

Ширина раскрытия трещин для ригелей перекрытий по данным расчета упругой системы a_T^y и с учетом неупругих свойств железобетона a_T^{ny} приведена в табл. 21.

В связи с образованием трещин на опорах ригелей и падением жесткости опорных сечений увеличение моментов в пролете ригелей происходит до 25% при соответствующем снижении момента на опорах по сравнению с результатами расчета упругой системы.

В табл. 22 приведено увеличение в % величин пролетных моментов и уменьшение в % величин суммарных моментов для различных ригелей. Следует отметить, что за счет неупругой работы материалов суммарные моменты в огибающей эпюре снижаются до 6%.

Данные табл. 21 показывают, что если по данным расчета упругой системы трещины в сечениях 4, 13 и 22 превысили допустимые, то при учете неупругих свойств материалов они оказывались в допустимых пределах.

Таблица 22

№ ригеля	Пролетные моменты		Суммарные моменты	
	расчетная нагрузка с $n_1=1$	расчетная нагрузка	расчетная нагрузка с $n_1=1$	расчетная нагрузка
5—6	11,4	13,1	4,6	5
6—7	17,2	18	4,7	5,7
9—10	12	14,8	5,6	5,8
10—11	15,1	16,7	5	5,2
13—14	14,6	18	5,5	6,1
14—15	21,7	25	0,5	1,4

Пример 8. Определить усилия в колоннах продольной рамы одноэтажного отапливаемого производственного здания от температурных воздействий и удлинения нижних поясов подстропильных ферм. Схема рамы представлена на рис. 48.

Здание с подвесными кран-балками. Пролеты по 24 м. Шаг колонн 12 м с подстропильными фермами из стали марки Ст3 по серии ПК-01-125, вып. 1. Марка фермы ПФ-95. Площадь нижнего пояса фермы $F_\phi = 22,6 \text{ см}^2$. Длина температурного блока 216 м. Высота колонн 6,65 м. Сечение колонны $h \times b = 0,5 \times 0,6 \text{ м}$. Марка бетона 200. $F_a = F'_a = 27,4 \text{ см}^2$. Толщина защитного слоя $a' = 0,05 \text{ м}$.

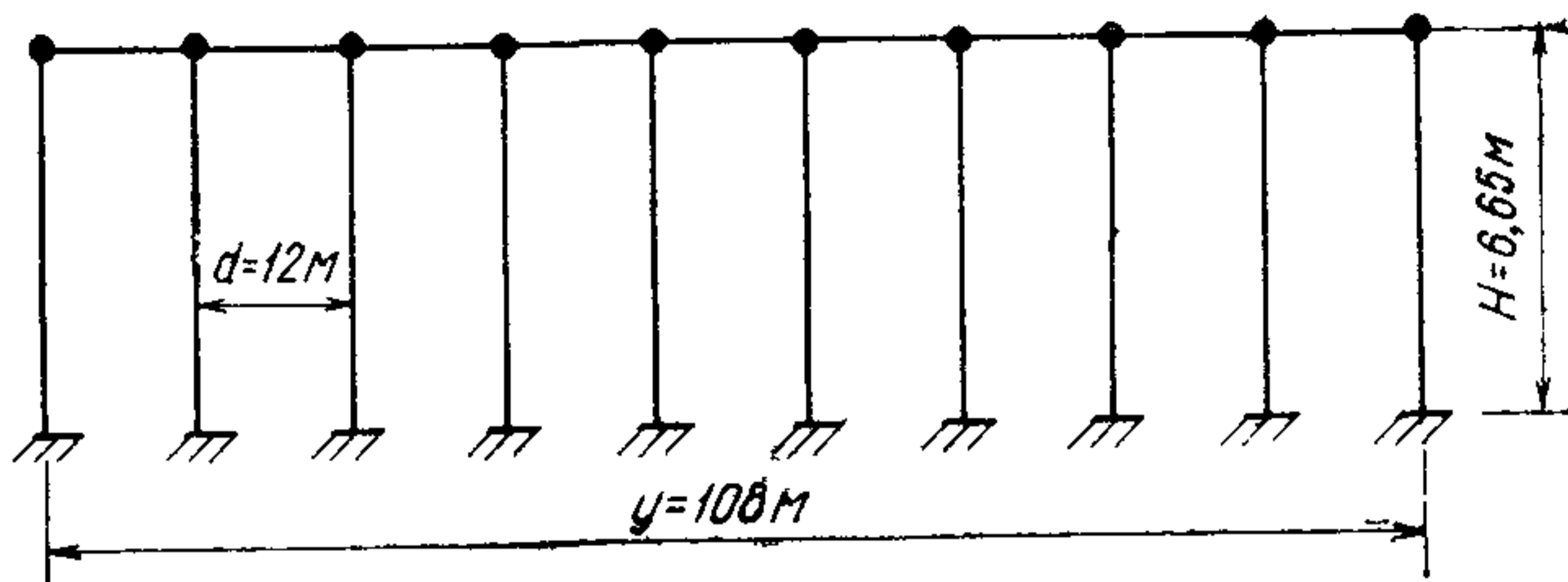


Рис. 48. Расчетная схема рамы

Влажностный режим — нормальный в месте строительства. Расчетная величина изменения температуры $\Delta t = 35^\circ\text{C}$ (по опытным данным). Равномерно распределенная нормативная нагрузка от массы покрытия 320 кгс/м^2 , снеговая нагрузка 100 кгс/м^2 . Наибольшая расчетная нагрузка на колонну (с учетом снеговой нагрузки) $N_{\max} = 172 \text{ тс}$, наименьшая (без снеговой нагрузки) $N_{\min} = 97 \text{ тс}$.

Требуется определить изгибающие моменты в заделке крайних колонн, расположенных по среднему ряду, при наибольшей и наименьшей продольной силе в колонне.

Свободное относительное температурное перемещение подстропильных конструкций составит [формула (118)]

$$\Delta_t = \alpha_t \Delta t = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 35 = 3,8 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент, учитывающий влияние нагрузки на величину удлинения нижнего пояса подстропильных ферм, при наличии в цехе подвесного крана будет:

при учёте снеговой нагрузки

$$K_L = 1 \cdot 0,8 = 0,8;$$

без учета снеговой нагрузки

$$K_L = \frac{0,6 \cdot 0,32 \cdot 0,8}{0,6 \cdot 0,32 + 0,9 \cdot 0,1} = \frac{0,154}{0,282} = 0,55.$$

Свободное относительное удлинение нижних поясов подстропильных ферм составит [формула (119)]:

при учете снеговой нагрузки

$$\Delta_L = \varepsilon_L K_L = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8 = 2,8 \cdot 10^{-4};$$

без учета снеговой нагрузки

$$\Delta_L = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,55 = 1,92 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент податливости стыков [формула (124)]

$$K_c = 1 - 0,01 \frac{L_6}{d} = 1 - 0,01 \frac{216}{12} = 0,82.$$

Определяем величину момента, который может воспринять колонна при максимальной и минимальной расчетной продольной силе.

Высота сжатой зоны сечения равна:

$$x_{\text{пр}} = \frac{(1000 - 1,5 R_{\text{пр}}) h_0}{850 + 0,1 R_a} = \frac{(1000 - 142) \cdot 45}{850 + 0,1 \cdot 3500} = 32,2 \text{ см};$$

$$x_{\text{max}} = \frac{N_{\text{max}}}{R_{\text{пр}} b} = \frac{172\,000}{95 \cdot 60} = 30 < 32,2;$$

$$\begin{aligned} M'_p &= N_{\text{max}} (h_0 - 0,5 x_{\text{max}}) + (R_a F_a - 0,5 N_{\text{max}}) (h_0 - a') = \\ &= 172\,000 (45 - 0,5 \cdot 30) + (3500 \cdot 27 - 0,5 \cdot 172\,000) \times \\ &\quad \times (215 - 5) = 5\,503\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M''_p &= 97\,000 (45 - 0,5 \cdot 17) + (3500 \cdot 27 - 0,5 \cdot 97\,000) (45 - 5) = \\ &= 5\,380\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см}; \end{aligned}$$

$$e_0 = \frac{M_p}{N_{\text{max}}} = \frac{5503}{172} = 32 \text{ см} > 0,5 h = 25 \text{ см},$$

поэтому можно применить приближенный метод расчета жесткости сечений с трещинами по формуле (147)

$$n = \frac{E_a}{E_6} = \frac{2\,000\,000}{240\,000} = 8,33;$$

$$\mu n = \frac{F_a n}{b h_0} = \frac{2,7 \cdot 8,33}{60 \cdot 45} = 0,083;$$

$$\gamma' = 2 \mu n = 2 \cdot 0,083 = 0,165.$$

По табл. 13 определяем в зависимости от μn и γ' значения коэффициентов:

$$K_1 = 0,5; \quad K_2 = 0,195; \quad K_3 = 0,91.$$

Вычисляем значения $I_{\text{пр}}$, $F_{\text{пр}}$, $r_{\text{яд}}$ [формулы (135) — (137)]:

$$\begin{aligned} I_{\text{пр}} &= \frac{b h^3}{12} + 2 F_a (0,5 h - a)^2 = \frac{60 \cdot 50^3}{12} + 2 \cdot 27 \cdot 8,33 (25 - 5)^2 = \\ &= 805\,000 \text{ см}^4; \end{aligned}$$

$$F_{\text{пр}} = 2 \cdot F_a n + b h = 2 \cdot 27 \cdot 8,33 + 8,33 + 60 \cdot 50 = 3445 \text{ см}^2;$$

$$r_{\text{яд}} = \frac{2 I_{\text{пр}}}{F_{\text{пр}} h} = \frac{2 \cdot 805\,000}{50 \cdot 3445} = 9,35 \text{ см}.$$

Жесткости для сечений с трещинами равны:

а) для колонн с продольной силой $N_{\max} = 172$ тс

$$B' = \frac{M K_1 E_a h_0^2 F_a}{M - K_2 b h^2 R_{pII} - K_3 N r_{яд}} =$$

$$= \frac{5\,503\,000 \cdot 2\,000\,000 \cdot 45^2 \cdot 0,5 \cdot 27}{5\,503\,000 - 0,195 \cdot 60 \cdot 50^2 \cdot 12 - 0,91 \cdot 172\,000 \cdot 9,35} = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{кгс};$$

б) для колонн с $N_{\min} = 97$ тс

$$B'' = \frac{5\,380\,000 \cdot 0,5 \cdot 2\,000\,000 \cdot 45^2 \cdot 27}{5\,380\,000 - 0,195 \cdot 60 \cdot 50^2 \cdot 12 - 0,91 \cdot 97\,000 \cdot 9,35} =$$

$$= 6,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{кгс}.$$

Жесткость сечения колонн без трещин [формулы (138); (139)]

$$C_6 = 0,5 (1 + C) = 0,5 (1 + 2) = 1,5;$$

$$B_{6.т} = \frac{0,85 I_{пр} E_6}{C_6} = \frac{0,85 \cdot 805\,000 \cdot 240\,000}{1,5} = 11 \cdot 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{кгс}.$$

Для определения приведенной жесткости вычислим момент сопротивления растянутой грани и момент появления трещин в колоннах

$$W_T = \left(0,292 + 1,65 \frac{F_a}{b h} n \right) b h^2 = \left(0,292 + 1,65 \frac{27 \cdot 8,33}{60 \cdot 50} \right) \times$$

$$\times 60 \cdot 50^2 = 62\,300 \text{ см}^3.$$

При действии продольной силы $N_{\max} = 172$ тс.

$$M'_T = W_T R_{pII} + N_{\max} r_{яд} = 62\,300 \cdot 12 + 172\,000 \cdot 9,35 =$$

$$= 2\,356\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см} \text{ при } N_{\min} = 97 \text{ тс};$$

$$M_T = 62\,300 \cdot 12 + 97\,000 \cdot 9,35 = 1\,650\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Приведенная жесткость равна (104):

$$B'_{пр} = B' + (B_{6.т} - B') e \left(\frac{M'_T - M'_p}{1,25 M_T} \right) =$$

$$= \left[8,1 + (11 - 8,1) e \left(\frac{23,56 - 55}{1,25 \cdot 23,56} \right) \right] 10^{10} = 9 \cdot 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{кгс};$$

$$B''_{пр} = \left[6,9 + (11 - 6,9) e \left(\frac{16,5 - 53,8}{1,25 \cdot 16,5} \right) \right] 10^{10} = 7,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{кгс}.$$

Определяем изгибающий момент в заделке колонн от температурного воздействия и удлинения нижних поясов подстропильных ферм при условии $K_y = 1$ (первое приближение):

$$y = 0,5 L_6 = 0,5 \cdot 21\,600 = 10\,800 \text{ см};$$

$$\Delta' = (\Delta_t + \Delta_L) y K_c K_y = (3,8 + 2,8) \cdot 10^{-4} \cdot 0,82 \cdot 1 \cdot 10\,800 = 5,8 \text{ см};$$

при учете снеговой нагрузки

$$M'_H = \frac{3 \Delta' B'_{\text{пр}}}{H_K^2} = \frac{3 \cdot 5,8 \cdot 9 \cdot 10^{10}}{665^2} = 35,5 \cdot 10^5 < 55 \text{ тс} \cdot \text{м};$$

без учета снеговой нагрузки

$$\Delta'' = (3,8 + 1,92) \cdot 10^{-4} \cdot 10\,800 \cdot 0,82 \cdot 1 = 5,05 \text{ см};$$

$$M''_H = \frac{3 \Delta'' B''_{\text{пр}}}{H_K^2} = \frac{3 \cdot 5,05 \cdot 7,5 \cdot 10^{10}}{665^2} = 28,1 \cdot 10^5 < 53,8 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Определяем значение коэффициентов K_y , учитывающего податливость ригеля по формуле (121):

при учете снеговой нагрузки

$$K'_y = e^{\left(-\frac{5500 M}{F_\phi E_a H_K}\right)} = e^{\left(-\frac{5500 \cdot 35,5 \cdot 10^5}{22,6 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 665}\right)} = 0,52;$$

без учета снеговой нагрузки

$$K''_y = e^{\left(-\frac{5500 \cdot 28,1 \cdot 10^5}{22,6 \cdot 2 \cdot 665 \cdot 10^6}\right)} = 0,6.$$

Окончательный изгибающий момент в заделке колонн:
при учете снеговой нагрузки

$$M'_H = M'_H K'_y = 35,5 \cdot 10^5 \cdot 0,52 = 18,5 \cdot 10^5 \text{ кгс} \cdot \text{см};$$

без учета снеговой нагрузки

$$M''_H = M''_H K''_y = 28,1 \cdot 10^5 \cdot 0,6 = 16,9 \cdot 10^5 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Пример 9. Определить расстояния между температурными швами типовой эстакады под технологические трубопроводы (рис. 49) при следующих исходных данных:

расчетная высота стоек 7,2 м, расстояние между стойками 12 м.

Постоянная вертикальная нагрузка на стойки 40 тс.

Изгибающий момент от внешней нагрузки в нижнем сечении стойки $M = 9 \text{ тс} \cdot \text{м}$.

Сечения стоек $b \times h = 60 \times 40 \text{ см}$.

Бетон стоек обычный марки 300; $R_{\text{прII}} = 180$; $R_{\text{пр}} = 140$; $R_{\text{рII}} = 16$; $E_b = 2,6 \cdot 10^5$; арматура класса А-III; $R_a = 3400$; $E_a = 2 \cdot 10^6$; $F_a = F'_a = 27 \text{ см}^2$ (6 $\varnothing 24$); $a' = 4 \text{ см}$.

Условия эксплуатации — влажность воздуха 50—70% (нормальная).

Определяем величину коэффициента C_6 , учитывая пластические свойства бетона при длительном действии нагрузки (139), и расчетную величину изменения температуры Δt (табл. 10).

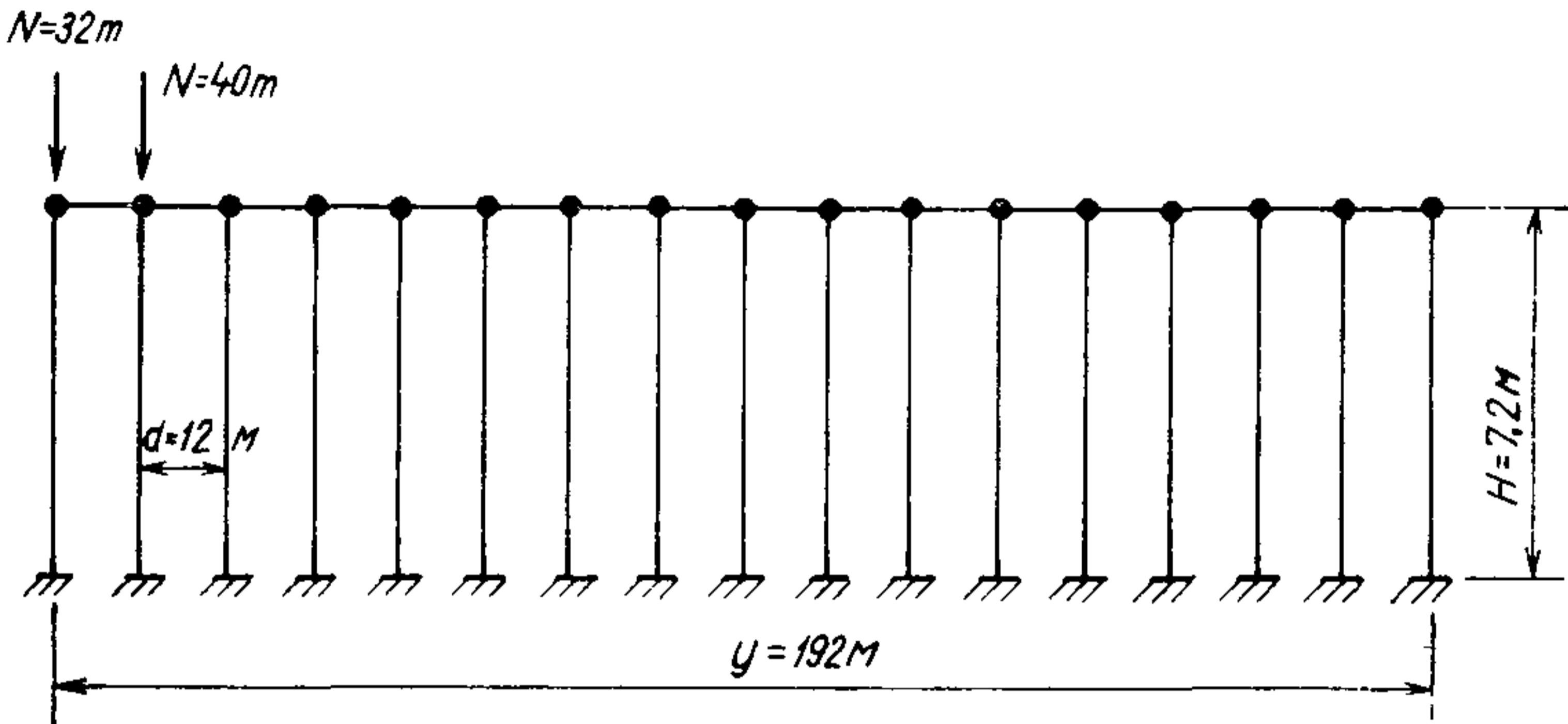


Рис. 49. Расчетная схема эстакады

Учитывая, что конструкция типовая и может быть возведена в любом районе СССР, принимаем:

$$C = 2; \quad \Delta t = \Delta t^x = -60^\circ \text{C};$$

$$C_6 = 0,5 (1 + c) = 0,5 (1 + 2) = 1,5.$$

Для определения момента сопротивления W_T , расстояния от ядровой точки до центра тяжести сечения $r_{яд}$, длительной жесткости сечений без трещин $B_{б.т}$, момента появления трещин M_T вычисляем геометрические характеристики сечения:

$$n = \frac{E_a}{E_6} = \frac{2 \cdot 10^6}{2,6 \cdot 10^5} = 6,9; \quad y_{ц} = 20 \text{ см};$$

$$F_{п} = F_{п} + 2 n F_a = 40 \cdot 60 + 2 \cdot 6,9 \cdot 27 = 2400 + 372 = 2772 \text{ см}^2;$$

$$I_6 = \frac{b h^3}{12} = \frac{60 \cdot 40^3}{12} = 3,2 \cdot 10^5;$$

$$I_a = 2 n F_a \left(\frac{h - 2 a'}{2} \right)^2 = 2 \cdot 6,9 \cdot 27 \left(\frac{40 - 8}{2} \right)^2 = 0,95 \cdot 10^5;$$

$$I_{п} = I_6 + I_a = (3,2 + 0,95) 10^5 = 4,15 \cdot 10^5;$$

$$r_{яд} = \frac{I_{п}}{F_{п} y_{ц}} = \frac{4,15 \cdot 10^5}{2772 \cdot 20} = 7,5 \text{ см};$$

$$\mu_1 = \frac{F_a}{b h} = \frac{27}{60 \cdot 40} = 0,0113.$$

Тогда по формулам (134), (138), (133) определяем:

$$W_T = (0,292 + 1,65 \mu_1 n) b h^2 = (0,292 + 1,65 \cdot 0,0113 \cdot 6,9) \times \\ \times 60 \cdot 40^2 = 40\,500 \text{ см}^3;$$

$$B_{\sigma.T} = 0,85 \left(\frac{I_{\sigma}}{C_{\sigma}} + I_a \right) E_{\sigma} = 0,85 \left(\frac{3,2 \cdot 10^5}{1,5} + 0,95 \cdot 10^5 \right) \times \\ \times 2,9 \cdot 10^5 = 7,2 \cdot 10^{10}.$$

$$M_T = W_T R_{\text{пр}} + N r_{\text{яд}} = 40\,500 \cdot 16 + 32\,000 \cdot 7,5 = 8,05 \cdot 10^5.$$

Определяем момент, который могут воспринять внецентренно сжатые колонны при расчетных характеристиках материала

$$x = \frac{N}{R_{\text{пр}} b} = \frac{40\,000}{140 \cdot 60} = 3,8 \text{ см, так как } x < 2a$$

$$M = (R_a F_a + 0,5 N) (h_0 - a') = (27 \cdot 3400 + 0,5 \cdot 40\,000) (36 - 4) = \\ = 34,5 \cdot 10^5 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Ширину раскрытия трещин, нормальных к оси колонн на уровне центра тяжести растянутой арматуры в сечении действия максимального момента M , производим по формуле (148)

$$a_T = C_0 \frac{R_a}{E_a} 20 (3,5 - 100 \mu) \sqrt[3]{d} = 1,25 \frac{3400}{2\,000\,000} \times \\ \times 20 \left(3,5 - 100 \frac{27}{60 \cdot 36} \right) \sqrt[3]{24} = 0,27 \text{ мм} < 0,3 \text{ мм}.$$

Определяем жесткость сечения стоек с трещинами при действии силы $N=40$ тс и расчетного момента $M_p = 34,5$ тс·м по формуле (141), для чего вычисляем:

$$\mu n = \frac{F_a n}{b h_0} = \frac{27 \cdot 6,9}{60 \cdot 36} = 0,086;$$

$$\gamma' = 2 \mu n = 2 \cdot 0,086 = 0,172;$$

$$T = \gamma' \left(1 - \frac{a'}{h_0} \right) = 0,172 \left(1 - \frac{4}{36} \right) = 0,148;$$

$$e_0 = \frac{M_p}{N} = \frac{3\,450\,000}{40\,000} = 86,2 \text{ см};$$

$$e = e_0 + (0,5 h_0 - a) = 86,2 + (0,5 \cdot 40 - 4) = 102,5 \text{ см};$$

$$M_3 = N e = 40\,000 \cdot 102,5 = 4\,090\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см};$$

$$L = \frac{M_3}{b h_0^2 R_{\text{пр}}} = \frac{4\,090\,000}{60 \cdot 36^2 \cdot 180} = 0,29;$$

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{1,8 + \frac{1 + 5(L + T)}{10 \mu n}} + \frac{1,5 + \gamma'}{11,5 \frac{e}{h_0} - 5} = \\ &= \frac{1}{1,8 + \frac{1 + 5(0,29 + 0,148)}{10 \cdot 0,086}} + \frac{1,5 + 0,172}{11,5 \frac{102,5}{36} - 5} = 0,242; \\ z_1 &= h_0 \left[1 - \frac{\frac{2a'}{h_0} \gamma' + \xi^2}{2(\gamma' + \xi)} \right] = 36 \left[1 - \frac{\frac{2 \cdot 4}{36} 0,172 + 0,242^2}{2(0,172 + 0,242)} \right] = \\ &= 32 \text{ см}; \end{aligned}$$

$$S_d = 0,95; \quad \nu = 0,325 \text{ (п. 3.15);}$$

$$\psi_a = 1,25 - S_d \frac{M_T}{M} = 1,25 - 0,95 \frac{8,05 \cdot 10^5}{34,5 \cdot 10^5} = 1,25 - 0,22 = 1,03 > 1;$$

принимаем $\psi_a = 1$.

Жесткость сечений колонн с трещинами в растянутой зоне равна:

$$\begin{aligned} B &= \frac{h_0 z_1 e_0}{\frac{\psi_a}{E_a F_a} (e - z_1) + \frac{\psi_b e}{\nu b h_0 E_b (\gamma' + \xi)}} = \\ &= \frac{86,2 \cdot 36 \cdot 32}{\frac{1}{27 \cdot 2 \cdot 10^6} (102,2 - 32) + \frac{0,9 \cdot 102 \cdot 2}{0,325 \cdot 60 \cdot 36 \cdot 260\,000 (0,172 + 0,242)}} = \\ &= 4 \cdot 10^{10}. \end{aligned}$$

Приведенная жесткость колонн равна:

$$\begin{aligned} B_{пр} &= B - (B_{б.т} - B) e^{\left(\frac{M_T - M}{1,25 M_T} \right)} = \left[4 - (7,2 - 4) \times \right. \\ &\quad \left. \times e^{\left(\frac{8,5 - 34,5}{1,25 \cdot 8,5} \right)} \right] 10^{10} = 4,4 \cdot 10^{10}. \end{aligned}$$

Максимально возможное расстояние между температурными швами эстакады определяем по формулам:

$$M_p = M - M_H = 34,5 - 9 = 25,5 \text{ тс} \cdot \text{м};$$

$$\Delta = \Delta t^x \alpha_t K_c = 60 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 0,8 = 525 \cdot 10^{-6};$$

$$L'_b = \frac{2 M_p H_k^2}{3 \Delta B_{пр}} = \frac{2 \cdot 2\,550\,000 \cdot 720^2}{3 \cdot 525 \cdot 10^{-6} \cdot 4,4 \cdot 10^{10}} = 38\,200 \text{ см.}$$

Перемещение верха крайней колонны

$$y_k = 0,5 \Delta L'_6 = 0,5 \cdot 525 \cdot 10^{-6} \cdot 38\,200 = 10 \text{ см.}$$

Выполняем второе приближение с учетом влияния гибкости колонн на их несущую способность:

$$M_p = M - M_H - N y_k = 34,5 - 9 - 40 \cdot 0,1 = 21,5 \text{ тс} \cdot \text{м},$$

$$K_c = 1 - 0,01 \frac{L'_6}{d} = 1 - 0,01 \frac{382}{12} = 1 - 0,32 = 0,68 > 0,6;$$

$$\Delta = \Delta t^\times \alpha_t K_c = 60 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 0,68 = 445 \cdot 10^{-6};$$

$$L''_6 = \frac{2 \cdot 2\,150\,000 \cdot 720^2}{3 \cdot 445 \cdot 10^{-6} \cdot 4,4 \cdot 10^{10}} = 38\,000 \text{ см.}$$

Учитывая, что расстояние между колоннами равно 12 м, длина температурного блока должна быть не более 372 м.

Пример 10. Рассчитать продольный каркас цеха, представляющий собой двухъярусную рамную конструкцию (рис. 50), на температурное воздействие окружающей среды. Здание длиной

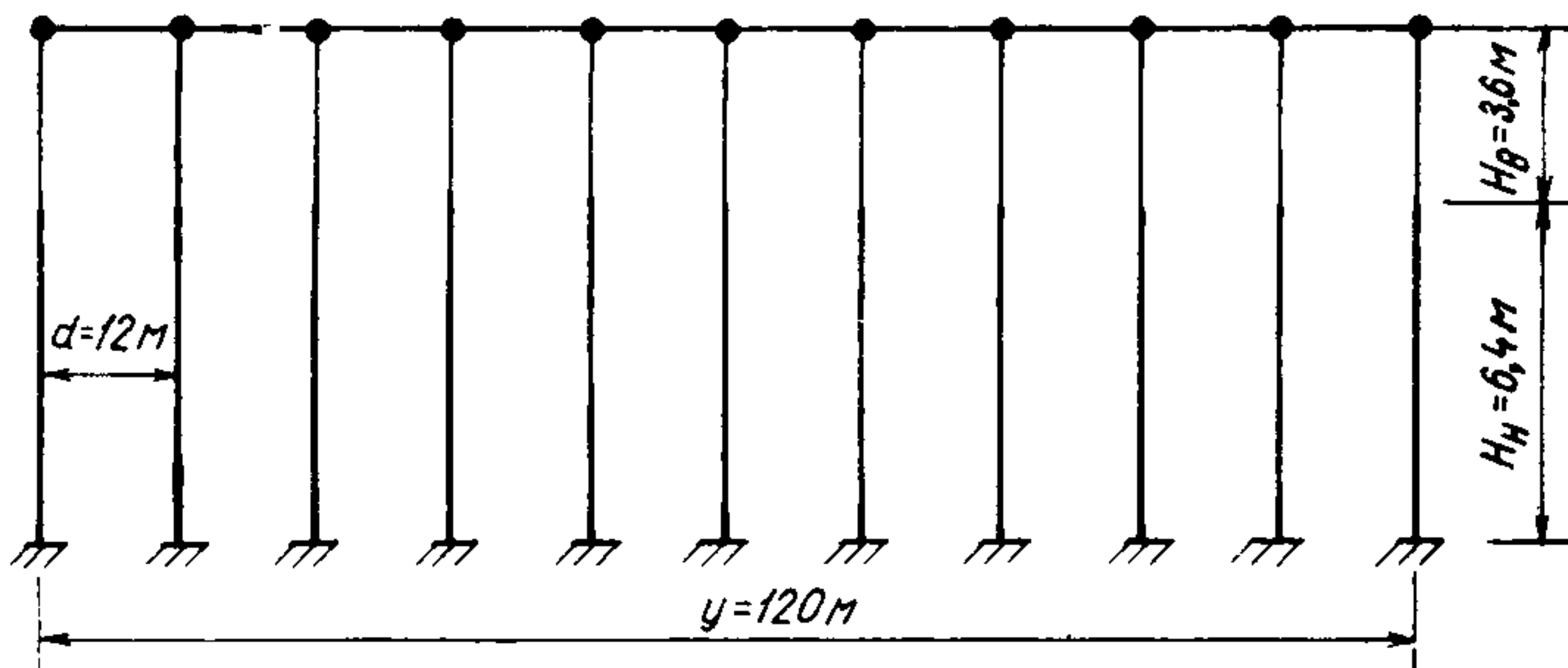


Рис. 50. Расчетная схема рамы

240 м проектируется без температурных швов. Подкрановые балки проектируются из металла, покрытие цеха и колонны из железобетона марки 300. Сечение подкрановой части двухветвевых колонн принято 70×50 , надкрановой 58×50 см. Арматура колонны соответственно $F_{ан} = 27 \text{ см}^2$ и $F_{ав} = 20 \text{ см}^2$ из класса А-II. Вертикальное усилие в колонне равно: $N_H = 142 \text{ тс}$, $N_B = 116 \text{ тс}$.

Требуется определить в стадии эксплуатации здания изгибающие моменты в крайних колоннах от изменения климатической температуры.

Расчетное изменение температуры определено по заданию на проектирование

$$\Delta t = +30 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Определяем величину изгибающего момента, который может воспринять верхняя часть двухъярусной колонны.

Высота сжатой зоны:

$$x_{\text{пр}}^{\text{в}} = \frac{(1000 - 1,5 R_{\text{пр}}) h_0}{850 + 0,1 R_a} = \frac{(1000 - 1,5 \cdot 140) 46}{850 + 0,1 \cdot 3400} = 30,6 \text{ см};$$

$$x_{\text{в}} = \frac{N_{\text{в}}}{R_{\text{пр}} b_{\text{в}}} = \frac{116\,000}{140 \cdot 58} = 14,3 < 30,6 \text{ см};$$

$$\begin{aligned} M_{\text{в}} &= N_{\text{в}} (h_0 - 0,5 x_{\text{в}}) + (R_a F_{\text{ав}} - 0,5 N_{\text{в}}) (h_0 - a') = \\ &= 116\,000 (46 - 0,5 \cdot 14,3) + (3400 \cdot 20 - 0,5 \cdot 116\,000) \times \\ &\quad \times (46 - 4) = 4\,920\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см}. \end{aligned}$$

Нижняя часть колонн (в месте заделки):

$$x_{\text{н}} = \frac{N_{\text{н}}}{R_{\text{пр}} b_{\text{н}}} = \frac{142\,000}{140 \cdot 70} = 14,5 < 30,6 \text{ см}.$$

$$M_{\text{н}} = 142\,000 (46 - 0,5 \cdot 14,5) + (3400 \cdot 27 - - 0,5 \cdot 142\,000) (46 - 4) = 6\,380\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см},$$

$$e_0^{\text{в}} = \frac{M_{\text{в}}}{N_{\text{в}}} = \frac{49 \cdot 10^5}{116\,000} = 42,2 \text{ см};$$

$$e_0^{\text{н}} = \frac{63,8 \cdot 10^5}{142\,000} = 45 \text{ см}.$$

Значения $e_0^{\text{в}}$ и $e_0^{\text{н}}$ больше 0,5 сечений колонн.

Поэтому можно применить приближенный метод расчета жесткости сечений с трещинами (п. 3.14), для чего определяем:

$$n = \frac{E_a}{E_b} = \frac{2\,100\,000}{260\,000} = 8,1;$$

$$\mu_{\text{в}} n = \frac{F_{\text{ав}} n}{b h_0} = \frac{20 \cdot 8,1}{58 \cdot 46} = 0,061;$$

$$\mu_{\text{н}} n = \frac{27 \cdot 8,1}{70 \cdot 46} = 0,068;$$

$$\gamma'_{\text{в}} = 2 \mu_{\text{в}} n = 2 \cdot 0,061 = 0,122;$$

$$\gamma'_{\text{н}} = 2 \cdot 0,068 = 0,136.$$

По табл. 13 определяем значения коэффициентов:

$$K_1^{\text{в}} = 0,52; \quad K_2^{\text{в}} = 0,19; \quad K_3^{\text{в}} = 0,95;$$

$$K_1^{\text{н}} = 0,525; \quad K_2^{\text{н}} = 0,19; \quad K_3^{\text{н}} = 0,95.$$

Вычисляем значения $I_{\text{пр}}$, $F_{\text{пр}}$, $r_{\text{яд}}$ [формулы (135) — (137)]:

$$\begin{aligned} I_{\text{пр}}^{\text{в}} &= \frac{b_{\text{в}} h^3}{12} + 2 F_{\text{ав}} (0,5 h - a)^2 = \frac{58 \cdot 50^3}{12} + 2 \cdot 20 (0,5 \cdot 50 - 4)^2 = \\ &= 622\,500 \text{ см}^4; \end{aligned}$$

$$I_{\text{пр}}^{\text{H}} = \frac{70 \cdot 50^3}{12} + 2 \cdot 27 (0,5 \cdot 50 - 4)^2 = 754\,000 \text{ см}^4;$$

$$F_{\text{пр}}^{\text{B}} = 2 F_{\text{ав}} n + b_{\text{в}} h = 2 \cdot 20 \cdot 8,1 + 58 \cdot 50 = 3224 \text{ см}^2;$$

$$F_{\text{пр}}^{\text{H}} = 2 \cdot 27 \cdot 8,1 + 70 \cdot 50 = 3935 \text{ см}^2;$$

$$r_{\text{яд}}^{\text{B}} = \frac{2 I_{\text{пр}}^{\text{B}}}{F_{\text{пр}}^{\text{B}} h} = \frac{2 \cdot 622\,500}{3224 \cdot 50} = 7,7 \text{ см};$$

$$r_{\text{яд}}^{\text{H}} = \frac{2 \cdot 754\,000}{3935 \cdot 50} = 7,7 \text{ см};$$

$$B_{\text{в}} = \frac{M_{\text{в}} K_1^{\text{B}} E_{\text{а}} h_0^2 F_{\text{ав}}}{M_{\text{в}} - K_2^{\text{B}} b_{\text{в}} h^2 R_{\text{рII}} - K_3^{\text{B}} N_{\text{в}} r_{\text{яд}}^{\text{B}}} =$$

$$= \frac{49,2 \cdot 10^5 \cdot 0,52 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 46^2 \cdot 20}{49,2 \cdot 10^5 - 0,19 \cdot 58 \cdot 50^2 \cdot 16 - 0,95 \cdot 116\,000 \cdot 7,7} =$$

$$= 62,7 \cdot 10^9 \text{ кгс} \cdot \text{см}^2;$$

$$B_{\text{н}} = \frac{63,8 \cdot 10^5 \cdot 0,525 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 46^2 \cdot 27}{63,8 \cdot 10^5 - 0,19 \cdot 70 \cdot 50^2 \cdot 16 - 0,95 \cdot 142\,000 \cdot 7,7} =$$

$$= 83,3 \cdot 10^9 \text{ кгс} \cdot \text{см}^2.$$

Определяем жесткость сечений колонн без трещин [формулы (138) и (139)]:

$$C_6 = 0,5 (1 + C) = 0,5 (1 + 2) = 1,5;$$

$$B_{6.т}^{\text{B}} = \frac{0,85 I_{\text{пр}}^{\text{B}} E_6}{C_6} = \frac{0,85 \cdot 622\,500 \cdot 260\,000}{1,5} = 91,15 \cdot 10^9 \text{ кгс} \cdot \text{см};$$

$$B_{6.т}^{\text{H}} = \frac{0,85 \cdot 754\,000 \cdot 260\,000}{1,5} = 111 \cdot 10^9;$$

$$W_{\text{т}}^{\text{B}} = \left(0,292 + 1,65 \frac{F_{\text{а}}^{\text{B}} n}{b_{\text{в}} h} \right) b_{\text{в}} h^2 =$$

$$= \left(0,292 + 1,65 \frac{20 \cdot 8,1}{58 \cdot 50} \right) 58 \cdot 50^2 = 55\,600 \text{ см}^3;$$

$$W_{\text{т}}^{\text{H}} = \left(0,292 + 1,65 \frac{27 \cdot 8,1}{70 \cdot 50} \right) 70 \cdot 50^2 = 69\,000 \text{ см}^3.$$

Момент появления трещин:

$$M_{\text{т}}^{\text{B}} = W_{\text{т}}^{\text{B}} R_{\text{рII}} + N_{\text{в}} r_{\text{яд}}^{\text{B}} = 55\,600 \cdot 16 + 116\,000 \cdot 7,7 = 1\,780\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см};$$

$$M_{\text{т}}^{\text{H}} = 69\,000 \cdot 16 + 142\,000 \cdot 7,7 = 2\,190\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Приведенная жесткость верхней и нижней части двухъярусных колонн равна (104):

$$B_{\Pi}^B = B_B + (B_{\text{с.т.}}^B - B_B) e \left(\frac{M_T^B - M_B}{1,25 M_B} \right) =$$

$$= \left[62,7 + (91,5 - 62,7) e \left(\frac{17,8 - 49,2}{1,25 \cdot 49,2} \right) \right] 10^9 = 80 \cdot 10^9;$$

$$B_{\Pi}^H = \left[83,3 + (111 - 83,3) e \left(\frac{21,9 - 63,8}{1,25 \cdot 63,8} \right) \right] 10^9 = 99,6 \cdot 10^9.$$

Определяем величину перемещений колонн в плоскости покрытия и подкрановых балок (117):

$$\Delta_B = (\Delta_t^B + \Delta_L^B) y K_y^B K_c^B;$$

$$\Delta_H = (\Delta_t^H + \Delta_L^H) y K_y^H K_c^H.$$

Свободное относительное температурное перемещение железобетонного покрытия равно (п. 3.14):

$$\Delta_t^B = \Delta t^x \alpha_t = 30 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 300 \cdot 10^{-6}.$$

Металлических подкрановых балок

$$\Delta_t^H = \Delta t^x \alpha_t = 30 \cdot 11 \cdot 10^{-6} = 330 \cdot 10^{-6}.$$

Относительное удлинение железобетонных элементов покрытия от действия внешней нагрузки (п. 3.10)

$$\Delta_L^B = 0,0001,$$

подкрановых балок $-\Delta_L^H = 0$.

Расстояние от несмещающейся точки каркаса равно:

$$y = \frac{L_6}{2} = \frac{24\,000}{2} = 12\,000 \text{ см.}$$

Величину коэффициентов, учитывающих податливость ригелей, принимаем равными:

$$K_y^B = K_y^H = 1.$$

Величину коэффициента, учитывающего податливость сжатых стыков подкрановых балок с колоннами, принимаем равным: $K_c^H = 0,8$. Учитывая, что от действия климатических температур верхние стыки будут растянуты (п. 3.13):

$$K_c^B = \frac{1}{0,8} = 1,25;$$

$$\Delta_B = (300 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-4}) 12\,000 \cdot 1,25 = 6 \text{ см};$$

$$\Delta_H = 330 \cdot 10^{-6} \cdot 12\,000 \cdot 0,8 = 3,27 \text{ см};$$

$$\Delta_B' = \Delta_B - \Delta_H = 6 - 3,27 = 2,73 \text{ см.}$$

Усилия в нижней и верхней части двухъярусных колонн от вынужденных перемещений определяем по формулам (110) и (111):

$$M_H = \frac{6 B_{\Pi}^H \Delta_H}{H_H^2} \left[1 - \frac{1 + \frac{B_{\Pi}^B \Delta'_B H_H^2}{2 B_{\Pi}^H \Delta_H H_B^2}}{2 \left(1 + \frac{B_{\Pi}^B H_H}{B_{\Pi}^H H_B} \right)} \right] =$$

$$= \frac{6 \cdot 99,6 \cdot 10^9 \cdot 3,27}{640^2} \left[1 - \frac{1 + \frac{80 \cdot 10^9 \cdot 2,73 \cdot 640^2}{2 \cdot 99,6 \cdot 10^9 \cdot 3,27 \cdot 380^2}}{2 \left(1 + \frac{80 \cdot 10^9 \cdot 640}{99,6 \cdot 10^9 \cdot 380} \right)} \right] =$$

$$= 27,9 \cdot 10^5 \text{ кгс} \cdot \text{см};$$

$$M_B = \frac{6 B_{\Pi}^H \Delta_H}{H_H^2} \left[1 - \frac{1 + \frac{B_{\Pi}^B \Delta'_B H_B^2}{2 B_{\Pi}^H \Delta_H H_H^2}}{1 + \frac{B_{\Pi}^B H_H}{B_{\Pi}^H H_B}} \right] =$$

$$= \frac{6 \cdot 99,6 \cdot 3,27}{640^2} \left[1 - \frac{1 + \frac{80 \cdot 10^9 \cdot 2,73 \cdot 640^2}{2 \cdot 99,6 \cdot 10^9 \cdot 3,27 \cdot 380^2}}{1 + \frac{80 \cdot 10^9 \cdot 640}{99,6 \cdot 10^9 \cdot 380}} \right] =$$

$$= 8,5 \cdot 10^5 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Пример 11. Рассчитать железобетонную подпорную стенку (стенку подвала машзала прокатного цеха) на действие температуры окружающей среды. Подпорная стенка запроектирована по оси продольного ряда колонн цеха и жестко связана с подколонниками (рис. 51).

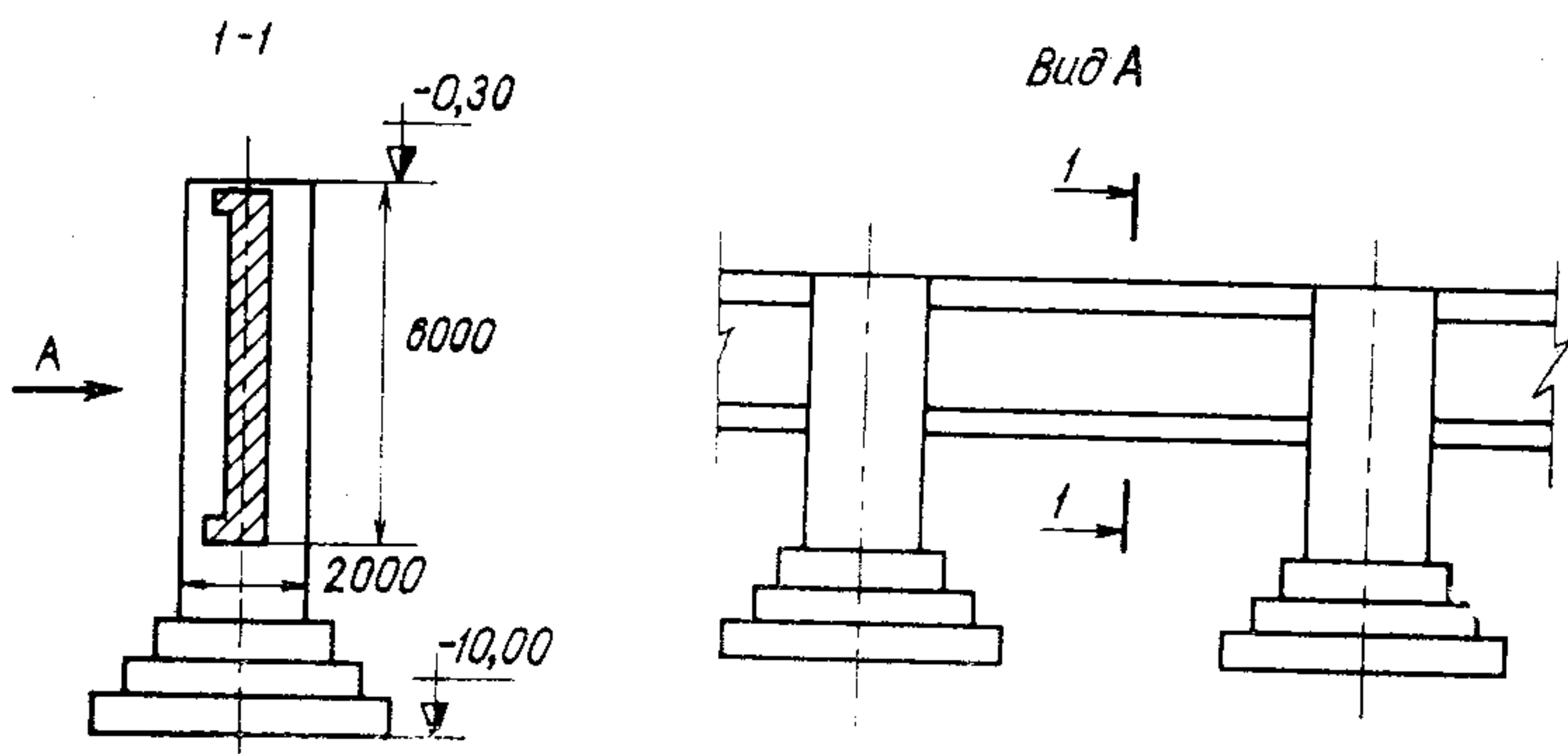


Рис. 51. Подпорная стенка по оси продольного ряда колонн

Так как подколонники нагружены значительной вертикальной нагрузкой, то всякое перемещение их в горизонтальном направлении исключено. В этом случае величина температурно-усадочных напряжений в подпорной стенке не зависит от длины сооружения, и поэтому подпорная стенка запроектирована без температурно-усадочных швов при длине 480 м. Стенка проектируется из бетона М200.

Цех возводится в г. Калинин. Относительная влажность воздуха 70%. Ориентировочное время строительства два года.

Расчет стенки в стадии строительства. Согласно табл. 10, для конструкций цеха принимаются расчетные изменения температур в период строительства цеха, равные:

$$\Delta t^{\Gamma} = 30^{\circ}\text{C}; \quad \Delta t^{\times} = -40^{\circ}\text{C}.$$

Определяем величину относительной деформации усадки бетона в элементах подпорной стенки (п. 1.10), для этого определяем приведенную высоту стенки

$$h_{\text{пр}} = \frac{bh}{b+h} = \frac{600 \cdot 50}{600+50} = 46 \text{ см};$$

относительную критическую влажность бетона

$$u_{\text{кр}} = \left(180 + \frac{160}{46} \right) 10^{-4} = 184 \cdot 10^{-4};$$

относительную равновесную влажность бетона

$$u_{\text{с}} = (0,0025 h_{\text{пр}} + 1,5) \varphi \cdot 10^{-4} = (0,0025 \cdot 46 + 1,5) \times 70 \cdot 10^{-4} = 115 \cdot 10^{-4}.$$

расчетное изменение относительной влажности бетона

$$\Delta u = u_{\text{кр}} - u_{\text{с}} = (184 - 115) 10^{-4} = 69 \cdot 10^{-4}.$$

Стенка выполнена из обычного бетона, поэтому $\beta = 0,03$ (табл. 3), $K_{\text{с}} = 0,55$ (табл. 1).

Предельная величина усадки бетона в стенке

$$\epsilon_y^{\text{п}} = \beta \Delta u = 0,03 \cdot 69 \cdot 10^{-4} = 207 \cdot 10^{-6}.$$

Величина усадки бетона через два года после начала строительства:

$$t = 2 \cdot 360 = 720 \text{ сут.}$$

$$\Delta y = \epsilon_y^{\text{п}} \left(1 - e^{-0,2 \left(\frac{t}{h_{\text{пр}}} \right)} \right) = 207 \cdot 10^{-6} \left(1 - e^{-0,2 \left(\frac{720}{46} \right)} \right) = -196 \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент релаксации внутренних усилий определяем по формуле (1) ($\mu = 0$).

Предельная величина меры ползучести бетона

$$C_{\text{п}\tau} = \frac{K_{\text{с}} \Delta u (0,15 + 10/\tau)}{R} = \frac{0,55 \cdot 69 \cdot 10^{-4} (0,15 + 10/28)}{R} = 9,6 \cdot 10^{-6}.$$

Мера ползучести при $t=720$ сут (два года)

$$C_{t\tau} = C_{п\tau} (1 - e^{-0,04 t}) = 9,6 \cdot 10^{-6} (1 - e^{-0,04 \cdot 720}) = 9,6 \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент C , учитывающий деформации ползучести бетона,

$$C_0 = 1 + C_{t\tau} \cdot 10^5 = 1 + 0,96 = 1,96.$$

Коэффициент релаксации (1)

$$\beta_{t,\tau} = \frac{1}{C_0} = \frac{1}{1,96} = 0,51.$$

Температурно-усадочные напряжения в плите определяем для стадии охлаждения конструкции. В этом случае:

$$\Delta t = 0,5 \Delta t^x = 0,5 (-40) = -20;$$

$$E_0 = 240\,000 \text{ кг/см}^2; \quad \alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ (табл. 11);}$$

$$\sigma_0 = (\Delta t \alpha + \Delta y) E_0 \beta_{t,\tau} =$$

$$= (20 \cdot 10 + 196) 10^{-6} \cdot 240\,000 \cdot 0,51 = 48,5 \text{ кг/см}^2 > R_{пII}.$$

Напряжения в плите превышают прочность бетона на растяжение, поэтому в процессе строительства возможно появление в плите температурно-усадочных трещин. В плите необходимо установить противоусадочную арматуру.

Принимаем арматуру класса А-II $R_a = 2600 \text{ кгс/см}^2$

Минимальный процент армирования определяем по формуле

$$\mu_{\min} = \frac{5 R_{пр}}{R_a} = \frac{5 \cdot 95}{2600} = 0,18\%.$$

Площадь арматуры на 1 м плиты

$$F_a = 100 h_0 \mu_{\min} = 100 \cdot 45 \cdot 0,0018 = 8,3 \text{ см}^2.$$

Принимаем $5\varnothing 14$ (с шагом 20 см).

Максимальная ширина раскрытия трещин в момент их образования [формула (148)] ($C_d=1$, $\eta=1$, $\sigma_a=R_a$, $E_a=2,1 \cdot 10^6$):

$$a_T = \frac{2600}{2,1 \cdot 10^6} 20 (3,5 - 0,18) \sqrt[3]{14} = 0,25 \text{ мм} \leq 0,3 \text{ мм}.$$

Ширина раскрытия температурно-усадочных трещин при эксплуатации конструкций (при $C_0=1,5$ и $\eta=1$)

$$\begin{aligned} a_{T_0} &= 20 C_0 \eta (\Delta t \alpha_t + \Delta y) (3,5 - 100 \mu) \sqrt[3]{d} = \\ &= 20 \cdot 1,5 \cdot 1 (200 \cdot 10^{-6} + 196 \cdot 10^{-6}) (3,5 - 0,18) \sqrt[3]{14} = 0,09 \text{ мм}. \end{aligned}$$