

М. В. МАЛЫШЕВ

**Основные положения по статическому расчету
коллекторов хвостохранилищ круглого
поперечного сечения и трубопроводов
под насыпями**

В статье излагаются основные положения способа статического расчета коллекторов хвостохранилищ, отводящих осветленную воду, и трубопроводов круглого поперечного сечения, укладываемых под высокими насыпями, при различном способе опирания на грунт.

§ 1. Назначение метода расчета. Общие положения расчета

Предлагающийся метод расчета предназначен для статического расчета коллекторов хвостохранилищ, служащих для отвода осветленной воды.

Вопрос о давлении хвостов на коллекторы, по существу, не изучен до сего времени. В связи с этим при расчетах коллекторов проектные организации вынуждены обращаться к расчетным методам и приемам, разработанным для других случаев и лишь в какой-то степени отвечающим условиям работы коллекторов.

Сюда относится, с одной стороны, привлечение различных схем, служащих для определения горного давления и, с другой стороны, схем, определяющих давление на трубы, укладываемые в траншеи.

Рассмотрение действительных условий работы коллектора приводит к выводу, что ни одно, ни другое предположение, по существу, не отвечают действительным условиям и применение их в расчетной практике не оправдано. В силу этого обстоятельства пришлось предложить новую схему, которая ближе отвечает условиям работы коллекторов хвостохранилищ.

Специфичность работы коллекторов — трубопроводов больших диаметров заключается в следующем. Они

закладываются во многих случаях на большую глубину и поэтому испытывают давление большой толщи хвостов. Следовательно нагрузка, передаваемая на них, является нагрузкой от собственного веса вышерасположенной массы. Транспортировка хвостов в хвостохранилище производится с помощью гидротранспорта. Хвосты откладываются водонасыщенными и отфильтрованное воды из них происходит со временем в зависимости от их фильтрационных свойств, а также водопроницаемости пород основания и бортов хвостохранилища. Уплотнение хвостов происходит во времени, причем мощность намытого слоя также увеличивается во времени. Наконец, коллекторы укладываются, в большом числе случаев, в теле самой насыпи, а не в специально сооружаемой траншее, и, следовательно, давление, приходящееся на них, передается ото всей насыпи.

В основе предлагаемого способа расчета лежит именно такая схема, когда предполагается, что коллектор находится в теле насыпи, а сбоку от него располагается слой, сжимающийся под действием увеличивающейся по своей мощности толщи хвостов. Однако перед тем, как перейти к описанию основных положений расчета с использованием такой схемы, необходимо остановиться на методах расчета горного давления и траншейной укладки, которые иногда используются при проектировании коллекторов для определения приходящегося на них давления.

Как известно, теории горного давления базируются на том обстоятельстве, что на обделку туннеля сверху действует не вся нагрузка от вышележащей толщи грунта, а некоторая часть этой нагрузки, равная весу грунта в пределах, так называемой, зоны обрушения, ограничиваемой сводом обрушения. Разумеется, речь идет о туннелях, которые значительно заглублены относительно дневной поверхности. Свод обрушения очерчивается различными авторами по разным кривым, в силу предпосылок, кладущихся в основу, и, естественно, объем грунта под сводом оказывается разным, вследствие чего и давление различно. Теория горного давления разработана для случая определения давления на крепи обделок в горных выработках, ведущихся закрытым способом. Таким образом, предполагается, что в массиве, слагаемом горными породами и имеющем под действием силы тяжести, а также условий формирования, соответствующее напряженное состояние, делается внутри выемка, контур которой в мягких и полускальных породах обычно

укрепляется облицовкой или крепью. Из практики угольных проходок известно, что крепи целесообразно делать податливыми, так как в этом случае на них приходится меньшее давление, чем в том случае, когда они выполняются жесткими. Образование свода обрушения соответствует возникновению предельно-напряженного состояния в этой зоне, а для возможности возникновения предельно-напряженного состояния требуется наличие некоторых деформаций в сторону выработки. Если бы при осуществлении выработки были бы подведены жесткие крепи таким образом, что деформации породы не смогли бы проявиться, то давление на крепь равнялось бы давлению на нетронутый пласт грунта и было бы больше, чем давление в случае податливых крепей, так как при этом давление оказывается весом не всего столба вышележащего грунта, а только части его в пределах зоны обрушения. Таким образом, с увеличением податливости крепей уменьшается величина давления на них. Находящиеся сбоку от проходки слои породы уже сформировались под влиянием веса вышележащей толщи и, таким образом, их дополнительное обжатие вследствие перераспределения будет незначительным.

Переходя к методам определения давления на трубопроводы, укладываемые в траншеи, следует отметить, что отличительным обстоятельством здесь является то, что траншеи, как правило, делаются сравнительно узкими, и, поэтому, благодаря развивающимся силам трения по бортам, давление, передаваемое на трубу, оказывается меньшим, чем вес столба грунта, находящегося над трубой. Эти методы разработаны главным образом, для обычно практикуемых случаев неглубокого заложения трубопроводов. При этом учитывается также, что плотность грунта засыпки бывает обычно меньшей, чем плотность грунта в бортах.

Существующие методы определения давления грунта на трубы изложены в книге [1].

В то же время характер передачи нагрузки на трубопровод, укладываемый в насыпи, отличается от того, который имеет место при укладке труб в траншею. Отличается он тем, что если мы имеем насыпь, то по контуру ее не возникает сил трения в процессе осадки вследствие уплотнения грунта во времени. В силу этого обстоятельства, если насыпь достаточно широка, то в средней ее части давление равно весу столба грунта, находящегося над рассматриваемой точкой. Если же

имеется какое-то включение в теле этой насыпи, например, трубопровод, сжимаемость которого меньше, чем сжимаемость материала насыпи, то происходит естественная концентрация напряжений у этого трубопровода. Таким образом, оказывается, что он воспринимает напряжения даже большие, чем высота столба грунта.

Если в траншее силы трения, возникающие по краям засыпки, были направлены вверх (рис. 1 а) и тем самым

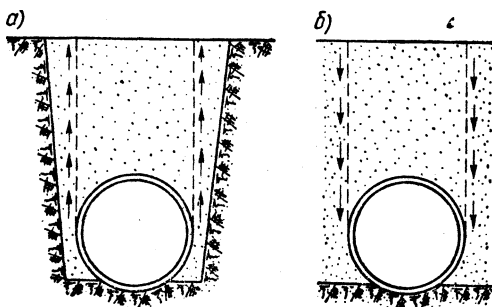


Рис. 1

разгружали трубу, то в данном случае, когда имеется насыпь с жестким включением, силы трения, действующие в вертикальном направлении на столб грунта, находящийся непосредственно над трубопроводом направлены вниз, т. е. окружающий грунт не поддерживает этот столб, как было ранее, а уже тянет его вниз (рис. 1, б): Это является коренным отличием, которое должно быть учтено методами расчета давления на трубы в траншеях и насыпях.

Таким образом, резюмируя изложенное, можно считать, что вертикальное давление, приходящееся на трубу в насыпи, должно быть, как правило, равно или более веса вышележащего столба грунта.

Боковое давление грунта в насыпи может быть различным в зависимости от ширины этой насыпи. Если предполагать насыпь достаточно широкой, а также учитывать трение материала насыпи о нижележащий слой грунта, то боковое давление грунта в средней части насыпи будет приближаться к тому, которое имеет место в массиве грунта, находящегося под действием собственного веса при невозможности деформирования этого массива в стороны.

Границы зоны, в которой можно учитывать полную высоту столба, давящего на коллектор, заключена в пределах (рис. 2)

$$-y = B_{лев} - H \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right); +y = B_{прав} - H \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right), \quad (1. 1)$$

а ширина ее $B_{лев} + B_{прав} - 2H \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right)$. Условия, в ко-

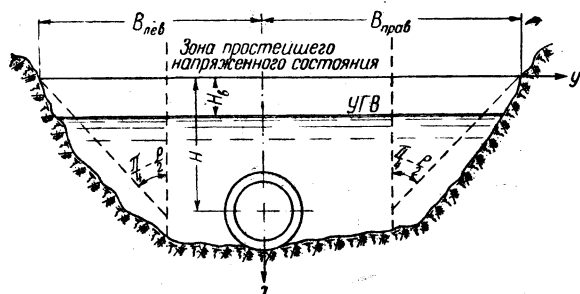


Рис. 2

торых находится грунт в этой зоне, по существу отвечают условиям, в которых он находится в неограниченно широкой насыпи.

§ 2. Боковое давление водонасыщенных грунтов

Учет бокового давления грунта позволяет избежать запасов при назначении толщины стенки коллектора. Поэтому ниже рассматривается важный для расчета коллекторов вопрос о боковом давлении водонасыщенных грунтов.

На глубине H от поверхности (рис. 2) вертикальное давление p будет складываться из давления от веса скелета столба грунта $p_{ск}$ и веса воды p_v . Если положение уровня воды, насыщающей поры грунта, не совпадает с положением дневной поверхности, то вес грунта, находящегося выше горизонта воды, определяется с учетом его влажности W . Объемный вес скелета сухого грунта $\gamma_{ск}$, как известно, равен $\gamma_{ск} = \Delta_{ск}(1 - n)$, где $\Delta_{ск}$ — удельный вес скелета грунта, n — его пористость.

Объемный вес влажного грунта равен $\gamma_{вл} = (1 + W)(1 - n)\Delta_{ск}$. Таким образом получим, что

$$p_{\text{эфф}}^{\text{ск}} = \Delta_{\text{ск}}(1-n)H + W\Delta_{\text{ск}}(1-n)H_s = \Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + WH_s). \quad (2.1)$$

Вес воды, заполняющей поры грунта ниже свободной ее поверхности на глубине H , будет равен

$$p_s = \Delta_s n(H - H_s), \quad (2.2)$$

где Δ_s — удельный вес воды.

Таким образом, суммарное вертикальное давление p на глубине H от веса столба вышерасположенного грунта будет равно

$$p = \Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + WH_s) + \Delta_s n(H - H_s). \quad (2.3)$$

Боковое давление грунта на ограждающую поверхность q выражается следующей зависимостью:

$$q = \xi_0 p_{\text{эфф}} + p_{\text{нейтр}}, \quad (2.4)$$

где ξ_0 — коэффициент бокового давления скелета грунта, определяемый экспериментально. Эффективное давление $p_{\text{эфф}}$ — это давление в скелете грунта, которое исчисляется с учетом его взвешивания в воде. Оно равно:

$$p_{\text{эфф}} = \Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + WH_s) - \Delta_s(1-n)(H - H_s) - p_{\text{пор}}. \quad (2.5)$$

Нейтральное давление — давление в воде, насыщающей грунт, равно:

$$p_{\text{нейтр}} = \Delta_s(H - H_s) + p_{\text{пор}}. \quad (2.6)$$

В формулах (2.5) и (2.6) $p_{\text{пор}}$ — избыточное над гидростатическим давление, возникающее вследствие незавершенности процесса консолидации или так называемое поровое давление [2]. Подставляя (2.5) и (2.6) в (2.4), получим следующее выражение для величины бокового давления:

$$q = \xi_0[\Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + WH_s) - \Delta_s(1-n)(H - H_s) - p_{\text{пор}}] + \Delta_s(H - H_s) + p_{\text{пор}}. \quad (2.7)$$

Выше было указано на возможность применения модели грунтовой массы для определения величины избыточного напора. Вводить в расчет величину $p_{\text{пор}}$

целесообразно тогда, когда определение давления производится для временного трубопровода. Но и в этом случае величина $p_{пор}$ может существенным образом повлиять на конечные результаты только тогда, когда коэффициент фильтрации грунта достаточно мал, а скорость намыва относительно велика. Проведенные расчеты показали, что при коэффициентах фильтрации k больших, чем $1 \cdot 10^{-6}$ см/сек величина $p_{пор}$ влияет на полное боковое давление q несущественным образом. Практически, видимо, величину $p_{пор}$ целесообразно учитывать, если $k < m \cdot 10^{-7}$ см/сек, где $1 < m < 10$. Для большинства хвостов коэффициент фильтрации больше, чем $1 \cdot 10^{-6}$ см/сек и, следовательно, учитывать величину $p_{пор}$ не обязательно. Пренебрежение величиной $p_{пор}$ в расчете идет в запас прочности коллектора.

Введем величину условного коэффициента бокового давления ξ , определяемого следующим образом:

$$\xi = \frac{q}{p}, \quad (2. 8)$$

где q — берется согласно выражения (2. 7) и p согласно выражения (2. 3).

Очевидно, что $\xi > \xi_0$ и лишь в случае отсутствия воды в грунте $\xi = \xi_0$. Чем ближе величина ξ к единице, тем в более хороших в статическом отношении условиях работает трубопровод и тем более, можно облегчить его сечение. Из формулы (2. 7) следует, что с увеличением разности $H - H_в$, а также величины $p_{пор}$ соответственно увеличиваются q , и, следовательно, ξ .

§ 3. Определение порового давления, возникающего вследствие незавершенности процесса консолидации

Для определения величины $p_{пор}$ в тех случаях, когда это целесообразно, рекомендуется использовать решение одномерной задачи об уплотнении постепенно увеличивающегося по своей мощности слоя водонасыщенного грунта [3]. Используя решение одномерной задачи, мы предполагаем, тем самым, что отфильтровывание воды, насыщающей поры грунта, происходит только вертикально вверх.

Определение $p_{пор}$ — порового давления для каждого интересующего нас момента времени производится следующим образом. Обозначим $v(t)$ — скорость намыва во

времени, x_{zp} — положение верхней границы намываемого слоя — и будем вести отсчет координат снизу вверх в соответствии с рис. 3. Тогда

$$x_{zp} = \int_0^t v(t) dt. \quad (3.1)$$

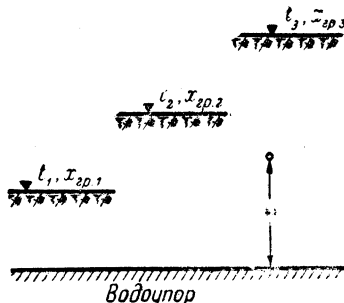


Рис. 3

Затем вычисляется безразмерный коэффициент λ для интересующих нас моментов времени по формуле, приведенной в работе [3]:

$$\lambda = \frac{k E_{zp} (1 + \xi_0)}{(1 - n_{cp}) \Delta_s (1 + \xi_0 - 2\xi_0^2) x_{zp} v(t)}. \quad (3.2)$$

где k — коэффициент фильтрации;
 n_{cp} — среднее значение пористости;
 Δ_s — удельный вес воды;
 E_{zp} — модуль сжимаемости грунта [4].

Решение задачи об уплотнении слоя грунта, увеличивающегося во времени, было получено с помощью решения системы линейных уравнений, приводящихся в работе [3]. На основе этого решения составлен график, который позволяет в пяти сечениях по высоте определить поровое давление. Если x — координата интересующей нас точки, то легко осуществить переход к безразмерной координате $U = \frac{x}{x_{zp}}$, которая будет изменяться в пределах от 0 до 1, причем для верхней границы $U = 1$ и для водонепроницаемого основания $U = 0$. Кривые (см. рис. 3 предыдущей статьи автора в настоящем сборнике) построены для значений $U = 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0$. Таким образом, зная величину λ , мы можем для этих значений U найти сразу по графику функцию $F(U, \lambda)$. Интересующая нас величина порового давления определяется по следующей формуле:

$$\dot{p}_{пор} = (\Delta_{ск} - \Delta_s) (1 - n_{ср}) x_{2р} \ddot{F}(U, \lambda), \quad (3.3)$$

где все обозначения прежние.

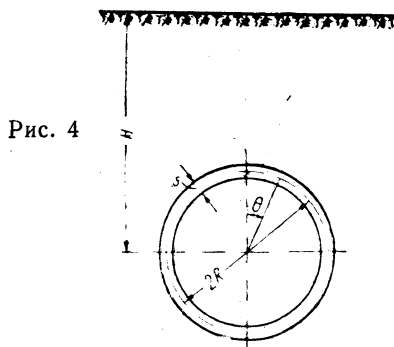
Все выводы для определения $p_{пор}$ относились пока к моменту возведения насыпи, то есть когда $v(t) > 0$. Однако можно определить и дальнейшее изменение $p_{пор}$ в послестроительный период, когда время $t > \bar{t}$ где \bar{t} — время окончания возведения насыпи. Если мы обозначим через $p_{пор}$ поровое давление, определяемое по формуле (3.3) для момента времени окончания возведения насыпи \bar{t} , то при $t > \bar{t}$ согласно [3] $p_{пор}$ равно:

$$p_{пор} = \bar{p}_{пор} \exp \left[- \frac{\pi k (t - \bar{t}) E_{2р} (1 + \xi_0)}{4 (1 - n_{ср}) \Delta_s (1 + \xi_0 - 2 \xi_0^2) H^2} \right], \quad (3.4)$$

где H — высота насыпи.

§ 4. Учет концентрации напряжений у коллектора. Общее решение задачи

В данном случае рассматривается полуплоскость, находящаяся под действием собственного веса, на некоторой глубине H от границы которой (рис. 4) вделана относи-



тельно тонкая упругая облицовка круглого поперечного сечения [5]. Под действием собственного веса грунта эта облицовка деформируется, причем из рассмотрения совместной работы массива грунта и облицовки вытекают необходимые граничные условия, заключающиеся в том, что нормальные и касательные напряжения и перемещения на внешней поверхности облицовки не претерпевают разрывов.

Деформируемость кольца определяется при допущениях, обычно принимаемых в строительной механике стержневых систем. Однако, в данном случае представляется целесообразным вместо обычного хода решения этой задачи, состоящего в выборе основной системы, составлении и решении системы канонических уравнений, воспользоваться полученным в замкнутом виде решением кольца при действии нормальной и касательной нагрузок, которые могут быть представлены рядом Фурье в функции полярного угла θ . Такое решение было получено для кольца А. И. Сегалем [6] и использовано для решения задачи о совместной работе упругих кольца и бесконечной пластинки С. А. Ивановым [7].

В нашем случае радиальная σ_r^R и касательная $\tau_{r\theta}^R$ составляющие нагрузки, действующей на кольцо, равны:

$$\sigma_r^R = p_0 + p_1 \cos \theta + p_2 \cos 2\theta + p_3 \cos 3\theta : \quad (4. 1)$$

$$\tau_{r\theta}^R = -p_1 \sin \theta + t_2 \sin 2\theta + p_3 \sin 3\theta . \quad (4. 2)$$

В соответствии с этим, если радиус кольца равен R , изгибающие моменты M , нормальные силы N и перерезывающие силы Q определяются следующими формулами:

$$M = \frac{R^2}{6} [(2p_2 + t_2) \cos 2\theta + p_3 \cos 3\theta] ; \quad (4. 3)$$

$$N = \frac{R}{6} [6p_0 - 2(p_2 + 2t_2) \cos 2\theta - 3p_3 \cos 3\theta] ; \quad (4. 4)$$

$$Q = \frac{R}{6} [2(2p_2 + t_2) \sin 2\theta + 3p_3 \sin 3\theta] . \quad (4. 5)$$

Соответственно радиальные u^R и тангенциальные v^R перемещения равны

$$u^R = \frac{p_0 R^2 (1 - \mu_{кол}^2)}{E_{кол} s} + \frac{R^4 (1 - \mu_{кол}^2)}{E_{кол} s^3} \left[\frac{4}{3} \left(p_2 + \frac{t_2}{2} \right) \cos 2\theta + \frac{1}{4} p_3 \cos 3\theta \right] \quad (4. 6)$$

$$v^R = \frac{2R^4 (1 - \mu_{кол}^2)}{E_{кол} s^3} \left[\frac{1}{3} (p_2 + 2t_2) \sin 2\theta + \frac{1}{8} p_3 \sin 3\theta \right] . \quad (4. 7)$$

В формулах (4. 1) — (4. 7) p_0, p_1, p_2, p_3, t_2 — коэффициенты, $E_{кол}$ — модуль упругости материала, из которого

Изготавливается коллектор, $\mu_{кол}$ — коэффициент Пуассона материала коллектора, s — толщина его стенки.

Для решения поставленной задачи воспользуемся выражениями для компонентов напряжений, удовлетворяющими уравнениям равновесия весомой среды и ее сплошности [8]. Затем составим, пользуясь законом Гука, выражения для относительных перемещений и проинтегрируем их для того, чтобы получить перемещения упругой полуплоскости u и v . Поставим условие отсутствия боковых перемещений в бесконечности при $\theta = \frac{\pi}{2}$, что позволит определить постоянные интегрирования. Далее используем условие равенства на контуре коллектора радиальных напряжений σ_r^R , касательных $\tau_{r\theta}^R$, а также смещений — радиального u^R и тангенциального v^R . Пользуясь полученными формулами, можно подсчитать коэффициенты p_0, p_1, p_2, p_3 и t_2 , входящие в формулы (4. 1)—(4. 7). Подробные выкладки по определению этих коэффициентов приводились в работе [9].

§ 5. Об усилиях, возникающих в коллекторе вследствие обжатия его гидростатическим давлением изнутри и снаружи

При гидростатическом обжатии коллектора, вследствие деформируемости материала, из которого он изготовлен, коллектор сжимается и происходит некоторое изменение напряжений в скелете окружающего его грунта.

Это изменение может быть установлено исходя из условий совместной деформации упругого тонкого кольца, нагруженного гидростатической нагрузкой и окружающей его среды. Если обозначить через p_s давление воды на коллектор, то вследствие совместной работы кольца и среды на кольцо будет приходиться давление p'_s , а на среду p''_s причем:

$$p_s = p'_s + p''_s. \quad (5. 1)$$

В соответствии с формулой (4. 6) радиальное смещение кольца при действии нагрузки p'_s будет

$$u_{p'_s}^R = \frac{p'_s R (1 - \mu_{кол}^2)}{E_{кол} s}. \quad (5. 2)$$

Деформация окружающей среды определяется из решения задачи Лямэ [8] при внешнем давлении, равном нулю и внешнем радиусе кольца, равном бесконечности.

Это перемещение равно

$$u_{p_0}^R = \frac{1 + \mu'_{zp}}{E_{zp}} R p_0'' . \quad (5.3)$$

Приравнивая выражения (5.2) и (5.3), получим с учетом зависимостей (5.1) и обозначив

$$\alpha = \frac{R E_{zp} (1 - \mu_{zp}^2)}{E_{кол} s} ;$$

следующее

$$p_0'' = \frac{\alpha}{1 + \mu_{zp}^1 + \alpha} p_0 ;$$

$$p_0' = \frac{1 + \mu_{zp}^1}{1 + \mu_{zp}^1 + \alpha} p_0 . \quad (5.4)$$

§ 6. Расчет коллектора круглого поперечного сечения

В § 4 и в статье [9] были приведены формулы для расчета коллектора круглого поперечного сечения. Расчет по этим формулам требует значительной вычислительной работы. Чтобы ее избежать, можно прибегнуть к графикам. Предварительно следует сказать, что можно положить $\mu'_{zp} = \xi_0$, т. е. принять обычную зависимость между коэффициентом бокового давления скелета ξ_0 и коэффициентом Пуассона грунта $\xi_0 = \frac{\mu_{zp}}{1 - \mu_{zp}}$.

Тогда получим:

$$p_0 = \frac{1 + \xi_0}{1 + \xi_0 + \alpha} \gamma_{об} H = \overline{p_0} \gamma_{об} H ; \quad (6.1)$$

$$p_1 = - \frac{\gamma_{об} R}{2} ; \quad (6.2)$$

$$p_2 = \overline{p_2} \gamma_{об} H ; \quad (6.3)$$

$$t_2 = \overline{t_2} \gamma_{об} H ; \quad (6.4)$$

$$p_3 = \gamma_{об} R \overline{p_3} ; \quad (6.5)$$

где $\overline{p_0}$, $\overline{p_2}$, $\overline{t_2}$, $\overline{p_3}$ — коэффициенты, зависящие от α , ξ_0 ;
 $\gamma_{об}$ — объемный вес грунта;
 H — высота насыпи;

Значения этих коэффициентов представлены в виде графиков на рис. 5. предыдущей статьи автора, помещенной в этом сборнике.

Напомним, что в данном случае рассматривается коллектор круглого поперечного сечения, находящийся в слое грунта значительной мощности, в связи с чем характеристики деформируемости основания кольца такие же, как и характеристики деформируемости вышерасположенной толщи. Кроме того, сверху, над коллектором находится значительный слой грунта. Минимальная толщина слоя грунта $H_{мин}$ над коллектором и под ним может быть уточнена расчетами. Ранее полученное решение [5], строго говоря, относится к бесконечной пластинке с вделанной в нее кольцевой обделкой. На практике же необходимо иметь решение для полуплоскости, край которой свободен от напряжений или пригружен равномерной нагрузкой. Напряженное состояние бесконечной пластинки и полуплоскости будут совпадать, если на краю нижней полуплоскости приложить напряжения, заменяющие влияние откинутой части (в данном случае верхней полуплоскости). Если эти напряжения, являющиеся по существу „паразитическими“ не велики и ими можно пренебречь, то можно воспользоваться решением не для полуплоскости, которое получить трудно, а сравнительно простым решением для бесконечной пластинки [9].

Однако, величины этих „паразитических“ напряжений сами по себе не определяют точности полученного решения. Нас может интересовать, какие от этих паразитических напряжений возникают дополнительные напряжения в месте расположения коллектора, причем не абсолютные, а относительные (относительно веса столба грунта над коллектором). Если эти дополнительные напряжения, действующие на коллектор, незначительны, то ими можно пренебречь. Исходя из этих дополнительных напряжений, можно установить минимальную высоту $H_{мин}$, начиная с которой данное решение задачи пригодно.

Для того, чтобы оценить величину получающейся погрешности вследствие замены полуплоскости полной плоскостью, был проведен ряд расчетов для жесткой трубы (наиболее неблагоприятный случай), т. е. при $\alpha = 0$ и при разных значениях ξ_0 и построены графики, приводившиеся в работе [9]. Крайние кривые соответствуют $\xi_0 = 0,2$; и $\xi_0 = 0,6$. Все остальные кривые укладываются между ними. Если считать, что для практических расчетов погрешность в 5% допустима, то по указанному гра-

фику получим, что следует принимать $\frac{H}{R} \geq 4,56$.

Если проследить, при каких значениях боковых относительных напряжений ошибка составляет 5%, то получим, что если $\xi_0 = 0,2$, то $\frac{H}{R} = 6,03$.

Если мы примем, что $\frac{H}{R} = 5$, то ошибка в вертикальных напряжениях при $\xi_0 = 0,2$, т. е. практически в самом тяжелом случае, составит для вертикальных напряжений 4,2% и для боковых 6,9%, что практически приемлемо.

Таким образом, можно сделать вывод, что для случаев, обычно имеющих место в практике, т. е. когда $\frac{H}{R} > 5$ или $\frac{H}{D} > 2,5$ при $\xi_0 \geq 0,2$ допустимо пользоваться решением не для полуплоскости, а для полной плоскости, т. е. тем решением, которое приводилось выше.

§ 7. О коэффициенте концентрации напряжений

При расчете трубопроводов, укладываемых в насыпи, вводится понятие о коэффициенте вертикального давления грунта в насыпи K_n . Этот коэффициент указывает, во сколько раз следует увеличить вес столба грунта, находящийся непосредственно над трубопроводом, чтобы учесть то местное перераспределение напряжений, которое возникает вследствие различной деформируемости самого трубопровода и рядом расположенного с ним грунта.

Вес этого грунта вычисляется по формуле

$$G = 2\gamma_{об} H R K_n \left(1 - \frac{R}{H}\right), \quad (7. 1)$$

если считать нагрузку на трубу, прилагающейся на уровне верха трубы [1]. Если же считать, что нагрузка прикладывается на контуре трубы, то получим, что вес грунта над трубой равен

$$G_1 = 2\gamma_{об} H R \left(1 - \frac{\pi}{4} \frac{R}{H}\right) K_n. \quad (7. 2)$$

Для того, чтобы вычислить коэффициент K_n , следует установить величину вертикального напряжения σ_x по контуру коллектора. В этом случае мы получим, что

$$G_1 = 2 \int_0^R \sigma_x dy. \quad (7. 3)$$

Но совершенно очевидно, что интеграл, находящийся в правой части выражения (7. 3), представляет собой не что иное, как удвоенное значение нормальной силы N , действующей в трубопроводе в сечении $\theta = \frac{\pi}{2}$. Это следует непосредственно из условия равновесия. Нормальная сила в сечении $\theta = \frac{\pi}{2}$, определяемая по формуле (19) предыдущей статьи автора, помещаемой в этом сборнике, равна:

$$N_{\theta = \frac{\pi}{2}} = \frac{R}{3} (3p_0 + p_2 + 2t_2). \quad (7. 4)$$

Производя приравнивание выражений (7. 4) и (7. 2), получим:

$$p_0 + \frac{p_2 + 2t_2}{3} = \gamma_{об} H K_n \left(1 - \frac{\pi}{4} \frac{R}{H} \right). \quad (7. 5)$$

Из выражения (7. 5) получаем, что

$$K_n = \frac{p_0 + \frac{p_2 + 2t_2}{3}}{\gamma_{об} H \left(1 - \frac{\pi}{4} \frac{R}{H} \right)}. \quad (7. 6)$$

При $H \gg R$ получаем упрощенное выражение для определения K_n в следующем виде:

$$K_n = \frac{p_0 + \frac{p_2 + 2t_2}{3}}{\gamma_{об} H}. \quad (7. 7)$$

Этот коэффициент характеризует собой как бы увеличение веса столба грунта непосредственно над коллектором, возникающее из-за различной податливости в вертикальном направлении коллектора и расположенного рядом с ним грунта.

Коэффициент K_n , характеризуя увеличение веса столба грунта, находящегося над коллектором, не дает представления о том, насколько увеличиваются максимальные ординаты давлений и изгибающие моменты против соответствующих их значений, которые имели бы место при одинаковой сжимаемости коллектора и рядом расположенного грунта. Эпюра давлений имеет максимальную

ординату в середине, на оси коллектора ($\theta = 0$) и минимальную у его края ($\theta = \frac{\pi}{2}$). Коэффициент, показывающий увеличение максимальной ординаты давлений по отношению к весу столба грунта над коллектором K_n' равен при $H \gg R$

$$K_n' = \frac{p_0 + p_2}{\gamma_{об} H}. \quad (7. 8)$$

Далее, если произвести приравнивание максимальных изгибающих моментов, имеющих место в сечении $\theta = 0$, то можно получить значение коэффициента K_n'' , показывающего, во сколько раз увеличивается максимальный изгибающий момент, если учесть увеличение напряжений за счет различной сжимаемости в вертикальном направлении самого коллектора и грунта, рядом с ним расположенного. Этот коэффициент выражается для случая $H \gg R$ по формуле:

$$K_n'' = \frac{2}{3(1 - \xi_0)} \frac{2p_2 + t_2}{\gamma_{об} H}, \quad (7. 9)$$

получаемой из формулы (18), приводившейся в предыдущей статье этого сборника, при $\theta = 0$ и формулы для изгибающих моментов в кольце при равномерной нагрузке, данной в работе [6]

$$M = \frac{1}{4} \gamma_{об} H (1 - \xi_0) R^2 K_n''. \quad (7. 10)$$

§ 8. Коллекторы мелкого заложения

Выше, в § 6 уже указывалось на условие применимости основной расчетной схемы, в основу которой положено решение задачи о бесконечной пластинке, в которую вделана кольцевая облицовка, обладающая упругостью. Если принять условие $H > 5R$, то погрешность от такого решения, поскольку в действительности мы имеем дело с полуплоскостью, а не бесконечной пластинкой, получается вполне для практических целей допустимой. Однако для случая $H < 5R$ эта погрешность начинает резко возрастать. В практике же могут встретиться случаи, когда коллекторы имеют мелкое заложение.

В условиях, когда $H < 5R$ недопустимо откидывать члены с p_1 и p_3 поскольку отношение $\frac{R}{H}$, делающее

члены, содержащие p_1 и p_3 незначительными по сравнению с остальными, начинает возрастать.

Кроме того, начинает в большой мере возрастать также и влияние „паразитических“ напряжений на поверхности. В связи с этим, если не принимать во внимание наличие „паразитических“ напряжений, нагрузки, передающиеся коллектору, получатся преувеличенными и чем больше отношение $\frac{R}{H}$, тем это преувеличение будет больше. Наиболее мелкое заложение коллектора, которое практически возможно, это когда $H = 2R$ или другими словами, когда над верхом коллектора находится слой грунта, равный его радиусу.

Величина „паразитических“ напряжений над коллектором определится по формулам, приводившимся в работе [9].

Если с помощью приближенного приема, „снять“ эти „паразитические“ напряжения, то мы при условии $H = R$ получим решение очень близкое к решению задачи о коллекторе, находящемся в сыпучей среде, напряжения в которой не зависят от деформируемости коллектора. Этот условный прием „снятия“ напряжений заключается в следующем. По формулам, приводившимся в работе [9], вычисляются напряжения на поверхности полуплоскости, для чего предварительно по формулам теории напряжений делается переход от полярной системы координат к прямоугольной. Затем используется решение задачи для полуплоскости — решение Фламана [8] и от этой нагрузки ищутся напряжения внутри сплошной полуплоскости в месте расположения коллектора по его контуру. Эти напряжения вычитаются из тех напряжений, которые мы получили ранее для случая бесконечной пластинки. Кроме того, ставится условие для напряжений σ_r при $\theta = 0$, чтобы в случае $r = H$ оно отсутствовало. Все эти выражения получаются достаточно громоздкими. Однако, учитывая, что наибольшее влияние на напряжения, вычисленные по указанным формулам имеют члены с b_0 и b_2 по сравнению с членами с a_1 , a_2 , a_3 , можно прийти к достаточно простым приближенным формулам, носящим интерполяционный характер, для вычисления напряжений у коллектора, считая, что эти напряжения изменяются пропорционально $\left(\frac{R}{H}\right)^2$ или, другими словами, принимаются во внимание в приводившихся ранее в работе [9] формулах члены при r^{-2} .

Таким путем были получены формулы (36) предыдущей статьи, помещенной в настоящем сборнике, при условии значений коэффициентов, определяемых по формулам (39), (40) той же статьи. Формулу (36) можно представить еще и несколько иначе, внося в нее значения коэффициентов по формулам (39), (40) и (14) предыдущей статьи при $H_g = 0$.

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \left[\bar{p}_0 \left(1 - \frac{R^2}{H^2} \right) + \frac{1 + \xi_0}{2} \left(\frac{R}{H} \right)^2 \right] p_{эфф} + p_{нейтр} + \\ & + \left\{ \left[\bar{p}_2 \left(1 - \frac{R^2}{H^2} \right) + \frac{1 - \xi_0}{2} \left(\frac{R}{H} \right)^2 \right] p_{эфф} \right\} \cos 2\theta - \\ & - \frac{1}{2} (p_{эфф} + p_{нейтр}) \frac{R}{H} \cos \theta + \left(\bar{p}_3 p_{эфф} - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \bar{p}_{нейтр} \right) \frac{R}{H} \cos 3\theta. \end{aligned} \quad (8. 1)$$

При отсутствии воды, заполняющей грунт, в формуле (8. 1) следует принять $p_{нейтр} = 0$.

Поскольку формулы (36)–(40) предыдущей статьи, а, следовательно, и (8. 1) являются приближенными, то максимальную погрешность мы получаем при $R = H$.

Такой случай практически лишен смысла. Уже при $H = 2R$ погрешность получается небольшой, и вполне приемлемой в практических расчетах.

Следует отметить, что в формулах (40) предыдущей статьи в знаменателе стоит разность $H - H_g$. Чем ниже положение уровня воды, тем меньше разность $H - H_g$, но и тем меньше $p_{нейтр}$. По формуле (3) предыдущей статьи при $p_{пор} = 0$ отношение $\frac{p_{нейтр}}{H - H_g} = \Delta_g$.

При вычислении p_1 и p_3 значением $p_{пор}$ следует пренебрегать, а учитывать $p_{пор}$ только при вычислении p_0 .

При $H = 5R$ отношение $\left(\frac{R}{H} \right)^2$ оказывается равным 0,04 и мы практически из решения, приводившегося в п. 22 предыдущей статьи, получаем основное решение.

§ 9. Усилия в коллекторе от его собственного веса и веса воды, полностью заполняющей сечение. Учет сейсмического воздействия на коллектор. Коэффициенты перегрузки. Учет временной нагрузки на поверхности

Усилия в коллекторе, возникающие вследствие собственного его веса, а также веса воды, полностью заполняющей его сечение, обычно очень невелики по сравнению с усилиями, возникающими в коллекторе под насыпью. Поэтому в ряде случаев ими можно пренебрегать. Однако, в случае необходимости учет этих усилий может быть произведен по формулам (21), (22), (23) и (24) предыдущей статьи. Максимальные значения моментов получаются в сечении $\theta = \pi$. Эти решения получены из условия опирания коллектора на жесткое основание (точечное опирание). Совершенно очевидно, что такое опирание является наиболее тяжелым для коллектора и все другие случаи опирания дадут меньшие значения изгибающих моментов. Это решение получено без учета совместной работы грунта, окружающего коллектор и самого коллектора. Наибольшее значение изгибающих моментов в сечении $\theta = \pi$ по формулам (21) и (23) предыдущей статьи будет

$$M'_{\theta=\pi} = \frac{3}{2} \Delta_{mp} s R^2; \quad M''_{\theta=\pi} = \frac{3}{4} \Delta_s R^3. \quad (9. 1)$$

По этим же формулам для верхнего сечения, для которого $\theta = 0$, получим

$$M'_{\theta=0} = \frac{1}{2} \Delta_{mp} s R^2; \quad M''_{\theta=0} = \frac{1}{4} \Delta_{mp} R^3. \quad (9. 2)$$

Из формул (9. 1) и (9. 2) следует, что момент в точке опирания в 3 раза более, чем момент в верхнем сечении. При других условиях опирания этот коэффициент будет уменьшаться.

Учет сейсмического воздействия произведен в соответствии с рекомендациями норм [10]. Считая, что коллекторы можно отнести к сооружениям II класса, по табл. 14, помещенной в нормах [10], получаем, что расчетная сейсмичность совпадает с сейсмичностью, определяемой по картам сейсмического районирования СССР. Далее, пользуясь основной формулой п. 21 норм [10] и считая произведение $\beta \gamma_{ik} = 1$, получаем:

$$s_k = Q_k K_c. \quad (9. 3)$$

Здесь Q_c — нагрузка, вызывающая инерционную силу, а K_c — коэффициент, принимаемый по табл. 2 норм [10].

Если считать, что колебание происходит в вертикальном направлении, то мы получим увеличение максимальной ординаты эпюры давлений в $1 + K_c$ раз. Вычислим, исходя из этого, новые значения p_0''' и p_2''' , считая, что без сейсмического усилия эти величины были бы равны p_0 и p_2 . При этом максимальная ордината при $\theta = 0$ равна $p_0 + p_2$, а минимальная при $\theta = \frac{\pi}{2}$ равна $p_0 - p_2$. Следовательно, для условия колебания в вертикальном направлении получаем:

$$p_0''' + p_2''' = (p_0 + p_2)(1 + K_c); \quad (9.4)$$

$$p_0''' - p_2''' = p_0 - p_2. \quad (9.5)$$

Решая систему уравнений (9.4) и (9.5), получим:

$$p_0''' = p_0 \left(1 + \frac{K_c}{2}\right) + p_2 \frac{K_c}{2};$$

$$p_2''' = p_0 \frac{K_c}{2} + p_2 \left(1 + \frac{K_c}{2}\right). \quad (9.6)$$

Если предположить, что колебания происходят в горизонтальном направлении, то можно составить следующую систему:

$$p_0'' + p_2'' = p_0 + p_2; \quad (9.7)$$

$$p_0'' - p_2'' = (p_0 - p_2)(1 - K_c). \quad (9.8)$$

Решая систему уравнений (9.7) и (9.8), получим:

$$p_0'' = p_0 \left(1 - \frac{K_c}{2}\right) + p_2 \frac{K_c}{2};$$

$$p_2'' = p_0 \frac{K_c}{2} + p_2 \left(1 - \frac{K_c}{2}\right). \quad (9.9)$$

Естественно, что $p_2'' < p_2'''$, поэтому для расчетов следует принимать формулы (9.6), а не (9.9).

Обозначим максимальный изгибающий момент через $M_{сейсм}$ и $\frac{K_c}{2} = K_6$; $1 + \frac{K_c}{2} = K_6'$. Тогда, пользуясь формулой (18) предыдущей статьи сборника, получим

$$\dot{M}_{\text{сейсм макс}} = \frac{\dot{R}^2}{6} (2p_2''' + t_2), \quad (9.10)$$

где
$$p_2''' = p_0 K_6 + p_2 K_6'. \quad (9.11)$$

Значения K_6 и K_6' приведены в табл. 7 предыдущей статьи, помещенной в настоящем сборнике.

При определении расчетных значений нагрузок, действующих на коллектор, необходимо вводить коэффициенты перегрузки. По рекомендации СНиП [11] эти коэффициенты могут быть приняты равными для хвостов 1,2 и для жидкостей — воды 1,1. Однако, в связи с большой специфичностью хвостохранилищ эти коэффициенты подлежат дальнейшему уточнению. Если имеется возможность опытного уточнения величин коэффициента перегрузки, то его следует устанавливать опытным путем. Поэтому рекомендации в отношении величин коэффициентов перегрузки следует пока рассматривать как предварительные.

В предыдущей статье предусмотрена возможность учета временной нагрузки, действующей на коллектор. Учет ее производится по формуле (41), данной там же. При этом предполагается, что распределение напряжений по глубине происходит согласно решению теории упругости о распределении напряжений в линейно-деформируемом полупространстве, а увеличение напряжений у коллектора за счет различной сжимаемости в вертикальном направлении самого коллектора и рядом с ним расположенного грунта такое же, как и от собственного веса грунта (максимальное). Поэтому в формуле (41) предыдущей статьи имеется в качестве множителя коэффициент K_n' . В то же время предполагается, что увеличение горизонтальных нормативных напряжений у коллектора не происходит, что дает $\tilde{p}_0 = \tilde{p}_2$. Коэффициент α'' взят из таблицы, приведенной в СНиП [12].

§ 10. Учет влияния жесткости основания на давление, передаваемое коллектору

В основном решении, которое было получено ранее [5], рассматривалась задача о весомой полуплоскости, в которой имеется круговой вырез на некоторой глубине H . Этот вырез подкреплялся упругой облицовкой. Облицовка деформировалась совместно с окружающим ее грунтом (полуплоскостью), перемещения облицовки соответство-

вали перемещением грунта, а также на контуре между облицовкой и круговым вырезом в полуплоскости производилось приравнивание напряжений. При этом рассматривается случай, когда горизонтальная прямая, проведенная через центр трубопровода (рис. 5, а) до деформации, остается на месте и после деформации. Однако в действительности характер деформирования будет иным.

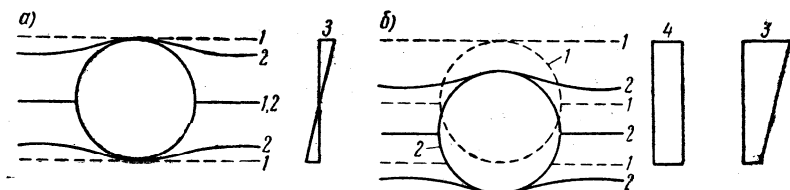


Рис. 5

1 — до деформации грунта; 2 — после деформации грунта; 3 — эпюра полных перемещений в грунте вдали от коллектора; 4 — эпюра полных перемещений коллектора

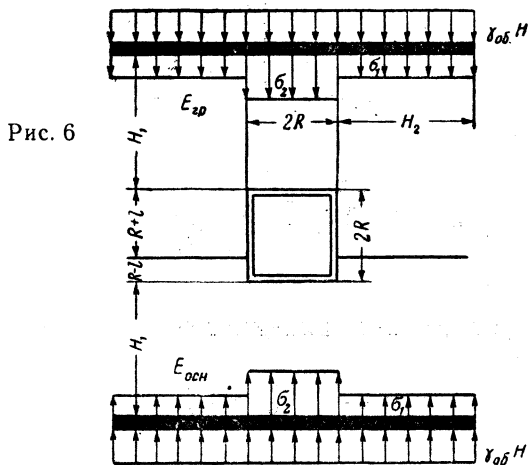
Если деформируемость основания и грунтовой толщи одинакова, то характер деформации примет вид, изображенный на рис. 5, б. Линия прямой до деформации грунтового массива и остающаяся прямой после деформации будет располагаться не на оси коллектора, а где-то ниже. В целом же сжатие слоя грунта, имеющего толщину, равную диаметру коллектора и располагающегося по бокам от него будет тем же самым (имеется в виду грунт не находящийся в непосредственной близости от коллектора). На рис. 5, а показана эпюра перемещений грунта вдали от коллектора (3), которая является антисимметричной. Эпюра перемещений коллектора в вертикальном направлении, поскольку коллектор не смещается, имеет все ординаты равными нулю.

В основном решении, полученном ранее [5], перемещения слоя грунта сбоку от коллектора соответствуют эпюре, изображенной на рис. 5, а (3). Нулевые смещения соответствуют горизонтальной оси коллектора.

На рис. 5, б изображены справа две эпюры. Эпюра (3) — есть эпюра абсолютных перемещений слоя грунта вдали от коллектора. Основание считается сжимаемым и поэтому поверхность его также смещается под действием нагрузки сверху. Коллектор смещается как жесткое тело поступательно, ординаты эпюры смещений его (4) все равны между собой.

Из рассмотрения эпюр смещений, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, что если сжимаемость

грунта сверху и снизу одинакова, то характер деформации грунта у коллектора будет сверху и снизу идентичен, однако к эпюре (3) рис. 5, а следует, для получения эпюры абсолютных смещений, прибавить прямоугольную эпюру смещений коллектора (4), показанную на рис. 5, б. Деформации, показанные на рис. 5, а и 5, б относительно коллектора, идентичны, в то время как абсолютные их смещения различны. Эпюра относительных смещений (3) на рис. 5, а, будучи сложена с эпюрой



смещений коллектора (4) на рис. 5, б даст эпюру абсолютных смещений (3), представленную на рис. 5, б. Следуя такой концепции, основанной на описанном выше допущении, мы просто можем использовать основное решение, полученное для полуплоскости. Однако такое решение непосредственно можно применить только в том случае, когда коллектор опирается на основание той же жесткости, что и расположенный выше грунт. Решить более точно задачу о коллекторе, опирающемся на более жесткое основание, не представляется пока возможным. Поэтому для решения этой задачи воспользуемся приближенной схемой расчета, которая в частном случае, когда жесткости основания и грунта сверху одинаковы, приведет к решению, совпадающему с полученным строгим решением — основным решением.

На рис. 6 представлена расчетная схема. Предполагается, что коллектор, условно имеющий прямоугольное очертание (квадрат со стороной $2R$), заглублен в основа-

ние на величину $\bar{R}-l$ и выходит из основания на величину l .

Модуль деформации основания $E_{осн}$ и грунта $E_{зр}$. Применительно к грунту и основанию используется модель Винклера. На расстоянии H_1 находится линия равных деформаций. Сверху действует нагрузка, равная $\gamma_{об}H$, давление, приходящееся на коллектор, равно σ_2 , а рядом σ_1 . Условие равновесия, составленное для половины коллектора в силу условий симметрии, дает

$$\sigma_1 H_2 + \sigma_2 R = \gamma_{об} H (H_2 + R) \quad (10. 1)$$

или

$$\sigma_1 \frac{H_2}{R} + \sigma_2 = \gamma_{об} H \left(\frac{H_2}{R} + 1 \right) \quad (10. 2)$$

откуда

$$\sigma_1 = \gamma_{об} H \frac{\frac{H_2}{R} + 1}{\frac{H_2}{R}} - \sigma_2 \frac{1}{\frac{H_2}{R}}. \quad (10. 3)$$

Условие равных деформаций дает

$$\sigma_1 = \left(\frac{H_1 + R + 1}{E_{зр}} + \frac{H + R - 1}{E_{осн}} \right) = \sigma_2 \left(\frac{H_1}{E_{зр}} + \frac{H_1}{E_{осн}} \right). \quad (10. 4)$$

Это условие составляется для несжимаемого коллектора.

В случае, когда $E_{зр} = E_{осн}$, т. е. для основного решения уравнение (10. 4.) дает после преобразований

$$\sigma_1 \left(\frac{H_1}{R} + 1 \right) = \sigma_2 \frac{H_1}{R}. \quad (10. 5)$$

Условие равновесия представляется уравнением (10. 3).

Из (10. 3), считая $\sigma_2 = K_n \gamma_{об} H$, для данного случая получаем

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_{об} H}{\frac{H_2}{H}} \left(\frac{H_2}{R} + 1 - K_n \right). \quad (10. 6)$$

Подставляя в (10. 5) значение σ_2 будем иметь:

$$\sigma_1 \left(\frac{H_1}{R} + 1 \right) = K_n \gamma_{об} H \frac{H_1}{R}. \quad (10. 7)$$

Или

$$\sigma_1 = \frac{K_n \gamma_{об} H \frac{H_1}{R}}{\frac{H_1}{R} + 1}. \quad (10. 8)$$

Приравнявая выражения (10. 8) и (10. 6), имеем уравнение

$$\frac{K_n \gamma_{об} H \frac{H_1}{R}}{\frac{H_1}{R} + 1} = \frac{\gamma_{об} H}{\frac{H_2}{R}} \left(\frac{H_2}{R} + 1 - K_n \right). \quad (10. 9)$$

Теперь необходимо установить величину $\frac{H_1}{R}$. В силу условий задачи мы должны иметь $\sigma_1 \leq \gamma_{об} \frac{H}{R}$ для жесткого коллектора. Если это условие использовать, то получим из уравнения (10. 8):

$$\frac{K_n \frac{H_1}{R}}{\frac{H_1}{R} + 1} \leq 1. \quad (10. 10)$$

Или разрешая неравенство (10. 10) относительно $\frac{H_1}{R}$

$$\frac{H_1}{R} \leq \frac{1}{K_n - 1}. \quad (10. 11)$$

Условие (11) дает

K_n	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
$\frac{H_1}{R} \leq$	2	2,5	3,33	5	10	∞

Значения K_n для жесткого коллектора, полученные из основного решения, приведены в табл. 1 и там же даны соответствующие значения $\frac{H_1}{R}$. Величина K_n вычисляется как нормальная сила в сечении $\theta = \frac{\pi}{2}$, отнесенная к радиусу, по формуле:

$$K_n = \frac{\frac{1}{3} (p_2 + 2t_2) + p_0}{\gamma_{об} H}. \quad (10. 12)$$

Таблица 1

ξ_0	K_n	$\frac{H_1}{R}$ по ф-ле (10. 11)
0,2	1,335	2,99
0,3	1,306	3,27
0,4	1,274	3,66
0,5	1,239	4,20
0,6	1,203	4,94
0,7	1,160	6,25

При расчете по формуле (10. 12) предполагалось, что коллектор жесткий ($\alpha' = 0$) и давление воды отсутствует. При этом получены максимальные для данного ξ_0 значения $\frac{H_1}{R}$, которые оказались для всех случаев кроме $\xi_0 = 0,7$ менее 5. Этими значениями $\frac{H_1}{R}$ будем пользоваться в дальнейших практических расчетах.

Из формул (10. 4) и (10. 8) получаем

$$\sigma_2 = \frac{K_n \gamma_{об} H \left[\frac{\frac{H_1}{R} + \frac{l}{R} + 1}{E_{zp}} + \frac{\frac{H_1}{R} + 1 - \frac{l}{R}}{E_{осн}} \right]}{\left(\frac{H_1}{R} + 1 \right) \left(\frac{1}{E_{zp}} + \frac{1}{E_{осн}} \right)}. \quad (10. 13)$$

Обозначая через α_1 отношение

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_2}{K_n \gamma_{об} H}, \quad (10. 14)$$

получим после небольшого преобразования

$$\alpha_1 = \frac{\left[\frac{H_1}{R} + \frac{l}{R} + 1 + \left(\frac{H_1}{R} + 1 - \frac{l}{R} \right) \frac{E_{zp}}{E_{осн}} \right]}{\left(1 + \frac{H_1}{R} \right) \left(1 + \frac{E_{zp}}{E_{осн}} \right)}. \quad (10. 15)$$

Формулой (10. 15) следует пользоваться для расчетов, принимая $\frac{H_1}{R}$ по табл. 1.

Величина K_u определяется из основного решения по формуле (10. 12).

Формулу (10. 15) можно преобразовать к такому виду

$$\alpha_1 = 1 + \frac{l}{R} \frac{1 - \frac{E_{zp}}{E_{осн}}}{\left(1 + \frac{E_{zp}}{E_{осн}}\right) \left(1 + \frac{H_1}{R}\right)}. \quad (10. 16)$$

Для того, чтобы рассчитать коллектор, пользуясь введенным коэффициентом α_1 , следует предварительно преобразовать формулы для изгибающих моментов. Нормальная сила в сечении $\theta = \frac{\pi}{2}$ меняется в отношении α_1 , нормальная сила в сечении $\theta = 0$ при этом не изменяется. По формуле, полученной в основном решении,

$$\bar{N} = \frac{R}{3} [3\bar{p}_0 - (\bar{p}_2 + 2\bar{t}_2) \cos 2\theta], \quad (10. 17)$$

где \bar{N} — нормальная сила, отнесенная к $\gamma_{об} H$.

Следовательно, в сечении $\theta = \frac{\pi}{2}$ будем иметь

$$\bar{N}_{\theta = \frac{\pi}{2}} = \frac{R}{3} [\bar{p}_2 + 2\bar{t}_2 + 3\bar{p}_0] \alpha_1 = \frac{R}{3} [\bar{p}_2' + 2\bar{t}_2' + 3\bar{p}_0'] \quad (10. 18)$$

и в сечении $\theta = 0$

$$\bar{N}_{\theta = 0} = \frac{R}{3} [3\bar{p}_0 - \bar{p}_2 - 2\bar{t}_2] = \frac{R}{3} [3\bar{p}_0' - \bar{p}_2' - 2\bar{t}_2']. \quad (10. 19)$$

Решаем два уравнения (10. 18) и (10. 19), в результате чего получаем:

$$\bar{p}_0' = \bar{p}_0 \frac{1 + \alpha_1}{2} - \frac{1 - \alpha_1}{6} (\bar{p}_2 + 2\bar{t}_2); \quad (10. 20)$$

$$\bar{p}_2' + 2\bar{t}_2' = \frac{1 + \alpha_1}{2} (\bar{p}_2 + 2\bar{t}_2) + \frac{3}{2} (\alpha_1 - 1) \bar{p}_0. \quad (10. 21)$$

Примем допущение о том, что увеличение касательных напряжений происходит пропорционально увеличению нормальных напряжений, то есть

$$\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_2'} = \frac{\bar{t}_2}{\bar{t}_2'}. \quad (10. 22)$$

Отсюда легко получим, что

$$\overline{p_2'} + \frac{\overline{t_2'}}{2} = \frac{\overline{p_2} + \frac{\overline{t_2}}{2}}{\overline{p_2} + 2\overline{t_2}} (\overline{p_2'} + 2\overline{t_2'}). \quad (10. 23)$$

Изгибающий момент равен

$$M = \frac{R^2}{6} \left(2\overline{p_2'} + \overline{t_2'} \right) \gamma_{0\sigma} H \cos 2\theta, \quad (10. 24)$$

где

$$\overline{p_2'} = \overline{p_2} \frac{1 + \alpha_1}{2} + \frac{3}{2} (\alpha_1 - 1) \frac{\overline{p_0} \overline{p_2}}{\overline{p_2} + 2\overline{t_2}}, \quad (10. 25)$$

$$\overline{t_2'} = \overline{t_2} \frac{1 + \alpha_2}{2} + \frac{3}{2} (\alpha_1 - 1) \frac{\overline{p_0} \overline{t_2}}{\overline{p_2} + 2\overline{t_2}}. \quad (10. 26)$$

Величина $\overline{p_0'}$, необходимая для вычисления силы, определяется по формуле (10. 20).

Формула (10. 4) была выведена в предположении несжимаемости коллектора. Рассмотрим прогиб коллектора под действием равномерно распределенной вертикальной нагрузки интенсивностью σ_2 . Этот прогиб мы получим из основного решения, полученного Сегалем [6], в котором пренебрегается сжатием кольца под действием всестороннего обжатия.

Формула для прогиба записывается так:

$$u = \frac{R^4 (1 - \nu_{кол}^2)}{9E_{кол} I} \left(p_2 + \frac{t_2}{2} \right) \cos 2\theta. \quad (10. 27)$$

Для равномерной нагрузки интенсивностью σ_2

$$p_2 = \frac{\sigma_2}{2}; \quad t_2 = \frac{\sigma_2}{2}, \quad (10. 28)$$

так как внешняя нагрузка будет

$$\sigma_r = p_0 + p_2 \cos 2\theta = \frac{\sigma_2}{2} + \frac{\sigma_2}{2} \cos 2\theta; \quad \tau_{r\theta} = \frac{\sigma_2}{2} \sin 2\theta. \quad (10. 29)$$

Из формул (10. 28) и (10. 27) получаем прогиб

$$u = \frac{R^4 (1 - \nu_{кол}^2)}{9E_{кол} I} \frac{3}{4} \sigma_2 \cos 2\theta. \quad (10. 30)$$

Максимальное сжатие кольца будет при $\theta = 0$ равно удвоенному прогибу, то есть

$$u_{\text{полн}} = \frac{1}{6} \frac{R^4 (1 - \mu^2_{\text{кол}})}{E_{\text{кол}} I} \sigma_2. \quad (10. 31)$$

Учитывая, что $I = \frac{s^3}{12}$, получим

$$u_{\text{полн}} = \frac{2R^4 (1 - \mu^2_{\text{кол}})}{E_{\text{кол}} s^3} \sigma_2. \quad (10. 32)$$

Ранее в работе [9] было введено обозначение для α'

$$\alpha' = \frac{(1 - \mu^2_{\text{кол}}) E_{2p}}{E_{\text{кол}}} \left(\frac{R}{s} \right)^3. \quad (10. 33)$$

Из (10. 32) с учетом (10. 33) получим

$$u_{\text{полн}} = 2R \alpha' \frac{\sigma_2}{E_{2p}}. \quad (10. 34)$$

С учетом сжатия трубопровода уравнение равенства прогибов — формула (10. 4) — запишется таким образом:

$$\sigma_1 = \left[\frac{H_1 + R + l}{E_{2p}} + \frac{H_1 + R - l}{E_{\text{осн}}} \right] = \sigma_2 \left[\frac{H_1}{E_{2p}} + \frac{H_1}{E_{\text{осн}}} \right]. \quad (10. 35)$$

При $E_{2p} = E_{\text{осн}}$ с учетом того, что $\sigma_2 = K_n \gamma_{\text{об}} H$, после ряда преобразований получаем:

$$\sigma_1 = K_n \gamma_{\text{об}} H \frac{\frac{H_1}{R} + \alpha'}{\frac{H_1}{R} + 1}. \quad (10. 36)$$

Окончательно с учетом (10. 14) из (10. 35) и (10. 36) имеем зависимость для определения коэффициента α_1 при жестком коллекторе

$$\alpha_1 = \frac{1 + \frac{E_{2p}}{E_{\text{осн}}}}{1 + \frac{E_{2p}}{E_{\text{осн}}} + \frac{2\alpha'}{R}} + \frac{l}{R} \frac{\left(1 - \frac{E_{2p}}{E_{\text{осн}}} \right) \left(1 + \frac{\alpha'}{\frac{H_1}{R}} \right)}{\left(1 + \frac{E_{2p}}{E_{\text{осн}}} + \frac{2\alpha'}{R} \right) \left(1 + \frac{H_1}{R} \right)}. \quad (10. 37)$$

Эта формула и используется в предыдущей статье, помещенной в настоящем сборнике — формула (15), где, H_1 обозначено через H_a .

§ 11. Учет различных условий опирания коллектора

В зависимости от условий опирания коллектора на основание в сильной степени изменяются изгибающие моменты в нижней его половине. Здесь следует различать случаи, когда коллектор сборный, но кольца устанавливаются на монолитный фундамент на растворе и наконец случай нормального опирания на предварительно хорошо спрофилированный грунт. Особо следует рассмотреть случаи, когда коллектор устанавливается на спрофилированный или неспрофилированный скальный и полускальный грунт. Естественно, что последний случай является наиболее тяжелым. Эти случаи опирания рассмотрены в предыдущей статье настоящего сборника.

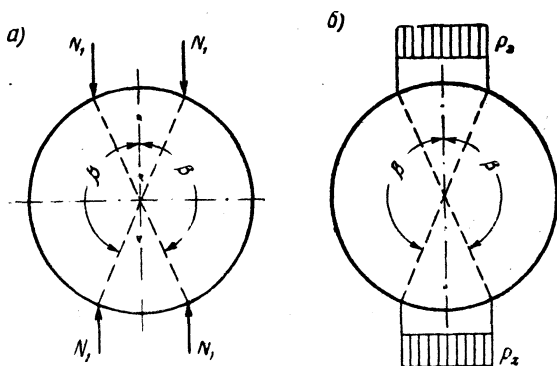


Рис. 7

Для рассмотрения их определены усилия в кольце или части его как статически неопределимой системе. Рассматриваемые случаи представлены на рис. 7. Кольцо предполагается нагруженным различными усилиями.

Для определения усилий в нижней части коллектора в том случае, когда коллектор сборный и кольца устанавливаются на монолитный фундамент используется схема, представленная на рис. 7, а. Предполагается, что коллектор опирается на фундамент в двух точках — крайних точках соприкосновения. Сила N_1 — равна нормаль-

ной силе, действующей в сечении $\theta = \frac{\pi}{2}$ за исключением давления воды $p_{\text{нейтр}}$.

В этом предположении и получена формула (26) предыдущей статьи для определения N_1 . Момент в нижней половине коллектора определяется по формуле (25) предыдущей статьи через N_1 (рис. 8). Коэффициент K_1 опре-

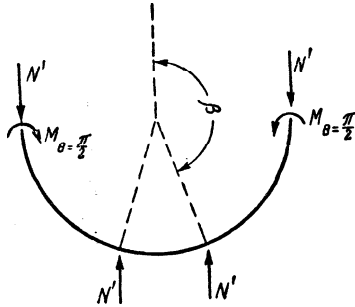


Рис. 8

деляется по формуле для кольца, нагруженного по схеме, соответствующей рис. 7. а [13]

$$M_{\theta > \beta} = -N_1 R \frac{1}{\pi} [2\cos \beta + (2\beta - \pi)\sin \beta] = N_1 R K_6. \quad (11. 1)$$

Коэффициенты K_1 даны в табл. 6 предыдущей статьи.

В значении силы N_1 давление воды исключено, так как считается, что вода окружает коллектор со всех сторон и в связи с этим момент в коллекторе от давления воды не возникает. В сечениях $\theta > \beta$ момент, определяющийся по формуле (11. 1) сохраняет свое значение, не изменяется. Исходя из значений коэффициента K_1 можно подобрать рациональное значение угла β . Если предположить, что коллектор опирается не в двух точках, а по всему сечению, то мы будем иметь другие значения момента. Однако, поскольку коллектор в месте опирания имеет утолщенное сечение за счет фундамента, можно пользоваться формулой (11. 1).

Переходим к случаям опирания коллектора на скальный или полускальный грунт, а также укладки на спрофилированное ложе на мягкий грунт.

Для того, чтобы решить эту задачу, следует прежде всего рассмотреть кольцо, нагруженное по схеме, представленной на рис. 7, б. В данном случае мы имеем однажды статически неопределимую систему.

После решения получающегося уравнения относительно неизвестного момента M_1 , имеем приведенный момент в любом сечении равным при интенсивности нагрузки p_x

$$\frac{M}{p_x R^2} \left(1 - \frac{\beta}{\pi}\right) \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \beta\right) - \frac{3}{4\pi} \sin 2\beta - \frac{1}{2} \sin^2 \beta - \bar{M}, \quad (11. 2)$$

где \bar{M} при $\theta \geq \beta$

$$\bar{M} = \frac{1}{2} \sin^2 \theta \quad (11. 3)$$

и при $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \beta$

$$\bar{M} = \sin \beta \left(\sin \theta - \frac{1}{2} \sin \beta \right). \quad (11. 4)$$

При расчете коллектора, опирающегося непосредственно на скальное основание, можно воспользоваться данным решением.

Для этого необходимо выразить p_x через N_1 . Из условия равновесия получаем, что

$$p_x = \frac{N_1}{R \sin \beta}. \quad (11. 5)$$

Из формул (11. 2) и (11. 3) и (11. 5) получаем решение, приведенное в п. 19 предыдущей статьи настоящего сборника. Формулы (30) и (31), данные там же, получены из приводящихся здесь формул, причем K_4 вычислен при $\theta = 180^\circ$, а K_5 при $\theta = \beta$. При $\beta = \frac{\pi}{2}$ из формул (11. 2) и (11. 3) получаем после небольших преобразований, что

$$\frac{M_{\beta = \frac{\pi}{2}}}{p_x R^2} = \frac{1}{4} \cos 2\theta. \quad (11. 6)$$

Переходим теперь к случаю нормального опирания коллектора. Если бы в этом случае воспользоваться формулами, выведенными для опирания коллектора на скалу, т. е. когда сжимаемость основания и хвостов резко различна, то тем самым мы не учли бы того обстоятельства, что коллектор опирается всей поверхностью нижнего полукольца, а не только той частью, которая покоится непосредственно на основании. Другими словами, если при устройстве коллектора на скальном или полускальном основании, можно, в запас

прочности, не учитывать сопротивления основания вертикальной осадке коллектора на участках $A'B$ и $D'E$ (рис. 9), а считать, что реактивные давления распределены лишь на участке BCD , то при устройстве коллектора на мягком основании такое предположение будет чрезмерным.

Поэтому следует учесть возникающее реактивное давление на всем участке $A'BCDE'$. Для этого следует ввести некоторые допущения. Во-первых предполагаем, что коллектор достаточно жесток и что при осадке на мягком основании все точки его смещаются на одинаковую величину. Во вторых, предполагаем, что вертикальные напряжения распределяются по одному и тому же закону по всем вертикалям, лежащим в пределах $A'A'' - E'E''$. Это предположение равносильно тому, что под краем фундамента и по его центру эпюра вертикальных напряжений одинакова. Далее ограничим сжимаемую зону линией $A''B''C''D''E''$, являющейся полуокружностью того же радиуса, что и коллектор.

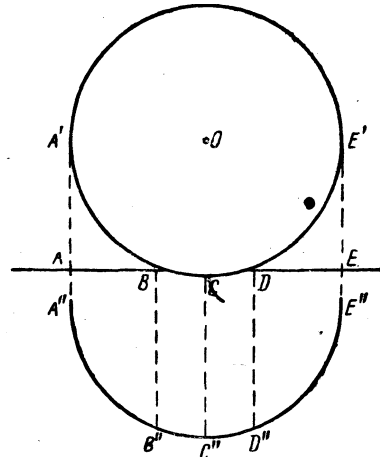


Рис. 9

Как указывалось в § 8, при $H = 5R$ мы имеем практическое затухание напряжений от включения коллектора, а в § 10 указывались максимальные величины зоны сжатия с применением гипотезы Винклера еще меньшие — см. табл. 11 или табл. 4 предыдущей статьи. Ограничим в данном случае активную зону также глубиной H_a , определяемой по табл. 4 предыдущей статьи настоящего сборника.

Модули деформации на участках $A'B$ и DE' и BCD различны. На крайних участках модуль $E_{прив}$, на среднем $E_{осн}$. Модуль $E_{прив}$, есть результирующий, получающийся путем приведения модуля деформации основания в пределах $ABB''A''$ и хвостов на участке $A'AB$ (в силу симметричности задачи рассматриваем в дальнейшем лишь половину).

Из условия равенства смещений получим, пользуясь законом Гука и упрощенной схемой, приведенной на рис. 10,

$$\frac{h_2}{E_{зр}} + \frac{H_a - h_2}{E_{осн}} = \frac{H_a}{F_{прив}}. \quad (11.7)$$

Полагая в запас $h_2 = R$, получим, после некоторых преобразований из формулы (11.7) формулу (29) предыдущей статьи, для вычисления приведенного модуля $E_{прив}$. Если взять $h_2 < R$, то мы будем получать для $E_{прив}$ более близкие значения к $E_{осн}$. Если считать, что на

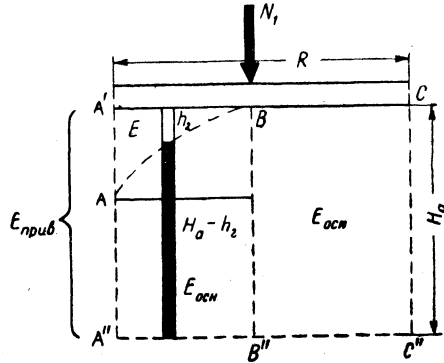


Рис. 10

участке BC (рис. 10) модуль деформации $E_{осн}$, а на участке $A'B$ — модуль $E_{прив}$, то пользуясь законом Гука и считая, что напряжения есть функция координаты x , то есть $\sigma_x(x) = \sigma_0 f(x)$, где σ_x — напряжение непосредственно под коллектором, получим из условия равенства смещений

$$\frac{\sigma_{A'B} f(x) A' A''}{E_{прив}} = \frac{\sigma_{BC} f(x) B B''}{E_{осн}} \quad (11.8)$$

или после сокращения

$$\frac{\sigma_{A'B}}{E_{прив}} = \frac{\sigma_{BC}}{E_{осн}}. \quad (11.9)$$

Причем

$$\sigma_{A'B} A'B + \sigma_{BC} BC = N_1, \quad (11.10)$$

где

$$BC = R \sin \beta; \quad A'B = R (1 - \sin \beta). \quad (11.11)$$

Систему уравнений (11.9) и (11.10) можно несколько преобразовать, если считать, что среднее напряжение

равно σ_0 . Тогда $\sigma_{A'B} = \sigma_0 + \Delta \sigma_{A'B}$ и $\sigma_{BC} = \sigma_0 + \Delta \sigma_{BC}$, причем $\sigma_0 R = N_1$. Подставляя эти соотношения в зависимость (11. 10), получим

$$\Delta \sigma_{A'B} (1 - \sin \beta) + \Delta \sigma_{BC} \sin \beta = 0 \quad (11. 12)$$

и из (11. 9) получим с учетом того, что $\sigma_0 R = N_1$

$$\frac{E_{прив}}{E_{осн}} \Delta \sigma_{BC} - \Delta \sigma_{A'B} = \frac{N_1}{R} \left(1 - \frac{E_{прив}}{E_{осн}} \right). \quad (11. 13)$$

Систему уравнений (11. 12) и (11. 13) остается решить относительно $\Delta \sigma_{BC}$ и $\Delta \sigma_{A'B}$. Решая, получим:

$$\Delta \sigma_{A'B} = - \Delta \sigma_{BC} \frac{\sin \beta}{1 - \sin \beta};$$

$$\Delta \sigma_{BC} = \frac{\frac{N_1}{R} \left(1 - \frac{E_{прив}}{E_{осн}} \right)}{\frac{E_{прив}}{E_{осн}} + \frac{\sin \beta}{1 - \sin \beta}}. \quad (11. 14)$$

Для того, чтобы вычислить усилия и моменты в коллекторе, можно воспользоваться уже полученным выше

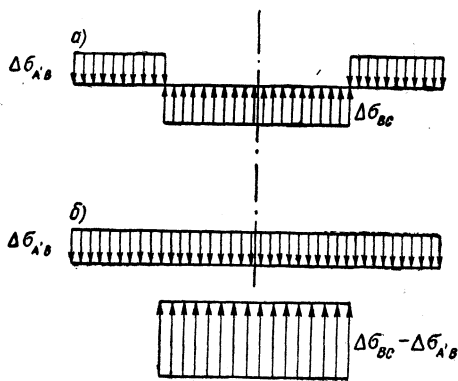


Рис 11.

решением задачи — формулами (11. 2) и (11. 3), придавая соответствующее значение p_x .

В нашем случае имеющуюся нагрузку, представленную на рис. 11, а можно разложить на две, представленные на рис. 11, б. Для верхней нагрузки используется формула

(11. 6) а для нижней—(11. 2) и (11. 3). Так как нагрузка— есть функция отношения модулей, что следует из формул (11. 14), то и моменты— есть функции отношения модулей.

Таким образом подсчитаны коэффициенты K_2 и K_3 в формулах (27) и (28) предыдущей статьи, значения которых приведены в табл. 6 той же статьи. Первое слагаемое в этих формулах— это величины моментов, действующих в случае опирания на грунт с тем же модулем деформации, что и хвосты, а второе— это корректирующий момент. Более строгое решение такой задачи представляет пока значительные трудности, а учитывая приближенность значений исходных характеристик, возможно пользоваться приближенным решением задач об определении усилий в коллекторе при разных случаях его опирания на основание.

§ 12. О расчете коллекторов, частично заглубленных в траншеи

При укладке в неглубокие траншеи практически снижение давления за счет трения грунта по стенкам (при заглублении в траншею меньшем, чем диаметр коллектора) не велико и в настоящем расчете этим снижением пренебрегается. Учет сжимаемости производится с использованием той же механической модели, что и ранее, то-есть модели, описанной в § 10. Только величина l в данном случае оказывается отрицательной (рис. 12). Коэффициент α_1

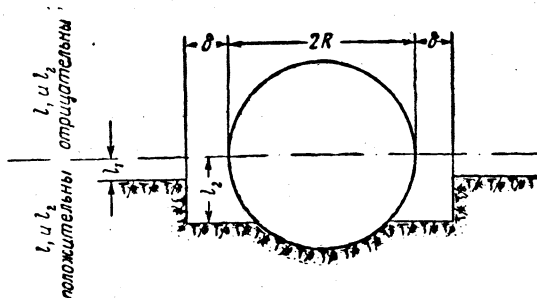


Рис. 10

вычисляется с учетом поправки, обычно вводимой при расчете труб, укладываемых в траншеи [1], когда давление на трубу определяется весом столба грунта, имеющего ширину равную диаметру трубы плюс ширина

пазухи. Таким образом получены формулы (42) и (43) предыдущей статьи, и там же в табл. 9 даются минимальные значения коэффициента α_1 с тем, чтобы произведение $\alpha_1 K_n$ было $\alpha_1 K_n \geq 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клейн Г. К., Расчет труб, уложенных в земле, Госстройиздат, 1957.
 2. Денисов Н. Я. и Жукова В. М., Поровое давление и сопротивление сдвигу глинистых пород, Информ. материалы № 3 лаборатории геотехники. Изд. ин-та ВОДГЕО, 1957.
 3. Малышев М. В., Уплотнение водонасыщенного грунта при постепенном увеличении толщины слоя, „Основания, фундаменты и механика грунтов“ № 3, 1959.
 4. Цытович Н. А., Механика грунтов, Госстройиздат, 1951.
 5. Малышев М. В., Определение давления водонасыщенного грунта на трубопроводы, „Гидротехническое строительство“, № 12, 1959.
 6. Сегаль А. М., Расчет замкнутого кольца как статически определимой системы, Сб. Исследования по теории сооружений, № 3, Госстройиздат, 1939.
 7. Иванов С. А., Плоская деформация тонкого кольца в упругой среде, Диссертация, 1954.
 8. Тимошенко С. П., Теория упругости, ОНТИ, 1937.
 9. Малышев М. В., Расчет давления грунтов на коллекторы круглого поперечного сечения, Сб. „Материалы для проектирования хранилищ отходов обогатительных фабрик“, Госстройиздат, 1962.
 10. Нормы и правила строительства в сейсмических районах СН—8—57, Госстройиздат, 1958.
 11. Строительные нормы и правила, часть II, Госстройиздат, 1954.
 12. Строительные нормы и правила, ч. II, раздел А, гл. 10, „Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования“, СНиП II-A. 10-62 г. 1962.
 13. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений, Расчетно-теоретический, Госстройиздат, 1960.
-