

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра строительных конструкций

С.Б. Колоколов

# **ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ГОРОДОВ**

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 08.03.01 Строительство

Оренбург  
2016

УДК 624.014:004 (07)

ББК 38.54я7

К61

Рецензент – доктор технических наук, профессор А.Ф. Колинченко

**Колоколов, С.Б.**

К61 Подземные сооружения городов: методические указания/ С.Б.Колоколов;  
Оренбургский гос. ун-т – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2016. - 33 с.

В учебном издании приводятся методические указания к выполнению расчетно-графической работы и рекомендации по оформлению графической части. Рассматривается числовой пример. Приведены варианты исходных данных для расчетно-графической работы. Учебное издание предназначено для использования студентами, обучающимися по программам высшего образования направления подготовки 08.03.01 Строительство.

УДК 624.014:004 (07)

ББК 38.54я7

© Колоколов С.Б., 2016

© ОГУ, 2016

## Содержание

	Введение.....	4
1	Определение координат расчетных сечений.....	5
2	Определение вертикального давления в расчетных точках..	14
3	Определение активного давления в расчетных точках.....	15
4	Построение эпюры активного давления.....	16
5	Построение эпюры пассивного давления.....	17
6	Уточнение требуемой глубины заделки.....	17
7	Определение расчетного изгибающего момента в подпорной стене.....	19
8	Пример выполнения расчетно-графической работы.....	20
9	Варианты заданий.....	31
	Список использованных источников.....	33

## Введение

Расчетно-графическая работа предназначена для приобретения навыков определения рациональных параметров стен подземных сооружений мелкого заложения и ограждения стенок при котлованном способе возведения. В рамках работы необходимо выполнить расчет активного давления грунта в расчетных сечениях подпорной стены (ограждения), определить величину заглубления стены в грунт для обеспечения устойчивости положения, определить внутренние усилия в стене, возникающие от давления грунта.

Высота подпорной стены  $H$  (или глубина котлована) принимается равной 10 м. остальные числовые исходные данные определяются в соответствии с вариантом задания. По первой цифре варианта задания выбираются данные, расположенные в столбце таблицы 1, по второй цифре – в таблице 2, по третьей – в таблице 3. Например, при варианте №432 из таблицы 1 берется столбец 4, из таблицы 2 – столбец 3, из таблицы 3 – столбец 2. В таблице даны мощности первых двух от поверхности слоев. Мощность третьего слоя не ограничена.

Для выполнения графической части работы следует использовать миллиметровую бумагу формата А3 или А4.

## 1 Определение координат расчетных сечений

Принимается система координат, в которой ось  $x$  совпадает с линией поверхности грунта, ось  $y$  – с внутренней гранью стены (линией стены). Начало координат обозначено точкой  $O$ . Поверхность грунта имеет ординату  $y = 0$ . Координаты расчетных точек определяются расчетом и графическим построением.

Величина активного давления вычисляется в расчетных сечениях стены, в которых эпюра давления претерпевает резкие изменения. В промежутках между расчетными сечениями эпюра имеет линейный характер. К расчетным сечениям относятся границы между слоями грунта, имеющими разные механические характеристики. В задании дано три слоя грунта, следовательно, таких границ две: они на схеме стены отмечены расчетными точками  $A$  и  $B$ . Точка  $A$  имеет ординату  $y_A = m_1$ , точка  $B$  – ординату  $y_B = m_1 + m_2$ . В каждой точке рассматривается два расчетных сечения, имеющие одну и ту же ординату  $y$ : одно расположено несколько выше расчетной точки и обозначается  $A$ -в или  $B$ -в, другое ниже расчетной точки и обозначается  $A$ -н или  $B$ -н.

К расчетным точкам также относятся точка  $K$ , которая находится на уровне дна котлована ( $y_K = H$ ) и точка  $Z$  – на уровне заделки стены в грунт ( $y_Z = H + z$ ). Последняя точка имеет условную координату, поскольку глубина заделки является предметом расчета и будет установлена по его окончании. Для определенности в первом приближении принимается глубина заделки  $z = 1$  м.

Кроме указанных расчетных сечений характерные изменения возникают на эпюре в местах начала и окончания влияния на стену нагрузок на поверхности. В задании даны две полосовые нагрузки на поверхности, следовательно, на эпюре еще четыре расчетных точки. Они обозначены буквами:  $C$  – точка начала влияния нагрузки  $q_1$ ,  $D$  – точка окончания влияния нагрузки  $q_1$ ,  $E$  – точка начала влияния нагрузки  $q_2$ ,  $F$  – точка окончания влияния нагрузки  $q_2$ . Во всех расчетных точках также рассматриваются два сечения, имеющие одну и ту же ординату  $y$ : одно расположено несколько выше расчетной точки, другое ниже расчетной точки.

Расчетные точки нужно нанести на расчетную схему. Расчетная схема выполняется в масштабе М1:50 таким образом, чтобы на формате А4 разместилась подпорная стена и призмы сползания (обрушения). Линия стены (ось  $y$ ) должна располагаться в левой части листа на расстоянии от 1 до 2 см от левой границы листа. Линия поверхности грунта (ось  $x$ ) должна располагаться на таком же расстоянии от верхней границы листа.

В том же масштабе на линии поверхности грунта обозначаются точки начала и конца полосовых нагрузок. Точка  $X_1$  находится на расстоянии  $a$  от точки  $O$  ( $x = a$ ), точка  $X_2$  – на расстоянии  $b$  от точки  $X_1$  ( $x = a+b$ ), точка  $X_3$  – на расстоянии  $d$  от точки  $X_2$  ( $x = a+b+d$ ), точка  $X_4$  - на расстоянии  $b$  от точки  $X_3$  ( $x = a+2b+d$ ).

На линии поверхности грунта наносится точка выхода на поверхность линии сползания  $O_1$ . Ее координата определяется графически и расчетом. Мощность последнего, третьего слоя принимается равной:

$$m_3 = H - m_1 - m_2 + z, \quad (1)$$

где  $H$  - высота стены, м;

$m_1$  - мощность первого слоя, м;

$m_2$  - мощность второго слоя, м;

$z$  - глубина заделки стены в грунт, м,

Определение координаты точки  $O_1$  графически показано на рисунке 1. Вначале из точки  $Z$  строится линия сползания третьего слоя под углом  $\theta_3$  к горизонтали до пересечения с границей второго слоя. Координата  $x$  точки пересечения  $B_1$ :

$$x_{B1} = m_3 \cdot ctg \theta_3. \quad (2)$$

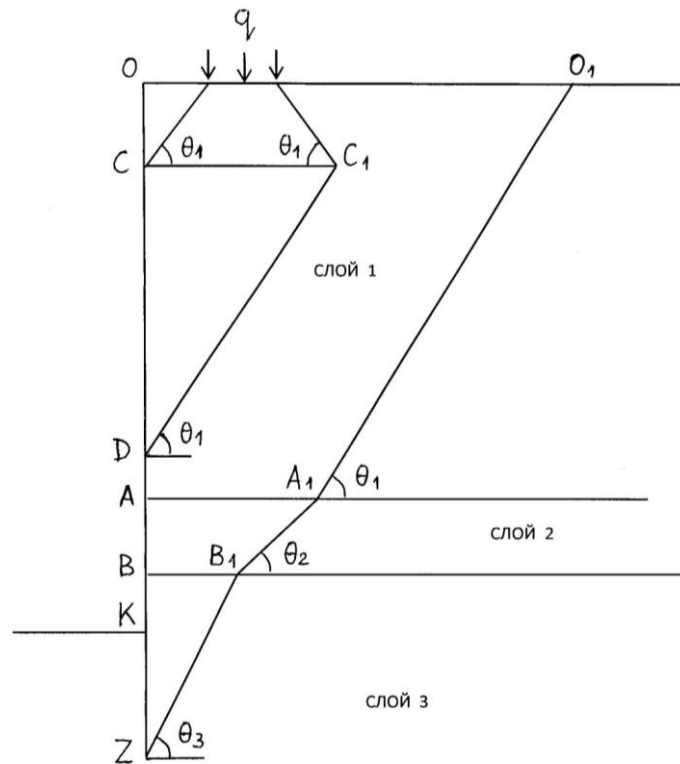


Рисунок 1 – К определению расчетных точек. Вариант 1

Из точки  $B_1$  строится линия сползания второго слоя под углом  $\theta_2$  к горизонтали до пересечения с границей первого слоя. Координата  $x$  точки пересечения  $A_1$ :

$$x_{A_1} = x_{B_1} + m_2 \cdot ctg \theta_2. \quad (3)$$

Из точки  $A_1$  строится линия сползания первого слоя под углом  $\theta_1$ . Точка пересечения этой линии с линией поверхности - точка  $O_1$ . Координата точки  $O_1$  может быть определена аналитически:

$$x_{O_1} = m_3 \cdot ctg \theta_3 + m_2 \cdot ctg \theta_2 + m_1 \cdot ctg \theta_1. \quad (4)$$

Напомним, что угол  $\theta$  зависит от угла внутреннего трения грунта соответствующего слоя:

$$\theta = \frac{90^\circ + \varphi}{2}. \quad (5)$$

Для определения ординат точек  $C$  и  $D$  строятся линии сползания (обрушения) из граничных точек  $X_1$  и  $X_2$  полосовой нагрузки  $q_1$  на поверхности грунта. При построении могут возникнуть разные варианты.

На рисунке 1 показан простейший вариант, когда линия сползания, проведенная из точки  $X_1$ , пересекает линию стены в первом слое. Полученная точка пересечения и есть точка С. Координата ее может быть определена аналитически:

$$y_c = a \cdot \operatorname{tg} \vartheta_1. \quad (6)$$

На уровне точки С определяется эквивалентная нагрузка, которая полностью покрывает призму сползания и распределяется на участке между точками С и  $C_1$ . Точка  $C_1$  получается при пересечении линии сползания, проведенной из точки  $X_2$  вправо, с горизонтальной линией, проведенной из точки С. Длина участка между точками С и  $C_1$ , а, следовательно, и координата  $x_{c1}$  равна  $2a + b$ , а интенсивность эквивалентной нагрузки:

$$q_s = q \cdot \frac{b}{2a + b}. \quad (7)$$

Из точки  $C_1$  проводится линия сползания, ограничивающая распространение давления от эквивалентной нагрузки, влево под углом  $\theta_1$  к горизонтали. На рисунке 1 рассмотрен вариант 1, когда линия сползания, идущая из точки  $C_1$ , пересекает линию стены в первом слое. Тогда координата точки D пересечения:

$$y_D = y_c + (2a + b) \cdot \operatorname{tg} \vartheta_1. \quad (8)$$

Если определенная по формуле (8) величина больше мощности первого слоя, то это означает, что пересечение линии сползания произойдет сначала с границей между слоями. Такой случай (вариант 2) рассмотрен на рисунке 2.



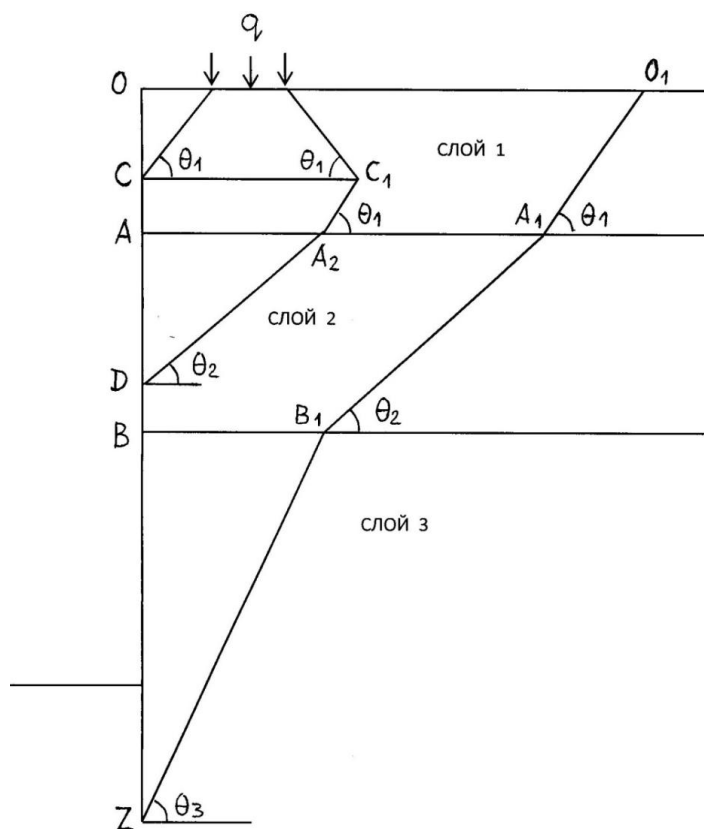


Рисунок 2 - К определению расчетных точек. Вариант 2

Координата точки пересечения  $A_2$ :

$$x_{A_2} = 2a + b - (m_1 - y_c) \operatorname{ctg} \vartheta_1. \quad (9)$$

Продолжение линии сползания во втором слое идет под углом  $\theta_2$  к горизонтали до пересечения с линией стены. Точка пересечения и есть точка D. Координата ее может быть определена аналитически:

$$y_D = m_1 + x_{A_2} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2. \quad (10)$$

На рисунке 3 рассмотрен вариант 3, когда линия сползания, проведенная из точки  $A_2$ , пересекает границу между вторым и третьим слоями раньше, чем линию стены.

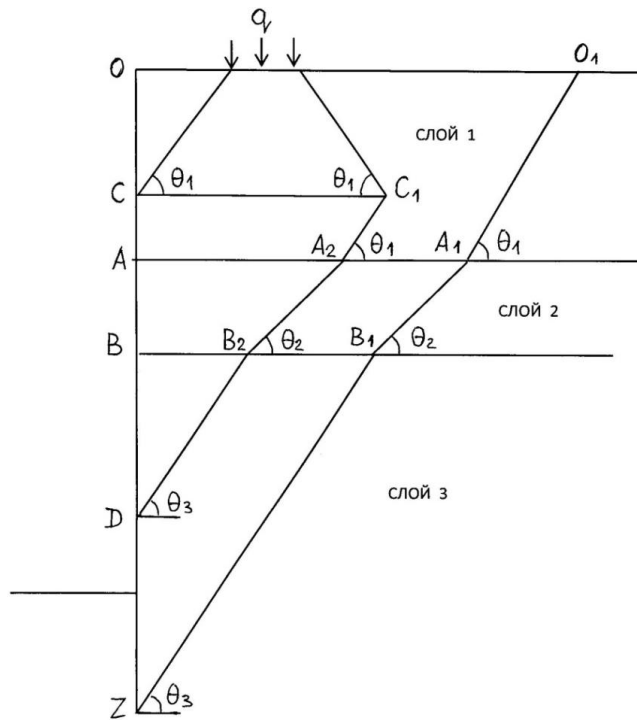


Рисунок 3 - К определению расчетных точек. Вариант 3

Координата точки пересечения  $B_2$ :

$$x_{B_2} = x_{A_2} - m_2 \cdot ctg \vartheta_2. \quad (11)$$

Из точки  $B_2$  линия сползания идет под углом  $\theta_3$  до пересечения с линией стены в точке  $D$ , координата которой:

$$y_D = y_B + x_{B_2} \cdot tg \vartheta_3. \quad (12)$$

Возможен вариант 4, когда линия сползания, проведенная из точки  $X_1$ , не пересекает линию стены в первом слое, а пересекает границу между первым и вторым слоями (точка  $A_3$  на рисунке 4).

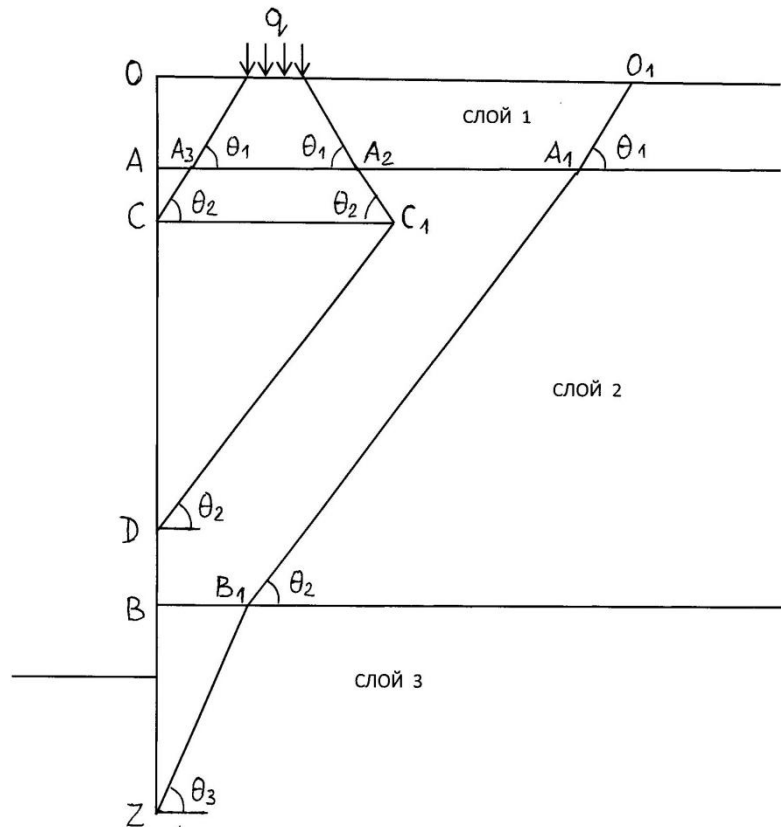


Рисунок 4 - К определению расчетных точек. Вариант 4

Координата точки  $A_3$ :

$$x_{A_3} = a - m_1 \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_1. \quad (13)$$

Во втором слое линия сползания из точки  $A_3$  идет уже под углом  $\theta_2$  к горизонтали до пересечения с линией стены в точке  $C$ . Ордината этой точки:

$$y_c = y_A + x_{A_3} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2. \quad (14)$$

Для определения координаты точки  $D$  строится линия сползания вправо в первом слое до пересечения границы между первым и вторым слоями в точке  $A_2$ . Из точки  $A_2$  линия сползания продолжается во втором слое под углом  $\theta_2$  к горизонтали до пересечения с горизонтальной линией, исходящей из точки  $C$  в точке  $C_1$ . Получаем участок длиной  $2a + b$  полностью покрытый эквивалентной нагрузкой. Далее линия сползания проводится из точки  $C_1$  влево под углом  $\theta_2$  к горизонтали и пересекает линию стены в точке  $D$ , координата которой

$$y_D = y_c + (2a + b) \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2. \quad (15)$$

Если линия сползания, проводимая из точки  $C_1$  пересекает границу между вторым и третьим слоями раньше, чем линию стены, как показано на рисунке 5 (вариант 5). Точка  $B_2$  пересечения границы слоя, из которой линия сползания идет под углом  $\theta_3$  к горизонтали до пересечения с линией стены в точке  $D$  имеет координату:

$$x_{B_2} = 2a + b - (y_B - y_c) \operatorname{ctg} \vartheta_2. \quad (16)$$

Координата точки  $D$  :

$$y_D = y_B + x_{B_2} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_3. \quad (17)$$

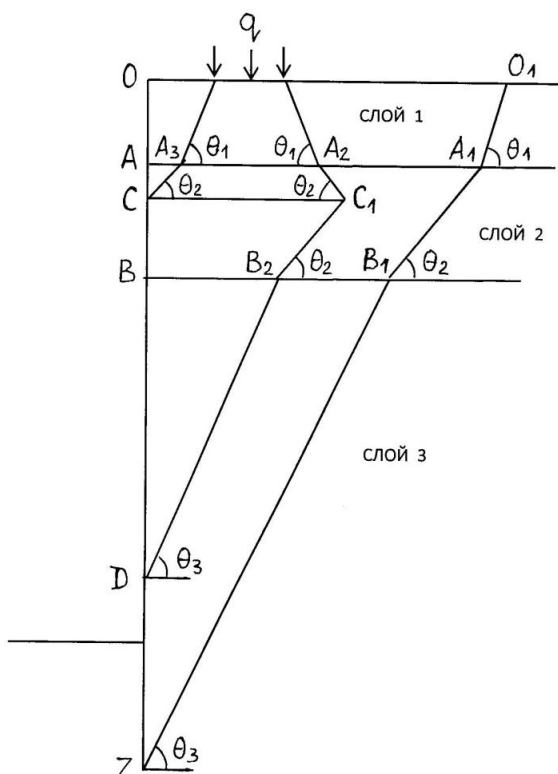


Рисунок 5 - К определению расчетных точек. Вариант 5

Возможен, наконец, вариант 6, показанный на рисунке 6, когда точка  $C$  оказывается в третьем слое. Линии сползания из точки  $X_1$  последовательно строятся под соответствующими углами сползания трех слоев до пересечения линии стены. Координата точки  $C$  в этом случае определяется по формуле:

$$y_c = (a - m_1 \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_1 - m_2 \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_2) \operatorname{tg} \vartheta_3. \quad (18)$$

Для определения ординаты точки D нужно последовательно строить линии сползания вправо в первом слое до пересечения с границей второго слоя, во втором слое – до пересечения с границей третьего слоя, в третьем – до пересечения с горизонтальной линией, проведенной из точки C. Поскольку длина участка C-C<sub>1</sub> равна  $2a + b$ , то координата точки D:

$$y_D = y_c + (2a + b) \cdot \operatorname{tg} \vartheta_3. \quad (19)$$

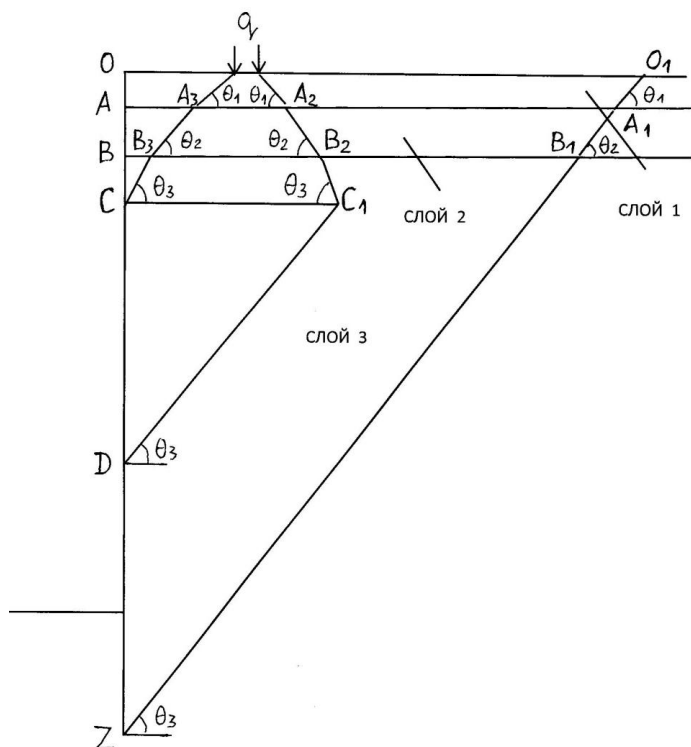


Рисунок 6 - К определению расчетных точек. Вариант б

Если какая-либо из линий сползания, проведенных вправо, пересечет границу призм сползания: линии A<sub>1</sub>-O<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>-A<sub>1</sub> или Z-B<sub>1</sub>, то это означает, что нижней границей влияния нагрузки на стену будет точка Z. Аналитически это условие выражается сравнением величины  $2a + b$  с координатами границ призм сползания: при расположении точки C в первом слое:

$$2a + b > x_{O_1} - y_c \cdot \operatorname{tg} \vartheta_1, \quad (20)$$

во втором слое:

$$2a + b > x_{A_1} - (y_c - m_1) \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2, \quad (21)$$

в третьем слое:

$$2a + b > x_{B1} - (y_c - m_1 - m_2) \cdot \operatorname{tg} \vartheta_3. \quad (22)$$

Совершенно аналогична последовательность действий при определении границ влияния полосы нагрузки интенсивностью  $q_2$ . Единственное отличие заключается в том, что при использовании формул, в которые входит величина  $a$ , вместо нее нужно подставлять выражение:  $a + b + d$ , а вместо букв С и D в обозначениях на рисунках понимать обозначения E и F. Так, например, формула (20) будет выглядеть так:

$$2(a + b + d) + b > x_{O1} - y_E \cdot \operatorname{tg} \vartheta_1.$$

Если полоса нагрузки на поверхности выходит за пределы призмы сползания:

$$a + 2b + d > x_{O1}, \quad (23)$$

то в определении положения точки D надобность отпадает – она совпадает с точкой Z.

## 2 Определение вертикального давления в расчетных точках

Следует напомнить, что активное (горизонтальное) давление грунта на подпорную стену (без учета влияния сил сцепления и нагрузки на поверхности грунта) определяется путем умножения вертикального давления на коэффициент горизонтального (бокового) давления  $\lambda$ . Величины вертикального давления определяются по формулам: для точек, находящихся в пределах первого слоя:

$$p^6 = \gamma_1 \cdot y, \quad (24)$$

второго слоя

$$p^6 = \gamma_1 \cdot m_1 + \gamma_2 \cdot (y - m_1), \quad (25)$$

третьего слоя

$$p^6 = \gamma_1 \cdot m_1 + \gamma_2 \cdot m_2 + \gamma_3 (y - m_1 - m_2). \quad (26)$$

### 3 Определение активного давления в расчетных точках

Активное давление в сечениях, расположенных выше точки С, определяется по формуле:

$$p_a = p^s \cdot \lambda_i - 2 \cdot c_i \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varphi_i}{2}, \quad (27)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент горизонтального (бокового) давления

$$\lambda_i = \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi_i}{2}, \quad (28)$$

индекс  $i$  означает номер слоя, в котором находится расчетное сечение.

Активное давление в сечениях, расположенных ниже точки С, но выше точек D и E, определяется по формуле:

$$p_a = (p^s + q_1) \cdot \lambda_i - 2 \cdot c_i \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varphi_i}{2}. \quad (29)$$

Активное давление в сечениях, расположенных ниже точки D, но выше точки E, определяется по формуле (27).

Активное давление в сечениях, расположенных ниже точек С и E, но выше точек D и F, определяется по формуле:

$$p_a = (p^s + q_1 + q_2) \cdot \lambda_i - 2 \cdot c_i \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varphi_i}{2}. \quad (30)$$

Активное давление в сечениях, расположенных ниже точек С, D и E, но выше точки F, определяется по формуле:

$$p_a = (p^s + q_2) \cdot \lambda_i - 2 \cdot c_i \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varphi_i}{2}. \quad (31)$$

Активное давление в сечениях, расположенных ниже точки F, определяется по формуле (27).

Если величина активного давления в результате расчета оказывается отрицательной, это свидетельствует об отсутствии активного давления. В этом случае его числовое значение принимается равным нулю.

## 4 Построение эпюры активного давления

Эпюра активного давления строится на миллиметровой бумаге в системе координат, в которой вертикальная ось такая же, как и при построении подпорной стены – линия стены, по горизонтальной оси откладываются значения интенсивности активного давления в расчетных точках. Рекомендуется вертикальную ось расположить посередине листа, а ось  $x$  на расстоянии от 1 до 2 см от верха листа. Масштаб по вертикальной оси – линейный – такой же, как и при построении подпорной стены. Масштаб по горизонтальной оси – силовой – принимается таким, чтобы все значения активного давления поместились в пределах листа. Рекомендуются масштабы: 0,5 кПа в 1 мм или 1 кПа в 1 мм. В любом случае масштаб должен быть удобен для откладывания значений и пересчета в натуру. Значения активного давления откладываются вправо от оси  $y$ . В каждой расчетной точке откладываются два значения, относящиеся к верхнему или нижнему сечениям. Числовые значения надписываются соответственно выше и ниже линии расчетной точки. Значения активного давления в промежутках между расчетными точками изменяются линейно, поэтому точки на эпюре соединяются прямыми линиями. Отрицательные значения давления также откладываются на эпюре (в левую сторону), но они используются лишь для построения. Координаты точек пересечения эпюры с осью  $y$  должны быть определены графически или аналитически. В частности, точка пересечения в первом слое расположена на глубине:

$$y_0 = \frac{2 \cdot c_1}{\gamma \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varphi}{2}}. \quad (32)$$

Эту же величину можно получить из рассмотрения подобия треугольников на эпюре.



## 5 Построение эпюры пассивного давления

Пассивное давление возникает на участке заглубления стены в грунт. Для построения эпюры, также имеющей линейный характер, нужно вычислить пассивное давление на уровне дна котлована:

$$p_{nH} = 2 \cdot c_3 \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi_3}{2}, \quad (33)$$

и в точке Z:

$$p_{nZ} = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ + \varphi_3}{2} + 2 \cdot c_3 \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi_3}{2}. \quad (34)$$

Полученные величины откладываются на эпюре в левую сторону, либо строится отдельная эпюра. Следует заметить, что величины пассивного давления намного больше величин активного давления, и поэтому силовой масштаб этой эпюры может быть более мелким.

## 6 Уточнение требуемой глубины заделки

Для определения требуемой глубины заделки вначале производится вычисление опрокидывающего и удерживающего моментов сил, действующих на подпорную стену при принятой глубине заделки  $z = 1$  м. Точку Z принимаем в качестве неподвижной точки, относительно которой вычисляются моменты. Фактически неподвижная точка принимается на глубине, равной 0,8 от глубины заделки. Поэтому, если принятая величина  $z = 1$  м окажется достаточной, то фактическую глубину заделки следует принять равной 1,25 м. Поскольку глубина заделки – предмет решения задачи расчета, то сначала находится глубина неподвижной точки, а потом – необходимая глубина заделки.

Найти момент сил относительно точки  $Z$  проще всего, определив сначала равнодействующие давления, действующего на отдельные участки, распределение которого носит простейший характер, а затем найти сумму моментов полученных сил. Величина равнодействующей участка эпюры равна площади этой эпюры. Линия действия равнодействующей проходит через центр тяжести эпюры. Поэтому эпюры разбиваются на совокупность прямоугольных и треугольных эпюр, так как площади и положение центров тяжести этих фигур известны. Фрагмент разбиения эпюры на простые фигуры показан на рисунке 7. Участки пронумеровываются. Вычисляются равнодействующие силы –  $R$  – участков. При вычислении площади размер по вертикали берется в метрах, а по горизонтали – в кПа. Напомним, что расчет подпорной стены ведется в плоской постановке, то есть рассматривается единица длины стены – в нашем случае – 1 м, на которую нужно умножить интенсивность давления. Поэтому в итоге размерность равнодействующей – кН.

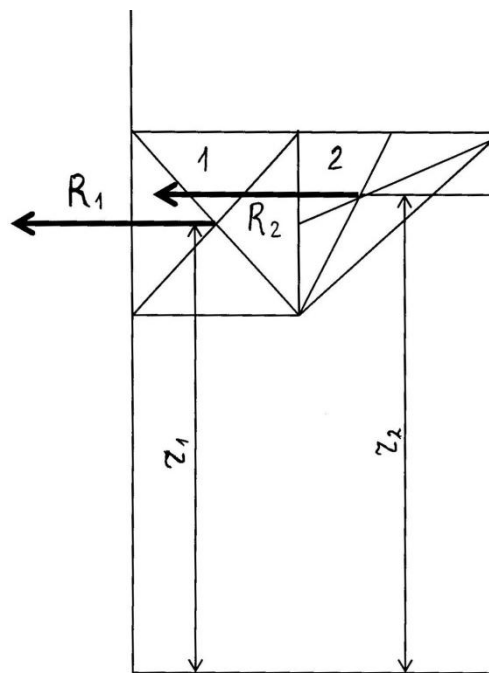


Рисунок 7 – Пример разбиения эпюры на участки

Далее определяются плечи равнодействующих  $r$  – расстояния по вертикали от линии действия (линии центра тяжести фигуры) до точки  $Z$  (рисунок 7). Вычисляются моменты равнодействующих и складываются. Сумма моментов

активных сил дает опрокидывающий момент. Аналогичные операции производятся с эпюрой пассивного давления. Сумма моментов пассивных сил дает удерживающий момент.

Для обеспечения равновесия – устойчивости подпорной стены – необходимо, чтобы удерживающий момент был больше опрокидывающего. Если условие не соблюдается, то глубину заделки стены в грунт надо увеличить. При этом увеличивается как эпюра активного давления, так и эпюра пассивного давления. Добавляются новые равнодействующие, увеличиваются и плечи равнодействующих. Процесс уточнения глубины заделки обычно быстро сходится.

Процедуру определения требуемой глубины заделки удобно производить в табличной форме так, как показано в примере расчета.

## **7 Определение расчетного изгибающего момента в подпорной стене**

Подбор геометрических параметров стены или ограждения, обеспечивающих прочность производится на основе вычисления расчетных значений внутренних сил в стене. Важнейшей из них является изгибающий момент. Расчетная схема стены – консольный стержень, жестко защемленный нижним концом. Поскольку глубина заделки определена из условия равенства опрокидывающего и удерживающего моментов, изгибающий момент в опоре равен нулю (или почти равен). Следовательно, наибольший изгибающий момент находится несколько выше в пределах глубины заделки. Координату точки с наибольшим изгибающим моментом можно найти, построив эпюру поперечных сил. Эта точка находится в месте, где поперечная сила меняет знак. Для построения эпюры поперечных сил участок заделки разбивается на равные части. Определяются поперечные силы в полученных сечениях. Поперечная сила в точке  $Z$  равна сумме равнодействующих всех сил, расположенных выше дна котлована. Эта поперечная сила принимается со знаком минус. В последующих сечениях добавляются равнодействующие новых

участков эпюры активного давления со знаком минус и пассивного давления со знаком плюс. Строится эпюра поперечных сил. Определяется графически с учетом масштаба координата точки пересечения оси эпюры. Затем определяется изгибающий момент в этой точке. При определении изгибающего момента используются ранее вычисленные равнодействующие сил активного и пассивного давления.

## 8 Пример выполнения расчетно-графической работы

1 Исходные данные:

Таблица 1

Параметры	Слой 1	Слой 2	Слой 3
Мощность, м	3	4	4
Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	18	20	22
Угол внутреннего трения, °	20	26	30
Удельное сцепление, кПа	5	10	60

$a=1$  м;  $b=1$  м;  $d=1$  м;  $q_1=70$  кПа;  $q_2=50$  кПа.

Заглубление стены в грунт принимается равным 1 м.

2 Определяем параметры призмы сползания:

$$\vartheta_1 = \frac{90^\circ + \varphi_1}{2} = \frac{90 + 20}{2} = 55^\circ; \quad \operatorname{tg} \vartheta_1 = 1,43; \quad \operatorname{ctg} \vartheta_1 = 0,70;$$

$$\vartheta_2 = \frac{90^\circ + \varphi_2}{2} = \frac{90 + 26}{2} = 58^\circ; \quad \operatorname{tg} \vartheta_2 = 1,60; \quad \operatorname{ctg} \vartheta_2 = 0,62;$$

$$\vartheta_3 = \frac{90^\circ + \varphi_3}{2} = \frac{90 + 30}{2} = 60^\circ; \quad \operatorname{tg} \vartheta_3 = 1,73; \quad \operatorname{ctg} \vartheta_3 = 0,58.$$

3 Определяем коэффициенты горизонтального давления грунта по слоям:

$$\lambda_1 = tg^2 \frac{90^\circ - \varphi_1}{2} = tg^2 \frac{90 - 20}{2} = 0.49;$$

$$\lambda_2 = tg^2 \frac{90^\circ - \varphi_2}{2} = tg^2 \frac{90 - 26}{2} = 0.39;$$

$$\lambda_3 = tg^2 \frac{90^\circ - \varphi_3}{2} = tg^2 \frac{90 - 30}{2} = 0.33.$$

4 Определяем величину эквивалентных нагрузок на 1 м длины стены:

$$q_{s1} = \frac{q_1 \cdot b \cdot 1}{2a + b} = \frac{70 \cdot 1}{2 \cdot 1 + 1} = 23,3 \text{ кН/м};$$

$$q_{s2} = \frac{q_2 \cdot b \cdot 1}{2(a + b + d) + b} = \frac{50 \cdot 1}{2 \cdot (1 + 1 + 1) + 1} = 7,1 \text{ кН/м}.$$

5 Определяем координаты точек пересечения линий сползания с границами слоев и линией поверхности грунта:

$$x_{B1} = m_3 \cdot ctg \vartheta_2 = 4 \cdot 0,58 = 2,32 \text{ м};$$

$$x_{A1} = x_{B1} + m_2 \cdot ctg \vartheta_2 = 2,32 + 4 \cdot 0,62 = 4,80 \text{ м};$$

$$x_{O1} = x_{A1} \cdot m_1 \cdot ctg \vartheta_1 = 4,80 + 3 \cdot 0,70 = 6,90 \text{ м}.$$

6 Строим на миллиметровой бумаге схему стены, границы слоев грунта и границы призмы сползания в слоях в масштабе 1:100 (рисунок 8). Отмечаем точки А, В, К, Z на линии стены, точки начала и конца полосовых нагрузок.

Определяем границы влияния нагрузки на поверхности грунта  $q_1$ . Проводим из точки  $X_1$  линию сползания влево под углом  $\vartheta_1$  и получаем точку пересечения с линией стены С. Уточняем ординату точки пересечения аналитически:

$$y_c = a \cdot tg \vartheta_1 = 1 \cdot 1,43 = 1,43 \text{ м}.$$

Ордината меньше мощности первого слоя, следовательно, действительно точка пересечения в первом слое. Проводим горизонтальную линию из точки С и



7 Определяем границы влияния нагрузки на поверхности грунта  $q_2$ . Проводим из точки  $X_3$  линию сползания влево под углом  $\vartheta_1$  и получаем точку пересечения с границей первого слоя. Проверим это аналитически по формуле (13): координата точки пересечения (вместо  $a$  подставляем  $a+b+d$ ):

$$x_{A3} = a + b + d - m_1 \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_1 = 1 + 1 + 1 - 3 \cdot 0.70 = 0.90 \text{ м.}$$

(если бы координата получилась бы отрицательной, то это означало бы, что пересечение с линией стены произошло бы в первом слое). Проводим из полученной точки пересечения линию сползания под углом  $\vartheta_2$ . Получаем точку пересечения с линией стены Е. Ордината этой точки:

$$y_E = m_1 + x_{A3} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 = 3 + 0.90 \cdot 1.60 = 4.44 \text{ м.}$$

Проводим линию сползания из точки  $X_4$  вправо под углом  $\vartheta_1$ . Получаем точку пересечения с границей первого слоя с координатой:

$$x_{A4} = a + b + d + b + m_1 \cdot \operatorname{ctg} \vartheta_1 = 1 + 1 + 1 + 1 + 3 \cdot 0.70 = 6.10 \text{ м.}$$

Это больше, чем координата точки  $A_1$ , следовательно, линия сползания, проведенная из точки  $X_4$  вправо, пересекает границу призмы сползания  $A_1 - O_1$ , а точка F совпадает с точкой Z.

Координаты всех расчетных точек получены. Отмечаем их на схеме.

8 Составляем таблицу расчета интенсивности активного давления на стену в расчетных точках (таблица 2). Напоминаем, что расчет ведется на 1 м длины стены, поэтому величина давления дается в кН/м.

В первой графе (столбце) таблицы указываются расчетные сечения. Во всех расчетных точках таких сечений два – верхнее и нижнее. Отметим, что координаты верхних и нижних сечений одной и той же точки одинаковые, так как они находятся на равной глубине, хотя и в разных слоях. В третьей графе помещаются значения вертикального давления в сечениях, определяемые по формулам (24) – (26). В четвертой графе указываются значения эквивалентных нагрузок в расчетных сечениях. В следующей, пятой графе указываются значения вертикального давления с учетом нагрузок на поверхности (сумма третьей и четвертой граф). В шестой графе размещаются величины коэффициентов горизонтального давления. В седьмой

графе – составляющая активного давления от давления грунта и нагрузки на поверхности – результат перемножения пятой и шестой граф. В восьмой графе составляющая сил сцепления, уменьшающая давление на стенку и поэтому принимаемая со знаком минус. В девятой графе итоговая величина активного давления грунта на стену.

Таблица 2 – Результаты расчета активного давления

Расчет- ные точки	$y$	$p^e$	$q_0$	(3)+(4)	$\lambda$	(5)x(6)	$2c \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varphi}{2}$	$p_a$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
О	0	0	0	0	0,49	0	-7	-7
С-в	1,43	26	0	26	0,49	13	-7	6
С-н	1,43	26	23	49	0,49	24	-7	7
А-в	3	54	23	77	0,49	38	-12	31
А-н	3	54	23	77	0,39	30	-12	18
Е-в	4,44	83	23	106	0,39	41	-12	29
Е-н	4,44	83	30	113	0,39	44	-12	32
Д-в	6	114	30	144	0,39	56	-12	44
Д-н	6	114	7	121	0,39	47	-12	35
В-в	7	134	7	141	0,39	55	-12	43
В-н	7	134	7	141	0,33	47	-70	-23
К	10	200	7	207	0,33	68	-70	-2
F(Z)	11	222	7	229	0,33	76	-70	6

9 Составляем таблицу расчета пассивного давления (таблица 3). Пассивное давление действует на заглубленном участке (от точки К до точки Z).



Таблица 3 – Результаты расчета пассивного давления

Расчет- ные точки	$y$	$p^e$	$\lambda_{п}$	(5)х(6)	$2c \cdot \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}$	$p_a$
1	2	3	4	5	6	7
K	0	0	3	0	208	208
F(Z)	1	22	3	66	208	274

10 Строим эпюры активного и пассивного давления (рисунок 9).

Абсциссы эпюры активного давления откладываются вправо, пассивного давления – влево. Масштаб, в котором откладываются значения интенсивности активного давления (силовой), - в 1 см 10 кН/м, интенсивности пассивного давления – в 1 см 100 кН/м. На участке O – C и на участке B – Z определяем координаты точек пересечения оси эпюры – точек  $O_0$  и  $B_0$  с нулевыми значениями активного давления:

$$y_{O0} = 1,43 \cdot \frac{7}{13} = 0,77 \text{ м,}$$

$$y_{B0} = 7 + 4 \cdot \frac{23}{29} = 10,2 \text{ м.}$$

11 Разбиваем эпюры на фрагменты простой конфигурации – прямоугольники и треугольники. Нумеруем фрагменты. Вычисляем площади фрагментов – величины равнодействующих R и расстояния r от линий их действия до горизонтальной линии, проходящей через точку Z.

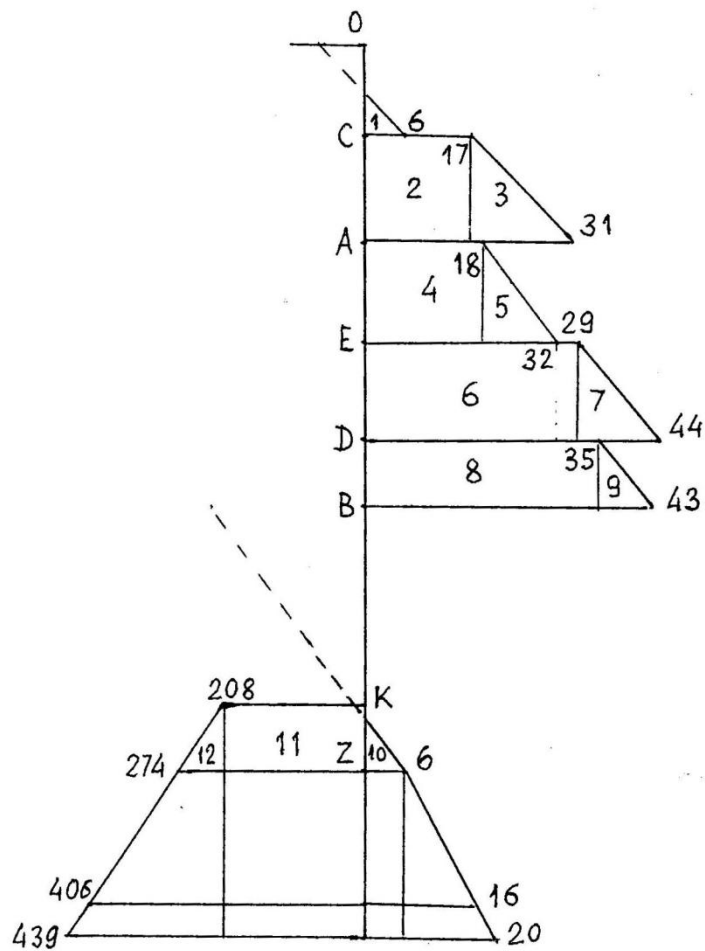


Рисунок 9 – Эпюры давления грунта на стену

Равнодействующие участков эпюры активного давления:

$$R_1 = 0,5 \cdot 6 \cdot (1,43 - 0,77) = 2 \text{ кН}, \quad r_1 = (11 - 1,43) + 0,33 \cdot (1,43 - 0,77) = 9,79 \text{ м};$$

$$R_2 = 17 \cdot (3 - 1,47) = 27 \text{ кН}, \quad r_2 = (11 - 3) + 0,5 \cdot (3 - 1,43) = 8,78 \text{ м};$$

$$R_3 = 0,5 \cdot (31 - 17) \cdot (3 - 1,43) = 11 \text{ кН}, \quad r_3 = (11 - 3) + 0,33 \cdot (3 - 1,43) = 8,52 \text{ м};$$

$$R_4 = 18 \cdot (4,44 - 3) = 26 \text{ кН}, \quad r_4 = (11 - 4,44) + 0,5 \cdot (4,44 - 3) = 7,28 \text{ м};$$

$$R_5 = 0,5 \cdot (29 - 18) \cdot (4,44 - 3) = 8 \text{ кН}, \quad r_5 = (11 - 4,44) + 0,33 \cdot (4,44 - 3) = 7,04 \text{ м};$$

$$R_6 = 32 \cdot (6 - 4,44) = 50 \text{ кН}, \quad r_6 = (11 - 6) + 0,5 \cdot (6 - 4,44) = 5,78 \text{ м};$$

$$R_7 = 0,5 \cdot (44 - 32) \cdot (6 - 4,44) = 9 \text{ кН}, \quad r_7 = (11 - 6) + 0,33 \cdot (6 - 4,44) = 5,52 \text{ м};$$

$$R_8 = 35 \cdot (7 - 6) = 35 \text{ кН}, \quad r_8 = (11 - 7) + 0,5 \cdot (7 - 6) = 4,50 \text{ м};$$

$$R_9 = 0,5 \cdot (43 - 35)(7 - 6) = 4 \text{ кН}, \quad r_9 = (11 - 7) + 0,33 \cdot (7 - 6) = 4,33 \text{ м};$$

$$R_{10} = 0,5 \cdot (11 - 10,2) \cdot 6 = 2 \text{ кН}, \quad r_{10} = 0,33 \cdot (11 - 10,2) = 0,27 \text{ м};$$

Равнодействующие участков эпюры пассивного давления:

$$R_{11} = 208 \cdot 1 = -208 \text{ кН}, \quad r_{11} = 0,5 \cdot (11 - 10) = 0,5 \text{ м};$$

$$R_{12} = 0,5 \cdot (274 - 208)(11 - 10) = 33 \text{ кН}, \quad r_{12} = 0,33 \cdot (11 - 10) = 0,33 \text{ м}.$$

12 Опрокидывающие моменты (с точностью до 1 кНм):

$$M_1 = R_1 \cdot r_1 = 2 \cdot 9,79 = 20 \text{ кНм},$$

$$M_2 = R_2 \cdot r_2 = 27 \cdot 8,78 = 237 \text{ кНм},$$

$$M_3 = R_3 \cdot r_3 = 11 \cdot 8,52 = 94 \text{ кНм},$$

$$M_4 = R_4 \cdot r_4 = 26 \cdot 7,28 = 189 \text{ кНм},$$

$$M_5 = R_5 \cdot r_5 = 8 \cdot 7,04 = 56 \text{ кНм},$$

$$M_6 = R_6 \cdot r_6 = 50 \cdot 5,78 = 289 \text{ кНм},$$

$$M_7 = R_7 \cdot r_7 = 9 \cdot 5,52 = 50 \text{ кНм},$$

$$M_8 = R_8 \cdot r_8 = 35 \cdot 4,50 = 158 \text{ кНм},$$

$$M_9 = R_9 \cdot r_9 = 4 \cdot 4,33 = 17 \text{ кНм},$$

$$M_{10} = R_{10} \cdot r_{10} = 2 \cdot 0,27 = 1 \text{ кНм},$$

$$\sum M_a = 1110 \text{ кНм},$$

13 Удерживающие моменты:

$$M_{11} = R_{11} \cdot r_{11} = 208 \cdot 0,5 = 104 \text{ кНм},$$

$$M_{12} = R_{12} \cdot r_{12} = 33 \cdot 0,33 = 11 \text{ кНм},$$

$$\sum M_n = 115 \text{ кНм}.$$

14 Опрокидывающий момент намного больше удерживающего (почти в десять раз), поэтому нужно увеличить глубину заделки. Переносим точку Z на 2 м глубже. Тогда плечи равнодействующих увеличатся на 2 м. Изменяется величина активного давления в точке Z:

$$p_a = (200 + (222 - 200) \cdot (13 - 10,2)) \cdot 0,33 - 70 = 16 \text{ кН/м}$$

и пассивного давления в этой же точке:

$$p_n = 22 \cdot 3 \cdot 3 + 208 = 406 \text{ кН/м.}$$

Величины равнодействующих активного давления не изменяются, кроме  $R_{10}$ .

Новое значение этой равнодействующей:

$$R_{10} = 0,5 \cdot (13 - 10,2) \cdot 18 = 25 \text{ кН.}$$

Опрокидывающие моменты:

$$M_1 = R_1 \cdot r_1 = 2 \cdot 11,79 = 24 \text{ кНм,}$$

$$M_2 = R_2 \cdot r_2 = 27 \cdot 10,78 = 291 \text{ кНм,}$$

$$M_3 = R_3 \cdot r_3 = 11 \cdot 10,52 = 116 \text{ кНм,}$$

$$M_4 = R_4 \cdot r_4 = 26 \cdot 9,28 = 241 \text{ кНм,}$$

$$M_5 = R_5 \cdot r_5 = 8 \cdot 9,04 = 72 \text{ кНм,}$$

$$M_6 = R_6 \cdot r_6 = 50 \cdot 7,78 = 389 \text{ кНм,}$$

$$M_7 = R_7 \cdot r_7 = 9 \cdot 7,52 = 68 \text{ кНм,}$$

$$M_8 = R_8 \cdot r_8 = 35 \cdot 6,50 = 228 \text{ кНм,}$$

$$M_9 = R_9 \cdot r_9 = 4 \cdot 6,33 = 25 \text{ кНм,}$$

$$M_{10} = R_{10} \cdot r_{10} = 16 \cdot 0,93 = 15 \text{ кНм,}$$

$$\sum M_a = 1469 \text{ кНм,}$$

Новые значения равнодействующих пассивного давления и их плеч относительно точки Z:

$$R_{11} = 208 \cdot 3 = -624 \text{ кН,} \quad r_{11} = 0,5 \cdot (13 - 10) = 1,5 \text{ м;}$$

$$R_{12} = 0,5 \cdot (406 - 208)(13 - 10) = 297 \text{ кН,} \quad r_{12} = 0,33 \cdot (13 - 10) = 1,00 \text{ м.}$$

Удерживающие моменты:

$$M_{11} = R_{11} \cdot r_{11} = 624 \cdot 1,5 = 936 \text{ кНм,}$$

$$M_{12} = R_{12} \cdot r_{12} = 297 \cdot 1,00 = 297 \text{ кНм,}$$

$$\sum M_n = 1233 \text{ кНм.}$$

15 опрокидывающий момент снова больше удерживающего, но уже не настолько – примерно на 20 %. Увеличим глубину заделки на 0,5 м. Плечи равнодействующих увеличатся на 0,5 м. Изменяется величина активного давления в точке Z:

$$p_a = (200 + (222 - 200) \cdot (13,5 - 10,2)) \cdot 0,33 - 70 = 20 \text{ кН/м}$$

и пассивного давления в этой же точке:

$$p_n = 22 \cdot 3,5 \cdot 3 + 208 = 439 \text{ кН/м.}$$

Величины равнодействующих активного давления не изменяются, кроме  $R_{10}$ .

Новое значение этой равнодействующей:

$$R_{10} = 0,5 \cdot (13,5 - 10,2) \cdot 20 = 33 \text{ кН.}$$

Опрокидывающие моменты:

$$M_1 = R_1 \cdot r_1 = 2 \cdot 12,29 = 25 \text{ кНм,}$$

$$M_2 = R_2 \cdot r_2 = 27 \cdot 11,28 = 305 \text{ кНм,}$$

$$M_3 = R_3 \cdot r_3 = 11 \cdot 11,02 = 121 \text{ кНм,}$$

$$M_4 = R_4 \cdot r_4 = 26 \cdot 9,78 = 254 \text{ кНм,}$$

$$M_5 = R_5 \cdot r_5 = 8 \cdot 9,54 = 76 \text{ кНм,}$$

$$M_6 = R_6 \cdot r_6 = 50 \cdot 8,28 = 414 \text{ кНм,}$$

$$M_7 = R_7 \cdot r_7 = 9 \cdot 8,02 = 72 \text{ кНм,}$$

$$M_8 = R_8 \cdot r_8 = 35 \cdot 7,00 = 245 \text{ кНм,}$$

$$M_9 = R_9 \cdot r_9 = 4 \cdot 6,83 = 27 \text{ кНм,}$$

$$M_{10} = R_{10} \cdot r_{10} = 16 \cdot 1,10 = 17 \text{ кНм,}$$

$$\sum M_a = 1539 \text{ кНм,}$$

Новые значения равнодействующих пассивного давления и их плеч относительно точки Z:

$$R_{11} = 208 \cdot 3,5 = -728 \text{ кН,} \quad r_{11} = 0,5 \cdot (13,5 - 10) = 1,75 \text{ м;}$$

$$R_{12} = 0,5 \cdot (439 - 208)(13,5 - 10) = 404 \text{ кН,} \quad r_{12} = 0,33 \cdot (13,5 - 10) = 1,17 \text{ м.}$$

Удерживающие моменты:

$$M_{11} = R_{11} \cdot r_{11} = 728 \cdot 1,75 = 1274 \text{ кНм},$$

$$M_{12} = R_{12} \cdot r_{12} = 404 \cdot 1,17 = 473 \text{ кНм},$$

$$\sum M_n = 1747 \text{ кНм}.$$

Удерживающий момент больше опрокидывающего. Устойчивость стены обеспечена. Запас – 13 %. Установленная глубина заделки – 3,5 м – это на самом деле глубина неподвижной точки, а фактическая глубина равна  $3,5:0,8=4,4$  м.

16 Определяем сечение стены, в котором изгибающий момент максимальный.

Для этого вычислим поперечные силы на участке влияния пассивного давления. В точке К поперечная сила равна сумме равнодействующих активного давления, расположенных выше дна котлована:

$$Q_K = - (2+27+11+26+8+50+9+35+4+16) = -188 \text{ кН}.$$

В точке Z при глубине заделки  $z = 1$  м величина составляющей поперечной силы от активного давления возрастает на величину равнодействующей  $R_{10} = 2$  кН. В то же время составляющая от пассивного давления равна сумме равнодействующих  $R_{11} = 208$  кН и  $R_{12} = 33$  кН, т.е  $Q_Z = -188 - 2 + 208 + 33 = +41$  кН. Следовательно, точка с нулевым значением поперечной силы находится выше, чем на 1 м ниже дна котлована. Найдем величину поперечной силы на глубине 0,5 м. Величина составляющей от активного давления уменьшится незначительно – в пределах 1 кН.

Составляющая от пассивного давления равна:

$$Q_{0,5} = +208 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot 33 \cdot 0,5 = +108,$$

полная величина - минус 80 кН. Построив график изменения поперечной силы, находим ординату точки пересечения – она равна 10,6 м.

17 Найдем изгибающий момент в этой точке – его величина – наибольшая. Моменты от равнодействующих сил активного давления:

$$M_1 = R_1 \cdot r_1 = 2 \cdot 9,39 = 19 \text{ кНм},$$

$$M_2 = R_2 \cdot r_2 = 27 \cdot 8,38 = 226 \text{ кНм},$$

$$M_3 = R_3 \cdot r_3 = 11 \cdot 8,12 = 89 \text{ кНм},$$

$$M_4 = R_4 \cdot r_4 = 26 \cdot 6,88 = 179 \text{ кНм},$$

$$M_5 = R_5 \cdot r_5 = 8 \cdot 6,64 = 53 \text{ кНм},$$

$$M_6 = R_6 \cdot r_6 = 50 \cdot 5,38 = 269 \text{ кНм},$$

$$M_7 = R_7 \cdot r_7 = 9 \cdot 5,12 = 46 \text{ кНм},$$

$$M_8 = R_8 \cdot r_8 = 35 \cdot 4,10 = 143 \text{ кНм},$$

$$M_9 = R_9 \cdot r_9 = 4 \cdot 3,93 = 16 \text{ кНм}.$$

Моменты от равнодействующих сил пассивного давления:

$$M_{11} = R_{11} \cdot r_{11} = -208 \cdot 0,6 \cdot 0,3 = -37 \text{ кНм},$$

$$M_{12} = R_{12} \cdot r_{12} = -0,5 \cdot 33 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,33 \cdot 0,6 = -1 \text{ кНм},$$

Суммируя значения моментов получаем расчетное значение изгибающего момента  $M = 1002 \text{ кНм}$ .

## 9 Варианты заданий

Таблица 4 – Мощности слоев

Слои	Первая цифра номера задания				
	1	2	3	4	5
Слой 1	3 м	1 м	2 м	2 м	3 м
Слой 2	6 м	6 м	5 м	6 м	5 м
Слой 3	>1 м	>3 м	>3 м	>2 м	>2 м

Таблица 5 – Характеристики грунтов

Характеристики	Вторая цифра номера задания				
	1	2	3	4	5
$\gamma_1, \text{кН/м}^3$	18	19	20	21	22
$\gamma_2, \text{кН/м}^3$	22	21	19	18	20
$\gamma_3, \text{кН/м}^3$	19	20	21	22	18
$\varphi_1^0$	20	22	24	26	28
$\varphi_2^0$	32	30	28	24	26
$\varphi_3^0$	28	26	32	28	34
$c_1, \text{кПа}$	12	10	8	6	4
$c_2, \text{кПа}$	16	14	14	16	18
$c_3, \text{кПа}$	60	64	68	72	76

Таблица 6 – Нагрузки на поверхности грунта

Параметры	Третья цифра номера задания				
	1	2	3	4	5
$a, \text{м}$	1	1,5	2	2,5	2
$b, \text{м}$	1	1	1	1	1
$d, \text{м}$	2	2	2	2	1,5
$q_1, \text{кПа}$	50	55	60	65	70
$q_2, \text{кПа}$	60	70	65	55	50



## **Список использованных источников**

- 1 Колоколов, С.Б. Подземные сооружения городов: учебное пособие / С.Б.Колоколов – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013. – 144с.
- 2 Справочник проектировщика инженерных сооружений / В.Ш.Козлов [и др.]. Киев: Будивэльник, 1988. – 352с.