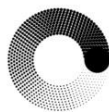


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Агафонов Александр Викторович  
Должность: директор филиала  
Дата подписания: 17.06.2025 11:53:35  
Уникальный программный ключ:  
2539477a8ecf706dc9cff164bc411eb6d3c4ab06

"МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
Чебоксарский институт (филиал)



**МОСКОВСКИЙ  
ПОЛИТЕХ**

Чебоксарский институт

Кафедра строительного производства

## МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

Методические указания для выполнения курсового проекта по дисциплине «Металлические конструкции, включая сварку» для направления подготовки 08.03.01 «Строительство» и специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», студентами очной формы обучения.

Чебоксары 2025

**Металлические конструкции:** Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Металлические конструкции, включая сварку» / Сост. Петрова И.В., Гоник Е.Г.- Чебоксары: ЧИ (Ф) МПУ, 2025 69 с.

Методические указания соответствуют государственным образовательным стандартам специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» по специализации «Строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений».

Цель данных методических указаний – углубить знания студентов по теме «Проектирование стального каркаса одноэтажного промышленного здания» и оказать им помощь при выполнении курсового проекта.

Методические указания предназначены для студентов дневной формы обучения.

## Оглавление

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Введение.....</b>                                            | <b>5</b>  |
| <b>2. Компоновка конструктивной схемы каркаса.....</b>             | <b>6</b>  |
| <b>3. Расчет поперечной рамы каркаса.</b>                          |           |
| <b>Сбор нагрузок.....</b>                                          | <b>10</b> |
| 3.1. Нагрузки на поперечную раму.....                              | 10        |
| 3.1.1. Постоянная нагрузка.....                                    | 11        |
| 3.1.2. Снеговая нагрузка.....                                      | 12        |
| 3.1.3. Вертикальные усилия от мостовых кранов.....                 | 13        |
| 3.1.4. Горизонтальные усилия от мостовых кранов.....               | 14        |
| 3.1.5. Ветровая нагрузка.....                                      | 14        |
| <b>4. Статический расчёт рамы и определение расчетных усилий..</b> | <b>16</b> |
| 4.1. Статический расчет рамы.....                                  | 16        |
| 4.2. Статический расчет рамы с помощью ЭВМ.....                    | 22        |
| 4.2.1. Статический расчёт рамы на постоянную нагрузку.....         | 22        |
| 4.2.2. Статический расчёт рамы на снеговую нагрузку.....           | 23        |
| 4.2.3. Статический расчёт рамы на вертикальное давление кранов..   | 24        |
| 4.2.4. Статический расчёт рамы на горизонтальное давление          |           |
| кранов.....                                                        | 25        |
| 4.2.5. Статический расчёт рамы на действие ветра.....              | 26        |
| <b>5. Конструирование и расчёт ступенчатой колонны.....</b>        | <b>31</b> |
| 5.1. Определение расчётных длин участков колонн.....               | 31        |
| 5.2. Конструирование и расчёт верхней части колонны.....           | 32        |
| 5.3. Компоновка сечения.....                                       | 33        |
| 5.4. Геометрические характеристики сечения.....                    | 33        |
| 5.5. Конструирование и расчет сечения нижней части колонн.....     | 36        |
| 5.6. Проверка устойчивости колонны в плоскости действия момента    |           |
| как единственного стержня.....                                     | 41        |
| 5.7. Конструирование и расчёт узла сопряжения верхней и нижней     |           |
| частей колонны.....                                                | 42        |
| 5.8. Расчёт и конструирование базы колонны.....                    | 47        |
| 5.9. База наружной ветви.....                                      | 47        |
| 5.10. Расчёт анкерных болтов.....                                  | 51        |
| <b>6. Конструирование и расчёт сквозного сечения ригеля..</b>      | <b>52</b> |
| 6.1. Статический расчет фермы с помощью ЭВМ.....                   | 53        |
| 6.1.1. Статический расчёт рамы на постоянную нагрузку.....         | 54        |
| 6.1.2. Статический расчёт рамы на снеговую нагрузку.....           | 55        |
| 6.1.3. Усилия в стержнях фермы от опорных моментов М1 и М2....     | 56        |
| 6.1.4. Усилия в стержнях фермы от опорных моментов М3 и М4.....    | 57        |
| 6.1.5. Усилия в стержнях фермы от распоров Н1 – Н2 и Н3 –Н4.....   | 58        |
| 6.1.6. Расчёт сварных швов.....                                    | 63        |
| 6.2. Подбор сечений стержней фермы.....                            | 64        |

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| 6.3. Расчёт узлов фермы.....                          | 65        |
| 6.3.1. Нижний опорный узел.....                       | 65        |
| 6.3.2. Верхний узел сопряжения ригеля с колонной..... | 67        |
| <b>Библиографический список.....</b>                  | <b>69</b> |

## 1. Введение

Цели курсового проекта по металлическим конструкциям:

- приобретение навыков в решении основных вопросов проектирования стального каркаса одноэтажного производственного здания;
- освоить методику компоновки производственного здания;
- определить нагрузки на несущие элементы каркаса здания;
- определить расчётные сочетания нагрузок и расчётные усилия в несущих элементах каркаса;
- произвести расчёт и конструирование колонны производственного здания и её узлов;
- произвести расчёт и конструирование стропильной фермы и её узлов.

## 2. Компоновка конструктивной схемы каркаса

Запроектировать стальной каркас одноэтажного, однопролётного сборочного цеха машиностроительного завода.

*Исходные данные:*

- 1.1. Снеговой район – 5.
- 1.2. Ветровой район – 4.
- 1.3. Параметры крана.
  - 1.3.1. Грузоподъемность – 100 тонн.
  - 1.3.2. Режим – средний.
- 1.4. Пролет  $L = 30$  м.
- 1.5. Шаг  $b = 10$  м.
- 1.6. Отметка головки кранового рельса  $H = 10$  м.
- 1.7. Длина здания  $S = 110$  м.
- 1.8. Ферма.
  - 1.8.1. Пояс – тавр.
  - 1.8.2. Решетка – уголок.
- 1.9. Режим помещения – теплый.

### *1. Конструкция ферм*

Стропильные фермы трапецидальные с уклоном верхнего пояса  $i = 0,015$ , высотой на опоре  $h_{\Phi} = 3150$  мм. Определим высоту посередине  $h_{cp}$ :

$$h_{cp} = h_{\Phi} + i \cdot L/2 = 3150 + 0,015 \cdot 15000 = 3375 \text{ мм.}$$

Состав покрытия приводится в табл. 1.

### *2. Определим вертикальные размеры поперечной рамы (рис. 1) [1].*

Для крана грузоподъемностью  $Q = 100$  т. (средний режим работы):

$H_{кр} = 4000 \text{ мм}$ ;  $B = 400 \text{ мм}$ ; тип рельса КР-120;  $h_p = 170 \text{ мм}$  (по приложению 1[3]).

$$H_2 \geq (H_{\kappa} + 100) + f = 4000 + 100 + 400 = 4500 \text{ мм, где}$$

$H_k$  – по приложению 1 [1]. Принимаем  $H_2 = 4600 \text{ мм}$ , кратно 200 мм.

*Высота колонны от пола до низа ригеля:*

$$H_0 = H_1 + H_2 = 10000 + 4600 = 14600 \text{ мм}, \text{ где}$$

$H_1 = 10000 \text{ мм}$  – отметка головки кранового рельса.

Принимаем  $H_0 = 16200 \text{ мм}$  кратное 1800 мм.

*Надкрановая часть колонны:*

$$H_B = (h_b + h_p) + H_2 = 1600 + 170 + 4600 = 6370 \text{ мм}, \text{ где}$$

$(h_b + h_p)$  – находим по приложению 1 [3].

*Подкрановая часть колонны:*

Заглубление базы ниже уровня пола принимаем 1000 мм.

$$H_H = H_0 - H_B + 1000 \text{ мм} = 16200 - 6370 + 1000 = 10830 \text{ мм}.$$

*Полная высота колонны:*

$$H = H_H + H_B = 10830 + 6370 = 17200 \text{ мм}.$$

3. Определим горизонтальные размеры поперечной рамы (рис. 1):

Для здания среднего режима работы не предусматривается специальный проход в теле колонны или рядом с колонной, поэтому принимаем привязку разбивочной оси к наружной грани колонны  $a = 250 \text{ мм}$ , высоту сечения верхней части колонны  $h_g = 750 \text{ мм}$ , но не менее  $(H_b/12 = 6170/12 = 514,167 \text{ мм})$ .

$$L_1 \geq B_1 + (h_b - a) + 75 = 400 + 750 - 250 + 75 = 975 \text{ мм}.$$

Назначаем  $L_1 = 1000 \text{ мм}$  (кратно 250 мм).

$$h_k = a + L_1 = 250 + 1000 = 1250 \text{ мм}.$$

Из условия жёсткости  $h_n/15 = 14450/15 = 963 \text{ мм}$ .

Принимаем  $h_n = 1250 \text{ мм}$ .

Пролёт мостового крана  $l_k = L - 2 \cdot L_1 = 30000 - 2 \cdot 1000 = 28000 \text{ мм}$ .

8



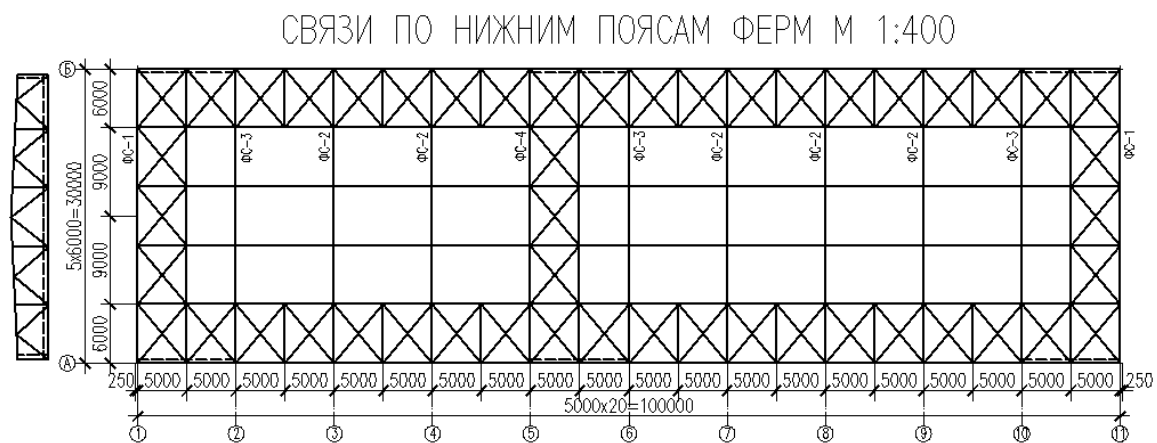
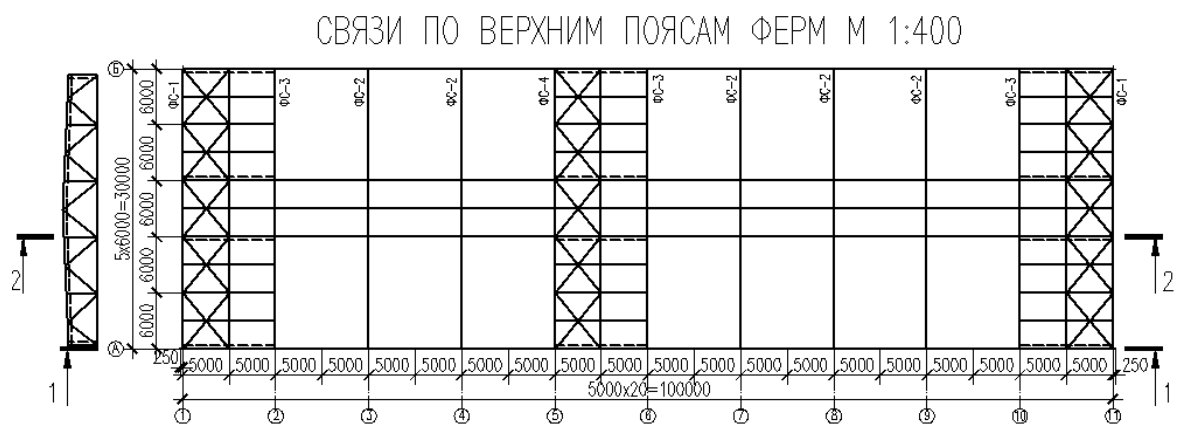


Рис. 2. Схема системы связей

### 3. Расчёт поперечной рамы каркаса. Сбор нагрузок

В соответствии с конструктивной схемой (рис. 1) принимаем расчётную схему (рис. 4).

В качестве расчетной принимаем схему рамы с жестким сопряжением ригеля с колоннами и с жестким сопряжением колонны с фундаментом, т. е. схему жесткой рамы без шарниров.

Соотношение моментов инерции принимаем в соответствии с рекомендациями ([1], стр. 287)  $I_H/I_b = 5; I_p/I_k = 4$ ; тогда относительные величины  $I_H = 1; I_b = 0,2; I_p = 4$ .

Эксцентриситете смещения осей верхней и нижней части колонны:

$$e_1 = 0,5 \cdot (h_n - h_g) = 0,5 \cdot (1250 - 750) = 250 \text{ мм}.$$

Эксцентриситете давления крана:

$$e_2 = 0,5 \cdot h_n = 0,5 \cdot 1250 = 625 \text{ мм}.$$

Эксцентриситете опорного узла стропильной фермы:

$$e_3 = 0,5 \cdot h_g = 0,5 \cdot 750 = 375 \text{ мм}.$$

#### 3.1. Нагрузки на поперечную раму

Все нагрузки подсчитываются с учётом коэффициента надёжности по назначению  $\gamma_n = 0,95$  стр. 34 [1].

##### Постоянная нагрузка от покрытия.

Таблица 1

| № | Состав покрытия                                                          | Нормативная, кПа |      | Расчётная, кПа |
|---|--------------------------------------------------------------------------|------------------|------|----------------|
| 1 | Стальной профильный настил $t=0,8$ мм                                    | 0,10             | 1,05 | 0,11           |
| 2 | Утеплитель минерал-ные плиты 40 мм, $\gamma = 3 \text{ кН} / \text{м}^2$ | 0,12             | 1,03 | 0,127          |
| 3 | Стальной профильный настил $t=0,8$ мм                                    | 0,10             | 1,05 | 0,11           |
| 4 | Прогоны пролетом 10 м                                                    | 0,09             | 1,05 | 0,097          |

|   |                                                 |             |      |              |
|---|-------------------------------------------------|-------------|------|--------------|
| 5 | Собственный вес металлических конструкций шатра | 0,30        | 1,05 | 0,32         |
| 6 | Связи по покрытию                               | 0,04        | 1,05 | 0,044        |
|   | <b>Итого:</b>                                   | <b>0,75</b> |      | <b>0,808</b> |

### 3.1.1. Постоянная нагрузка

Нагрузка на  $1 \text{ м}^2$  кровли подсчитана в табл. 1.

Расчётная равномерно распределённая линейная нагрузка на ригель рамы:

$$q_n = \gamma_n \cdot q_{kp} \cdot b / \cos \alpha = 0,95 \cdot 0,808 \cdot 10 / 1 = 7,676 \text{ кН/м}, \text{ где:}$$

$q_{kp}$  – равномерно распределённая нагрузка на  $1 \text{ м}^2$  покрытия, принимая из табл. 1;

$b$  – шаг ферм, равный шагу поперечных ферм;

$\cos \alpha$  – косинус угла наклона плоскости кровли к горизонтали.

Опорная реакция ригеля рамы:

$$F_R = q_n \cdot L / 2 = 7,676 \cdot 30 / 2 = 115,14 \text{ кН.}$$

Расчётный вес верхней части колонны 20 % веса всей колонны, равен:

$$G_B = 0,2 \cdot \gamma_n \cdot \gamma_f \cdot g_0 \cdot B \cdot L / 2 = 0,2 \cdot 0,95 \cdot 1,05 \cdot 0,5 \cdot 10 \cdot 30 / 2 = 14,963 \text{ кН}$$

Нижняя часть колонны составляет 80 % веса всей колонны:

$$G_H = 0,8 \cdot \gamma_n \cdot \gamma_f \cdot g_0 \cdot B \cdot L / 2 = 0,8 \cdot 0,95 \cdot 1,05 \cdot 0,5 \cdot 10 \cdot 30 / 2 = 59,85 \text{ кН}, \text{ где}$$

$\gamma_f$  – коэффициент надёжности по нагрузкам [2];

$g_0$  – нормативная нагрузка, принимаемая по табл. 12.1 [3];

$L$  – пролёт поперечной рамы.

Поверхностная масса стен  $m_1 = 2 \text{ кН/м}^2$ , переплётов с остеклением  $m_p = 0,35 \text{ кН/м}^2$ .

Вес стен и верхней части колонны F1:

$$F_1 = \gamma_n \cdot [1,2 \cdot m_1 \cdot (h_{CT1} - h_p) + 1,1 \cdot m_p \cdot h_p] \cdot B, \text{ где}$$

$$h_{CT1} = H_B + h_\Phi + h_n = 6,37 + 3,15 + 0,6 = 10,12 \text{ м};$$

$h_p = 1,2 \text{ м}$  – ширина полосы остекления;

$h_n = 0,6 \text{ м}$  – выступ стены парапета.

$$F_1 = 0,95 \cdot [1,2 \cdot 2 \cdot (10,12 - 1,2) + 1,1 \cdot 1,2 \cdot 0,35] \cdot 10 = 207,765 \text{ кН}.$$

В нижней части колонны ширина остекления  $h_p = 3,8 \text{ м}$ , а общая высота стены  $h_{CT2} = 9,83 \text{ м}$ .

$$F_2 = 0,95 \cdot [1,2 \cdot 2 \cdot (9,83 - 3,8) + 1,1 \cdot 0,35 \cdot 4,8] \cdot 10 = 155,04 \text{ кН}.$$

Изгибающий момент от смещения оси:

$$M = -(F_R + F_1) \times e_0 = -(115,14 + 207,765) \times 0,25 = -80,726 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

### 3.1.2. Снеговая нагрузка

В соответствии с [2] расчетная снеговая нагрузка для 5 снегового района строительства  $S_q = 320 \text{ кг} / \text{м}^2 = 3,2 \text{ кН} / \text{м}^2$ .

Линейная распределённая нагрузка от снега на ригель рамы по формуле:

$$q_{CH} = \gamma_n \cdot \mu \cdot S_q \cdot B = 0,95 \cdot 1 \cdot 3,2 \cdot 10 = 30,4 \text{ кН/м}, \text{ где}$$

$\mu = 1$  – коэффициент перехода от нагрузки на земле к нагрузке на  $1 \text{ м}^2$  проекции кровли, при уклоне  $\alpha \leq 25^\circ$ ,  $\mu = 1$ .

Опорная реакция ригеля рамы:

$$F_{CH} = q_{CH} \times L/2 = 30,4 \times 30/2 = 456 \text{ кН}.$$

Изгибающий момент от смещения оси:

$$M = -F_{CH} \times e_0 = -456 \times 0,25 = -114 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

### 3.1.3. Вертикальные усилия от мостовых кранов

Характеристики крана грузоподъемностью 100 т (приложение 1 [3]):

$H=4000$  мм,  $B=9350$  мм,  $F_1 = 469$  кН,  $F_2 = 489$  кН.

Максимальное давление кранов на колонну:

$$D_{\max} = \gamma_n \cdot (\gamma_f \cdot \psi \cdot (\sum F_{K\max} \cdot y_i) + \gamma_f \cdot G_n + \gamma_f \cdot g_H \cdot b_T \cdot B)$$

$$D_{\max} = 0,95 \cdot (1,1 \cdot 0,85 \cdot 479 \cdot 4,26 + 1,05 \cdot 150 + 1,05 \cdot 1,5 \cdot 0,75 \cdot 10) = 2186,593 \text{ кН}, \text{ где}$$

$$G_H = g_{нб}^H \cdot b \cdot L/2 = 0,6 \cdot 10 \cdot 30/2 = 150;$$

$$g_{нб}^H - \text{по табл. 12.1 [3];}$$

$\gamma_f, \psi$  – коэффициенты надежности по нагрузке и сочетания; принимаемые 1,1 и 0,85 для двух кранов с режимом работы 6 к в соответствии с [2]:

$y_i$  – ординаты линии влияния (рис. 3);

$g_H$  – полезная нормативная нагрузка на тормозной площадке;

$b_T$  – ширина тормозной площадки;

$$F_{\max} = (F_1 + F_2) / 2 = (469 + 489) / 2 = 479 \text{ кН}$$

Минимальное давление колеса крана определяем по формуле 12.6 [3].

$$F_{K\min} = (9,8 \cdot Q_i + G_{KT}) / n_0 - F_{\max} = (9,8 \cdot 100 + 1401) / 4 - 479 = 116,25 \text{ кН}, \text{ где}$$

$G_{KT}$  – вес крана с тележкой;

$Q_i$  – грузоподъемность крана;

$n_0$  – число колёс с одной стороны крана.

Минимальное давление крана на колонну  $D_{\min}$  вычисляется аналогично формуле для  $D_{\max}$ .

$$D_{\min} = \gamma_n \cdot (\gamma_f \cdot \psi \cdot (\sum F_{K\min} \cdot \gamma_i) + \gamma_f \cdot G + \gamma_f \cdot g_T \cdot b_T \cdot B)$$

$$D_{\min} = 0,95 \cdot (1,1 \cdot 0,85 \cdot 116,25 \cdot 4,26 + 1,05 \cdot 150 + 1,05 \cdot 1,5 \cdot 0,75 \cdot 10) = 686,823 \text{ кН}$$

Сосредоточенные моменты  $M_{\max}$  и  $M_{\min}$  от вертикальных усилий вычисляем по формулам 12.7 [3].

$$M_{\max} = D_{\max} \cdot e_K ;$$

$$M_{\min} = D_{\min} \cdot e_K , \text{ где}$$

$$e_K = 0,5 \cdot h_H = 0,5 \cdot 1,0 = 0,5 \text{ м} ;$$

$$M_{\max} = 2186,593 \cdot 0,5 = 1093,297 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\min} = 686,823 \cdot 0,5 = 343,411 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

### 3.1.4. Горизонтальные усилия от мостовых кранов

Горизонтальная сила от мостовых кранов, приходящейся на одно колесо с одной стороны крана, формула 12.4 [3]:

$$T_K^H = 0,05 \cdot (9,8 \cdot Q + G_T) / n_0 = 0,05 \cdot (9,8 \cdot 100 + 363) / 4 = 16,788 \text{ кН}.$$

Горизонтальное давление крана на поперечную раму Т (формула 12.8 [3]):

$$T = \gamma_n \cdot \gamma_f \cdot \psi \cdot \sum T_K^H \cdot \gamma = 0,95 \cdot 1,1 \cdot 0,85 \cdot 16,788 \cdot 4,26 = 70,998 \text{ кН}.$$

Считаем точку приложения силы Т на уровне головки рельса подкрановой балки.

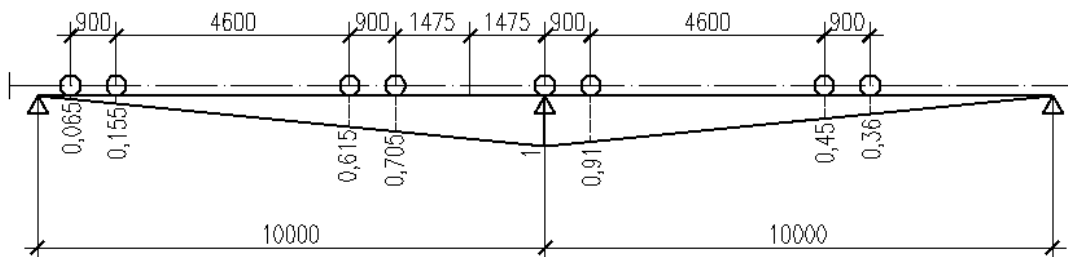


Рис. 3. Линии влияния давления кранов

### 3.1.5. Ветровая нагрузка

Нормативный скоростной напор ветра смотрим в [2]  $g_0 = 0,48 \text{ кН} / \text{м}^2$ .

Тип местности – второй из предложенных в приложении 3 [2]: городские территории, лесные массивы и подобные местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м.

Поправочные коэффициенты  $k$  на возрастание давления ветра по высоте будут следующими: 5 м – 0,5; 10 м – 0,65; 20 м – 0,85; 40 м – 1,1.

По формуле 12.10 [3]:

$$g_g = \gamma_n \cdot \gamma_f \cdot g_0 \cdot k \cdot c \cdot b = 0,95 \cdot 1,4 \cdot 0,48 \cdot k \cdot 0,8 \cdot 10 = 5,107 \cdot k$$

Линейная распределённая нагрузка при высоте:

$$\text{До 5 м: } 5,107 \cdot 0,5 = 2,554 \text{ кН / м}$$

$$\text{До 10 м: } 5,107 \cdot 0,65 = 3,320 \text{ кН / м}$$

$$\text{До 20 м: } 5,107 \cdot 0,85 = 4,341 \text{ кН / м}$$

$$\text{До 40 м: } 5,107 \cdot 1,1 = 5,618 \text{ кН / м}$$

Сосредоточенные силы от ветровой нагрузки – формула 12.12 [3]:

$$W_b = (q_1 + q_2) \cdot h / 2;$$

$$W'_b = 0,6/0,8 \cdot F_b, \text{ где}$$

$g_1$  и  $g_2$  – величины ветровой нагрузки, соответствующие высотам:

$H_2$  – отметка верха парапета;

$H_1$  – отметка нижнего пояса ферм:

$$H_2 = H_0 + h_{\Phi} + h_n = 16,2 + 3,15 + 0,6 = 19,95 \text{ м},$$

$$H_1 = H_0 = 16,2 \text{ м};$$

$$q_1 = (19,95 - 20) / 20 \cdot (q_{b40} - q_{b20}) + q_{b20} = 0,0025 \cdot (5,618 - 4,341) + 4,341 = 4,338 \text{ кН / м};$$

$$q_2 = (16,2 - 10) / 10 \cdot (q_{b20} - q_{b10}) + q_{b10} = 0,62 \cdot (4,341 - 3,320) + 3,320 = 3,953 \text{ кН / м};$$

$$q_s = q_{b10} \cdot \alpha = 3,32 \cdot 1,1 = 3,652 \text{ кН / м};$$

$$q'_s = q_s \cdot 0,6/0,8 = 3,652 \cdot 0,6/0,8 = 2,739 \text{ кН / м}.$$

Таким образом, получаем:

$$W_b = (4,338 + 3,953) \cdot (3,15 + 0,6) / 2 = 15,546 \text{ кН};$$

$$W'_b = 0,6/0,8 \cdot 15,546 = 11,660 \text{ кН}.$$

## 4. Статический расчёт рамы и определение расчётных усилий

### 4.1. Статический расчёт рамы

Статический расчет рамы можно выполнить на персональном компьютере. Для этого необходимо подготовить данные для конкретной рамы и ввести их в ЭВМ. Принятая расчетная схема, показанная на рис. 4, представляет собой жесткую раму без шарниров.

Учёт пространственной работы осуществляется введением реактивного отпора  $R_M$  при действии  $D_{\max}$  и  $D_{\min}$ , а также реактивного отпора  $R_T$ , при расчете на горизонтальную тормозную силу.

$$R_M = r_{1p} \times (1 - \alpha_{np}); R_T = r'_{1p} \times (1 - \alpha'_{np}), \text{ где}$$

$r_{1p}$  – реакция дополнительной связи в основной системе рамы от крановых моментов;

$r'_{1p}$  – реакция дополнительной связи в основной системе рамы от поперечного торможения кранов.

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\alpha'$  для блока из семи рам с одноступенчатыми колоннами:

Таблица 2

|           |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta$   | 0,00  | 0,01 | 0,02  | 0,03  | 0,04  | 0,05  | 0,1   | 0,15  | 0,2   | 0,5   |
| $\alpha$  | 0,86  | 0,77 | 0,73  | 0,71  | 0,69  | 0,67  | 0,62  | 0,58  | 0,56  | 0,46  |
| $\alpha'$ | -0,14 | -0,2 | -0,22 | -0,24 | -0,25 | -0,25 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,25 |

Коэффициенты  $k'_e$  для определения реакции в ступенчатой стойке с защемлёнными стойками от смещения опоры:

Таблица 3

|                           |       |      |       |      |
|---------------------------|-------|------|-------|------|
| $\alpha_1 \backslash n_1$ | 0,10  | 0,15 | 0,20  | 1,00 |
| 0,20                      | 5,203 | 5,82 | 6,365 | 12,0 |
| 0,25                      | 5,195 | 5,8  | 6,315 |      |
| 0,30                      | 5,182 | 5,77 | 6,283 |      |
| 0,35                      | 5,11  | 5,73 | 6,263 |      |
| 0,4                       | 4,956 | 5,67 | 6,248 |      |



Выражения коэффициентов в формулах принимаем по табл. 12.3 [3].

$$r_{1p} = 6 \times (M_{\max} - M_{\min}) \times l \times \frac{(b - a \cdot s)}{H \cdot k};$$

$$r'_{1p} = T \times l^2 \times \frac{(3 \cdot b - 2 \cdot a \cdot p)}{k}.$$

По формуле 12.20 [3] вычислим:

$$\alpha_{np} = 1 - \alpha - \alpha' \times \left( \frac{n_o}{\sum y_i} - 1 \right), \text{ где}$$

$n_0=8$  – число колёс с одной стороны кранов на одной нитке подкрановых балок;

$\sum y_i=4,260$  – сумма ординат линии влияния реакции рассматриваемой рамы (рис. 3).

Коэффициенты упругого отпора  $\alpha$  и  $\alpha'$  можно определить по табл. 2 или табл. 12.2 [3] в зависимости от параметра  $\beta$ :

По формуле 12.15 [3]:

$$\beta = \sum J_n \times d \times \frac{B^3}{H^3 \times J_n}, \text{ где}$$

$B$  – шаг поперечных рам;

$H$  – высота колонн;

$\sum J_n$  – сумма моментов инерции нижних частей колонн;

$$J_{\Pi} = J_{\text{св}} + J_{\text{кр}};$$

$J_{\text{св}}$  – момент инерции продольных связей по нижним поясам стропильных ферм;

$J_{\text{кр}}$  – эквивалентный момент инерции кровли;

$d$  – коэффициент приведения ступенчатой колонны к эквивалентной по смещению колонне постоянного сечения.

При жёстком сопряжении ригеля с колонной:

$$d = \frac{k'_e}{12} \quad (k'_e - \text{коэффициент при определении опорной реакции от}$$

смещения стойки см. табл. 3 или табл. 12.4 [3].

Принимаем  $\sum J_H/J_H=1/4$ .

$$n_1 = J_B/J_H = 0,2;$$

$$\alpha_1 = H_B/H = 6,37/17,2 = 0,37 \quad (H_B = 6,37 \text{ м}; H = 17,2 \text{ м}).$$

Для жёсткой рамы коэффициент  $d = k'_e/12$ , где  $k'_e = 6,257$  из табл. 3 или табл. 12.4 [3].

$$d = 6,257/12 = 0,521;$$

$$\beta = \sum J_n \times d \times \frac{B^3}{H^3 \times J_n} = (1 \cdot 0,521 \cdot 10^3 / ((17,2)^3 \cdot 4)) = 0,026;$$

$$\alpha = 0,72; \quad \alpha' = -0,23;$$

$$\alpha_{np} = 1 - \alpha - \alpha' \times \left( \frac{n_o}{\sum y_i} - 1 \right) = 1 - 0,72 + 0,23 \cdot (8/4,260 - 1) = 0,482.$$

Вычисляем реакцию связевых ферм RM от вертикального давления кранов (крановых моментов):

$$\alpha_1 = H_B/H = 6,37/17,2 = 0,37;$$

$$\mu = \frac{J_n}{J_e} - 1 = 5 - 1 = 4;$$

$$a = 1 + \alpha_1 \times \mu = 1 + 0,37 \cdot 4 = 2,48;$$

$$b = 1 + \alpha_1^2 \times \mu = 1 + 0,37^2 \cdot 4 = 1,548;$$

$$c = 1 + \alpha_1^3 \times \mu = 1 + 0,37^3 \cdot 4 = 1,203;$$

$$k = 4 \cdot a \cdot c - 3 \cdot b^2 = 4 \cdot 2,48 \cdot 1,203 - 3 \cdot 1,548^2 = 4,745;$$

$$s = 1 + \lambda = 1 + 0,37 = 1,37;$$

$$l = 1 - \lambda = 1 - 0,37 = 0,63.$$

$$\begin{aligned} r_{1p} &= 6 \times (M_{\max} - M_{\min}) \times l \times \frac{(b - a \cdot s)}{H \cdot k} = \\ &= 6 \times (1093,297 - 343,411) \times 0,63 \times \frac{(1,548 - 2,48 \cdot 1,37)}{17,2 \cdot 4,745} = -64,239 \text{ кН}. \end{aligned}$$

$$RM = r_{1p} \times (1 - \alpha_{np}) = -64,239 \times (1 - 0,482) = -33,276 \text{ кН}.$$

Вычисляем реакцию связевых ферм RT от тормозной силы T:

Из расчётной схемы действия тормозной силы  $T$  видно, что  $\alpha_1 = \lambda$ , поэтому вышеперечисленные коэффициенты:  $\lambda$ ,  $\alpha_1$ ,  $\mu$ ,  $\ell$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $k$  те же.

$$p = 2 + \lambda = 2 + 0,37 = 2,37;$$

$$r'_{1p} = T \times l^2 \times \frac{(3 \cdot b - 2 \cdot a \cdot p)}{k} = 70,998 \times 0,63^2 \times \frac{(3 \cdot 1,548 - 2 \cdot 2,48 \cdot 2,37)}{4,745} = -42,231 \text{ кН}.$$

$$RT = r'_{1p} \times (1 - \alpha_{np}) = -42,231 \times (1 - 0,482) = -21,876 \text{ кН}.$$

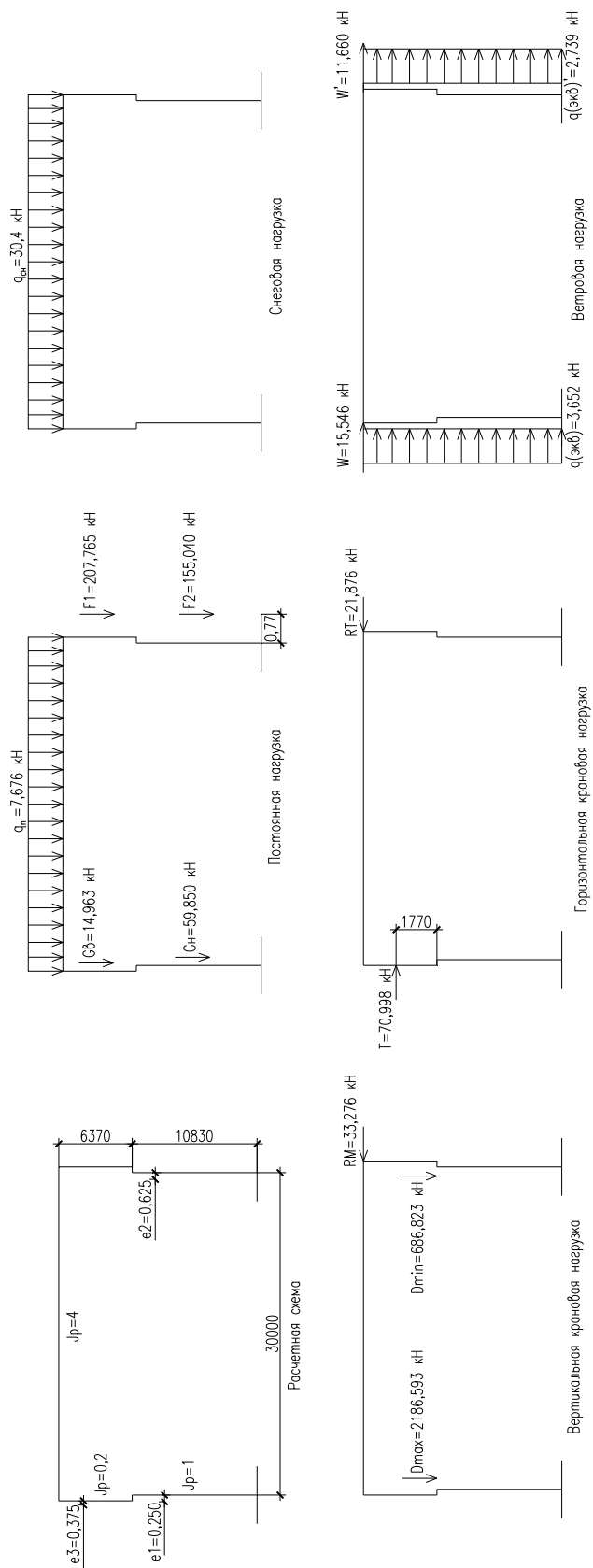


Рис. 4. Расчетные схемы и нагрузки на раму

Исходные данные статического расчёта показаны на схемах (рис. 4).

*Схема 1.* Компоновочные параметры рамы и соотношения жесткостей элементов рамы. Отметки узлов рамы даются в метрах от уровня пола цеха. Нагрузки даются в килоньютонах, положительное направление векторов показано на схемах.

*Схема 2.* Расположение и величины постоянной нагрузки, включая давление подстропильных ферм.

*Схема 3.* Расположение и величина снеговой нагрузки, включая давление от подстропильных ферм.

*Схема 4.* Вертикальные крановые нагрузки  $D_{\max}$  и  $D_{\min}$  и реактивный отпор  $R_M$ .

*Схема 5.* Горизонтальное давление кранов  $T$  и реактивный отпор  $R_T$ .

*Схема 6.* Ветровая нагрузка.

## 4.2. Статический расчет рамы с помощью ЭВМ [4]

### 4.2.1. Статический расчёт рамы на постоянную нагрузку

Исходные  
данные:

|    |                                         |         |
|----|-----------------------------------------|---------|
| 1  | пролёт поперечной рамы (м)              | 30      |
| 2  | высота колонны – Н (м)                  | 17,2    |
| 3  | Н(в) [м]                                | 6,37    |
| 4  | Н(н) [м]                                | 10,83   |
| 5  | смещен. прод. оси колонны (e1) [м]      | 0,25    |
| 6  | J(в)/J(н)                               | 0,2     |
| 7  | J(p)/J(н)                               | 4       |
| 8  | изгиб. момент от смещ. оси (кн*м)       | -80,726 |
| 9  | нагрузка на ригель (кн/м)               | 7,676   |
| 10 | нагрузка от стен и колонн (верх. части) | 207,765 |
| 11 | нагрузка от стен и колонн (нижн. части) | 155,04  |

относительные параметры:

|   |          |           |        |          |       |       |       |
|---|----------|-----------|--------|----------|-------|-------|-------|
| 1 | $\alpha$ | $\lambda$ | $\mu$  | c        | g     | n     | s     |
| 2 | 0,370    | 0,370     | 4      | 1,203    | 0,741 | 1,075 | 1,370 |
| 3 | p        | t         | u      | a        | b     | k     | n1    |
| 4 | 2,370    | 0         | 1,111  | 2,481395 | 1,549 | 4,748 | 4     |
| 5 | n2       | F(b)      | M(b)   |          |       |       |       |
| 6 | 0,573    | 6,916     | 16,635 | 0,630    |       |       |       |

коэффициенты канонического уравнения:

|                               |          |  |
|-------------------------------|----------|--|
| r11                           | R1q      |  |
| 5,60                          | 592,3    |  |
| поворот $\varphi \rightarrow$ | 105,7665 |  |

усилия в левой стойке поперечной рамы

| сечение | M ( $\varphi$ ) | M (p)        | M ( $\Sigma$ ) | Q ( $\Sigma$ ) | N       |
|---------|-----------------|--------------|----------------|----------------|---------|
| B       | -107,2194839    | 16,63528482  | -90,58         | -5,12          | 115,14  |
| C (в)   | -30,55541779    | -27,41913841 | -57,97         | -5,12          | 322,905 |
| C (н)   | -30,55541779    | 53,30686159  | 22,8           | -5,12          | 322,905 |
| A       | 99,78552984     | -21,59257381 | 78,19          | -5,12          | 477,945 |
| B (риг) | 485,1158009     | -575,7       | -90,58         | 115,14         | (---)   |

#### 4.2.2. Статический расчёт рамы на снеговую нагрузку

исходные  
данные:

|    |                                    |       |
|----|------------------------------------|-------|
| 1  | шаг поперечных рам (м)             | 10    |
| 2  | пролёт поперечной рамы (м)         | 30    |
| 3  | высота колонны – Н (м)             | 17,2  |
| 4  | Н(в) [м]                           | 6,37  |
| 5  | Н(н) [м]                           | 10,83 |
| 6  | смещен. прод. оси колонны (e1) [м] | 0,25  |
| 7  | J(в)/J(н)                          | 0,2   |
| 8  | J(p)/J(н)                          | 4     |
| 9  | изгиб. момент от смещ. оси (кн*м)  | -114  |
| 10 | снеговая нагрузка на ригель (кн/м) | 30,4  |

относительные параметры:

|   |          |           |        |          |       |       |       |
|---|----------|-----------|--------|----------|-------|-------|-------|
| 1 | $\alpha$ | $\lambda$ | $\mu$  | c        | g     | n     | s     |
| 2 | 0,370    | 0,370     | 4      | 1,203    | 0,741 | 1,075 | 1,370 |
| 3 | p        | t         | u      | a        | b     | k     | n1    |
| 4 | 2,370    | 0         | 1,111  | 2,481395 | 1,549 | 4,748 | 4     |
| 5 | n2       | F(b)      | M(b)   | $\ell$   |       |       |       |
| 6 | 0,573    | 9,767     | 23,492 | 0,630    |       |       |       |

коэффициенты канонического уравнения:

|                                    |        |         |
|------------------------------------|--------|---------|
| r11                                | R1q    |         |
| 5,60                               | 2256,5 |         |
| поворот узла $\varphi \rightarrow$ |        | 402,919 |

усилия в левой стойке поперечной рамы:

| сечение | M*( $\varphi$ )<br>(кн*м) | M(p)<br>(кн*м) | M( $\Sigma$ )<br>(кн*м) | Q( $\Sigma$ )<br>(кн) | N<br>(кн) |
|---------|---------------------------|----------------|-------------------------|-----------------------|-----------|
| В       | -408,4538264              | 23,49209015    | -384,96                 | -36,08                | 456       |
| С (в)   | -116,4012067              | -38,72088024   | -155,12                 | -36,08                | 378       |
| С (н)   | -116,4012067              | 75,27911976    | -41,12                  | -36,08                | 378       |
| А       | 380,1340949               | -30,49269645   | 349,64                  | -36,08                | 378       |
| В (риг) |                           |                |                         |                       |           |

### 4.2.3. Статический расчёт рамы на вертикальное давление кранов

исходные  
данные:

|    |                                    |          |
|----|------------------------------------|----------|
| 1  | пролёт поперечной рамы (м)         | 30       |
| 2  | высота колонны – Н (м)             | 17,2     |
| 3  | Н(верх) [м]                        | 6,37     |
| 4  | Н(низ) [м]                         | 10,83    |
| 5  | смещен. прод. оси колонны (e1) [м] | 0,25     |
| 6  | J(в)/J(н)                          | 0,2      |
| 7  | J(р)/J(н)                          | 4        |
| 8  | изгиб. момент от D(max) (кн*м)     | 1093,297 |
| 9  | изгиб. момент от D(min) (кн*м)     | 343,411  |
| 10 | D (max)[кн]                        | 2186,593 |
| 11 | D (min)[кн]                        | 686,823  |

относительные параметры:

|   |          |           |          |           |       |       |       |
|---|----------|-----------|----------|-----------|-------|-------|-------|
| 1 | $\alpha$ | $\lambda$ | $\mu$    | c         | g     | n     | s     |
| 2 | 0,370    | 0,370     | 4        | 1,203р.   | 0,741 | 1,075 | 1,370 |
| 3 | p        | t         | u        | a         | b     | k     | n1    |
| 4 | 2,370    | 0         | 1,111    | 2,4813953 | 1,549 | 4,748 | 4     |
| 5 | n2       | F(b)      | M(b)     | $\ell$    | t     |       |       |
| 6 | 0,573    | -93,664   | -225,297 | 0,630     | 0     |       |       |

коэффициенты канонического уравнения:

r11 R1q  $\alpha(\text{пр})$   $\Delta(\text{пр})$   
0,7293

1 64,2

смещение

$\Delta(\text{пл}) \rightarrow$  88,08872 0,482 42,45876

усилия в левой стойке рамы от вертикального давления крана:

| сечение                              | M* $\Delta$  | M (р)        | M ( $\Sigma$ ) | Q ( $\Sigma$ ) | N (сжат.) |
|--------------------------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-----------|
|                                      | (кн*м)       | (кн*м)       | (кн*м)         | (кн)           | (кн)      |
| загружение – D (max) на левую стойку |              |              |                |                |           |
| В                                    | 83,0997948   | -225,2968    | -142,20        | -78,18         | 0         |
| С (верх)                             | -15,5255136  | 371,3458088  | 355,82         | -78,18         | 0         |
| С (низ)                              | -15,5255136  | -721,9511912 | -737,477       | -78,18         | 2186,593  |
| А                                    | -183,2040207 | 292,4348557  | 109,23         | -78,18         | 2186,593  |



| загрузка – D (min) на левую стойку |              |              |         |        |         |
|------------------------------------|--------------|--------------|---------|--------|---------|
| B                                  | –51,47250082 | –225,2968    | –142,20 | –78,18 | 0       |
| C (верх)                           | –2,576913446 | 371,3458088  | 355,82  | –78,18 | 0       |
| C (низ)                            | –2,576913446 | –721,9511912 | –737,48 | –78,18 | 2186,59 |
| A                                  | 114,9805626  | 292,4348557  | 109,23  | –78,18 | 2186,59 |

#### 4.2.4. Статический расчёт рамы на горизонтальное давление кранов

исходные  
данные:

|   |                                    |        |
|---|------------------------------------|--------|
| 1 | пролёт поперечной рамы (м)         | 30     |
| 2 | высота колонны – Н (м)             | 17,2   |
| 3 | Н(верх) [м]                        | 6,37   |
| 4 | Н(низ) [м]                         | 10,83  |
| 5 | смещен. прод. оси колонны (e1) [м] | 0,25   |
| 6 | J(в)/J(н)                          | 0,2    |
| 7 | J(p)/J(н)                          | 4      |
| 8 | T(max) → на левую стойку (кН)      | 70,998 |

относительные параметры:

|   |          |             |          |           |       |       |       |
|---|----------|-------------|----------|-----------|-------|-------|-------|
| 1 | $\alpha$ | $\lambda$   | $\mu$    | c         | g     | n     | s     |
| 2 | 0,370    | 0,370       | 4        | 1,203     | 0,741 | 1,075 | 1,370 |
| 3 | p        | t           | u        | a         | b     | k     | n1    |
| 4 | 2,370    | 0           | 1,111    | 2,4813953 | 1,549 | 4,748 | 4     |
| 5 | n2       | F(b)        | M(b)     | $\ell$    | t     |       |       |
| 6 | 0,573    | –<br>42,200 | –128,944 | 0,630     | 0     |       |       |

коэффициенты канонического уравнения:

|                                    |          |               |               |
|------------------------------------|----------|---------------|---------------|
| r11                                | R1q      | $\alpha(p_r)$ | $\Delta(p_r)$ |
| –0,72931                           | –42,2    |               |               |
| смещение $\Delta(p_l) \rightarrow$ | 57,86338 | 0,482         | 27,89015      |

усилия в левой стойке рамы от горизонт. торм. крана:

| сечение                | M ( $\Delta$ ) | M (p)     | $\Sigma$ M | $\Sigma$ Q | N |
|------------------------|----------------|-----------|------------|------------|---|
| (T → на левую стойку)  |                |           |            |            |   |
| M(б) =                 | 54,5862705     | -128,9443 | -74,36     | -32,03     | 0 |
| M(с.в.)=               | -10,19833908   | 139,87155 | 129,67     | -32,03     | 0 |
| M(с.н.)=               | -10,19833908   | 139,87155 | 129,67     | 38,97      | 0 |
| M(a)=                  | -120,3423456   | -172,0077 | -292,35    | 38,97      | 0 |
| (T ← на правую стойку) |                |           |            |            |   |
| M(б) =                 | 22,83533558    | 0         | 22,84      | 3,41       | 0 |
| M(с.в.)=               | 1,143225652    | 0         | 1,14       | 3,41       | 0 |
| M(с.н.)=               | 1,143225652    | 0         | 1,14       | 4,82       | 0 |
| M(a)=                  | -51,01014503   | 0         | -51,01     | 4,8156     | 0 |

#### 4.2.5. Статический расчёт рамы на действие ветра

исходные данные:

|    |                                      |        |
|----|--------------------------------------|--------|
| 1  | пролёт поперечной рамы (м)           | 30     |
| 2  | высота колонны – Н (м)               | 17,2   |
| 3  | Н(в) [м]                             | 6,37   |
| 4  | Н(н) [м]                             | 10,83  |
| 5  | смещен. прод. оси колонны (e1) [м]   | 0,25   |
| 6  | J(в)/J(н) [м]                        | 0,2    |
| 7  | J(p)/J(н) [м]                        | 4      |
| 8  | ветер на левую стойку – q(1) (кн/м)  | 4,338  |
| 9  | ветер на правую стойку – q(2) (кн/м) | 3,953  |
| 10 | ветер сосредоточенный – W(1)         | 15,546 |
| 11 | ветер сосредоточенный – W(2)         | 11,66  |

относительные параметры:

|   |          |           |         |          |       |       |       |
|---|----------|-----------|---------|----------|-------|-------|-------|
| 1 | $\alpha$ | $\lambda$ | $\mu$   | c        | g     | n     | s     |
| 2 | 0,370    | 0,370     | 4       | 1,203    | 0,741 | 1,075 | 1,370 |
| 3 | p        | t         | u       | a        | b     | k     | n1    |
| 4 | 2,370    | 0         | 1,111   | 2,481395 | 1,549 | 4,748 | 4     |
| 5 | n2       | F(b)      | M(b)    | $\ell$   | t     |       |       |
| 6 | 0,573    | -91,453   | -76,709 | 0,630    | 0     |       |       |

коэффициенты канонического уравнения:

|                                             |         |          |
|---------------------------------------------|---------|----------|
| r11                                         | R1q     |          |
| -0,72931                                    | 91,4534 |          |
| смещение<br>$\Delta(\text{пл}) \rightarrow$ |         | -125,397 |

усилия в левой стойке рамы от ветровой нагрузки:

| сечение  | M ( $\Delta$ )                | M (p)        | $\Sigma M$ | $\Sigma Q$ | N |
|----------|-------------------------------|--------------|------------|------------|---|
|          | ветер слева ( $\rightarrow$ ) |              |            |            |   |
| B        | 245,4262759                   | -76,70930908 | 168,72     | 12,11      | 0 |
| C (верх) | -45,85292894                  | 49,4095783   | 3,56       | 39,74      | 0 |
| C (низ)  | -45,85292894                  | 49,4095783   | 3,56       | 39,74      | 0 |
| A        | -541,073304                   | -140,2011583 | -681,27    | 86,725     | 0 |
|          | ветер справа ( $\leftarrow$ ) |              |            |            |   |
| B        | -245,4262759                  | 69,90131369  | -175,52    | -15,09     | 0 |
| C (верх) | 45,85292894                   | -45,02444975 | 0,83       | -40,28     | 0 |
| C (низ)  | 45,85292894                   | -45,02444975 | 0,83       | -40,28     | 0 |
| A        | 541,073304                    | 127,7582247  | 668,83     | -83,09     | 0 |

Таблица расчётных усилий в левой стойке рамы

| №  | нагрузка            | $\psi_c$ | сечения левой стойки |        |        |            |         |  |            |          |  |            |          |        |
|----|---------------------|----------|----------------------|--------|--------|------------|---------|--|------------|----------|--|------------|----------|--------|
|    |                     |          | сеч. 1 - 1           |        |        | сеч. 2 - 2 |         |  | сеч. 3 - 3 |          |  | сеч. 4 - 4 |          |        |
|    |                     |          | M                    | N      | Q      | M          | N       |  | M          | N        |  | M          | N        | Q      |
| 1  | постоянная          | 1        | -90,58               | 115,14 | -5,12  | -57,97     | 322,905 |  | 22,75      | 322,905  |  | 78,19      | 477,945  | -5,12  |
| 2  | снеговая            | 1        | -384,96              | 456    | -36,08 | -155,12    | 378     |  | -41,12     | 378      |  | 349,64     | 378      | -36,08 |
|    |                     | 0,9      | -346,47              | 410,40 | -32,47 | -139,61    | 340,20  |  | -37,01     | 340,20   |  | 314,68     | 340,20   | -32,47 |
| 3  | на левую<br>стойку  | 1        | -142,20              | 0      | -78,18 | 355,82     | 0       |  | -737,477   | 2186,593 |  | 109,23     | 2186,593 | -78,18 |
|    |                     | 0,9      | -127,98              | 0      | -70,36 | 320,24     | 0       |  | -663,73    | 1967,93  |  | 98,31      | 1967,93  | -70,36 |
| 3* | на правую<br>стойку | 1        | -142,20              | 0      | -78,18 | 355,82     | 0       |  | -737,477   | 2186,593 |  | 109,23     | 2186,593 | -78,18 |
|    |                     | 0,9      | -127,98              | 0      | -70,36 | 320,24     | 0       |  | -663,73    | 1967,93  |  | 98,31      | 1967,93  | -70,36 |
| 4  | на левую<br>стойку  | 1+       | -74,36               | 0      | -32,03 | 129,67     | 0       |  | 129,673    | 0        |  | -292,35    | 0        | 38,97  |
|    |                     | 1-       | 74,36                | 0      | 32,03  | -129,67    | 0       |  | -129,67    | 0        |  | 292,35     | 0        | -38,97 |
|    |                     | 0,9+     | 66,92                | 0      | 28,83  | -116,71    | 0       |  | -116,71    | 0        |  | 263,12     | 0        | -35,07 |
|    |                     | 0,9-     | -66,92               | 0      | -28,83 | 116,71     | 0       |  | 116,71     | 0        |  | -263,12    | 0        | 35,07  |
| 4* | на правую<br>стойку | 1+       | 22,84                | 0      | -32,03 | 1,14       | 0       |  | 1,14       | 0        |  | -51,01     | 0        | 4,82   |
|    |                     | 1-       | -22,84               | 0      | 32,03  | -1,14      | 0       |  | -1,14      | 0        |  | 51,01      | 0        | -4,82  |
|    |                     | 0,9+     | -20,55               | 0      | 28,83  | -1,03      | 0       |  | -1,03      | 0        |  | 45,91      | 0        | -4,33  |
|    |                     | 0,9-     | 20,55                | 0      | -28,83 | 1,03       | 0       |  | 1,03       | 0        |  | -45,91     | 0        | 4,33   |
| 5  | на правую<br>стойку | 1        | 168,72               | 0      | 12,11  | 3,56       | 0       |  | 3,56       | 0        |  | -681,27    | 0        | 86,72  |
|    |                     | 0,9      | 151,85               | 0      | 10,90  | 3,20       | 0       |  | 3,20       | 0        |  | -613,15    | 0        | 78,05  |
| 5* | на левую<br>стойку  | 1        | -175,52              | 0      | -15,09 | 0,83       | 0       |  | 0,83       | 0        |  | 668,83     | 0        | -83,09 |
|    |                     | 0,9      | -157,97              | 0      | -13,59 | 0,75       | 0       |  | 0,75       | 0        |  | 601,948    | 0        | -74,78 |

Таблица расчётных комбинаций нагрузок

| ком. ус.          | Нагрузки      | $\psi$ : | сечения левой стойки |        |         |            |         |   |            |         |   |             |          |         |
|-------------------|---------------|----------|----------------------|--------|---------|------------|---------|---|------------|---------|---|-------------|----------|---------|
|                   |               |          | сеч. 1 - 1           |        |         | сеч. 2 - 2 |         |   | сеч. 3 - 3 |         |   | сеч. 4 - 4  |          |         |
|                   |               |          | M                    | N      | Q       | M          | N       | Q | M          | N       | Q | M           | N        | Q       |
| M(+)              | На нагружения | 1        | 1,5                  |        |         | 1,3;4      |         |   | 1,5        |         |   | 1,5*        |          |         |
|                   | Усилия        |          | 78,13                | 115,14 | 6,99    | 427,52     | 322,905 |   | 26,308     | 322,905 |   | 747,02      | 477,945  | -88,21  |
| N <sub>сост</sub> | На нагружения | 0,9      | -                    |        |         | 1,3;4;-5   |         |   | -          |         |   | 1,2;3;4+;5* |          |         |
|                   | Усилия        |          | -                    | -      | -       | 382,17     | 322,905 |   | -          | -       |   | 1191,43     | 2786,08  | -217,81 |
| M (-)             | На нагружения | 1        | 1,2                  |        |         | 1,2        |         |   | 1,3;4-     |         |   | 1,5         |          |         |
|                   | Усилия        |          | -475,55              | 571,14 | -41,20  | -213,10    | 700,905 |   | -844,40    | 2509    |   | -603,08     | 478      | 81,61   |
| N <sub>сост</sub> | На нагружения | 0,9      | 1,2;3;4;-5*          |        |         | -          |         |   | 1,2;3;4+   |         |   | 1,3;4;-5    |          |         |
|                   | Усилия        |          | -656,08              | 525,54 | -150,37 | -          | -       |   | -794,69    | 2631,04 |   | -699,76     | 2445,88  | 37,64   |
| N <sub>max</sub>  | На нагружения | 1        | -                    |        |         | -          |         |   | -          |         |   | 1,2;3;4+;5* |          |         |
|                   | Усилия        |          | -                    | -      | -       | -          | -       |   | -          | -       |   | 1356,24     | 2786,08  | -358,53 |
| M(+)              | На нагружения | 0,9      | -                    |        |         | 1,2;3;4;-5 |         |   | -          |         |   | 1,2;3;4+;5* |          |         |
|                   | Усилия        |          | -                    | -      | -       | 242,56     | 663,11  |   | -          | -       |   | 1356,24     | 2786,08  | -217,81 |
| N <sub>max</sub>  | На нагружения | 1        | 1,2                  |        |         | 1,2        |         |   | 1,3;4-     |         |   | 1,3;4+      |          |         |
|                   | Усилия        |          | -475,55              | 571,14 | -41,20  | -213,10    | 700,905 |   | -844,40    | 2509    |   | -104,93     | 2664,538 | -44,33  |
| M (-)             | На нагружения | 0,9      | 1,2;3;4;-5*          |        |         | -          |         |   | 1,2;3;4+   |         |   | 1,2;3;4;-5  |          |         |
|                   | Усилия        |          | -789,92              | 525,54 | -150,37 | -          | -       |   | -794,69    | 2631,04 |   | -385,08     | 2786,08  | 5,17    |
| N <sub>min</sub>  | На нагружения | 1        | 1,5                  |        |         | 1,3;4+     |         |   | 1,5        |         |   | 1,5*        |          |         |
|                   | Усилия        |          | 78,13                | 115,14 | 6,99    | 427,52     | 322,905 |   | 26,31      | 322,905 |   | 747,02      | 477,945  | -88,21  |
| M <sub>min</sub>  | На нагружения | 1        | 1,3;4+               |        |         | 1,5*       |         |   | -          |         |   | 1,5         |          |         |
|                   | Усилия        |          | -307,14              | 115,14 | -115,33 | -57,15     | 322,905 |   | -          | -       |   | -603,08     | 477,945  | 81,61   |
| Q <sub>max</sub>  | На нагружения | 0,9      | 1,2;3;4;-5*          |        |         | -          |         |   | -          |         |   | 1,2;3;4+;5* |          |         |
|                   | Усилия        |          | -                    | -      | -150,37 | -          | -       |   | -          | -       |   | -           | -        | -217,81 |

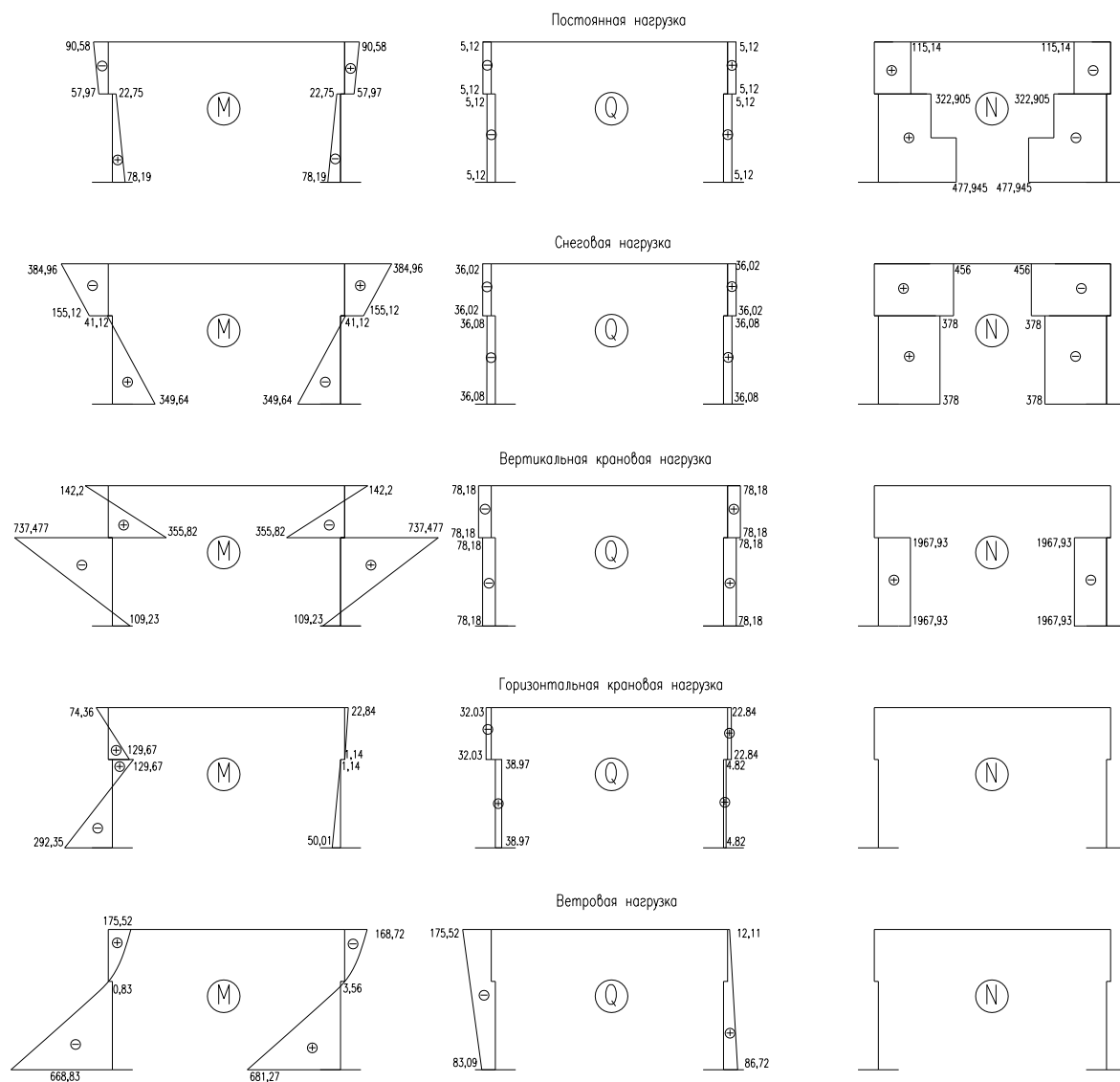


Рис. 5. Эпюры расчета усилий в раме

## 5. Конструирование и расчёт ступенчатой колонны

Из табл. 5 находим расчётные усилия для колонны:

- верхней части –  $M = -656,08 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $N = 525,54 \text{ кН}$  (1;2;3;4–;5\*);
- подкрановой ветви –  $M = -794,69 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $N = 2631,04 \text{ кН}$  (1;2;3;4+);
- наружной ветви –  $M = +1356,24 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $N = 2786,08 \text{ кН}$  (1;2;3;4+;5\*);
- раскосной решётки –  $Q_{\max} = -217,81 \text{ кН}$  (1;2;3;4+;5\*);
- анкерных болтов –  $M = -603,08 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $N = 477,945 \text{ кН}$  (1;5) усилия

для расчёта сквозного ригеля (фермы):

- опорный момент (слева) –  $M_1 = -656,08 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (1;2;3;4–;5\*);
- опорный момент (справа) –  $M_2 = -392,63 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (1;2;3\*;4–\*;5);
- опорный момент (слева) –  $M_3 = -443,45 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (1;3\*;4–;5\*);
- опорный момент (справа) –  $M_4 = -46,16 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (1;3;4–\*;5);
- рамный распор 1 (от левой ст.)  $\rightarrow H_1 = -150,57 \text{ кН}$  (1;2;3\*;4–;5\*);
- рамный распор 2 (от правой ст.)  $\leftarrow H_2 = -125,88 \text{ кН}$  (1;2;3;4–\*;5);
- рамный распор 3 (от левой ст.)  $\rightarrow H_3 = -117,9 \text{ кН}$  (1;3\*;4–;5\*);
- рамный распор 4 (от правой ст.)  $\leftarrow H_4 = -93,41 \text{ кН}$  (1;3;4–\*;5).

Расчёт сечения и узлов ступенчатой колонны с жёстким сопряжением ригеля с колонной и колонны с фундаментом  $I_b/I_n = 1/5$ . Сталь марки С 245;  $R_y = 24 \text{ кН/см}^2$ . Бетон фундамента марки В12,5.

### 5.1. Определение расчётных длин участков колонн

В плоскости рамы для ступенчатых колонн расчётные длины определяются отдельно для нижней и верхней частей колонн.

Для нижней части:  $l_{x,1} = \mu_1 \cdot l_1$ .

Для верхней части:  $l_{x,2} = \mu_2 \cdot l_2$ .

Так как  $H_B/H_H = l_2/l_1 = 6,37/10,83 = 0,588 < 0,6$  и  $N_H/N_B = \frac{2631,04}{525,54} = 5,006 > 3$ .

Значения  $\mu_1$  и  $\mu_2$  находим по табл. 14.1 [3].

При жёстком сопряжении ригеля с колонной  $\mu_1 = 2$ ,  $\mu_2 = 3$ .

Значения расчётных длин колонны в плоскости рамы:

$$l_{x1} = \mu_1 \cdot l_1 = 2 \cdot 10,83 = 21,66 \text{ м}; \quad l_{x2} = \mu_2 \cdot l_2 = 3 \cdot 6,37 = 19,11 \text{ м}$$

Расчётные длины участков колонны из плоскости рамы:

$$l_{y1} = 0,5 \cdot H_n = 5,415 \text{ м}; \quad l_{y2} = H_B - h_d = 6,37 - 1,6 = 4,77 \text{ см.}$$

## 5.2. Конструирование и расчёт верхней части колонны

Сечение принимаем в виде сварного двутавра с высотой сечения

$$h_B = 750 \text{ мм}.$$

Для симметричного двутавра:

$$i_x = 0,42 \cdot h_B = 0,42 \cdot 75 = 31,5 \text{ см}$$

$$p_x = 0,35 \cdot h_B = 0,35 \cdot 75 = 26,25 \text{ см}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{x2}}{i_{x2}} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{1911}{31,5} \cdot \sqrt{\frac{24}{2,06 \cdot 10^4}} = 2,071$$

$$m_x = \frac{M}{N \cdot p_x} = \frac{65608}{525,54 \cdot 26,25} = 4,756 \text{ кН} \cdot \text{см.}$$

Значение коэффициента  $\eta$  определяем по приложению 10 [3].

Предварительно принимаем  $\frac{A_f}{A_w} = 1$ , тогда:

$$\eta = 1,4 - 0,02 \cdot \bar{\lambda} = 1,4 - 0,02 \cdot 2,071 = 1,359$$

$$m_{ef} = \eta \cdot m_x = 1,359 \cdot 4,756 = 6,46$$

при  $m_{ef} = 6,46$ ;  $\bar{\lambda} = 2,071$ ;  $\varphi_e = 0,182$  из приложения 9 [3].

Требуемая площадь сечения:

$$A_{TP} = \frac{N}{\varphi_e \cdot R_y} \frac{525,54}{0,182 \cdot 24} = 120,316 \text{ см}^2.$$



### 5.3. Компонировка сечения

Высота стенки  $h_w = h_f - 2 \cdot t_f = 75 - 2 \cdot 2 = 72,6 \text{ см}$ . Принимаем предварительно толщину полки  $t_f = 1,2 \text{ см}$ .

Согласно формуле 14.15 [3] при  $1 \leq m_x \leq 10$  и  $\bar{\lambda} \geq 2$  из условия местной устойчивости:

$$\bar{\lambda}_{uw} = 1,2 + 0,35\bar{\lambda}_x = 1,2 + 0,35 \cdot 2,071 = 1,924;$$

$$t_{w,mp} = \frac{h_w \cdot \sqrt{R_y / E}}{\bar{\lambda}_{uw}} = \frac{72,6 \cdot \sqrt{24 / 2,071 \cdot 10^4}}{1,924} = 1,285 \text{ см}.$$

Поскольку сечение с такой стенкой неэкономично, принимаем  $t_w = 1 \text{ см}$ .

Требуемая площадь сечения полки:

$$A_f = (A_{mp} - t_w \cdot h_w) / 2 = (120,316 - 1 \cdot 72,6) / 2 = 23,858 \text{ см}^2.$$

Из условий устойчивости верхней части колонны из плоскости рамы, ширина полки:

$$b_f \geq \frac{l_{y2}}{20} = \frac{477}{20} = 23,85 \text{ см}.$$

Из условий местной устойчивости:

$$\frac{b_{ef}}{t_f} \leq (0,36 + 0,1 \cdot \bar{\lambda}) \sqrt{\frac{E}{R}} = (0,36 + 0,1 \cdot 2,071) \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^4}{24}} = 16,615.$$

Принимаем  $b_f = 32 \text{ см}$ ;  $t_f = 1,2 \text{ см}$ ;  $A_f = 34 \cdot 1,2 = 40,8 \text{ см}^2$ .

$$b_f = 32 \text{ см} \geq \frac{l_{y2}}{20} = \frac{477}{20} = 23,85 \text{ см}.$$

### 5.4. Геометрические характеристики сечения

Полная площадь сечения  $A_0 = 2 \cdot 30 \cdot 2 + 1 \cdot 72,6 = 166 \text{ см}^2$ .

Расчётная площадь сечения с учётом только устойчивой части стенки:

$$A = 2 \cdot b_f \cdot t_f + 2 \cdot 0,85 \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{E/R_y} = 2 \cdot 32 \cdot 1,2 + 2 \cdot 0,85 \cdot 1^2 \cdot \sqrt{2,06 \cdot 10^4 / 24} = 126,605 \text{ см}^2;$$

$$I_x = \frac{1 \cdot 72,6^3}{12} + 2 \cdot 31 \cdot 2 \cdot [(75 - 1,2) / 2]^2 = 200727,738 \text{ см}^4;$$

$$I_y = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 32^3}{12} = 6553,6 \text{ см}^4; \quad W_x = \frac{I_x}{0,5 \cdot h} = \frac{200727,738}{0,5 \cdot 75} = 5352,740 \text{ см}^4;$$

$$p_x = W_x / A_o = 5352,740 / 166 = 32,245 \text{ см};$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{200727,738}{126,605}} = 39,818 \text{ см}; \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{6553,6}{126,605}} = 6,502 \text{ см}.$$

Проверка устойчивости верхней части колонны в плоскости действия момента по формуле:

$$\lambda_x = \frac{l_{x2}}{i_x} = \frac{1911}{39,818} = 47,993; \quad \bar{\lambda}_x = \lambda_x \cdot \sqrt{R_y/E} = 47,993 \cdot \sqrt{24/2,06 \cdot 10^4} = 1,638;$$

$$m_x = \frac{M_x}{N \cdot p_x} = \frac{65608}{525,54 \cdot 32,245} = 3,872; \quad A_f/A_w = 1,2 \cdot 32 / 72,6 \cdot 1 = 0,529.$$

Значение коэффициента  $\eta$  определяем по приложению 11 [3]:

$$\text{при } A_f/A_w = 0,5 \Rightarrow \eta = (1,75 - 0,1m) - 0,02(5 - m)\lambda$$

$$(1,75 - 0,1 \cdot 0,529) - 0,02(5 - 0,529) \cdot 1,518 = 1,561,$$

$$\text{при } A_f/A_w = 1 \Rightarrow \eta = (1,9 - 0,1m) - 0,02(6 - m)\lambda$$

$$(1,9 - 0,1 \cdot 0,529) - 0,02(6 - 0,529) \cdot 1,518 = 1,681.$$

$$m_{fx} = \eta \cdot m_x = 1,564 \cdot 3,872 = 6,058 \text{ получаем } \varphi_e = 0,193 \text{ из приложения 9 [3].}$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e \cdot A} = \frac{525,54}{0,193 \cdot 126,605} = 21,508 \text{ кН / см}^2 \leq R_y = 24 \text{ кН / см}^2 \quad - \quad \text{условие}$$

выполняется.

$$\text{Недонапряжение: } \frac{24 - 21,508}{24} \cdot 100\% = 10\%$$

Проверка устойчивости верхней части колонны из плоскости действия момента.

$$\lambda_y = \frac{l_{y2}}{i_y} = \frac{477}{6,502} = 73,362 \text{ При } \lambda_y = 73,362 \Rightarrow \varphi_y = 0,731 \text{ согласно табл. 72 [1].}$$

Для определения  $m_x$  найдем максимальный момент в средней трети расчётной длины стержня верхней части колонны.

$$M_1 = -656,08 \text{ кН} \cdot \text{м} (1;2;3;4-;5^*) \text{ по сечению 1-1.}$$

$$M_2 = -3,81 \text{ кН} \cdot \text{м} (1;2;3;4-;5^*) \text{ по сечению 2-2.}$$

$$M = M_2 + \frac{M_1 - M_2}{l_2} \cdot \left( l_2 - \frac{1}{3} l_{y2} \right) = -3,81 + \frac{-656,08 + 3,81}{6,35} \cdot \left( 6,37 - \frac{1}{3} \cdot 4,77 \right) = -509,21 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

По модулю  $M_x \geq M_{MAX}/2 = 794,69/2 = 397,345 \text{ кН} \cdot \text{м}$  условие выполнено.

$$m_x = \frac{M}{N \cdot p} = \frac{M \cdot A_0}{N \cdot W_x} = \frac{50921,19 \cdot 166}{525,54 \cdot 5352,740} = 5,509 \text{ кН} \cdot \text{см}.$$

$$\text{При } \lambda_y = 73,362 (\lambda_c = 3,14 \sqrt{E/R} = 92.$$

Коэффициент (с) при  $5 < m_x < 10$  определяется по следующей формуле:

$$C = C_5 (2 - 0,2 m_x) + C_{10} (0,2 m_x - 1), \text{ где}$$

$$C_5 = \beta / (1 + \alpha m_x);$$

$$C_{10} = 1 / [1 + m_x \varphi_y / \varphi_\delta];$$

$$C_5 = \frac{1}{(1 + 0,925 \cdot 5,509)} = 0,164;$$

$$\beta = 1, \varphi_\delta = 1;$$

$$\alpha = 0,65 + 0,05 m_x = 0,65 + 0,05 \cdot 5,509 = 0,925;$$

$$C_{10} = \frac{1}{\left( 1 + \frac{5,509 \cdot 0,731}{1} \right)} = 0,199;$$

$$C = 0,164 \cdot (2 - 0,2 \cdot 5,509) + 0,199 \cdot (0,2 \cdot 5,509 - 1) = 0,168;$$

$$\sigma_y = \frac{N}{C \varphi_y A} = \frac{525,54}{0,168 \cdot 0,731 \cdot 126,605} = 23,8 \text{ кН} / \text{см}^2 < 24 = R_y \gamma_y \text{ кН} / \text{см}^2.$$

Принятое сечение удовлетворяет условию устойчивости из плоскости рамы.

### 5.5. Конструирование и расчет сечения нижней части колонны

Сечение нижней части сквозное, состоящее из двух ветвей, соединенных раскосной решеткой. Высота сечения  $h_n = 1250 \text{ мм}$ . Подкрановую ветвь колонны принимаем из широкополосного двутавра, наружную – составного сечения из трёх листов (см. рис. 6).

Определим ориентировочное положение центра тяжести. Принимаем  $Z_0 = 10 \text{ см}$ .  $h_0 = h_n - 10 = 125 - 10 = 115 \text{ см}$ .

$$y_1 = \frac{|M_2|}{|M_1| + |M_2|} \cdot h_0 = \frac{135624}{79469 + 135624} \cdot 115 = 72,512 \text{ см};$$

$$y_2 = h_0 - y_1 = 115 - 72,512 = 42,488 \text{ см}.$$

Усилия в ветвях колонны: 1-подкрановой и 2-наружной определяем по формулам 14.19 и 14.20 [3]:

$$N_{B1} = N_1 \cdot \frac{y_2}{h_0} + \frac{M_1}{h_0} = 2631,04 \cdot \frac{42,488}{115} + \frac{79469}{115} = 1663,101 \text{ кН};$$

$$N_{B2} = N_2 \cdot \frac{y_1}{h_0} + \frac{M_2}{h_0} = 2786,08 \cdot \frac{72,512}{115} + \frac{135624}{115} = 3008,752 \text{ кН}.$$

Определим требуемую площадь сечения ветвей. Для этого зададимся  $\lambda = 70$ , при которой  $\varphi = 0,754$ .

$$A_{B1} = \frac{N_{B1}}{\varphi \cdot R} = \frac{1663,101}{0,754 \cdot 24} = 91,904 \text{ см}^2;$$

$$A_{B2} = \frac{N_{B2}}{\varphi \cdot R} = \frac{3008,752}{0,754 \cdot 24} = 166,266 \text{ см}^2.$$

Для подкрановой ветви ( $A_{B1}$ ) подбираем по сортаменту (двутавры стальные горячекатаные ГОСТ 8239-89) двутавр № 50:

$$A_1 = 100 \text{ см}^2; \quad i_x = 19,9 \text{ см}; \quad i_y = 3,23 \text{ см}.$$

Для наружной ветви принимаем просвет между внутренними гранями полок составного сечения, равный высоте сечения двутавра –  $h_0^i = 466 \text{ см}$ . Стенку принимаем из стандартного листа  $560 \times 1,6 \text{ мм}$ .

Требуемая площадь полки:

$$A_f = (A_{B2} - A_w) / 2 = (166,266 - 1 \cdot 56) / 2 = 55,133 \text{ см}^2;$$

из условия местной устойчивости:

$$\frac{b_f}{t_f} \leq \left[ \left( 0,38 + 0,08 \cdot \bar{\lambda} \right) \cdot \sqrt{E/R_y} \right] = \left[ (0,38 + 0,08 \cdot 2,389) \cdot \sqrt{2,06 \cdot 10^4 / 24} \right] = 16,73.$$

Принимаем:  $t_f = 1,6 \text{ см}$ ;  $b_f = 20 \text{ см}$ ;  $A_f = 32 \text{ см}^2$ .

$$\frac{b_f}{t_f} = 20 / 1,6 = 12,5 < 16,73.$$

Геометрические характеристики ветвей:

$$A_{B2} = 1 \cdot 56 + 2 \cdot 20 \cdot 1,6 = 120 \text{ см}^2;$$

$$Z_0 = \frac{S_{ix}}{A_{B2}} = \frac{h_w \cdot t_w \cdot t_w / 2 + 2 \cdot t_f \cdot b_f \cdot (t_w + b_f / 2)}{A_{B2}};$$

$$Z_0 = \frac{S_{ix}}{A_{B2}} = \frac{56 \cdot 1,6 \cdot 1,6 / 2 + 2 \cdot 1,6 \cdot 20 \cdot (1,6 + 20 / 2)}{120} = 6,784 \text{ м};$$

$$I_{x2} = t_w \cdot h_w \cdot (z_0 - t_w / 2)^2 + 2 \cdot t_f \cdot b_f^3 / 12 + 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot ((b_f / 2 + t_w) - z_0)^2;$$

$$I_{x2} = 1,6 \cdot 56 \cdot (10 - 1,6 / 2)^2 + 2 \cdot 1,6 \cdot 20^3 / 12 + 2 \cdot 20 \cdot 1,6 \cdot ((20 / 2 + 1,6) - 10)^2 = 9880,917 \text{ см}^4$$

$$I_{y2} = t_w \cdot h_w^3 / 12 + 2 \cdot t_f \cdot b_f \cdot (h_0^i / 2 + t_f / 2)^2;$$

$$I_{y2} = 1,6 \cdot 56^3 / 12 + 2 \cdot 1,6 \cdot 20 (46,6 / 2 + 1,6 / 2)^2 = 60587,307 \text{ см}^4;$$

$$i_{x2} = \sqrt{\frac{I_{x2}}{120}} = \sqrt{\frac{9880,917}{120}} = 9,074 \text{ см};$$

$$i_{y2} = \sqrt{\frac{I_{y2}}{120}} = \sqrt{\frac{60587,307}{120}} = 22,47 \text{ см}.$$

Уточняем положение центра тяжести:

$$h_0 = h_n - Z_0 = 125 - 6,784 = 118,216 \text{ см}.$$

$$y_1 = \frac{A_{B2} \cdot h_0}{A_{B2} + A_{B1}} = \frac{120 \cdot 118,216}{120 + 100} = 64,481 \text{ см}.$$

$$y_2 = h_0 - y_1 = 118,216 - 64,481 = 53,735 \text{ см}.$$

Изменение  $y_1$  и  $y_2$  отличаются от первоначально принятых значений, поэтому выполняем перерасчёт усилий.

$$N_{B1} = N_1 \cdot \frac{y_2}{h_0} + \frac{M_1}{h_0} = 2631,04 \cdot \frac{53,735}{118,216} + \frac{79469}{118,216} = 1868,173 \text{ кН}.$$

$$N_{B2} = N_2 \cdot \frac{y_1}{h_0} + \frac{M_2}{h_0} = 2786,08 \cdot \frac{64,481}{118,216} + \frac{135624}{118,216} = 2666,925 \text{ кН}.$$

Проверяем устойчивость ветвей из плоскости рамы:

Подкрановая ветвь:

$$\lambda_{y1} = \frac{l_{y1}}{i_{y1}} = \frac{542}{19,9} = 27,236; \text{ по табл. 72 [1]} \Rightarrow \varphi_{y1} = 0,940;$$

$$\sigma_{y1} = \frac{N_{B1}}{\varphi_{y1} \cdot A_{B1}} = \frac{1868,173}{0,940 \cdot 100} = 19,874 < R_y = 24 \text{ кН / см}^2.$$

Наружная ветвь:

$$\lambda_{y2} = \frac{l_{y2}}{i_{y2}} = \frac{542}{22,47} = 24,121 \Rightarrow \varphi_{y2} = 0,949;$$

$$\sigma_{y2} = \frac{N_{B2}}{\varphi_{y2} \cdot A_{B2}} = \frac{2666,925}{0,949 \cdot 120} = 23,419 \text{ кН / см}^2 < 24 = R_y \gamma_y.$$

Из условия равноустойчивости ветвей в плоскости и из плоскости рамы определяем требуемое расстояние между узлами решетки:

$$\lambda_{x1} = \frac{l_{B1}}{i_{x1}} = \lambda_{y1} = 27,236; \quad l_{B1} = 27,236 \cdot i_{x1} = 27,236 \cdot 3,23 = 87,972 \text{ см}.$$

Окончательно принимаем  $l_{B1} = 200 \text{ см}$  – как длину, разделившую нижнюю часть колонны на равные участки. Проверяем устойчивость ветвей в плоскости рамы:

$$\lambda_{x1} = \frac{l_{B1}}{i_{x1}} = 200/3,23 = 61,92 – \text{ветвь устойчива} \Rightarrow \varphi_{x1} = 0,795$$

$$\sigma_{x1} = \frac{N_{B1}}{\varphi_{x1} \cdot A_{B1}} = \frac{1868,173}{0,795 \cdot 100} = 23,499 < R = 24 \text{ кН / см}^2.$$

$$\lambda_{x2} = \frac{l_{B2}}{i_{x2}} = 200/9,074 = 22,041 – \text{ветвь устойчива.} \Rightarrow \varphi_{x2} = 0,956$$

$$\sigma_{x2} = \frac{N_{B2}}{\varphi_{x2} \cdot A_{B2}} = \frac{2666,925}{0,956 \cdot 120} = 23,247 < R = 24 \text{ кН / см}^2.$$

### *Расчёт решётки подкрановой части колонны*

Условная поперечная сила:  $Q_{ycl} = 0,2(100 + 120) = 48 \text{ кН}$   $\langle Q_{MAX} = 217,81 \text{ кН}$ .

В расчёте принимаем фактическую поперечную силу  $Q_{MAX} = 217,81 \text{ кН}$ .

Усилие сжатия в раскосе:

$$N_p = \frac{Q_{MAX}}{2 \sin \alpha} = \frac{217,81}{2 \cdot 0,64} = 170,164 \text{ кН}.$$

$$\sin \alpha = \frac{h_n}{l_p} = \frac{125}{\sqrt{125^2 + (200/2)^2}} = 0,781 \Leftrightarrow \alpha = 51^\circ$$

Задаётся  $\lambda_p = 100$ ;  $\varphi = 0,56$ .

Требуемая площадь раскоса:

$$A_{p,TP} = \frac{N_p}{\varphi_x \cdot R \cdot \gamma} = \frac{170,164}{0,56 \cdot 24 \cdot 0,75} = 16,881 \text{ см}^2$$

$R = 24 \text{ кН / см}^2$ ; С-245;  $\gamma = 0,75$  (сжатый уголок, прикреплённый одной полкой).

*Принимаем уголок стальной горячекатаный по ГОСТ 8509:*

$110 \times 8$ ;  $A_p = 17,2 \text{ см}^2$ ;  $i_{\min} = 2,18 \text{ см}$ .

$$\lambda_{\max} = \frac{\sqrt{125^2 + (200/2)^2}}{2,18} = 73,430$$

$\varphi_{\min} = 0,731$  (табл. 72 [3]).

$$\sigma_p = \frac{N_p}{\varphi \cdot A_p} = \frac{170,164}{0,731 \cdot 17,2} = 13,534 \text{ кН / см}^2 < R \cdot \gamma = 24 \cdot 0,75 = 18 \text{ кН / см}^2.$$

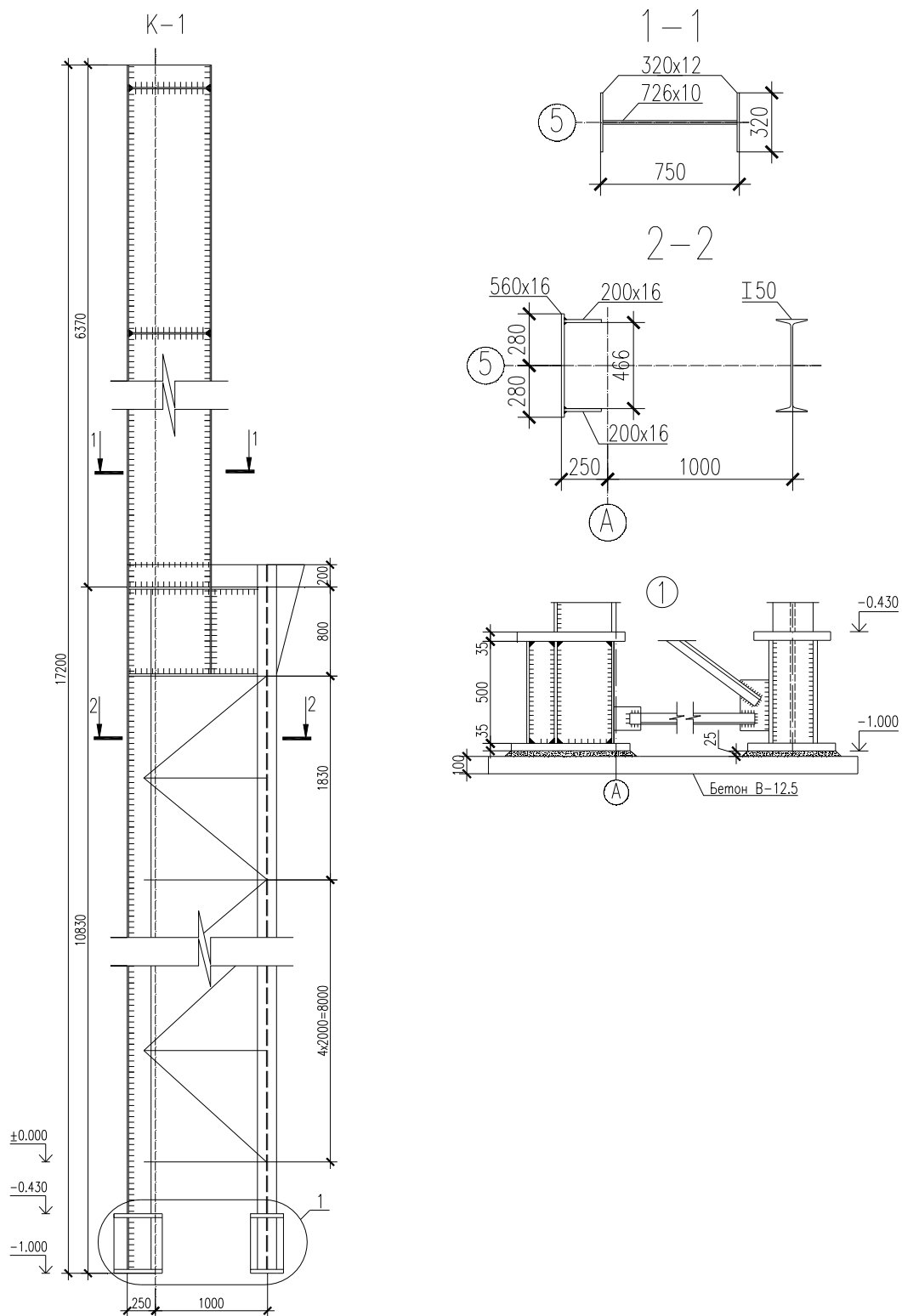


Рис. 6. Конструктивная схема колонны



## 5.6. Проверка устойчивости колонны в плоскости действия момента как единственного стержня

Геометрические характеристики сечения:

$$A = A_{B1} + A_{B2} = 100 + 120 = 240 \text{ см}^2.$$

$$I_{x1} = A_{B1} \cdot y_1^2 + A_{B2} \cdot y_2^2 = 100 \cdot 64,481^2 + 120 \cdot 53,735^2 = 762273,963 \text{ см}^4.$$

$$i_x = \sqrt{I_{x1}/A} = \sqrt{\frac{762273,963}{240}} = 56,357 \text{ см}.$$

$$\lambda_q = l_{x,1}/i_x = 2166/56,357 = 38,434.$$

Приведенная гибкость:

$$\lambda_{\text{нр}} = \sqrt{\lambda_x^2 + \alpha \cdot (A/A_p)} = \sqrt{38,434^2 + 31,762 \cdot \left(\frac{240}{34,4}\right)} = 41,216.$$

$$l_p = \sqrt{h_H^2 + (l_{B1}/2)^2} = \sqrt{125^2 + (300/2)^2} = 195,256 \text{ см}$$

$$\alpha_1 = 10 \frac{l_p^3}{b^2 l_b}; \quad b=125; \quad \alpha_1 = 10 \frac{195,256^3}{125^2 \cdot 300/2} = 31,762$$

$$A_{p1} = 2A_p = 2 \cdot 17,2 = 34,4; \quad \lambda_{\text{нр}} = \lambda \cdot \sqrt{R/E} = 41,216 \sqrt{24/2,06 \cdot 10^4} = 1,407.$$

Для комбинации усилия, догружающих наружную ветвь (сечение 1-1).

$$N_2 = 2786,08 \text{ кН}; \quad M_2 = 1356,24 \text{ кНм}.$$

$$m = \frac{M_2 \cdot A \cdot (y_2 + Z_0)}{N_2 I_x} = \frac{1356,24 \cdot 240 \cdot (53,735 + 6,784)}{2786,08 \cdot 762273,963} = 0,928.$$

Так как  $\lambda_{\text{нр}} = 1,407 \Leftrightarrow \varphi_1 = 0,593$  (приложение 9[3]);

$$\sigma = \frac{N_2}{\varphi_1 \cdot A} = \frac{2786,08}{0,593 \cdot 240} = 19,576 \text{ кН / см}^2 < 24 \text{ кН / см}^2.$$

Для комбинации усилий, догружающих подкрановую ветвь (сечение 2-2).

$$N_1 = 2631,04 \text{ кН}; \quad M_1 = -794,69 \text{ кНм}.$$

$$m = \frac{M_1 \cdot A \cdot y_1}{N_1 \cdot I_x} = \frac{794,69 \cdot 240 \cdot 64,481}{2631,04 \cdot 762273,963} = 0,613; \Leftrightarrow \varphi_e = 0,716.$$

$$\sigma = \frac{N_1}{\varphi_e \cdot A} = \frac{2631,04}{0,716 \cdot 240} = 15,311 \text{ кН / см}^2 < 24 \text{ кН / см}^2.$$

Проверки показали, что устойчивость колонны как единого стержня в плоскости рамы обеспечена. Из плоскости рамы устойчивость как единого стержня не проверяется, так как это условие устойчивости из плоскости рамы каждой ветви в отдельности.

### 5.7. Конструирование и расчёт узла сопряжения верхней и нижней частей колонны

Расчётные комбинации усилий над уступом в сечении 2-2:

$$M_1 = 427,52 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad N_1 = 322,905 \text{ кН}.$$

$$M_2 = -213,100 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad N_2 = 700,905 \text{ кН}.$$

$$\text{Давление кранов } D_{\max} = 2186,593 \text{ кН}.$$

Прочность стыков шва Ш-1 (рис. 7) проверяем по нормальным напряжениям в крайних точках сечения надкрановой части. Площадь шва равна площади сечения колонны:

1-я комбинация усилия:

наружная полка:

$$\sigma = \frac{N_1}{A} + \frac{|M_1|}{W} = \frac{322,905}{126,605} + \frac{427,52}{5352,740} = 10,537 \text{ кН} / \text{см}^2 < R_{wy} \gamma_c = 24 \cdot 0,85 = 20,4 ;$$

внутренняя полка:

$$\sigma = \frac{N_1}{A} - \frac{|M_1|}{W} = \frac{322,905}{126,605} - \frac{427,52}{5352,740} = -5,436 \text{ кН} / \text{см}^2 < R_{wy} \gamma_c = 24 \cdot 0,85 = 20,4 ;$$

2-я комбинация:

наружная полка:

$$\sigma = \frac{N_2}{A} + \frac{|M_2|}{W} = \frac{700,905}{126,605} - \frac{21310}{5352,740} = 1,555 \text{ кН} / \text{см}^2 < R_{wy} \gamma_c = 24 \cdot 0,85 = 20,4 ;$$

внутренняя полка:

$$\sigma = \frac{N_2}{A} - \frac{|M_2|}{W} = \frac{700,905}{126,605} + \frac{21310}{5352,740} = 9,517 \text{ кН} / \text{см}^2 < R_{wy} \gamma_c = 24 \cdot 0,85 = 20,4 .$$

Толщина стенки траверсы определяется из условия смятия:

$$t_{TP} = \frac{D_{\max}}{l_{ef} \cdot R_p \cdot \gamma_c} = \frac{2186,593}{40 \cdot 36 \cdot 1} = 0,84 \text{ см}.$$

Длина смятия  $l_{ef}$ , определяется шириной опорного ребра подкрановой балки, которую считаем принятой равной 30 см, и толщиной опорной плиты  $t_{nl} = 2 \text{ см}$ .

Толщину стенки траверсы определяем из условия ее смятия по формуле:

$$l_{mp} = \frac{D_{\max} \cdot \gamma_n}{l_{ef} \cdot R_p} = \frac{2186,593 \cdot 0,95}{34 \cdot 37} = 1,651 \text{ см}.$$

$l_{ef} = b_d + 2 \cdot t = 30 + 2 \cdot 2 = 34 \text{ см}$  (по СНиП II-23-81\* п. 3) для листовой стали С-245.

$$R_p = \frac{R_{nl}}{\gamma_m} = \frac{38}{1,025} = 37 \text{ кН / см}^2.$$

Принимаем толщину траверсы  $l_{mp} = 1,8 \text{ см}$ .

Усилие во внутренней полке верхней части колонны при действии 2-ой комбинации:

$$N_p = \frac{N_2}{2} + \frac{M_2}{h_B} = \frac{700,905}{2} + \frac{21310}{75} = 634,586 \text{ кН}.$$

Длина шва крепления вертикального ребра траверсы к стенке траверсы (шов 2 рис. 7).

$$l_w = \frac{N_p}{(4 \cdot k_f \cdot \beta_f \cdot \gamma_m \cdot R_w) \cdot \min \gamma_d}.$$

Для полуавтоматической сварки принимаем сварочную проволоку марки Св-0.8А,  $d = 1,4 \div 2 \text{ мм}$ ;  $\beta_f = 0,9$ ;  $\beta_z = 1,05$ . принимаем по табл. 34 [1].

Назначаем:

$k_f = 0,6 \text{ см}$ ;  $\gamma_{wf} = 1$ ,  $R_{wf} = 18 \text{ кН / см}^2$ ;  $R_{wz} = 16,5 \text{ кН / см}^2$  принимаем по табл. 3 [1].

$$\beta_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} = 0,9 \cdot 18 \cdot 1 = 16,2 < \beta \cdot R_{wz} \cdot \gamma_w = 1,05 \cdot 16,5 \cdot 1 = 17,3 \cdot \text{кН / см}^2$$

$$l_{w2} = \frac{634,586}{4 \cdot 0,6 \cdot 16,2} = 16,321 \text{ см} \leq 85 k_f \cdot \beta_f = 45,9 \text{ см}.$$

В стенке подкрановой ветви делаем прорезь, в которую заводим стенку траверсы. Для расчёта шва крепления траверсы к подкрановой ветви (шов 3, рис. 7) составляем комбинацию, дающую наибольшую опорную реакцию траверсы  $M_2 = -213,100 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ;  $N_2 = 700,905 \text{ кН}$  (сечение 2-2).

$$F = \frac{N}{2} \cdot \frac{h_B}{h_H} - \frac{M}{h_H} + D_{\max} \cdot 0,9 = \frac{700,905}{2} \cdot \frac{75}{125} - \frac{(-21310)}{125} + 2186,593 \cdot 0,9 = 2348,685 \text{ кН}.$$

Требуемая длина шва:

$$l_{w3} = \frac{F}{4 \cdot k_f \cdot (\beta_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf}) \cdot \gamma_c} = \frac{2348,685}{4 \cdot 0,6 \cdot 16,2 \cdot 1} = 60,409 \text{ см}.$$

Из условия прочности стенки подкрановой ветви в месте крепления траверсы определяем высоту траверсы:

$$h_{TP} \geq \frac{F}{2 \cdot t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{2348,685}{2 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 1} = 83,881, \text{ где}$$

$t_{cm} = 1 \text{ см}$  — толщина стенки двутавра 50 по сортаменту;

$R_s = 0,58 \cdot R_y = 14 \text{ кН} / \text{см}^2$  согласно табл. 1 [1].

Принимаем  $h_{TP} = 90 \text{ см}$ . Из конструктивных соображений  $h_{TP\min} \geq 0,5h_H$ , т. е.  $h_{\min} = 62,5 \text{ см}$ .

Проверить прочность траверсы как балки, нагруженной усилиями  $N$ ,  $M$ ,  $D_{\max}$ . Найдём геометрические характеристики сечения траверсы (рис. 7). Нижний пояс траверсы принимаем конструктивно  $320 \times 20 \text{ мм}$ , верхние горизонтальные рёбра — из двух листов  $160 \times 20 \text{ мм}$ .

Положение центра тяжести сечения:

$$y_0 = \frac{2 \cdot 16 \cdot 2,0 \cdot 70 + 88 \cdot 1,6 \cdot 46 + 32 \cdot 2 \cdot 1,0}{2 \cdot 16 \cdot 2,0 + 88 \cdot 1,6 + 2,0 \cdot 32} = 41 \text{ см};$$

$$I_x = \frac{1,6 \cdot 88^3}{12} + 88 \cdot 1,6 \cdot 5^2 + 32 \cdot 2,0 \cdot 40^2 + 2 \cdot 16 \cdot 2,0 \cdot 29^2 = 250606,9 \text{ см}^4;$$

$$W_x = \frac{I_x}{y_{\max}} = \frac{250606,9}{90 - 41} = 5114,43 \text{ см}^3.$$

Максимальный изгибающий момент в траверсе возникает при 2-ой комбинации усилий.

$$M_{TP} = F_{TP1} \cdot (h_H - h_B) = \left( -\frac{M}{h_H} + \frac{N}{2} \cdot \frac{h_B}{h_H} \right) \cdot (h_H - h_B);$$

$$M_{TP} = \left( \frac{-21310}{125} + \frac{700,905 \cdot 75}{2 \cdot 125} \right) \cdot (125 - 75) = 1989,575 \text{ кН} \cdot \text{см};$$

$$\sigma_{TP} = \frac{M_{TP}}{W_{\min}} = \frac{1989,575}{5114,43} = 0,389 \text{ кН} / \text{см}^2 \langle R = 24 \text{ кН} / \text{см}^2.$$

Максимальная поперечная сила в траверсе с учетом усилия от кранов:

$$Q_{\max} = \frac{N \cdot h_B}{2h_H} - \frac{M}{h_H} + \frac{\kappa \cdot 0,9 \cdot D_{\max}}{2} = \frac{700,905 \cdot 75}{2 \cdot 125} - \frac{(-21310)}{125} +$$

$$+ \frac{1,2 \cdot 0,9 \cdot 2186,593}{2} = 1561,512 \text{ кН},$$

$k = 1,2$  – коэффициент, учитывающий неравномерную передачу усилий  $D_{\max}$ .

$$\tau = \frac{Q_{\max}}{t_{mp} \cdot h_{mp}} = \frac{1561,512}{1,6 \cdot 90} = 10,844 \langle R_s = 14 \text{ кН} / \text{см}^2.$$

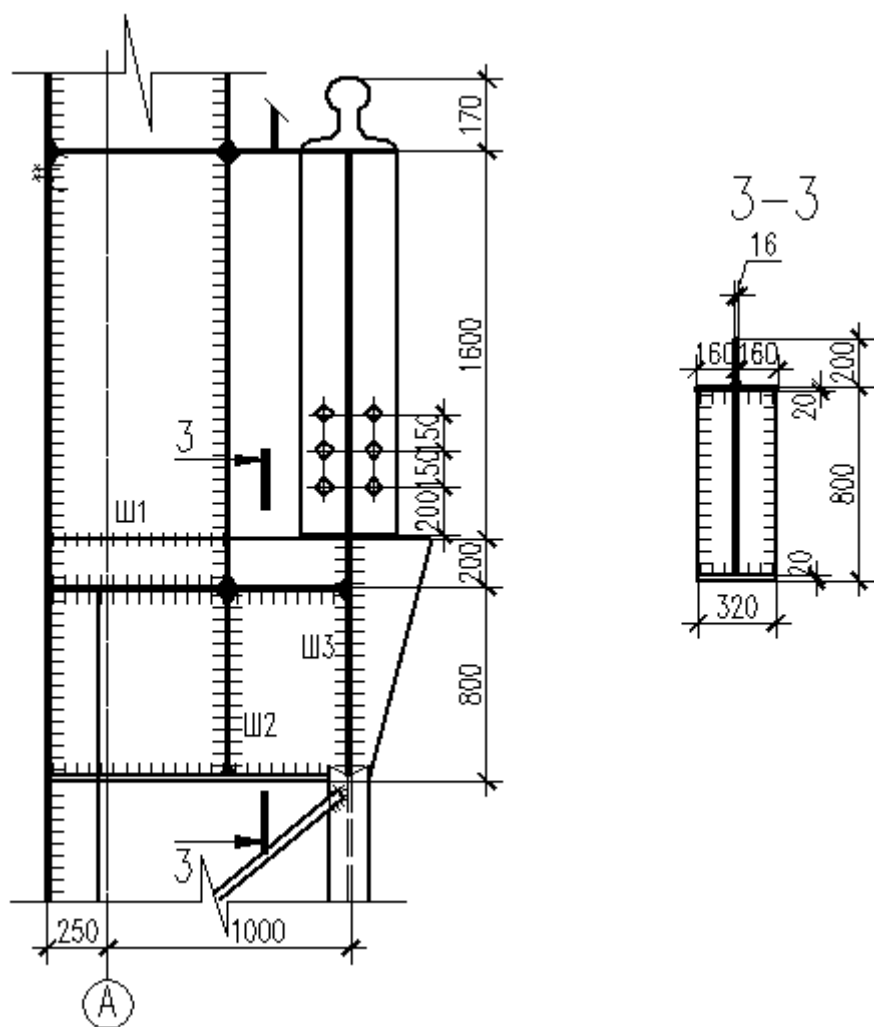


Рис. 7. Сопряжение верхней и нижней частей колонны

## 5.8. Расчёт и конструирование базы колонны

Ширина нижней части колонны равна 1,25 м. Базу проектируем раздельного типа. Расчётные комбинации усилий в нижнем сечении колонны (сечении 4-4):

$M_1=1356,24$  кН·м;  $N_1=2786,08$  кН (для расчета базы наружной ветви);

$M_1=-699,76$  кН·м;  $N_1=2445,88$  кН (для расчета базы внутренней ветви).

Усилия в ветвях колонны:

$$N_{B1} = \frac{N_1 \cdot y_2}{h_0} + \frac{M_1}{h_0} = \frac{2786,08}{118,216} \cdot 53,735 + \frac{1356,24}{118,216} = 2413,667 \text{ кН}.$$

$$N_{B2} = \frac{N_2 \cdot y_1}{h_0} + \frac{M_2}{h_0} = \frac{2445,88}{118,216} \cdot 64,481 + \frac{699,76}{118,216} = 1926,04 \text{ кН}.$$

## 5.9. База наружной ветви

Требуемая площадь плиты:

$$A_{TP} = \frac{N_{B1}}{R_\phi} = \frac{2413,667}{0,9} = 2140,044 \text{ см}^2,$$

где  $R_\phi = \gamma \cdot R_\sigma = 1,2 \cdot 0,75 = 0,9$  кН/см (бетон В12,5).

Ширина плиты  $b_n$  равна (см. рис. 8):

$$B \geq b_k + 2c_2 = 50 + 2 \cdot 5 = 60 \text{ см} \text{ Принимаем } B = 60 \text{ см}.$$

$$L_{пл} = \frac{A_{пл}}{B} = \frac{2140,044}{60} = 35,667 \text{ см. Принимаем } 50 \text{ см}.$$

$$A_{пл.фак.} = 36 \cdot 60 = 2160 \text{ см}^2 \geq A_{пл.тр.}$$

Среднее напряжение в бетоне под плитой.

$$\sigma_\phi = \frac{N_{B1}}{b \cdot L} = \frac{2413,667}{2160} = 0,892 \text{ кН/см}^2.$$

$$2(b_f + t_w - z_0) = 2 \cdot (20 + 1,0 - 6,784) = 14,216 \text{ см}.$$

Определяем изгибающие моменты на отдельных участках плиты.

$$\text{При } t_{TP} = 1,0 \text{ см; } C_1 = \frac{(36 - 14,216 - 2 \cdot 1,0)}{2} = 9,892 \text{ см}$$

Принимаем  $C_1 = 10 \text{ см}$ .

Участок 1 (консольный свес  $C_1 = 10 \text{ см}$ ).

$$M_1 = \frac{\sigma_\phi^2 \cdot c_1^2}{2} = \frac{0,892^2 \cdot 10^2}{2} = 39,783 \text{ кНсм}.$$

Участок 2 (консольный свес  $C = C_2 = 10,0 \text{ см}$ ).

$$M_2 = \frac{0,892^2 \cdot 10,0^2}{2} = 39,783 \text{ кНсм}.$$

Участок 3 (плита, опёртая на 4 стороны).

$$\frac{b}{a} = \frac{46,6}{20} = 2,33 \Rightarrow \alpha = 0,125 \text{ табл. 8.5 [3].}$$

$$M_3 = \alpha \cdot \sigma_\phi \cdot a^2 = 0,125 \cdot 0,892 \cdot 20^2 = 44,6 \text{ кНсм}.$$

Участок 4 (плита, опёртая на 4 стороны).

$$\frac{b}{a} = \frac{46,6}{7} = 6,657 \Rightarrow \alpha = 0,125$$

$$M_4 = 0,125 \cdot 0,892 \cdot 7^2 = 5,464 \text{ кНсм}.$$

Требуемая толщина плиты:

$$t_{пл} = \sqrt{\frac{6M_{MAX}}{R_y \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 44,6}{24 \cdot 1,2}} = 3,048 \text{ см} (\pm 2 \text{ мм на фрезеровку}).$$

Принимаем  $t_{пл} = 3,5 \text{ см}$ ;  $R = 24 \text{ кН/см}^2$  для листовой стали С-245  
 $t = 20\text{--}40 \text{ мм}$ .

Высоту траверсы (Ш1) определяем из условия размещения сварных швов. Сварка полуавтоматическая, проволокой Св-0,8А,  $d = 1,4\text{--}2,0 \text{ мм}$ ,  
 $k_f = 0,8 \text{ мм}$ .

$$l_{w.TP} = \left[ \frac{N_{B1}}{4 \cdot k_f \cdot (\beta_f \cdot R_{wy} \cdot \gamma_{wy}) \cdot \gamma_c} \right] = \frac{2413,667}{4 \cdot 0,8 \cdot 16,2 \cdot 1} = 37,154 \text{ см}$$

$$l_w \cdot 85 \cdot k_f \cdot \beta_f = 85 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 61,2 \text{ см}.$$

Принимаем высоту траверсы  $h_{TP} = 50 \text{ см}$ .



Проверка прочности траверсы производится как для балки на двух опорах.

Равномерно распределённая нагрузка:

$$q_{mp} = \sigma_{\phi} \cdot b / 2 = 0,892 \cdot 50 / 2 = 22,3 \text{ кН/см}$$

$$M_1 = \frac{q_{mp} \cdot l^2}{2} = \frac{22,3 \cdot 8,0^2}{2} = 713,6 \text{ кН} \cdot \text{см}$$

$$M_2 = \frac{q_{mp} \cdot l^2}{8} - M_1 = \frac{22,3 \cdot 46,6^2}{8} - 713,6 = 5339,624 \text{ кН} \cdot \text{см}.$$

Условие прочности траверсы имеет вид:

$$\sigma = M_{MAX} / W_{TP} = 5339,624 / 416,67 = 12,815 < 24 \text{ кН} / \text{см}^2, \text{ где}$$

$$W_{TP} = t_{TP} \cdot \frac{h_{TP}^2}{6} = 1,0 \cdot \frac{50^2}{6} = 416,67 \text{ см}^3.$$

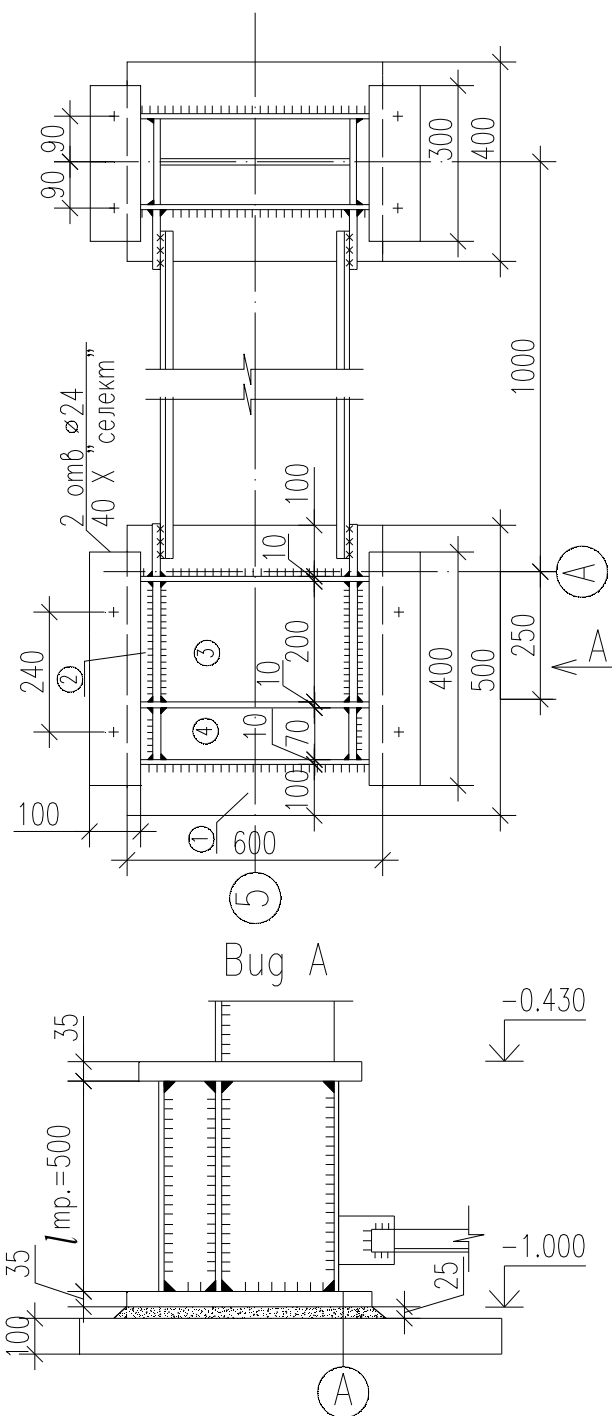


Рис. 8. База колонны

## 5.10. Расчёт анкерных болтов

Расчётные усилия в колонне для расчёта анкерных болтов:

$$N_{MIN} = 477,945 \text{ кН}; M = 603,08 \text{ кНм}$$

Принимаем, что центр соединения анкерных болтов каждой ветви совпадает с центром оси ветви колонны. Усилия в анкерных болтах для сквозной колонны равны:

$$F_a = -N_{MIN} \cdot \frac{y_2}{h_0} + \frac{M}{h_0} = -477,945 \cdot \frac{53,735}{118,216} + \frac{60308}{118,216} = 292,901 \text{ кН}$$

Принимаем анкерные болты из стали 40 X «селект»  $R_{bt} = 11 \text{ кН/см}^2$  – расчётное сопротивление болтов на растяжение по табл. 61\* [1].

$$A_z = \frac{F_a}{R_{bt}} = \frac{292,901}{11} = 26,627 \text{ см}^2$$

Принимаем по шесть болтов с каждой стороны базы диаметром  $d=24$  мм.

$$A_n = 4,52 \text{ см}^2; A_{bn} = 4,52 \cdot 6 = 27,12 \text{ см}^2 > 7,78 \text{ см}^2$$

Нагрузка на подкрановую ветвь меньше, чем на наружную.

Требуемая площадь опорной плиты:

$$A_{пл1} = \frac{N_{B2}}{\sigma_\phi} = \frac{1926,04}{0,9} = 2681,852 \text{ см}^2$$

Принимаем размер плиты:  $60 \times 50 \text{ см}$ ,  $A_{пл} = 3000 \text{ см}^2$ .

Проверка фактического соотношения жесткости нижней и верхней частей колонны.

$$I_{x2} / I_{x1} = \frac{200727,738}{762273,963} = 0,263 > 0,2$$

Отличие фактического соотношения составляет  $\Delta$ :

$$\Delta = \left( \frac{0,263 - 0,2}{0,263} \right) \times 100\% = 23,95\% < 30\% \text{ – допустимого расхождения.}$$

## 6. Конструирование и расчёт сквозного сечения ригеля

Постоянная распределённая нагрузка условно прикладывается в верхних узлах ферм. Равномерно распределённая нагрузка определена в табл. № 1, из которой видно, что  $q_k = 0,808 \text{ кН/м}^2$ .

Схемы действия нагрузок показаны на рис. 9.

Величина узловой постоянной нагрузки  $P_{1,2}$ :

$$P_1 = q_k \cdot B \cdot 0,5 \cdot d = 0,808 \cdot 10 \cdot 3 = 11,514 \text{ кН}.$$

$$P_2 = q_k \cdot B \cdot d = 0,808 \cdot 10 \cdot 3 = 23,028 \text{ кН},$$

где  $\alpha$  – длина панели по верхнему поясу;  $B$  – шаг ферм.

Снеговая нагрузка определяется по СнИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия». С учётом принятого уклона кровли  $i=0.015$  коэффициент неравномерности снега  $C=1$ . Узловая снеговая нагрузка  $F_{1,2}$  равна:

$$F_1 = S_q \cdot B \cdot 0,5 \cdot d = 3,2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 3 = 48 \text{ кН}.$$

$$F_2 = S_q \cdot B \cdot d = 3,2 \cdot 10 \cdot 3 = 96 \text{ кН}.$$

Нагрузка от опорных моментов (табл. 5):

- опорный момент (слева) –  $M_1 = -656,08 \text{ кН} \cdot \text{м}$  (1;2;3;4–;5\*);
- опорный момент (справа) –  $M_2 = -392,63 \text{ кН} \cdot \text{м}$  (1;2;3\*;4–\*;5);
- опорный момент (слева) –  $M_3 = -443,45 \text{ кН} \cdot \text{м}$  (1;3\*;4–;5\*);
- опорный момент (справа) –  $M_4 = -46,16 \text{ кН} \cdot \text{м}$  (1;3;4–\*;5).
- Величины распоров  $H$  определяются по эпюрам поперечных сил с учётом расчётных сочетаний нагрузок (рис. 5, табл. 5):

- рамный распор 1 (от левой ст.)  $\rightarrow H_1 = -150,57 \text{ кН}$  (1;2;3\*;4–;5\*);
- рамный распор 2 (от правой ст.)  $\leftarrow H_2 = -125,88 \text{ кН}$  (1;2;3;4–\*;5);
- рамный распор 3 (от левой ст.)  $\rightarrow H_3 = -117,9 \text{ кН}$  (1;3\*;4–;5\*);
- рамный распор 4 (от правой ст.)  $\leftarrow H_4 = -93,41 \text{ кН}$  (1;3;4–\*;5).

При вычислении усилий в нижнем поясе от каждой пары распоров  $H_1 - H_2$  и  $H_3 - H_4$  принимается, что разность этих значений распределяется линейно между элементами нижнего пояса.

## 6.1. Статический расчет фермы с помощью ЭВМ [5]

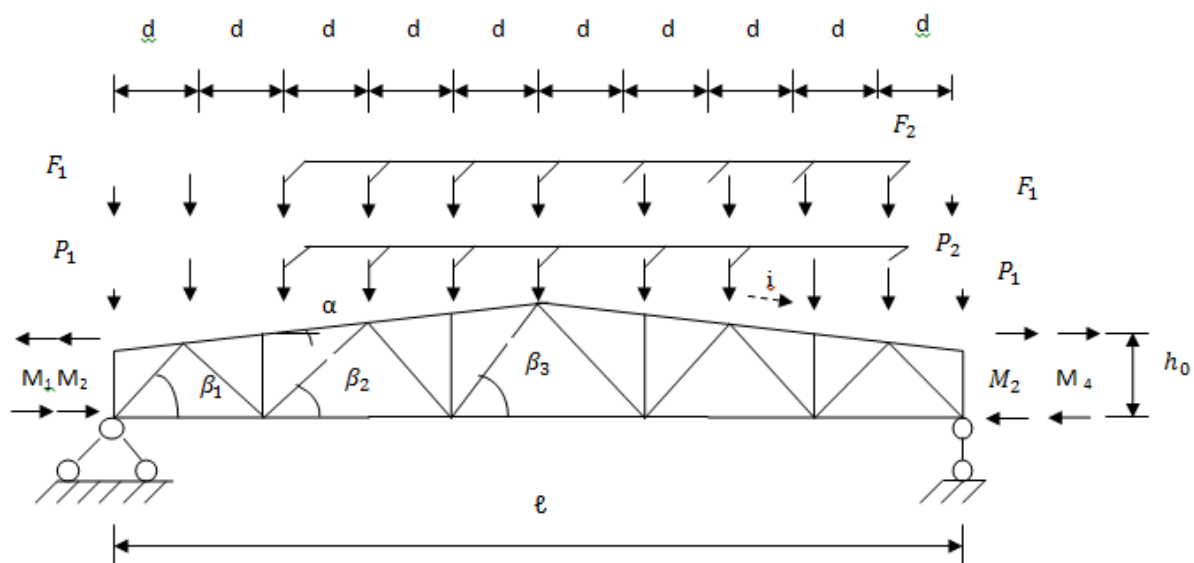


Рис. 9. Геометрическая схема фермы –  $10d$ . Схема вертикальных нагрузок и опорных моментов действующих на узлы фермы

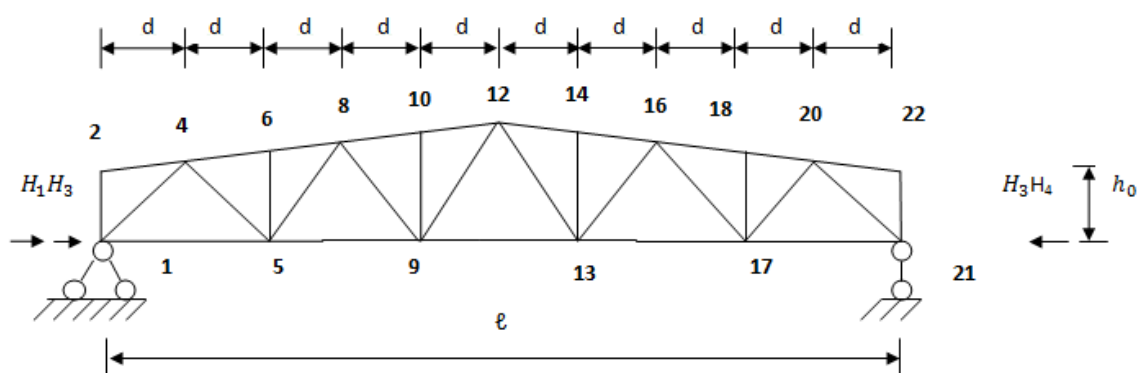


Рис. 10. Схема нумерации узлов фермы –  $10d$ . Номера 3; 7; 11; 15; 21 условно не показаны. Схема нагрузок рамного распора

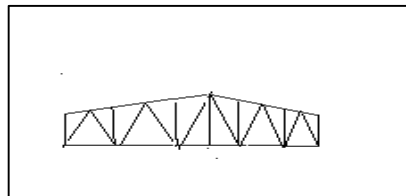
### 6.1.1. Статический расчёт рамы на постоянную нагрузку

статический расчёт симметричной фермы на вертикальную нагрузку

**(постоянная)**

I. Геометрические размеры фермы:

|   |                    |       |
|---|--------------------|-------|
| 1 | пролёт<br>(м)      | 30    |
| 2 | h <sub>о</sub> (м) | 3,15  |
| 3 | уклон<br>в.п.      | 0,015 |
| 4 | к.<br>панелей      | 10    |
| 5 | панель<br>(м)      | 3,00  |



II. Узловые нагрузки по верхнему поясу:

|           |        |        |        |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| № узла    | 2; 22  | 4; 20  | 6; 18  | 8; 16  | 10; 14 | 12     |
| нагр.(кн) | 11,514 | 23,028 | 23,028 | 23,028 | 23,028 | 23,028 |
| нагр.(кн) | 11,514 | 23,028 | 23,028 | 23,028 | 23,028 |        |

III. Результаты расчёта:

|                        |  |        |
|------------------------|--|--------|
| относит. дл.<br>панели |  | 0,1    |
| опорн. реакция –<br>R1 |  | 115,14 |
| опорн. реакция –<br>R2 |  | 115,14 |

|                |       |
|----------------|-------|
| $\Delta$ (м) = | 0,045 |
| a1             | 0,015 |
| b1             | 0,817 |
| b2             | 0,831 |
| b3             | 0,844 |

усилия в стержнях фермы (кн)

|            |            |         |         |         |         |         |
|------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| верх. пояс | № стерж.   | (2–4)   | (4–6)   | (6–8)   | (8–10)  | (10–12) |
|            | усил. (кн) | 0       | –170,60 | –170,60 | –248,98 | –248,98 |
| ниж. пояс  | № стерж.   | (1–5)   | (5–9)   | (9–13)  |         |         |
|            | усил. (кн) | 97,30   | 220,82  | 255,87  |         |         |
| раскосы    | № стерж.   | (1–4)   | (4–5)   | (5–8)   | (8–9)   | (9–12)  |
|            | усил. (кн) | –142,15 | 107,05  | –74,50  | 41,72   | –10,41  |
| стойки     | № стерж.   | (1–2)   | (5–6)   | (9–10)  |         |         |
|            | усил. (кн) | –11,514 | –23,028 | –23,03  |         |         |

Фамилия И.

С-41

23.03.2012

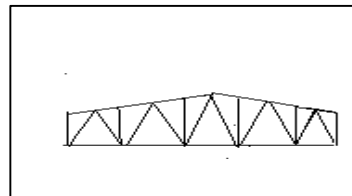
## 6.1.2. Статический расчёт рамы на снеговую нагрузку

статический расчёт симметричной фермы на вертикальную нагрузку

(снег)

I. Геометрические размеры фермы:

|   |                    |       |
|---|--------------------|-------|
| 1 | пролёт<br>(м)      | 30    |
| 2 | h <sub>0</sub> (м) | 3,15  |
| 3 | уклон<br>в.п.      | 0,015 |
| 4 | к.<br>панелей      | 10    |
| 5 | панель<br>(м)      | 3,00  |



II. Узловые нагрузки по верхнему поясу:

| № узла    | 2; 22 | 4; 20 | 6; 18 | 8; 16 | 10; 14 | 12 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|--------|----|
| нагр.(кн) | 48    | 96    | 96    | 96    | 96     | 96 |
| нагр.(кн) | 48    | 96    | 96    | 96    | 96     |    |

III. Результаты расчёта:

|                        |  |     |
|------------------------|--|-----|
| относит. дл.<br>панели |  | 0,1 |
| опорн. реакция –<br>R1 |  | 480 |
| опорн. реакция –<br>R2 |  | 480 |

|                |       |
|----------------|-------|
| $\Delta$ (м) = | 0,045 |
| a1             | 0,015 |
| b1             | 0,817 |
| b2             | 0,831 |
| b3             | 0,844 |

усилия в стержнях фермы (кн)

| верх. пояс | № стерж.   | (2–4)   | (4–6)   | (6–8)   | (8–10)   | (10–12)  |
|------------|------------|---------|---------|---------|----------|----------|
|            | усил. (кн) | 0       | –711,19 | –711,19 | –1037,95 | –1037,95 |
| ниж. пояс  | № стерж.   | (1–5)   | (5–9)   | (9–13)  |          |          |
|            | усил. (кн) | 405,63  | 920,55  | 1066,67 |          |          |
| раскосы    | № стерж.   | (1–4)   | (4–5)   | (5–8)   | (8–9)    | (9–12)   |
|            | усил. (кн) | –592,59 | 446,27  | –310,58 | 173,93   | –43,39   |
| стойки     | № стерж.   | (1–2)   | (5–6)   | (9–10)  |          |          |
|            | усил. (кн) | –48     | –96     | –96,00  |          |          |

Фамилия И.

С-41

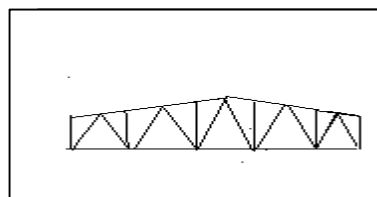
23.03.2012

### 6.1.3. Усилия в стержнях фермы от опорных моментов М1 и М2

Усилия в стержнях фермы от опорных моментов М1 и М2.

I. Геометрические размеры фермы:

|   |                    |       |
|---|--------------------|-------|
| 1 | пролёт (м)         | 30    |
| 2 | h <sub>0</sub> (м) | 3,15  |
| 3 | уклон в.п.         | 0,015 |
| 4 | к. панелей         | 10    |
| 5 | панель (м)         | 3,00  |



II. Опорные моменты:

| моменты        | М1      | М2      |
|----------------|---------|---------|
| значение(кн*м) | -656,08 | -392,63 |

III. Результаты расчёта:

|                     |  |         |
|---------------------|--|---------|
| относит. дл. панели |  | 0,1     |
| опорн. реакция – R1 |  | 8,7817  |
| опорн. реакция – R2 |  | -8,7817 |

|         |           |
|---------|-----------|
| Δ (м) = | 0,045     |
| a1      | 0,0149989 |
| b1      | 0,8168648 |
| b2      | 0,8307132 |
| b3      | 0,8441540 |

усиления в стержнях фермы (кн)

| верх. пояс | № стерж.   | (2–4)   | (4–6)   | (6–8)   | (8–10) | (10–12) |
|------------|------------|---------|---------|---------|--------|---------|
|            | усил. (кн) | 208,30  | 186,25  | 186,25  | 228,69 | 228,69  |
| ниж. пояс  | № стерж.   | (1–5)   | (5–9)   | (9–13)  |        |         |
|            | усил. (кн) | -197,10 | -175,64 | -155,36 |        |         |
| раскосы    | № стерж.   | (1–4)   | (4–5)   | (5–8)   | (8–9)  | (9–12)  |
|            | усил. (кн) | -16,33  | 15,88   | -15,68  | 14,81  | -15,49  |
| стойки     | № стерж.   | (1–2)   | (5–6)   | (9–10)  |        |         |
|            | усил. (кн) | 3,12    | 0       | 0,00    |        |         |

Фамилия И.

С-41

23.03.2012



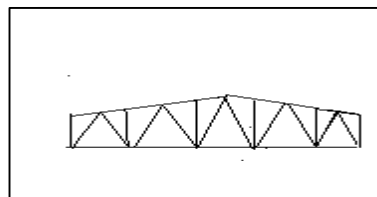
## 6.1.4. Усилия в стержнях фермы от опорных моментов М3 и М4

Усилия в стержнях фермы от опорных моментов М3 и М4.

I. Геометрические размеры фермы:

таб. 1

|   |                    |       |
|---|--------------------|-------|
| 1 | пролёт (м)         | 30    |
| 2 | h <sub>0</sub> (м) | 3,15  |
| 3 | уклон в.п.         | 0,015 |
| 4 | к. панелей         | 10    |
| 5 | панель (м)         | 3,00  |



II. Опорные моменты:

| моменты        | М3      | М4     |
|----------------|---------|--------|
| значение(кн*м) | -443,45 | -46,16 |

III. Результаты расчёта:

|                     |          |
|---------------------|----------|
| относит. дл. панели | 0,1      |
| опорн. реакция – R1 | 13,2430  |
| опорн. реакция – R2 | -13,2430 |

|                |           |
|----------------|-----------|
| $\Delta$ (м) = | 0,045     |
| a1             | 0,0149989 |
| b1             | 0,8168648 |
| b2             | 0,8307132 |
| b3             | 0,8441540 |

усиления в стержнях фермы (кн)

| верх. пояс | № стерж.   | (2–4)   | (4–6)  | (6–8)  | (8–10) | (10–12) |
|------------|------------|---------|--------|--------|--------|---------|
|            | усил. (кн) | 140,79  | 112,36 | 112,36 | 180,91 | 180,91  |
| ниж. пояс  | № стерж.   | (1–5)   | (5–9)  | (9–13) |        |         |
|            | усил. (кн) | -126,36 | -98,70 | -72,53 |        |         |
| раскосы    | № стерж.   | (1–4)   | (4–5)  | (5–8)  | (8–9)  | (9–12)  |
|            | усил. (кн) | -21,06  | 20,48  | -20,22 | 18,82  | -19,97  |
| стойки     | № стерж.   | (1–2)   | (5–6)  | (9–10) |        |         |
|            | усил. (кн) | 2,11    | 0      | 0,00   |        |         |

Фамилия И.

С-41

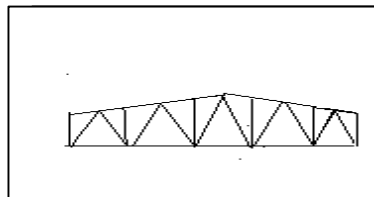
23.03.2012

### 6.1.5. Усилия в стержнях фермы от распоров Н1 – Н2 и Н3 – Н4

Усилия в стержнях фермы от распоров Н1 – Н2 и Н3 – Н4.

I. Геометрические размеры фермы:

|   |                    |       |
|---|--------------------|-------|
| 1 | пролёт<br>(м)      | 30    |
| 2 | h <sub>0</sub> (м) | 3,15  |
| 3 | уклон<br>в.п.      | 0,015 |
| 4 | к.<br>панелей      | 10    |
| 5 | панель<br>(м)      | 3,00  |



II. Значения распоров:

| распор                | Н1      | Н2      | Н3     | Н4     |
|-----------------------|---------|---------|--------|--------|
| значение(кн*м)        | -150,57 | -125,88 | -117,9 | -93,41 |
| 1 узл. ступень усилия | -6,1725 |         |        |        |
| 2 узл. ступень усилия | -6,1225 |         |        |        |

III. Результаты расчёта:

усилия в стержнях фермы (кн)

|                      |            |        |        |         |  |  |
|----------------------|------------|--------|--------|---------|--|--|
| ниж. пояс<br>(Н1;Н2) | № стерж.   | (1–5)  | (5–9)  | (9–11)  |  |  |
|                      | усил. (кн) | 150,57 | 144,40 | 138,225 |  |  |
| ниж. пояс<br>(Н3;Н4) | № стерж.   | (1–5)  | (5–9)  | (9–13)  |  |  |
|                      | усил. (кн) | 117,9  | 111,78 | 105,655 |  |  |

Фамилия И.

С-41

23.03.2012

Таблица 6

Таблица расчетных усилий в стержнях фермы

| элемент | стержень | пост. н-ка<br>1 | снег. н-ка<br>2 | снег (0.9)<br>2а | M1; M2.<br>3 | M3; M4.<br>3а | N1; N2.<br>4 | N3; N4.<br>4а | № нагр. | Усилие   |
|---------|----------|-----------------|-----------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------|----------|
| верхний | (2 - 4)  | 0,00            | 0,00            | 0,00             | 208,30       | 140,79        | 0,00         | 0,00          | 3       | 208,30   |
|         | (4 - 6)  | -170,60         | -711,19         | -640,07          | 186,25       | 112,36        | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -881,79  |
|         | (6 - 8)  | -170,60         | -711,19         | -640,07          | 186,25       | 112,36        | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -881,79  |
|         | (8 - 10) | -248,98         | -1037,95        | -934,16          | 228,69       | 180,91        | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -1286,93 |
| нижний  | (10-12)  | -248,98         | -1037,95        | -934,16          | 228,69       | 180,91        | 0,00         | 0,00          | 1:2     | -1286,93 |
|         | (1 - 5)  | 97,30           | 405,63          | 365,07           | -197,10      | -126,36       | 150,57       | 117,90        | 1:2     | 502,94   |
|         | (5 - 9)  | 220,82          | 920,55          | 828,49           | -175,64      | -98,70        | 144,40       | 111,78        | 1:2     | 1141,36  |
|         | (9-11)   | 255,87          | 1066,67         | 960,00           | -155,36      | -72,53        | 138,23       | 105,66        | 1:2     | 1322,53  |
| раскосы | (1 - 4)  | -142,15         | -592,59         | -533,33          | -16,33       | -21,06        | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -734,74  |
|         | (4 - 5)  | 107,05          | 446,27          | 401,64           | 15,88        | 20,48         | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | 553,32   |
|         | (5 - 8)  | -74,50          | -310,58         | -279,52          | -15,68       | -20,22        | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -385,08  |
|         | (8 - 9)  | 41,72           | 173,93          | 156,54           | 14,81        | 18,82         | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | 215,65   |
| стойки  | (9-12)   | -10,41          | -43,39          | -39,05           | -15,49       | -19,97        | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -53,80   |
|         | (1 - 2)  | -11,51          | -48,00          | -43,20           | 3,12         | 2,11          | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -59,51   |
|         | (5 - 6)  | -23,03          | -96,00          | -86,40           | 0,00         | 0,00          | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -119,03  |
|         | (9 - 10) | -23,03          | -96,00          | -86,40           | 0,00         | 0,00          | 0,00         | 0,00          | 1:2.    | -119,03  |

Таблица 7

Таблица определения расчётных характеристик стержней фермы

| элемент      | стержень  | Усилия   | $\lambda$ (задан.) | $R(y)$ | $\lambda(y_{сл})$ | $\delta$ | $\phi$ | $A(tr)$ | $r(tr)(x)$ | $r(tr)(y)$ | $e(x)(cm)$ | $e(y)(cm)$ |
|--------------|-----------|----------|--------------------|--------|-------------------|----------|--------|---------|------------|------------|------------|------------|
| верхний пояс | (2 - 4)   | 208,30   | 400,00             | 24,00  | 13,65312          | 0        | 1,00   | 8,68    | 0,75       | 0,75       | 300        | 300        |
|              | (4 - 6)   | -881,79  | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 74,93   | 3          | 3          | 300        | 300        |
|              | (6 - 8)   | -881,79  | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 74,93   | 3          | 3          | 300        | 300        |
|              | (8 - 10)  | -1286,93 | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 109,36  | 3          | 3          | 300        | 300        |
|              | (10 - 12) | -1286,93 | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 109,36  | 3          | 3          | 300        | 300        |
| нижний пояс  | (1 - 5)   | 502,94   | 400,00             | 24,00  | 13,65312          | 0        | 1,000  | 20,96   | 1,5        | 1,5        | 600,00     | 600,00     |
|              | (5 - 9)   | 1141,36  | 400,00             | 24,00  | 13,65312          | 0        | 1,00   | 47,56   | 1,5        | 1,5        | 600,00     | 600,00     |
|              | (9 - 13)  | 1322,53  | 400,00             | 24,00  | 13,65312          | 0        | 1,00   | 55,11   | 1,5        | 1,5        | 600,00     | 600,00     |
| раскосы      | (1 - 4)   | -734,74  | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 62,44   | 2,56       | 3,20       | 255,60     | 319,50     |
|              | (4 - 5)   | 553,32   | 400,00             | 24,00  | 13,65312          | 0        | 1,00   | 23,06   | 0,64       | 0,80       | 255,60     | 319,50     |
|              | (5 - 8)   | -385,08  | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 32,72   | 3,56       | 4,45       | 355,90     | 444,87     |
|              | (8 - 9)   | 215,65   | 400,00             | 24,00  | 13,65312          | 0        | 1,000  | 8,99    | 0,89       | 1,11       | 355,90     | 444,87     |
|              | (9 - 12)  | -53,80   | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 0        | 1,00   | -2,24   | 3,61       | 4,52       | 361,25     | 451,56     |
| стойки       | (1 - 2)   | -59,51   | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 5,06    | (---)      | (---)      | (---)      | (---)      |
|              | (5 - 6)   | -119,03  | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 10,11   | 2,592      | 3,24       | 259,20     | 324,00     |
|              | (9 - 10)  | -119,03  | 100,00             | 24,00  | 3,41328           | 25,84216 | 0,490  | 10,11   | 2,664      | 3,33       | 266,40     | 333,00     |



Таблица 8

Таблица проверки стержней «в плоскости фермы» (тавры и уголки)

| элемент                                                                                         | стержень | Усилие   | A(тр)  | r(тр)/r(x) | сечение          | A      | r(x) | ℓ(x)   | φ     | σ      | R(y) | λ(x)   | [λ]   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|--------|------------|------------------|--------|------|--------|-------|--------|------|--------|-------|
| верхний                                                                                         | (2 - 4)  | 208,30   | 8,68   | 0,75       | тавра<br>27,5БТ1 | 113,37 | 5,83 | 300,00 | (--)  | 1,84   | 24   | 51,46  | 400   |
|                                                                                                 | (4 - 6)  | -881,79  | 74,93  | 3,00       |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 9,93   | 24   | 51,46  | 155,2 |
|                                                                                                 | (6 - 8)  | -881,79  | 74,93  | 3,00       |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 9,93   | 24   | 51,46  | 155,2 |
|                                                                                                 | (8 - 10) | -1286,93 | 109,36 | 3,00       |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 14,486 | 24   | 51,46  | 143,8 |
|                                                                                                 | (10-12)  | -1286,93 | 109,36 | 3,00       |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 14,49  | 24   | 51,46  | 143,8 |
| нижний                                                                                          | (1 - 5)  | 502,94   | 20,96  | 1,50       | тавра<br>20БТ1   | 61,25  | 8,17 | 600,00 | (--)  | 8,21   | 24   | 73,44  | 400   |
|                                                                                                 | (5 - 9)  | 1141,36  | 47,56  | 1,50       |                  | 61,25  | 8,17 | 600,00 | (--)  | 18,63  | 24   | 73,44  | 400   |
|                                                                                                 | (9 - 13) | 1322,53  | 55,11  | 1,50       |                  | 61,25  | 8,17 | 600,00 | (--)  | 21,59  | 24   | 73,44  | 400   |
| раскосы                                                                                         | (1 - 4)  | -734,74  | 62,44  | 2,56       | 2уг.140x12       | 64,98  | 2,78 | 255,60 | 0,536 | 21,10  | 24   | 91,94  | 127,2 |
|                                                                                                 | (4 - 5)  | 553,32   | 23,06  | 0,64       | 2уг.100x7        | 27,5   | 3,08 | 255,60 | (--)  | 20,12  | 24   | 82,99  | 400   |
|                                                                                                 | (5 - 8)  | -385,08  | 32,72  | 3,56       | 2уг.140x12       | 64,98  | 2,78 | 355,90 | 0,354 | 16,76  | 24   | 128,02 | 138,1 |
|                                                                                                 | (8 - 9)  | 215,65   | 8,99   | 0,89       | 2уг.75x6         | 17,56  | 2,30 | 355,90 | (---) | 12,28  | 24   | 154,74 | 400   |
|                                                                                                 | (9-12)   | -53,80   | -2,24  | 3,61       | 2уг.75x6         | 17,56  | 2,30 | 361,25 | 0,258 | 11,89  | 24   | 157,06 | 400   |
| стойки                                                                                          | (1 - 2)  | -59,51   | 5,06   | (---)      | (--)             | (--)   | (--) | (--)   | (--)  | (--)   | 24   | (--)   | (---) |
|                                                                                                 | (5 - 6)  | -119,03  | 10,11  | 2,59       | 2уг.75x6         | 17,56  | 2,30 | 259,20 | 0,422 | 16,06  | 24   | 112,70 | 139,8 |
|                                                                                                 | (9 - 10) | -119,03  | 10,11  | 2,66       |                  | 17,56  | 2,30 | 266,40 | 0,407 | 16,66  | 24   | 115,83 | 138,4 |
| Тавры подобраны по ГОСТ 26020-83 ДВУТАВРЫ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТНЫЕ И ТАВРЫ ПОЛУЧАЕМЫЕ ИХ РАЗРЕЗКОЙ |          |          |        |            |                  |        |      |        |       |        |      |        |       |
| Уголки подобраны по ГОСТ 8509-83 УГОЛКИ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТНЫЕ РАВНОПОЛОЧНЫЕ                     |          |          |        |            |                  |        |      |        |       |        |      |        |       |

Таблица проверки стержней «из плоскости фермы»  
(стержни, тавры и уголки)

| элемент                                                                                         | стержень | Усилие   | A(тр)  | r(тр)(y) | сечение          | A      | r(y) | ℓ(y)   | φ     | σ      | R(y) | λ(y)   | [λ]   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|--------|----------|------------------|--------|------|--------|-------|--------|------|--------|-------|
| верхний пояс                                                                                    | (2 - 4)  | 208,30   | 8,68   | 0,75     | тавра<br>27,5БТ1 | 113,37 | 5,83 | 300,00 | (--)  | 1,84   | 24   | 51,46  | 400   |
|                                                                                                 | (4 - 6)  | -881,79  | 74,93  | 3,00     |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 9,93   | 24   | 51,46  | 155,2 |
|                                                                                                 | (6 - 8)  | -881,79  | 74,93  | 3,00     |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 9,93   | 24   | 51,46  | 155,2 |
|                                                                                                 | (8 - 10) | -1286,93 | 109,36 | 3,00     |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 14,486 | 24   | 51,46  | 143,8 |
|                                                                                                 | (10-12)  | -1286,93 | 109,36 | 3,00     |                  | 113,37 | 5,83 | 300,00 | 0,784 | 14,49  | 24   | 51,46  | 143,8 |
| нижний пояс                                                                                     | (1 - 5)  | 502,94   | 20,96  | 1,50     | тавра<br>20БТ1   | 61,25  | 8,17 | 600,00 | (--)  | 8,21   | 24   | 73,44  | 400   |
|                                                                                                 | (5 - 9)  | 1141,36  | 47,56  | 1,50     |                  | 61,25  | 8,17 | 600,00 | (--)  | 18,63  | 24   | 73,44  | 400   |
|                                                                                                 | (9 - 13) | 1322,53  | 55,11  | 1,50     |                  | 61,25  | 8,17 | 600,00 | (--)  | 21,59  | 24   | 73,44  | 400   |
|                                                                                                 | (1 - 4)  | -734,74  | 62,44  | 3,20     |                  | 64,98  | 6,18 | 319,50 | 0,782 | 14,45  | 24   | 51,70  | 143,9 |
| раскосы                                                                                         | (4 - 5)  | 553,32   | 23,06  | 0,80     | 2уг.100х7        | 27,5   | 3,08 | 319,50 | (--)  | 20,12  | 24   | 103,73 | 400   |
|                                                                                                 | (5 - 8)  | -385,08  | 32,72  | 4,45     | 2уг.140х12       | 64,98  | 6,18 | 444,87 | 0,660 | 8,98   | 24   | 71,99  | 157,6 |
|                                                                                                 | (8 - 9)  | 215,65   | 8,99   | 1,11     | 2уг.75х6         | 17,56  | 3,51 | 444,87 | (---) | 12,28  | 24   | 126,74 | 400   |
|                                                                                                 | (9-12)   | -53,80   | -2,24  | 4,52     | 2уг.75х6         | 17,56  | 3,51 | 451,56 | 0,351 | 8,73   | 24   | 128,65 | 400   |
|                                                                                                 | (1 - 2)  | -59,51   | 5,06   | (---)    | (--)             | (--)   | (--) | (---)  | (--)  | (--)   | 24   | (--)   | (---) |
| стойки                                                                                          | (5 - 6)  | -119,03  | 10,11  | 3,24     | 2уг.75х6         | 17,56  | 3,51 | 324,00 | 0,534 | 12,70  | 24   | 92,31  | 148,2 |
|                                                                                                 | (9 - 10) | -119,03  | 10,11  | 3,33     |                  | 17,56  | 2,30 | 333,00 | 0,294 | 23,09  | 24   | 144,78 | 122,3 |
| Тавры подобраны по ГОСТ 26020-83 ДВУТАВРЫ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТНЫЕ И ТАВРЫ ПОЛУЧАЕМЫЕ ИХ РАЗРЕЗКОЙ |          |          |        |          |                  |        |      |        |       |        |      |        |       |
| Уголки подобраны по ГОСТ 8509-93 УГОЛКИ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТНЫЕ РАВНОПОЛОЧНЫЕ                     |          |          |        |          |                  |        |      |        |       |        |      |        |       |

## 6.1.6. Расчёт сварных швов

расчёт сварных швов

расчётные характеристики сварочных материалов

| №  | характеристика                                                  | значение  |
|----|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1  | полуавтомат, Св-08Г2С,<br>d =                                   | (1,4–2)мм |
| 2  | катет шва, [см].<br>k(f) =                                      | 0,8       |
| 3  | $\beta(f)$ =                                                    | 0,9       |
| 4  | $\beta(z)$ =                                                    | 0,45      |
| 5  | $\gamma(\omega f)$ =                                            | 1         |
| 6  | $\gamma(\omega z)$ =                                            | 1         |
| 7  | R( $\omega f$ ) [МПа] =                                         | 215       |
| 8  | R( $\omega z$ ) [МПа] =                                         | 370       |
| 9  | R( $\omega f$ ) * $\beta(f)$ * $\gamma(\omega f)$ [МПа] =       | 193,5     |
| 10 | R( $\omega z$ ) * $\beta(z)$ * $\gamma(\omega z)$ [МПа] =       | 166,5     |
| 11 | [R( $\omega$ ) * $\beta()$ * $\gamma(\omega)$ ](min)<br>[МПа] = | 166,5     |

расчётные длины сварных швов

| стержень | сечение    | N (кн)  | швы по обушке |            |           | швы по перу |            |          |
|----------|------------|---------|---------------|------------|-----------|-------------|------------|----------|
|          |            |         | N(об)         | k(f)<br>см | ℓ(об)(см) | N(п)        | k(f)<br>см | ℓ(п)(см) |
| 1        | 2          | 3       | 4             | 5          | 6         | 7           | 8          | 9        |
| (1–4)    | 2уг.140x12 | –734,74 | –514,316      | 0,8        | 20,30616  | –220,421    | 0,8        | 9,27407  |
| (4–5)    | 2уг.100x7  | 553,32  | 167,762       | 0,8        | 7,297372  | 165,9962    | 0,8        | 7,23109  |
| (5–8)    | 2уг.140x12 | –385,08 | –92,4938      | 0,8        | 4,471991  | –115,523    | 0,8        | 5,336437 |
| (8–9)    | 2уг.75x6   | 215,65  | 150,9564      | 0,8        | 6,666533  | 64,69561    | 0,8        | 3,428514 |
| (9–12)   | 2уг.75x6   | –53,80  | –37,6614      | 0,8        | 2,413718  | –16,1406    | 0,8        | 1,605879 |

## 6.2. Подбор сечений стержней фермы

Подбор сечений сжатых и растянутых стержней производится в соответствии с [3] раздел 9.5. Рассмотрим пример подбора сечения сжатого и растянутого элементов фермы:

*Сжатый пояс (элемент 8–10)*

$N = -1286,93$  кН;  $l_x = l_y = 300$  см.

Принимаем предварительно  $\lambda = 80$ ,  $\varphi = 0,688$  (по табл. 72 [1])

$$A_{TP} = \frac{N}{\varphi \cdot R_y \gamma_c} = \frac{1286,93}{0,688 \cdot 24 \cdot 1} = 12,615 \text{ см}^2.$$

Принимаем: Тавра 27,5БТ1;  $A = 113,37 \text{ см}^2$ ;  $i_x = 5,83 \text{ см}$ ;  $i_y = 5,83 \text{ см}$ .

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} = \frac{300}{5,83} = 51,458; \lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{300}{5,83} = 51,458; \varphi_{\min} = 0,845.$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} = \frac{208,3}{0,845 \cdot 113,37} = 2,174 < 24 \text{ кН / см}^2.$$

*Растянутый пояс (элемент 9–13)*

$N = 1322,53$  кН;  $l_x = 600$  см;  $l_y = 600$  см.

$$A_{TP} = \frac{N}{R_y \gamma_c} = \frac{1322,53}{24 \cdot 1} = 55,105 \text{ см}^2.$$

Принимаем: Тавра 20БТ1;  $A = 61,25 \text{ см}^2$ ;  $i_x = 8,17 \text{ см}$ ;  $i_y = 8,17 \text{ см}$ ;

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} = \frac{600}{8,17} = 73,439; \lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{600}{8,17} = 73,439;$$

$$\sigma = \frac{N}{A \gamma_c} = \frac{1322,53}{61,25 \cdot 1} = 21,592 < 24 \text{ кН / см}^2.$$

Для конструирования фермы должно быть принято не более 6-7 типов сечений стержней. Для этого близкие сечения объединяются по большему профилю.

Расчет остальных элементов решетки и принятые сечения уголков приведены в табличной форме (см. табл. № 8 и 9). При проверке прочности элементов решетки (кроме опорных) введен коэффициент условий работы  $\gamma_c = 0,8$ .



### 6.3. Расчёт узлов фермы

Расчёт сварных швов, соединяющих раскосы с поясами, производится из условия прочности этих швов (см. [3] стр. 285–297). Длина сварных швов по обушке  $I_w^{об}$  и по перу  $I_w^n$  производится по формулам:

$$I_w^{об} = \frac{N_{об}}{k_f \cdot (\beta_w \cdot R_w \cdot \gamma_w)} \min \gamma_c.$$

$$I_w^n = \frac{N_n}{k_f \cdot (\beta_w \cdot R_w \cdot \gamma_w)} \min \gamma_c.$$

$$N_{об} = \frac{(l - z_0)}{h} \cdot N_i; \quad N_n = \frac{z_0}{h} \cdot N_i, \text{ где}$$

$N_i$  – расчётное усилие в  $i$ -м стержне;

$z_0$  – расстояние от обушки до центра тяжести сечения;

$l$  – высота уголка;

$k_f$  – катет сварного шва;

$(\beta_w \cdot R_w \cdot \gamma_w)$  – минимальное значение характеристики сварного шва при сравнении их по металлу шва или по месту границы сплавления.

#### 6.3.1. Нижний опорный узел

Определяем размеры швов для прикрепления нижнего пояса.

$$N_{1-5} = 502,95 \text{ кН}.$$

Для тавра 20БТ1  $z_0 = 4,59 \text{ см}$ ;  $h_{w1} = 8 \text{ мм}$ ;  $h_{w2} = 6 \text{ мм}$ .

Находим:

$$l_{w1} = \frac{385,167}{2 \cdot 0,8 \cdot 17,5} = 13,756 \text{ см}; \quad l_{w2} = \frac{117,783}{2 \cdot 0,6 \cdot 17,5} = 5,609 \text{ см};$$

$$N_{об} = \frac{502,95 \cdot (19,6 - 4,59)}{19,6} = 385,167 \text{ кН}; \quad N_n = \frac{502,95 \cdot 4,59}{19,6} = 117,783 \text{ кН}.$$

Конструктивно принимаем  $l_{w1} = 140 \text{ мм}$ .

Длина опорного столика (Ш1) определяется из условия прочности сварного шва на действие  $N=1,5 \times F_\phi$ , где  $F_\phi = F_R + F_{сн} = 571,14 \text{ кН}$  – опорная реакция от вертикальных нагрузок на нём.  $N = 571,14 \cdot 1,5 = 754,425 \text{ кН}$ .

Для сварки принимаем проволоку Св-08Г2С  $d=1,4 \dots 2 \text{ мм}$ .

$$k_w = 8 \text{ мм}; \beta_w = 0,9; \beta_z = 1,05; \gamma_{wf} = \gamma_{wz} = 1.$$

Несущая способность шва определяется на границе сплавления основного металла и шва.

$$l_{wl} = \frac{754,425}{2 \cdot 0,8 \cdot 17,5} = 26,944 \text{ см. Принимаем } l_s = 28 \text{ см.}$$

$$H = \frac{M_{\max 1}}{h_{op}} + H_1 = \frac{656,08}{3,15} + 150,57 = 358,849 \text{ кН.}$$

Прочность шва Ш2 проверяется по формуле:

$$\tau_w = \sqrt{(\tau_{wf})^2 + (\tau_{wH} + \tau_{wM})^2} \leq R_{wt} = 16,6 \text{ кН/см}^2 ;$$

$$\tau_{wf} = \frac{F_\phi}{2\beta_w \cdot k_w \cdot l_w} = \frac{502,95}{2 \cdot 0,8 \cdot 50 \cdot 1,05} = 5,99 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_{wH} = \frac{358,849}{0,8 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 1,05} = 4,27 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_{wM} = \frac{6 \cdot 358,849 \cdot 15}{0,8 \cdot 1,05 \cdot 50^2 \cdot 2} = 7,69 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_w = \sqrt{5,99^2 + (4,27 + 7,69)^2} = 13,38 \text{ кН/см}^2 < R_{wz} = 16,6 \text{ кН/см}^2 .$$

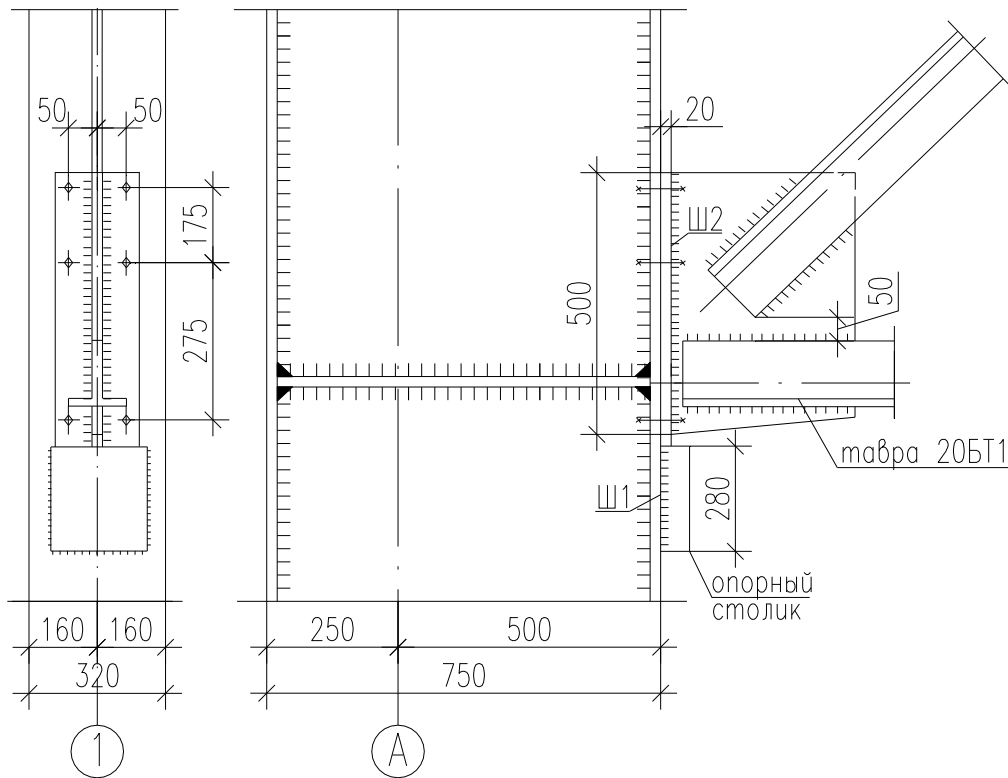


Рис. 10. Нижний опорный узел

### 6.3.2. Верхний узел сопряжения ригеля с колонной

Усилие в верхнем поясе – наибольшее в крайней панели  
 $N_{2-4} = 208,3 \text{ кН}$ .

Для тавра 27,5БТ1  $z_0 = 6,48 \text{ см}$ ;  $h_{w1} = 8 \text{ мм}$ ;  $h_{w2} = 6 \text{ мм}$ .

$$l_{w1} = \frac{208,3 \cdot (19,6 - 6,48)}{19,6 \cdot 17,5 \cdot 0,8 \cdot 2} + 1 = 5,98 \text{ см} \quad l_{w2} = \frac{208,3 \cdot 6,48}{2 \cdot 0,8 \cdot 17,5 \cdot 19,6} = 2,46 \text{ см}.$$

Сопряжение верхнего пояса фермы с колонной производится на болтах с помощью фланцев. Толщиной фланца принимается  $h_\phi = 20 \text{ мм}$ , как для жесткого узла сопряжения ригеля с колонной. Количество болтов:

$$n \geq \frac{208,3}{112} = 1,86$$

$$N_{bt} = R_{bt} \cdot R = 20 \cdot 5,6 = 112 \text{ кН для болта } \varnothing 30 \text{ мм 40Х «селект»}.$$

$N_H = 208,3 \text{ кН} = N_{2-4}$  – усилие растяжение в крайней панели верхнего пояса .

Принимаем 2 болта, симметрично расположенных относительно центра тяжести сечения пояса фермы.

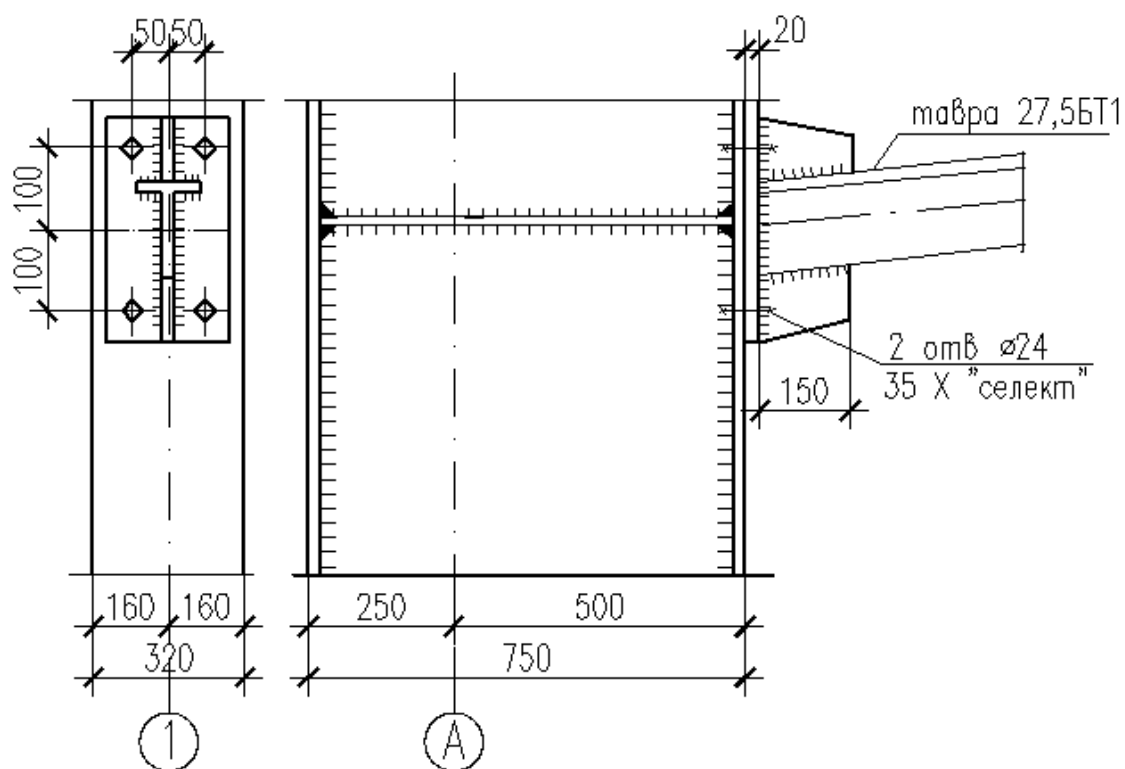


Рис. 11. Верхний опорный узел

## Библиографический список

1. Юдина, А. Ф. Металлические и железобетонные конструкции. Монтаж : учебник для вузов / А. Ф. Юдина. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 302 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-06927-3. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/561681>
2. Юдина, А. Ф. Строительные конструкции. Монтаж : учебник для среднего профессионального образования / А. Ф. Юдина. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 302 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-07027-9. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/564809>
3. Юдина, А. Ф. Строительные конструкции. Монтаж : учебник для среднего профессионального образования / А. Ф. Юдина. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 302 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-07027-9. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/564809>