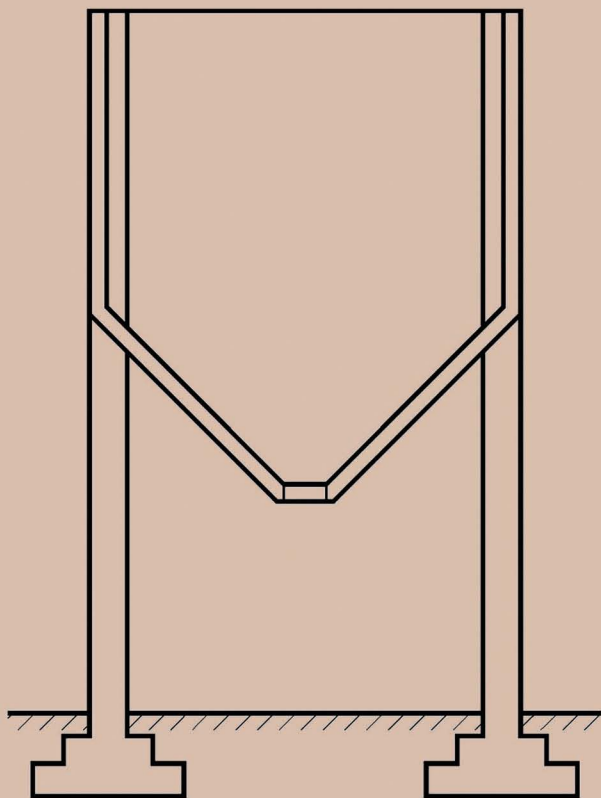


А.Н. Добромыслов

**ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА
КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**



А.Н. Добромыслов

**ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА
КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ИНЖЕНЕРНЫХ
СООРУЖЕНИЙ**



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва, 2010

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство, сертификация и стандартизация» Московского государственного открытого университета *В.В. Доркин*;
кандидат технических наук, профессор кафедры АСП Московского государственного строительного университета *А.Н. Малахова*

Добромыслов А.Н.

Примеры расчета конструкций железобетонных инженерных сооружений. Справочное пособие: – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 272 с.

ISBN 978-5-93093-713-8

Приведены цифровые примеры расчёта и конструирования железобетонных конструкций инженерных сооружений массового применения: подпорных стен, тоннелей и каналов, различных типов резервуаров, бункеров, силосов, водонапорных башен, опор трубопроводов, коллекторов, малых мостов и пандусов, открытых крановых эстакад.

Содержатся необходимые справочные материалы и пояснения для выполнения расчётов.

Для инженеров-строителей и студентов строительных вузов.

ISBN 978-5-93093-713-8

© Добромыслов А.Н., 2010

© Издательство АСВ, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ГЛАВА 1. ПОДПОРНЫЕ СТЕНЫ	7
1.1. Основные сведения	7
1.2. Расчет подпорных стен.....	9
1.3. Пример 1. Расчет уголковой подпорной стены	11
1.4. Пример 2. Расчет массивной подпорной стены из бетонных блоков	16
1.5. Пример 3. Расчет шпунтовой подпорной стены.....	20
1.6. Пример 4. Расчет ramпы ячеиковой конструкции.....	22
ГЛАВА 2. ТОННЕЛИ И КАНАЛЫ	27
2.1. Общие сведения	27
2.2. Расчет тоннелей и каналов	28
2.3. Пример 5. Расчет тоннеля из монолитного железобетона.....	32
ГЛАВА 3. РЕЗЕРВУАРЫ	40
3.1. Общие сведения	40
3.2. Определение усилий	44
3.2.1. Расчет круглых резервуаров	44
3.2.2. Расчет прямоугольных резервуаров	55
3.3. Расчет резервуаров по методу предельного равновесия	57
3.3.1. Расчет цилиндрических резервуаров	59
3.3.2. Расчет цилиндрических резервуаров на основе оптимальных усилий	63
3.4. Пример 6. Расчет железобетонного предварительно напряженного радиального отстойника	68
3.5. Пример 7. Расчет цилиндрического заглубленного резервуара для воды из монолитного железобетона	76
3.6. Пример 8. Расчет резервуара водонапорной башни	90
3.7. Пример 9. Расчет железобетонного прямоугольного резервуара для воды.....	106
ГЛАВА 4. БУНКЕРЫ	119
4.1. Основные сведения	119
4.2. Расчет бункеров	122
4.3. Пример 10. Расчет пирамидального бункера.....	123

ГЛАВА 5. СИЛОСЫ	136
5.1. Общие сведения	136
5.2. Расчет силосов.....	138
5.3. Пример 11. Расчет монолитного круглого силоса	142
ГЛАВА 6. ВОДОНАПОРНЫЕ БАШНИ	152
6.1. Общие сведения	152
6.2. Расчет водонапорных башен.....	152
6.3. Пример 12. Расчет водонапорной башни.....	155
ГЛАВА 7. ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИЕ ОПОРЫ ПОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ	182
7.1. Общие сведения	182
7.2. Расчет опор.....	183
7.3. Пример 13. Расчет отдельно стоящей опоры под технологические трубопроводы	186
ГЛАВА 8. ТРУБОПРОВОДЫ И КОЛЛЕКТОРЫ	196
8.1. Общие сведения	196
8.2. Расчет трубопроводов и коллекторов	200
8.3. Пример 14. Расчет безнапорного трубопровода.....	206
8.4. Пример 15. Расчет канализационного коллектора	210
ГЛАВА 9. МАЛЫЕ МОСТЫ, ПАНДУСЫ, ПЕШЕХОДНЫЕ ГАЛЕРЕИ	217
9.1. Основные сведения.....	217
9.2. Расчет сооружений.....	222
9.3. Пример 16. Расчет малого автодорожного моста.....	224
9.4. Пример 17. Расчет пешеходного пандуса	233
ГЛАВА 10. ОТКРЫТЫЕ КРАНОВЫЕ ЭСТАКАДЫ	242
10.1. Общие сведения	242
10.2. Расчет крановых эстакад	245
10.3. Пример 18. Расчет открытой крановой эстакады.....	249
ПРИЛОЖЕНИЯ	260
ЛИТЕРАТУРА	266

ПРЕДИСЛОВИЕ

Железобетонные инженерные сооружения находят широкое применение в различных отраслях промышленности, энергетики, транспорта, сельского хозяйства и гражданского строительства.

В отличие от конструкций зданий проектирование различных инженерных сооружений имеет целый ряд специфических особенностей, практические методы расчета которых недостаточно полно освещены в технической литературе.

Как правило, при разработке проектов проектировщики стараются использовать имеющиеся аналоги в виде примеров расчета. Это позволяет применять существующий порядок расчета используемого примера для проектируемого сооружения, анализировать принятые расчетные предпосылки, оценивать в ходе расчета полученный результат и тем самым ускорять процесс проектирования и избегать возможных ошибок.

Как показывает более чем 50-летний опыт эксплуатации различных железобетонных сооружений, запроектированных на основании инженерных методов расчета, они отличаются высокой надежностью, и большинство из них успешно эксплуатируются до настоящего времени.

В последнее время для расчета железобетонных конструкций, в том числе инженерных сооружений, используются программы расчета на компьютерах. Однако пользователи этих программ не всегда знакомы с особенностями действительной работы проектируемого им сооружения. Кроме того, применяемые компьютерные программы, позволяющие производить статические расчеты с высокой скоростью и точностью, в то же время не обладают достаточной точностью принимаемых исходных данных: расчетных схем, предпосылок расчета, характеристик нагрузок, материалов, условий изготовления и эксплуатации конструкций. Неправильный учет всего этого может привести к ошибочной трактовке полученных результатов. Поэтому наряду с электронными расчетами при проектировании инженеры должны владеть также практическими методами расчета, реально отражающими физическую сторону работы конструкций сооружения, включая опыт эксплуатации конструкций данного вида сооружения.

В основу книги положены цифровые примеры расчета и конструирования наиболее часто встречающихся при строительстве сооружений: подпорных стен, тоннелей и каналов, резервуаров,

бункеров, силосов, водонапорных башен, опор трубопроводов, труб и коллекторов, малых мостов, пандусов, открытых крановых эстакад.

В качестве примеров использованы типовые и реальные проекты сооружений.

При изложении примеров расчета предполагается, что читатели уже знакомы с расчетом сечений железобетонных элементов конструкций. Поэтому в ряде примеров для краткости изложения эти расчеты опущены. Все расчеты выполнены по действующим на момент написания работы строительным нормам.

Примерам расчета сооружений в каждом разделе предпосланы краткие сведения для пояснения принятых методов расчета и приемов конструирования. Приводятся также справочные материалы, необходимые для выполнения расчетов.

ГЛАВА 1. ПОДПОРНЫЕ СТЕНЫ

1.1. Основные сведения

Подпорные стены используются в промышленном и гражданском строительстве для ограждения откосов и котлованов в процессе строительства, а также в виде специальных сооружений: рам, складов сыпучих материалов.

По конструктивным особенностям различают массивные, угловые железобетонные, гибкие (шпунтовые) и ячеистые подпорные стены.

Наиболее рациональной для стен при высотах до 6 м являются конструкции угловых безреберных железобетонных подпорных стен, так как при их устройстве расходуется минимальное количество материалов и упрощается изготовление¹. Наибольшая высота построенной угловой безреберной железобетонной подпорной стены, известная автору, составляла 17 м.

Угловые подпорные стены могут быть монолитными и сборными, состоящими из плиты стенки, заделываемой в щелевой паз днища и плиты днища.

Подошва фундаментной плиты стен предпочтительна горизонтальная, а стенка вертикальная. В качестве боковой засыпки рекомендуется дренирующие грунты – песчаные и гравелистые.

Предварительные размеры угловых подпорных стен приведены на *рис. 1.1*. Размеры нижнего сечения вертикальной стенки принимаются не менее Н/15. Глубина заложения подошвы должна быть не менее глубины промерзания грунта со стороны нижней части.

Массивные стены выполняют из монолитного бетона или бетонных блоков, как правило, при небольших высотах.

¹При проектировании сооружений возникают две задачи: разработка конструкций нового сооружения по заданным нагрузкам и проверка принятых конструкций заданного сооружения (или подбор типовых конструкций) в соответствии с действующими нагрузками. В первой задаче выбор оптимальных конструкций и материалов сооружения осуществляется на основании технико-экономического сравнения нескольких вариантов конструкций и определения оптимального варианта с детальной проработкой армирования конструкций и узлов. Во второй задаче производится проверка на прочность и пригодность к эксплуатации наиболее напряженных зон конструкций сооружения.

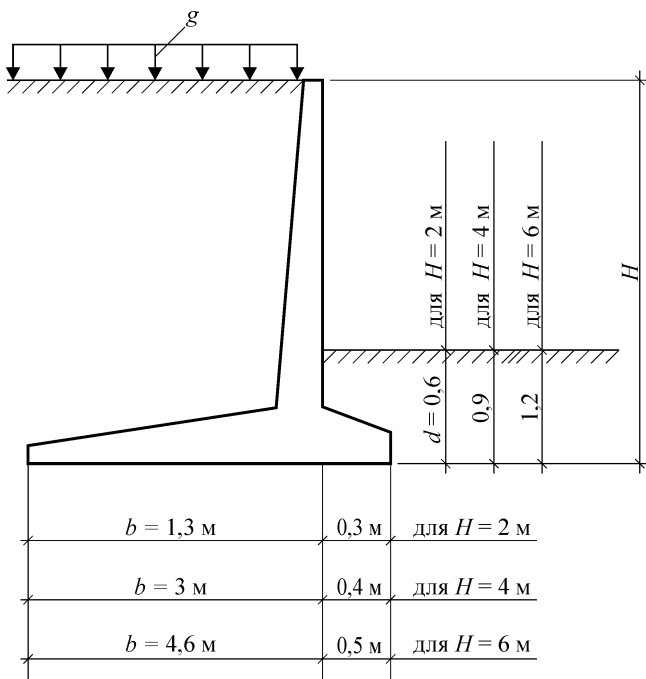


Рис. 1.1. К определению размеров уголкового подпорных стен

Гибкие подпорные стены, состоящие из свай или линейных элементов (стена в грунте), используют в качестве ограждений котлованов при стесненной застройке.

Подпорные стены из буронабивных свай с расстояниями между сваями в свету 0,5–1 диаметра применяют при ограждении котлована глубиной до 10 м.

Давление грунта на подпорные стены определяется по теории Кулона.

Равнодействующая бокового давления грунта на стенку E при наличии на призме обрушения равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q для вертикальной стенки или стенки с небольшими уклонами определяется по формуле

$$E = 0,5 \gamma (H + H_0)^2 \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2), \quad (1.1)$$

где $H_0 = q/\gamma$ – высота приведенного слоя грунта, γ – удельный вес грунта засыпки, φ° – угол внутреннего трения грунта засыпки.

Центр приложения равнодействующей бокового давления грунта находится на расстоянии e от низа стенки:

$$e = (H + H_0) / 3. \quad (1.2)$$

Горизонтальное давление на глубине y определяется по формуле

$$q_r = \gamma y \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2). \quad (1.3)$$

1.2. Расчет подпорных стен

Угловые подпорные стены рассчитываются на прочность и устойчивость.

Горизонтальная сила E давления грунта стремится опрокинуть стену относительно крайней левой точки «о» фундаментной плиты (рис. 1.2), создавая момент $M_0 = Ee$, и сдвинуть стену по направлению силы E .

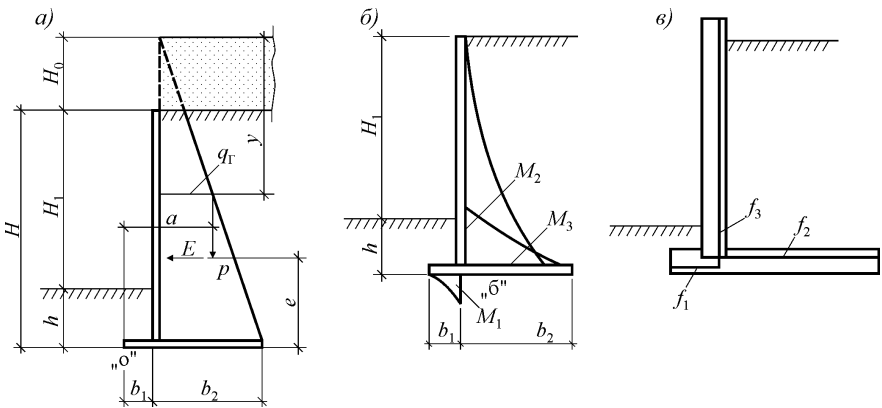


Рис. 1.2. Расчетная схема угловой подпорной стены:

a – расчетная схема; $б$ – эпюры изгибающих моментов; $в$ – схема расположения рабочей арматуры

Нагрузка от веса грунта и собственного веса стены создает относительно точки «о» удерживающий момент $M_y = \Sigma P_i a_i$, сопротивляющийся опрокидыванию, и силу трения по подошве $T = f \Sigma P_i$, препятствующую скольжению стены.

Устойчивость стены будет обеспечена при $M_0 \leq M_y$; $E < T$.

В практических расчетах угловых стен при определении P вес железобетонной стены учитывают путем умножения удельного веса грунта на коэффициент 1,08.

При расчете на устойчивость горизонтальное давление грунта на стену E , создающее опрокидывающий момент, умножают на коэффициент надежности 1,2, а вертикальные силы P (вес стены и грунта на обрезах фундамента), создающие удерживающий момент, на коэффициент надежности по нагрузке 0,8.

При расчете на прочность силы E и P умножают на коэффициенты по надежности соответственно 1,2 и 1,1.

Силы E и P создают относительно центра тяжести подошвы фундаментной плиты (рис. 1.2, б) момент M и силу N , вызывающие по подошве нормальные напряжения на грунт σ . Рассматривая стену и грунт над фундаментной плитой как твердое тело, определяют величины краевых напряжений в грунте под подошвой фундамента. При этом отрыв подошвы от грунта, как правило, не допускается.

Силы E , P и реакция грунта σ изгибают консольные плиты стены, вызывая в них изгибающие моменты M_1 , M_2 , M_3 (рис. 1.2, в) относительно точки «б» пересечения плит. Исходя из равновесия моментов,

$$M_1 + M_2 - M_3 = 0, \quad M_2 = M_3 - M_1.$$

По найденным моментам производят подбор сечений консольных плит в точке «б» – заделке консолей, а также производят проверку напряжений под подошвой фундамента.

При определении прогиба верха стены при ее изгибе жесткость железобетонного элемента B допускается определять с учетом пластических свойств бетона и появления трещин по формуле $B = \Theta E_6 I$, где E_6 – начальный модуль упругости бетона на сжатие, Θ – коэффициент, принимаемый равным 0,35 при длительном действии нагрузки и 0,5 при кратковременном действии нагрузки.

Расчет основания под подошвой стены производят по деформациям от нормативных нагрузок. Эпюру напряжений следует принимать трапецевидной или треугольной. Допускается двухзначная эпюра напряжений при условии, что площадь сжатой зоны должна быть не менее 75% общей площади подошвы фундамента подпорной стены.

Массивные стены рассчитываются аналогично угловым стенам.

Гибкие подпорные стены (шпунтовые ограждения) находятся под влиянием активного давления грунта и его пассивного сопротивления. Активное давление изгибает стену и стремится повернуть ее. Повороту стены сопротивляется пассивное давление грунта на глубине h .

Расчет сводится к определению минимальной величины h заглубления стены в грунт, необходимой для ее устойчивости. Толщина стены и площадь сечения арматуры определяются из расчета прочности на изгибающий момент.

Для подпорных стен с применением свай требуемую глубину заглубления сваи диаметром d в грунт находят из уравнения

$$E = \frac{mdh^3}{3(4H + 3h)}, \quad (1.4)$$

где E – расчетная величина горизонтальной силы от давления грунта, действующая на участок стены длиной 1 м, $m = \gamma(\xi_n - \xi_a)$, $\xi_a = \text{tg}^2(45 - \varphi/2)$, $\xi_n = \text{tg}^2(45 + \varphi/2)$, γ – удельный вес грунта, φ – угол внутреннего трения грунта в градусах.

Максимальный изгибающий момент в свае определяют по формуле

$$M_{\text{макс}} = E\left(H + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{E}{md}}\right). \quad (1.5)$$

Для сплошных шпунтовых стен (стена в грунте) требуемое заглубление стены из расчета на 1 м длины стены определяют из уравнения

$$E = \frac{mdh^3}{6(4H + 3h)}. \quad (1.6)$$

Максимальный изгибающий момент в стене на 1 м ее длины

$$M_{\text{макс}} = E\left(H + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{E}{m}}\right). \quad (1.7)$$

1.3. Пример 1. Расчет уголкового подпорной стены

Требуется рассчитать уголковую подпорную стену, выполненную из монолитного железобетона, при следующих данных (рис. 1.3): высота стены $H_1 = 4$ м, глубина заложения подошвы из условия промерзания грунта $h = 1,3$ м, полная высота стены $H = H_1 +$

+ $h = 4 + 1,3 = 5,4$ м, угол внутреннего трения грунта засыпки $\varphi = 32^\circ$, удельный вес грунта засыпки (песок) $\gamma = 16 \text{ кН/м}^3$. Коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n = 1^1$.

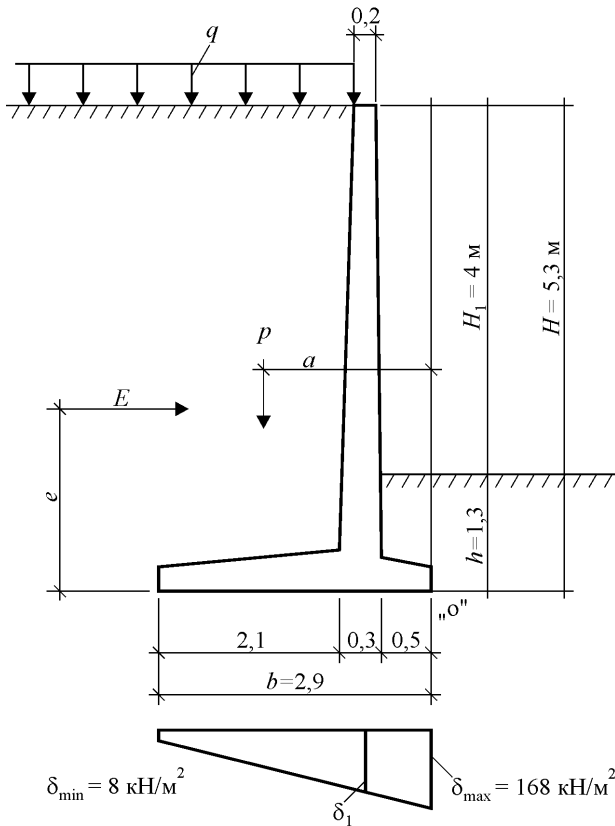


Рис. 1.3. К расчету уголкового подпорной стены

Расчетное сопротивление грунта основания $R_{гр} = 0,15 \text{ МПа} = 150 \text{ кН/м}^2$. Стена возводится из бетона класса В25, $R_b = 14,5 \text{ МПа} = 1,45 \text{ кН/см}^2$, $R_{bt} = 1,05 \text{ МПа} = 0,105 \text{ кН/см}^2$. Арматура класса А400, $R_s = 355 \text{ МПа} = 35,5 \text{ кН/см}^2$.

По верху стены действует временная нормативная равномерно распределенная нагрузка $q = 10 \text{ кН/м}^2$.

Расчет производим на 1 м длины стены.

¹ Здесь и далее в примерах коэффициент надежности по ответственности принят $\gamma_n = 1$.

Проверка стены на устойчивость.

Определяем величины H_0 , E , e , P .

$$H_0 = q/\gamma = 10/16 = 0,62 \text{ м.}$$

Горизонтальное давление

$$\begin{aligned} E &= 0,5 \gamma (H+H_0)^2 \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2) = \\ &= 0,5 \cdot 16(5,3 + 0,62)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 (45 - 32/2) = 86 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Эксцентриситет относительно подошвы

$$e = (H+ H_0) /3 = (5,4 + 0,62)/3 = 2 \text{ м.}$$

$$P = 1,08 \cdot 16(2,4 \cdot 5,92 + 0,5 \cdot 1,3) = 256 \text{ кН.}$$

Момент, опрокидывающий стену относительно точки «о», с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,2$:

$$M_o = \gamma_f E e = 1,2 \cdot 86 \cdot 2 = 206 \text{ кН.}$$

Момент, удерживающий стену от опрокидывания, при $\gamma_f = 0,8$, $a = 3,4/2 + 0,5 = 2,2$:

$$\begin{aligned} M_y &= \gamma_f \sum P_i a_i = \\ &= 0,8 \cdot 1,08 \cdot 16[2,4 \cdot 5,92 \cdot (2,4/2 + 0,5) + 0,5 \cdot 1,3 \cdot 0,25] = \\ &= 336 \text{ кН} > M_o = 206 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Сила трения T , сопротивляющаяся скольжению стены, с коэффициентом трения $f = 0,55$ (грунт по подошве супесь):

$$T = f \gamma_f P = 0,55 \cdot 0,8 \cdot 256 = 113 \text{ кН} > E = 86 \text{ кН.}$$

Проверка основания под подошвой стены.

Определяем момент сил E и P относительно центра тяжести подошвы от нормативных нагрузок:

$$M = M_o /1,2 - \sum P_i a_i =$$

$$= 206/1,2 - 1,08 \cdot 16 [2,4 \cdot 5,92 \cdot (1,45 - 1,15) - 0,5 \cdot 1,3 \cdot (1,45 - 0,25)] =$$

$$= 112 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$F = 2,9 \cdot 1 = 2,9 \text{ м}^2;$$

$$W = 1 \cdot 2,9^2 / 6 = 1,4 \text{ м}^3;$$

$$\sigma = P/F + M/W = 256/2,9 \pm 112/1,4 \text{ кН/м}^2,$$

$$\sigma = P/F = 256/2,9 = 88 < R_{\text{тп}} = 150 \text{ кН/м}^2,$$

$$\sigma_{\text{max}} = 168 \text{ кН/м}^2 < R_{\text{тп}} = 1,2 \cdot 150 = 180 \text{ кН/м}^2, \quad \sigma_{\text{min}} = 8 \text{ кН/м}^2 > 0.$$

Расчет прочности элементов стены.

Расчет прочности производим от расчетных нагрузок:

$$M_3 = \gamma_f E e = 1,2 \cdot 86 \cdot 2 = 206 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Напряжение в грунте под подошвой в месте стенки:

$$\sigma_1 = (168 - 8) \cdot (2,9 - 0,65) / 2,9 + 8 = 132 \text{ кН/м}^2.$$

Изгибающий момент в плите с учетом веса засыпки со стороны лицевой стороны стенки при $h = 1,3$ м:

$$M_1 = (132 + 168) 0,65^2 \cdot 1,2 / 2^2 - 1,3 \cdot 16 \cdot 1,2 \cdot 0,5^2 / 2 = 35 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_2 = M_3 - M_1 = 206 - 35 = 171 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Определим необходимую арматуру в стенке (позиция 1):

$$M = M_3 = 206 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$Q = \gamma_f E = 1,2 \cdot 86 = 103 \text{ кН};$$

$$h_0 = 30 - 4 = 26 \text{ см};$$

$$\alpha_m = M / (R_b \cdot b \cdot h_0^2) = 20\,600 / (1,45 \cdot 100 \cdot 26^2) = 0,21 < \alpha_R = 0,422;$$

$$\zeta = 0,895;$$

$$A_s = M / (R_s \zeta h_0) = 20\,600 / (35,5 \cdot 0,895 \cdot 26) = 24,9 \text{ см}^2.$$

Принимаем в стенке арматуру диаметром 18 мм класса А400 с шагом 10 см ($A_s = 25,45 \text{ см}^2$)¹.

Проверяем условие

$$bh_0 R_{bt} = 100 \cdot 26 \cdot 0,105 = 273 \text{ кН} > Q = 103 \text{ кН}.$$

Так как условие удовлетворено, поперечной арматуры не требуется. Определяем арматуру в фундаментной плите:

$$h_0 = 30 - 4 = 26 \text{ см}.$$

Площадь сечения арматуры позиции 4:

$$A_s = M_2 / (0,9 h_0 R_s) = 17\,100 / (0,9 \cdot 26 \cdot 35,5) = 20,5 \text{ см}^2.$$

Принимаем арматуру диаметром 18 мм класса А400 с шагом 10 см ($A_s = 25,45 \text{ см}^2$).

Площадь арматуры позиции 3:

$$A_s = M_1 / (0,9 h_0 R_s) = 3500 / (0,9 \cdot 26 \cdot 35,5) = 4,2 \text{ см}^2.$$

Принимаем арматуру диаметром 8 мм класса А240 с шагом 10 см ($A_s = 5,03 \text{ см}^2$).

Остальную арматуру принимаем конструктивно диаметром 8 мм из стали класса А240.

Армирование подпорной стены показано на *рис. 1.4*.

¹В соответствии с эпюрой изгибающих моментов можно только половину стержней доводить до самого верха, а остальные обрывать ниже в чередующемся порядке на одном или двух уровнях в зависимости от высоты стены. Здесь и далее в приводимых ниже примерах расчетов сооружений нахождение мест обрывов арматуры для ее экономии не приводится.

Справочное пособие

Андрей Николаевич **Добромыслов**

**ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА
КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ИНЖЕНЕРНЫХ
СООРУЖЕНИЙ**

Компьютерная верстка: *Е.В. Орлов*

Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*

Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Подписано к печати 18.01.10. Формат 60х90/16.

Бумага газ. Гарнитура Таймс.

Усл. 17 п.л. Тираж 1000 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>