассчитать болтовое соединения фланцев, соединяющих секции верхнего пояса стрелы.
  - Рассчитать болтовое соединения фланцев, соединяющих секции нижнего пояса стрелы.
  - Разработать чертёж, на котором указана геометрическая схема стрелы в двух проекциях с размерами, часть геометрической схемы стрелы в аксонометрии, узел с условным изображением сварки и фланцевые соединения секций верхнего и нижнего поясов.
- Варианты заданий представлены ниже.

## **2. Общие требования к оформлению курсового проекта**

Курсовая работа состоит из расчётно-пояснительной записки, которая выполняется на стандартных листах писчей бумаги объёмом 20-30 страниц формата А-4. В начале пояснительной записки приводятся исходные данные – задание.

Расчётная схема изображается в масштабе длин. На ней указываются все необходимые данные в численном виде.

Все расчёты должны быть иллюстрированы расчётными схемами. При использовании формул все входящие в них величины должны быть обозначены и расшифрованы.

Все листы пояснительной записки оформляются согласно требованиям ЕСКД, нумеруются, снабжаются титульным листом. На титульном листе указываются: название работы, фамилия, имя и отчество студента, номер группы, номер специальности, индивидуальный шифр. Работа должна быть сброшюрована.

Графическая часть работы должна содержать сборочный чертёж секции стрелы в масштабе 1:25, 1:40, 1:50. Допускается один или два разрыва. На чертеже секции стрелы должны быть указаны общие габаритные размеры в трёх плоскостях, размеры её характерных участков. С помощью выносок отдельных сечений должны быть даны типы и размеры прокатных профилей отдельных элементов стрелы,

сборочных фланцев секций стрелы. В узлах, кроме размеров, должна быть указана характеристика сварных швов и болтовых соединений. При вычерчивании узлов фермы стержни, не лежащие в плоскости чертежа, не показываются.

**Выполненные небрежно и не по шифру работы к защите не принимаются.**

### 3. Порядок получения индивидуального задания

Исходные данные для выполнения работы студент выписывает из приведённых в задании таблиц и схем в соответствии со своим шифром. Шифром являются три последних цифры номера зачётной книжки или студенческого билета. Например, номер зачётной книжки 18549: Первая цифра шифра – 5, вторая – 4, третья – 9..

### 4. Варианты заданий для выполнения курсовой работы

Варианты заданий.									Таблица 1В		
1-я цифра шифра	$H$ м	$n_{кр.}$ об/мин	Тип башни	** № схемы	2-я цифра шифра	* ®	$v_{п}$ м/мин	3-я цифра шифра	$m_{g1}$ / $m_{g2}$ т	$L$ м	*** Тип заправки
0	28	0,6	П	1	0	A1	20	0	8,2/4,1	27	1
1	33	0,7	НП	2	1	A2	27	1	6,4/3,1	24	2
2	30	0,8	П	3	2	A3	22	2	7,6/3,9	28	2
3	32	0,9	НП	4	3	A4	25	3	5,8/3,6	31	1
4	34	0,6	П	1	4	A5	24	4	9,6/4,8	26	1
5	31	0,7	НП	2	5	A1	23	5	9,8/4,8	25	2
6	35	0,8	П	3	6	A2	26	6	9,4/4,5	30	1
7	29	0,9	НП	4	7	A3	21	7	7,8/4,2	29	2
8	36	0,7	П	2	8	A4	28	8	8,5/4,0	32	1
9	27	0,6	НП	4	9	A5	25	9	6,8/3,5	27	2

*Примечания к таблице заданий:*

- $H$  – максимальная высота подъёма груза (грузовой) обоймы;
- $L$  – максимальный вылет груза, м;
- $n_{кр.}$  – частота вращения поворотной части крана (угловая скорость), об/мин;

- $v_{\text{п}}$  – скорость подъёма груза, м/мин;
- $m_{1,2}$  – грузоподъёмность крана. Максимальная – в пролётной части стрелы, минимальная – в крайнем положении грузовой тележки на конце стрелы, т;
- \*® – Режим работы крана (А-1...А-5);
- \*\* № схемы решётки вертикальных ферм:

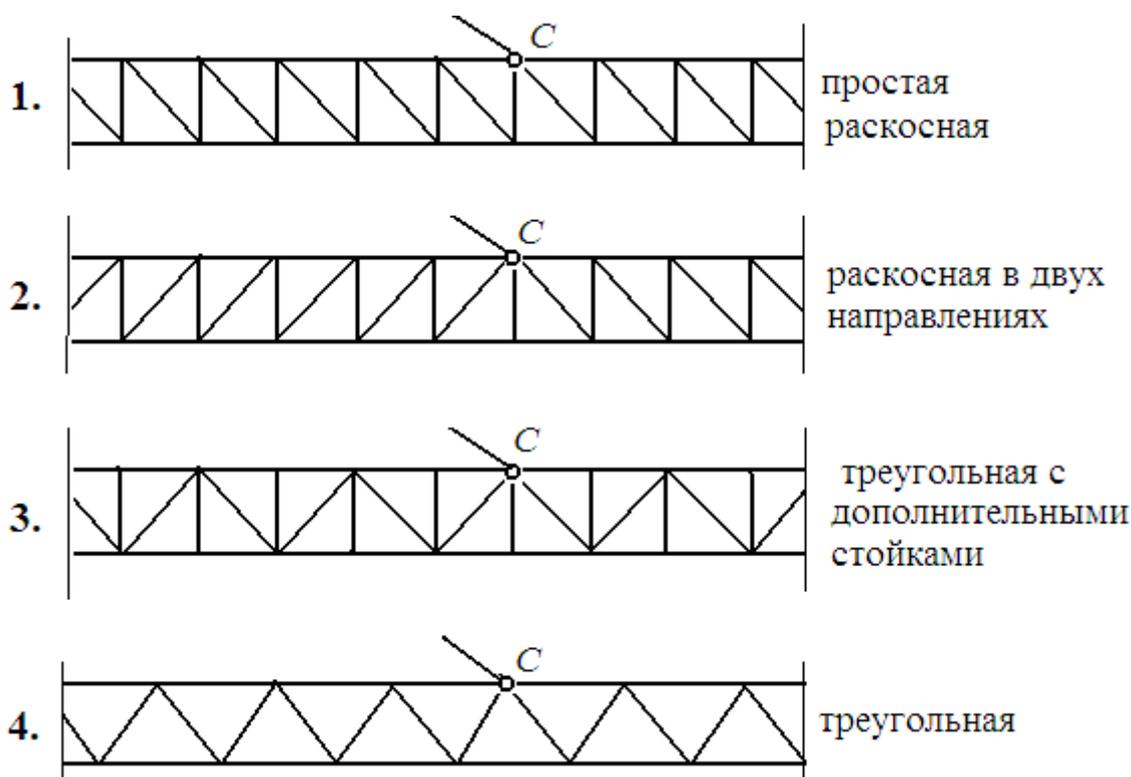


Рис.1В. типы решёток вертикальных ферм

- Тип башни: П – кран с поворотной башней,  
НП – кран с неповоротной башней;
- \*\*\* Тип запасовки механизма подъёма груза:
  - 1 – конец каната механизма подъёма груза закреплён у пяты стрелы (в т. А, рис 1.7),
  - 2 – конец каната механизма подъёма груза закреплён на голове стрелы (на конце консольной части в т. D, рис.1.8).

## Список литературы

1. *Прокофьев Б.И.* Расчёт и проектирование балочных стрел кранов. Учебное пособие. Томск. Изд-во ТГАСУ. 2012. – 113с.
2. *Масленников А.М.* Начальный курс строительной механики стержневых систем. Учебное пособие: ООО «Перспектив науки», 2009. – 238 с.
3. *Живейнов Н.Н., Карасёв Г.Н., Цвей И.Ю.* Строительная механика и металлоконструкции строительных и дорожных машин: М. Машиностроение. 1988. – 279с.
4. СНиП 11-23-81. Актуализированная редакция. «Стальные конструкции». М. 2011. – 96с.
5. *Соколов А.А.* Металлические конструкции подъёмно - транспортных машин. Учебное пособие для вузов по направлению подготовки бакалавров и магистров. СПб. Политехника. 2005. – 423 с.
6. *Металлические конструкции.* В 3 т. Т.1.Элементы конструкций. Учебник для вузов под ред. В.В. Горева. – М. Высшая школа. 2001. – 551 с.
7. *Металлические конструкции.* Справочник проектировщика. Под общ. ред. В.В. Кузнецова. В 3 т. Т.1. – М. Изд-во АВС. 1998. – 576 с.
8. *Вайсон А.А.* Подъёмно-транспортные машины строительной промышленности. Атлас конструкций. М. Машиностроение. 1976.
9. *Справочник по кранам.* В 2 т. Под ред. М.М. Гохберга – М. Машиностроение.1988.– Т.1. – 535 с. т,2. – 559 с.
10. *Гохберг М. М.* Металлические конструкции подъёмно-транспортных машин. Изд. Машиностроение. Ленинград 1969. 520с.
11. *Металлические конструкции строительных и дорожных машин.* Под ред. В.А . Ряхина. М. Машиностроение. 1972. – 312 с.
12. *Файбишенко В.К.* Металлические конструкции. Учебное пособие для вузов. – М.: Стройиздат,1984. – 336 с.

# Расчёт стрелы башенного крана

## 1. Расчётная схема стрелы башенного крана [1]

### 1.1. Конструкция балочных стрел

На рис. 1 схематично представлен башенный кран с поворотной башней и со стрелой балочного типа. Стрела прикреплена к башне шарнирами (пята стрелы, т.  $A$ ) и расчалкой (расчалом)  $CB$ .

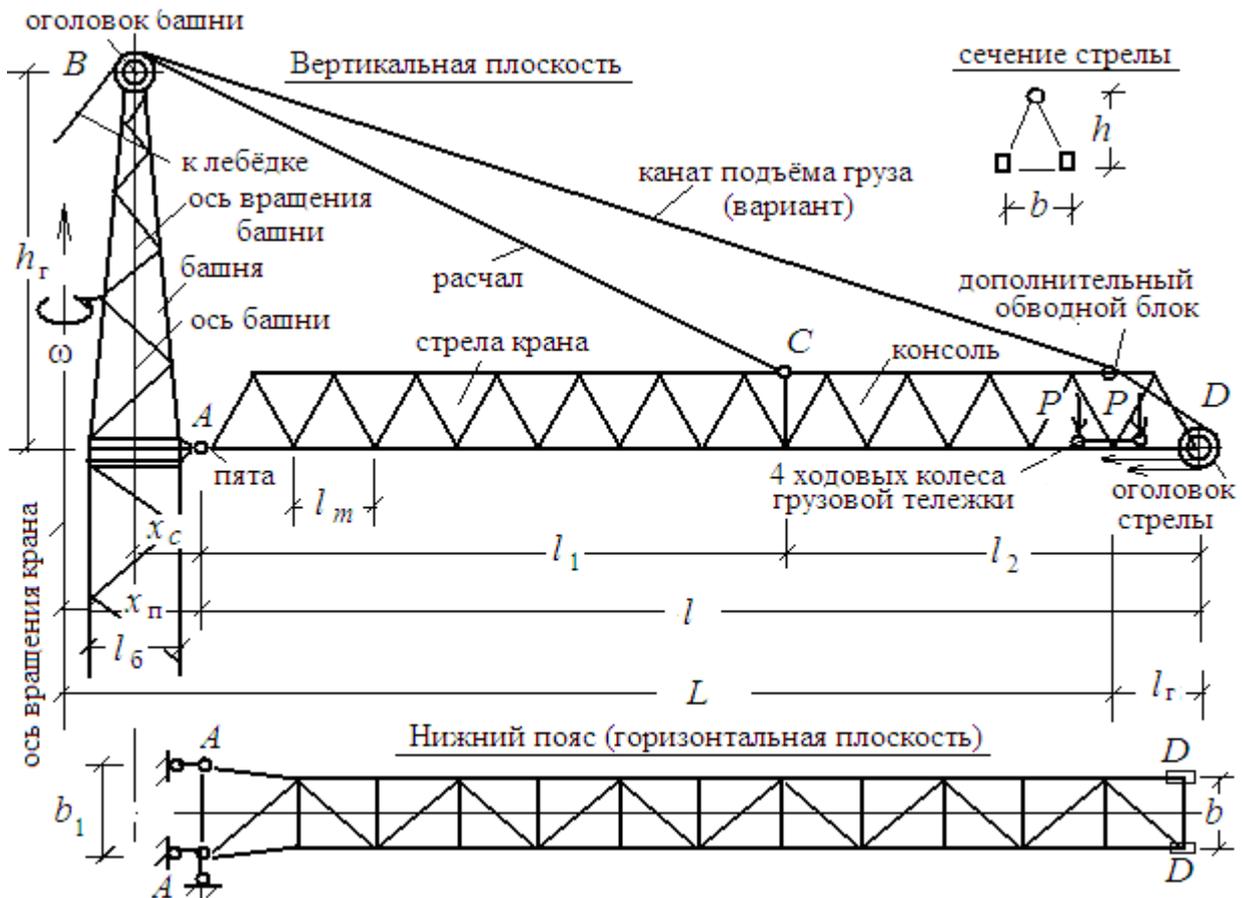


Рис.1.1. Расчётная схема стрелы башенного крана.

Запасовка канатов подъёма груза представлена следующая: конец каната крепится у пяты стрелы (в т.  $A$ ) и, проходя через блоки полиспаста грузовой тележки и крюковой обоймы, огибая направляющие блоки на конце стрелы (в т.  $D$ ) и оголовке башни (т.  $B$ ), закрепляется на барабане грузоподъёмной лебёдки (см. рис. 1.7).

Балочная стрела башенного крана – это пространственная ферма, имеющая в поперечнике треугольник или четырёхугольник (см. рис.1.2). Трёхгранные стрелы – более лёгкие. Поэтому они, в основном, и применяются.

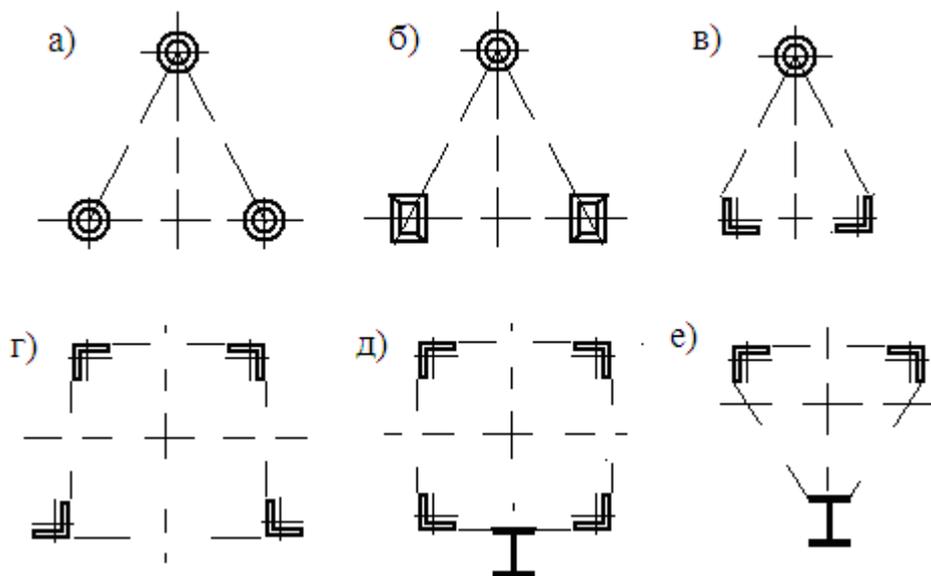


Рис.1.2. Типы сечений балочных стрел:  
а, б, в, е) трёхгранные, г, д) четырёхгранные

Выполняются они, обычно, из труб или из прокатных профилей (например, из составных уголков).

Основная часть стрелы (пролёт между пятой *A* и точкой *C* крепления расчала к стреле) работает на изгиб и сжатие.

Консольная часть работает, в основном, на изгиб. Поэтому решётку вертикальных ферм в консольной части иногда делают раскосной так, чтобы раскосы работали на растяжение. Иногда применяется раскосная решётка в двух направлениях. Но чаще в вертикальных фермах применяют треугольную решётку без стоек или со стойками. А движение грузовой тележки (каретки) делают по нижнему поясу.

Подвижная сосредоточенная нагрузка от ходовых колёс грузовой тележки вызывает в элементах нижнего пояса фермы дополнительный местный изгиб, который необходимо так же учитывать. Для уменьшения напряжений в элементах нижнего пояса фермы от этого местного давления желательно длину панелей стрелы делать меньше. При проектировании стрелы рекомендуется придерживаться следующих рекомендаций:

- сечение стрелы углом вверх (рис. 1.2.а, б) годится для кранов любой грузоподъёмности;
- сечение стрелы углом вниз (рис. 1.2.в) обычно применялось в кранах грузоподъёмностью до 5т;

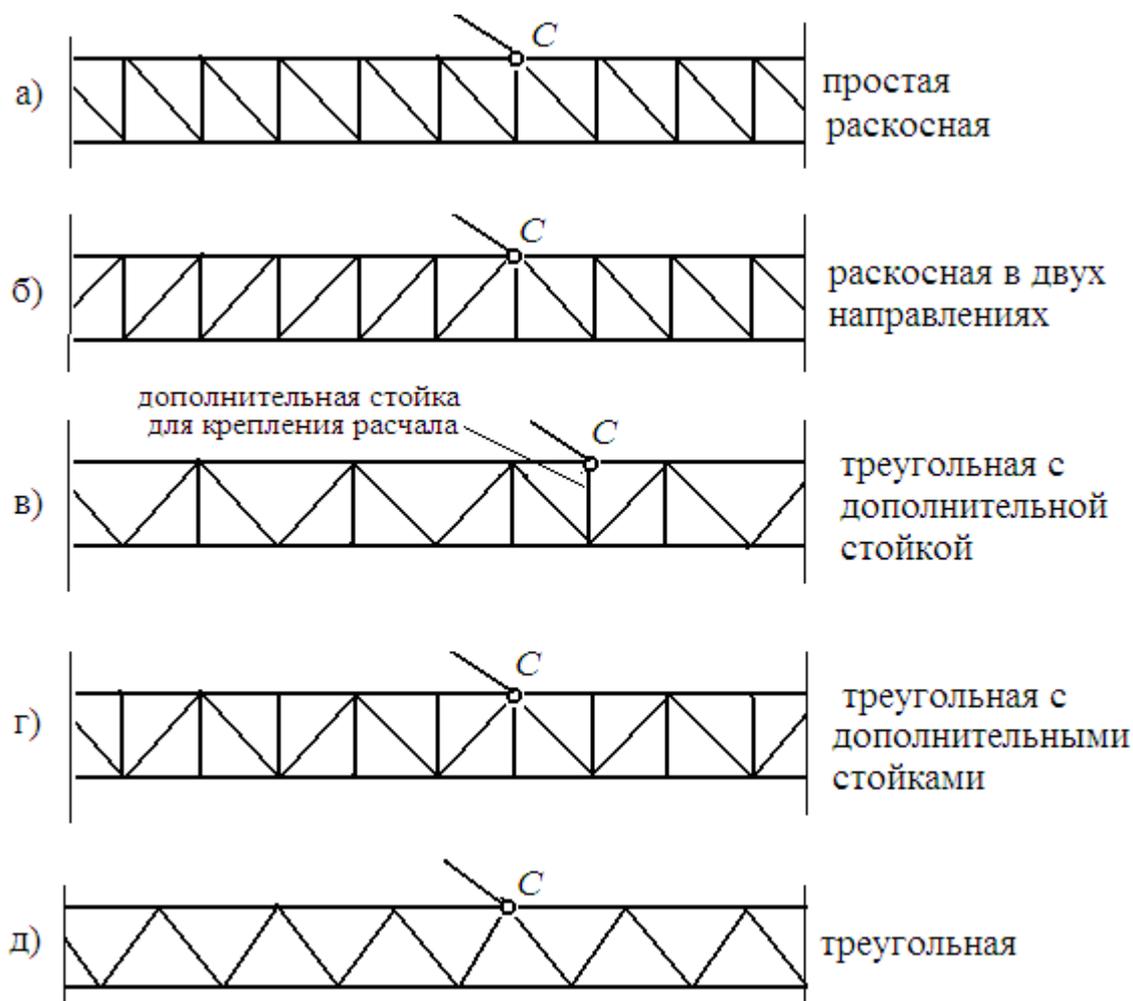


Рис.1.3. Типы решёток вертикальных ферм балочных стрел

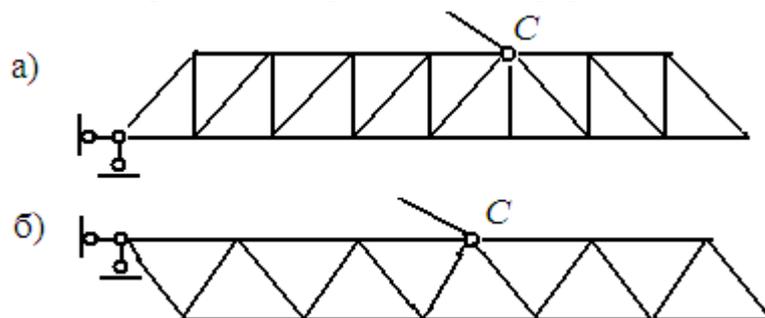


Рис.1.4. Типы крепления решёток вертикальных ферм балочных стрел

- в кранах грузоподъёмностью более 5т обычно применяется треугольная решётка или треугольная с дополнительными стойками;
- длина панели зависит от высоты фермы и типа решётки;
- стрелы длиной более 10 м собираются из отдельных секций: корневой, головной и промежуточных. В длинных стрелах сечения могут быть переменными.
- крепление стрелы (пята стрелы) может находиться на нижнем поясе (обычно) (рис.1.4.а) или на верхнем (рис.1.4.б).

- в кранах грузоподъёмностью до 5т обычно применяется раскосная решётка двух направлений. В консоли – ниспадающая, в пролётной части – в обратном направлении;

## 1.2. Выбор размеров расчётной схемы балочной стрелы башенного крана

При составлении расчётной схемы стрелы обычно пользуются опытом работы существующих конструкций кранов и существующими эмперическими формулами и рекомендациями, полученными в результате опыта. На основании этого производится расчёт и назначаются необходимые размеры. Обычно сначала задаются значениями:  $H$  – максимальной высоты подъёма груза, м;

$L$  – максимальным вылетом груза, м;  $l$  – длиной стрелы, м.

Затем определяют:

- поперечное сечение башни (квадрат), м:

– поворотной башни по формуле, м:  $l_6 = (0,9 - 1,1) \cdot \frac{H}{19}$  (1.1)

– неповоротной башни по формуле, м:  $l_6 = (0,9 - 1,1) \cdot \frac{H}{16}$  (1.2)

- высоту башни от оголовка башни от шарнира пяты стрелы по формуле, м:  $h_r = (0,8 - 1,2) \cdot \frac{L}{3,6}$  (1.3)

- расстояние от оси башни до оси пяты стрелы по формуле, м:

$$x_c = 0,5 \cdot l_6 + 0,2 \quad (1.4)$$

- расстояние от оси вращения крана с поворотной башней до оси пяты стрелы по формуле, м:  $x_{п} = (0,55 - 0,6) \cdot l_6 + x_c$  (1.5)

- высоту вертикальной фермы стрелы по формуле, м:

$$h = (0,9 - 1,1) \cdot \frac{L}{22} \quad (1.6)$$

*В кранах с неповоротной башней ось вращения крана совпадает с осью башни ( $x_c = x_{п}$ ).*

Ширину горизонтальной фермы у пяты стрелы следует принять равной размеру башни:  $b_1 = l_6$ .

Обычно применяются два типа горизонтальных ферм:

- с параллельными поясами на всей длине ( $b_1 = b$ ) или
- с трапецеидальной частью у пяты стрелы (рис.1). В этом случае и стрела и конструкция грузовой тележки – более компактны и, следо-

вательно, обладают меньшей массой. Тогда ширину стрелы принимают по формуле, м:  $b = (0,65 - 0,8) \cdot b_1$  (1.7)

- стрела состоит из пролётной части  $l_1$  и консоли  $l_2$  (рис.1).
- Длина консольной части зависит от длины стрелы и максимальной грузоподъёмности крана (в середине пролёта и на конце стрелы), указанных в техническом задании на проектирование. В существующих кранах обычно её размер, определяется по формуле, м:

$$l_2 = (0,3 - 0,5) \cdot l \quad (1.8)$$

- При увеличении длины стрелы (вылета груза) могут быть запроектированы две точки её подвеса к башне крана.
- В окончательном варианте желательно (экономически выгодно), чтобы изгибающий момент в пролётной части был бы близок по значению к изгибающему моменту в сечении крепления расчала:  $M_1 \approx M \approx M_2$  (Рис.1.5).

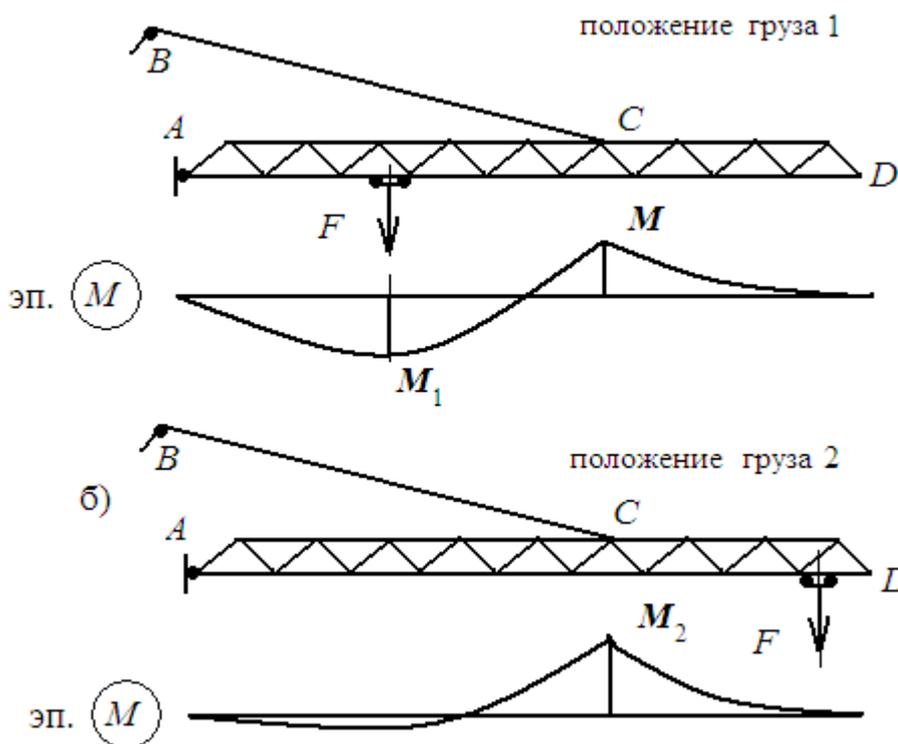


Рис.1.5. Предполагаемые эпюры моментов от поднимаемого груза с учётом собственного веса (вертикальная плоскость).

- Расчал крепится в узле верхнего пояса фермы (т.С). Если необходимо, ставят для этого дополнительную стойку в ферме с треугольной решёткой.
- Длина стрелы для крана с поворотной башней определяется по формуле, м:  $l = L - x_{п} + l_{г}$  (1.9)

- Длина стрелы для крана с неповоротной башней определяется по формуле, м:  $l = L - x_c + l_r$  (1.10)

где  $l_r$  - расстояние от центра подвеса груза (центра грузовой тележки) до центра последнего шарнира при максимальном вылете груза. Обычно принимается, м:  $l_r = (1,6 - 2)$  (1.11)

- Естественно, что длина стрелы равна, м:  $l = n_{\text{п}} \cdot l_m$  где  $n_{\text{п}}$  - число панелей фермы,  $l_m$  - длина панели.

Длиной панели предварительно задаются в пределах, м:

$$l_m = (1,4 - 2,5) \quad (1.12)$$

- Необходимо увязать длину панели  $l_m$  с высотой фермы  $h$ . Угол между раскосом и панелью должен быть  $35^\circ - 60^\circ$  ( $\text{tg} \alpha = 0,7 - 1,73$ ).

- Определив предполагаемую длину фермы  $l$  и, задавшись длиной панели  $l_m$ , определяют число панелей  $n_{\text{п}}$  (округлив полученное число до целого числа в любую сторону) и определяют окончательное расстояние от последнего шарнира до центра грузовой тележки  $l_r$ :

$$l_r = L - R + x_{\text{п}} \quad (1.13)$$

- Предварительно задаются базой грузовой тележки  $d$ .

Для 4-х опорной грузовой тележки база (м):  $d = (1 - 1,4)$  (1.14)

- Расстояние  $l_r$  надо увязать с базой грузовой тележки  $d$ .

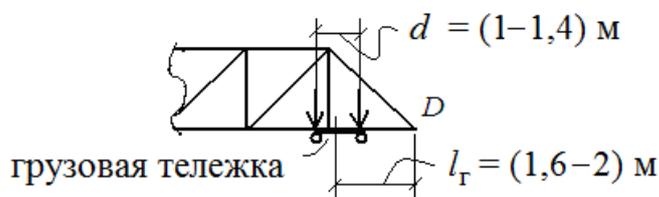


Рис.1.6. Рекомендуемые размеры расположения грузовой тележки

### 1.3. Схемы запасовки канатов механизма подъема грузов

Запасовки канатов механизма подъема грузов и механизма перемещения грузовой тележки обеспечивают передвижение тележки с грузом. Поэтому усилия, возникающие в канатах этих механизмов, будут влиять на усилия в стержнях фермы.

В кранах с балочными стрелами применяются **2 типа запасовки канатов механизма подъема грузов:**

- **1-й тип:** (рис. 1.7 и рис.1.1) запасовки канатов механизма подъема грузов: Конец каната крепится к металлоконструкциям у пяты стрелы (т. А). Затем канат проходит по блокам полиспаста грузовой тележки и крюковой обоймы, огибает направляющие блоки на конце

стрелы (т.  $D$ ) и на оголовке башни (т.  $B$ ) и крепится на барабане грузоподъёмной лебёдки.

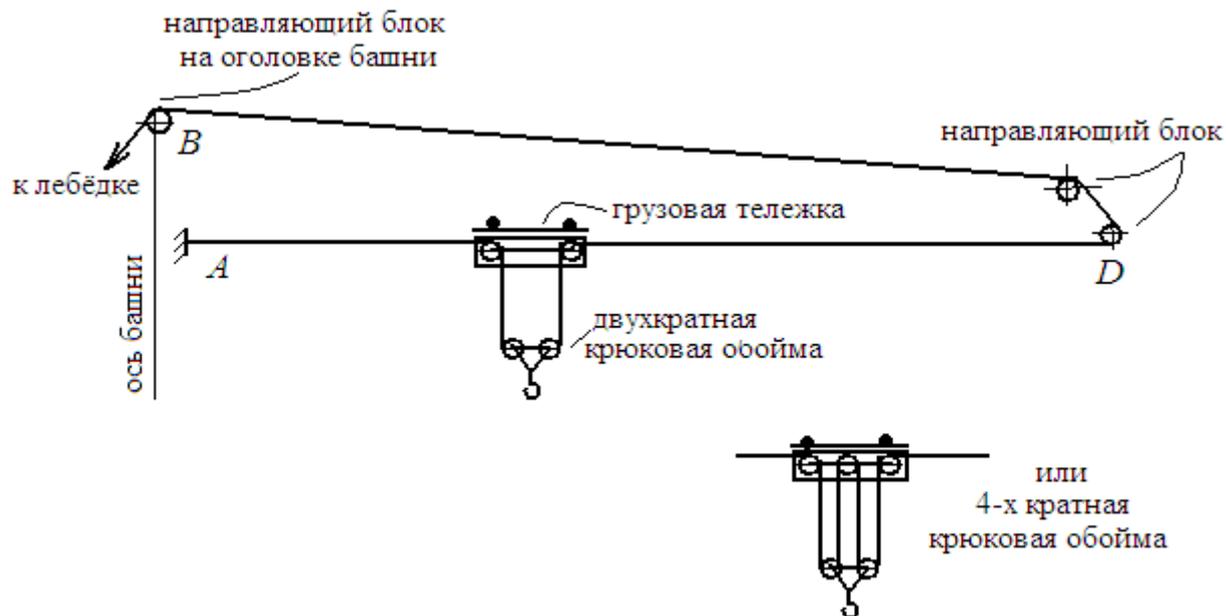


Рис.1.7. Схема запасовки каната механизма подъёма груза при закреплении его конца у пяты стрелы в т.  $A$

Такая запасовка канатов применяется при стрелах относительно небольшой длины. Недостатком её является провисание каната между стрелой и оголовком башни ( $BD$  на рис.1.1), что создаёт неравномерность работы механизма подъёма груза. Но зато при такой запасовке усилие в расчале подвеса меньше.

• **2-й тип** запасовки канатов механизма подъёма грузов (рис. 1.8):  
 Конец каната крепится к металлоконструкциям на конце стрелы (т.  $D$ ). Затем канат проходит по блокам полиспаста грузовой тележки и крюковой обоймы, огибает направляющие блоки у основания стрелы (т.  $A$ ) и на оголовке башни (т.  $B$ ) и крепится на барабане грузоподъёмной лебёдки. Такая запасовка канатов применяется при стрелах любой длины.

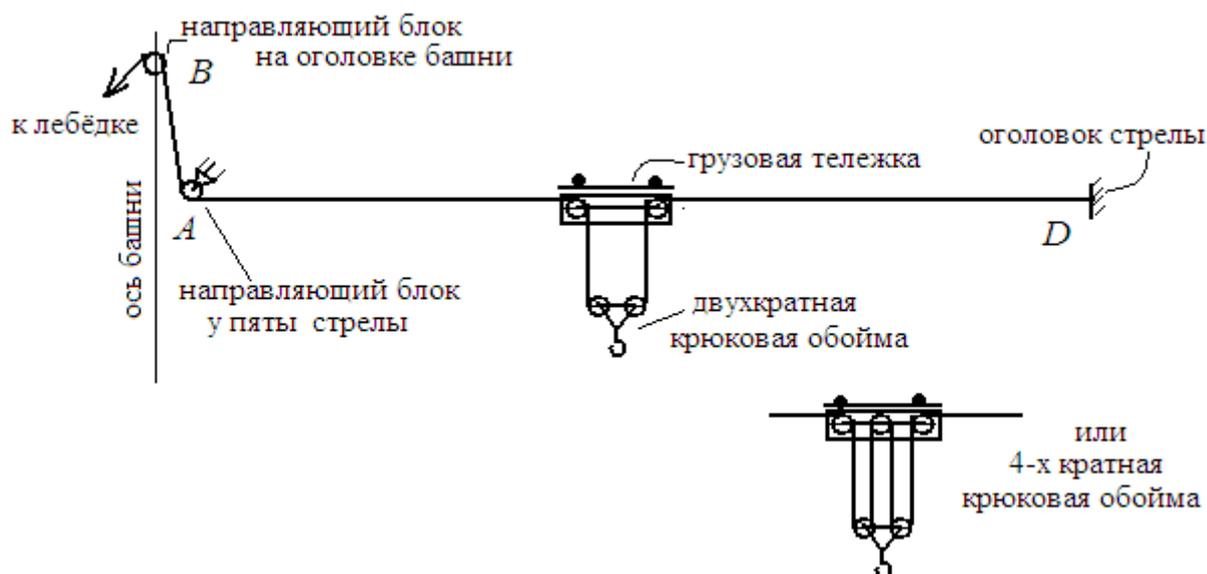


Рис.1.8. Схема запасовки каната механизма подъёма груза при закреплении его конца на голове стрелы в т. D

- Схема запасовки каната механизма перемещения грузовой тележки представлена на рис.1.9.



Рис.1.9. Схема запасовки каната механизма перемещения грузовой тележки

Через обводные блоки, находящиеся на голове стрелы (т. D) сжимающие усилия, возникающие в канатах механизма подъёма грузов и канатах механизма перемещения грузовой тележки, будут передаваться на элементы фермы и их надо учитывать.

### ***Пример составления расчётной схемы стрелы крана. (Пример №1)***

**Задание:** спроектировать и рассчитать стрелу башенного крана.

**Дано:** тип башни – П (поворотная); грузоподъёмность крана:  $m_{g(1)} = 7 \text{ т}$  ( $F_{(1)} = 70 \text{ кН}$ ) – в середине пролёта,  $m_{g(2)} = 3,5 \text{ т}$  ( $F_{(2)} = 35 \text{ кН}$ ) – на максимальном вылете; максимальная высота подъёма груза:  $H = 30 \text{ м}$ ; максимальный вылет груза:  $L = 26 \text{ м}$ ; скорость подъёма груза:

$v_{\Pi} = 22$  м/с; время разгона (торможения) для 2-х положений грузовой тележки:

$t_1 = 1,1$  с,  $t_2 = 1,0$  с; скорость поворота крана  $n_{кр.} = 0,9$  об/мин;  
сечение стрелы – треугольное, решётки вертикальных ферм – простые раскосные, решётки горизонтальных ферм – треугольные с дополнительной стойкой; сечение верхнего пояса фермы и решётки выполняются из труб (Трубы бесшовные горячекатаные по ГОСТ 8732–80); сечение нижнего пояса выполняется из стального гнутого замкнутого профиля прямоугольного сечения (ГОСТ 30245 – 2003). Профили стальные гнутые квадратного и прямоугольного сечения для строительных конструкций). Режим работы крана А5.  
Конец каната запасовки канатов механизма подъёма грузов крепится к металлоконструкциям у пяты стрелы (т. А).

*Построение расчётной схемы стрелы крана:*

• Поперечное сечение башни (квадрат) (1.1):

$$l_6 = (0,9 - 1,1) \frac{H}{19} = (0,9 - 1,1) \frac{30}{19} = (1,58 - 1,93); \text{ Принимаем } l_6 = 1,6 \text{ м};$$

• Высота башни от оголовка башни от шарнира пяты стрелы (1.3):

$$h_T = (0,8 - 1,2) \frac{L}{3,6} = (0,8 - 1,2) \frac{26}{3,6} = (5,78 - 8,67); \text{ Принимаем } h_T = 7 \text{ м};$$

• Расстояние от оси башни до оси пяты стрелы (1.4):

$$x_c = 0,5 \cdot l_6 + 0,2 = 0,5 \cdot 1,6 + 0,2 = 1 \text{ м}; \quad x_c = 1 \text{ м};$$

• Расстояние от оси вращения крана с поворотной башней до оси пяты стрелы (1.4):  $x_{\Pi} = (0,55 - 0,6) l_6 + x_c = (0,55 - 0,6) 1,6 + 1 = (0,88 - 1,96)$ ; Принимаем  $x_{\Pi} = 1,9$  м;

• Высота вертикальной фермы стрелы (предварительная) (1.6):

$$h = (0,9 - 1,1) \frac{L}{22} = (0,9 - 1,1) \frac{26}{22} = (1,06 - 1,3); \text{ Принимаем } h = 1,2 \text{ м};$$

• Ширина горизонтальной фермы у пяты стрелы  $b_1 = l_6 = 1,6$  м;

• Выбираем горизонтальную ферму с трапециевидальной частью у пяты стрелы. Тогда ширина горизонтальной фермы стрелы (1.7):

$$b = (0,65 - 0,8) b_1 = (0,65 - 0,8) 1,6 = (1,04 - 1,28); \text{ Принимаем } b = 1,1 \text{ м};$$

• Воспользовавшись рекомендациями, предварительно принимаем расстояние от середины грузовой тележки до центра последнего шарнира  $l_T = 1,6$  м, а расстояние между ходовыми колёсами 4-х опорной тележки  $d = 1,2$  м;

• Тогда предварительная длина стрелы:  $l = L + l_T - x_{\Pi} = 26 + 1,6 - 1,9 = 25,7$  м;

- Предварительно задаёмся длиной панели; рекомендуется (1.12)

$$l_m = (1,4 - 2,5). \text{ Принимаем } l_m = 2\text{ м; Тогда число панелей будет: } n_{\text{п}} = \frac{l}{l_m} = \frac{25,7}{2} = 12,85; \text{ Принимаем окончательное число панелей: } n_{\text{п}} = 12;$$

- Тогда  $l_m = \frac{25,7}{12} = 2,14 \text{ м. Принимаем окончательную длину панели:}$

$$l_m = 2,15 \text{ м;}$$

- Окончательная длина стрелы:  $l = n_{\text{п}} \cdot l_m = 12 \cdot 2,15 = 25,8 \text{ м; } l = 25,8 \text{ м;}$

- Пересчитываем  $l_r = l - L + x_{\text{п}} = 25,8 - 26 + 1,9 = 1,7 \text{ м; } l_r = 1,7 \text{ м;}$

- Определяем место прикрепления расчала; по рекомендации (1.8) длина консоли должна быть  $l_2 = (0,3 - 0,5) l = (7,74 - 12,9) \text{ м. Назначаем } l_2 = 2,15 \cdot 5 = 10,75 \text{ м; Закрепление расчала - в 5-м узле от оголовка стрелы (в т.Д). } l_2 = 10,75 \text{ м;}$

- Длина  $l_1 = l - l_2 = 25,8 - 10,75 = 15,05 \text{ м; } l_1 = 15,05 \text{ м;}$

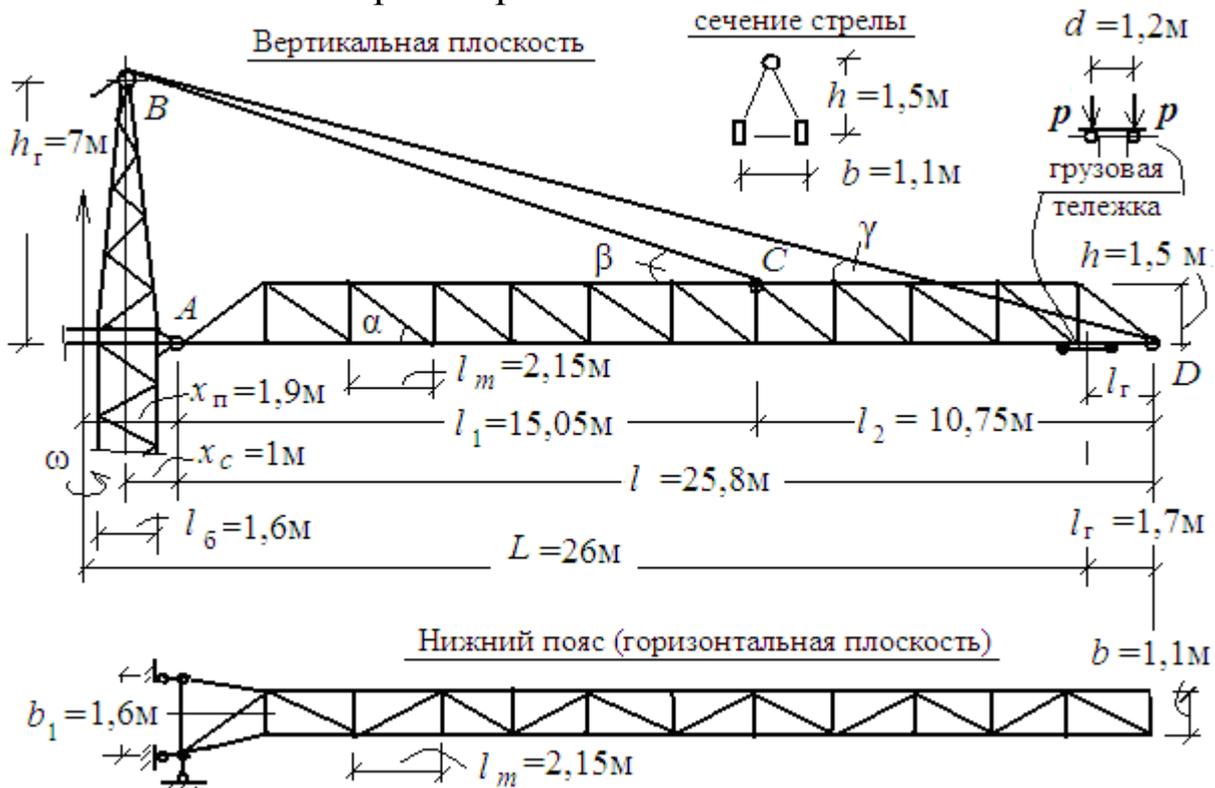
- Необходимо увязать длину панели  $l_m$  с высотой фермы  $h$ :

Угол между раскосом и панелью должен быть  $35^\circ - 60^\circ$ .

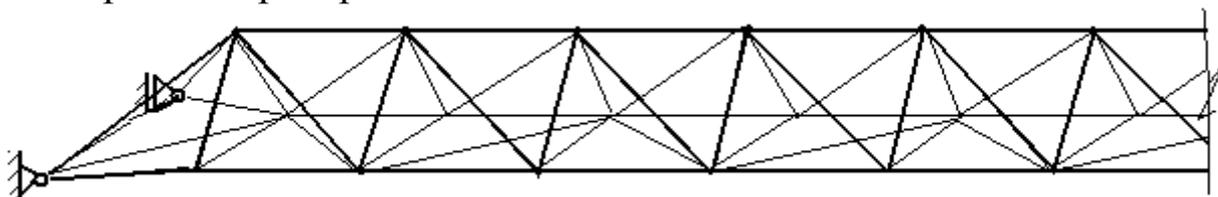
$$\text{tg } \alpha = \frac{h}{l_m} = \frac{1,2}{2,15} = 0,558, \alpha = 29,17^\circ < 35^\circ.$$

Окончательно принимаем высоту:  $h = 1,5 \text{ м; tg } \alpha = \frac{h}{l_m} = \frac{1,5}{2,15} = 0,7, \alpha = 35^\circ.$

- Расчётная схема стрелы крана:



Вид стрелы в пространстве:



## 2. Определение расчётных нагрузок на стрелу [1]

Стрела башенного крана воспринимает нагрузки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Они различны. Различны и расчётные схемы ферм в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Все значения нагрузок должны быть определены для 2-х положений поднимаемого груза  $F$ :  $F_{(1)}$  – груз в середине пролёта и  $F_{(2)}$  – груз на конце стрелы.

### 2.1. Расчёт нагрузок в вертикальной плоскости

#### 2.1.1. Определение массы и веса стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы

Весом стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы необходимо предварительно задаться. Для современных кранов вес одного метра стрелы приблизительно равен  $q_c = (0,8 - 3)$  кН/м. Это – довольно широкое разнообразие. Масса стрелы зависит от грузоподъёмности крана, грузового момента, высоты подъёма груза и других факторов.

- Массу крана с поворотной башней ориентировочно можно принять по формуле: 
$$m_{кр} = 0,355 \cdot T_{гр.} \cdot \left(\frac{H}{m_g}\right)^{0,34} \quad (2.1)$$

Массу крана с неповоротной башней ориентировочно можно принять по формуле: 
$$m_{кр} = 0,36 \cdot T_{гр.} \cdot \left(\frac{H}{m_g}\right)^{0,34}, \quad (2.2)$$

где  $T_{гр.}$  – грузовой момент;  $T_{гр.} = m_q \cdot L$ , т·м; (2.3)

$L$  – максимальный вылет груза, м;

$m_g = m_{g2}$  – грузоподъёмность крана на максимальном вылете, т;

$H$  – максимальная высота подъёма груза, м;

• Тогда вес крана  $G_{кр.}$  будет равен:  $G_{кр.} = g \cdot m_{кр.} = 9,81 \cdot m_{кр.}$ , кН, (2.4)

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

• Вес стрелы можно предварительно принять:  $G_c = 0,05 \cdot G_{кр.}$ ; кН, (2.5)

• Нормативная равномерно-распределённая нагрузка от собственного веса стрелы будет:  $q_{сн} = \frac{G_c}{l}$ , кН/м .

• Вес грузовой тележки можно предварительно принять:

$$G_T = 0,01 \cdot G_{кр.}; \quad (2.6)$$

• Вес крюковой обоймы можно предварительно принять:

$$G_o = 0,005 \cdot G_{кр.}; \quad (2.7)$$

• При разгоне и торможении механизмов крана возникают силы инерции. При их нахождении используются массы стрелы  $m_c$ , грузовой тележки  $m_T$  и крюковой обоймы  $m_o$ .

Их можно так же определить в долях от массы крана:

$$m_c = 0,05 \cdot m_{кр.}; \quad m_T = 0,01 \cdot m_{кр.}; \quad m_o = 0,005 \cdot m_{кр.} \quad (2.8)$$

### ***Пример определения веса и массы стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы***

(продолжение примера №1):

• Массу крана с поворотной башней ориентировочно принимаем по формуле (2.9):  $m_{кр.} = 0,355 \cdot T_{гр.} \cdot \left(\frac{H}{m_g}\right)^{0,34}$ , где  $T_{гр.}$  - грузовой момент

$$(2.3): T_{гр.} = m_{g2} \cdot L = 3,5 \cdot 26 = 91 \text{ т} \cdot \text{м};$$

$L = 26$  м – максимальный вылет груза (задан);  $m_{g2} = 3,5$  т – грузоподъёмность крана на максимальном вылете (задана);

$H = 30$  м – максимальная высота подъёма груза (задана);

$$m_{кр.} = 0,355 \cdot 91 \left(\frac{30}{3,5}\right)^{0,34} = 67,06 \text{ т},$$

вес крана  $G_{кр.}$  будет равен (2.4):  $G_{кр.} = g \cdot m_{кр.} = 9,81 \cdot 67,06 = 657,9$  кН ,

• тогда масса стрелы (2.8):  $m_c = 0,05 \cdot m_{кр.} = 0,05 \cdot 67,06 = 3,35$  т;

вес стрелы  $G_c$  будет равен (2.5):  $G_c = g \cdot m_c = 9,81 \cdot 3,35 = 32,9$  кН ,

масса грузовой тележки (2.8):  $m_T = 0,01 \cdot m_{кр.} = 0,01 \cdot 67,06 = 0,67$  т;

вес грузовой тележки  $G_T$  будет равен (2.6):

$$G_T = g \cdot m_T = 9,81 \cdot 0,67 = 6,57 \text{ кН},$$

масса крюковой обоймы (2.8):  $m_o = 0,005 \cdot m_{кр.} = 0,005 \cdot 67,06 = 0,335$  т;

вес крюковой обоймы  $G_o$  будет равен (2.7):

$$G_o = g \cdot m_o = 9,81 \cdot 0,335 = 3,29 \text{ кН} .$$

- Нормативная равномерно-распределённая нагрузка от собственного веса стрелы будет:  $q_{сн} = \frac{G_c}{l} = \frac{32,9}{25,8} = 1,28 \text{ кН/м}$ ;

### 2.1.2. Расчётный режим.

Расчётные нагрузки определяются при самом неблагоприятном режиме работы крана, когда они достигают наибольших величин при самом неблагоприятном их сочетании. Обычно это происходит при разгоне (или торможении) механизма вращения крана при одновременном торможении опускающегося груза. Следует учитывать так же давление ветра.

Согласно графику грузоподъёмности крана, элементы фермы воспринимают наибольшие усилия, когда грузовая тележка находится или в середине пролётной части, или на конце консольной части фермы. В этих положениях наибольшие изгибающие моменты будут возникать в середине пролётной части и в сечении, где расчал прикрепляется к стреле.

Поскольку, исходя из технологических соображений, пояса и решётку стремятся изготавливать из одного типа прокатного профиля, желательно стремиться к тому, чтобы изгибающие моменты в указанных «опасных» сечениях были бы близки по значению ( $M_1 \approx M_2 \approx M_3$  на рис.2.1).

Из этого так же следует, что достаточно определять усилия не во всех элементах фермы, а только в тех, в которых усилия достигают максимальной величины.

Таким образом, на стрелу крана действуют следующие нагрузки:

- нагрузка от собственного веса стрелы;
- нагрузка от ходовых колёс грузовой тележки;

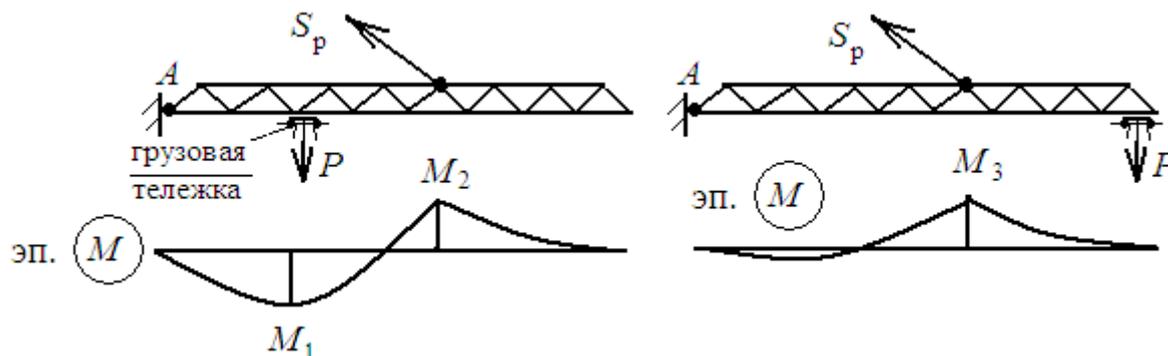


Рис. 2.1. Предполагаемая эпюра моментов  
(при варианте крепления запасовки подъёма груза в т.А)

- нагрузка от усилия в расчале подвеса стрелы.
- нагрузка от усилий в канате механизма подъёма груза и в канате механизма перемещения грузовой тележки.

Усилия в стержнях фермы при перемещении ходовых колёс грузовой тележки будут меняться не только по величине, но и по направлению. Поэтому они будут определяться по линиям влияния.

По линиям влияния будут определяться также усилия в стержнях фермы от собственного веса.

### 2.1.3. Определение собственного веса.

Нагрузка от собственного веса – равномерно-распределённая. Она определяется путём умножения нормативной нагрузки на коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки), так как в дальнейшем прочностной расчёт металлоконструкций стрелы будет вестись по предельному состоянию.

$$q_{\text{в}} = k_g \cdot q_{\text{сн}} \quad (2.10)$$

где  $q_{\text{в}}$  – расчётная величина нагрузки от собственного веса,

$q_{\text{сн}}$  – нормативная величина нагрузки от собственного веса,

$k_g = 1,1$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки).

### 2.1.4. Определение сосредоточенной подвижной нагрузки $p_{(1,2)}$ от давления ходовых колёс грузовой тележки.

Нагрузка от ходовых колёс грузовой тележки  $p_{(1,2)}$  – сосредоточенная сила. Тележка перемещается по нижнему поясу фермы. Она имеет 4 ходовых колеса при грузоподъёмности до 10 т; и 8 ходовых колёс при грузоподъёмности более 10 т (по 4 с каждой стороны для уменьшения местного давления на стержни нижнего пояса).

Давление ходового колеса  $p_{(1,2)}$  складывается из:

веса поднимаемого груза  $F$ , веса грузовой тележки  $G_{\text{т}}$ ,

веса крюковой обоймы с полиспасом  $G_{\text{о}}$ ,

сил инерции, возникающих при подъёме груза  $F_{\text{и}}$ .

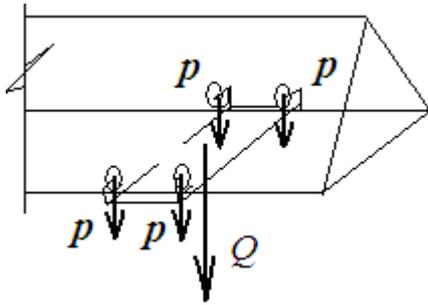


Рис.2.2. Нагрузка от ходовых колёс тележки

Таким образом, расчётная нагрузка от давления ходового колеса будет:

$$p = \frac{1}{n_k} (F \cdot k_q + (G_T + G_o) \cdot k_g + F_{и}) \quad (2.11)$$

где  $n_k$  – число ходовых колёс тележки,

$k_q$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки) для массы поднимаемого груза,

$k_g = 1,1$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки) для веса грузовой тележки и крюковой обоймы.

Значения коэффициента перегрузки  $k_g$  для массы поднимаемого груза зависит от режима работы крана (см. табл. 2.1).

В соответствии с графиком грузоподъёмности крана, масса поднимаемого груза зависит от его местоположения. Если груз находится в середине пролётной части стрелы, то в расчёт берётся нормативное (максимальное) значение массы груза (при  $F_{(1)} = F_{max}$ ).

Значения коэффициента надёжности по нагрузке  $k_g$ . Таблица 2.1.

Масса груза т	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

Если груз находится на конце консольной части стрелы – значение грузоподъёмности  $F_{(2)} = F_{min}$  (минимальное). Поэтому и расчётная нагрузка от давления ходового колеса будет разная  $p_{(1)}$  и  $p_{(2)}$ . Её надо определять дважды, для двух положений груза.

Сила инерции, возникающая при резком подъёме или торможении груза, находится по известной формуле:

$$F_{и} = m_{гр} \cdot a = m_{гр} \cdot \frac{v_n}{t_n} \quad (2.12)$$

где  $m_{гр.}$  – масса поднимаемого груза и крюковой обоймы (т, кг),  
 $a$  – ускорение,  $v_n$  – скорость подъёма груза, м/с, (она задаётся).  
 $t_n$  – время разгона (торможения) груза, с. Рекомендуется принимать  
 $t_n = 1 - 3$  с. Чем больше масса поднимаемого груза, тем больше  $t_n$ .

• Стержни нижнего пояса испытывают также изгиб от местного давления ходовых колёс грузовой тележки. Изгибающий момент в этом случае, при  $d \geq \frac{l_m}{2}$  равен:  $M_{п} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot p_{(1,2)} \cdot l_m = 0,35 \cdot p_{(1,2)} \cdot l_m$  (2.13)

где  $p_{(1,2)}$  – нагрузка на ходовое колесо, 0,7 – коэффициент учёта жёсткости узла,  $l_m$  – длина панели фермы,  $d$  – расстояние (база) между колёсами грузовой тележки.

(Примечание: 0,5 – так как 2 колеса в одной плоскости, а всего их – 4).

### 2.1.5. Определение нагрузки от усилия в канате механизма подъёма груза $S_{п}$ .

Усилие в канате механизма подъёма груза определяется по формуле:

$$S_{п} = \frac{F \cdot k_q + G_o \cdot k_g + F_{и}}{i \cdot \eta} \quad (2.14)$$

где  $i$  – кратность полиспаста в механизме подъёма груза. Принимается в пределах (2 – 4) в зависимости от массы груза,  
 $\eta$  – к.п.д. полиспаста ( $\eta = 0,9 - 0,92$ ).

При 1-м типе запасовки канатов механизма подъёма грузов на металлоконструкцию верхнего пояса стрелы устанавливается дополнительный направляющий блок каната подъёма груза (чтобы избежать трение каната о металлоконструкцию). При этом угол наклона

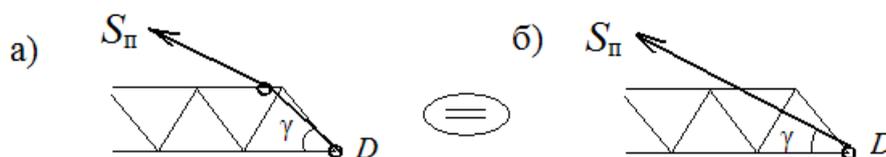


Рис. 2.3. Канат механизма подъёма груза: а) в действительности, б) при расчёте

каната к горизонтальной плоскости  $\gamma$  несколько меняется. На верхний пояс будут действовать незначительные поперечные усилия, которые будут восприниматься раскосами вертикальных ферм. Ими, в силу малости, в расчётах пренебрегают.

### 2.1.6. Определение нагрузки от усилия в канате механизма перемещения тележки $S_T$

Усилие в канате механизма перемещения тележки  $S_T$  определяется при расчёте канатного механизма. Предварительно его можно принять в пределах:  $S_T = (2 - 4) \text{ кН}$ .

Продольные усилия от  $S_T$  и  $S_{\Pi}$  будут восприниматься как сжимающая нагрузка элементами нижнего пояса вертикальных ферм через обводные блоки (т.  $D$ ).

При разных типах запасовки канатов механизма подъёма грузов эти усилия будут разными.

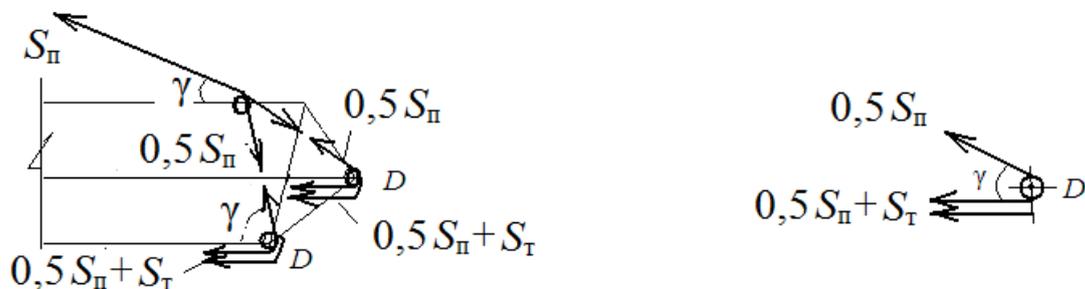


Рис. 2.4. Первый тип запасовки канатов механизма подъёма грузов

$$N_{i \text{ тип } 1} = S_T + 0,5 S_{\Pi} + 0,5 S_{\Pi} \cos \gamma = S_T + 0,5 S_{\Pi} (1 + \cos \gamma) \quad (2.15)$$

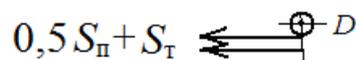


Рис. 2.5. Второй тип запасовки канатов механизма подъёма грузов

$$N_{i \text{ тип } 2} = S_T + 0,5 S_{\Pi} \quad (2.16)$$

### 2.1.7. Определение нагрузки от усилия в расчале стрелы $S_p$

Усилие в расчале стрелы  $S_p$  определяется из условия равновесия всех сил, приложенных к стреле (из уравнения моментов относительно пяты стрелы  $\Sigma M_A = 0$ ). При составлении уравнения моментов относительно точки  $A$  следует учесть следующее:

- при 1-м типе запасовки канатов механизма подъёма грузов, когда конец каната крепится к металлоконструкциям у пяты стрелы (в т.  $A$ ) в уравнении равновесия  $\Sigma M_A = 0$  участвует вертикальная составляющая усилия  $S_{\Pi}$ :  $S_{\Pi \text{ верт.}} = S_{\Pi} \cdot \sin \gamma$  (см. пример 1).

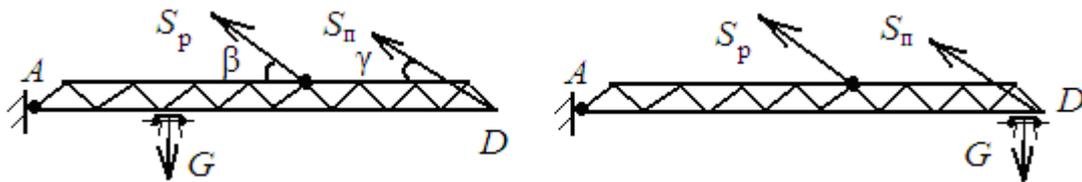


Рис. 2.6. Силы, действующие на стрелу при первом типе запасовки.

- при 2-м типе запасовки канатов механизма подъёма грузов, когда конец каната крепится к металлоконструкциям у оголовка стрелы (в т.  $D$ ) усилие  $S_{II}$  в уравнении равновесия  $\Sigma M_A = 0$  отсутствует, так как  $S_{II} = 0$  (см. пример 2).

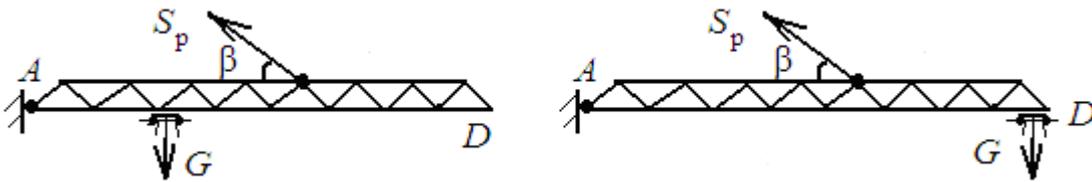


Рис. 2.7. Силы, действующие на стрелу при втором типе запасовки.

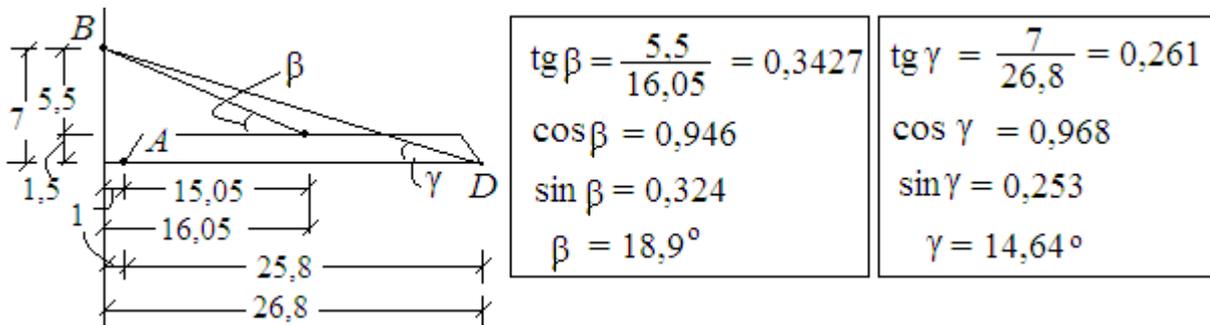
При определении нагрузки на нижние пояса вертикальных ферм следует учесть, что расчал крепится к верхнему поясу, а нижних поясов два. Следовательно, *при определении усилий в каждом нижнем поясе надо учитывать лишь половину значения усилия в расчале* ( $S_p / 2$ ).

Определив все нагрузки и усилия в канатах, можно построить эпюры моментов для стрелы (как для балки) для 2-х случаев расположения тележки с грузом: в середине пролётной части и на конце стрелы (см. рис. 2.1). Если моменты  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  расходятся существенно по своим значениям, следует пересмотреть размеры стрелы.

### **Пример расчёта нагрузок для вертикальных ферм** (продолжение примера №1)

Обозначим:  $B$  – усилия в стержнях верхнего пояса,  
 $H$  – усилия в стержнях нижнего пояса,  
 $P$  – усилия в раскосах,  
 $C$  – усилия в стойках.

- Определяем углы наклона расчала и каната подъёма груза к горизонту и геометрические параметры:



1) Определяем равномерно-распределённую нагрузку от собственного веса стрелы:

$$q_B = k_g \cdot q_{\text{сн}} = 1,1 \cdot 1,28 = 1,4 \text{ кН/м}; \quad q_B = 1,4 \text{ кН/м};$$

здесь  $q_{\text{сн}} = 1,28 \text{ кН/м}$  – расчётная нормативная равномерно-распределённая нагрузка от собственного веса;  $k_g = 1,1$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки).

2) Определяем сосредоточенную подвижную нагрузку  $p_{(1,2)}$  от давления ходовых колёс грузовой тележки для 2-х положений грузовой тележки: (1) - в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$p_{(1,2)} = \frac{1}{n_k} [F_{(1,2)} \cdot k_q + (G_T + G_o) \cdot k_g + F_{\text{и}(1,2)}] \quad (2.11)$$

где  $n_k = 4$  – число ходовых колёс тележки (при массе груза до 10 т);  $k_q = 1,25$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки) для массы поднимаемого груза (2.1.3.табл.1);  $k_g = 1,1$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки) для веса грузовой тележки и крюковой обоймы;  $F_1 = 70 \text{ кН}$ ;  $F_2 = 35 \text{ кН}$  – грузоподъёмность крана при 2-х положениях грузовой тележки (заданы);  $G_T = 6,57 \text{ кН}$  – вес грузовой тележки;  $G_o = 3,29 \text{ кН}$  – вес крюковой обоймы;

• Определяем силу инерции  $F_{\text{и}}$  для 2-х положений грузовой тележки: (1) – в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$F_{\text{и}(1,2)} = m_{\text{гр}} \cdot a = m_{\text{гр}} \frac{v_n}{t_n} \quad (2.12)$$

$$F_{\text{и}(1)} = m_{\text{гр}} \cdot a = (m_{g(1)} + m_o) \frac{v_{n1}}{t_{n1}} = (7 + 0,335) \frac{22}{60 \cdot 1,1} = 2,445 \text{ кН};$$

$$F_{\text{и}(2)} = m_{\text{гр}} \cdot a = (m_{g(2)} + m_o) \frac{v_{n2}}{t_{n2}} = (3,5 + 0,335) \frac{22}{60 \cdot 1} = 1,406 \text{ кН};$$

Здесь:  $m_o = 0,335 \text{ т}$  масса крюковой обоймы;  $m_{g(1)} = 7 \text{ т}$  и  $m_{g(2)} = 3,5 \text{ т}$  – масса груза при 2-х положениях грузовой тележки;  $t_{n(1)} = 1,1 \text{ с}$  (при

$m_{g(1)} = 7$  т) и  $t_{н(2)} = 1$ , с (при  $m_{g(2)} = 3,5$  т) – время разгона (торможения) груза для 2-х положений грузовой тележки,  $a$  – ускорение,  $v_n = 22$  м/с – скорость подъёма груза (задана).

• Обозначим для упрощения дальнейших расчётов суммарную нагрузку от веса груза, грузовой тележки и крюковой обоймы через  $Q_{(1)}$  и  $Q_{(2)}$  для 2-х положений грузовой тележки:

(1) - в середине пролёта:  $Q_{(1)} = F_1 \cdot k_q + (G_T + G_o) k_g + F_{и1} = 70 \cdot 1,25 + (6,67 + 3,29)1,1 + 2,445 = 98,35$  кН;

(2) – на конце стрелы:  $Q_{(2)} = F_2 \cdot k_q + (G_T + G_o) k_g + F_{и2} = 35 \cdot 1,25 + (6,67 + 3,29)1,1 + 1,406 = 56,0$  кН;

• Подставляем найденные значения и находим:

$$p_{(1)} = \frac{1}{n_k} Q_{(1)} = \frac{1}{4} 98,35 = 24,6 \text{ кН}; \quad p_{(1)} = 24,6 \text{ кН};$$

$$p_{(2)} = \frac{1}{n_k} Q_{(2)} = \frac{1}{4} 56 = 14 \text{ кН}; \quad p_{(2)} = 14 \text{ кН};$$

3) Определяем наибольший изгибающий момент, действующий на ферму и вызывающий усилия в стержнях нижнего пояса от давления грузовой тележки (на каждую панель).

При  $d > l_m / 2$ , (у нас:  $1,2 > 2,15 / 2$ ).

$M_{нп} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot p \cdot l_m$ ;  $M_{нп} = 0,35 \cdot p_{(1)} \cdot l_m = 0,35 \cdot 24,6 \cdot 2,15 = 18,5$  кН·м;  
 $M_{нп} = 18,5$  кН·м;

4) Определяем усилие в канате подъёма груза для 2-х положений грузовой тележки: (1) – в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$S_{п} = \frac{F \cdot k_q + G_o \cdot k_g + F_{и}}{i \cdot \eta} \quad (2.14)$$

где  $i = 2$  – кратность полиспаста в механизме подъёма груза;

$\eta = 0,91$  – к.п.д. полиспаста;

$$S_{п(1)} = \frac{F_1 \cdot k_q + G_o \cdot k_g + F_{и1}}{i \cdot \eta} = \frac{70 \cdot 1,25 + 3,29 \cdot 1,1 + 2,445}{2 \cdot 0,91} = 51,4 \text{ кН};$$

$$S_{п(2)} = \frac{F_2 \cdot k_q + G_o \cdot k_g + F_{и2}}{i \cdot \eta} = \frac{35 \cdot 1,25 + 3,29 \cdot 1,1 + 1,406}{2 \cdot 0,91} = 26,8 \text{ кН};$$

5) Усилие в канате механизма перемещения грузовой тележки принимаем по рекомендации:  $S_T = 3$  кН.

6) Определяем усилие сжатия на нижний пояс от канатов подъёма груза  $S_{п}$  и механизма перемещения грузовой тележки  $S_T$  для двух положений грузовой тележки: (1) – в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$H_{i\Gamma(1)} = - [S_T + 0,5 S_{II} (1 + \cos \gamma)] = - [3 + 0,5 \cdot 51,4 (1 + 0,97)] = - 53,7; \quad H_{i\Gamma(1)} = - 53,7 \text{ кН};$$

$$H_{i\Gamma(2)} = - [S_T + 0,5 S_{II} (1 + \cos \gamma)] = - [3 + 0,5 \cdot 26,8 (1 + 0,97)] = - 29,4; \quad H_{i\Gamma(2)} = - 29,4 \text{ кН};$$

То есть усилие в стержне  $H_2$  (см. разрез в дальнейшем) будет:

$$H_{2\Gamma(1)} = - 53,7 \text{ кН (при 1-м положении грузовой тележки)}$$

$$H_{2\Gamma(2)} = - 29,4 \text{ кН (при 2-м положении грузовой тележки).}$$

Следовательно, усилие в стержнях  $H_1$  и  $H_2$  будет:

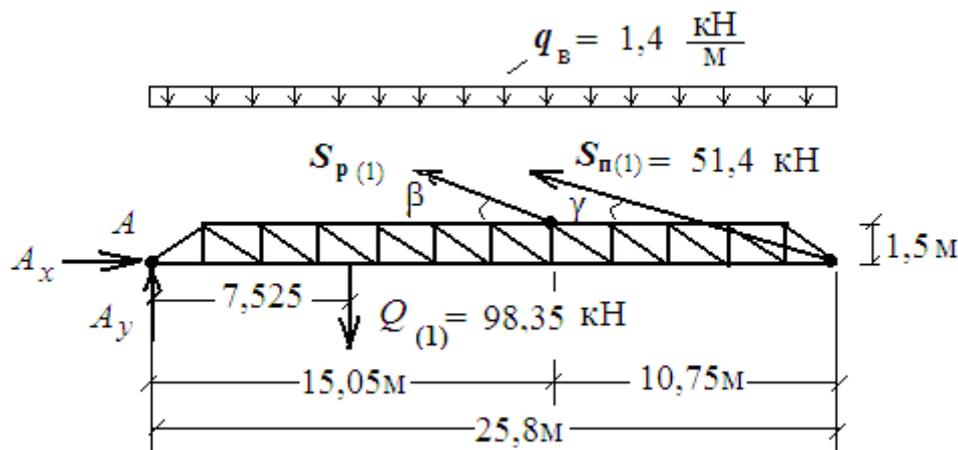
$$H_{1\Gamma(1)} = H_{2\Gamma(1)} = - 53,7 \text{ кН (при 1-м положении грузовой тележки)}$$

$$H_{1\Gamma(2)} = H_{2\Gamma(2)} = - 29,4 \text{ кН (при 2-м положении грузовой тележки).}$$

7) Определяем усилия в расчале  $S_p$  ( $S_{p(1)}$  и  $S_{p(2)}$ ) стрелы для 2-х положений грузовой тележки из уравнения равновесия  $\Sigma M_A = 0$ :

• Положение груза (1) – в середине пролётной части стрелы:

$$Q_{(1)} = 98,35 \text{ кН}; \quad S_{II(1)} = 51,4 \text{ кН};$$



$$\Sigma M_{A(1)} = 0; \quad q_B \cdot 25,8 \frac{25,8}{2} + Q_{(1)} \cdot 7,525 - S_{II(1)} \cdot \sin \gamma \cdot 25,8 -$$

$$- S_{p(1)} \cdot \sin \beta \cdot 15,05 - S_{p(1)} \cdot \cos \beta \cdot 1,5 = 0; \quad 1,4 \cdot 25,8 \frac{25,8}{2} + 98,35 \cdot 7,525 -$$

$$- 51,4 \cdot 0,253 \cdot 25,8 - S_{p1} \cdot 0,324 \cdot 15,05 - S_{p(1)} \cdot 0,95 \cdot 1,5 = 0;$$

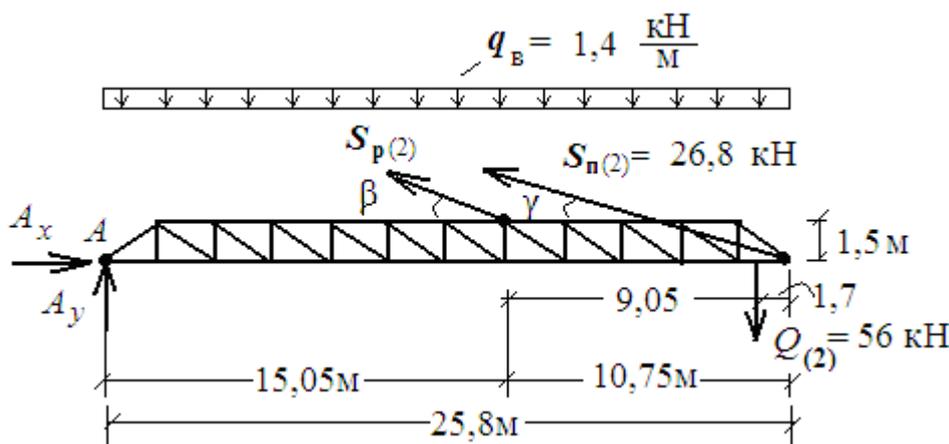
$$S_{p(1)} = 140,1 \text{ кН};$$

Определяем из уравнений равновесия:  $\Sigma x = 0$ ;  $A_x = 182,96 \text{ кН}$ ,

$$\Sigma y = 0; \quad A_y = 76,79 \text{ кН},$$

• Положение груза (2) – в конце консольной части стрелы:

$$Q_{(2)} = 56 \text{ кН}; \quad S_{II(2)} = 26,8 \text{ кН};$$



$$\begin{aligned} \Sigma M_{A(2)} = 0; & q_B \cdot 25,8 \frac{25,8}{2} + Q_{(2)} \cdot 24,1 - S_{n(2)} \cdot \sin \gamma \cdot 25,8 - S_{p(2)} \cdot \sin \beta \cdot 15,05 - \\ & - S_{p(2)} \cdot \cos \beta \cdot 1,5 = 0; 1,4 \cdot 25,8 \frac{25,8}{2} + 56 \cdot 24,1 - 26,8 \cdot 0,253 \cdot 25,8 - \\ & - S_{p(2)} \cdot 0,324 \cdot 15,05 - S_{p(2)} \cdot 0,95 \cdot 1,5 = 0; S_{p(2)} = 263,25 \text{ кН}; \\ \text{Определяем из уравнений равновесия: } \Sigma x = 0; & A_x = 276,1 \text{ кН}, \\ \Sigma y = 0; & A_y = 1,18 \text{ кН}. \end{aligned}$$

8) Усилия ( $B$ ) сжатия в стержнях *верхнего пояса* фермы от усилия в расчале  $S_p$  (от точки  $C$  – крепления расчала до точки  $A$  – пяты стрелы) для 2-х положений грузовой тележки:

(1) – в середине пролёта:

$$B_{i p(1) \text{ верх.п.}} = -S_{p(1)} \cdot \cos \beta = -140,1 \cdot 0,946 = -133,1 \text{ кН};$$

(2) – на конце стрелы:

$$B_{i p(2) \text{ верх.п.}} = -S_{p(2)} \cdot \cos \beta = -261,5 \cdot 0,946 = -248,4 \text{ кН};$$

То есть усилие от расчала в стержне  $B_1$  (см. разрез 1 в дальнейшем) будет:  $B_{1 p(1)} = -133,1 \text{ кН}$  (при 1-м положений грузовой тележки)

$$B_{1 p(2)} = -248,4 \text{ кН} \text{ (при 2-м положений грузовой тележки)}$$

9) Усилия ( $H$ ) сжатия в стержнях *нижнего пояса пролётной части* фермы от усилия в расчале  $S_p$  (от точки  $C$  - крепления расчала до точки  $A$  – пяты стрелы) для 2-х положений грузовой тележки будут в 2 раза меньше (так как нижних поясов два):

$$H_{i(1) \text{ ниж.п.}} = -133,1 \cdot 0,5 = -66,6 \text{ кН};$$

$$H_{i(2) \text{ ниж.п.}} = -248,4 \cdot 0,5 = -124,2 \text{ кН};$$

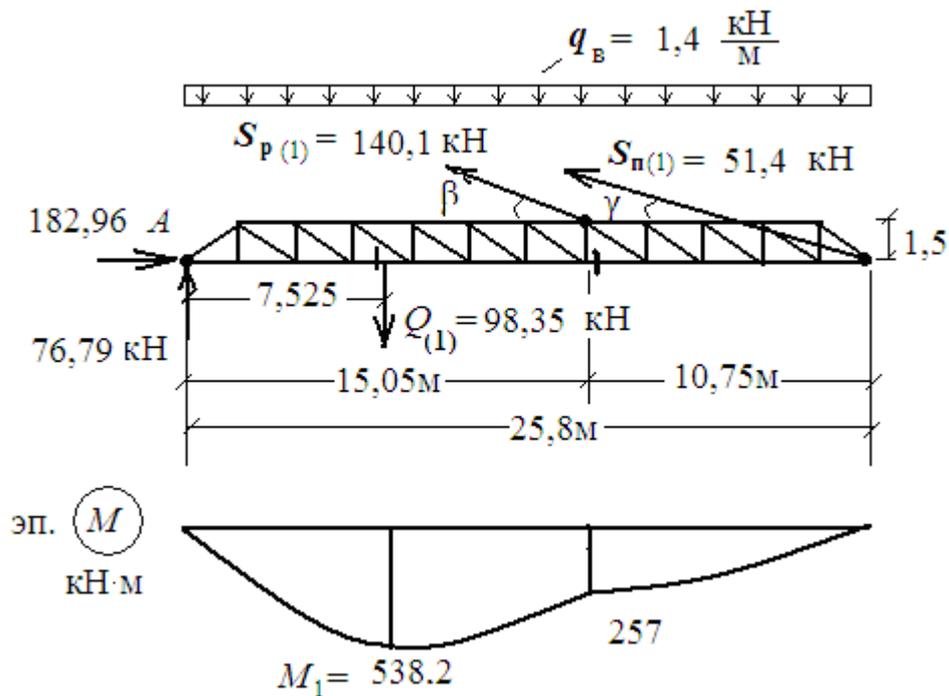
То есть усилие от расчала в стержне  $H_1$  будет:

$$H_{1 p(1)} = -66,6 \text{ кН} \text{ (при 1-м положений грузовой тележки)}$$

$$H_{1 p(2)} = -124,2 \text{ кН} \text{ (при 2-м положений грузовой тележки)}$$

10) Построим эпюры моментов для стрелы для 2-х случаев расположения тележки с грузом: в середине пролётной части и на конце стрелы.

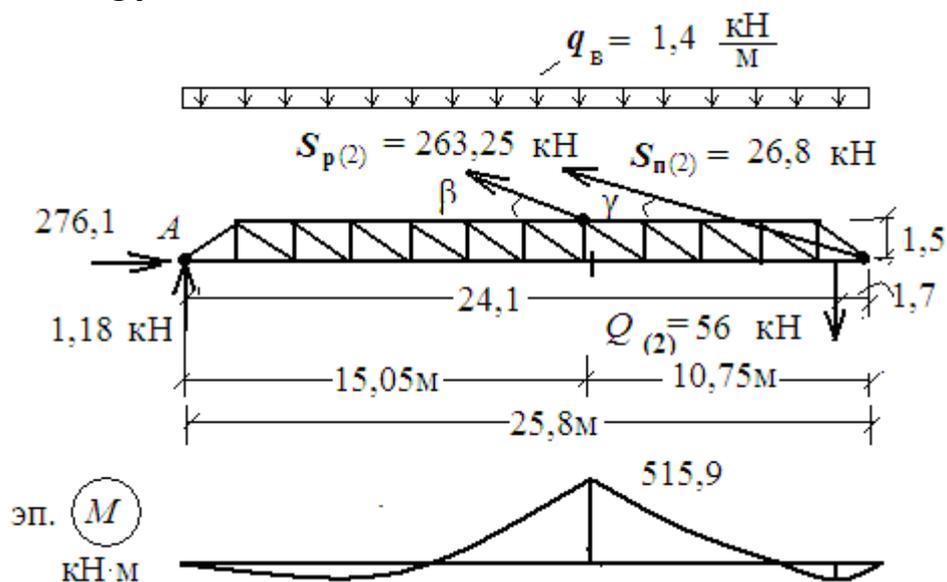
-1-й случай нагружения:



$$M_1 = 76,79 \cdot 7,525 - 1,4 \cdot 7,525^2 \cdot \frac{1}{2} = 538,2 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$M_3 = 76,79 \cdot 15,05 - 98,35 \cdot 7,525 - 1,4 \cdot 15,05^2 \cdot \frac{1}{2} = 257 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

-2-й случай нагружения:



$$M_3^{\text{лев}} = 1,18 \cdot 15,05 - 1,4 \cdot 15,05^2 \cdot \frac{1}{2} - 263,25 \cdot 0,95 \cdot 1,5 = -515,9 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Сравним величины моментов в характерных точках:

$M_1 = 538,2 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ,  $M_3 = 515,9 \text{ кН}\cdot\text{м}$ . Числа сопоставимые.

• Вывод: расчётная схема фермы и нагрузки принимаются для дальнейших расчётов.

## 2.2. Линии влияния в стержнях ферм. Определение усилий в стержнях ферм по линиям влияния [2]

При перемещениях тележки с грузом в стержнях ферм будут возникать переменные усилия, которые будут меняться не только по величине, но и по направлению. Чтобы подобрать сечение какого-либо стержня, надо знать самое невыгодное положение нагрузки, при котором усилие в этом стержне будет наибольшим. Для этого необходимо построить линии влияния. Как известно, они строятся от единичной безразмерной нагрузки  $F = 1$ , которая устанавливается в произвольном положении с координатой  $x$  в произвольно выбранной системе координат. Затем из уравнений равновесия устанавливается зависимость определяемой величины от текущей координаты  $x$  и строится график (линия влияния искомой величины).

Для определения усилия в стержне фермы от заданной нагрузки с помощью линии влияния пользуются следующими формулами:

- от равномерно-распределённой нагрузки (собственного веса):

$$N_G = q_v \cdot \omega ; \quad (2.17)$$

- от сосредоточенной нагрузки:  $N_F = \Sigma (F_i \cdot y_i) ; \quad (2.18)$

где  $N_G$  – величина усилия в рассматриваем стержне от собственного веса фермы,

$q_v$  - величина равномерно-распределённой нагрузки от собственного веса на единицу длины,

$\omega$  – площадь линии влияния под равномерно-распределённой нагрузкой,

$N_F$  – величина усилия в рассматриваем стержне от сосредоточенной нагрузки,

$F_i$  - величины сосредоточенных сил,

$y_i$  – ордината на линии влияния под сосредоточенной силой.

Подробное изложение построения линий влияния изучается в курсе «Строительная механика». Поэтому рассмотрим построение линий влияния и определение усилий по ним на примере.

### *Пример построения линий влияния и определения усилий в стержнях вертикальных ферм (продолжение примера №1)*

По эпюрам моментов, построенным выше, видно, что наиболее опасными являются сечения в середине пролётной части фермы и у

расчала в её консольной части. Именно в этих местах проведём сечения 1-1 и 2-2 и построим линии влияния для определения усилий в наиболее нагруженных стержнях от собственного веса и подвижной нагрузки от грузовой тележки с грузом.

$q_v = 1,4$  кН/м – величина равномерно-распределённой нагрузки от собственного веса на единицу длины;

$p_{(1)} = 24,6$  кН – нагрузка на ходовое колесо (сеч. 1-1);

$p_{(2)} = 14$  кН – нагрузка на ходовое колесо (сеч. 2-2);

*Линия влияния усилия в расчале  $S_p$ :*

$$\sum M_A = 0; 1 \cdot x_1 - S_p \cdot \cos \beta \cdot 1,5 - S_p \cdot \sin \beta \cdot 15,05 = 0;$$

$$\cos \beta = 0,946; \quad \sin \beta = 0,324 \text{ (см. выше);}$$

$$1 \cdot x_1 - S_p \cdot 0,946 \cdot 1,5 - S_p \cdot 0,324 \cdot 15,05 = 0; \quad S_p = 0,16 x_1;$$

(уравнение прямой, зависящей от текущей координаты; для построения линии влияния достаточно определить 2 точки):

при  $x_1 = 0$ ;  $S_p = 0$ ;

$$x_1 = 25,8 \text{ м}; \quad S_p = 0,16 \cdot 25,8 = 4,13;$$

*Линия влияния горизонтальной составляющей опорной*

*реакции  $A_x$ :  $\sum x = 0$ ;  $A_x - S_p \cdot \cos \beta = 0$ ;  $A_x = 0,16 \cdot 0,946 \cdot x_1$ ;  $A_x = 0,15 x$ ;*

при  $x_1 = 0$ ;  $A_x = 0$ ; при  $x_1 = 25,8$  м;  $A_x = 0,15 \cdot 25,8 = 3,87$ ;

*Линия влияния вертикальной составляющей опорной реакции  $A_y$*

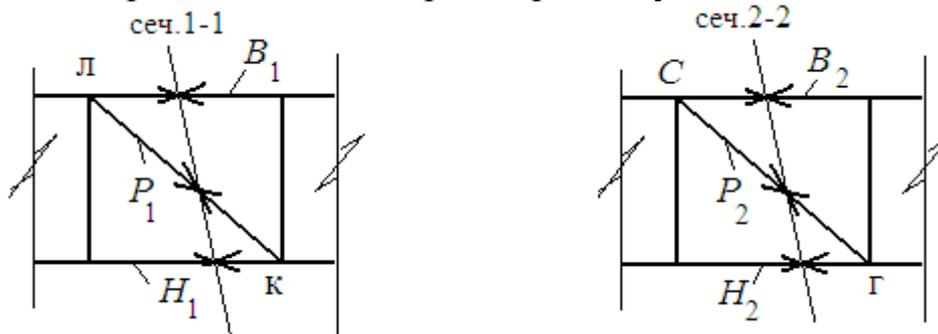
$$A_y - 1 + S_p \cdot \sin \beta = 0; \quad A_y = 1 - 0,16 \cdot 0,324 \cdot x; \quad A_y = 1 - 0,052 x_1;$$

при  $x_1 = 0$ ;  $A_y = 1$ ; при  $x_1 = 25,8$  м;  $A_y = 1 - 0,052 \cdot 25,8 = -0,34$ ;

Определим место, где л.в.  $A_y$  меняет знак:  $A_y = 1 - 0,052 x_1 = 0$ ;

$$x_1 = 1/0,052 = 19,3 \text{ м.}$$

Выше были определены «опасные сечения» в вертикальных фермах. Применим метод сечений, и в этих местах проведём сечения 1-1 и 2-2, соответственно. Пронумеруем разрезанные стержни и обозначим их, соответственно:  $B_1$ ,  $P_1$  и  $H_1$  в сечении 1-1 и  $B_2$ ,  $P_2$  и  $H_2$  в сечении 2-2. Предполагаем стержни растянутыми.



Построим линии влияния для них, рассматривая равновесие отсечённых частей и составляя уравнения равновесия.

**Сечение 1-1. Линия влияния усилия в стержне  $B_1$  (верхний пояс):**

• *груз слева* (смотрим правую часть):

$$\Sigma M_K^{\text{пр.}} = 0; -B_1 \cdot 1,5 - S_p \cdot \cos \beta \cdot 1,5 - S_p \cdot \sin \beta \cdot 6,45 = 0;$$

$$-B_1 \cdot 1,5 - S_p \cdot 0,946 \cdot 1,5 - 0,324 \cdot 6,45 = 0; B_1 = -2,34 S_p;$$

при  $S_p = 0$ ;  $B_1 = 0$ ; при  $S_p = 4,13$ ;  $B_1 = -2,34 \cdot 4,13 = -9,66$ ;

Проводим линию влияния слева от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:

$$y = \frac{9,66}{25,8} \cdot 6,45 = 2,415;$$

• *груз справа* (смотрим левую часть):

$$\Sigma M_K^{\text{лев.}} = 0; B_1 \cdot 1,5 + A_y \cdot 8,6 = 0; B_1 = -5,73 A_y;$$

при  $A_y = 1$ ;  $B_1 = -5,73$ ; при  $A_y = -0,34$ ;  $B_1 = -5,73 \cdot (-0,34) = 1,94$ ;

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели.

(Обе линии влияния должны пересекаться под моментной точкой).

Определяем недостающую координату из подобия треугольников:

$$y = \frac{7,17}{25,8} \cdot 17,2 = 4,78;$$

Проводим передаточную линию. Она соединяет обе части линии влияния и находится под рассматриваемой панелью.

(Передаточная линия совпадает с л.в. «груз слева»)

• Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузовую тележку будем устанавливать в 2-х наиболее неблагоприятных положениях. Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_1 = \frac{5,73}{19,3} \cdot 9,5 = 2,82; \quad y_2 = \frac{1,94}{6,5} \cdot 4,2 = 1,25; \quad y_3 = \frac{1,94}{6,5} \cdot 5,4 = 1,61;$$

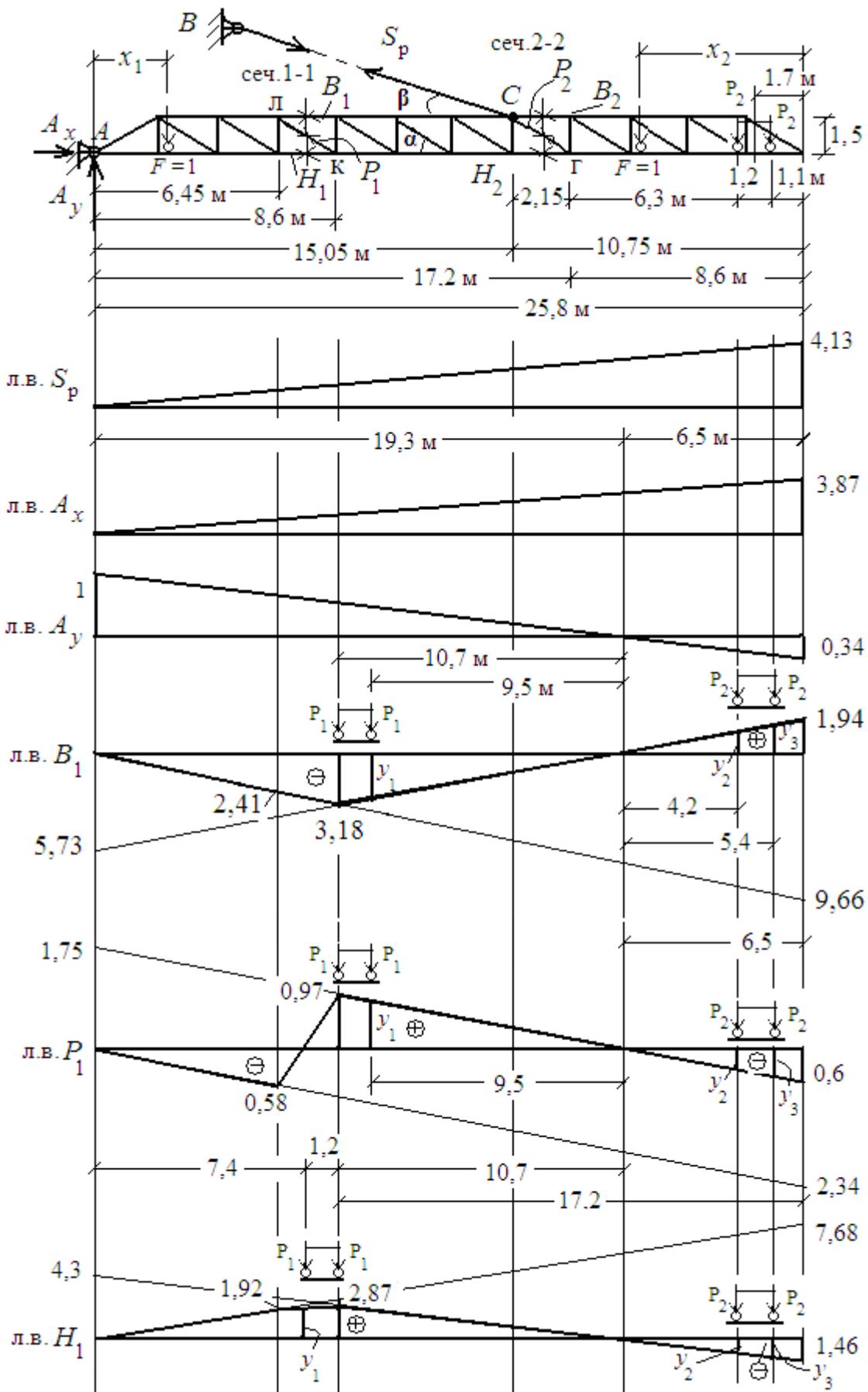
Определим площадь линии влияния  $B_1$ :

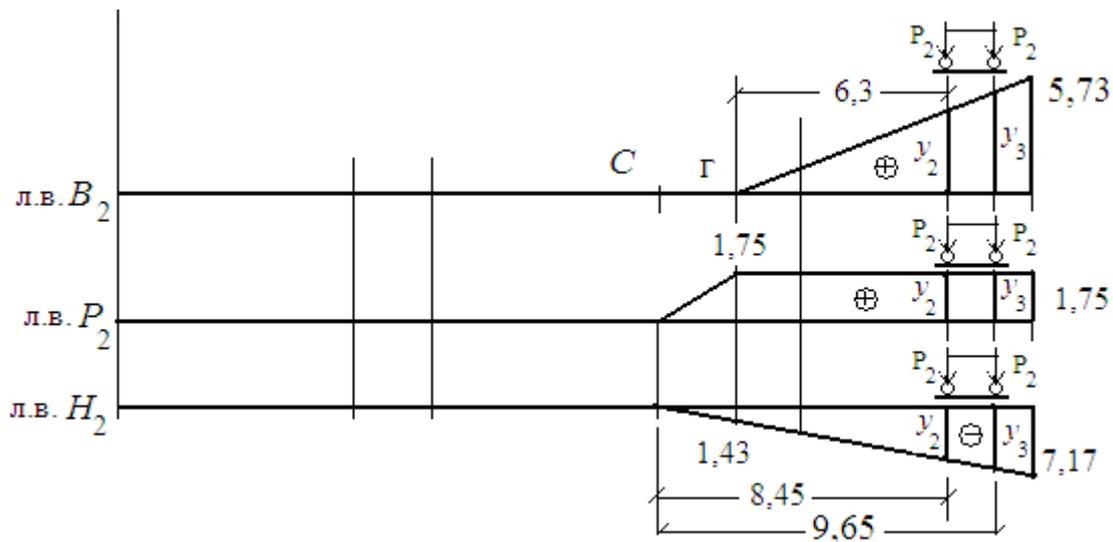
$$\omega = -\frac{1}{2} \cdot 3,18 \cdot 8,6 - \frac{1}{2} \cdot 3,18 \cdot 10,7 + \frac{1}{2} \cdot 1,94 \cdot 6,5 = -24,38;$$

**Линия влияния усилия в стержне  $P_1$  (раскос):**

• *груз слева* (смотрим правую часть):  $\Sigma y^{\text{пр.}} = 0; P_1 \cdot \sin \alpha + S_p \cdot \sin \beta = 0;$

из треугольника:  $\text{tg } \alpha = \frac{1,5}{2,15} = 0,7; \alpha = 35^\circ; \text{ тогда } \sin \alpha = 0,572;$





$$P_1 \cdot 0,572 + S_p \cdot 0,324 = 0; P_1 = -0,56 S_p;$$

$$\text{при } S_p = 0; P_1 = 0; \text{ при } S_p = 4,13; P_1 = -2,34;$$

Проводим прямую и обводим линию влияния слева от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия

$$\text{треугольников: } y = \frac{2,34}{25,8} \cdot 6,45 = 0,58;$$

$$\bullet \text{ груз справа (смотрим левую часть): } \Sigma y^{\text{лев.}} = 0; -P_1 \cdot \sin \alpha + A_y = 0;$$

$$-P_1 \cdot 0,566 + A_y = 0; P_1 = 1,75 A_y;$$

$$\text{при } A_y = 1; P_1 = 1,75; \text{ при } A_y = -0,34; P_1 = -0,34 \cdot 1,75 = -0,6;$$

Проводим прямую и обводим жирно линию влияния справа от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из

$$\text{подобия треугольников: } y = \frac{1,75}{19,3} \cdot 10,7 = 0,97; \text{ Проводим передаточ-$$

ную линию. (Обе прямые должны быть параллельны, так как параллельны пояса).

• Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку будем устанавливать в 2-х наиболее неблагоприятных положениях.

Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_1 = \frac{0,97}{10,7} \cdot 9,5 = 0,6; \quad y_2 = \frac{0,6}{6,5} \cdot 4,2 = 0,39; \quad y_3 = \frac{0,6}{6,5} \cdot 5,4 = 0,5;$$

$$\text{Определим площадь линии влияния } P_1: \omega = -\frac{1}{2} \cdot 6,45 \cdot 0,58 + \frac{1}{2} (0,97 -$$

$$-0,58) \cdot 2,15 + \frac{1}{2} \cdot 10,7 \cdot 0,97 - \frac{1}{2} \cdot 6,5 \cdot 0,6; \omega = -1,79;$$

Максимальное усилие в раскосе  $P_1$  от собственного веса стрелы:

$$P_{1G} = q_B \cdot \omega = 1,4(-1,79) = -2,5; P_{1G} = -2,5 \text{ кН (сжатие);}$$

Максимальные усилия в раскосе  $P_1$  от ходовых колёс грузовой тележки

$$P_{1F(1)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(1)} \cdot (0,97 + 0,86) = 24,6 \cdot 1,83 = 45,0;$$

тележка в середине пролёта:  $P_{1F(1)} = 45 \text{ кН (растяжение);}$

$$P_{1F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} \cdot (y_2 + y_3) = p_{(2)} \cdot (-0,39 - 0,5) = 14(-0,89) =$$

$$= -12,5; \text{ тележка на конце консоли: } P_{1F(2)} = -12,5 \text{ кН (сжатие).}$$

*Линия влияния усилия в стержне  $H_1$  (нижний пояс):*

• *груз слева* (смотрим правую часть):

$$\Sigma M_{\text{л}}^{\text{пр}} = 0; H_1 \cdot 1,5 - S_p \cdot \sin \beta \cdot 8,6 = 0; H_1 \cdot 1,5 - S_p \cdot 0,324 \cdot 8,6 = 0; H_1 = -1,83 S_p;$$

$$\text{при } S_p = 0; H_1 = 0; \text{ при } S_p = 4,13; H_1 = -7,68;$$

Проводим линию влияния слева от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:

$$y = \frac{7,68}{25,8} \cdot 6,45 = 1,92;$$

• *груз справа* (смотрим левую часть):

$$\Sigma M_{\text{л}}^{\text{лев}} = 0; -H_1 \cdot 1,5 + A_y \cdot 6,45 = 0; H_1 = 4,3 A_y;$$

$$\text{при } A_y = 1; H_1 = 4,3; \text{ при } A_y = -0,34; H_1 = -1,46;$$

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:

$$y = \frac{4,3}{25,8} \cdot 17,2 = 2,87;$$

Проводим передаточную линию. Она соединяет обе части линии влияния и находится под рассматриваемой панелью.

• Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузовую тележку будем устанавливать в 2-х наиболее неблагоприятных положениях.

Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_1 = 1,92 + \frac{2,87 - 1,92}{2,15} (2,15 - 1,2) = 2,34; y_2 = \frac{1,46}{6,5} \cdot 4,2 = 0,94;$$

$$y_3 = \frac{1,46}{6,5} \cdot 5,4 = 1,21;$$

Определяем площадь линии влияния  $H_1$ :  $\omega = \frac{1}{2} \cdot 6,45 \cdot 1,92 +$

$$+ \frac{1}{2} (1,92 + 2,87) \cdot 2,15 + \frac{1}{2} \cdot 10,7 \cdot 2,83 - \frac{1}{2} \cdot 6,5 \cdot 1,46; \omega = 21,74$$

Максимальные усилия в стержне  $H_1$  от собственного веса стрелы:

$$H_{1G} = q_B \cdot \omega = 1,4 \cdot 21,74 = 30,4; H_{1G} = 30,4 \text{ кН (растяжение);}$$

Максимальные усилия в стержне  $H_1$  от ходовых колёс грузовой тележки:  $H_{1F(1)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(1)} \cdot (2,34 + 2,87) = 24,6 \cdot 5,21 = 128,2;$

тележка в середине пролёта:  $H_{1F(1)} = 128,2 \text{ кН (растяжение);}$

$$H_{1F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} \cdot (y_2 + y_3) = p_{(2)} \cdot (-0,94 - 1,21) = 14 \cdot 2,15 = -30,1;$$

тележка на конце консоли:  $H_{1F(2)} = -30,1 \text{ кН (сжатие);}$

**Сечение 2–2.** Линия влияния усилия в стержне  $B_2$  (верхний пояс):

• *груз слева* (смотрим правую часть): все стержни – нулевые (по признакам нулевых стержней):  $B_2 = P_2 = H_2 = 0.$

• *груз справа* (смотрим правую часть):

$$\Sigma M_{\Gamma}^{\text{лев.}} = 0; -B_2 \cdot 1,5 + 1 \cdot (8,6 - x_2) = 0; B_2 = \frac{8,6 - x}{1,5};$$

при  $x_2 = 0; B_2 = 5,73;$  при  $x_2 = 8,6; B_2 = 0;$

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели. Проводим передаточную линию. Она совпадает с нулевой линией.

• Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку будем устанавливать в наиболее неблагоприятное положение. Для усилия  $B_2$  оно одно (на конце консоли).

- Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_2 = \frac{5,73}{8,6} 6,3 = 4,2; y_3 = \frac{5,73}{8,6} 7,5 = 5,0;$$

- Определим площадь линии влияния  $B_2$ :  $\omega = \frac{1}{2} 8,6 \cdot 5,73 = 24,64;$

- Максимальное усилие в стержне  $B_2$  от собственного веса стрелы:

$$B_{2G} = q_B \cdot \omega = 1,4 \cdot 24,64 = 34,5; B_{2G} = 34,5 \text{ кН (растяжение);}$$

- Максимальные усилия в стержне №4 от ходовых колёс грузовой тележки: тележка в середине пролёта:  $B_{2F(1)} = 0;$

$$\text{тележка на конце консоли: } B_{2F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} \cdot (y_2 + y_3) = 14(4,2 + 5) = +14 \cdot 9,2 = 128,8; B_{2F(2)} = +128,8 \text{ кН (растяжение);}$$

*Линия влияния усилия в раскосе  $P_2$ :*

• *груз слева* (смотрим правую часть):  $P_2 = 0.$

• *груз справа* (смотрим правую часть):  $\Sigma y^{\text{лев.}} = 0; P_2 \cdot \sin \alpha - 1 = 0;$

$$P_2 \cdot 0,572 - 1 = 0; P_2 = 1,75; \text{ (уравнение прямой, не зависящей от } x).$$

Проводим прямую, параллельную нулевой линии справа от рассматриваемой панели. Проводим передаточную линию.

- Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку будем устанавливать в наиболее неблагоприятное положение. Для усилия  $P_2$  оно одно (на конце консоли)  $y_2 = y_3 = 1,75$ ;

- Определим площадь линии влияния  $P_2$ :

$$\omega = \frac{1}{2} 2,15 \cdot 1,75 + 1,75 \cdot 8,6 = 16,93;$$

- Максимальное усилие в раскосе  $P_2$  от собственного веса стрелы:

$$N_{5G} = q_B \cdot \omega = 1,4 \cdot 16,93 = 23,7; \quad P_{2G} = 23,7 \text{ кН (растяжение);}$$

- Максимальные усилия в раскосе  $P_2$  от ходовых колёс грузовой тележки: тележка в середине пролёта:  $P_{2F(1)} = 0$ ;

тележка на конце консоли:  $P_{2F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_2 (y_2 + y_3) = 14 \cdot 2 \cdot 1,75 = 49$ ;  
 $P_{2F(2)} = 49 \text{ кН (растяжение);}$

*Линия влияния усилия в стержне  $H_2$  (нижний пояс):*

- груз слева (смотрим правую часть):  $N_6 = 0$ .

- груз справа (смотрим правую часть):

$$\Sigma M_C^{\text{лев.}} = 0; \quad H_2 \cdot 1,5 + 1 \cdot (10,75 - x_2) = 0; \quad H_2 = - \frac{10,75 - x}{1,5};$$

При  $x = 0$ ;  $H_2 = -7,17$ ; при  $x = 8,6$ ;  $H_2 = -1,43$ ; при  $x = 10,75$ ;  $H_2 = 0$ ;

Проводим прямую и обводим жирно линию влияния справа от рассматриваемой панели. Проводим передаточную линию. Она совпадает с продолжением линии влияния.

- Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку установим в наиболее неблагоприятное положение. Для усилия  $H_2$  оно одно (на конце консоли).

- Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_2 = \frac{7,17}{10,75} 8,45 = 5,64; \quad y_3 = \frac{7,17}{10,75} 9,65 = 6,44;$$

- Определим площадь линии влияния  $H_2$ :  $\omega = - \frac{1}{2} 7,17 \cdot 10,75 = -38,54$ ;

- Максимальное усилие в стержне  $H_2$  от собственного веса стрелы:

$$H_{2G} = q_B \cdot \omega = 1,4 (-38,54) = -54; \quad H_{2G} = -54 \text{ кН (сжатие);}$$

- Максимальные усилия в стержне  $H_2$  от ходовых колёс грузовой тележки: тележка в середине пролёта:  $H_{2F(1)} = 0$ ;

тележка на конце консоли:  $H_{2F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)}(y_2 + y_3) =$   
 $= 14(-5,64 - 6,44) = -169,1$ ;  $H_{2F(2)} = -169,1$  кН (сжатие);

## 2.3. Расчёт нагрузок в горизонтальной плоскости

Так как сечение стрелы крана – треугольное, нагрузки в горизонтальной плоскости воспринимает только горизонтальная часть фермы. При этом учитывается два вида нагрузок:

- ветровая нагрузка;
- силы инерции, которые возникают при разгоне (торможении) стрелы крана с грузом при её повороте.

Влияние этих нагрузок на стрелу крана в горизонтальной плоскости выглядит приблизительно так, как показано на рис. 2.11.

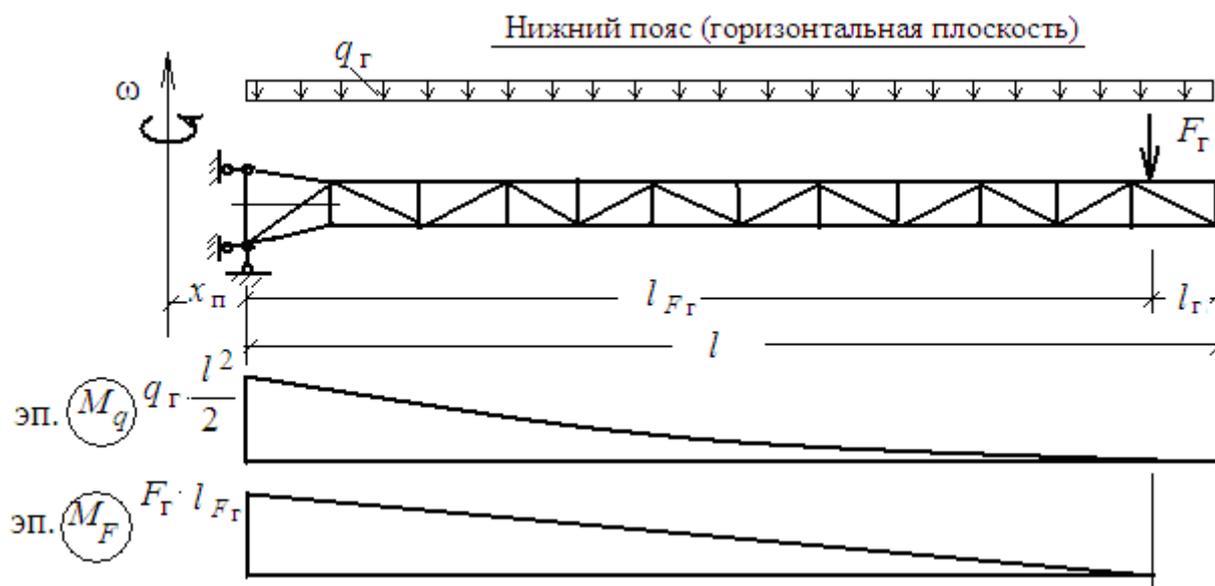


Рис. 2.11. Эпюры моментов от нагрузок в горизонтальной плоскости

### 2.3.1. Расчёт ветровой нагрузки

Ветровая нагрузка рассчитывается по ГОСТу 1451-77. Это – равномерно-распределённая нагрузка. Она может быть статической – при установившейся скорости ветра и динамической, которая вызвана пульсацией ветра. Статическая составляющая ветровой нагрузки:

$$F_B = w \cdot A \quad (2.19)$$

где  $F_B$  – ветровая нагрузка, кН:

( $F_{BC}$  – ветровая нагрузка на стрелу,  $F_{BG}$  – ветровая нагрузка на груз);

$w$  – расчётная ветровая нагрузка на единицу расчётной площади конструкции или груза в данной зоне высоты, Па;

$A$  – наветренная (расчётная) площадь стрелы  $A_c$  или груза  $A_{гр.}$ , м<sup>2</sup>.

$A_c$  – наветренная площадь стрелы определяется по формуле:

$$A_c = A_{ск} \cdot \varphi_3 \quad (2.20)$$

$A_{ск}$  – наветренная (расчётная) площадь стрелы по её контуру, м<sup>2</sup>;

$\varphi_3$  – коэффициент заполнения, равный:  $\varphi_3 = 0,2 - 0,4$  – для ферм из труб,  $\varphi_3 = 0,2 - 0,6$  – для ферм из прямоугольных профилей. Для конструкций из труб наветренная (расчётная) площадь может быть уменьшена путём умножения на поправочный коэффициент 0,75.

$A_{гр.}$  – наветренная (расчётная) площадь груза зависит от грузоподъёмности крана и вычисляется по формуле:  $A_{гр.} = 3,2 \cdot \sqrt{Q}$  (2.21)

Или по таблице 2.2:

Таблица 2.2

Масса груза, т	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
Площадь груза, $A_{гр}$ м <sup>2</sup>	4	5	5,6	6,3	7,1	8	9	10	12	14	16	18

Ветровую нагрузку на груз принимать не менее 500 Н.

Ветровую нагрузку на груз необходимо определять для груза, находящегося на конце консоли стрелы, так как при этом положении груза изгибающий момент будет наибольшим (рис.2.11).

Расчётная ветровая нагрузка  $w$  определяется по формуле:

$$w = q \cdot k \cdot c \cdot \gamma \quad (2.22)$$

где  $q$  – динамическое давление ветра, (Па). Зависит от скорости ветра и назначения крана. Определяется по формуле:  $q = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$  (2.23)

где  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха;  $v$  – скорость ветра, направленная параллельно поверхности земли на высоте 10м, установленная для данного региона. При нахождении крана в рабочем состоянии можно принимать значение динамического давления по таблице 2.3:

Значения скорости ветра и динамического давления на высоте 10 м для различных типов кранов.

Таблица 2.3

Назначение кранов	Скорость ветра $v$ , м/с	Динамическое давление $q$ , Па
Краны строительные, монтажные	14	125
Краны всех типов, устанавливаемые в речных и морских портах	20	250

При нахождении крана в нерабочем состоянии  $q$  (динамическое давление ветра) и  $v$  (скорость ветра, направленная параллельно поверх-

ности земли на высоте 10м) рекомендуется принимать по таблице 2.4. (в зависимости от географического пункта на территории России, поскольку в различных географических пунктах предельные скорости воздуха на высоте 10 м над землёй различны. Если район установки крана неизвестен, допускается принимать  $q = 450$  Па.

*Значения скорости ветра и динамического давления на высоте 10 м по районам России.* *Таблица 2.4*

Наименование показателей ветровой нагрузки по районам России	1	2	3	4	5	6	7
Скорость ветра $v$ , м/с	21	24	27	30	33	37	40
Динамическое давление $q$ , Па	270	350	450	550	700	850	1000

$\gamma = 1,1$  – коэффициент перегрузки при нерабочем состоянии при расчётах по предельному состоянию. Для ветровых нагрузок рабочего состояния принимается  $\gamma = 1,0$ .

$k$  – коэффициент, учитывающий изменение (возрастание) динамического давления по высоте. Принимается по таблице 2.5. Для промежуточных высот для определения коэффициента  $k$  применяют линейную интерполяцию.

*Коэффициент, учитывающий изменение (возрастание) динамического давления по высоте.* *Таблица 2.5*

Высота над уровнем земли, м	10	20	40	60	100	200	350 и более
Значение $k$	1	1,25	1,55	1,75	2,1	2,6	3,1

$c$  – коэффициент аэродинамической силы, учитывающий характер обтекания объекта воздушным потоком (коэффициент лобового сопротивления);

– при рабочем состоянии для груза принимается  $c = 1,2$ ;

– для пространственных ферм треугольного сечения коэффициент  $c$  зависит от коэффициента заполнения  $\varphi_3$ :

*Коэффициент заполнения  $\varphi_3$*  *Таблица 2.6*

Коэффициент $\varphi_3$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Сечение круглого профиля	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
Сечение некруглого профиля	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6

### 2.3.2. Расчёт инерционных нагрузок [1]

При повороте стрелы во время разгона или торможения крана возникает сила инерции при ускорении массы стрелы и от совокупной массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы.

• Касательная сила инерции, возникающая при ускорении массы стрелы, является равномерно-распределённой нагрузкой по длине фермы. Её интенсивность меньше у основания фермы и больше на конце консольной части. Для упрощения расчётов её можно заменить эквивалентной сосредоточенной равнодействующей силой инерции, кН:

$$F_{и.с} = \frac{m_c \cdot \omega}{t_e} \cdot (x_{п} + 0,5 \cdot l); \quad (2.24)$$

с точкой её приложения:  $l_c = \frac{1}{3} \cdot l \cdot \frac{3 \cdot x_n + 2 \cdot l}{2 \cdot x_n + l}; \quad (2.25)$

где  $m = \frac{G_c}{g}$  – масса стрелы, т;  $G_c$  – вес стрелы, кН;  $l$  – длина стрелы, м;

$x_{п}$  – расстояние от оси вращения крана до оси пяты стрелы (т. А), м;

$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$  – угловая скорость 1/с (радиан в секунду);

$t_b$  – время разгона (торможения) поворотной части крана, с.

Оно определяется из расчёта механизма поворота крана. Его нормативное значение:  $t_b = 5 - 10$  с.

Если касательная сила инерции приводится к голове стрелы (концу консольной части), то её величину можно определить по формуле:

$$F_{и.с} = \frac{m_c \cdot \omega}{3 \cdot t_e} \cdot \frac{x_n^2 + x_n \cdot l + l^2}{x_n + l}; \quad (2.26)$$

Изгибающий момент от неё будет определяться обычно, как от сосредоточенной силы.

• Касательная сила инерции возникающая при ускорении совокупной массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы определяется по формуле:

$$F_{и.с} = (m_g + m_T + m_o) \frac{\omega}{t_e} \cdot (x_{п} + r); \quad (2.27)$$

где  $(m_g + m_T + m_o)$  – масса груза  $Q_2$ , грузовой тележки и крюковой обоймы, т;

$r = l - l_T$  – расстояние от пяты стрелы до грузовой тележки на стреле;

$l_T$  – расстояние от центра грузовой тележки до оголовка стрелы при её положении на конце консольной части.

### 2.3.3. Расчёт суммарных нагрузок в горизонтальной плоскости

• Суммарная равномерно–распределённая нагрузка на единицу длины от ветра и сил инерции в горизонтальной плоскости будет:

$$q_{\Gamma} = \frac{F_{\text{вс}} + F_{\text{и.с.}}}{l} \quad (2.28),$$

где  $F_{\text{вс}}$  – ветровая нагрузка на стрелу,  $F_{\text{и.с.}}$  – инерционная нагрузка на стрелу от её массы,  $l$  – длина стрелы, м.

Изгибающий момент от нагрузки  $q_{\Gamma}$  в расчётном сечении нижнего пояса будет:  $M_{\text{и}} = \frac{1}{2} q_{\Gamma} \cdot x^2$ , где  $x$  – расстояние от головы стрелы до конца панели фермы, в стержнях которой определяются усилия. Для стержня  $N_3$  нижнего пояса сечения 1–1 оно будет:  $x_1 = l_2 + l_m \cdot n$ , где  $l_2$  – длина консольной части стрелы;  $l_m$  – длина панели фермы,  $n$  – число панелей от точки крепления расчала до конца рассечённой панели, включая её.

Для стержня  $N_6$  нижнего пояса сечения 2–2 (у крепления расчала) оно будет:  $x_2 = l_2$ , для стержня нижнего пояса у основания стрелы (т. А) оно будет:  $x_0 = l$ .

По этой формуле можно построить эпюру изгибающих моментов от равномерно–распределённой нагрузки  $q_{\Gamma}$  и определить изгибающие моменты для любого сечения фермы в горизонтальной плоскости.

• Горизонтальная сосредоточенная нагрузка на стрелу будет:

$F_{\Gamma} = F_{\text{в}} + F_{\text{и.г}}$ , где  $F_{\text{в}}$  – ветровая нагрузка, кН;  $F_{\text{и.г}}$  – инерционная нагрузка, возникающая при ускорении совокупной массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы, кН;

• Изгибающий момент будет равен:  $M_F = F_{\Gamma} \cdot x_{\Gamma}$ , где  $x_{\Gamma}$  – расстояние от центра тяжести грузовой тележки до конца панели, в стержнях которой определяются усилия.

Для сечения 1–1 оно будет:  $x_{\Gamma 1} = l_2 - l_{\Gamma} + l_m \cdot n$ ,

для сечения 2–2 оно будет:  $x_{\Gamma 1} = l_2 - l_{\Gamma}$ ,

для сечения у основания стрелы:  $x_{\Gamma 0} = l - l_{\Gamma}$ .

По вычисленным 3-м значениям изгибающего момента строится эпюра изгибающих моментов.

• От вычисленных изгибающих моментов, действующих в горизонтальной плоскости, определяются усилия в стержнях нижних поясов:

$N_{Гq} = \pm \frac{M_q}{b}$ ,  $N_{ГF} = \pm \frac{M_F}{b}$ , где  $M_q$ ,  $M_F$  – значения изгибающих моментов от равномерно–распределённой и сосредоточенной нагрузок в той панели, в которой определяются усилия,  $b$  – ширина горизонтальной фермы (между центрами поясов). Знаки  $\pm$  означают, что стержни нижнего пояса будут испытывать растягивающие или сжимающие усилия в зависимости от направления вращения крана.

**Пример расчёта нагрузок в горизонтальной плоскости**  
(продолжение примера №1)

Даны: масса стрелы  $m_c = 3,35$  т,  
 масса груза (от  $F_2 = 35$  кН)  $m_{g2} = 3,5$  т,  
 масса грузовой тележки  $m_T = 0,67$  т,  
 масса крюковой обоймы  $m_o = 0,335$  т ;  
 $x_{п} = 1,9$  м,  $b = 1,1$  м; максимальная высота подъёма груза:  $H = 30$  м;  
 максимальный вылет груза:  $L = 26$  м;  
 скорость подъёма груза:  $v_{п} = 22$  м/с;  
 скорость поворота крана  $n_{кр.} = 0,9$  об/мин;

1) Расчёт ветровой нагрузки  $F_B$ : ветровая нагрузка:  $F_B = w \cdot A$  (2.19);

$w$  – расчётная ветровая нагрузка:  $w = q \cdot k \cdot c \cdot \gamma$  (2.22);

$q$  – динамическое давление ветра примем по таблице 2.3:  $q = 125$  Па,  
 $k$  – коэффициент, учитывающий изменение (возрастание) динамического давления по высоте примем по таблице 2.5 с помощью линейной интерполяции:

$$k = 1,25 + \frac{1,55 - 1,25}{40 - 20} (30 - 20) = 1,4;$$

$c$  – коэффициент аэродинамической силы, учитывающий характер обтекания объекта воздушным потоком (коэффициент лобового сопротивления) примем  $c = 1,4$ , учитывая, что ферма изготовлена из труб и уголков;

$\gamma$  – коэффициент перегрузки, примем  $\gamma = 1,0$ ;

тогда  $w = 125 \cdot 1,4 \cdot 1,4 \cdot 1 = 245$  Па,

$\phi$  – коэффициент заполнения примем  $\phi = 0,4$  (для ферм из труб и уголков),

– площадь стрелы по контуру равна (см. чертёж фермы):

$$A_{ск} = (l - l_m) \cdot h = (25,8 - 2,15) \cdot 1,2 = 28,38 \text{ м}^2;$$

– наветренная площадь стрелы равна (2.20):

$$A_c = A_{ск} \cdot \phi = 28,38 \cdot 0,4 = 11,35 \text{ м}^2;$$

– наветренная площадь среднестатистического груза (2.20):

$$A_{гр} = 3,2 \cdot \sqrt{Q_2} = 3,2 \cdot \sqrt{3,2} = 5,72 \text{ м}^2;$$

( $A_{гр}$  можно было взять по таблице 2.2:  $A_{гр} = 5,6 \text{ м}^2$ );

Ветровая нагрузка на груз определяется для 2-го положения грузовой тележки (на конце стрелы), так как радиус её приложения в этом случае - наибольший.

Таким образом: ветровая нагрузка на стрелу:

$$F_{вс} = w \cdot A_c = 245 \cdot 11,35 = 2780 \text{ Н} = 2,78; \quad F_{вс} = 2,78 \text{ кН};$$

ветровая нагрузка на груз:

$$F_{вг} = w \cdot A_{гр} = 245 \cdot 5,72 = 1401 \text{ Н} = 1,4; \quad F_{вг} = 1,4 \text{ кН}; A_{гр}$$

2) Расчёт инерционной нагрузки:

- Касательная сила инерции от массы стрелы считается по формуле:

$$F_{и.с} = \frac{m_c \cdot \omega}{t_g} \cdot (x_{п} + 0,5 \cdot l); \quad (2.24) \quad \text{Здесь: угловая скорость } \omega \text{ (радиан в}$$

$$\text{секунду): } \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 0,9}{30} = 0,094 \text{ 1/с};$$

время разгона (торможения) механизма поворота принимаем  $t_b = 5 \text{ с}$ ,

$$\text{тогда } F_{и.с} = \frac{3,35 \cdot 0,094}{5} \cdot (1,9 + 0,5 \cdot 25,8) = 0,93 \text{ кН};$$

• Касательная сила инерции от массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы, расположенных в крайнем положении тележки у оголовка стрелы (2.27):  $F_{и.г} = (m_g + m_T + m_o) \frac{\omega}{t_g} (x_{п} + l - l_m) = (3,5 +$

$$+ 0,67 + 0,335) \frac{0,094}{5} (1,9 + 25,8 - 1,7) = 2,2 \text{ кН}; \quad F_{и.г} = 2,2 \text{ кН};$$

3) Суммарная равномерно-распределённая нагрузка на стрелу от ветра и сил инерции в горизонтальной плоскости будет равна:

$$q_{г} = (F_{вс} + F_{и.с}) / l = \frac{2,78 + 0,93}{25,8} = 0,14 \text{ кН/м.}$$

4) Суммарная сосредоточенная нагрузка на стрелу от ветрового влияния на груз и от силы инерции от массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы в горизонтальной плоскости будет равна:

$$F_{г} = F_{вг} + F_{и.г} = 1,4 + 2,2 = 3,6 \text{ кН};$$

5) Строим эпюры изгибающих моментов в горизонтальной плоскости стрелы: • изгибающие моменты в расчётных сечениях фермы стрелы от равномерно-распределённой нагрузки  $q_{г}$  будут равны

$$\text{(по формуле } M = \frac{q \cdot l^2}{2} \text{):}$$

сечение 2-2:  $M_{q2} = \frac{1}{2} q_{\Gamma} \cdot l_2^2 = 0,5 \cdot 0,14 \cdot 10,75^2 = 8,09 \text{ кН} \cdot \text{м};$

сечение 1-1:  $M_{q1} = \frac{1}{2} q_{\Gamma} (l_2^2 + l_m \cdot 4) = 0,5 \cdot 0,14 (10,75 + 2,15 \cdot 4)^2 =$   
 $= 0,5 \cdot 0,14 \cdot 19,35^2 = 26,21 \text{ кН} \cdot \text{м};$

Сечение у шарнира  $A$  пяти стрелы:

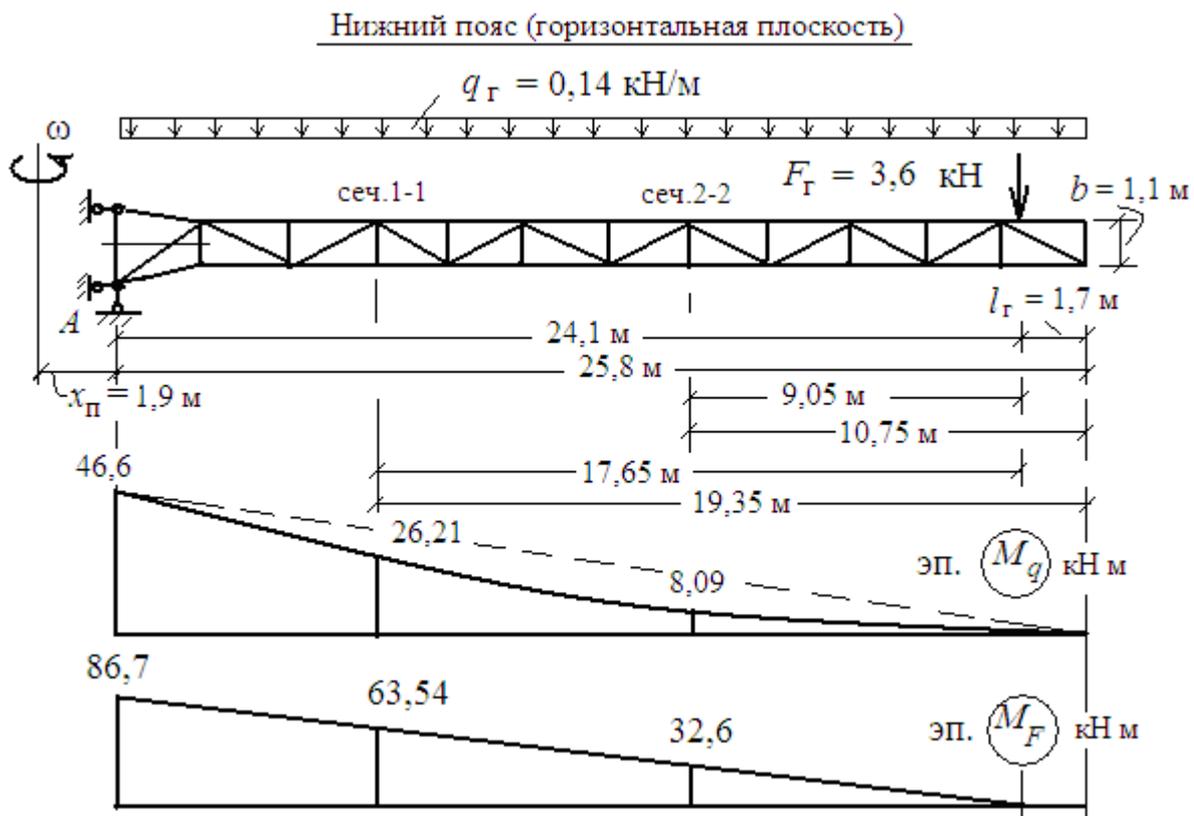
$M_{qA} = \frac{1}{2} q_{\Gamma} \cdot l^2 = 0,5 \cdot 0,14 \cdot 25,8^2 = 46,6 \text{ кН} \cdot \text{м};$

• Изгибающие моменты в расчётных сечениях фермы стрелы от сосредоточенной нагрузки  $F_{\Gamma}$  будут: (по формуле  $M = F \cdot l$ ,  $l_{\Gamma} = 1,7 \text{ м}$ ):

сечение 2-2:  $M_{F2} = F_{\Gamma} (l_2 - l_{\Gamma}) = 3,6 (10,75 - 1,7) = 3,6 \cdot 9,05 = 32,6 \text{ кН} \cdot \text{м};$

сечение 1-1:  $M_{F1} = F_{\Gamma} (l_2 - l_{\Gamma} + l_m \cdot 4) = 3,6 (10,75 - 1,7 + 2,15 \cdot 4) =$   
 $= 3,6 \cdot 17,65 = 63,54 \text{ кН} \cdot \text{м};$

Сечение у шарнира  $A$  пяти стрелы:  $M_{FA} = F_{\Gamma} \cdot x_0 = 3,3(25,8 - 1,7) =$   
 $= 3,6 \cdot 24,1 = 86,7 \text{ кН} \cdot \text{м};$



б) Усилия в расчётных стержнях нижнего пояса фермы  $H_1$  и  $H_2$  от нагрузок в горизонтальной плоскости (от изгибающих моментов):

для стержня  $H_1$ :  $H_{1q} = \pm \frac{M_q}{b} = \pm \frac{26,21}{1,1} = \pm 23,83 \text{ кН},$

$$H_{1F}^{\Gamma} = \pm \frac{M_F}{b} = \pm \frac{63,54}{1,1} = \pm 57,8 \text{ кН},$$

для стержня  $H_2$ :  $H_{2q}^{\Gamma} = \pm \frac{M_q}{b} = \pm \frac{8,09}{1,1} = \pm 7,34 \text{ кН},$

$$H_{2F}^{\Gamma} = \pm \frac{M_F}{b} = \pm \frac{32,6}{1,1} = \pm 29,6 \text{ кН}.$$

### 3. Определение расчётных (максимальных) усилий в расчётных стержнях стрелы

Для определения расчётных усилий в расчётных стержнях надо воспользоваться принципом независимости действия сил и сложить усилия от всех силовых факторов при их неблагоприятных сочетаниях. То есть надо выявить наибольшие растягивающие и сжимающие усилия, которые могут возникнуть в расчётном стержне. Для этого надо учесть режим работы крана и положение грузовой тележки на стреле при подъёме максимального груза, влияние собственного веса стрелы, вертикальные и горизонтальные нагрузки. Поскольку все эти влияния рассмотрены выше, удобнее для расчётов свести их в таблицу 3.1.

Тогда усилия в расчётных стержнях можно посчитать, воспользовавшись таблицей и выявить наибольшие растягивающие и сжимающие усилия. Например:

Стержень  $B_1$ :  $B_1 = \pm B_{1G} \pm B_{1p} \pm B_{1F}$

Стержень  $P_1$ :  $P_1 = \pm P_{1G} \pm P_{1F}$

Стержень  $H_1$ :  $H_1 = \pm H_{1G} \pm H_{1\Gamma} \pm H_{1p} \pm H_{1F} \pm H_{1q}^{\Gamma} \pm H_{1F}^{\Gamma}$

Стержень  $B_2$ :  $B_2 = \pm B_{2G} \pm B_{2F}$

Стержень  $P_2$ :  $P_2 = \pm P_{2G} \pm P_{2F}$

Стержень  $H_2$ :  $H_2 = \pm H_{2G} \pm H_{2\Gamma} \pm H_{2F} \pm H_{2q}^{\Gamma} \pm H_{2F}^{\Gamma}$

Примечание: 1. В числителе указывается значения усилий в стержнях, полученные при нахождении грузовой тележки с грузом в середине пролётной части, в (1)<sup>М</sup> положении. В знаменателе – значения усилий в стержнях, полученные при нахождении грузовой тележки с грузом на конце консольной части – во (2)<sup>М</sup> положении.

2. При дальнейших расчётах следует учесть, что стержни нижнего пояса (в том числе  $N_3$  и  $N_4$ ) испытывают местный изгиб от действия грузовой тележки с грузом  $M_{ни}$ .

Таблица усилий в стержнях фермы

Таблица 3.1.

номера стержней	Усилия в стержнях, кН								изгиб. момент кН·м
	от собств. веса $q_B$ (лин.вл.)	от расчала $S_p$	от канатов $S_{\Gamma}$ и $S_{\Pi}$	от подвижных нагрузок $P$ (лин.вл.)	от горизонтальных нагрузок		Суммарные		
					$q_{\Gamma}$	$F_{\Gamma}$	растяжение +	сжатие -	
верх.п. $B_1$	$B_{1G}$	$\frac{B_{1p(1)}}{B_{1p(2)}}$	—	$\frac{B_{1F(1)}}{B_{1F(2)}}$	—	—	+ $B_1$	- $B_1$	
раскос $P_1$	$P_{1G}$	—	—	$\frac{P_{1F(1)}}{P_{1F(2)}}$	—	—	+ $P_1$	- $P_1$	
ниж.п. $N_3$	$H_{1G}$	$\frac{H_{1p(1)}}{H_{1p(2)}}$	$\frac{H_{1\Gamma(1)}}{H_{1\Gamma(2)}}$	$\frac{H_{1F(1)}}{H_{1F(2)}}$	$\pm H_{1q}$	$\pm H_{1F}$	+ $H_1$	- $H_1$	$M_{ниж.}$
верх.п. $B_2$	$B_{2G}$	—	—	$\frac{B_{2F(1)}}{B_{2F(2)}}$	—	—	+ $B_2$	- $B_2$	
раскос $P_2$	$P_{2G}$	—	—	$\frac{P_{2F(1)}}{P_{2F(2)}}$	—	—	+ $P_2$	- $P_2$	
ниж.п. $H_2$	$H_{2G}$	—	$\frac{H_{2\Gamma(1)}}{H_{2\Gamma(2)}}$	$\frac{N_{6F(1)}}{N_{6F(2)}}$	$\pm H_{2q}$	$\pm H_{2F}$	+ $H_2$	- $H_2$	$M_{ниж.}$

### Пример определения максимальных усилий в расчётных стержнях стрелы

(продолжение примера №1)

Стержень  $B_1$  (верхний пояс):  $B_1 = \pm B_{1G} \pm B_{1p} \pm B_{1F}$

1-е положение тележки:  $B_1 = -34,13 - 133,1 - 295,2 = -462,4$ ;

2-е положение тележки:  $B_1 = -31,21 - 248,4 + 80,1 = -199,5$ ;

Максимальное растягивающее усилие  $B_1$ : 0;

Максимальное сжимающее усилие  $B_1$ : -462,4 кН;

Стержень  $P_1$  (раскос):  $P_1 = \pm P_{1G} \pm P_{1F}$

1-е положение тележки:  $P_1 = -2,5 + 45 = +42,5$ ;

2-е положение тележки:  $P_1 = -2,5 - 12,5 = -15$ ;

Максимальное растягивающее усилие  $P_1$ : +42,5 кН;

Максимальное сжимающее усилие  $P_1$ : -15 кН;

Стержень  $H_1$  (нижний пояс):  $H_1 = \pm H_{1G} \pm H_{1\Gamma} \pm H_{1p} \pm H_{1F} \pm H_{1q} \pm H_{1F}$

1-е положение тележки:  $H_1 = 30,4 - 66,6 - 53,7 + 128,2 + 23,83 + 57,8 = 120$ ;

2-е положение тележки:  $H_1 = 30,4 - 124,2 - 29,4 - 30,1 - 23,83 - 57,8 = -235$ ;

Максимальное растягивающее усилие  $H_1$ : + 120 кН;

Максимальное сжимающее усилие  $H_1$ : - 235 кН;

*Стержень  $B_2$  (верхний пояс):  $B_2 = \pm B_2 \pm B_2$*

1-е положение тележки:  $B_2 = 34,5 + 128,8 = + 34,5$ ;

2-е положение тележки:  $B_2 = 34,5 + 128,8 = + 163,3$ ;

Максимальное растягивающее усилие  $B_2$ : + 163,3 кН;

*Стержень  $P_2$  (раскос):  $P_2 = \pm P_{2G} \pm P_{2F}$*

1-е положение тележки:  $P_2 = 23,7$ ;

2-е положение тележки:  $P_2 = 23,7 + 49 = + 72,7$ ;

Максимальное растягивающее усилие  $P_2$ : + 72,7 кН;

*Стержень  $H_2$  (нижний пояс):  $H_2 = \pm H_{2G} \pm H_{2Г} \pm H_{2F} \pm H_{2q}^Г \pm H_{2F}^Г$*

1-е положение тележки:  $H_2 = - 54 - 53,7 - 7,34 - 29,6 = - 144,6$ ;

2-е положение тележки:  $H_2 = - 54 - 29,4 - 169,1 - 7,34 - 28,3 = - 289,2$ ;

Максимальное сжимающее усилие  $H_2$ : - 289,2 кН;

номера стержней	Усилия в стержнях, кН							
	от собств. веса $q_v$ (лин.вл.)	от расчала $S_p$	от канатов $S_{Г}$ и $S_{П}$	от подвижных нагрузок $P$ (лин.вл.)	от горизонтальных нагрузок		Суммарные	
					$q_{Г}$	$F_{Г}$	растяжение +	сжатие -
верх.п $B_1$	- 34,13	$\frac{- 133,1}{+ 248,4}$	0	$\frac{- 295,2}{+ 80,1}$	0	0	0	- 462,4
раскос $P_1$	- 2,5	0	0	$\frac{+ 45}{- 12,5}$	0	0	+ 42,5	- 15
ниж.п $H_1$	+ 30,4	$\frac{- 66,6}{- 124,2}$	$\frac{- 53,7}{- 29,4}$	$\frac{+ 128,2}{- 30,1}$	$\pm 23,83$	$\pm 57,8$	+ 120	- 235
верх.п $B_2$	+ 34,5	0	0	$\frac{0}{+ 128,8}$	0	0	+ 163,3	0
раскос $P_2$	+ 23,7	0	0	$\frac{0}{+ 49}$	0	0	+ 72,7	0
ниж.п $H_2$	- 54	0	$\frac{- 53,7}{- 29,4}$	$\frac{0}{- 169,1}$	$\pm 7,34$	$\pm 29,6$	0	- 289,2

## 4. Подбор сечений стержней фермы стрелы [4]

При конструировании стрелы крана следует стремиться к тому, чтобы число типов поперечных сечений было не больше трёх – четырёх: верхний пояс, нижний пояс и элементы решёток.

Стрелы выполняются из стали. Обычно это – малоуглеродистые стали: сталь Ст.3 группы В (стали класса С-235, С245, С255) и низколегированные стали повышенной прочности (сталь класса С345, С375, С390...).

Выбор марки стали зависит от условий эксплуатации и требуемых технических характеристик проектируемой стрелы. Например, стрелы из малоуглеродистой стали могут работать при температуре до минус 40 °С.

В настоящем курсовом проекте предлагается выполнить верхний пояс и решётку фермы из стальных бесшовных горячекатаных труб круглого сечения по ГОСТ 8732-80, нижний пояс – из гнutosварных прямоугольных труб по ГОСТ 30245 – 2003. (см. приложение 2, 3).

Поскольку прокат круглого и прямоугольного сечений поставляется заводами–изготовителями длиной 6 – 12 м, пояса фермы выполняют из отдельных секций. В зависимости от длины стрелы, она может иметь 2 – 3 секции, соединённые между собой сваркой или фланцами.

Расчётное сопротивление стали зависит от её марки, толщины проката и др. В таблице 4.1 приведены нормативные и расчётные сопротивления некоторых марок сталей, рекомендуемых для применения в курсовом проекте. В курсовом проекте рекомендуется применять: – для поясов фермы при усилиях от  $\pm 250$  кН до  $\pm 1000$  кН – низколегированную сталь повышенной прочности марки 09Г2С – 6 – 2 (С345);

– для решётки фермы с усилиями от  $\pm 38$  до  $\pm 102$  кН – углеродистую сталь марки ВСт3кп 2 – 1 (С235);

– для решётки и поясов фермы с усилиями от  $\pm 100$  до  $\pm 250$  кН – углеродистую сталь С255 (ВСт3пс 5–2).

Подбор поперечных сечений элементов ферм производится из условий прочности и устойчивости. Растянутые стержни рассчитываются на прочность, сжатые – на устойчивость, поскольку потеря устойчивости центрально-сжатых гибких стержней наступает раньше потери их прочности.

Нормативные и расчётные сопротивления рекомендуемых марок стали в кН/см<sup>2</sup> представлены в таблице 4.1.

Нормативные и расчётные сопротивления рекомендуемых марок стали в кН/см<sup>2</sup>. Таблица 4.1.

Марка стали ГОСТ или ТУ	Толщина Прока- та <i>t</i> , мм	$R_{yn}/R_{un}$ кН/см <sup>2</sup> Времен. сопрот.	$R_y$ кН/см <sup>2</sup> Раст. Сжат. Изгиб	$R_p$ кН/см <sup>2</sup> Смя- тие	$R_s$ кН/см <sup>2</sup> Срез	$R_{wz}$ кН/см <sup>2</sup> Угл. шов	$R_{wf}$ кН/см <sup>2</sup> Угл. шов	$R_{bp}$ кН/см <sup>2</sup>
Углеродистая ст. ВСт3кп2-1 (С235) ГОСТ 380-71 ТУ 14-1-3023-80	2 – 20	23,5/35	23	35	13,3	16	15,2	47,5
	21 – 40	22,5/36	22	35	12,5	16	15,2	47,5
Углеродистая ст. ВСт3пс6-1 (С245) ГОСТ 380-71 ТУ 14-1-3023-80	2 – 20	24,5/37	24	36	14	16,5	16	48,5
	21 – 30	23,5/37	23	36	13,5	16,5	16	48,5
Углеродистая ст. ВСт3сп5-1 (С255) ГОСТ 380 -71	2 – 10	25,5/38	25	37	14,5	17	17	50
	11 – 20	23,5/37	23	36	13,5	16,5	17	48,5
Низколегиро- ванная ст. 09Г2С- 6-2 (С345) ГОСТ 19282-73*	2 – 10	34,5/49	33,5	48	19,5	22	20	64,5
	11 – 20	32,5/47	31	46	18	21	20	62
	21 – 40	30,5/46	30	45	17,5	20,5	19	60,5
Низколегиро- ванная ст. 15ХСНД (С345) ГОСТ 6713-91	8 – 32	34,5/50	31,5	46	18	23	20	64,5
Низколегиро- ванная ст. 10ХСНД (С390) ГОСТ 6713-91	8 – 32	39/54	38	52,5	22	24,5	22	71

Здесь:

$R_{yn}$  – временное сопротивление стали, равное пределу текучести  $R_{yn} = \sigma_T$  кН/см<sup>2</sup>;

$R_{un} = \sigma_b$  – временное сопротивление стали кН/см<sup>2</sup>;

$R_y$  – расчётное сопротивление стали по пределу текучести кН/см<sup>2</sup>;

$R_p$  – расчётное сопротивление стали смятию кН/см<sup>2</sup>;

$R_s$  – расчётное сопротивление стали сдвигу кН/см<sup>2</sup>;

$R_{wz}$  – расчётное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу границы сплавления кН/см<sup>2</sup>;

$R_{wf}$  – расчётное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва кН/см<sup>2</sup>;

$R_{bp}$  – расчётное сопротивление смятию одноболтового соединения кН/см<sup>2</sup>.

Если элемент фермы в процессе передвижения груза испытывает деформации и растяжения и сжатия, подбор сечения производится в зависимости от соотношения растягивающих и сжимающих усилий. Если они равны или близки по значению – стержень рассчитывается на устойчивость (по сжимающему усилию). Если усилие растяжения превосходит усилие сжатия в 1,3 – 1,5 раз, следует дополнительно проверить его на прочность по усилию на растяжение. Расчёт производится по предельному состоянию.

Условие прочности для случая растяжения (сжатия):

$$\frac{N}{A \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1 \quad (4.1)$$

Подбор сечения из условия прочности производится по формуле:

$$A \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot R_y} \quad (4.2)$$

Условие устойчивости при продольном изгибе:

$$\frac{N}{A \cdot R_y \cdot \varphi \cdot \gamma_c} \leq 1 \quad (4.3)$$

Подбор сечения из условия устойчивости производится по формуле:

$$A \geq \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y} \quad (4.4)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение,

$N$  – величина продольной силы в сечении,

$A$  – площадь поперечного сечения,

$R_y$  – расчётное сопротивление материала (см. таблицу 4.1),

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы. Значения коэффициента условий работы  $\gamma_c = 0,75 - 1,0$ . В курсовом проекте рекомендуется принимать  $\gamma_c$ : для стержней, потеря прочности которых может вызвать разрушение всей конструкции (для пояса фермы)  $\gamma_c = 0,8 - 0,9$ ; для раскосов из труб  $\gamma_c = 1,0$ .

$\varphi$  – коэффициент продольного изгиба (коэффициент уменьшения расчётного сопротивления при продольном изгибе). Он зависит

от гибкости стержня  $\lambda$  и марки стали. Подбирается по таблице Приложения 1.

Поскольку коэффициент  $\varphi$  зависит от гибкости стержня  $\lambda$ , а гибкость, в свою очередь, зависит от сечения стержня, при подборе сечения предварительно задаются значением коэффициента  $\varphi$ .

Для предварительных расчётов его рекомендуется принимать равным:  $\varphi = (0,7 - 0,8)$  – для стержней поясов фермы,  
 $\varphi = (0,5 - 0,6)$  – для стоек и раскосов фермы.

При проектировании стрелы крана вначале делается предварительный расчёт элементов конструкции по шарнирной схеме (в узлах фермы предполагаются идеальные шарниры). Затем проектируются жёсткие узлы, выявляются дополнительные нагрузки (например, получаемые в узлах дополнительные моменты от децентровки стержней в узле), уточняются расчётные сопротивления элемента в зависимости от толщины полученного сечения проката и т.д.). Далее производится перерасчёт фермы с учётом дополнительных данных. В курсовом проекте достаточно выполнить расчёт по шарнирной схеме.

### ***Порядок подбора сечения стержня при расчёте на устойчивость***

- Задаются предварительным значением коэффициента  $\varphi$ , следуя приведённым выше рекомендациям.

- Вычисляют необходимую площадь поперечного сечения

по формуле (4.4): 
$$A \geq \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y};$$

- Выбирают по сортаменту проката необходимый профиль.

- Для проверки устойчивости стержня с выбранным поперечным сечением надо подобрать действительное значение коэффициента  $\varphi$ ,

для чего: – определяют гибкость стержня: 
$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{\min}} \quad (4.5),$$

где  $\mu$  – коэффициент приведения длины; ( $\mu = 1$  – для стержней, имеющих по концам шарниры),

– определяют минимальный радиус инерции. Радиус инерции сечений из прокатного профиля берётся в таблицах проката (для прямоугольного профиля  $i_{\min} = i_y$ ). Таблицы проката приведены в Приложении 3.

– по таблице Приложения 1 определяют коэффициент  $\varphi$ .

- Проверяют устойчивость стержня, определив фактическое напряжение и сравнив его с расчётным сопротивлением:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} \leq R \cdot \gamma_c \quad (4.6)$$

- Если выбранное сечение не удовлетворяют условию устойчивости, расчёт следует повторить (иногда несколько раз).
- Стержни нижнего пояса испытывают сложное напряжённое состояние: не только деформацию растяжения – сжатия, но и изгиб от действия подвижной грузовой тележки (от изгибающего момента  $M_{\text{нп}}$ ). Поэтому проверку устойчивости производят по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} \pm \frac{M_{\text{нп}}}{W_x} \leq R \cdot \gamma_c \quad (4.7)$$

### **Пример подбора сечений стержней фермы стрелы** (продолжение примера №1)

#### *Верхний пояс стрелы:*

Максимальные расчётные усилия в расчётных стержнях верхнего пояса:  $B_1 = -462,4$  кН (сжатие), в консольной части  $B_2 = +163,3$  кН (только растяжение). Поэтому стержень  $B_1$  будем рассчитывать на устойчивость, а стержень  $B_2$  – на прочность.

*Стержень  $B_1$ :* Верхний пояс выполняем из бесшовной горячекатанной трубы по ГОСТ 8732 –78. Материал – низколегированная сталь 09 Г2С-6-2; Расчётное усилие  $B_1 = -462,4$  кН, Расчётное сопротивление  $R_y = 310$  МПа ( $31$  кН/см<sup>2</sup>), коэффициент условий работы  $\gamma_c = 0,8$ ;  $\gamma_c \cdot R_y = 0,8 \cdot 31 = 24,8$  кН/см<sup>2</sup>. Длина панели  $l = l_m = 2,15$  м = 215 см.

- Делаем первую попытку. Принимаем коэффициент продольного изгиба  $\varphi_1 = 0,7$ . Тогда необходимая площадь поперечного сечения

должна быть 
$$A \geq \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y} = \frac{462,4}{0,7 \cdot 0,8 \cdot 31} = 26,64 \text{ см}^2;$$

По приложению 1 выбираем трубу  $102 \times 10$ ;  $A = 28,91$  см<sup>2</sup>,  $i = 3,28$  см.

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l_m}{i} = \frac{1 \cdot 215}{3,28} = 65,55; \quad \varphi = 0,764 - \frac{0,764 - 0,683}{10} \cdot 5,55 = 0,72;$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} = \frac{462,4}{0,72 \cdot 28,91} = 22,2 \text{ кН/см}^2 < 24,8 \text{ кН/см}^2.$$

- Принимаем сечение верхнего пояса в пролётной части – труба  $\circ 102 \times 10$ . Площадь поперечного сечения  $A = 28,91 \text{ см}^2$ .

*Стержень  $B_2$* : Расчётное усилие  $B_2 = + 163,3 \text{ кН}$  (только растяжение). Материал – углеродистая сталь ВСтЗсп-6-1 (С245);  $R_y = 240 \text{ МПа}$  ( $24 \text{ кН/см}^2$ ).

- Верхний пояс консольной части рассчитываем на прочность, приняв  $\gamma_c = 0,8$ :  $A \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{163,3}{0,8 \cdot 24} = 8,5 \text{ см}^2$ ;

- Принимаем сечение верхнего пояса в консольной части: труба  $\circ 68 \times 5$ , Площадь поперечного сечения  $A = 9,89 \text{ см}^2$ .

*Нижний пояс стрелы:*

Максимальные расчётные усилия в расчётных стержнях нижнего пояса – в стержне  $H_1 = - 235 \text{ кН}$  (сжатие),  $H_2 = - 289,2 \text{ кН}$  (сжатие).

Поэтому весь нижний пояс рассчитываем на устойчивость.

Длина панели  $l = l_m = 2,15 \text{ м} = 215 \text{ см}$ . Стержни нижнего пояса, кроме того, испытывают изгиб от давления ходовых колёс грузовой тележки. Изгибающий момент  $M_{\text{нп.}} = 18,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

Нижний пояс выполняем из профилей гнутых замкнутых сварных прямоугольных для строительных конструкций Гост 30245 - 2003. Материал – низколегированная сталь 09 Г2С-6-2 (С345). Расчётное сопротивление  $R_y = 310 \text{ МПа}$  ( $31 \text{ кН/см}^2$ ).

*Стержень  $H_2$* : Расчётное усилие  $H_2 = - 289,2 \text{ кН}$ ;

- Принимаем коэффициент условий работы  $\gamma_c = 0,9$ , Тогда  $\gamma_c \cdot R_y = 0,9 \cdot 31 = 27,9 \text{ кН/см}^2$ .

- Подбираем сечение из условия устойчивости: принимаем коэффициент продольного изгиба  $\varphi = 0,7$ . Тогда необходимая площадь поперечного сечения:  $A \geq \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y} = \frac{289,2}{0,7 \cdot 0,9 \cdot 31} = 16,66 \text{ см}^2$ ;

- Поскольку стержни нижнего пояса кроме сжатия испытывают изгиб, площадь сечения принимаем значительно больше. Поэтому выбираем сечение из стального гнутого замкнутого профиля прямоугольного сечения площадью приблизительно в 2 раза больше (см. Приложение 3): сечение  $140 \times 120 \times 6$ :  $A = 28,83 \text{ см}^2$ ;

$i_{\text{min}} = i_y = 4,71 \text{ см}$ ; осевой момент сопротивления:  $W_x = 104,6 \text{ см}^3$ ;

- Определяем гибкость стержня:  $\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{\min}} = \frac{1 \cdot 215}{4,71} = 45,65;$

- По таблице Приложения 1 определяем действительный коэффициент  $\varphi$ :  $\varphi = 0,871 - \frac{0,871 - 0,82}{10} \cdot 5,65 = 0,842;$

- Определяем напряжение в стержне, проверяем прочность:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} \pm \frac{M_{\text{шт}}}{W_x} = \frac{289,2}{0,842 \cdot 28,83} + \frac{18,5 \cdot 100}{116} = 27,86 < 27,9 \text{ кН/см}^2.$$

Устойчивость обеспечена. Принимаем сечение всего нижнего пояса – гнутозамкнутый профиль прямоугольного сечения  $140 \times 100 \times 6,5$ . Площадь поперечного сечения  $A = 28,06 \text{ см}^2$ .

#### *Раскосы:*

Максимальные усилия в расчётных стержнях раскосов: в раскосе  $P_1 = -15 \text{ кН}$  (мало), в раскосе  $P_2 = +72,7 \text{ кН}$ . Поэтому раскосы рассчитываем на прочность по  $P_2$ . Раскосы выполняем из бесшовной горячекатаной трубы по ГОСТ 8732–78. Материал – углеродистая сталь ВСт.3кп2-1 (С235);  $R_y = 230 \text{ МПа}$  ( $23 \text{ кН/см}^2$ ), коэффициент условий работы  $\gamma_c = 1$ . Длину раскоса находим из треугольника:

$$l_p = \sqrt{2,15^2 + 1,5^2} = 2,62 \text{ м} = 262 \text{ см}.$$

*Стержень  $P_2$ :* Расчётное усилие раскоса в консольной части  $P_2 = +72,7 \text{ кН}$  (только растяжение). Материал – углеродистая сталь ВСт.3кп2-1 (С235); Раскосы консольной части рассчитываем на

прочность, приняв  $\gamma_c = 1$ ;  $A \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{72,7}{1 \cdot 23} = 3,16 \text{ см}^2;$

- Принимаем сечение раскосов в консольной части: труба  $\circ 45 \times 4$ , Площадь поперечного сечения  $A = 5,15 \text{ см}^2$ .

Для проектирования узла верхнего пояса определяем сечение стойки. Назовём усилие в стойке буквой  $C_1$ .

#### *Стойка.*

Рассмотрим равновесие узла примыкания раскоса и стойки к верхнему поясу в консольной части фермы, сечение 2-2.

$$\sum y = 0; + N_2 \cdot \sin \alpha - C_1 = 0; C_1 = 72,7 \cdot 0,57 = 41,4 \text{ кН}.$$

Стойку рассчитываем на сжатие с расчётным усилием  $41,4 \text{ кН}$ .

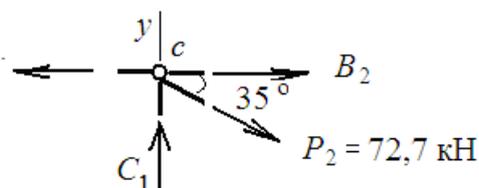


Рис. Узел верхнего пояса консольной части фермы. Сечение 2-2

$\gamma_c = 1; A \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{41,4}{0,9 \cdot 23} = 2 \text{ см}^2$ ; Принимаем сечение стоек - труба  $\circ 45 \times 4$ . Площадь поперечного сечения  $A = 5,15 \text{ см}^2$ ,

Результаты расчётов сведём в таблицу.

Таблица 4.2.

Элемент фермы	Обозначение	Материал	Расчётное усилие	Сечение	$R_y$ кН/см <sup>2</sup>
Верхний пояс в пролётн. части в консольн. части	$B_1$	09Г2С-6-2	- 462,4	$\circ 102 \times 10$	31
	$B_2$	ВСтЗпс-6-2	+ 163,3	$\circ 68 \times 5$	24
Нижний пояс	$H_1$	09Г2С-6-2	- 235	$\square 140 \times 120 \times 6$	31
	$H_2$	09Г2С-6-2	- 289,2	$\square 140 \times 120 \times 6$	31
Раскосы в пролётн. части в консольн. части	$P_1$	ВСтЗкп2-1	+ 42,5	$\circ 45 \times 4$	23
	$P_2$	ВСтЗкп2-1	+ 72,7	$\circ 45 \times 4$	23
Стойки	$C_1$	ВСтЗкп2-1	+ 41,4	$\circ 45 \times 4$	23

## 5. Соединения стальных элементов стрелы

Ферма стрелы крана состоит из стержней, соединяемых между собой в узлы при помощи сварки. Фермы из круглосварных труб и замкнутых гнутосварных прямоугольных труб весьма экономичны благодаря рациональной форме профиля и возможности бесфасонного присоединения стержней решётки к поясам. Сравнительно высокая жёсткость бесфасонного присоединения обеспечивает повышенную общую и местную устойчивость стержней и позволяет воспринимать внеузловые нагрузки. Их достоинством является также возможность использования высокопрочных сталей.

Бесфасонное присоединения стержней решётки к поясам выполняется в заводских условиях (сварка автоматическая), так как должна быть соблюдена повышенная точность их изготовления.

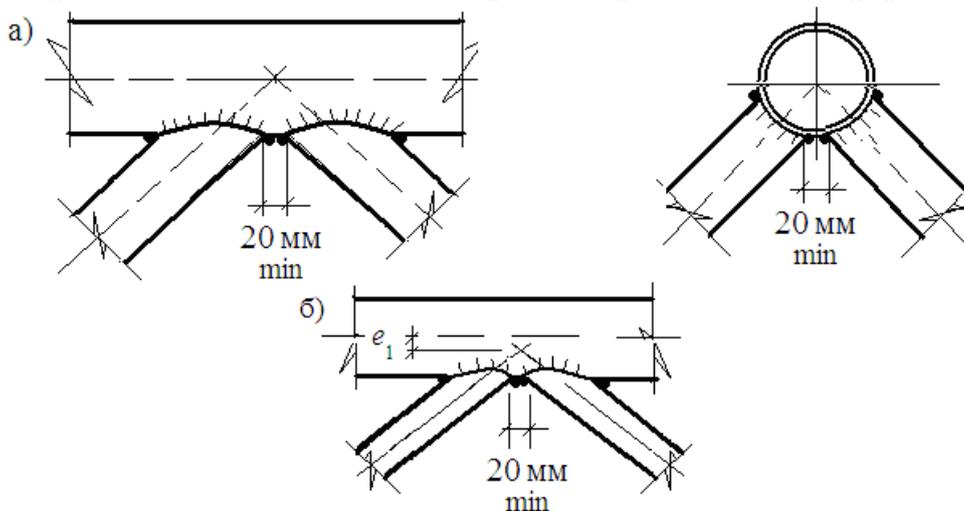
При проектировании узлов ферм надо стремиться к тому, чтобы оси всех стержней узла пересекались в одной точке. Если по конструктивным соображениям этого достичь не удаётся, необходимо учитывать влияние возникающего при этом изгибающего момента. Момент допускается не учитывать, если эксцентриситет  $e < 0,015 h_{\text{п}}$  для круглых труб ( $h_{\text{п}}$  - высота сечения). В прямоугольных трубах момент допускается не учитывать, если  $e < 0,025 h_{\text{п}}$ . Так как обычно гибкость решётки в плоскости фермы больше гибкости пояса, узловой момент, в основном, воспринимается поясом.

В курсовом проекте учёт моментов, возникающих в результате расцентровки осей, не предусматривается.

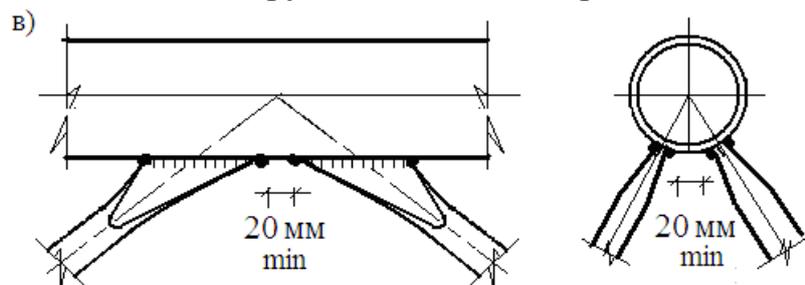
Если решётка имеет трубчатый профиль, то приварка может быть из обжатых или необжатых труб.

При приварке необжатых труб с фигурной разделкой кромок расчёт сварочного шва на срез является условным, так как отдельные участки такого соединения приближаются к стыковым. В этих случаях сварные швы рекомендуется располагать симметрично относительно оси центра тяжести сечения. Если это выполнить невозможно, то тогда надо проверить на прочность оба шва, расположенные по обе стороны от оси центра тяжести стержня. Примеры бесфасонного присоединении стержней решётки к верхнему поясу представлены на рис.5.1.

Присоединение необжатых труб к верхнему поясу фермы:



Присоединение обжатых труб в плоскости, параллельной оси стержня:



Присоединение обжатых труб в плоскости, перпендикулярной оси стержня:

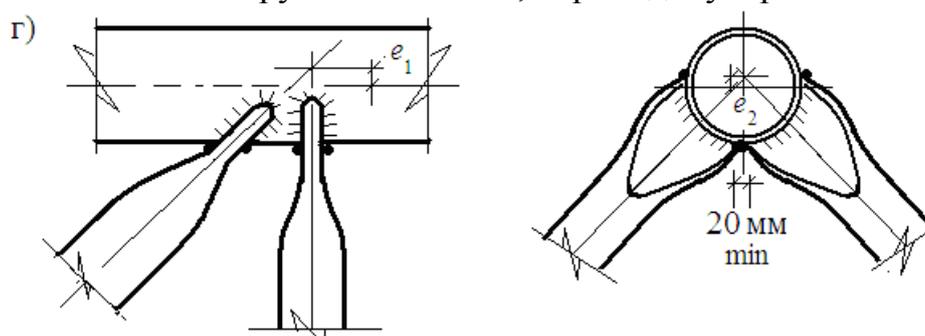


Рис.5.1. Присоединение обжатых и необжатых труб к верхнему поясу

Для предотвращения расцентровки стержней в узле возможно использование фасонки, что не очень желательно, так как это увеличит вес стрелы. Но если применение фасонки необходимо, следует соблюдать нормы их конструирования. Чтобы снизить сварочные напряжения в фасонках, стержни решётки не следует доводить до поясов на расстояние  $6t - 20$  мм, но не более 80 мм ( $t$  - толщина фасонки). Толщина фасонки выбирается в зависимости от действующих усилий. Допустимая разница толщин фасонки в смежных узлах - 2 мм. Целесообразно унифицировать размер фасонки и иметь не более двух типоразмеров.

Рекомендуемые толщины фасонки.

Таблица 5.2.

Максимальное усилие в стержнях решётки	До 150	160-250	260-400	410-600	610-1000	1010-1400	1410-1800	Более 1800
Толщина фасонки, мм	6	8	10	12	14	16	18	20

Для удобства опирания примыкающих элементов, верхнюю грань пояса сохраняют на одном уровне. Если при этом взаимное смещение осей превысило  $0,015 h_{п}$  ( $h_{п}$  - меньшая высота сечения пояса), необходимо также учесть изгибающий момент.

В узлах ферм помимо расчёта сварных швов проверяют также стенку пояса панели на продавливание (вырывание) в местах крепления решётки, а боковые грани пояса на выпучивание. В курсовом проекте этот расчёт не предусматривается.

## 5.1. Расчёт сварных соединений

От взаимного расположения свариваемых элементов зависит вид сварного соединения. Различают стыковые, угловые, тавровые и нахлесточные соединения.

Длина сварного флангового шва должна быть не менее  $10t$ , но и не менее 4 см, ( $t$  - катет или толщина шва). Наибольшая длина флангового шва должна быть не более  $60t$ . Расчётная длина углового шва принимается на 1 см меньше конструктивной (указанной на чертеже) длины. Желательно, чтобы расстояние между соседними швами было не менее 20 мм.

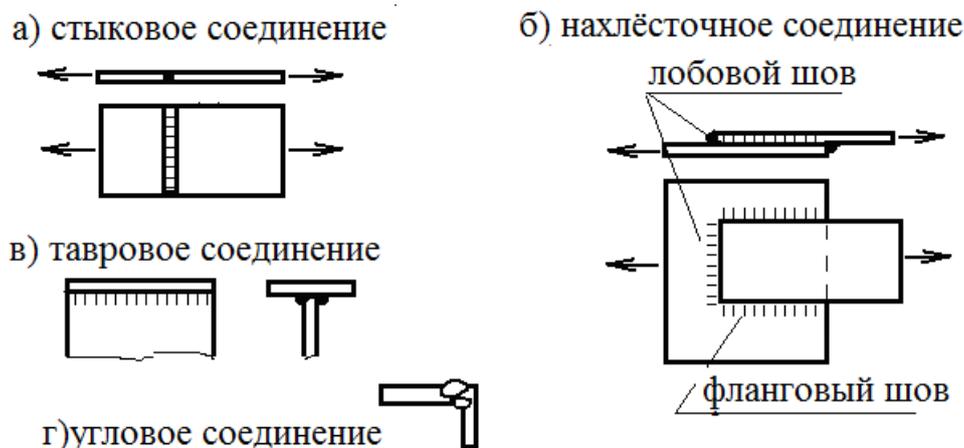


Рис. 5.2. Виды сварных соединений

### 5.1.1. Расчёт стыковых сварочных швов

Расчёт стыковых швов с обработанной поверхностью производится по нормальным напряжениям. Условие прочности стыковых швов:

$$\frac{N}{l_w \cdot t \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c} \leq 1 \quad (5.1)$$

$N$  – внешнее продольное усилие в соединяемом элементе,  
 $l_w$  – расчётная длина сварного шва. Она равна полной длине при применении выводных планок, которые после сварки срезают. При сварке без выводных планок  $l_w = l - 2 \cdot t$ .

$t$  – расчётная толщина наиболее тонкого из свариваемых элементов,  $R_{wy}$  – расчётное сопротивление сварного шва. Оно равно расчётному сопротивлению основного металла  $R_{wy} = R_y$  (соединяемых элементов) при применении физических методов контроля качества шва (см.табл.4.1). Швы, выполненные в заводских условиях должны иметь такой контроль. В ином случае  $R_{wy} = 0,85 \cdot R_y$ .

Так как  $R_y$  зависит от толщины проката (уменьшаясь с увеличением толщины элемента), его следует принимать по металлу наиболее толстого элемента.

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы;  $\gamma_c = 1,0$ ;

При работе стыкового шва на сдвиг, его расчётное сопротивление  $R_{ws}$  назначают равным расчётному сопротивлению срезу основного металла  $R_s$ ;  $R_{ws} = R_s$  (см. табл. 4.1).

### 5.1.2. Расчёт угловых сварочных швов

При изготовлении стальных конструкций чаще всего применяют угловые швы. Угловые швы, параллельные линии действия усилия, называются фланговыми, а швы, расположенные перпендикулярно линии действия усилия, называются лобовыми. Угловые швы рассчитываются на срез (условный) по двум опасным сечениям: по металлу шва – 1 и по металлу границы сплавления – 2.

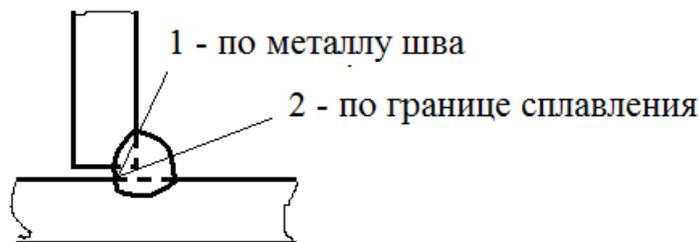


Рис.5.2. Опасные сечения угловых швов

при  $\frac{\beta_f \cdot R_{wf}}{\beta_z \cdot R_{wz}} \leq 1$  расчёт ведётся по металлу шва, по формуле:

$$\frac{N}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (5.2)$$

при  $\frac{\beta_f \cdot R_{wf}}{\beta_z \cdot R_{wz}} > 1$  расчёт ведётся по металлу границы сплавления, по

$$\text{формуле: } \frac{N}{\beta_z \cdot k_f \cdot l_f \cdot R_{wz} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (5.3)$$

где  $l_w$  – расчётная длина сварочного шва, равная суммарной длине всех участков за вычетом по 1см на каждом непрерывном участке шва;  $k_f$  - катет шва;  $\beta_f, \beta_z$  – коэффициенты, учитывающие способ сварки. В курсовом проекте их можно принять:

при ручной сварк:  $\beta_f = 0,7, \beta_z = 1,0$ ;

при автоматической сварке:  $\beta_f = \beta_z = 1,0$ ;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы;  $\gamma_c = 1,0$ ;

$R_{wf}$  и  $R_{wz}$  – расчётные сопротивления угловых швов срезу по металлу шва и по металлу границы сплавления (см. таблица 4.1).

### 5.1.3. Расчёт сварного соединения из необжатых круглых труб

Расчёт узлов при безфасонном присоединении необжатых круглых труб теоретически сложная задача, относящаяся к области расчёта пересекающихся цилиндрических оболочек. Напряжения по длине шва распределяются неравномерно. При остром угле примыкания раскоса к поясу шов приближается к угловому. При тупом – к стыковому. Такой шов рекомендуется проверять по формуле:

$$\frac{N}{0,85 \cdot k_f \cdot l_w \cdot (R_w \cdot \beta)_{\min} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (5.4)$$

$R_w = R_y$  – расчётное сопротивление одного из соединяемых стержней, меньшее по величине; 0,85 – коэффициент условий работы, учитывающий неравномерность распределения напряжений по длине шва,  $k_f$  – катет шва, равный наименьшей толщине свариваемых элементов,  $l_w$  – расчётная длина сварочного шва:

$$l_w = 0,5 \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot [1,5(1 + \csc \alpha) - \sqrt{\csc \alpha}]; \quad (5.5)$$

Косеканс угла:  $\csc \alpha = \frac{1}{\sin \alpha}$ ,  $\alpha$  – угол наклона раскоса к поясу,

$\xi$  – коэффициент, зависящий от соотношения диаметров соединяемых труб, приведено в таблице 5.3.

Значение коэффициента  $\xi$  Таблица 5.3.

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

При расчётах сварных узлов обычно сначала задаются высотой сварочного шва  $k_f$  и определяют требуемую длину шва. Затем проверяют соединение на прочность.

### **Пример расчёта сварного соединения необжатого раскоса**

(продолжение примера №1)

(присоединение раскоса  $P_2$  к верхнему поясу стрелы, узел «с»)

Максимальное усилие в раскосе:  $P_2 = 72,7$  кН;

Сечение пояса – труба 102×10 (диаметр 10,2 см, толщина  $t=1,0$  см);

Сечение раскоса – труба 45×4 (диаметр 4,5 см, толщина

$k_f = t = 0,4$  см);

Расчётное сопротивление  $R_w = R_y = 240$  МПа (24 кН/см<sup>2</sup>),

Коэффициент условий работы  $\gamma_c = 1$ ;

Автоматическая сварка ( $\beta = 1,0$ )

Угол наклона раскоса к горизонту  $\alpha = 35^\circ$ ,  $\sin \alpha = 0,572$ ;

$d/D = 45/102 = 0,44$ ,  $\xi = 1,01$  (из таблицы 5.3),

Длина сварного шва для обжатой трубы (5.5):

$$l_w = 0,5 \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot [1,5 (1 + \csc \alpha) - \sqrt{\csc \alpha}];$$

$$l_w = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 4,5 \cdot 1,01 \cdot [1,5 (1 + \frac{1}{0,573}) - \sqrt{\frac{1}{0,573}}] = 20 \text{ см};$$

Проверяем прочность шва; условие прочности (5.4):

$$\frac{N}{0,85 \cdot k_f \cdot l_w \cdot (R_w \cdot \beta)_{\min} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad \frac{72,7}{0,85 \cdot 0,4 \cdot 20 \cdot (24 \cdot 1)_{\min} \cdot 1} = 0,44 < 1;$$

Прочность обеспечена.

#### **5.1.4. Расчёт сварного соединения из обжатых круглых труб**

При приварке обжатых концов трубчатых элементов решётки в осевой плоскости пояса (рис.5.1.в) длина шва вычисляется по формуле:

$$l_w = \frac{\pi \cdot d}{\sin \alpha} \quad (5.6)$$

При приварке обжатых концов трубчатых элементов решётки в плоскости, перпендикулярной к плоскости присоединяемых стержней (рис.5.1.г) длина шва вычисляется по формуле:

$$l_w = \pi \cdot d + 1,3 \frac{d^3}{D^2}. \quad (5.7)$$

**Пример расчёта сварного соединения из обжатых круглых труб**  
(Пример 2)

Максимальное усилие в раскосе  $P_2 = - 61,1$  кН; Сечение раскоса – труба 45×4 (диаметр 4,5 см, толщина  $t = 0,4$  см);

Расчётное сопротивление  $R_y = 230$  МПа ( $23$  кН/см<sup>2</sup>),

Коэффициент условий работы  $\gamma_c = 1$ ;

Автоматическая сварка ( $\beta = 1,0$ )

Угол наклона раскоса к горизонту  $\alpha = 53,8^\circ$ ,  $\sin \alpha = 0,807$ ;

Раскос приваривается к нижнему поясу прямоугольного сечения 160×100×7,  $R_y = 310$  МПа. Сварка автоматическая.

Сварной шов – угловой. Рассчитывается по 2-м опасным сечениям.

Расчётная длина  $l_w = \frac{\pi \cdot d}{\sin \alpha} = \frac{3,14 \cdot 4,5}{0,807} = 17,5$  см,

Определяем опасное сечение по формуле (5.2):  $\beta_f = \beta_z = 1,0$ ,

По табл. 5.1 при  $R_y = 230$  МПа,  $R_{wf} = 160$  МПа,  $R_{wz} = 164$  МПа,

При  $\frac{\beta_f \cdot R_{wf}}{\beta_z \cdot R_{wz}} = \frac{160}{164} < 1$ . Расчёт ведём по металлу шва, по формуле

$$(5.2): \frac{N}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_c} = \frac{61,1}{1 \cdot 4 \cdot 17,5 \cdot 16 \cdot 1} = 0,06 \leq 1;$$

Прочность сварного шва обеспечена.

При других схемах присоединения элементов решётки к поясу расчёт сварных швов надо производить по факту.

## 5.2. Болтовые соединения элементов стрелы

Для соединения элементов стрел обычно применяются стыковые соединения: фланцевые на болтах или соединения на пальцах.

Фланцевые соединения элементов стальных конструкций – наиболее эффективный тип болтовых соединений для конструкций первого класса (наличие подвижной и динамической нагрузок, и знакопеременных усилий), к которым принадлежит стрела крана.

Фланцы могут быть выполнены из листовой низколегированной стали марок: С345, С375 по Гост 27772-88\*.

Для фланцевых соединений металлических конструкций первого класса следует применять высокопрочные болты из легированных термически обработанных сталей (40Х «селект», 48ХФА «селект» и др.), входящих в отверстие с зазором, с нормативным сопротивлением 1100 МПа (класс прочности 10,9). Они обеспечивают передачу усилий через трение, возникающее по соприкасающимся плоскостям. Предполагается, что в болтовых соединениях болты работают в одинаковых условиях (равномерное распределение усилия). Основной вид работы болтового соединения – работа на срез. Но необходимо проверить его так же на растяжение (сжатие) и смятие. Условия прочности:

$$\text{на срез: } \frac{N}{n \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot A \cdot R_{bs}} \leq 1; \quad (5.8)$$

$$\text{на смятие: } \frac{N}{n \cdot d \cdot \gamma_b \cdot (\sum t_{\min}) \cdot R_{bp}} \leq 1; \quad (5.9)$$

$$\text{на растяжение: } \frac{N}{n \cdot A_n \cdot R_{bt}} \leq 1; \quad (5.10)$$

Здесь:  $N$  - расчётное значение продольной силы,  $n$  - число болтов в соединении,  $n_s$  - число срезов одного болта (во фланцевом соединении  $n_s = 1$ ),  $\gamma_b$  - коэффициент условий работы болтового соединения; для болтов класса точности  $A$ :  $\gamma_b = 1$ ;  $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  - расчётная площадь сечения одного болта, см<sup>2</sup>;  $d$  - наружный диаметр одного болта, см;  $R_{bs}$  - расчётное сопротивление болта на срез. Для болтов класса 10,9:  $R_{bs} = 40 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$ ;  $R_{bt} = 50 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$ ;

$R_{bp}$  - расчётное сопротивление болта смятию.  $R_{bp}$  зависит от временного сопротивления стали  $R_{un}$  соединяемых элементов (см.табл.4.1).

$(\sum t)_{\min}$  - наименьшая суммарная толщина элементов, сминаемых в одном направлении,

$R_{bt}$  - расчётное сопротивление болта растяжению.

$A_n$  - площадь сечения болта нетто (табл. 5.4).

Площади сечения болтов.

Таблица 5.4

$d, \text{мм}$	16	20	24	30	36	42	48
$A, \text{см}^2$	2,01	3,14	4,52	7,06	10,17	13,85	18,09
$A_n, \text{см}^2$	1,57	2,45	3,52	5,6	8,16	11,2	14,72

$$\text{Тогда диаметр болтов будет: } d \geq \sqrt{\frac{N \cdot 4}{\pi \cdot n \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot R_{bs}}} \quad (5.11)$$

Для поясов нижнего пояса коробчатого сечения во фланцевых стыках применяются высокопрочные болты. При их применении усилие затяжки должно быть таким, чтобы сила трения по плоскостям соединения элементов не была бы меньше сдвигающих усилий. Необходимо также учитывать отрывающее усилие, вызываемое наличием изгибающего момента в месте стыка. Нормы расстановки высокопрочных болтов в болтовых соединениях: 1) Расстояния между центрами болтов в любом направлении: минимальное –  $2,5d$ . (Рис.5.3). 2) Расстояние от центра болта до края элемента: минимальное при высокопрочных болтов при любой кромке и любом направлении –  $1,3d$ .

Для фланцевых стыков предварительно назначают количество болтов и их расположение относительно центра стыкуемых поясов. Затем определяют требуемую минимальную площадь поперечного сечения одного болта  $A$  по формуле:

$$A \geq \frac{1}{0,65 \cdot \sigma_e} \cdot \left( \frac{M \cdot y_1}{\sum y_i^2} + \frac{N}{n} + \frac{Q}{f \cdot n \cdot \gamma_c} \right) \quad (5.12)$$

где  $N$ ,  $Q$ ,  $M$  – величина продольной силы, поперечной силы и изгибающего момента в поясе стрелы в месте стыка;

$y_i$  – расстояние от горизонтальной оси поперечного сечения стыка до оси болта (рис.4.1);  $y_1$  – расстояние от горизонтальной оси поперечного сечения стыка до оси наиболее удалённого болта (рис.5.3);

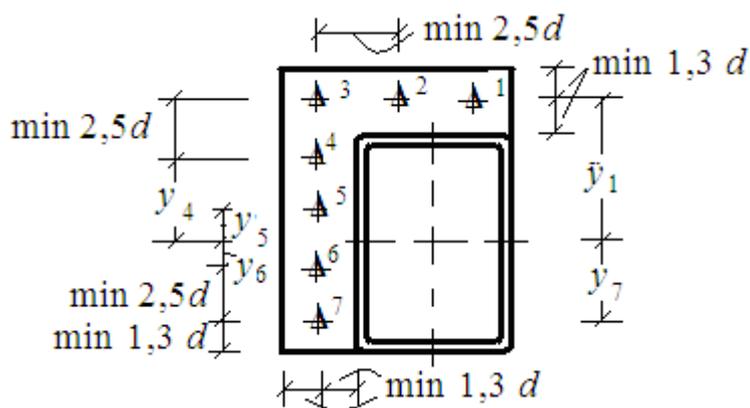


Рис.5.3. Фланцевое соединение секций нижнего пояса

$f = 0,25$  – коэффициент трения для необработанных поверхностей;

$n$  – количество болтов в стыке;  $\gamma_c = 0,9$  – коэффициент условий работы;  $0,65 \cdot \sigma_b$  – временное сопротивление разрыву материала высокопрочного болта после термической обработки.

$\sigma_b = 110 \text{ кН/см}^2$  – для стали 40Х,

$\sigma_b = 135 \text{ кН/см}^2$  – для стали 40ХФА и 30ХГС.

Если центр стыка совпадает с центром узла болтового соединения, можно принять, что изгибающий момент  $M = 0$ , а поперечная сила равна усилию давления колеса грузовой тележки  $Q = P$ .

**Пример определения количества болтов для фланцевого соединения труб верхнего пояса**  
(пример №1 продолжение)

Максимальное усилие в верхнем поясе  $B_1 = 462,4 \text{ кН}$ .

Сечение верхнего пояса – труба  $102 \times 10$ ;  $t = 1 \text{ см}$ ,

Выбираем высокопрочные болты из стали марки 40Х,

$R_{bs} = 40 \text{ кН·см}^2$ ;  $\gamma_c = 1$  – коэффициент условий работы:

$n = 4$  – число болтов в соединении;

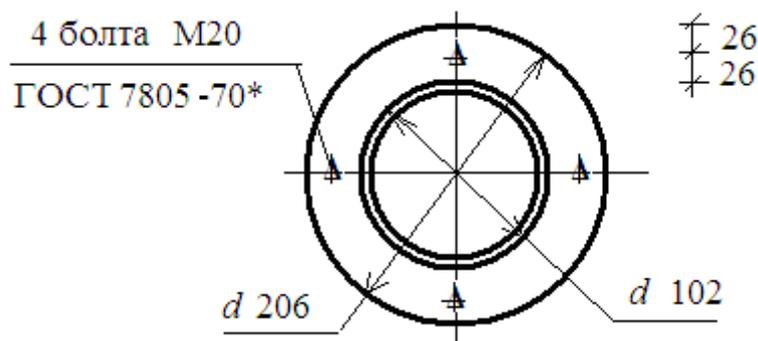
Необходимый диаметр болтов должен быть равен (5.11):

$$d \geq \sqrt{\frac{N \cdot 4}{\pi \cdot n \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot R_{bs}}} \geq \sqrt{\frac{462,4 \cdot 4}{3,14 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 40}} \geq 1,92 \text{ см} \geq 18,4 \text{ мм}.$$

Принимаем 4 болта М 20 мм ГОСТ 7798-70\*.

Минимальное расстояние от отверстия болта до края элемента:

$1,3 d = 1,3 \cdot 20 = 26 \text{ мм}$ .



**Пример расчёта болтов во фланцевом соединении консольной части нижнего пояса**  
(пример №1 продолжение):

Максимальное усилие в нижнем поясе:  $H_2 = - 289,2 \text{ кН}$ ,

Сечение нижнего пояса  $140 \times 120 \times 6$ ;  $t = 0,6$  см,

Изгибающий момент от грузовой тележки:  $M_{\text{нп}} = 1850$  кН·см,

Поперечная сила  $Q = p_{(2)} = 14$  кН (усилие от колеса грузовой тележки;

$\sigma_b = 1100$  МПа ( $110$  кН/см<sup>2</sup>) – для стали 40Х,

$\gamma_c = 0,9$  – коэффициент условий работы:

$f = 0,25$  – коэффициент трения для необработанных поверхностей;

Тогда  $A$  – площадь поперечного сечения одного болта определяем

по формуле (5.12) 
$$A \geq \frac{1}{0,65 \cdot \sigma_b} \cdot \left( \frac{M \cdot y_1}{\sum y_i^2} + \frac{N}{n} + \frac{Q}{f \cdot n \cdot \gamma_c} \right)$$

Конструируем фланец. Выбираем фланцевое соединение из 5 болтов

M16, min расстояние до элемента:  $1,3 \cdot d = 1,3 \cdot 16 = 21$  мм,

min расстояние между болтами:  $2,5 \cdot d = 2,5 \cdot 16 = 40$  мм.

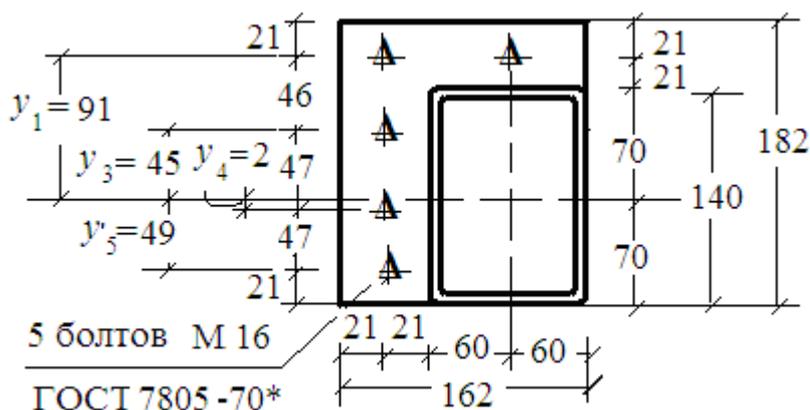
Тогда  $y_1 = y_2 = 9,1$  см;  $y_3 = 4,5$  см;  $y_4 = 0,2$  см;  $y_5 = 4,9$  см;

$\sum y_i^2 = 9,1^2 \cdot 2 + 4,5^2 + 0,2^2 + 4,9^2 = 210$  см<sup>2</sup>;

$$A \geq \frac{1}{0,65 \cdot 110} \cdot \left( \frac{1850 \cdot 9,1}{210} + \frac{289,2}{5} + \frac{14}{0,25 \cdot 5 \cdot 0,9} \right) \geq 2,1 \text{ см}^2;$$

По таблице 5.4 выбираем болты M20 диаметром  $d = 20$  см

( $A = 3,14$  см<sup>2</sup>) для выбранных размеров фланца. Необходимо пере-  
считать размеры фланцевого соединения для болтов M20.



### 5.3. Расчёт шарнирных стыковых соединений на пальцах

При применении шарнирных стыковых соединений на пальцах, которые могут воспринимать подвижную нагрузку, диаметр пальца

можно определить по формуле: 
$$d = 2,8 \cdot \sqrt[4]{A_c \cdot \frac{R}{R_u}} \cdot \sqrt{l} \quad (5.14)$$

Принятый диаметр пальца проверяется на равнопрочность по формуле:

$$A \cdot \sqrt{\left(\frac{l}{0,4 \cdot d^3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot d^2}\right)^2} \leq \frac{R_u}{R} \quad (5.15)$$

Прочность проушин проверяется по формуле Ламе:

$$\frac{A}{2 \cdot d \cdot S} \cdot \frac{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2 + d^2}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2 - d^2} \leq \frac{R_{np.}}{R}, \quad (5.16)$$

где  $d$  – диаметр пальца,  $r$  – наружный радиус проушины,  $A$  – площадь сечения пальца,  $A_c$  – площадь поперечного сечения стыкуемого стержня,  $R$  – предельное сопротивление материала стыкуемого стержня,  $R_u$  – предельное сопротивление материала на изгиб,  $R_{np.}$  – предельное сопротивление материала проушины,  $S$  – толщина проушины,  $l$  – расстояние между средними плоскостями проушин.

## Пример №2

*Задание:* спроектировать и рассчитать стрелу башенного крана.

Дано: тип башни – НП – (неповоротная);

– грузоподъёмность крана:  $m_{g(1)} = 8$  т (в середине пролётной части),  $m_{g(2)} = 4$  т (на – максимальном вылете), ( $F_{(1)} = 80$  кН,  $F_{(2)} = 40$  кН);  
 максимальная высота подъёма груза:  $H = 28$  м; максимальный вылет груза:  $L = 30$  м; скорость подъёма груза:  $v_{п} = 25$  м/с; время разгона (торможения) для 2-х положений грузовой тележки:  $t_1 = 1,1$  с,  $t_2 = 1,0$  с; скорость поворота крана  $n_{кр.} = 0,9$  об/мин; сечение стрелы – треугольник, тип решётки вертикальных ферм – треугольная, тип решётки горизонтальной фермы – треугольная с дополнительной стойкой; сечение верхнего пояса фермы и решётки выполняются из труб (Трубы бесшовные горячекатаные по ГОСТ - 8732 – 80). сечение нижнего пояса выполняется из стального гнутого замкнутого профиля прямоугольного сечения (ГОСТ 30245 – 2003). Профили стальные гнутые квадратного и прямоугольного сечения для строительных конструкций). Режим работы крана: А4.

Конец каната запасовки канатов механизма подъёма грузов крепится к голове стрелы (т. D).

## 1. Построение расчётной схемы стрелы крана

- Поперечное сечение башни (квадрат):

$$l_6 = (0,9-1,1) \frac{H}{19} = (0,9-1,1) \frac{28}{19} = (1,575-1,925); \text{ Принимаем } l_6 = 1,6 \text{ м};$$

- Высота башни от оголовка башни от шарнира пяты стрелы:

$$h_r = (0,8-1,2) \frac{L}{3,6} = (0,8-1,2) \frac{30}{3,6} = (6,6-10,0); \text{ Принимаем } h_r = 8 \text{ м};$$

- Расстояние от оси башни до оси пяты стрелы:

$$x_c = 0,5 \cdot l_6 + 0,2 = 0,5 \cdot 1,6 + 0,2 = 1 \text{ м}; \quad \text{ Принимаем } x_c = 1 \text{ м};$$

- Высота вертикальной фермы стрелы (предварительная):

$$h = (0,9-1,1) \frac{L}{22} = (0,9-1,1) \frac{30}{22} = (1,23-1,5); \text{ Принимаем } h = 1,4 \text{ м};$$

- Ширина горизонтальной фермы у пяты стрелы  $b_1 = l_6 = 1,6 \text{ м};$

- Выбираем горизонтальную ферму с трапецидальной частью у пяты стрелы. Тогда ширина горизонтальной фермы стрелы:

$$b = (0,65-0,8) b_1 = (0,65-0,8) 1,6 = (1,04-1,28); \text{ Принимаем } b = 1,2 \text{ м};$$

- Воспользовавшись рекомендациями, предварительно принимаем расстояние от середины грузовой тележки до центра последнего шарнира  $l_r = 1,6 \text{ м},$  а расстояние между ходовыми колёсами 4-х опорной тележки  $d = 1,2 \text{ м};$  Тогда предварительная длина стрелы:

$$l = L + l_r - x_c = 26 + 1,6 - 1,0 = 30,6 \text{ м};$$

- Предварительно задаёмся длиной панели; рекомендуется

$$l_m = (1,4-2,5). \text{ Принимаем } l_m = 2 \text{ м}; \text{ Тогда число панелей будет:}$$

$$n_{\text{п}} = \frac{l}{l_m} = \frac{30,6}{2} = 15,3; \text{ Принимаем окончательное число панелей:}$$

$$n_{\text{п}} = 15. \text{ Тогда } l_m = \frac{30,6}{15} = 2,04 \text{ м. Принимаем окончательную дли-}$$

ну панели:  $l_m = 2,05 \text{ м}.$

- Окончательная длина стрелы:  $l = n_{\text{п}} \cdot l_m = 15 \cdot 2,05 = 30,75 \text{ м};$   $l = 30,75 \text{ м};$

- Пересчитываем  $l_r = l - L + x_{\text{п}} = 30,75 - 30 + 1,0 = 1,75 \text{ м};$   $l_r = 1,75 \text{ м};$

- Определяем место прикрепления расчала; рекомендация - длина консоли должна быть  $l_2 = (0,3-0,5) \cdot 30,75 = (9,23-15,37) \text{ м}.$

$$\text{ Назначаем } l_2 = 2,05 \cdot 6,5 = 13,325 \text{ м};$$

Закрепление расчала - в 7-м узле верхнего пояса от оголовка стрелы (т. D):  $l_2 = 13,325 \text{ м};$

- Длина  $l_1 = l - l_2 = 30,75 - 13,325 = 15,05 \text{ м};$   $l_1 = 17,425 \text{ м};$

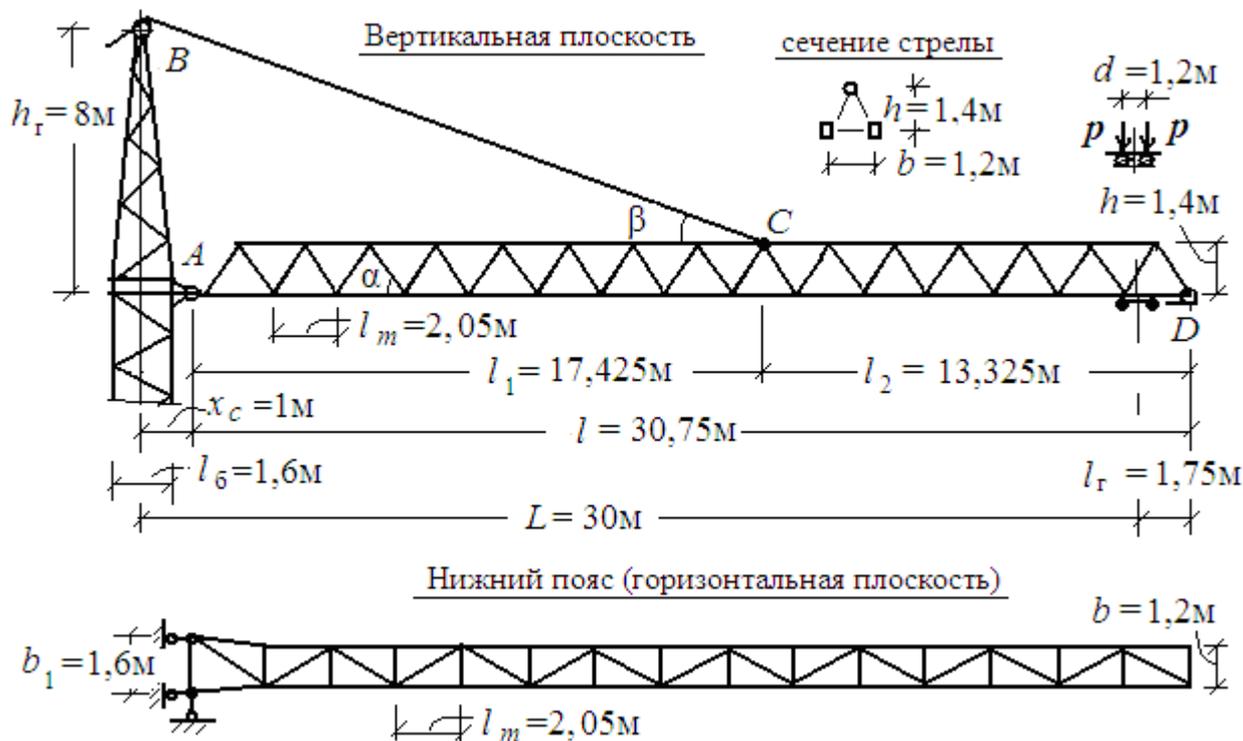
- Необходимо увязать длину панели  $l_m$  с высотой фермы  $h:$

Угол между раскосом и панелью должен быть  $35^\circ - 60^\circ$ .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{l_m} = \frac{1,4}{2,05/2} = 1,366, \quad \alpha = 53,79^\circ > 35^\circ, \quad \sin \alpha = 0,807,$$

$\cos \alpha = 0,591$ . Окончательно принимаем высоту:  $h = 1,4\text{ м}$ ;

- Расчётная схема стрелы крана:



## 2. Определение массы и веса стрелы, грузовой тележки и крюковой обоймы: (предварительно)

- Массу крана с неповоротной башней ориентировочно принимаем

по формуле:  $m_{кр} = 0,36 \cdot T_{гр.} \cdot \left(\frac{H}{m_g}\right)^{0,34}$

где  $T_{гр.}$  – грузовой момент:  $T_{гр.} = m_{g2} \cdot L = 4 \cdot 30 = 120 \text{ т} \cdot \text{м}$ ;

$L = 30 \text{ м}$  – максимальный вылет груза (задан);

$m_{g2} = 4 \text{ т}$  – грузоподъёмность крана на максимальном вылете;

$H = 28 \text{ м}$  – максимальная высота подъёма груза (задана);

$$m_{кр} = 0,36 \cdot 120 \left(\frac{28}{4}\right)^{0,34} = 83,81 \text{ т. Вес крана } G_{кр} \text{ будет равен:}$$

$G_{кр} = g \cdot m_{кр} = 9,81 \cdot 83,81 = 822,16 \text{ кН}$ , где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Тогда масса стрелы:  $m_c = 0,05 \cdot m_{кр} = 0,05 \cdot 83,81 = 4,19 \text{ т}$ ;

вес стрелы  $G_c$  будет равен:  $G_c = g \cdot m_c = 9,81 \cdot 4,19 = 41,11$  кН ,

масса грузовой тележки:  $m_T = 0,01 \cdot m_{кр} = 0,01 \cdot 83,81 = 0,84$  т;

вес грузовой тележки  $G_T$  будет равен:  $G_T = g \cdot m_T = 9,81 \cdot 0,84 = 8,24$  кН,

масса крюковой обоймы:  $m_o = 0,005 \cdot m_{кр} = 0,005 \cdot 83,81 = 0,42$  т;

вес крюковой обоймы  $G_o$  будет равен:  $G_o = g \cdot m_o = 9,81 \cdot 0,42 = 4,11$  кН.

• Расчётная нормативная равномерно-распределённая нагрузка от собственного веса стрелы будет:  $q_{сн} = \frac{G_c}{l} = \frac{41,11}{30,75} = 1,34$  кН/м;

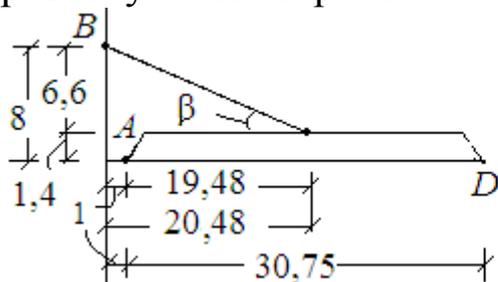
### 3. Расчёт нагрузок для вертикальных ферм

Обозначим:  $B$  – усилия в стержнях верхнего пояса,

$H$  – усилия в стержнях нижнего пояса,  $P$  – усилия в раскосах,

$C$  – усилия в стойках.

• Определяем углы наклона расчала и каната подъёма груза к горизонту и геометрические параметры:



$$\operatorname{tg} \beta = \frac{6,6}{20,48} = 0,322$$

$$\cos \beta = 0,95$$

$$\sin \beta = 0,31$$

$$\beta = 17,86^\circ$$

1) Определяем равномерно-распределённую нагрузку от собственного веса стрелы:  $q_B = k_g \cdot q_{сн} = 1,1 \cdot 1,34 = 1,47$  кН/м;  $q_B = 1,47$  кН/м; здесь  $k_g = 1,1$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки).

2) Определяем сосредоточенную подвижную нагрузку  $p$  от давления ходовых колёс грузовой тележки для 2-х положений грузовой тележки: (1) – в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$p_{(1,2)} = \frac{1}{n_k} [F_{(1,2)} \cdot k_q + (G_T + G_o) \cdot k_g + F_{и(1,2)}].$$

Обозначим для простоты дальнейших расчётов:

$$Q_{(1,2)} = F_{(1,2)} \cdot k_q + (G_T + G_o) \cdot k_g + F_{и(1,2)}, \text{ тогда } p_{(1,2)} = \frac{1}{n_k} Q_{(1,2)}$$

где  $n_k = 4$  – число ходовых колёс тележки (при массе груза до 10 т);  
 $k_q = 1,25$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки) для массы поднимаемого груза (2.1.3.табл.1);  
 $k_g = 1,1$  – коэффициент надёжности по нагрузке (коэффициент перегрузки) для веса грузовой тележки и крюковой обоймы.

$F_{(1)} = 80 \text{ кН}$ ;  $F_{(2)} = 40 \text{ кН}$  – грузоподъёмность крана при 2-х положениях грузовой тележки;

$G_T = 8,24 \text{ кН}$  – вес грузовой тележки;

$G_o = 4,11 \text{ кН}$  – вес крюковой обоймы;

• Определяем силу инерции  $F_{и}$  для 2-х положений грузовой тележки: (1) - в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$F_{и(1,2)} = m_{гр} \cdot a = m_{гр} \frac{v_n}{t_n};$$

$$F_{и(1)} = m_{гр} \cdot a = (m_{g(1)} + m_o) \frac{v_{n1}}{t_{n1}} = (8 + 0,42) \frac{25}{60 \cdot 1,2} = 2,92 \text{ кН};$$

$$F_{и(2)} = m_{гр} \cdot a = (m_{g(2)} + m_o) \frac{v_{n2}}{t_{n2}} = (4 + 0,42) \frac{25}{60 \cdot 1,1} = 1,67 \text{ кН};$$

Здесь:  $t_{n(1)} = 1,2 \text{ с}$  (при  $m_{g(1)} = 8 \text{ т}$ ) и  $t_{n(2)} = 1,1 \text{ с}$  (при  $m_{g(2)} = 4 \text{ т}$ ) – время разгона (торможения) груза для 2-х положений грузовой тележки,  $a$  – ускорение,  $v_n = 25 \text{ м/с}$  – скорость подъёма груза (задана)

• Обозначим для упрощения дальнейших расчётов суммарную нагрузку от веса груза, грузовой тележки и крюковой обоймы через  $Q_{(1)}$  и  $Q_{(2)}$  для 2-х положений грузовой тележки:

(1) – в середине пролёта:  $Q_{(1)} = F_1 \cdot k_q + (G_T + G_o) k_g + F_{и(1)} = 80 \cdot 1,25 + (8,24 + 4,11) 1,1 + 2,92 = 116,51$ ;  $Q_{(1)} = 116,51 \text{ кН}$ ;

(2) – на конце стрелы:  $Q_{(2)} = F_2 \cdot k_q + (G_T + G_o) k_g + F_{и(2)} = 40 \cdot 1,25 + (8,24 + 4,11) 1,1 + 1,67 = 65,26$ ;  $Q_{(2)} = 65,26 \text{ кН}$ ;

• Подставляем найденные значения и находим:

$$p_{(1)} = \frac{1}{n_k} Q_{(1)} = \frac{1}{4} 116,51 = 29,13 \text{ кН}; \quad p_{(1)} = 29,13 \text{ кН};$$

$$p_{(2)} = \frac{1}{n_k} Q_{(2)} = \frac{1}{4} 65,26 = 16,31 \text{ кН}; \quad p_{(2)} = 16,31 \text{ кН};$$

3) Определяем наибольший изгибающий момент, действующий на стержни нижнего пояса от давления грузовой тележки (на каждую панель). При  $d > l_m / 2$ ,  $M_{нп} = 0,5 \cdot 0,7 \cdot p \cdot l_m$ ; (у нас:  $1,2 > 2,05 / 2$ ).

$$M_{нп} = M_{нп}^{\max} = 0,35 \cdot p_{(1)} \cdot l_m = 0,35 \cdot 29,13 \cdot 2,05 = 20,9 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{нп} = 20,9 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

4) Определяем усилие в канате подъёма груза для 2-х положений грузовой тележки: (1) - в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$S_{пi} = \frac{F \cdot k_q + G_o \cdot k_g + F_{иi}}{i \cdot \eta}, \quad \text{где } i = 2 \text{ – кратность полиспаста в механизме}$$

подъёма груза;  $\eta = 0,91$  - к.п.д. полиспаста;

$$S_{\Pi(1)} = \frac{F_{(1)} \cdot k_q + G_o \cdot k_g + F_{и(1)}}{i \cdot \eta} = \frac{80 \cdot 1,25 + 4,11 \cdot 1,1 + 2,92}{2 \cdot 0,91} = 59,03 \text{ кН};$$

$$S_{\Pi(2)} = \frac{F_{(2)} \cdot k_q + G_o \cdot k_g + F_{и(2)}}{i \cdot \eta} = \frac{40 \cdot 1,25 + 4,11 \cdot 1,1 + 1,67}{2 \cdot 0,91} = 30,87 \text{ кН};$$

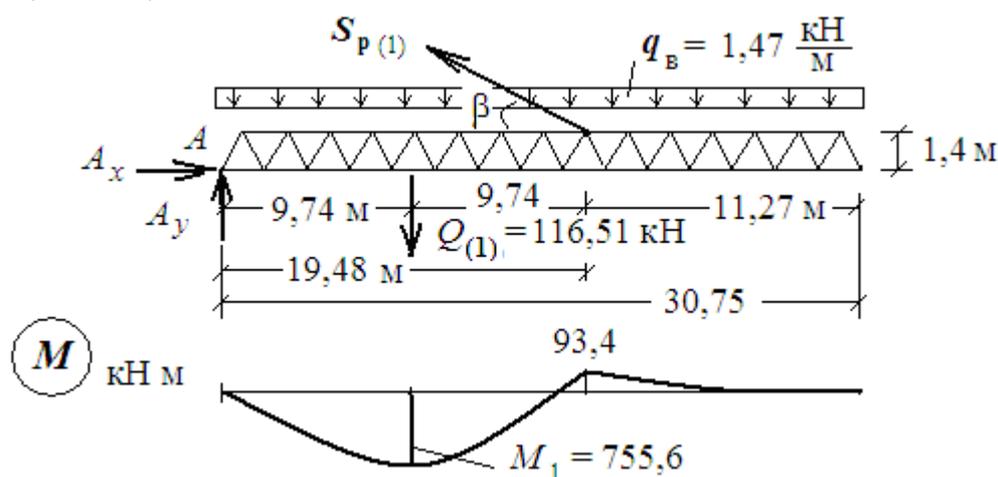
5) Усилие в канате механизма перемещения грузовой тележки принимаем по рекомендации:  $S_T = 3 \text{ кН}$ .

6) Определяем усилие сжатия на нижний пояс от канатов подъёма груза  $S_{\Pi}$  и механизма перемещения грузовой тележки  $S_T$  для 2-х положений грузовой тележки: (1) - в середине пролёта, (2) - на конце стрелы:  $H_{i \Gamma(1)} = -(S_T + 0,5 S_{\Pi}) = -(3 + 0,5 \cdot 59,03) = -32,52 \text{ кН}$ ;

$H_{i \Gamma(2)} = -(S_T + 0,5 \cdot S_{\Pi}) = -(3 + 0,5 \cdot 30,87) = -18,44 \text{ кН}$ . То есть усилие в стержнях  $H_1$  и  $H_2$  будет:  $H_{1 \Gamma(1)} = H_{2 \Gamma(1)} = -32,52 \text{ кН}$  (при 1-м положении грузовой тележки),  $H_{1 \Gamma(2)} = H_{2 \Gamma(2)} = -18,44 \text{ кН}$  (при 2-м положении грузовой тележки).

7) Определяем усилия в расчале  $S_p$  ( $S_{p(1)}$  и  $S_{p(2)}$ ) стрелы для 2-х положений грузовой тележки из уравнения равновесия  $\Sigma M_A = 0$ :

• Положение груза (1) - в середине пролётной части стрелы:  $Q_{(1)} = 116,51 \text{ кН}$ ;



$$M_{A(1)} = 0;$$

$$q_b \cdot 30,75 \frac{30,75}{2} + Q_{(1)} \cdot 9,74 - S_{p(1)} \cdot \sin \beta \cdot 19,48 - S_{p(1)} \cdot \cos \beta \cdot 1,4 = 0;$$

$$1,47 \cdot 30,75 \frac{30,75}{2} + 116,5 \cdot 9,74 - S_{p(1)} \cdot 0,31 \cdot 19,48 - S_{p(1)} \cdot 0,95 \cdot 1,4 = 0;$$

$$S_{p(1)} = 248,28 \text{ кН};$$

Определяем из уравнений равновесия:

$$\Sigma y = 0; A_y - 1,47 \cdot 30,75 - 116,51 + 248,28 \cdot 0,31 = 0, A_y = 84,74 \text{ кН},$$

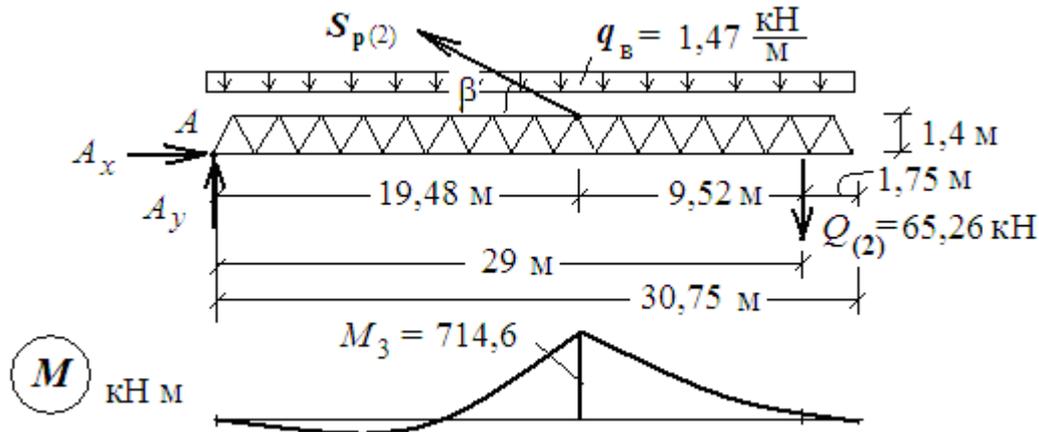
$$\Sigma x = 0; A_x - 248,28 \cdot 0,95 = 0; A_x = 236 \text{ кН}.$$

Строим эпюру моментов в вертикальной плоскости

$$M_1 = 84,74 \cdot 9,74 - 1,47 \cdot 9,74^2 \cdot \frac{1}{2} = 755,6 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

• Положение груза (2) – в конце консольной части стрелы:

$$Q_{(2)} = 65,26 \text{ кН};$$



$$\Sigma M_{A(1)} = 0;$$

$$q_B \cdot 30,75 \cdot \frac{30,75}{2} + Q_{(2)} \cdot 29 - S_{p(2)} \cdot \sin \beta \cdot 19,48 - S_{p(2)} \cdot \cos \beta \cdot 1,4 = 0;$$

$$1,47 \cdot 30,75 \cdot \frac{30,75}{2} + 65,26 \cdot 29 - S_{p(2)} \cdot 0,31 \cdot 19,48 - S_{p(2)} \cdot 0,95 \cdot 1,4 = 0;$$

$$S_{p(2)} = 351,1 \text{ кН};$$

Определяем из уравнений равновесия:

$$\Sigma y = 0; A_y - 1,47 \cdot 30,75 - 65,26 + 351,1 \cdot 0,31 = 0, A_y = 1,62 \text{ кН},$$

$$\Sigma x = 0; A_x - 351,1 \cdot 0,95 = 0; A_x = 333,5 \text{ кН},$$

Строим эпюру моментов в вертикальной плоскости,

$$M_3 = -65,26 \cdot 9,52 - 1,47 \cdot 11,27^2 \cdot \frac{1}{2} = 714,6 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Сравним величины моментов в характерных точках:

$$M_1 = 755,6 \text{ кН} \cdot \text{м}, M_3 = 714,6 \text{ кН} \cdot \text{м.} \text{ Числа сопоставимые.}$$

• Вывод: расчётная схема фермы и нагрузки принимаются для дальнейших расчётов.

8) Тогда усилия сжатия в стержнях *верхнего пояса* фермы от усилия в расчале  $S_p$  (от точки  $C$  - крепления расчала до точки  $A$  - пята стрелы) для 2-х положений грузовой тележки:

(1) - в середине пролёта, (2) – на конце стрелы:

$$B_{i p(1) \text{ верх.п.}} = -S_{p(1)} \cdot \cos \beta = -248,28 \cdot 0,95 = -236 \text{ кН};$$

$B_{i p(2) \text{ верх.п.}} = -S_{p(2)} \cdot \cos \beta = -351,1 \cdot 0,95 = -333,5 \text{ кН};$  То есть усилие от расчала в стержне  $B_1$  верхнего пояса, в пролётной части, будет:

$$B_{1 p(1)} = -236 \text{ кН (при 1-м положений грузовой тележки),}$$

$V_{1p(2)} = -333,5$  кН (при 2-м положений грузовой тележки).

9) Тогда усилия сжатия в стержнях *нижнего пояса* фермы от усилия в расчале  $S_p$  (от точки  $C$  – крепления расчала до точки  $A$  – пяты стрелы) для 2-х положений грузовой тележки будут в 2 раза меньше (т.к. нижних поясов два):  $H_{i(1) \text{ ниж.п.}} = -236 \cdot 0,5 = -118$  кН;

$H_{i(2) \text{ ниж.п.}} = -333,5 \cdot 0,5 = -166,75$  кН; То есть усилие от расчала в стержне  $H_1$  нижнего пояса пролётной части, будет:

$H_{1p(1)} = -118$  кН (при 1-м положений грузовой тележки)

$H_{1p(2)} = -166,75$  кН (при 2-м положений грузовой тележки) ].

#### 4. Построение линий влияния в стержнях вертикальных ферм от собственного веса и от подвижной нагрузки.

##### Определение усилий в стержнях ферм по линиям влияния

По эпюрам моментов, построенным выше, видно, что наиболее опасными являются сечения в середине пролётной части фермы и у расчала в её консольной части. Именно в этих местах проведём сечения 1-1 и 2-2 и построим линии влияния для определения усилий в наиболее нагруженных стержнях от собственного веса и подвижной нагрузки от грузовой тележки с грузом.

$q_v = 1,47$  кН/м – величина равномерно-распределённой нагрузки от собственного веса;  $p_{(1)} = 29,13$  кН – нагрузка на ходовое колесо (сеч. 1-1);  $p_{(2)} = 16,31$  кН – нагрузка на ходовое колесо (сеч. 2-2);  
 $\sin \alpha = 0,807$ ,  $\cos \alpha = 0,591$ .

*Линия влияния усилия в расчале  $S_p$ :*

$\Sigma M_A = 0$ ;  $1 \cdot x_1 - S_p \cdot \cos \beta \cdot 1,4 - S_p \cdot \sin \beta \cdot 19,475 = 0$ ;  $\cos \beta = 0,95$ ;  $\sin \beta = 0,31$  (см в предыдущем примере);

$1 \cdot x_1 - S_p \cdot 0,95 \cdot 1,4 - S_p \cdot 0,31 \cdot 19,475 = 0$ ;  $S_p = 0,1357 x_1$ ; (уравнение прямой, зависящей от текущей координаты; для построения линии влияния достаточно определить 2 точки):

при  $x_1 = 0$ ;  $S_p = 0$ ; при  $x_1 = 30,75$  м;  $S_p = 0,1357 \cdot 30,75 = 4,174$ ;

*Линия влияния горизонтальной составляющей опорной реакции  $A_x$ :*

$\Sigma x = 0$ ;  $A_x - S_p \cdot \cos \beta = 0$ ;  $A_x = S_p \cdot 0,95$ ;

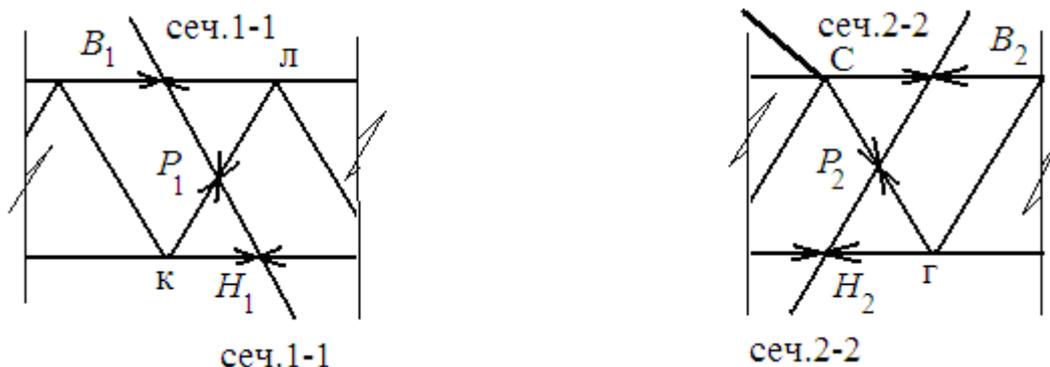
при  $S_p = 0$ ;  $A_x = 0$ ; при  $S_p = 4,174$ ;  $A_x = 4,174 \cdot 0,95 = 3,965$ ;

*Линия влияния вертикальной составляющей опорной реакции  $A_y$ :*

$A_y - 1 + S_p \cdot \sin \beta = 0$ ;  $A_y = 1 - S_p \cdot 0,31$ ;

при  $S_p = 0$ ;  $A_y = 1$ ; при  $S_p = 4,174$ ;  $A_y = 1 - 4,174 \cdot 0,31 = -0,294$ ;  
 Найдём сечение, где линия влияния  $A_y$  пересекает нулевую линию:  
 $A_y = 1 - S_p \cdot 0,31 = 1 - 0,1357 x_1 \cdot 0,31 = 0$ ;  $x = 23,81$  м;  
 $A_y = 0$  при  $x = 23,81$  м;

Выше были определены «опасные сечения» в вертикальных фермах. Применим метод сечений, и в этих местах проведём сечения 1-1 и 2-2, соответственно. Предполагаем стержни растянутыми.



Обозначим их:

в сечении 1-1:  $B_1$  – стержень верхнего пояса,  $P_1$  – раскос,  
 $H_1$  – стержень нижнего пояса,  
 в сечении 2-2:  $B_2$  – стержень верхнего пояса,  $P_2$  – раскос,  
 $H_2$  – стержень нижнего пояса.

### Сечение 1-1

*Линия влияния усилия в стержне  $B_1$  (верхний пояс):*

• *груз слева* (смотрим правую часть):

$$\Sigma M_K^{\text{пр}} = 0; -B_1 \cdot 1,4 - S_p \cdot \cos \beta \cdot 1,4 - S_p \cdot \sin \beta \cdot 2,05 \cdot 4,5 = 0;$$

$$-B_1 \cdot 1,4 - S_p \cdot 0,95 \cdot 1,4 - S_p \cdot 0,31 \cdot 9,225 = 0; B_1 = -2,99 S_p;$$

$$\text{при } S_p = 0; B_1 = 0; \text{ при } S_p = 4,174; B_1 = -2,99 \cdot 4,174 = -12,48;$$

Проводим линию влияния слева от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:

$$y = \frac{12,48}{30,75} 10,25 = 4,16;$$

• *груз справа* (смотрим левую часть):

$$\Sigma M_K^{\text{лев}} = 0; B_1 \cdot 1,4 + A_y \cdot 10,25 = 0; B_1 = -7,32 A_y;$$

$$\text{при } A_y = 1; B_1 = -7,32; \text{ при } A_y = -0,294; B_1 = -7,32(-0,294) = 2,152;$$

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:  $y =$

$\frac{2,152}{7} 11,45 = 3,52$ ; Проводим передаточную линию. Она соединяет

обе части линии влияния и находится под рассматриваемой панелью.

• Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузовую тележку будем устанавливать в 2-х наиболее неблагоприятных положениях. Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_1 = \frac{4,16}{13,5} (13,5 - 1,2) = 3,79; \quad y_2 = \frac{2,152}{7} 4,65 = 1,43; \quad y_3 = \frac{2,152}{7} 5,85 = 1,8;$$

Определим площадь линии влияния  $B_1$ :

$$\omega = -\frac{1}{2} 4,16 \cdot 10,25 - \frac{1}{2} 4,16 \cdot 13,5 + \frac{1}{2} 7 \cdot 2,152 = -41,87;$$

Максимальное усилие в стержне  $B_1$  от собственного веса стрелы:

$$B_{1G} = q_b \cdot \omega = 1,47 (-41,87) = -61,6; \quad B_{1G} = -61,6 \text{ кН (сжатие);}$$

Максимальные усилия в стержне  $B_1$  от ходовых колёс грузовой тележки:  $B_{1F(1)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = -2 \cdot p_{(1)} \cdot (4,16 + y_1) = -2 \cdot p_{(1)} (4,16 + 3,79) = -2 \cdot 29,13 \cdot 7,95 = -463,2$ ;

тележка в середине пролёта:  $B_{1F(1)} = -463,2 \text{ кН (сжатие);}$

$$B_{1F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = 2 \cdot p_{(2)} (y_2 + y_3) = 2 \cdot 16,3 \cdot (1,43 + 1,8) = 105,36;$$

тележка на конце консоли:  $B_{1F(2)} = 105,4 \text{ кН (растяжение);}$

(примечание:  $2 \cdot p$ , так как верхний пояс - общий для двух ферм и, следовательно, воспринимает давление не 2-х, а 4-х колёс).

### *Линия влияния усилия в раскосе $P_1$ :*

• *груз слева* (смотрим правую часть):

$$\Sigma y^{\text{пр}} = 0; \quad -P_1 \cdot \sin \alpha + S_p \cdot \sin \beta = 0; \quad -P_1 \cdot 0,807 + S_p \cdot 0,31 = 0; \quad P_1 = 0,384 S_p;$$

при  $S_p = 0$ ;  $P_1 = 0$ ; при  $S_p = 4,174$ ;  $P_1 = 1,6$ ; Проводим линию влияния слева от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:  $y = \frac{1,6}{30,75} 10,25 = 0,53$ ;

$$y = \frac{1,6}{30,75} 10,25 = 0,53;$$

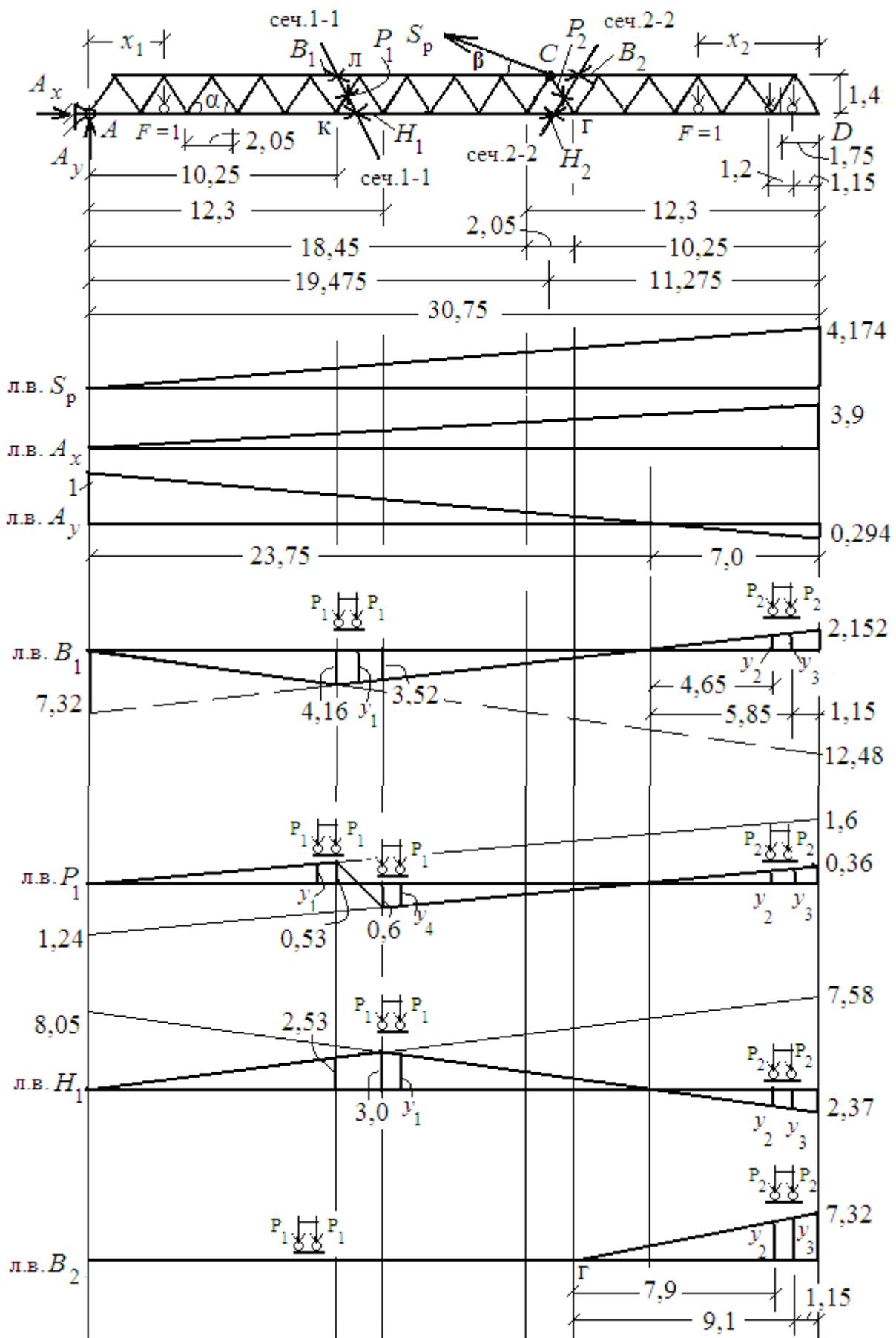
• *груз справа* (смотрим левую часть):

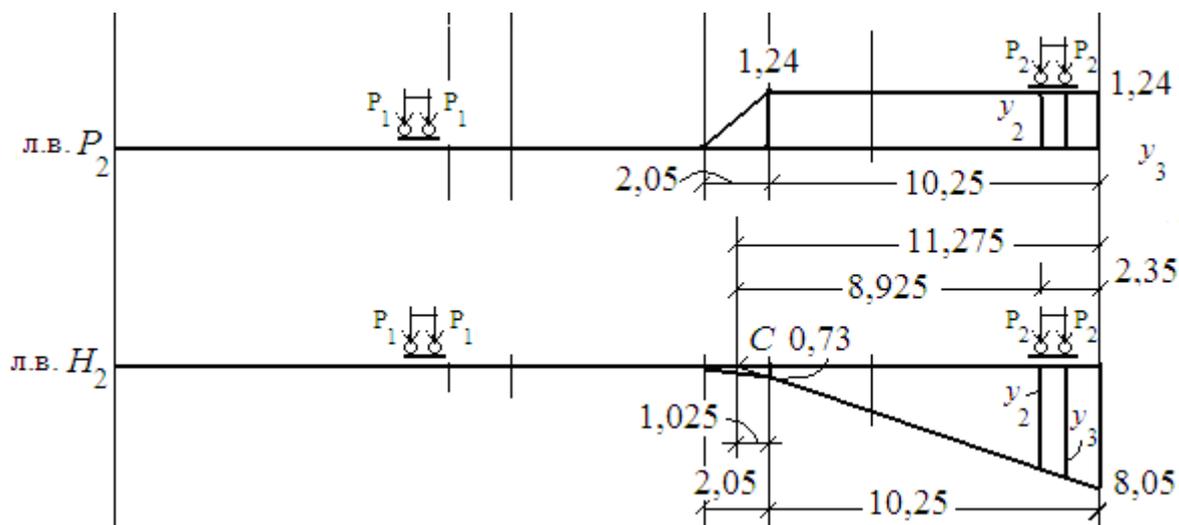
$$\Sigma y^{\text{лев}} = 0; \quad P_1 \cdot \sin \alpha + A_y = 0; \quad P_1 \cdot 0,807 + A_y = 0; \quad P_1 = -1,24 A_y;$$

$$\text{при } A_y = 1; \quad P_1 = -1,24; \quad A_y = -0,294; \quad P_1 = -0,294 \cdot (-1,24) = 0,36;$$

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:

$$y = \frac{1,24}{23,75} 11,45 = 0,6. \text{ Проводим передаточную линию.}$$





- Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку будем устанавливать в 2-х наиболее неблагоприятных положениях. Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_1 = \frac{0,53}{10,25} (10,25 - 1,2) = 0,47; \quad y_2 = \frac{0,36}{7} 4,65 = 0,24;$$

$$y_3 = \frac{0,36}{7} 5,85 = 0,3; \quad y_4 = \frac{0,6}{11,45} (11,45 - 1,2) = 0,54;$$

Определим площадь линии влияния  $P_1$ :

$$\omega = -\frac{1}{2} 10,25 \cdot 0,53 + \frac{1}{2} (0,53 - 0,6) 2,05 + \frac{1}{2} 11,45 \cdot 0,6 - \frac{1}{2} 7 \cdot 0,36 = 0,471;$$

$$\omega = 0,471;$$

Максимальное усилие в раскосе  $P_1$  от собственного веса стрелы:

$$P_{1G} = q_b \cdot \omega = 1,47 \cdot 0,471 = 0,7; \quad P_{1G} = 0,7 \text{ кН (растяжение);}$$

Максимальные усилия в стержне  $P_1$  от ходовых колёс грузовой тележки:

$$P_{1F(1)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(1)} \cdot (0,47 + 0,53) = 29,13 \cdot 1 = 29,1;$$

$$P_{1F(1)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = 29,13(-0,6 - 0,54) = 29,13(-1,14) = -33,2;$$

тележка в середине пролёта:  $P_{1F(1)} = 29,1 \text{ кН (растяжение);}$

$$P_{1F(1)} = -33,2 \text{ кН (сжатие);}$$

$$P_{1F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} \cdot (y_2 + y_3) = 16,31 \cdot (0,24 + 0,3) = 8,8;$$

тележка на конце консоли:  $P_{1F(2)} = 8,8 \text{ кН (растяжение);}$

*Линия влияния усилия в стержне  $H_1$  (нижний пояс):*

- груз слева (смотрим правую часть):  $\Sigma M_{л}^{пр} = 0; H_1 \cdot 1,4 - S_p \cdot \sin \beta \cdot 8,6 = 0; H_1 \cdot 1,4 - S_p \cdot 0,31 \cdot 8,6 = 0; H_1 = 1,8 S_p;$

при  $S_p = 0$ ;  $H_1 = 0$ ; при  $S_p = 4,174$ ;  $H_1 = 7,58$ ; Проводим линию влияния слева от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:  $y = \frac{7,58}{30,75} 10,25 = 2,53$ ;

• *груз справа* (смотрим левую часть):  $\Sigma M_{\Gamma}^{\text{лев.}} = 0$ ;

$-H_1 \cdot 1,4 + A_y \cdot 2,05 \cdot 5,5 = 0$ ;  $H_1 = 8,05 A_y$ ;

при  $A_y = 1$ ;  $H_1 = 8,05$ ; при  $A_y = -0,294$ ;  $H_1 = -0,294 \cdot 8,05 = -2,37$ ;

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели. Определяем недостающую координату из подобия треугольников:

$y = \frac{8,05}{30,75} 11,45 = 3,0$ ; Проводим передаточную линию. Она соединяет

обе части линии влияния и находится под рассматриваемой панелью. Она совпадает с линией влияния «груз слева».

• Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку будем устанавливать в 2-х наиболее неблагоприятных положениях.

Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$y_1 = \frac{3}{11,45} (11,45 - 1,2) = 2,73$ ;  $y_2 = \frac{2,37}{7} 4,65 = 1,57$ ;  $y_3 = \frac{2,37}{7} 5,85 = 1,98$ ;

Определяем площадь линии влияния  $H_1$ :

$\omega = \frac{1}{2} 3 \cdot 12,3 + \frac{1}{2} 3 \cdot 11,45 - \frac{1}{2} 2,37 \cdot 7 = 27,34$ ;

Максимальные усилия в стержне  $H_1$  от собственного веса стрелы:

$H_{1G} = q_B \cdot \omega = 1,47 \cdot 27,34 = 40,2$ ;  $H_{1G} = 40,2$  кН (растяжение);

Максимальные усилия в стержне  $H_1$  от ходовых колёс грузовой тележки:  $H_{1F(1)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(1)} \cdot (2,73 + 3) = 29,13 \cdot 5,7 = 166,9$ ;

тележка в середине пролёта:  $H_{1F(1)} = 166,9$  кН (растяжение);

$H_{1F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} (y_2 + y_3) = 16,31 (-1,57 - 1,98) = -57,9$ ;

тележка на конце консоли:  $H_{1F(2)} = -57,9$  кН (сжатие);

### Сечение 2 – 2

*Линия влияния усилия в стержне  $B_2$  (верхний пояс):*

• *груз слева* (смотрим правую часть): все стержни – нулевые (по признакам нулевых стержней):  $B_2 = P_2 = H_2 = 0$ .

• *груз справа* (смотрим правую часть):  $\Sigma M_{\Gamma}^{\text{лев.}} = 0$ ;  $-B_2 \cdot 1,4 + 1 \cdot (10,25 - x_2) = 0$ ;  $B_2 = \frac{10,25 - x_2}{1,4}$ ; при  $x_2 = 0$ ;  $B_2 = 7,32$ ; при  $x_2 = 10,25$ ;  $B_2 = 0$ ;

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели. Проводим передаточную линию. Она совпадает с нулевой линией.

- Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку будем устанавливать в наиболее неблагоприятное положение. Для усилия  $B_2$  оно одно (на конце консоли).

- Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_2 = \frac{7,32}{10,25} \cdot 7,9 = 5,64; \quad y_3 = \frac{7,32}{10,25} \cdot 9,1 = 6,5;$$

- Определим площадь линии влияния  $B_2$ :  $\omega = \frac{1}{2} \cdot 10,25 \cdot 7,32 = 37,5$ ;

- Максимальное усилие в стержне  $B_2$  от собственного веса стрелы:  $N_{4G} = q_B \cdot \omega = 1,47 \cdot 37,5 = 55,1$ ;  $B_{2G} = 55,1$  кН (растяжение);

- Максимальные усилия в стержне  $B_2$  от ходовых колёс грузовой тележки: тележка в середине пролёта:  $B_{2F(1)} = 0$ ;

тележка на конце консоли:  $B_{2F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} \cdot (y_2 + y_3) = 16,31 \cdot (5,64 + 6,5) = 198$ ;  $B_{2F(2)} = 198$  кН (растяжение);

#### *Линия влияния усилия в раскосе $P_2$ :*

- груз слева (смотрим правую часть):  $P_2 = 0$ .

- груз справа (смотрим правую часть):  $\Sigma y^{\text{лев.}} = 0$ ;  $P_2 \cdot \sin \alpha - 1 = 0$ ;  
 $P_2 \cdot 0,807 - 1 = 0$ ;  $P_2 = 1,24$ ; (уравнение прямой, не зависящей от  $x$ ).

Проводим прямую, параллельную нулевой линии справа от рассматриваемой панели. Проводим передаточную линию.

- Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузovou тележку будем устанавливать в наиболее неблагоприятное положение. Для усилия  $P_2$  оно одно (на конце консоли).  $y_2 = y_3 = 1,24$ ;

- Определим площадь линии влияния  $P_2$ :

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot 2,05 \cdot 1,24 + 1,24 \cdot 10,25 = 13,98;$$

- Максимальное усилие в раскосе  $P_2$  от собственного веса стрелы:  $N_{5G} = q_B \cdot \omega = 1,47 \cdot 13,98 = 20,6$ ;  $N_{5G} = 20,6$  кН (растяжение);

- Максимальные усилия в раскосе  $P_2$  от ходовых колёс грузовой тележки: тележка в середине пролёта:  $P_{2F(1)} = 0$ ;

тележка на конце консоли:  $P_{2F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} \cdot (y_2 + y_3) = 16,31 \cdot 2 \cdot 1,24 = 40,5$ ;  $P_{2G} = 40,5$  кН (растяжение);

Линия влияния усилия в стержне  $H_2$  (нижний пояс):

- груз слева (смотрим правую часть):  $H_2 = 0$ .
- груз справа (смотрим правую часть):  $\Sigma M_C^{\text{лев.}} = 0$ ;  $H_2 \cdot 1,4 + 1 \cdot (10,25 + 1,025 - x_2) = 0$ ;  $H_2 = -\frac{11,275 - x}{1,4}$ ; при  $x_2 = 0$ ;  $H_2 = -8,05$ ;

при  $x_2 = 11,275$ ;  $H_2 = 0$ ; при  $x_2 = 10,25$ ;  $H_2 = \frac{8,05}{11,275} \cdot 1,025 = 0,73$ ;

Проводим линию влияния справа от рассматриваемой панели.

Проводим передаточную линию.

- Определяем максимальные значения усилий от собственного веса стрелы и от давления грузовой тележки. Для этого грузовую тележку устанавливаем в наиболее неблагоприятное положение. Для усилия  $H_2$  оно одно (на конце консоли).

– Определяем недостающие координаты из подобия треугольников:

$$y_2 = \frac{8,05}{11,275} (11,275 - 2,35) = 6,37; \quad y_3 = \frac{8,05}{11,275} (11,275 - 1,15) = 7,23;$$

– Определим площадь линии влияния  $H_2$ :

$$\omega = -\frac{1}{2} 0,72 \cdot 2,05 - \frac{0,73 + 8,05}{2} 10,25 = -31,68;$$

– Максимальное усилие в стержне  $H_2$  от собственного веса стрелы:

$$H_{2G} = q_B \cdot \omega = 1,47 (-31,68) = -46,6; \quad H_{2G} = -46,6 \text{ кН (сжатие);}$$

– Максимальные усилия в стержне  $H_2$  от ходовых колёс грузовой тележки:

тележка в середине пролёта:  $H_{2F(1)} = 0$ ; тележка на конце консоли:  $H_{2F(2)} = \Sigma(F_i \cdot y_i) = p_{(2)} \cdot (y_2 + y_3) = 16,31 (-6,37 - 7,23) = -221,8$ ;  
 $H_{2F(2)} = -221,8 \text{ кН (сжатие);}$

## 5. Расчёт нагрузок в горизонтальной плоскости

Даны: масса стрелы  $m_c = 4,19$  т, масса груза (от  $Q_2 = 4$  кН)  $m_{g2} = 4$  т, масса грузовой тележки  $m_T = 0,84$  т, масса крюковой обоймы  $m_o = 0,42$  т;  $b = 1,2$  м; максимальная высота подъёма груза:  $H = 28$  м; максимальный вылет груза:  $L = 30$  м; скорость подъёма груза:  $v_{\text{п}} = 25$  м/с; скорость поворота крана  $n_{\text{кр.}} = 0,9$  об/мин; время разгона (торможения) для 2-х положений грузовой тележки:  $t_1 = 1,1$  с,  $t_2 = 1,0$  с;

### 1) Расчёт ветровой нагрузки $F_w$ :

ветровая нагрузка (2.19) кН:  $F_w = w \cdot A$ ;

$w$  – расчётная ветровая нагрузка (2.22):  $w = q \cdot k \cdot c \cdot \gamma$ ;

$q$  – динамическое давление ветра примем по таблице 2.3:  $q = 125$  Па,

$k$  – коэффициент, учитывающий изменение (возрастание) динамического давления по высоте примем по таблице 2.5 с помощью линейной интерполяции:  $k=1,25+\frac{1,55-1,25}{40-20}(28-20)=1,37$ ;

$c$  – коэффициент аэродинамической силы, учитывающий характер обтекания объекта воздушным потоком (коэффициент лобового сопротивления) примем  $c=1,4$ , учитывая, что ферма изготовлена из труб и уголков;

$\gamma$  – коэффициент перегрузки, примем  $\gamma=1,0$ ;

тогда  $w=125 \cdot 1,37 \cdot 1,4 \cdot 1=239,75$  Па,

$\varphi$  – коэффициент заполнения примем  $\varphi=0,4$  (для ферм из труб и уголков),

– площадь стрелы по контуру равна (см. чертёж фермы):

$$A_{\text{ск}} = (l - l_m) \cdot h = (30,75 - 2,05) \cdot 1,4 = 40,18 \text{ м}^2;$$

– наветренная площадь стрелы равна (2.20):

$$A_c = A_{\text{ск}} \cdot \varphi = 40,18 \cdot 0,4 = 16,07 \text{ м}^2;$$

– наветренная площадь среднестатистического груза (2.21):

$$A_{\text{гр}} = 3,2 \cdot \sqrt{Q_2} = 3,2 \cdot \sqrt{4} = 6,4 \text{ м}^2;$$

Ветровая нагрузка на груз определяется для 2-го положения грузовой тележки (на конце стрелы), так как радиус её приложения в этом случае - наибольший.

Таким образом: ветровая нагрузка на стрелу  $F_{\text{вс}}$ :  $F_{\text{вс}} = w \cdot A_c = 239,75 \cdot 16,07 = 3853 \text{ Н} = 3,85$ ;  $F_{\text{вс}} = 3,85 \text{ кН}$ ;

ветровая нагрузка на груз  $F_{\text{вг}}$ :  $F_{\text{вг}} = w \cdot A_{\text{гр}} = 239,75 \cdot 6,4 = 1534 \text{ Н} = 1,53$ ;  $F_{\text{вг}} = 1,53 \text{ кН}$ ;

## 2) Расчёт инерционной нагрузки:

Касательная сила инерции от массы стрелы считается по формуле:

$$F_{\text{и.с}} = \frac{m_c \cdot \omega}{t_e} \cdot (x_c + 0,5 \cdot l) \quad (2.24); \quad \text{Здесь: } \omega - \text{угловая скорость (радиан в}$$

секунду):  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 0,9}{30} = 0,094 \text{ 1/с}$ ;

время разгона (торможения) механизма поворота принимаем  $t_b = 5 \text{ с}$ ,

тогда  $F_{\text{и.с}} = \frac{4,19 \cdot 0,094}{5} (1 + 0,5 \cdot 30,75) = 1,29 \text{ кН}$ ;

• Касательная сила инерции от массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы, расположенных в крайнем положении тележки у оголовка стрелы (2.27):  $F_{и.г} = (m_g + m_T + m_o) \frac{\omega}{t_e} (x_c + l - l_T) =$

$$= (4 + 0,84 + 0,42) \frac{0,094}{5} (1 + 30,75 - 1,75) = 2,97 \text{ кН}; \quad F_{и.г} = 2,97 \text{ кН.}$$

3) **Суммарная равномерно - распределённая нагрузка** на стрелу от ветра и сил инерции в горизонтальной плоскости будет равна:

$$q_T = (F_{вс} + F_{и.с}) / l = \frac{3,85 + 1,29}{30,75} = 0,167 \text{ кН/м.}$$

4) **Суммарная сосредоточенная нагрузка** на стрелу от ветрового влияния на груз и от силы инерции от массы груза, грузовой тележки и крюковой обоймы в горизонтальной плоскости будет равна:

$$F_T = F_{вг} + F_{и.г} = 1,53 + 2,97 = 4,5 \text{ кН};$$

5) **Строим эпюры изгибающих моментов** в горизонтальной плоскости:

• изгибающие моменты в расчётных сечениях фермы стрелы от равномерно - распределённой нагрузки  $q_T$  будут равны

(по формуле  $M = \frac{q \cdot l^2}{2}$ ):

$$\text{сечение 2-2: } M_{q2} = \frac{1}{2} q_T \cdot l_2^2 = 0,5 \cdot 0,167 \cdot 13,325^2 = 14,8 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$\text{сечение 1-1: } M_{q1} = \frac{1}{2} q_T \cdot (l_2 + 2,05 \cdot 4)^2 = 0,5 \cdot 0,167 (13,325 + 8,2)^2 = \\ = 0,5 \cdot 0,167 \cdot 21,525^2 = 38,7 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$\text{Сечение у шарнира } A \text{ пяты стрелы: } M_{qA} = \frac{1}{2} q_T \cdot l^2 = 0,5 \cdot 0,167 \cdot 30,75^2 = \\ = 78,95 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

• изгибающие моменты в расчётных сечениях фермы стрелы от сосредоточенной нагрузки  $F_T$  будут: (по формуле  $M = F \cdot l$ ,  $l_T = 1,75 \text{ м}$ )

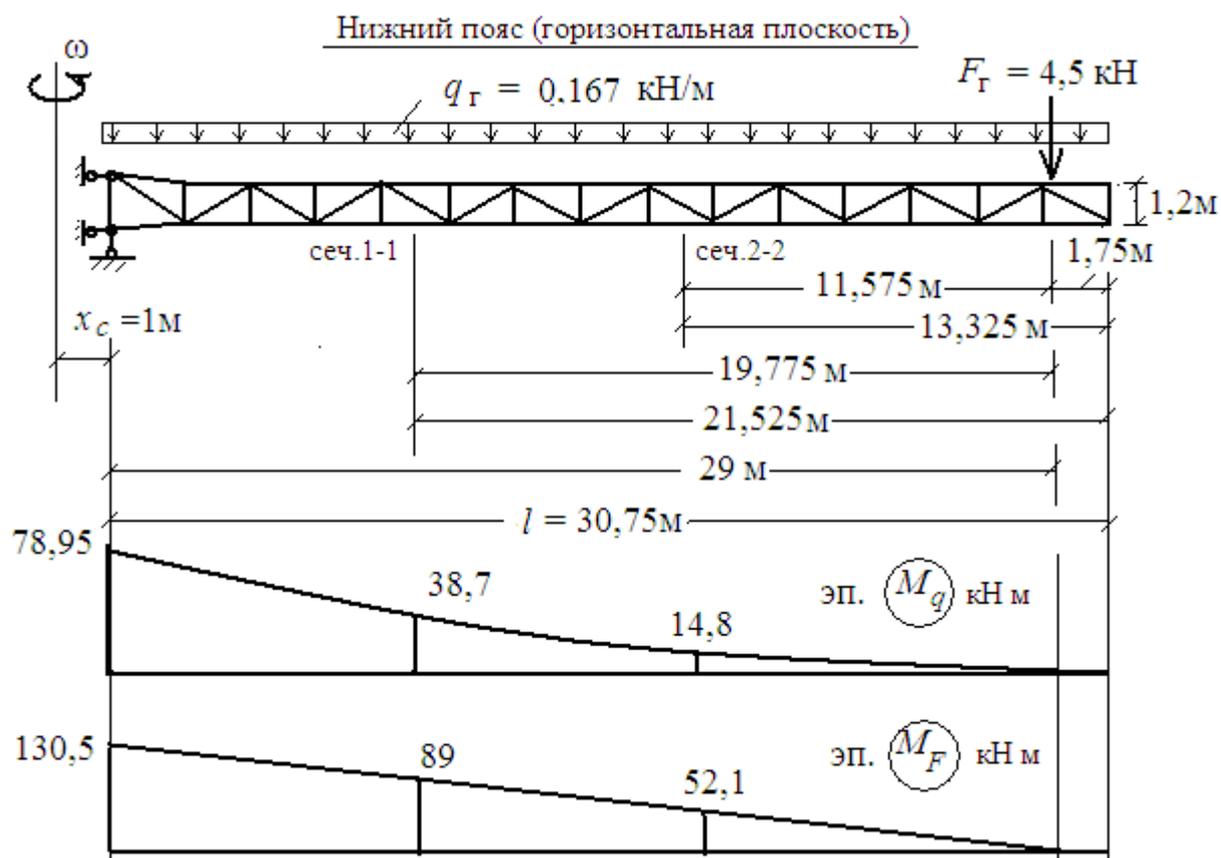
$$\text{сечение 2-2: } M_{F2} = F_T (l_2 - l_T) = 4,5 (13,325 - 1,75) = 4,5 \cdot 11,575 = \\ = 52,1 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$\text{сечение 1-1: } M_{F1} = F_T (l_2 - l_T + 2,05 \cdot 4) = 4,5 (13,325 - 1,75 + 2,05 \cdot 4) = \\ = 4,5 \cdot 19,775 = 89 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

Сечение у шарнира  $A$  пяты стрелы:

$$M_{FA} = F_T (l - l_T) = 4,5 (30,75 - 1,75) = 4,5 \cdot 29 = 130,5 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

б) Определяем усилия в расчётных стержнях нижнего пояса фермы ( $H_1$  и  $H_2$ ) от нагрузок в горизонтальной плоскости (от изгибающих моментов):



для стержня  $H_1$ :  $H_{1q}^r = \pm \frac{M_q}{b} = \pm \frac{38,7}{1,2} = \pm 32,25$  кН,

$$H_{1F}^r = \pm \frac{M_F}{b} = \pm \frac{89}{1,2} = \pm 74,17$$
 кН,

для стержня  $H_2$ :  $H_{2q}^r = \pm \frac{M_q}{b} = \pm \frac{14,8}{1,2} = \pm 12,33$  кН,

$$H_{2F}^r = \pm \frac{M_F}{b} = \pm \frac{52,1}{1,2} = \pm 43,4$$
 кН.

## 6. Определение максимальных усилий в расчётных стержнях стрелы:

Стержень  $B_1$  (верхний пояс):  $B_1 = \pm B_{1G} \pm B_{1p} \pm B_{1F}$

1-е положение тележки:  $B_1 = -61,6 - 236 - 463,2 = -760,8$  кН;м

2-е положение тележки:  $B_1 = -61,6 - 333,5 + 105,4 = -289,2$  кН;

Максимальное растягивающее усилие: 0

Максимальное сжимающее усилие: – 760,8 кН;

Стержень  $P_1$  (раскос):  $P_1 = \pm P_{1G} \pm P_{1F}$

1-е положение тележки:  $P_1 = + 0,7 + 29,1 = + 29,8$  кН;

$P_1 = + 0,7 - 33,2 = - 32,5$  кН;

2-е положение тележки:  $P_1 = + 0,7 + 8,8 = + 9,5$  кН;

Максимальное растягивающее усилие: + 29,8 кН;

Максимальное сжимающее усилие: – 32,5 кН;

Таблица усилий в стержнях фермы

номера стержней	Усилия в стержнях, кН							
	от собств. веса $q_B$ (лин.вл.)	от расчала $S_p$	от канатов $S_T$ и $S_{II}$	от подвижных нагрузок $P$ (лин.вл.)	от горизонтальных нагрузок		Суммарные	
					$q_G$	$F_G$	растяжение +	сжатие –
верх.п $B_1$	– 61,6	$\frac{-236}{-333,5}$	0	$\frac{-463,2}{+105,4}$	0	0	0	– 760,8
раскос $P_1$	+ 0,7	0	0	$\frac{+29,1}{-33,2}$ $\frac{+8,8}{+8,8}$	0	0	+ 29,8	– 32,5
ниж.п $H_1$	+ 40,2	$\frac{-118}{-166,8}$	$\frac{-32,52}{-18,44}$	$\frac{+166,9}{-57,9}$	$\pm 32,25$	$\pm 74,17$	+ 163	– 309,3
верх.п $B_2$	+ 55,1	0	0	$\frac{0}{+198}$	0	0	+ 253,1	0
раскос $P_2$	+ 20,6	0	0	$\frac{0}{+40,5}$	0	0	+ 61,1	0
ниж.п $H_2$	– 46,6	0	$\frac{-32,52}{-18,44}$	$\frac{0}{-221,8}$	$\pm 12,33$	$\pm 43,4$	0	– 342,6

Примечание к таблице:

1. В числителе указывается значения усилий в стержнях, полученные при нахождении грузовой тележки с грузом в середине пролётной части в 1- м положении.

В знаменателе – значения усилий в стержнях, полученные при нахождении грузовой тележки с грузом на конце консольной части во 2- м положении.

2. При дальнейших расчётах следует учесть, что стержни нижнего пояса испытывают местный изгиб от действия грузовой тележки  $M_{\text{нп}} = 20,9$  кН· м.

*Стержень  $H_1$  (нижний пояс):*

$$H_1 = \pm H_{1G} \pm H_{1r} \pm H_{1p} \pm H_{1F} \pm H_{1q}^r \pm H_{1F}^r$$

1-е положение тележки:

$$H_1 = + 40,2 - 118 - 32,52 + 166,9 + 32,25 + 74,17 = + 163 \text{ кН};$$

2-е положение тележки:

$$H_1 = + 40,2 - 166,75 - 18,44 - 57,9 - 32,25 - 74,17 = - 309,3 \text{ кН};$$

Максимальное растягивающее усилие: + 163 кН;

Максимальное сжимающее усилие: - 309,3 кН;

*Стержень  $B_2$  (верхний пояс):  $B_2 = \pm B_{2G} \pm B_{2F}$*

1-е положение тележки:  $B_2 = 55,1$  кН;

2-е положение тележки:  $B_2 = + 55,1 + 198 = + 253,1$  кН;

Максимальное растягивающее усилие: + 253,1 кН;

Максимальное сжимающее усилие: 0.

*Стержень  $P_2$  (раскос):  $P_2 = \pm P_{2G} \pm P_{2F}$*

1-е положение тележки:  $P_2 = 20,6$  кН;

2-е положение тележки:  $P_2 = 20,6 + 40,5 = + 61,1$  кН;

Максимальное растягивающее усилие: + 61,1 кН;

Максимальное сжимающее усилие: 0.

*Стержень  $H_2$  (нижний пояс):*

$$H_2 = \pm H_{2G} \pm H_{2r} \pm H_{2F} \pm H_{2q}^r \pm H_{2F}^r$$

1-е положение тележки:  $H_2 = - 46,6 - 32,52 \pm 12,33 \pm 43,4 = - 23,42$  кН;

2-е положение тележки:

$$H_2 = - 46,6 - 18,44 - 221,8 - 12,33 - 43,4 = - 342,6 \text{ кН};$$

Максимальное растягивающее усилие: 0;

Максимальное сжимающее усилие: - 342,6 кН;

## **7. Подбор поперечных сечений стержней фермы (стрелы)**

*Верхний пояс стрелы:*

Максимальные усилия в расчётных стержнях верхнего пояса:

$B_1 = - 760,8$  кН (сжатие), в консольной части  $B_2 = + 253,1$  кН

(только растяжение). Поэтому стержень  $B_1$  будем рассчитывать на устойчивость, а стержень  $B_2$  – на прочность.

*Стержень  $B_1$ :*

Верхний пояс выполняем из бесшовной горячекатаной трубы по ГОСТ 8732 –78. Материал – низколегированная сталь 09 Г2С-6-2;

Расчётное усилие  $B_1 = -760,8$  кН, Расчётное сопротивление  $R=310$  МПа ( $31$  кН/см<sup>2</sup>), коэффициент условий работы  $\gamma_c = 0,8$ ;

$\gamma_c \cdot R = 0,8 \cdot 31 = 24,8$  кН/см<sup>2</sup>. Длина панели  $l = l_m = 2,05$  м = 205 см.

• Делаем первую попытку. Принимаем коэффициент продольного изгиба  $\varphi_1 = 0,7$ . Тогда необходимая площадь поперечного сечения

$$\text{должна быть } A \geq \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y} = \frac{760,8}{0,7 \cdot 0,8 \cdot 31} = 43,82 \text{ см}^2;$$

• Выбираем трубу  $102 \times 16$  (наружный диаметр 102 мм, толщина стенки 16 мм). Площадь поперечного сечения  $A = 43,22$  см<sup>2</sup>, радиус инерции  $i = 3,09$  см.

• Определяем гибкость стержня:  $\lambda = \frac{\mu \cdot l_m}{i} = \frac{1 \cdot 205}{3,09} = 66,34$ ;

• По таблице Приложения 1 определяем действительный коэффициент  $\varphi$ :  $\varphi = 0,759 - \frac{0,759 - 0,674}{10} \cdot 6,34 = 0,705$ ;

• Проверяем устойчивость стержня (определяем напряжение):

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} = \frac{760,8}{0,705 \cdot 43,22} = 24,97 \text{ кН/см}^2 < 24,8 \text{ кН/см}^2.$$

% перегрузки:  $\frac{24,97 - 24,8}{24,8} 100\% = 0,7\% < 5\%$ , что допустимо.

Принимаем сечение верхнего пояса в пролётной части – труба  $102 \times 16$ . Площадь поперечного сечения  $A = 43,22$  см<sup>2</sup>.

*Стержень  $B_2$ :*

Расчётное усилие  $B_2 = +253,1$  кН (только растяжение).

Материал – углеродистая сталь ВСт3пс-6-2;  $R_y = 240$  МПа ( $24$  кН/см<sup>2</sup>)

Верхний пояс консольной части рассчитываем на прочность, приняв

$$\gamma_c = 0,8: A \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{253,1}{0,8 \cdot 24} = 13,18 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение верхнего пояса в консольной части – труба  $102 \times 5$ . Площадь поперечного сечения  $A = 15,24$  см<sup>2</sup>.

*Нижний пояс стрелы:*

Максимальные усилия в расчётных стержнях нижнего пояса – в стержне  $H_1 = -309,3$  кН (сжатие),  $H_2 = -342,6$  кН (сжатие).

Поэтому весь нижний пояс рассчитываем на устойчивость по  $H_2$ .

Стержни нижнего пояса, кроме того, испытывают изгиб от давления ходовых колёс грузовой тележки. Изгибающий момент

$M_{\text{нп}} = 20,9$  кН·м. Нижний пояс выполняем из профилей гнутых замкнутых сварных прямоугольных для строительных конструкций ГОСТ 30245 - 2003. Материал – низколегированная сталь 09 Г2С-6-2; Расчётное сопротивление  $R_y = 310$  МПа ( $31$  кН/см<sup>2</sup>).

*Стержень  $H_2$ :*

Расчётное усилие  $H_2 = -342,6$  кН;  $l = l_m = 205$  см.

- Принимаем коэффициент условий работы  $\gamma_c = 0,9$ , Тогда  $\gamma_c \cdot R_y = 0,9 \cdot 31 = 27,9$  кН/см<sup>2</sup>.

- Подбираем сечение из условия устойчивости. Принимаем коэффициент продольного изгиба  $\varphi = 0,7$ . Необходимая площадь поперечного сечения должна быть

$$A \geq \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y} = \frac{342,6}{0,7 \cdot 0,9 \cdot 31} = 17,54 \text{ см}^2;$$

Поскольку стержни нижнего пояса кроме сжатия испытывают изгиб, площадь сечения принимаем значительно больше. Поэтому выбираем сечение из стального гнутого замкнутого профиля прямоугольного сечения площадью приблизительно в 2 раза больше (см. приложение): сечение  $160 \times 100 \times 7$ :  $A = 32,76$  см<sup>2</sup>;  $i_{\text{min}} = i_y = 3,98$  см;  $W_x = 134,7$  см<sup>3</sup>;

Определяем гибкость стержня:  $\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{\text{min}}} = \frac{1 \cdot 205}{3,98} = 51,5$ ;

- По таблице Приложения 1 определяем действительный коэффициент  $\varphi$ :  $\varphi = 0,856 - \frac{0,856 - 0,81}{10} \cdot 1,5 = 0,85$ ;

- Определяем напряжение в стержне, проверяем прочность:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} \pm \frac{M_{\text{нп}}}{W_x} = \frac{342,6}{0,85 \cdot 32,76} + \frac{20,9 \cdot 100}{134,7} = 27,82 < 27,9 \text{ кН/см}^2,$$

Устойчивость обеспечена. Принимаем сечение нижнего пояса – гнутозамкнутый профиль прямоугольного сечения  $160 \times 100 \times 7$ .

Площадь поперечного сечения  $A = 32,76$  см<sup>2</sup>.

*Раскосы:*

Максимальные усилия в расчётных стержнях раскосов: в стержне  $P_1 = -32,5$  кН, в стержне  $P_2 = +61,1$  кН. Поэтому раскосы пролётной части ( $P_1$ ) рассчитываем на устойчивость, раскосы консольной части ( $P_2$ ) – на прочность. Раскосы выполняем из бесшовной горячекатаной трубы по ГОСТ 8732–78. Материал – углеродистая сталь ВСтЗкп-2-1;  $R_y = 230$  МПа ( $23$  кН/см<sup>2</sup>); коэффициент условий работы  $\gamma_c = 0,8$ . Длину раскоса находим из треугольника:

$$l_p = \sqrt{1,025^2 + 1,4^2} = 1,735 \text{ м} = 173,5 \text{ см} = l.$$

*Стержень P<sub>1</sub>:*

Расчётное усилие  $P_1 = -32,5$  кН. Материал – углеродистая сталь ВСтЗкп-2-1. Принимаем коэффициент продольного изгиба  $\varphi = 0,5$ .

Тогда необходимая площадь поперечного сечения должна быть

$$A \geq \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y} = \frac{32,5}{0,5 \cdot 0,8 \cdot 23} = 3,53 \text{ см}^2; \text{ Выбираем трубу } \circ 45 \times 4; A$$

$$= 5,15 \text{ см}^2, \quad i = 1,45 \text{ см};$$

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{\min}} = \frac{1 \cdot 173,5}{1,45} = 119,77; \quad \varphi = 0,492 - \frac{0,492 - 0,433}{10} \cdot 9,77 = 0,43;$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} = \frac{32,5}{0,43 \cdot 5,15} = 14,68 \text{ кН/см}^2 < 23,0 \text{ кН/см}^2.$$

• Принимаем сечение решётки в пролётной части – труба 45×4.

Площадь поперечного сечения  $A = 5,15 \text{ см}^2$ .

*Стержень P<sub>2</sub>:*

Расчётное усилие раскоса в консольной части  $P_2 = +61,1$  кН (только растяжение). Материал – углеродистая сталь ВСтЗкп-2-1;

Раскосы консольной части рассчитываем на прочность, приняв

$$\gamma_c = 0,8: A \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{61,1}{0,8 \cdot 23} = 3,32 \text{ см}^2; \text{ принимаем сечение раскосов}$$

в консольной части – труба 45×4, площадь поперечного сечения  $A = 5,15 \text{ см}^2$ .

Результаты расчётов сведём в таблицу:

Элемент фермы	Обозначение	Материал	Расчётное усилие	Сечение	$R_y$ кН/см <sup>2</sup>
Верхний пояс в пролётн. части в консольн. части	$B_1$	09Г2С-6-2	- 706,8	○ 102×16	31
	$B_2$	ВСтЗпс-6-2	+ 253,1	○ 102×5	24
Нижний пояс в пролётн. части в консольн. части	$H_1$	09Г2С-6-2	- 309,3	□ 160×100×7	31
	$H_2$	09Г2С-6-2	- 342,6	□ 160×100×7	31
Раскосы в пролётн. части в консольн. части	$P_1$	ВСтЗкп2-1	- 32,5	○ 45×4	23
	$P_2$	ВСтЗкп2-1	+ 61,1	○ 45×4	23

## 8. Расчёт сварных соединений узлов фермы

### 8.1. Расчёт сварного соединения из необжатых круглых труб.

Присоединение необжатого раскоса  $P_2$  к верхнему поясу стрелы в узле «л». Максимальное усилие в раскосе  $P_2 = -61,1$  кН;

Сечение раскоса – труба  $45 \times 4$  (диаметр 4,5 см, толщина  $t = 0,4$  см);

Сечение пояса – труба  $102 \times 5$  (диаметр 10,2 см, толщина  $t = 0,5$  см);

Расчётное сопротивление  $R_w = R_y = 230$  МПа ( $23$  кН/см<sup>2</sup>),

Коэффициент условий работы  $\gamma_c = 1$ ; Автоматическая сварка ( $\beta = 1,0$ ). Угол наклона раскоса к горизонту  $\alpha = 53,8^\circ$ ,  $\sin \alpha = 0,807$ ;

$d/D = 45/102 = 0,44$ ,  $\xi = 1,01$  (из таблицы 5.3),

Длина сварного шва для обжатой трубы:

$$l_w = 0,5 \cdot \pi \cdot d \cdot \xi \cdot [1,5 (1 + \csc \alpha) - \sqrt{\csc \alpha}]$$

$$l_w = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 4,5 \cdot 1,01 [1,5 (1 + \frac{1}{0,807}) - \sqrt{\frac{1}{0,807}}] = 16, \text{ см};$$

Проверяем прочность шва; условие прочности:

$$\frac{N}{0,85 \cdot k_f \cdot l_w \cdot (R_w \cdot \beta)_{\min} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad \frac{61,1}{0,85 \cdot 5 \cdot 16 \cdot (23 \cdot 1)_{\min} \cdot 1} = 0,04 < 1;$$

Прочность обеспечена.

### 8.2. Расчёт сварного соединения из обжатых круглых труб.

Присоединение обжатого раскоса  $P_2$  к верхнему поясу стрелы в узле «л» (вариант). Максимальное усилие в раскосе  $P_2 = -61,1$  кН;

Сечение раскоса – труба  $45 \times 4$  (диаметр 4,5 см, толщина  $t = 0,4$  см);

Расчётное сопротивление  $R_y = 230$  МПа ( $23$  кН/см<sup>2</sup>), Коэффициент условий работы  $\gamma_c = 1$ ; Автоматическая сварка ( $\beta = 1,0$ )

Угол наклона раскоса к горизонту  $\alpha = 53,8^\circ$ ,  $\sin \alpha = 0,807$ ;

Раскос приваривается к нижнему поясу прямоугольного сечения

$160 \times 100 \times 7$ ,  $R_y = 310$  МПа. Сварка автоматическая. Сварной шов –

угловой. Рассчитывается по 2-м опасным сечениям. Расчётная длина

$$l_w = \frac{\pi \cdot d}{\sin \alpha} = \frac{3,14 \cdot 4,5}{0,807} = 17,5 \text{ см},$$

Определяем опасное сечение по формуле (5.2):  $\beta_f = \beta_z = 1,0$ ,

По табл. 5.1: при  $R_y = 230$  МПа,  $R_{wf} = 160$  МПа,  $R_{wz} = 164$  МПа, при

$$\frac{\beta_f \cdot R_{wf}}{\beta_z \cdot R_{wz}} = \frac{160}{164} < 1. \text{ Расчёт ведём по металлу шва, по формуле:}$$

$$\frac{N}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_c} = \frac{61,1}{1 \cdot 4 \cdot 17,5 \cdot 16 \cdot 1} = 0,06 \leq 1;$$

Прочность сварного шва обеспечена.

## 9. Расчёт болтовых соединений

### 9.1. Определение количества болтов для фланцевого соединения двух элементов труб верхнего пояса

Максимальное усилие в верхнем поясе  $N_1 = -706,8$  кН. Сечение нижнего пояса – труба  $102 \times 16$ ; Выбираем высокопрочные болты из стали марки 40Х,  $R_{bs} = 40$  кН·см<sup>2</sup>;  $\gamma_c = 1$ ,  $\gamma_b = 1$ .

Конструируем фланец и определяем необходимое число болтов.

Условия прочности на срез: 
$$\frac{N}{n \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot A \cdot R_{bs}} \leq 1;$$

1) определяем необходимое количество болтов М16,  $A = 2,01$  см<sup>2</sup>:

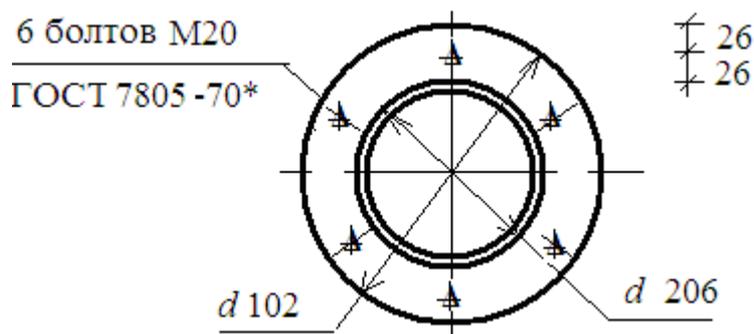
$$n = \frac{N}{n_s \cdot \gamma_b \cdot A \cdot R_{bs}} = \frac{706,8}{1 \cdot 1 \cdot 2,01 \cdot 40} = 8,8 = 9 \text{ шт.}$$

2) определяем необходимое количество болтов М20,  $A = 3,14$  см<sup>2</sup>:

$$n = \frac{N}{n_s \cdot \gamma_b \cdot A \cdot R_{bs}} = \frac{706,8}{1 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 40} = 5,63 = 6 \text{ шт.}$$

По конструктивным соображениям выбираем 2) вариант:

6 болтов М 20 мм ГОСТ 7798-70\*.



### 9.2. Расчёт болтов во фланцевом соединении консольной части нижнего пояса

Максимальное усилие в нижнем поясе:  $N_6 = -342,6$  кН. Сечение нижнего пояса  $160 \times 100 \times 7$ . Изгибающий момент от грузовой тележки:  $M_{\text{нп}} = 2090$  кН·см. Поперечная сила  $Q = p_{(2)} = 16,31$  кН (усилие от колеса грузовой тележки);  $\sigma_b = 110$  кН/см<sup>2</sup> – для стали 40Х,

$\gamma_c = 0,9$  – коэффициент условий работы:

$f = 0,25$  – коэффициент трения для необработанных поверхностей;

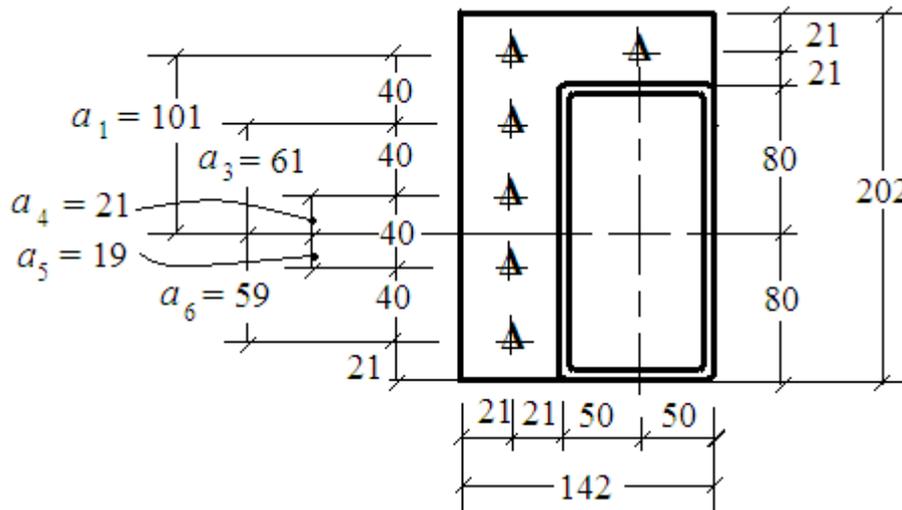
Тогда  $A$  – площадь поперечного сечения одного болта определяем

по формуле (5.13): 
$$A \geq \frac{1}{0,65 \cdot \sigma_s} \left( \frac{M \cdot y_1}{\sum y_i^2} + \frac{N}{n} + \frac{Q}{f \cdot n \cdot \gamma_c} \right)$$

Конструируем фланец. Выбираем фланцевое соединение из 5 болтов

M16. Мин расстояние до элемента:  $1,3 \cdot d = 1,3 \cdot 16 = 21$  мм,

Мин расстояние между болтами:  $2,5 \cdot d = 2,5 \cdot 16 = 40$  мм.



Тогда  $a_1 = a_2 = 10,1$  см;  $a_3 = 6,1$  см;  $a_4 = 2,1$  см;  $a_5 = 1,9$  см;  $a_6 = 5,9$  см;

$$\sum \frac{a_i^2}{a_1} = \frac{a_1^2}{a_1} + \frac{a_2^2}{a_1} + \frac{a_3^2}{a_1} + \frac{a_4^2}{a_1} + \frac{a_5^2}{a_1} + \frac{a_6^2}{a_1} = \frac{10,1^2}{10,1} + \frac{10,1^2}{10,1} + \frac{6,1^2}{10,1} + \frac{2,1^2}{10,1} + \frac{1,9^2}{10,1} + \frac{5,9^2}{10,1} = 20,2 + \frac{36,71}{10,1} + \frac{4,41}{10,1} + \frac{3,61}{10,1} + \frac{34,81}{10,1} = 28,12 \text{ см};$$

$$A_6 \geq \frac{1}{0,65 \cdot 11} \cdot \left( \frac{2090}{28,12} + \frac{342,9}{6} + \frac{16,31}{0,25 \cdot 6 \cdot 0,9} \right) \geq 2,0 \text{ см}^2,$$

По таблице 5.4 выбираем 6 болтов M16, диаметром  $d = 16$  см для выбранных размеров для фланца.

Коэффициенты продольного изгиба  $\varphi$  для центрально-сжатых стальных стержней:

Гибкость $\lambda$	Коэффициент $\varphi$					
	Расчётное сопротивление элементов $R$ , МПа					
	230	240	325	345	365	385
10	0,987	0,987	0,984	0,983	0,983	0,982
20	0,963	0,962	0,954	0,953	0,951	0,950
30	0,933	0,931	0,916	0,913	0,910	0,908
40	0,897	0,894	0,871	0,867	0,862	0,859
50	0,856	0,852	0,820	0,813	0,807	0,802
60	0,810	0,805	0,764	0,755	0,745	0,735
70	0,761	0,754	0,683	0,666	0,650	0,638
80	0,698	0,686	0,557	0,579	0,561	0,569
90	0,624	0,612	0,517	0,498	0,479	0,465
100	0,556	0,542	0,443	0,423	0,403	0,388
110	0,492	0,498	0,375	0,352	0,334	0,321
120	0,433	0,419	0,316	0,299	0,283	0,273
130	0,364	0,348	0,272	0,257	0,244	0,234
140	0,328	0,315	0,236	0,223	0,212	0,204
150	0,287	0,276	0,208	0,196	0,186	0,180
160	0,254	0,244	0,184	0,174	0,165	0,159
170	0,227	0,218	0,165	0,156	0,148	0,143
180	0,204	0,196	0,148	0,140	0,133	0,128
190	0,184	0,177	0,134	0,127	0,121	0,116
200	0,168	0,161	0,122	0,116	0,110	0,106

Приложение 2

Трубы стальные бесшовные горячекатаные по ГОСТ 8732-80

Диаметр $D_n$ мм	Толщина $t$ мм	Площ. сечен. $A$ см <sup>2</sup>	Радиус инерции $i$ мм	Масса кг/м	Диаметр $D_n$ мм	Толщина $t$ мм	Площ. сечен. $A$ см <sup>2</sup>	Радиус инерции $i$ мм	Масса кг/м
45	4	5,15	1,45	4,05	121	4	14,71	4,14	11,54
	5	6,28	1,42	4,93		5	18,23	4,11	14,30
50	4	5,78	1,64	4,54		6	21,67	4,07	17,02
	4,5	6,43	1,62	5,05		7	25,07	4,04	19,68
	5	7,07	1,60	5,55		8	28,40	4,01	22,29
	5,5	7,69	1,59	6,04		10	34,36	3,95	27,37
54	4	6,28	1,78	4,93		12	41,10	3,89	32,36
	5	7,69	1,74	6,04		14	47,05	3,82	36,94
	6	9,05	1,71	7,10		16	52,79	3,76	41,48
	7	10,33	1,68	8,11		17	55,58	3,73	43,60
	8	11,56	1,65	9,08		18	58,23	3,70	45,72
	9	12,72	1,63	9,99		20	63,48	3,65	49,82
	10	13,83	1,59	10,85		22	68,41	3,59	53,71
	11	14,85	1,57	14,85		25	75,36	3,51	59,19
57	4	6,66	1,88	5,23	127	28	81,88	3,44	64,22
	5	8,17	1,85	6,41		5	19,17	4,33	15,04
	6	9,62	1,82	7,55		6	22,81	4,29	17,90
	7	10,99	1,79	8,63		7	26,39	4,26	20,72
	8	12,32	1,76	9,67		8	29,91	4,22	23,43
	9	13,57	1,73	10,65		9	33,36	4,19	26,19
	10	14,76	1,68	10,65		10	36,75	4,15	28,85
	11	15,90	1,67	12,46		11	40,07	4,12	31,47
60	4	7,04	1,99	5,52		12	43,38	4,10	34,03
	5	8,64	1,96	6,78		14	49,71	4,03	39,01
	6	10,18	1,92	7,99		16	55,79	3,97	43,80
	7	11,65	1,89	9,15		17	58,74	3,94	46,12
	8	13,07	1,86	10,26		18	61,62	3,91	48,39
	9	14,42	1,83	11,32		20	67,27	3,85	52,78
	10	15,72	1,81	12,33	22	72,59	3,80	56,97	
	11	16,94	1,78	13,29	25	80,10	3,72	62,89	
	12	18,10	1,75	14,21	28	87,14	3,65	68,36	
	14	20,24	1,70	15,88	30	91,45	3,59	71,76	
68	4	8,04	1,99	5,52	133	8	31,42	4,44	24,66
	5	9,89	1,96	6,78		10	38,65	4,37	30,33
						14	52,35	4,24	41,00

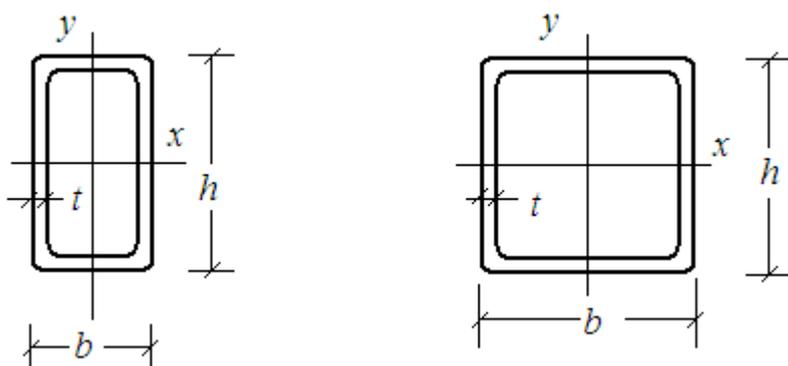
68	6	11,69	1,92	7,99	133	18	65,06	4,12	51,65	
	7	13,41	1,89	9,15		22	76,76	4,01	60,22	
	8	15,07	1,86	10,26		25	84,82	3,93	66,59	
	9	16,69	1,83	11,32		30	97,02	3,80	76,20	
	10	18,22	1,81	12,33		32	101,48	3,75	79,71	
	11	19,69	1,78	13,29		140	6	25,26	4,75	19,83
	12	21,12	1,75	14,21			8	33,81	4,68	26,04
14	23,75	1,98	18,64	10	40,84		4,62	32,06		
16	26,15	1,93	20,52	11	44,56		4,58	34,99		
70	6	12,06	2,28	9,47	12		48,24	4,55	37,88	
	8	15,59	2,21	12,23	14		55,42	4,49	43,50	
	10	18,85	2,15	14,80	16		62,35	4,43	48,93	
	12	21,88	2,10	17,16	17	65,72	4,40	51,57		
73	4	8,67	2,45	6,81	18	68,96	4,36	54,16		
	5	10,69	2,41	8,38	20	75,39	4,31	59,19		
	6	12,63	2,38	9,91	22	81,57	4,25	64,02		
	8	16,33	2,32	12,82	25	90,27	4,16	70,90		
	10	19,79	2,26	15,54	28	95,83	4,11	77,34		
	12	23,01	2,20	18,05	30	103,7	4,04	81,38		
	14	23,01	2,15	20,37	32	106,5	3,99	85,23		
16	28,66	2,10	22,49	36	117,5	3,90	92,23			
83	4	9,92	2,82	7,79	146	6	26,39	4,96	20,72	
	5	12,26	2,77	9,62		8	34,68	4,89	27,23	
	6	14,52	2,74	11,39		9	38,72	4,86	30,41	
	7	16,72	2,70	13,12		10	42,75	4,83	33,54	
	8	18,86	2,67	14,80		11	46,67	4,80	36,62	
	9	20,93	2,64	16,42		12	50,63	4,76	39,96	
	10	22,95	2,61	18,00		14	58,05	4,70	45,57	
	11	24,87	2,51	19,53		16	65,32	4,64	51,30	
	12	26,75	2,55	21,01		17	68,93	4,61	54,08	
89	4	10,68	3,01	8,38	18	72,41	4,57	56,82		
	5	13,20	2,98	10,36	20	79,17	4,52	62,15		
	6	15,65	2,95	12,28	22	85,87	4,46	64,28		
	8	20,36	2,88	15,98	25	95,06	4,37	74,68		
	10	24,83	2,82	19,48	30	109,8	4,24	85,82		
	12	29,02	2,76	22,79	36	124,3	4,09	97,66		
	14	33,00	2,70	25,89	152	6	27,39	5,18	21,72	
	16	36,68	2,65	28,80		8	36,68	5,11	28,23	
	18	40,16	2,59	31,52		9	40,72	5,07	31,41	
20	43,34	2,54	34,03	10		44,75	5,00	35,54		
95	4	11,44	3,23	8,98		11	48,67	5,01	38,62	
	5	14,43	3,19	11,10	12	52,63	4,97	41,96		

95	6	16,78	3,16	13,17	152	14	60,05	4,91	47,57	
	7	19,35	3,12	15,19		16	68,32	4,85	53,30	
	8	21,87	3,09	17,16		18	75,93	4,79	59,08	
	9	24,31	3,06	19,09		20	82,41	4,72	65,82	
	10	26,71	3,03	20,96		25	99,17	4,58	78,15	
	12	31,30	2,97	24,56		30	115,0	4,46	90,28	
	14	35,62	2,91	27,97		32	120,7	4,40	94,68	
	16	39,73	2,86	31,17		36	131,2	4,30	103,0	
	17	41,66	2,83	32,70		159	8	37,96	5,35	29,79
	18	43,57	2,80	34,18			9	42,39	5,31	33,29
20	47,10	2,75	36,99	10	46,80		5,29	36,75		
22	50,43	2,70	39,61	11	51,15		5,26	40,15		
102	4	12,32	3,49	9,98	12	55,45	5,22	43,50		
	5	15,24	3,44	11,96	14	63,78	5,16	50,06		
102	6	18,09	3,41	14,21	16	77,05	5,09	56,43		
	7	20,88	3,37	16,40	17	75,83	5,06	59,53		
	8	23,64	3,34	18,55	18	79,75	5,03	62,59		
	9	26,30	3,31	20,64	20	87,32	4,97	68,56		
	10	28,91	3,28	22,69	22	94,73	4,91	74,33		
	11	31,44	3,24	24,69	25	105,3	4,82	86,62		
	12	33,92	3,21	26,63	28	115,3	4,75	90,46		
	14	38,72	3,16	30,38	30	121,5	4,68	95,44		
	16	43,22	3,09	33,93	32	127,7	4,64	100,2		
	17	45,38	3,07	35,64	36	139,2	4,54	109,2		
	18	47,53	3,04	37,29	168	8	40,20	5,67	31,57	
	20	51,53	2,99	40,44		10	49,61	5,60	38,97	
	22	55,27	2,94	43,40		11	54,28	5,57	42,59	
	108	4	13,07	3,69		10,26	12	58,84	5,54	46,17
5		16,19	3,56	12,70	14	67,76	5,48	53,17		
6		19,22	3,62	15,09	16	76,42	5,41	59,98		
7		22,21	3,58	17,44	17	80,66	5,38	63,31		
8		25,14	3,55	19,73	18	84,84	5,35	66,50		
9		28,00	3,52	21,97	20	93,00	5,29	73,00		
10		30,77	3,49	24,17	22	100,3	5,23	79,56		
11		33,52	3,46	26,31	25	112,29	5,14	88,16		
12		36,20	3,43	28,41	30	129,99	5,00	102,1		
14		41,33	3,36	32,45	36	149,94	4,85	117,2		
16		46,25	3,31	36,30	40	160,87	4,75	126,3		
17		48,62	3,28	38,15	45	173,85	4,64	136,5		
18		50,87	3,25	39,95	194	6	35,43	6,66	27,82	
20		55,31	3,19	43,40		7	41,13	6,62	31,28	
22	59,42	3,14	46,66							

108	25	65,23	3,07	51,17	194	8	46,76	6,58	36,70
	28	70,40	3,00	55,24		9	52,33	6,56	41,06
114	4	13,82	3,89	10,85	10	57,78	6,52	45,38	
	5	17,12	3,86	13,44	11	63,22	6,48	49,64	
	6	20,35	3,83	15,95	12	68,60	6,46	53,86	
	7	23,54	3,80	18,47	14	97,18	6,39	62,15	
	8	26,65	3,77	20,91	16	89,52	6,33	70,24	
	9	29,69	3,73	23,31	17	94,49	6,29	74,21	
	10	32,66	3,77	25,65	18	99,50	6,26	78,13	
	11	35,61	3,67	27,94	20	109,3	6,20	85,28	
	12	38,46	3,64	30,19	25	132,7	6,04	104,2	
	14	43,33	3,57	34,53	30	154,5	5,90	121,3	
	16	49,26	3,52	38,67					
	20	59,09	3,40	46,36					
22	63,58	3,35	49,91						

### Приложение 3

Профили гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций Гост 30245 - 2003



h мм	b мм	t мм	A см <sup>2</sup>	Справочные величины для осей						масса 1м, кг
				x - x			y - y			
				$I_x$ см <sup>4</sup>	$W_x$ см <sup>3</sup>	$i_x$ см	$I_y$ см <sup>4</sup>	$W_y$ см <sup>3</sup>	$i_y$ см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50	25	2,0	2,74	8,38	3,35	1,75	2,80	2,24	1,01	2,15
		2,5	3,34	9,88	3,95	1,72	3,27	2,61	0,99	2,62
		3,0	3,91	11,17	4,47	1,69	3,65	2,92	0,97	3,07
		3,5	4,44	12,24	4,90	1,66	3,96	3,16	0,94	3,49
		4,0	4,95	13,12	5,25	1,63	4,19	3,35	0,92	3,88

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50	30	2,0	2,94	9,53	3,81	1,80	4,29	2,86	1,21	2,31
		2,5	3,59	11,29	4,52	1,77	5,04	3,36	1,19	2,82
		3,0	4,21	12,82	5,13	1,75	5,68	3,79	1,16	3,30
		3,5	4,79	14,13	5,65	1,72	6,22	4,15	1,14	3,76
		4,0	5,35	15,24	6,09	1,69	6,66	4,44	1,12	4,20
		5,0	6,36	16,85	6,74	1,63	7,26	4,84	1,07	4,99
50	40	2,0	3,34	11,84	4,73	1,88	8,38	4,19	1,58	2,62
		2,5	4,09	14,11	5,65	1,86	9,97	4,98	1,56	3,21
		3,0	4,81	16,14	6,45	1,83	11,36	5,68	1,54	3,77
		3,5	5,49	17,92	7,17	1,81	12,59	6,29	1,51	4,31
		4,0	6,15	19,47	7,79	1,78	13,64	6,82	1,49	4,83
		4,5	6,77	20,80	8,32	1,75	14,54	7,27	1,47	5,31
5,0	7,36	21,91	8,77	1,73	15,28	7,64	1,44	5,77		
60	30	2,0	3,74	18,41	6,14	2,22	9,82	4,91	1,62	2,93
		2,5	4,09	17,93	5,98	2,09	5,99	3,99	1,21	3,21
		3,0	4,81	20,49	6,83	2,06	6,78	4,52	1,19	3,77
		3,5	5,49	22,74	7,58	2,03	7,45	4,97	1,16	4,31
		4,0	6,15	24,69	8,23	2,00	8,01	5,34	1,14	4,83
		4,5	6,77	26,34	8,78	1,97	8,47	5,64	1,12	5,31
		5,0	7,36	27,72	9,24	1,94	8,83	5,88	1,10	5,77
		5,5	7,91	28,84	9,61	1,91	9,10	6,06	1,07	6,21
6,0	8,43	29,69	9,90	1,88	9,28	6,19	1,05	6,62		
60	40	2,0	3,74	18,41	6,14	2,22	9,82	4,91	1,62	2,93
		2,5	4,59	22,06	7,35	2,19	11,72	5,86	1,60	3,60
		3,0	5,41	25,37	8,46	2,17	13,42	6,71	1,58	4,25
		3,5	6,19	28,33	9,44	2,14	14,92	7,46	1,55	4,86
		4,0	6,95	30,96	10,32	2,11	16,23	8,12	1,53	5,45
		4,5	7,67	33,28	11,09	2,08	17,37	8,69	1,51	6,02
		5,0	8,36	35,29	11,76	2,05	18,34	9,17	1,48	6,56
		5,5	9,01	37,00	12,33	2,03	19,16	9,58	1,46	7,07
6,0	9,63	38,44	12,81	2,00	19,82	9,91	1,43	7,56		
70	50	2,0	4,54	31,47	8,99	2,63	18,75	7,50	2,03	3,56
		2,5	5,59	38,00	10,86	2,61	22,57	9,03	2,01	4,39
		3,0	6,61	44,03	12,58	2,58	26,08	10,43	1,99	5,19
		3,5	7,59	49,57	14,16	2,55	29,27	11,71	1,96	5,96
		4,0	8,55	54,64	15,61	2,53	32,16	12,87	1,94	6,71
		4,5	9,47	59,24	16,93	2,50	34,77	13,91	1,92	7,43
		5,0	10,36	63,40	18,11	2,47	37,10	14,84	1,89	8,13
		5,5	11,21	67,12	19,18	2,45	39,17	15,67	1,87	8,80
6,0	12,03	70,43	20,12	2,42	40,98	16,39	1,85	9,45		
80	40	2,0	4,54	37,35	9,34	2,87	12,71	6,36	1,67	3,56
		2,5	5,59	45,10	11,27	2,84	15,24	7,62	1,65	4,39
		3,0	6,61	52,24	13,06	2,81	17,52	8,76	1,63	5,19
		3,5	7,59	58,79	14,70	2,78	19,58	9,79	1,61	5,96
		4,0	8,55	64,77	16,19	2,75	21,42	10,71	1,58	6,71

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
80	40	4,5	9,47	70,19	17,55	2,72	23,04	11,52	1,56	7,43
		5,0	10,36	75,07	18,77	2,69	24,47	12,23	1,54	8,13
		5,5	11,21	79,42	19,86	2,66	25,70	12,85	1,51	8,80
		6,0	12,03	83,26	20,82	2,63	26,75	13,38	1,49	9,45
80	60	2,0	5,34	49,52	12,38	3,05	34,35	11,45	2,54	4,19
		2,5	6,59	60,11	15,03	3,02	42,42	14,14	2,54	5,17
		3,0	7,81	70,02	17,51	2,99	44,86	14,95	2,40	6,13
		3,5	8,99	79,27	19,82	2,97	50,67	16,89	2,37	7,06
		4,0	10,15	87,87	21,97	2,94	56,05	18,68	2,35	7,97
		4,5	11,27	95,84	23,96	2,92	61,00	20,33	2,33	8,85
		5,0	12,36	103,2	25,80	2,89	65,54	21,85	2,30	9,70
		5,5	13,41	109,9	27,49	2,86	69,68	23,23	2,28	10,53
		6,0	14,43	116,1	29,03	2,84	73,43	24,48	2,26	11,33
		6,5	15,06	115,9	28,98	2,77	73,58	24,53	2,21	11,82
7,0	15,96	120,1	30,01	2,74	76,10	25,37	2,18	12,53		
80	70	3,0	8,41	78,92	19,73	3,06	64,23	18,35	2,76	6,60
		3,5	9,69	89,51	22,38	3,04	72,79	20,80	2,74	7,61
		4,0	10,95	99,42	24,86	3,01	80,77	23,08	2,72	8,59
		4,5	12,17	108,7	27,17	2,99	88,20	25,20	2,69	9,55
		5,0	13,36	117,3	29,31	2,96	95,09	27,17	2,67	10,48
		5,5	14,51	125,2	31,30	2,94	101,5	28,98	2,64	11,39
		6,0	15,63	132,5	33,14	2,91	107,3	30,66	2,62	12,27
		6,5	16,36	133,5	33,37	2,86	108,2	30,92	2,57	12,84
7,0	17,36	138,7	34,68	2,83	112,4	32,11	2,54	13,63		
90	50	3,0	7,81	81,83	18,19	3,24	32,70	13,08	2,05	6,13
		3,5	8,99	92,63	20,59	3,21	36,84	14,74	2,02	7,06
		4,0	10,15	102,7	22,82	3,18	40,63	16,25	2,00	7,97
		4,5	11,27	112,0	24,88	3,15	44,09	17,63	1,98	8,85
		5,0	12,36	120,5	26,79	3,12	47,23	18,89	1,95	9,70
		5,5	13,41	128,4	28,53	3,09	50,06	20,02	1,93	10,53
		6,0	14,43	135,6	30,13	3,06	52,59	21,04	1,91	11,33
		6,5	15,06	134,7	29,93	2,99	52,62	21,05	1,87	11,82
7,0	15,96	139,4	30,97	2,96	54,27	21,71	1,84	12,53		
90	60	3,0	8,41	93,19	20,71	3,33	49,73	16,58	2,43	6,60
		3,5	9,69	105,7	23,50	3,30	56,26	18,75	2,41	7,61
		4,0	10,95	117,5	26,10	3,28	62,32	20,77	2,39	8,59
		4,5	12,17	128,4	28,54	3,25	67,93	22,64	2,36	9,55
		5,0	13,36	138,6	30,80	3,22	73,10	24,37	2,34	10,48
		5,5	14,51	148,0	32,90	3,19	77,84	25,95	2,32	11,39
		6,0	15,63	156,7	34,83	3,17	82,18	27,39	2,29	12,27
		7,0	17,36	163,5	36,33	3,07	85,93	28,64	2,23	13,63
100	40	3,0	7,81	92,33	18,47	3,44	21,63	10,82	1,66	6,13
		3,5	8,99	104,4	20,89	3,41	24,24	12,12	1,64	7,06
		4,0	10,15	115,7	23,13	3,38	26,60	13,30	1,62	7,97
		4,5	11,27	126,0	25,21	3,34	28,71	14,36	1,60	8,85

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
100	40	5,0	12,36	135,6	27,11	3,31	30,59	15,30	1,57	9,70
		5,5	13,41	144,3	28,85	3,28	32,25	16,12	1,55	10,53
		6,0	14,43	152,2	30,43	3,25	33,69	16,85	1,53	11,33
		6,5	15,06	150,1	30,03	3,16	33,54	16,77	1,49	11,82
		7,0	15,96	155,0	31,01	3,12	34,39	17,19	1,47	12,53
100	50	3,0	8,41	106,4	21,29	3,56	36,02	14,41	2,07	6,60
		3,5	9,69	120,7	24,15	3,53	40,62	16,25	2,05	7,61
		4,0	10,95	134,1	26,82	3,50	44,86	17,94	2,02	8,59
		4,5	12,17	146,6	29,31	3,47	48,74	19,50	2,00	9,55
		5,0	13,36	158,1	31,62	3,44	52,29	20,92	1,98	10,48
		5,5	14,51	168,8	33,76	3,41	55,50	22,20	1,96	11,39
		6,0	15,63	178,7	35,73	3,38	58,40	23,36	1,93	12,27
		6,5	16,36	178,6	35,71	3,30	58,77	23,51	1,90	12,84
		7,0	17,36	185,3	37,06	3,27	60,74	24,29	1.87	13,63
100	60	3,0	9,01	120,6	24,11	3,66	54,61	18,20	2,46	7,07
		3,5	10,39	137,0	27,41	3,63	61,85	20,62	2,44	8,16
		4,0	11,75	152,5	30,51	3,60	68,59	22,86	2,42	9,22
		4,5	13,07	167,1	33,42	3,58	74,86	24,95	2,39	10,26
		5,0	14,36	180,7	36,14	3,55	80,66	26,89	2,37	11,27
		5,5	15,61	193,4	38,68	3,52	86,01	28,67	2,35	12,25
		6,0	16,83	205,2	41,03	3,49	90,93	30,31	2,32	13,21
		6,5	17,66	207,0	41,39	3,42	92,18	30,73	2,28	13,86
		7,0	18,76	215,6	43,12	3,39	95,77	31,92	2,26	14,72
120	40	3,0	9,01	148,0	24,67	4,05	25,74	12,87	1,69	7,07
		3,5	10,39	168,1	28,01	4,02	28,91	14,45	1,67	8,16
		4,0	11,75	186,9	31,14	3,99	31,79	15,89	1,64	9,22
		4,5	13,07	204,4	34,07	3,96	34,38	17,19	1,62	10,26
		5,0	14,36	220,8	36,79	3,92	36,72	18,36	1,60	11,27
		5,5	15,61	235,9	39,32	3,89	38,79	19,40	1,58	12,25
		6,0	16,83	249,9	41,65	3,85	40,63	20,31	1,55	13,21
		6,5	17,66	249,6	41,60	3,76	40,84	20,42	1,52	13,86
		7,0	18,76	259,2	43,21	3,72	42,01	21,00	1,50	14,72
120	60	3,0	10,21	189,1	31,52	4,30	64,35	21,45	2,51	8,01
		3,5	11,79	215,6	35,93	4,28	73,02	24,34	2,49	9,26
		4,0	13,35	240,7	40,12	4,25	81,14	27,05	2,47	10,48
		4,5	14,87	264,5	44,08	4,22	88,72	29,57	2,44	11,67
		5,0	16,36	286,9	47,82	4,19	95,79	31,93	2,42	12,84
		5,5	17,81	308,0	51,34	4,16	102,3	34,12	2,40	13,98
		6,0	19,23	327,9	54,65	4,13	108,4	36,14	2,37	15,10
		6,5	20,26	333,3	55,56	4,06	110,8	36,93	2,34	15,90
		7,0	21,56	348,6	58,10	4,02	115,4	38,48	2,31	16,92
120	80	3,0	11,41	230,2	38,36	4,49	123,4	30,85	3,29	8,96
		3,5	13,19	263,1	43,85	4,47	140,7	35,18	3,27	10,36
		4,0	14,95	294,5	49,09	4,44	157,2	39,30	3,24	11,73
		4,5	16,67	324,5	54,08	4,41	172,8	43,20	3,22	13,08

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
120	80	5,0	18,36	353,0	58,84	4,39	187,6	46,89	3,20	14,41
		5,5	20,01	380,1	63,36	4,36	201,5	50,38	3,17	15,71
		6,0	21,63	405,9	67,64	4,33	214,7	53,67	3,15	16,98
		6,5	22,86	417,1	69,51	4,27	221,3	55,31	3,11	17,94
		7,0	24,36	438,0	73,00	4,24	232,0	57,99	3,09	19,12
140	60	3,0	11,41	278,1	39,72	4,94	74,10	24,70	2,55	8,96
		3,5	13,19	317,7	45,39	4,91	84,19	28,06	2,53	10,36
		4,0	14,95	355,5	50,79	4,88	93,68	31,23	2,50	11,73
		4,5	16,67	391,6	55,94	4,85	102,6	34,19	2,48	13,08
		5,0	18,36	425,8	60,83	4,82	110,9	36,97	2,46	14,41
		5,5	20,01	458,3	65,47	4,79	118,7	39,56	2,44	15,71
		6,0	21,63	489,1	69,87	4,75	125,9	41,97	2,41	16,98
		6,5	22,86	500,2	71,46	4,68	129,4	43,13	2,38	17,94
		7,0	24,36	524,8	74,97	4,64	135,1	45,03	2,36	19,12
140	100	4,0	18,15	503,5	71,93	5,27	300,0	60,00	4,07	14,25
		4,5	20,27	556,8	79,54	5,24	331,2	66,25	4,04	15,91
		5,0	22,36	608,1	86,87	5,22	361,2	72,24	4,02	17,55
		5,5	24,41	657,3	93,90	5,19	389,8	77,97	4,00	19,16
		6,0	26,43	704,5	100,6	5,16	417,2	83,45	3,97	20,75
		6,5	28,06	731,9	104,6	5,11	434,3	86,85	3,93	22,03
		7,0	29,96	772,4	110,3	5,08	457,8	91,55	3,91	23,52
140	120	4,0	19,75	577,5	82,50	5,41	456,0	76,00	4,81	15,50
		4,5	22,07	639,4	91,35	5,38	504,6	84,10	4,78	17,32
		5,0	24,36	699,2	99,88	5,36	551,4	91,90	4,76	19,12
		5,5	26,61	756,8	108,1	5,33	596,5	99,41	4,73	20,89
		6,0	28,83	812,3	116,0	5,31	639,8	106,6	4,71	22,63
		6,5	30,66	847,8	121,1	5,26	668,3	111,4	4,67	24,07
		7,0	32,76	896,3	128,0	5,23	706,2	117,7	4,64	25,71
		7,5	34,82	942,5	134,6	5,20	742,2	123,7	4,62	27,33
		8,0	36,84	986,5	140,9	5,17	776,5	129,4	4,59	28,92
150	100	4,0	18,95	594,5	79,27	5,60	318,4	63,68	4,10	14,87
		4,5	21,17	657,9	87,72	5,58	351,8	70,35	4,08	16,62
		5,0	23,36	719,0	95,87	5,55	383,7	76,75	4,05	18,33
		5,5	25,51	777,9	103,7	5,52	414,4	82,88	4,03	20,03
		6,0	27,63	834,4	111,3	5,50	443,7	88,75	4,01	21,69
		6,5	29,36	868,2	115,8	5,44	462,7	92,54	3,97	23,05
		7,0	31,36	917,1	122,3	5,41	488,0	97,61	3,95	24,62
160	40	3,0	11,41	315,9	39,49	5,26	33,95	16,98	1,73	8,96
		3,5	13,19	360,5	45,07	5,23	38,23	19,12	1,70	10,36
		4,0	14,95	403,0	50,37	5,19	42,15	21,08	1,68	11,73
		4,5	16,67	443,2	55,40	5,16	45,73	22,86	1,66	13,08
		5,0	18,36	481,3	60,16	5,12	48,97	24,48	1,63	14,41
		5,5	20,01	517,3	64,66	5,08	51,89	25,94	1,61	15,71
		6,0	21,63	551,2	68,90	5,05	54,50	27,25	1,59	16,98
		6,5	22,86	559,7	69,96	4,95	55,43	27,71	1,56	17,94
		7,0	24,36	585,8	73,22	4,90	57,26	28,63	1,53	19,12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
160	80	4,0	18,15	597,6	74,71	5,74	203,4	50,85	3,35	14,25
		4,5	20,27	660,8	82,60	5,71	224,1	56,02	3,33	15,91
		5,0	22,36	721,6	90,20	5,68	243,8	60,95	3,30	17,55
		5,5	24,41	779,9	97,48	5,65	262,6	65,64	3,28	19,16
		6,0	26,43	835,8	104,5	5,62	280,4	70,10	3,26	20,75
		6,5	28,06	866,0	108,3	5,56	291,5	72,87	3,22	22,03
		7,0	29,96	913,5	114,2	5,52	306,6	76,64	3,20	23,52
		7,5	31,82	958,0	120,1	5,48	321,7	80,41	3,18	25,01
160	100	4,0	19,75	695,0	86,87	5,93	336,9	67,37	4,13	15,50
		4,5	22,07	769,6	96,21	5,91	372,3	74,46	4,11	17,32
		5,0	24,36	841,7	105,2	5,88	406,3	81,26	4,08	19,12
		5,5	26,61	911,2	113,9	5,85	439,0	87,79	4,06	20,89
		6,0	28,83	978,1	122,3	5,82	470,2	94,05	4,04	22,63
		6,5	30,66	1019	127,4	5,77	491,1	98,22	4,00	24,07
		7,0	32,76	1077	134,7	5,73	518,3	103,7	3,98	25,71
		7,5	34,82	1133	141,6	5,70	544,1	108,8	3,95	27,33
8,0	36,84	1186	148,2	5,67	568,6	113,7	3,93	28,92		
160	120	4,0	21,35	792,3	99,04	6,09	509,8	84,97	4,89	16,76
		4,5	23,87	878,5	109,8	6,07	564,6	94,10	4,86	18,74
		5,0	26,36	961,8	120,2	6,04	617,5	102,9	4,84	20,69
		5,5	28,81	1042	130,3	6,02	668,6	111,4	4,82	22,62
		6,0	31,23	1120	140,0	5,99	717,8	119,6	4,79	24,52
		6,5	33,26	1172	146,5	5,94	752,0	125,3	4,76	26,11
		7,0	35,56	1241	155,2	5,91	795,5	132,6	4,73	27,91
		7,5	37,82	1307	163,4	5,88	837,2	139,5	4,70	29,69
8,0	40,04	1371	171,3	5,85	876,9	146,1	4,68	31,43		
160	140	5,0	28,36	1082	135,2	6,18	881,4	125,9	5,58	22,26
		5,5	31,01	1174	146,7	6,15	955,8	136,5	5,55	24,34
		6,0	33,63	1263	157,8	6,13	1028	146,8	5,53	26,40
		6,5	35,86	1325	165,7	6,08	1079	154,2	5,49	28,15
		7,0	38,36	1405	175,6	6,05	1144	163,4	5,46	30,11
		7,5	40,82	1482	185,2	6,02	1206	172,3	5,44	32,04
		8,0	43,24	1555	194,4	6,00	1265	180,8	5,41	33,95
		8,5	45,61	1625	203,1	5,97	1322	188,9	5,38	35,81
180	60	4,0	18,15	678,1	75,3	6,11	118,8	39,6	2,56	14,25
		4,5	20,27	749,4	83,3	6,08	130,3	43,4	2,54	15,91
		5,0	22,36	817,8	90,9	6,05	141,2	47,1	2,51	17,55
		5,5	24,41	883,3	98,1	6,02	151,4	50,5	2,49	19,16
		6,0	26,43	946,0	105,1	5,98	160,9	53,6	2,47	20,75
		6,5	28,06	976,4	108,5	5,90	166,6	55,5	2,44	22,03
		7,0	29,96	1029	114,3	5,86	174,4	58,1	2,41	23,52
		7,5	31,82	1078	119,8	5,82	181,6	60,5	2,39	24,98
8,0	33,64	1125	125,0	5,78	188,2	62,7	2,37	26,41		
180	80	4,0	19,75	802,0	89,12	6,37	226,5	56,62	3,39	15,50
		4,5	22,07	888,0	98,67	6,34	249,7	62,44	3,36	17,32
		5,0	24,36	970,9	107,9	6,31	271,9	67,99	3,34	19,12
		5,5	26,61	1051	116,8	6,28	293,1	73,28	3,32	20,89
		6,0	28,83	1128	125,3	6,25	313,3	78,31	3,30	22,63
		6,5	30,66	1172	130,2	6,18	326,6	81,65	3,26	24,07

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
180	80	7,0	32,76	1238	137,6	6,15	343,9	85,97	3,24	25,71
		7,5	34,82	1301	144,6	6,11	360,1	90,03	3,22	27,33
		8,0	36,84	1361	151,3	6,08	375,4	93,85	3,19	28,92
180	100	4,0	21,35	926,1	102,9	6,59	373,7	74,74	4,18	16,76
		4,5	23,87	1027	114,1	6,56	413,3	82,67	4,16	18,74
		5,0	26,36	1124	124,9	6,53	451,4	90,29	4,14	20,69
		5,5	28,81	1218	135,4	6,50	488,1	97,61	4,12	22,62
		6,0	31,23	1309	145,5	6,47	523,3	104,7	4,09	24,52
		6,5	33,26	1368	152,0	6,41	547,9	109,6	4,06	26,11
		7,0	35,56	1448	160,9	6,38	578,8	115,8	4,03	27,91
		7,5	37,82	1525	169,4	6,35	608,3	121,7	4,01	29,69
		8,0	40,04	1598	177,6	6,32	636,3	127,3	3,99	31,43
180	140	4,0	24,55	1174	130,42	6,91	799,5	114,2	5,71	19,27
		4,5	27,47	1304	144,87	6,89	887,3	126,8	5,68	21,56
		5,0	30,36	1430	158,92	6,86	972,6	138,9	5,66	23,83
		5,5	33,21	1553	172,58	6,84	1055	150,7	5,64	26,07
		6,0	36,03	1673	185,85	6,81	1135	162,2	5,61	28,29
		6,5	38,46	1759	195,45	6,76	1195	170,8	5,57	30,19
		7,0	41,16	1867	207,43	6,73	1268	181,1	5,55	32,31
		7,5	43,82	1971	218,99	6,71	1338	191,1	5,52	34,40
8,0	46,44	2071	230,15	6,68	1405	200,8	5,50	36,46		
200	40	4,0	18,15	738,6	73,86	6,38	52,52	26,26	1,70	14,25
		4,5	20,27	815,3	81,53	6,34	57,07	28,53	1,68	15,91
		5,0	22,36	888,7	88,87	6,30	61,22	30,61	1,65	17,55
		5,5	24,41	958,8	95,88	6,27	64,98	32,49	1,63	19,16
		6,0	26,43	1026	102,6	6,23	68,37	34,19	1,61	20,75
		6,5	28,06	1053	105,3	6,13	70,02	35,01	1,58	22,03
		7,0	29,96	1107	110,7	6,08	72,50	36,25	1,56	23,52
200	80	4,0	21,35	1046	104,6	7,00	249,6	62,40	3,42	16,76
		4,5	23,87	1159	115,9	6,97	275,4	68,85	3,40	18,74
		5,0	26,36	1269	126,9	6,94	300,1	75,02	3,37	20,69
		5,5	28,81	1375	137,5	6,91	323,6	80,91	3,35	22,62
		6,0	31,23	1477	147,7	6,88	346,1	86,53	3,33	24,52
		6,5	33,26	1539	153,9	6,80	361,7	90,43	3,30	26,11
		7,0	35,56	1629	162,9	6,77	381,2	95,29	3,27	27,91
		7,5	37,82	1714	171,4	6,73	399,6	99,89	3,25	29,69
8,0	40,04	1795	179,5	6,70	416,9	104,2	3,23	31,43		
200	100	4,0	22,95	1200	120,0	7,23	410,6	82,12	4,23	18,01
		4,5	25,67	1331	133,1	7,20	454,4	90,87	4,21	20,15
		5,0	28,36	1459	145,9	7,17	496,6	99,31	4,18	22,26
		5,5	31,01	1583	158,3	7,14	537,2	107,4	4,16	24,34
		6,0	33,63	1703	170,3	7,12	576,3	115,3	4,14	26,40
		6,5	35,86	1783	178,3	7,05	604,7	120,9	4,11	28,15
		7,0	38,36	1889	188,9	7,02	639,4	127,9	4,08	30,11
		7,5	40,82	1992	199,2	6,99	672,5	134,5	4,06	32,04
		8,0	43,24	2090	209,0	6,95	704,0	140,8	4,03	33,95

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
200	120	4,0	24,55	1353	135,3	7,42	617,5	102,9	5,02	19,27
		4,5	27,47	1503	150,3	7,40	684,7	114,1	4,99	21,56
		5,0	30,36	1649	164,9	7,37	749,8	125,0	4,97	23,83
		5,5	33,21	1791	179,1	7,34	812,8	135,5	4,95	26,07
		6,0	36,03	1929	192,9	7,32	873,7	145,6	4,92	28,29
		6,5	38,46	2026	202,6	7,26	919,5	153,2	4,89	30,19
		7,0	41,16	2150	215,0	7,23	974,3	162,4	4,87	32,31
		7,5	43,82	2270	227,0	7,20	1027	171,2	4,84	34,40
		8,0	46,44	2385	238,5	7,17	1078	179,6	4,82	36,46
200	160	5,0	34,36	2029	202,9	7,69	1442	180,3	6,48	26,97
		5,5	37,61	2207	220,7	7,66	1568	195,9	6,46	29,52
		6,0	40,83	2380	238,0	7,64	1690	211,2	6,43	32,05
		6,5	43,66	2513	251,3	7,59	1785	223,1	6,39	34,27
		7,0	46,76	2672	267,2	7,56	1897	237,1	6,37	36,70
		7,5	49,82	2826	282,6	7,53	2005	250,6	6,34	39,11
		8,0	52,84	2975	297,5	7,50	2110	263,7	6,32	41,48
		8,5	55,83	3120	312,0	7,48	2211	276,4	6,29	43,83
		9,0	58,78	3260	326,0	7,45	2309	288,7	6,27	46,14
		9,5	61,69	3395	339,5	7,42	2404	300,5	6,24	48,43
		10	64,57	3527	352,7	7,39	2496	312,0	6,22	50,68
220	100	4,0	24,55	1519	138,1	7,87	447,4	89,49	4,27	19,27
		4,5	27,47	1687	153,4	7,84	495,4	99,08	4,25	21,56
		5,0	30,36	1851	168,3	7,81	541,7	108,3	4,22	23,83
		5,5	33,21	2010	182,7	7,78	586,3	117,3	4,20	26,07
		6,0	36,03	2164	196,7	7,75	629,3	125,9	4,18	28,29
		6,5	38,46	2270	206,3	7,68	661,6	132,3	4,15	30,19
		7,0	41,16	2408	218,9	7,65	699,9	134	4,12	32,31
		7,5	43,82	2541	231,0	7,61	736,6	147,3	4,10	34,40
		8,0	46,44	2669	242,7	7,58	771,7	154,3	4,08	36,46
220	140	5,0	34,36	2313	210,3	8,21	1155	165,0	5,80	26,97
		5,5	37,61	2516	228,7	8,18	1254	179,2	5,77	29,52
		6,0	40,83	2714	246,7	8,15	1351	193,0	5,75	32,05
		6,5	43,66	2862	260,2	8,10	1427	203,7	5,72	34,27
		7,0	46,76	3043	276,6	8,07	1515	216,5	5,69	36,70
		7,5	49,82	3218	292,6	8,04	1601	228,7	5,67	39,11
		8,0	52,84	3388	308,0	8,01	1683	240,5	5,64	41,48
240	120	5,0	34,36	2579	215,0	8,66	882	147,0	5,07	26,97
		5,5	37,61	2805	233,8	8,64	957	159,5	5,04	29,52
		6,0	40,83	3026	252,1	8,61	1030	171,6	5,02	32,05
		6,5	43,66	3188	265,6	8,54	1087	181,2	4,99	34,27
		7,0	46,76	3388	282,4	8,51	1153	192,2	4,97	36,70
		7,5	49,82	3583	298,6	8,48	1217	202,8	4,94	39,11
		8,0	52,84	3771	314,3	8,45	1278	213,1	4,92	41,48
240	160	6,0	45,63	3683	306,9	8,98	1974	246,8	6,58	35,82
		6,5	48,86	3896	324,7	8,93	2091	261,4	6,54	38,35
		7,0	52,36	4148	345,7	8,90	2224	278,1	6,52	41,10
		7,5	55,82	4394	366,2	8,87	2354	294,2	6,49	43,82

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
240	160	7,5	55,82	4394	366,2	8,87	2354	294,2	6,49	43,82
		8,0	59,24	4633	386,1	8,84	2480	309,9	6,47	46,51
		8,5	62,63	4865	405,4	8,81	2602	325,2	6,45	49,16
		9,0	65,98	5091	424,2	8,78	2720	340,0	6,42	51,79
		9,5	69,29	5311	442,5	8,75	2835	354,3	6,40	54,39
		10,0	72,57	5524	460,3	8,72	2946	368,2	6,37	56,96
		10,5	74,86	5590	465,8	8,64	2990	373,8	6,32	58,76
		11,0	77,97	5777	481,4	8,61	3088	386,1	6,29	61,20
		11,5	81,03	5957	496,4	8,57	3183	397,8	6,27	63,61
		12,0	84,06	6130	510,9	8,54	3273	409,2	6,24	65,99
250	150	6,0	45,63	3885	310,8	9,23	1768	235,7	6,22	35,82
		6,5	48,86	4109	328,7	9,17	1872	249,6	6,19	38,35
		7,0	52,36	4375	350,0	9,14	1991	265,4	6,17	41,10
		7,5	55,82	4633	370,7	9,11	2106	280,8	6,14	43,82
		8,0	59,24	4885	390,8	9,08	2217	295,7	6,12	46,51
260	130	6,0	44,43	3888	299,0	9,35	1326	204,0	5,46	34,88
		6,5	47,56	4106	315,8	9,29	1403	215,8	5,43	37,33
		7,0	50,96	4369	336,1	9,26	1490	229,2	5,41	40,00
		7,5	54,32	4625	355,8	9,23	1574	242,2	5,38	42,64
		8,0	57,64	4874	374,9	9,20	1656	254,8	5,36	45,25
		8,5	60,93	5116	393,5	9,16	1735	266,9	5,34	47,83
		9,0	64,18	5350	411,6	9,13	1811	278,6	5,31	50,38
		9,5	67,39	5578	429,1	9,10	1885	290,0	5,29	52,90
		10,0	70,57	5799	446,0	9,06	1956	300,9	5,26	55,39
		10,5	72,76	5848	449,8	8,96	1982	305,0	5,22	57,12
		11,0	75,77	6038	464,5	8,93	2044	314,5	5,19	59,48
		11,5	78,73	6221	478,6	8,89	2103	323,6	5,17	61,81
12,0	81,66	6397	492,1	8,85	2160	332,3	5,14	64,10		
300	100	6,0	45,63	4777	318,4	10,23	841,4	168,3	4,29	35,82
		6,5	48,86	5038	335,9	10,15	888,9	177,8	4,27	38,35
		7,0	52,36	5360	357,3	10,12	942,1	188,4	4,24	41,10
		7,5	55,82	5673	378,2	10,08	993,3	198,7	4,22	43,82
		8,0	59,24	5977	398,5	10,04	1043	208,5	4,20	46,51
		8,5	62,63	6273	418,2	10,01	1090	218,0	4,17	49,16
		9,0	65,98	6559	437,3	9,97	1135	227,0	4,15	51,79
		9,5	69,29	6836	455,8	9,93	1179	235,7	4,12	54,39
		10,0	72,57	7105	473,7	9,90	1220	244,0	4,10	56,96
		300	200	6,0	57,63	7370	491,3	11,31	3961	396,1
6,5	61,86			7838	522,5	11,26	4217	421,7	8,26	48,56
7,0	66,36			8365	557,7	11,23	4497	449,7	8,23	52,09
7,5	70,82			8882	592,1	11,20	4771	477,1	8,21	55,59
8,0	75,24			9388	625,9	11,17	5039	503,9	8,18	59,07
8,5	79,63			9884	658,9	11,14	5302	530,2	8,16	62,51
9,0	83,98			10370	691,3	11,11	5558	555,8	8,14	65,92
9,5	88,29			10845	723,0	11,08	5809	580,9	8,11	69,31
10,0	92,57			11310	754,0	11,05	6054	605,4	8,09	72,66
10,5	95,86			11547	769,8	10,98	6195	619,5	8,04	75,25
11,0	99,97			11970	798,0	10,94	6418	641,8	8,01	78,47

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
300	200	11,5	104,0	12383	825,5	10,91	6636	663,6	7,99	81,67
		12,0	108,1	12784	852,3	10,88	6847	684,7	7,96	84,83
320	180	6,0	57,63	8012	500,8	11,79	3308	367,5	7,58	45,24
		6,5	61,86	8517	532,3	11,73	3520	391,1	7,54	48,56
		7,0	66,36	9089	568,1	11,70	3752	416,9	7,52	52,09
		7,5	70,82	9650	603,1	11,67	3979	442,2	7,50	55,59
		8,0	75,24	10200	637,5	11,64	4201	466,8	7,47	59,07
		8,5	79,63	10738	671,1	11,61	4418	490,9	7,45	62,51
		9,0	83,98	11265	704,0	11,58	4630	514,4	7,42	65,92
		9,5	88,29	11780	736,3	11,55	4836	537,4	7,40	69,31
		10,0	92,57	12285	767,8	11,52	5038	559,7	7,38	72,66
		10,5	95,86	12530	783,1	11,43	5155	572,7	7,33	75,25
		11,0	99,97	12988	811,7	11,40	5338	593,1	7,31	78,47
		11,5	104,0	13434	839,6	11,36	5517	613,0	7,28	81,67
		12,0	108,1	13867	866,7	11,33	5690	632,2	7,26	84,83
350	250	6,0	69,63	12456	711,8	13,37	7457	596,6	10,35	54,66
		6,5	74,86	13293	759,6	13,33	7963	637,0	10,31	58,76
		7,0	80,36	14210	812,0	13,30	8508	680,6	10,29	63,08
		7,5	85,82	15112	863,5	13,27	9044	723,5	10,27	67,37
		8,0	91,24	15999	914,3	13,24	9570	765,6	10,24	71,63
		8,5	96,63	16872	964,1	13,21	10087	807,0	10,22	75,85
		9,0	102,0	17731	1013	13,19	10595	847,6	10,19	80,05
		9,5	107,3	18575	1061	13,16	11094	887,5	10,17	84,22
		10,0	112,6	19404	1109	13,13	11583	926,7	10,14	88,36
		10,5	116,9	19923	1138	13,06	11912	952,9	10,10	91,73
		11,0	122,0	20694	1183	13,03	12368	989,5	10,07	95,74
		11,5	127,0	21451	1226	12,99	12815	1025	10,04	99,72
		12,0	132,1	22191	1268	12,96	13253	1060	10,02	103,7
350	300	6,0	75,63	14232	813,2	13,72	11259	750,6	12,20	59,37
		6,5	81,36	15210	869,2	13,67	12037	802,5	12,16	63,87
		7,0	87,36	16269	929,6	13,65	12872	858,1	12,14	68,58
		7,5	93,32	17312	989,2	13,62	13694	912,9	12,11	73,26
		8,0	99,24	18339	1048	13,59	14504	966,9	12,09	77,91
		8,5	105,1	19351	1106	13,57	15301	1020	12,06	82,53
		9,0	111,0	20347	1163	13,54	16086	1072	12,04	87,12
		9,5	116,8	21328	1219	13,51	16858	1124	12,01	91,68
		10,0	122,6	22294	1274	13,49	17618	1175	11,99	96,21
		10,5	127,4	22948	1311	13,42	18147	1210	11,94	99,98
		11,0	133,0	23855	1363	13,39	18861	1257	11,91	104,4
		11,5	138,5	24745	1414	13,36	19561	1304	11,88	108,7
		12,0	144,1	25619	1464	13,34	20249	1350	11,86	113,1

## Приложение 4. ЕСКД. Основные надписи первого, второго и последующих листов пояснительной записки и чертежей.

Основная надпись первого листа пояснительной записки:

					КБ - 200.00.00.000 РПЗ			15
8 x 5 = 40	Изм	Лист	№ Докум	Дата	Подп	Лит.	Лист	Листов
	Разраб.	Комов К.К					1	25
	Провер.	Иванов К.В				СПбГАСУ		
	Н.контр.					Каф. ... гр....		
	Утв.							
						15	20	50
185								

Основная надпись второго листа пояснительной записки:

					КБ - 200.00.00.000 РПЗ			Лист	15
5 x 5 = 5	Изм	Лист	№ Докум	Дата	Подп				
185									

Основная надпись последующих листов пояснительной записки:

							Лист	7	15
								8	
185									

Основная надпись на чертеже:

					КБ - 200.01.00.000. СБ			5	5	5	17	18	15
11 x 5 = 55	Изм	Лист	№ Докум	Дата	Подп	Лит.	Масса	Масштаб					
	Разраб.	Комов К.К											
	Провер.	Иванов К.В											
	Т.контр.					Лист 1	Листов 1						
	Н.контр.					СПбГАСУ							
Утв.					Каф. ... гр....								
						20	50						
185													