

МИНЕСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРХИТЕКТУРЫ И
СТРОИТЕЛЬСТВА»

Инженерно-строительный институт
Кафедра «Строительные конструкции»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине «Фундаменты, подпорные стены и ограждения котлованов»
на тему:
«Проектирование монолитной угловой подпорной стены»

Автор проекта: Колесников Д.А.

Группа: 22СТ1м

Обозначение: КП-2069059-08.04.01-220885-22.

Направление: 08.04.01 «Строительство»

Руководитель проекта: к.т.н., доцент Корнюхин А.В.

Проект защищен _____

Пенза 2022

Содержание

Введение.....	3
1. Определение расчётных характеристик грунтов.....	3
2. Определение основных геометрических параметров подпорной стены.....	4
3. Определение параметров давления грунта на подпорную стену.....	5
4. Расчет устойчивости положения стены против сдвига.....	6
5. Расчет прочности грунтового основания.....	9
6. Расчет оснований по деформациям.....	11
7. Определение нагрузок, действующих на тонкостенную подпорную стену...	12
8. Проектирование монолитной уголкового консольной подпорной стены.....	14
8.1. Определение внутренних усилий в элементах подпорной стены.....	14
8.2. Подбор арматуры в элементах подпорной стены.....	15
8.3. Расчет подпорной стены по деформациям.....	19
Список используемых источников.....	22

Введение

В данном курсовом проекте необходимо разработать монолитную угловую консольную подпорную стену.

В качестве задания принимаем следующие параметры:

1. Высота подпорной стены, м – 4,5;
2. Глубина заложения подошвы, м – 1,3;
3. Временная нормативная нагрузка, кПа – 12,5;
4. Класс бетона монолитных конструкций – В15;
5. Класс арматуры монолитных конструкций – А240;
6. Грунт основания – супесь тяжёлая;
7. Грунт засыпки – глина песчаная;
8. Объемный вес грунта основания, кН/м³ – 18,0;
9. Объемный вес засыпки, кН/м³ – 19,0;
10. Коэффициент пористости грунта основания – 0,6;
11. Коэффициент пористости грунта засыпки – 0,65;
12. Класс ответственности сооружения – IV.

1. Определение расчётных характеристик грунтов.

По заданию, грунт основания – супесь тяжёлая с показателем текучести $I_L = 0,6$; объемный вес грунта $\gamma^n = 18$ кН/м³; коэффициент пористости грунта основания 0,6. По [1, табл. II и III, прил. 1] находим:

- удельное сцепление $c^n = 25$ кПа;
- угол внутреннего трения $\varphi^n = 14^\circ$;
- модуль деформации $E = 20$ МПа.

Расчётные параметры грунта основания:

- для расчётов по первой группе предельных состояний

$$\begin{aligned}\gamma_I &= 1,05 \cdot \gamma^n = 1,05 \cdot 18 = 18,9 \text{ кН/м}^3; \\ \varphi_I &= \varphi^n \gamma_\varphi = 14 \cdot 1,15 = 16,1^\circ; \\ c_I &= \frac{c_n}{1,5} = \frac{25}{1,5} = 16,667 \text{ кПа.}\end{aligned}$$

- для расчётов по второй группе предельных состояний

$$\begin{aligned}\gamma_{II} &= \gamma^n = 18 \text{ кН/м}^3; \\ \varphi_{II} &= \varphi^n = 14^\circ; \\ c_{II} &= c_n = 25 \text{ кПа.}\end{aligned}$$

По заданию, грунт засыпки – глина песчаная с показателем текучести $I_L = 0,3$; объемный вес грунта $\gamma^n = 19$ кН/м³; коэффициент пористости грунта основания 0,65. По [1, табл. II и III, прил. 1] находим:

- удельное сцепление $c^n = 57$ кПа;
- угол внутреннего трения $\varphi^n = 18^\circ$;
- модуль деформации $E = 21$ МПа.

Расчётные параметры грунта засыпки:

- для расчётов по первой группе предельных состояний

$$\gamma'_I = 0,95 \cdot 1,05 \cdot \gamma^n = 0,95 \cdot 1,05 \cdot 19 = 18,953 \text{ кН/м}^3;$$

$$\varphi'_I = 0,9 \cdot \varphi^n \gamma_\varphi = 0,9 \cdot 18 \cdot 1,1 = 17,8^\circ;$$

$$c'_I = 0,5 \cdot \frac{c_n}{1,5} = 0,5 \cdot \frac{57}{1,5} = 19 \text{ кПа.}$$

– для расчётов по второй группе предельных состояний

$$\gamma'_{II} = 0,95 \cdot \gamma^n = 0,95 \cdot 19 = 18,05 \text{ кН/м}^3;$$

$$\varphi'_{II} = 0,9 \cdot \varphi^n = 0,9 \cdot 18 = 16,2^\circ;$$

$$c'_{II} = 0,5 \cdot c_n = 0,5 \cdot 57 = 28,5 \text{ кПа.}$$

2. Определение основных геометрических параметров подпорной стены.

Основные геометрические параметры подпорной стены приведены на рис. 1. По заданию, высота подпорной стены $h = 4,5$ м; глубина заложения подошвы $d = 1,3$ м. Принимаем ширину подошвы фундамента стены в пределах $(0,5 - 0,7)h$, что при высоте стены 4,5 м составляет 2,25-3,15 м. Принимаем ширину подошвы фундамента $b = 2,7$ м.

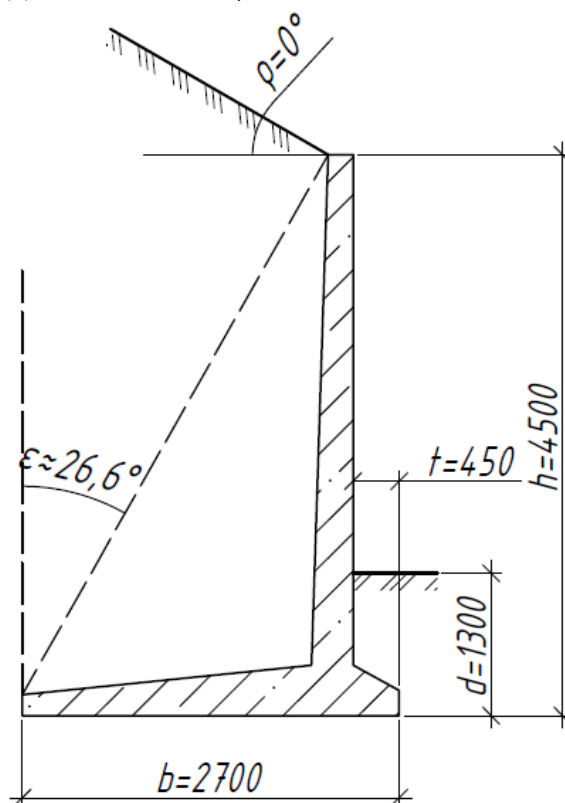


Рис. 1. Габаритные параметры подпорной стены.

Величину выступа передней консоли подошвы подпорной стены t (см. рис. 1) ориентировочно определяем по формуле:

$$t \approx 200 \text{ мм} + 0,05h = 200 + 0,05 \cdot 4500 = 425 \text{ мм.}$$

Принимаем $t = 450$ мм.

Поскольку заданием предусматривается временная нагрузка, расположенная на верхнем уровне стены, что предполагает здесь горизонтальную поверхность, получаем: $\rho = 0^\circ$.

Угол наклона расчетной плоскости (см. рис. 1) к вертикали определяем из уравнения:

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{b-t}{h} = \operatorname{arctg} \frac{2,7 - 0,45}{4,5} = \operatorname{arctg} 0,5 \approx 26,6^\circ \approx 0,464 \text{ рад},$$

при этом ε принимаем не более $\left(45^\circ - \frac{\varphi'_I}{2}\right) = \left(45 - \frac{17,8}{2}\right) = 36,1^\circ \approx 0,630 \text{ рад}$.

3. Определение параметров давления грунта на подпорную стену.

Расчетная схема подпорной стены уголкового профиля приведена на рис. 2. Поскольку наибольшая величина активного давления грунта при наличии на горизонтальной поверхности засыпки равномерно распределенной нагрузки q определяется при расположении этой нагрузки в пределах всей призмы обрушения, получаем (см. рис. 2): $a = 0, y_a = 0$.

Горизонтальные нагрузки на подпорную стену от временной нагрузки и от активного давления грунта вычисляются по [1, формулы (1), (10)].

Предварительно по [1, формулы (5), (6), (7)] находим коэффициенты:

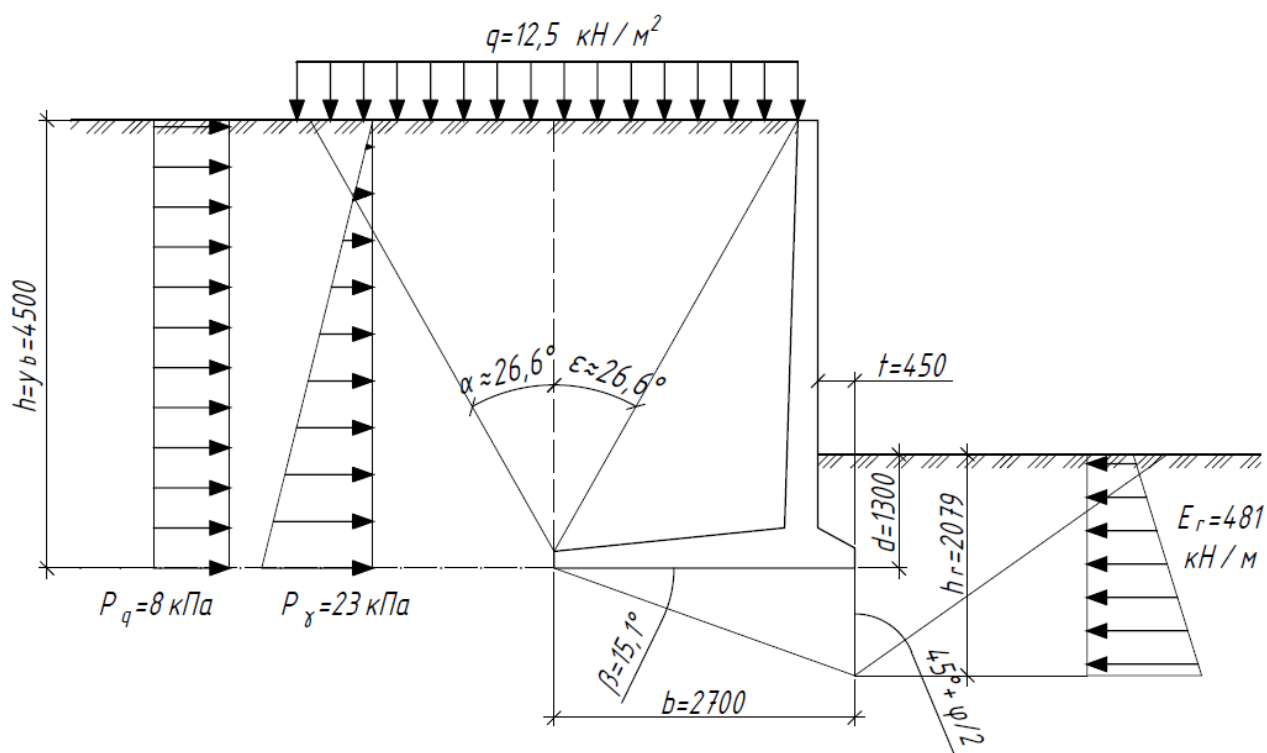


Рис. 2. Расчётная схема подпорной стены.

$$k_1 = \frac{\sin(\varphi'_I + \varphi_s) \sin(\varphi'_s - \rho)}{\cos(\varepsilon + \varphi_s) \cos(\varepsilon - \rho)} = \frac{\sin(17,8^\circ + 17,8^\circ) \cdot \sin(17,8^\circ - 0^\circ)}{\cos(26,6^\circ + 17,8^\circ) \cdot \cos(26,6^\circ - 0^\circ)} = 0,2786;$$

$$k_2 = \frac{\sin(\varphi'_I + \varphi_s) \sin \varphi'_I}{\cos(\varepsilon + \varphi_s - \rho) \cos(\varepsilon - \rho)} = \frac{\sin(17,8^\circ + 17,8^\circ) \cdot \sin 17,8^\circ}{\cos(26,6^\circ + 17,8^\circ - 0^\circ) \cdot \cos(26,6^\circ - 0^\circ)} = 0,2786;$$

$$k_3 = \frac{\cos \varepsilon \cos(\varepsilon + \varphi_s)}{\cos(\varepsilon - \rho) \cos(\varepsilon + \varphi_s - \rho)} = \frac{\cos 26,6^\circ \cdot \cos(26,6^\circ + 17,8^\circ)}{\cos(26,6^\circ - 0^\circ) \cdot \cos(26,6^\circ + 17,8^\circ - 0^\circ)} = 1,000,$$

где φ_s – угол трения грунта на контакте с расчетной плоскостью (для уголкового стены $\varphi_s = \varphi = 17,8^\circ$, но не более 30° . Принимаем $\varphi_s = 17,8^\circ$).

Коэффициенты горизонтального давления грунта вычисляем по [1, формулы (3), (4)]:

$$\lambda_\varphi = \left[\frac{\cos(\varphi'_I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon (1 - \sqrt{k_2})} \right]^2 = \left[\frac{\cos(17,8^\circ - 26,6^\circ)}{\cos 26,6^\circ \cdot (1 - \sqrt{0,2786})} \right]^2 = 0,523;$$

$$\lambda_c = k_3 \left[\frac{\cos(\varphi'_I - \varepsilon + \rho)}{\cos \varepsilon (1 + \sqrt{k_2})} \right]^2 = 1 \cdot \left[\frac{\cos(17,8^\circ - 26,6^\circ + 0^\circ)}{\cos 26,6^\circ \cdot (1 + \sqrt{0,2786})} \right]^2 = 0,523.$$

Вертикальное давление в грунте от собственного веса на глубине $y = h$ определяем по [1, формула (2)]:

$$p_{\gamma h} = \gamma_f \gamma'_I h = 1,15 \cdot 18,953 \cdot 4,5 = 98,082 \text{ кПа.}$$

Интенсивность горизонтального активного давления грунта от собственного веса на глубине $y = h$ вычисляем по [1, формула (1)]:

$$p_\gamma = p_{\gamma h} \lambda_\varphi - \frac{c'_I}{tg \varphi'_I} (1 - \lambda_c) = 98,082 \cdot 0,523 - \frac{19}{tg 17,8^\circ} \cdot (1 - 0,523) =$$

$$= 23,119 \text{ кПа.}$$

Интенсивность горизонтального давления грунта от равномерно распределенной нагрузки q , расположенной на поверхности призмы обрушения, определяем по [1, формула (10)]:

$$p_q = q \gamma_f \lambda_\varphi = 12,5 \cdot 1,2 \cdot 0,523 = 7,850 \text{ кПа.}$$

Поскольку $\varphi_I = 16,1^\circ > 15^\circ$, коэффициент пассивного сопротивления грунта $\lambda_{p\varphi}$ находим по [1, формула (15)]:

$$\lambda_{p\varphi} = \frac{\cos \varphi_s + \sqrt{\sin^2 \varphi_I - \sin^2 \varphi_s}}{\cos^2 \varepsilon (1 - \sin \varphi_I)} \times \exp \left[\left(\varphi_s + \arcsin \frac{\sin \varphi_s}{\sin \varphi_I} + 2\varepsilon \right) tg \varphi_I \right] =$$

$$= \frac{\cos 16,1^\circ + \sqrt{\sin^2 16,1^\circ - \sin^2 16,1^\circ}}{\cos^2 26,6^\circ \cdot (1 - \sin 16,1^\circ)} \times \exp \cdot$$

$$\cdot \left[\left(0,281 + \arcsin \frac{\sin 16,1^\circ}{\sin 16,1^\circ} + 2 \cdot 0,464 \right) \cdot tg 16,1^\circ \right] = 3,627.$$

Коэффициент пассивного сопротивления грунта λ_{pc} вычисляем по [1, формула (18)]:

$$\lambda_{pc} = \lambda_{p\varphi} + tg \varepsilon tg \varphi_s = 3,627 + tg 26,6^\circ \cdot tg 16,1^\circ = 3,772.$$

Угол трения грунта на контакте с расчетной плоскостью φ_s принимаем для грунта основания $\varphi_s = \varphi_I$, но не более 30° , т.е. принимаем $\varphi_s = 16,1^\circ = 0,281$ рад.

4. Расчет устойчивости положения стены против сдвига.

Расчет устойчивости положения стены против сдвига производится из [1, условие (20)]. При этом выделяем один погонный метр стенки. Предварительно определяем следующие параметры:

– по [1, формула (22)] – сдвигающую силу от собственного веса грунта:

$$F_{sa,\gamma} = \frac{p_{\gamma}h}{2} = \frac{23,119 \cdot 4,5}{2} = 52,018 \frac{\text{кН}}{\text{м}};$$

– по [1, формула (23)] – сдвигающую силу от нагрузки, расположенной на поверхности призмы обрушения (здесь $y_b = h$, поскольку $y_a = 0$):

$$F_{sa,q} = p_q y_b = 7,850 \cdot 4,5 = 35,325 \frac{\text{кН}}{\text{м}};$$

– по [1, формула (21)] – сдвигающую силу:

$$F_{sa} = F_{sa,\gamma} + F_{sa,q} = 52,018 + 35,325 = 87,343 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Удерживающую силу F_{sr} находим по [1, формула (24)] для трех значений угла наклона поверхности сдвига β (см. рис. 2).

Рассмотрим первый вариант: $\beta = 0^\circ$.

При $\beta = 0^\circ$ следует учитывать следующие ограничения:

– удельное сцепление грунта – не более 5 кПа (так как в нашем случае $c_I = 16,667$ кПа, принимаем $c_I = 5$ кПа;

– угол внутреннего трения грунта – не более 30° (так как в нашем случае $\varphi_I = 16,1^\circ < 30^\circ$, принимаем $\varphi_I = 16,1^\circ$);

– коэффициенты пассивного сопротивления грунта $\lambda_{p\varphi}$ и λ_{pc} принимаем равными единице.

Высоту призмы выпора грунта находим по [1, формула (27)]:

$$h_r = d + b \tan \beta = 1,3 + 2,7 \cdot \tan 0^\circ = 1,3 \text{ м.}$$

Пассивное сопротивление грунта определяем по [1, формула (26)]:

$$E_r = \frac{\gamma_I h_r^2 \lambda_{p\varphi}}{2} + \frac{c_I h_r (\lambda_{pc} - 1)}{\tan \varphi_I} = \frac{18,9 \cdot 1,3^2 \cdot 1}{2} + \frac{5 \cdot 1,3 \cdot (1 - 1)}{\tan 16,1^\circ} = 15,971 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Сумму проекций всех сил на вертикальную плоскость вычисляем по [1, формула (25)]:

$$\begin{aligned} F_v &= F_{sa} \tan(\varepsilon + \varphi'_I) + \gamma_f \gamma'_I \left[\frac{h(b-t)}{2} + td \right] + \frac{\gamma_I \tan \beta b^2}{2} = \\ &= 87,343 \cdot \tan(26,6^\circ + 17,8^\circ) + 1,2 \cdot 18,953 \cdot \\ &\cdot \left[\frac{4,5 \cdot (2,7 - 0,45)}{2} + 0,45 \cdot 1,3 \right] + \frac{18,9 \cdot \tan 0^\circ \cdot 2,7^2}{2} = 213,977 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Удерживающую силу F_{sr} находим по [1, формула (24)]:

$$F_{sr} = F_v \operatorname{tg}(\varphi_I - \beta) + bc_I + E_r = 213,977 \cdot \operatorname{tg}(16,1^\circ - 0^\circ) + 2,7 \cdot 5 + 15,971 = 116,252 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Расчет устойчивости положения стены против сдвига производим по [1, условие (20)]:

$$F_{sa} = 87,343 \frac{\text{кН}}{\text{м}} < \frac{\gamma_c F_{sr}}{\gamma_n} = \frac{0,9 \cdot 116,252}{1,15} = 90,980 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Условие выполняется, следовательно, устойчивость стены против сдвига (при $\beta = 0^\circ$) обеспечена.

Рассмотрим второй вариант: $\beta = 0,5\varphi_I = 0,5 \cdot 16,1^\circ = 8,05^\circ$.

Здесь указанные в случае $\beta = 0^\circ$ ограничения не учитываются. Поэтому: удельное сцепление грунта $c_I = 16,667$ кПа; угол внутреннего трения грунта $\varphi_I = 16,1^\circ$; коэффициент пассивного сопротивления грунта $\lambda_{p\varphi} = 3,627$; коэффициент пассивного сопротивления грунта $\lambda_{pc} = 3,772$.

Расчет устойчивости положения стены против сдвига ведем аналогично.

Высоту призмы выпора грунта находим по [1, формула (27)]:

$$h_r = d + b \operatorname{tg} \beta = 1,3 + 2,7 \cdot \operatorname{tg} 8,05^\circ = 1,682 \text{ м}.$$

Пассивное сопротивление грунта определяем по [1, формула (26)]:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{\gamma_I h_r^2 \lambda_{p\varphi}}{2} + \frac{c_I h_r (\lambda_{pc} - 1)}{\operatorname{tg} \varphi_I} = \\ &= \frac{18,9 \cdot 1,682^2 \cdot 3,627}{2} + \frac{16,667 \cdot 1,682 \cdot (3,772 - 1)}{\operatorname{tg} 16,1^\circ} = \\ &= 366,163 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Сумму проекций всех сил на вертикальную плоскость вычисляем по [1, формула (25)]:

$$\begin{aligned} F_v &= F_{sa} \operatorname{tg}(\varepsilon + \varphi'_I) + \gamma_f \gamma'_I \left[\frac{h(b-t)}{2} + td \right] + \frac{\gamma_I \operatorname{tg} \beta b^2}{2} = \\ &= 87,343 \cdot \operatorname{tg}(26,6^\circ + 17,8^\circ) + 1,2 \cdot 18,953 \cdot \\ &\cdot \left[\frac{4,5 \cdot (2,7 - 0,45)}{2} + 0,45 \cdot 1,3 \right] + \frac{18,9 \cdot \operatorname{tg} 8,05^\circ \cdot 2,7^2}{2} = \\ &= 223,720 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Удерживающую силу F_{sr} находим по [1, формула (24)]:

$$F_{sr} = F_v \operatorname{tg}(\varphi_I - \beta) + bc_I + E_r = 223,720 \cdot \operatorname{tg}(16,1^\circ - 8,05^\circ) + 2,7 \cdot 16,667 + 366,163 = 442,805 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Расчет устойчивости положения стены против сдвига производим по [1, условие (20)]:

$$F_{sa} = 87,343 \frac{\text{кН}}{\text{м}} < \frac{\gamma_c F_{sr}}{\gamma_n} = \frac{0,9 \cdot 442,805}{1,15} = 346,543 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Условие выполняется, следовательно, устойчивость стены против сдвига (при $\beta = 0,5\varphi_I = 0,5 \cdot 16,1^\circ = 8,05^\circ$) обеспечена.

Рассмотрим третий вариант: $\beta = \varphi_I = 16,1^\circ$.

Высоту призмы выпора грунта находим по [1, формула (27)]:

$$h_r = d + btg\beta = 1,3 + 2,7 \cdot tg16,1^\circ = 2,079 \text{ м}.$$

Пассивное сопротивление грунта определяем по [1, формула (26)]:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{\gamma_I h_r^2 \lambda_{p\varphi}}{2} + \frac{c_I h_r (\lambda_{pc} - 1)}{tg\varphi_I} = \\ &= \frac{18,9 \cdot 2,079^2 \cdot 3,627}{2} + \frac{16,667 \cdot 2,079 \cdot (3,772 - 1)}{tg16,1^\circ} = \\ &= 481,020 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Сумму проекций всех сил на вертикальную плоскость вычисляем по [1, формула (25)]:

$$\begin{aligned} F_v &= F_{sa} tg(\varepsilon + \varphi'_I) + \gamma_f \gamma'_I \left[\frac{h(b-t)}{2} + td \right] + \frac{\gamma_I tg\beta b^2}{2} = \\ &= 87,343 \cdot tg(26,6^\circ + 17,8^\circ) + 1,2 \cdot 18,953 \cdot \\ &\cdot \left[\frac{4,5 \cdot (2,7 - 0,45)}{2} + 0,45 \cdot 1,3 \right] + \frac{18,9 \cdot tg16,1^\circ \cdot 2,7^2}{2} = \\ &= 233,861 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Удерживающую силу F_{sr} находим по [1, формула (24)]:

$$\begin{aligned} F_{sr} &= F_v tg(\varphi_I - \beta) + bc_I + E_r = \\ &= 233,861 \cdot tg(16,1^\circ - 16,1^\circ) + 2,7 \cdot 16,667 + 481,020 = \\ &= 526,021 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Расчет устойчивости положения стены против сдвига производим по [1, условие (20)]:

$$F_{sa} = 87,343 \frac{\text{кН}}{\text{м}} < \frac{\gamma_c F_{sr}}{\gamma_n} = \frac{0,9 \cdot 526,021}{1,15} = 411,669 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Условие выполняется, следовательно, устойчивость стены против сдвига (при $\beta = \varphi_I = 16,1^\circ$) обеспечена.

Поскольку [1, условие (20)] выполняется при всех трех вариантах, устойчивость стены против сдвига обеспечена.

5. Расчет прочности грунтового основания.

Тангенс угла наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание определяется из [1, условие (28)], при этом сумма проекций всех сил на вертикальную плоскость F_v принимается при значении угла $\beta = 0^\circ$:

$$tg\delta_1 = \frac{F_{sa}}{F_v} = \frac{87,343}{213,977} = 0,408 \quad (\delta_1 = \arctg 0,389 = 23,4^\circ).$$

Поскольку $tg\delta_1 = 0,408 > \sin \varphi_I = \sin 16,1^\circ = 0,277$, требуется произвести расчет прочности грунтового основания. Этот расчет выполняем по [1, условие (29)].

Предварительно находим необходимые параметры.

Расстояние от равнодействующей сдвигающей силы до низа подошвы стены определяем по [1, формула (34)]:

$$h^* = \frac{\left[\frac{F_{sa,y}h}{3} + F_{sa,q} \left(h - y_a - \frac{y_b}{2} \right) \right]}{F_{sa}} = \frac{\left[\frac{87,343 \cdot 4,5}{3} + 35,325 \cdot \left(4,5 - 0 - \frac{4,5}{2} \right) \right]}{87,343}$$

$= 1,803$ м.

По [1, формула (33)] вычисляем сумму моментов всех вертикальных и горизонтальных сил относительно оси, проходящей через центр тяжести подошвы:

$$\begin{aligned} M_0 &= F_{sa} \left[h^* - tg(\varepsilon + \varphi'_I) \left(\frac{b}{2} - h^* tg\varepsilon \right) \right] + \gamma_f \gamma'_I (b - t) \cdot \frac{[h(b - 4t) + 6td]}{12} = \\ &= 87,343 \cdot \left[1,803 - tg(26,6^\circ + 17,8^\circ) \cdot \left(\frac{2,7}{2} - 1,803 \cdot tg26,6^\circ \right) \right] \\ &\quad + 18,953 \cdot 1,2 \cdot (2,7 - 0,45) \cdot \frac{[(4,5 \cdot (2,7 - 4 \cdot 0,45) + 6 \cdot 0,45 \cdot 1,3)]}{12} \\ &= 151,518 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Эксцентриситет приложения равнодействующей всех сил относительно оси, проходящей через центр тяжести подошвы стены, определяем по [1, формула (32)]:

$$e = \frac{M_0}{F_v} = \frac{151,518}{213,977} = 0,708 \text{ м},$$

что не превышает $\frac{b}{3} = \frac{2,7}{3} = 0,9$ м.

Прицеленную ширину подошвы находим по [1, формула (31)]:

$$b' = h - 2e = 4,5 - 2 \cdot 0,708 = 3,084 \text{ м}.$$

Безразмерные коэффициенты несущей способности определяем по [1, прил. 2] в зависимости от расчетного значения угла внутреннего трения грунта ($\varphi_I = 16,1^\circ$) и угла наклона к вертикали ($\delta_1 = 23,4^\circ$) равнодействующей внешней нагрузки на основание в уровне подошвы стены:

$$N_\gamma = 0,479; N_q = 2,922; N_c = 4,998.$$

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления основания N_u , находим по [1, формула (30)]:

$$N_u = b'(N_\gamma b' \gamma_I + N_q \gamma_I' d + N_c c_I) = 3,084 \cdot (0,479 \cdot 3,084 \cdot 18,9 + 2,922 \cdot 18,953 \cdot 1,3 + 4,998 \cdot 16,667) = 564,942 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Производим расчет прочности основания по [1, условие (29)]:

$$F_v = 213,977 \frac{\text{кН}}{\text{м}} < \frac{\gamma_c N_u}{\gamma_n} = \frac{0,9 \cdot 564,942}{1,15} = 442,128 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Поскольку условие выполняется, прочность основания обеспечена.

6. Расчет оснований по деформациям.

Поскольку эксцентриситет приложения равнодействующей всех сил относительно оси, проходящей через центр тяжести подошвы стены, большой ($e = 0,708 \text{ м} > \frac{b}{6} = \frac{2,7}{6} = 0,45 \text{ м}$), схема давления под подошвой фундамента принимается по рис. 3.

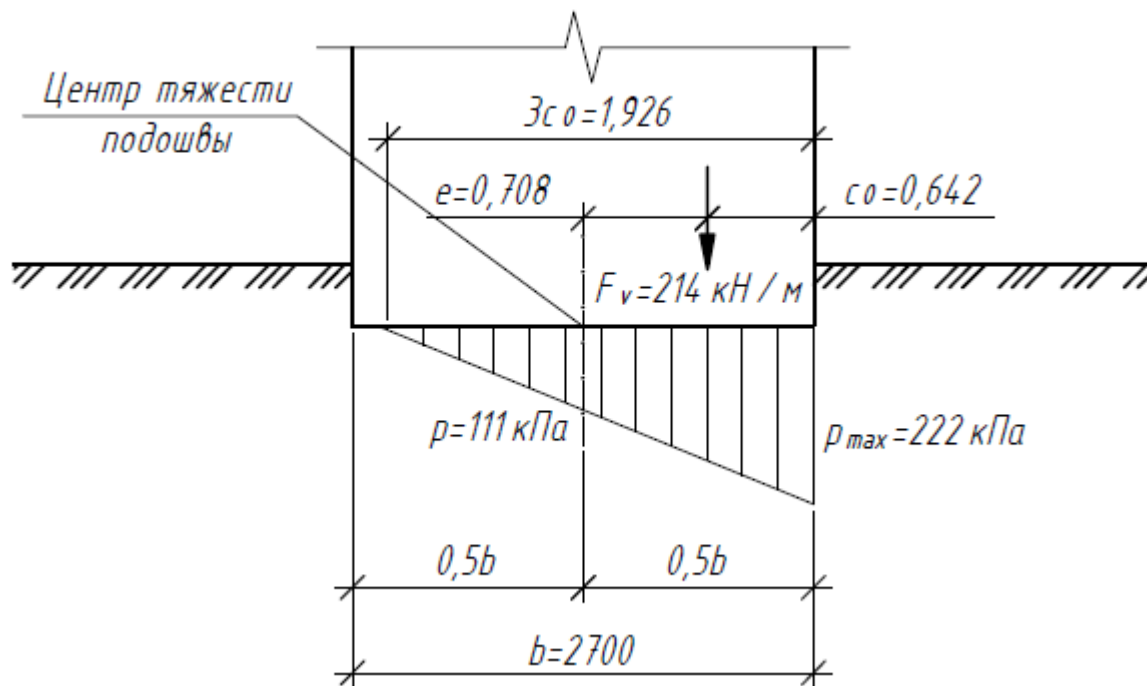


Рис. 3. Схема для определения давлений под подошвой стены.

Краевое давление на грунт под подошвой стены p_{\max} вычисляется по [1, формула (37)]:

$$p_{\max} = \frac{2F_v}{3c_0} = \frac{2 \cdot 213,977}{3 \cdot 0,642} = 222,198 \text{ кПа},$$

где $3c_0$ – длина эпюры давления по подошве фундамента.

$$c_0 = 0,5b - e = 0,5 \cdot 2,7 - 0,708 = 0,642 \text{ м}.$$

Расчетное сопротивление грунта основания R определяется по [1, формула (39)]. Предварительно по [1, табл. 3] находим коэффициент γ_{c1} , а по [1, табл.

4] – коэффициенты M_γ , M_q , M_c в зависимости от угла внутреннего трения грунта основания ($\varphi_{II} = 14^\circ$):

$$\gamma_{c1} = 1,1; M_\gamma = 0,29; M_q = 2,17; M_c = 4,69.$$

$$R = \left(\frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k} \right) (M_\gamma b \gamma_{II} + M_q d \gamma'_{II} + M_c c_{II}) =$$

$$= \left(\frac{1,1 \cdot 1}{1,1} \right) \cdot (0,29 \cdot 2,7 \cdot 18 + 2,17 \cdot 1,3 \cdot 18,05 + 4,69 \cdot 25) =$$

$$= 182,263 \text{ кПа}.$$

Проверяем [1, усл. (35)]:

$$p = 0,5 p_{max} = 0,5 \cdot 222,198 = 111,099 \text{ кПа} < R = 182,263 \text{ кПа};$$

$$p_{max} = 222,198 \text{ кПа} < 1,2 \cdot R = 1,2 \cdot 182,263 = 225,716 \text{ кПа}.$$

Оба условия выполняются; следовательно, деформации основания не превышают допустимых величин.

7. Определение нагрузок, действующих на тонкостенную подпорную стену.

Схема приложения нагрузок к тонкостенной подпорной стене приведена на рис. 4.

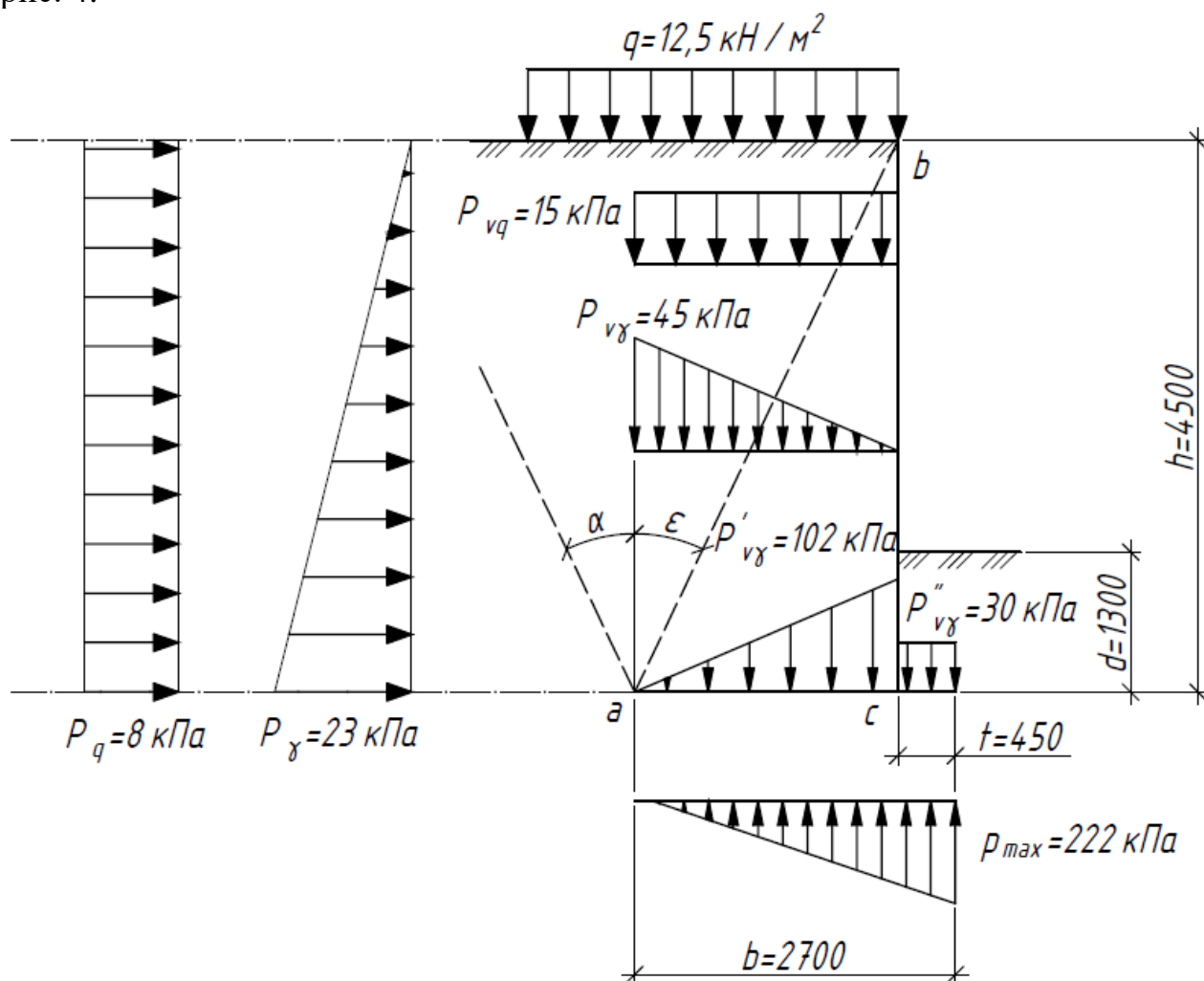


Рис. 4. Схема воздействия нагрузок на тонкостенную подпорную стену при расчете ее на прочность.

Интенсивности горизонтального давления p_γ и p_q были вычислены ранее (см. раздел 3):

$$p_\gamma = 23,119 \text{ кПа};$$

$$p_q = 7,850 \text{ кПа}.$$

Интенсивности вертикального давления от собственного веса грунта в призме обрушения $p_{v\gamma}$ и от временной нагрузки p_{vq} определяются по [1, формулы (40), (41)]:

$$p_{v\gamma} = \frac{p_\gamma \operatorname{tg}(\varepsilon + \varphi'_I)}{\operatorname{tg} \varepsilon} = \frac{23,119 \cdot \operatorname{tg}(26,6^\circ + 17,8^\circ)}{\operatorname{tg} 26,6^\circ} = 45,211 \text{ кПа};$$

$$p_{vq} = \frac{p_q \operatorname{tg}(\varepsilon + \varphi'_I)}{\operatorname{tg} \varepsilon} = \frac{7,850 \cdot \operatorname{tg}(26,6^\circ + 17,8^\circ)}{\operatorname{tg} 26,6^\circ} = 15,351 \text{ кПа};$$

интенсивности вертикального давления от собственного веса грунта в контуре abc $p'_{v\gamma}$ и над передней консолью $p''_{v\gamma}$ – по [1, формулы (42), (43)]:

$$p'_{v\gamma} = \gamma'_I \gamma_f h = 18,953 \cdot 1,2 \cdot 4,5 = 102,346 \text{ кПа};$$

$$p''_{v\gamma} = \gamma''_I \gamma_f d = 18,953 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 29,567 \text{ кПа}.$$

При приложении временной нагрузки ко всей поверхности (на рис. 4: $a = 0$; b_0 – не ограничено) равнодействующая всех усилий определяется по формуле:

$$\begin{aligned} N &= p_{vq}(b - t) + 0,5(p_{v\gamma} + p'_{v\gamma})(b - t) + p''_{v\gamma}t = \\ &= 15,351 \cdot (2,7 - 0,45) + 0,5 \cdot (45,211 + 102,346) \cdot (2,7 - 0,45) \\ &\quad + 29,567 \cdot 0,45 = 213,847 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Изгибающий момент, действующий по подошве фундаментной плиты подпорной стены:

$$\begin{aligned} M &= \frac{p_q h^2}{2} + \frac{p_\gamma h^2}{6} - \frac{p_{vq} t(b - t)}{2} - \frac{p_{v\gamma}(b - t)(b + 2t)}{12} + \frac{p'_{v\gamma}(b - t)(b - 4t)}{12} \\ &\quad + \frac{p''_{v\gamma} t(b - t)}{2} = \frac{7,850 \cdot 4,5^2}{2} + \frac{23,119 \cdot 4,5^2}{6} - \\ &\quad - \frac{15,351 \cdot 0,45 \cdot (2,7 - 0,45)}{2} - \frac{45,211 \cdot (2,7 - 0,45) \cdot (2,7 + 2 \cdot 0,45)}{12} + \\ &\quad + \frac{102,346 \cdot (2,7 - 0,45) \cdot (2,7 - 4 \cdot 0,45)}{12} + \frac{29,567 \cdot 0,45 \cdot (2,7 - 0,45)}{2} = \\ &= 151,458 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Эксцентриситет приложения равнодействующей относительно центра подошвы фундаментной плиты:

$$e = \frac{M}{N} = \frac{151,458}{213,847} = 0,708 \text{ м.}$$

Поскольку эксцентриситет приложения равнодействующей всех сил относительно оси, проходящей через центр тяжести подошвы стены, большой ($e = 0,708 \text{ м} > \frac{b}{6} = \frac{2,7}{6} = 0,45 \text{ м}$), схема давления под подошвой фундамента принимается по рис. 3.

Краевое давление на грунт под подошвой стены p_{max} определяется по [1, формула (37)]:

$$p_{max} = \frac{2N}{3c_0} = \frac{2 \cdot 213,847}{3 \cdot 0,642} = 222,063 \text{ кПа.}$$

8. Проектирование монолитной угловой консольной подпорной стены.

Расчетная схема и схема приложения нагрузок к подпорной стене приведены на рис. 5.

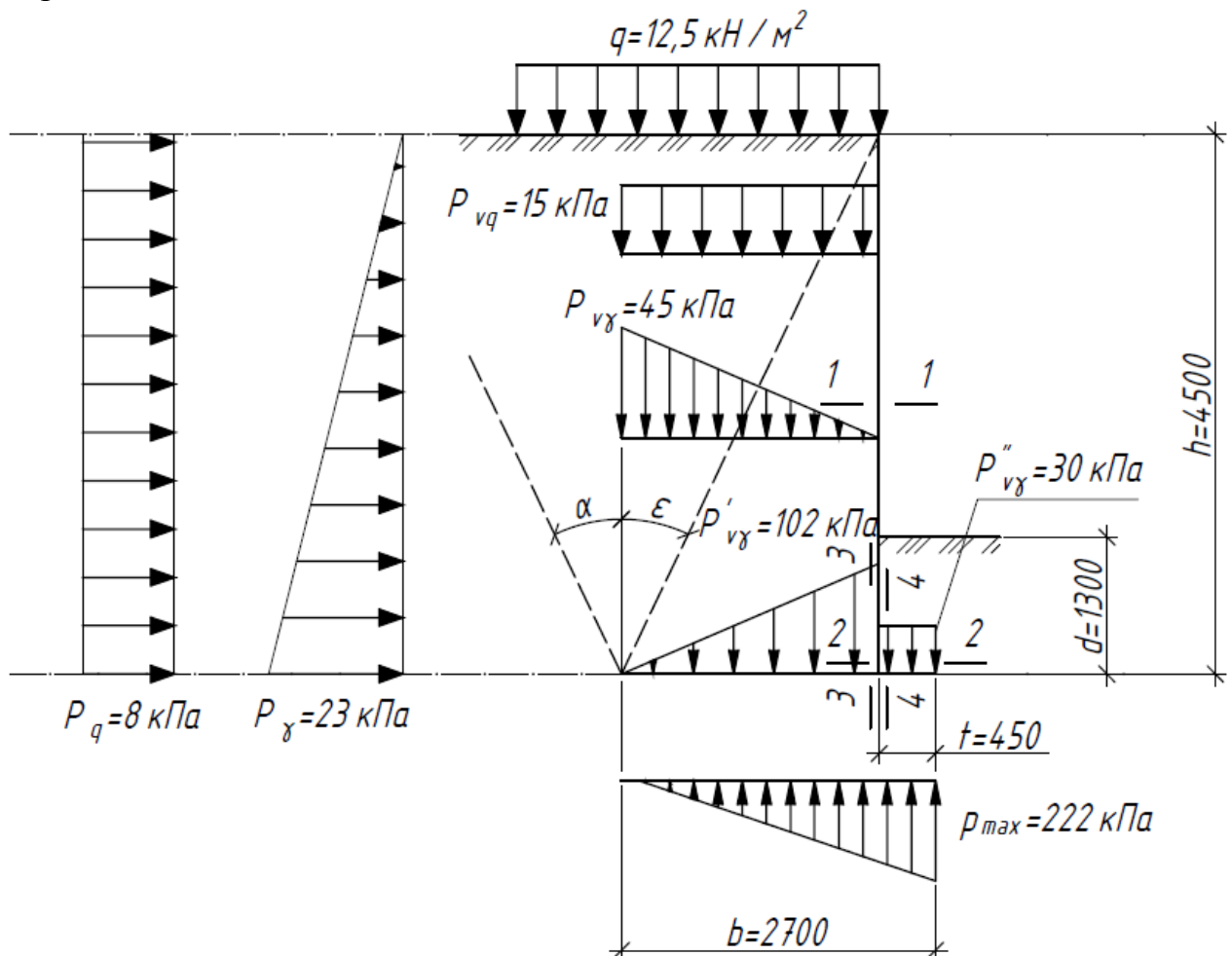


Рис. 5. Расчётная схема и схема приложения нагрузок к подпорной стене.

8.1. Определение внутренних усилий в элементах подпорной стены.

Определяем внутренние усилия:

– в сечении 1 – 1 – по [1, формулы (44), (45)]:

$$M_1 = p_v \frac{h^2}{48} + p_q \frac{h^2}{8} = 23,119 \cdot \frac{4,5^2}{48} + 7,850 \cdot \frac{4,5^2}{8} = 29,624 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}};$$

$$Q_1 = 0,125p_v h + 0,5p_q h = 0,125 \cdot 23,119 \cdot 4,5 + 0,5 \cdot 7,850 \cdot 4,5 = 30,667 \frac{\text{кН}}{\text{м}};$$

– в сечении 2 – 2 – по [1, формулы (46), (47)]:

$$M_2 = p_v \frac{h^2}{6} + p_q \frac{h^2}{2} = 23,119 \cdot \frac{4,5^2}{6} + 7,850 \cdot \frac{4,5^2}{2} = 157,508 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}};$$

$$Q_2 = 0,5p_v h + p_q h = 0,5 \cdot 23,119 \cdot 4,5 + 7,850 \cdot 4,5 = 87,343 \frac{\text{кН}}{\text{м}};$$

– в сечении 3 – 3 – по [1, формулы (48), (49)]; предварительно находим по [1, формула (50)] давление на грунт под лицевой панелью:

$$p_t = p_{min} + (p_{max} - p_{min}) \frac{b - t}{b} = 0 + (222,063 - 0) \cdot \frac{2,7 - 0,45}{2,7} = 185,052 \text{ кПа};$$

$$M_3 = (2p_{min} + p_t - 3p_{vq} - 2p_{vy} - p'_{vy}) \frac{(b - t)^2}{6} =$$

$$= (2 \cdot 0 + 185,052 - 3 \cdot 15,351 - 2 \cdot 45,211 - 102,346) \cdot \frac{(2,7 - 0,45)^2}{6} =$$

$$= -45,367 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}};$$

$$Q_3 = 0,5(p_{min} + p_t - 2p_{vq} - p_{vy} - p'_{vy})(b - t) =$$

$$= 0,5 \cdot (0 + 185,052 - 2 \cdot 15,351 - 45,211 - 102,346) \cdot (2,7 - 0,45) =$$

$$= 7,643 \frac{\text{кН}}{\text{м}};$$

– в сечении 4 – 4 – по [1, формулы (54), (55)]:

$$M_4 = (2p_{max} + p_t - 3p''_{vy}) \frac{t^2}{6} = (2 \cdot 222,063 + 185,052 - 3 \cdot 29,567) \cdot \frac{0,45^2}{6} =$$

$$= 18,241 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}};$$

$$Q_4 = 0,5(p_{max} + p_t - 2p''_{vy})t = 0,5 \cdot (222,063 + 185,052 - 2 \cdot 29,567) \cdot 0,45 =$$

$$= 78,296 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

8.2. Подбор арматуры в элементах подпорной стены.

Эпюры внутренних усилий в элементах подпорной стенки приведены на рис. 6.

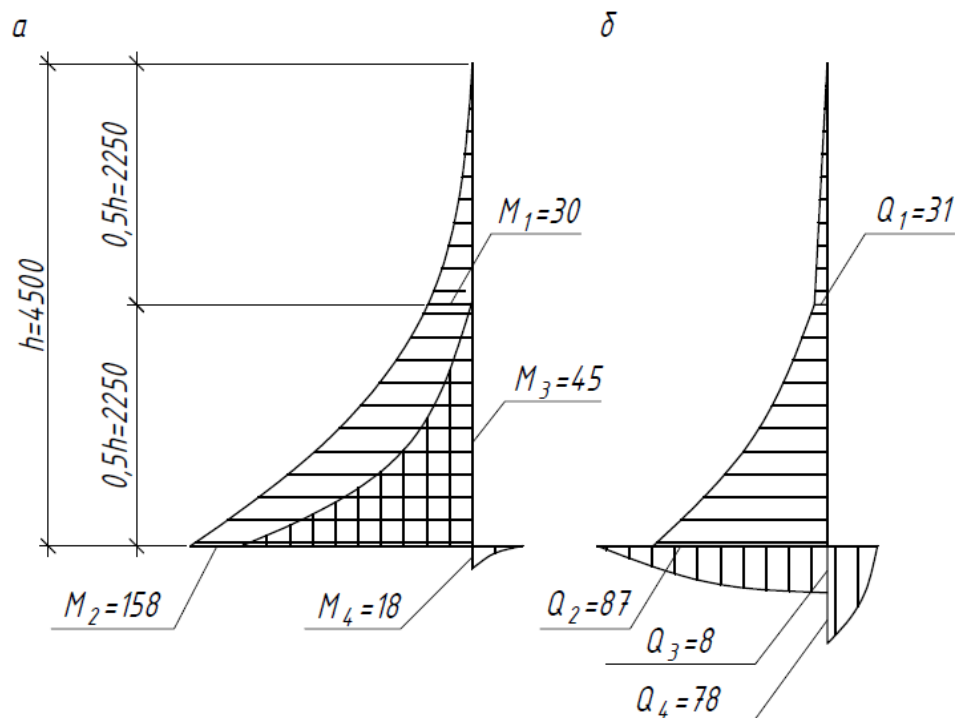


Рис. 6. Эпюры внутренних усилий в элементах угловой подпорной стены:
а – эпюра моментов, $\frac{\text{кН}\cdot\text{м}}{\text{м}}$; б – эпюра поперечных сил, $\frac{\text{кН}}{\text{м}}$.

Принимаем: толщину стены в месте примыкания к фундаментной плите не менее $\frac{h}{15} = \frac{4500}{15} = 300$ мм, толщину стены 300 мм, толщины всех элементов по краям 200 мм. Опалубочные размеры подпорной стены приведены на рис. 7.

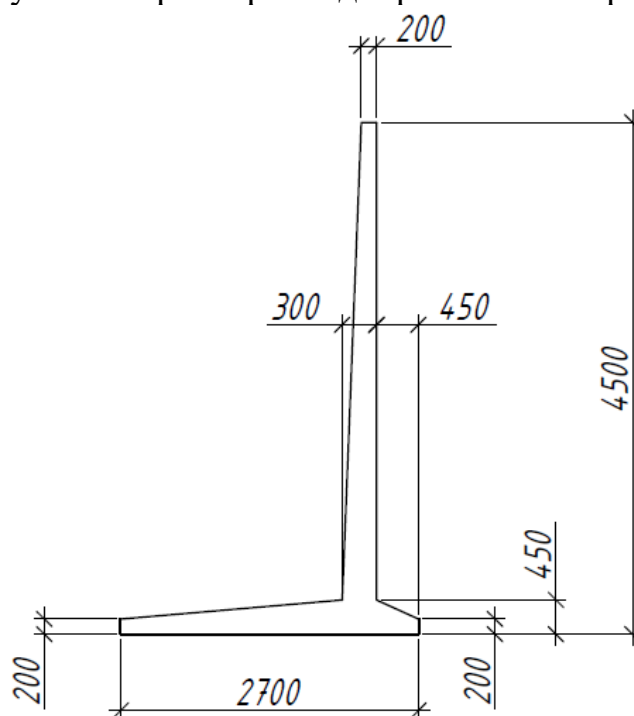


Рис. 7. Опалубочные размеры подпорной стены.

В соответствии с эпюрой моментов (см. рис. 6) в лицевой части подпорной стены растянутая зона находится с левой стороны. В связи с этим здесь будет располагаться продольная рабочая арматура. С правой стороны арматура будет монтажная.

Для расчета выделяем участок стены длиной 1 м. Расчетное сечение получается прямоугольным (см. рис. 8) с шириной $b = 1$ м. Максимальный изгибающий момент в лицевой части в сечении 2 – 2. Высота сечения здесь $h = 300$ мм. Принимаем расстояние от рабочей продольной арматуры до растянутой грани $a = 50$ мм. В этом случае $h_0 = h - a = 300 - 50 = 250$ мм. Подбор арматуры проводим по формулам, согласно [1]. По заданию, класс бетона монолитной подпорной стены В15, класс рабочей арматуры А240. Расчетные характеристики бетона и арматуры принимаем по [2]: $R_b = 8,5$ МПа, $R_s = 210$ МПа.

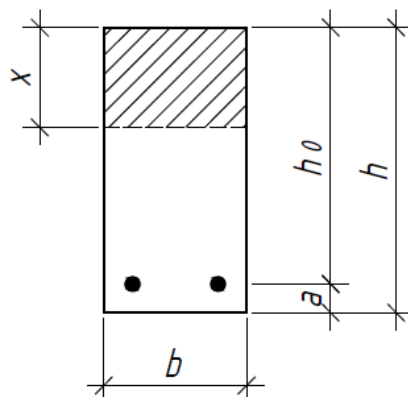


Рис. 8. Расчетное поперечное сечение изгибаемого железобетонного элемента прямоугольного профиля с одиночным армированием.

По [1, формула (97)] определяем коэффициент a_m :

$$a_m = \frac{\gamma_{lc}\gamma_n M}{\gamma_c \gamma_b R_b b h_0^2} = \frac{1 \cdot 1,2 \cdot 157,508 \cdot 10^6}{1 \cdot 1,1 \cdot 8,5 \cdot 1000 \cdot 250^2} = 0,323.$$

Определяем требуемую площадь сечения рабочей арматуры:

$$A_s = \frac{R_b b h_0 (1 - \sqrt{1 - 2a_m})}{R_s} = \frac{8,5 \cdot 1000 \cdot 250 \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,323})}{210} = 4106 \text{ мм}^2.$$

По [3] принимаем диаметр стержней 25 мм, шаг стержней 100 мм (всего на 1 п.м. укладывается 10 стержней общей площадью сечения 4909 мм^2).

Учитывая, что изгибающие моменты в верхней части стены значительно меньшие, обрываем часть стержней (через один). Таким образом, на одном метре укладывается 5 стержней (с шагом 200 мм) общей площадью 2454 мм^2 . В сечении 1 – 1 изгибающий момент $M_1 = 29,625 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$. Высота сечения здесь $h = 0,5 \cdot (300 + 200) = 250$ мм. В этом случае $h_0 = h - a = 250 - 50 = 200$ мм. По [1, формула (91)] определяем высоту сжатой зоны:

$$x = \frac{\gamma_s R_s A_s}{\gamma_b R_b b} = \frac{1,1 \cdot 210 \cdot 2454}{1,1 \cdot 8,5 \cdot 1000} = 60,63 \text{ мм}.$$

Относительная высота сжатой зоны:

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{60,63}{200} = 0,303 < \xi_R = 0,6.$$

Проверяем условие прочности по [1, усл. (90)]:

$$\begin{aligned}\gamma_k \gamma_n M &= 1 \cdot 1,2 \cdot 29,625 = 35,549 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}} < \gamma_c \gamma_b R_b b x (h_0 - 0,5x) = \\ &= 1 \cdot 1,1 \cdot 8,5 \cdot 1000 \cdot 60,63 \cdot (200 - 0,5 \cdot 60,63) = 96191 \text{ Н} \cdot \text{м} = \\ &= 96,191 \text{ кН} \cdot \text{м}.\end{aligned}$$

Условие выполняется. Следовательно, прочность сечения (1 – 1) обеспечена.

Фундаментная плита в соответствии с эпюрой моментов имеет растянутые зоны и сверху, и снизу. Следовательно, продольная рабочая арматура должна подбираться и для верхней, и для нижней зоны. Подбор продольной рабочей арматуры проводим аналогично подбору арматуры стены.

Для верхней арматуры в сечении 3 – 3 $M_3 = 45,367 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$; высота сечения $h = 450$ мм. Принимаем расстояние от рабочей продольной арматуры до верхней грани $a = 50$ мм. В этом случае $h_0 = h - a = 450 - 50 = 400$ мм. Подбор арматуры проводим по формулам, согласно [1]. По заданию, класс бетона монолитной подпорной стены В15, класс рабочей арматуры А240.

По [1, формула (97)] определяем коэффициент α_m :

$$\alpha_m = \frac{\gamma_{lc} \gamma_n M}{\gamma_c \gamma_b R_b b h_0^2} = \frac{1 \cdot 1,2 \cdot 45,367 \cdot 10^6}{1 \cdot 1,1 \cdot 8,5 \cdot 1000 \cdot 400^2} = 0,036.$$

Определяем требуемую площадь сечения рабочей арматуры:

$$\begin{aligned}A_s &= \frac{R_b b h_0 (1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m})}{R_s} = \frac{8,5 \cdot 1000 \cdot 400 \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,036})}{210} = \\ &= 600 \text{ мм}^2.\end{aligned}$$

По [3] принимаем диаметр стержней 10 мм, шаг стержней 100 мм (всего на 1 п.м. укладывается 10 стержней общей площадью сечения 785 мм²).

Для нижней арматуры в сечении 4 – 4 $M_4 = 18,241 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$; высота сечения $h = 450$ мм. Принимаем расстояние от рабочей продольной арматуры до верхней грани $a = 100$ мм. В этом случае $h_0 = h - a = 450 - 100 = 350$ мм. Подбор арматуры проводим по формулам, согласно [1]. По заданию, класс бетона монолитной подпорной стены В15, класс рабочей арматуры А240.

По [1, формула (97)] определяем коэффициент α_m :

$$\alpha_m = \frac{\gamma_{lc} \gamma_n M}{\gamma_c \gamma_b R_b b h_0^2} = \frac{1 \cdot 1,2 \cdot 18,241 \cdot 10^6}{1 \cdot 1,1 \cdot 8,5 \cdot 1000 \cdot 350^2} = 0,019.$$

Определяем требуемую площадь сечения рабочей арматуры:

$$\begin{aligned}A_s &= \frac{R_b b h_0 (1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m})}{R_s} = \frac{8,5 \cdot 1000 \cdot 350 \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,019})}{210} = \\ &= 273 \text{ мм}^2.\end{aligned}$$

По [3] принимаем диаметр стержней 10 мм, шаг стержней 200 мм. Всего на 1 п.м. укладывается 5 стержней общей площадью сечения 393 мм². Схема расположения рабочей продольной арматуры в монолитной подпорной стене приведена на рис. 9.

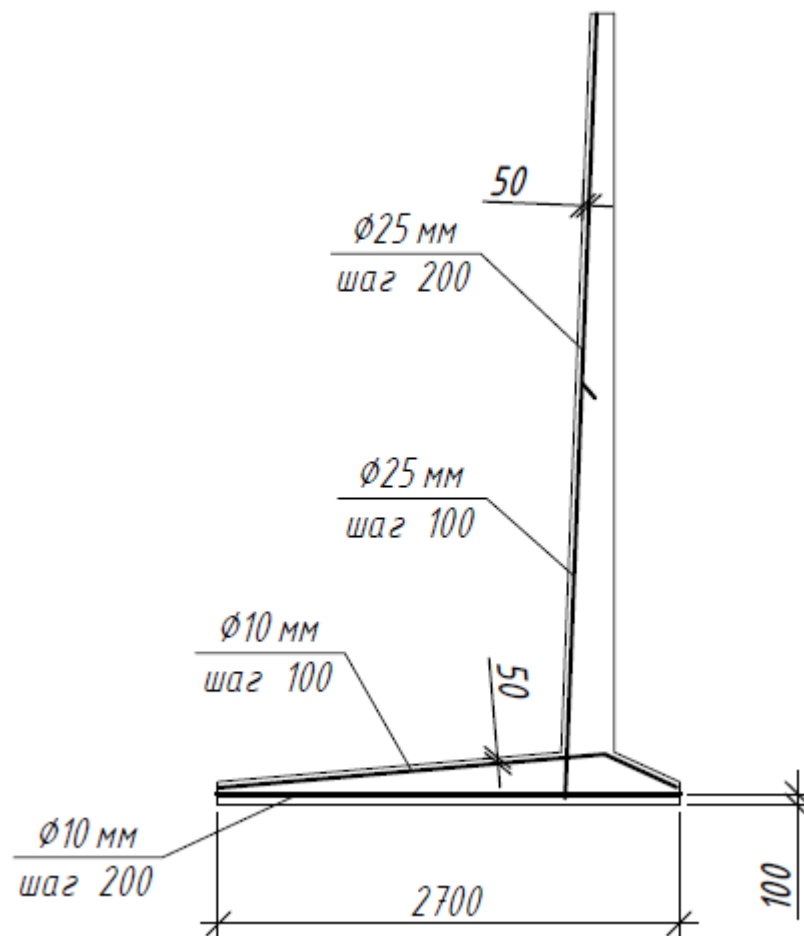


Рис. 9. Схема армирования монолитной подпорной стены продольной рабочей арматурой.

8.3. Расчет подпорной стены по деформациям.

Нормативная величина интенсивности горизонтального активного давления грунта от собственного веса на глубине $y = h$ вычисляется по формуле:

$$p_{\gamma}^n = \frac{p_{\gamma}}{\gamma_n} = \frac{23,119}{1,15} = 20,103 \text{ кПа.}$$

Нормативная величина интенсивности горизонтального давления грунта от равномерно распределенной нагрузки q , расположенной на поверхности призмы обрушения, определяется по формуле:

$$p_q^n = \frac{p_q}{\gamma_n} = \frac{7,850}{1,15} = 6,826 \text{ кПа.}$$

Изгибающий момент от постоянных нагрузок

$$C = p_{\gamma}^n \frac{h^2}{6} = 20,103 \cdot \frac{4,5^2}{6} = 67,849 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}.$$

Изгибающий момент от временных нагрузок

$$V = p_q^n \frac{h^2}{2} = 6,826 \cdot \frac{4,5^2}{2} = 69,114 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}.$$

Изгибающий момент от постоянных и временных нагрузок

$$M = C + V = 67,849 + 69,114 = 136,963 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}.$$

Параметры сечения 2 – 2 на рис. 5: высота сечения $h = 300$ мм, рабочая высота сечения $h_0 = 250$ мм. Расчетные характеристики бетона и арматуры при расчетах по второй группе предельных состояний принимаем по [2]: $R_{b,ser} = 11$ МПа, $E_b = 19500$ МПа, $R_{s,ser} = 240$ МПа, $E_s = 210000$ МПа.

Высота сжатой зоны при указанных характеристиках

$$x = \frac{R_{s,ser} A_s}{R_{b,ser} b} = \frac{240 \cdot 4909}{11 \cdot 1000} = 107,11 \text{ мм}.$$

Момент инерции сжатой зоны бетона относительно центра тяжести сечения

$$I_b = \frac{bx^3}{12} + bx \left(\frac{h-x}{2} \right)^2 = \frac{1000 \cdot 107,11^3}{12} + 1000 \cdot 107,11 \cdot \left(\frac{300 - 107,11}{2} \right)^2 = 10,987 \cdot 10^8 \text{ мм}^4.$$

Момент инерции площади сечения арматуры относительно центра тяжести сечения элемента

$$I_s = A_s \left(h_0 - \frac{h}{2} \right)^2 = 4909 \cdot \left(250 - \frac{300}{2} \right)^2 = 0,491 \cdot 10^8 \text{ мм}^4.$$

Жесткость сечения определяем по [1, формула (111)]:

$$\begin{aligned} B &= \frac{1,1 E_b (I_b + \nu I_s) (C + V)}{\delta C + V} = \\ &= \frac{1,1 \cdot 19500 \cdot (10,987 \cdot 10^8 + 10,769 \cdot 0,491 \cdot 10^8) \cdot (67,849 + 69,114)}{2 \cdot 67,849 + 69,114} = \\ &= 233430 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2, \end{aligned}$$

где отношение модулей упругости арматуры и бетона

$$\nu = \frac{E_s}{E_b} = \frac{210000}{19500} = 10,769.$$

Отношение высоты сечения стены в верхней части h_B к высоте сечения в нижней h_H

$$\alpha = \frac{h_B}{h_H} = \frac{200}{300} = 0,667.$$

Коэффициент, учитывающий изменение толщины стены по высоте, находим по [1, формула (113)]:

$$k = \frac{1 + 1,5\alpha - 3\alpha^2 + 0,5\alpha^3 + 3\alpha \ln \alpha}{(1 - \alpha)^4} =$$

$$= \frac{1 + 1,5 \cdot 0,667 - 3 \cdot 0,667^2 + 0,5 \cdot 0,667^3 + 3 \cdot 0,667 \cdot \ln 0,667}{(1 - 0,667)^4} = 0,315.$$

Горизонтальное смещение верха уголковой консольной подпорной стены определяем по [1, формула (112)]:

$$\Delta = k \frac{Mh^2}{B} = 0,315 \cdot \frac{136,963 \cdot 10^6 \cdot 4500^2}{233430 \cdot 10^8} = 37 \text{ мм.}$$

Допускаемую величину смещения верха стены в рамках курсового проектирования можно принять равной $\frac{1}{75}h = \frac{1}{75} \cdot 4500 = 60 \text{ мм.}$

Поскольку смещение верха стены не превышает допускаемую величину, жесткость подпорной стены обеспечена.

Список использованных источников.

1. Багдоев, С.Г. Проектирование железобетонных подпорных стен: учеб. пособие / С.Г. Багдоев. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 88 с.
2. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».
3. ГОСТ 5781-82 «Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций».
4. Волосухин, В.А. Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений [Текст]: учеб. пособие / В.А. Волосухин, В.П. Дыба, С.И. Евтушенко. – М.: АСВ, 2008. – 96 с.
5. СП 20.13330.2017 «Нагрузки и воздействия».
6. Проектирование подпорных стен и стен подвалов [Текст]: справочное пособие к СНиП. – М.: Стройиздат, 1990. – 104 с.