

# Определение давления водонасыщенного грунта на трубопроводы

Кандидат техн. наук М. В. Малышев

На практике могут встретиться три принципиально различных случая, определяющих выбор расчетной схемы для определения давления на трубопровод круглого сечения, находящийся в водонасыщенном грунте (рис. 1): а) укладка трубопровода в узкую траншею; б) укладка трубопровода в широкую траншею или насыпь и в) прокладка трубопровода закрытым способом.

Согласно теории предельного равновесия сыпучей среды [Л. 2] ширина зоны, в которой имеет место простейшее минимальное напряженное состояние (при этом вертикальные давления при отсутствии трубопровода соответствуют весу всего расположенного выше столба грунта), определяется выражением (рис. 2).

$$|x| \leq \frac{B}{2} - H \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  — угол внутреннего трения грунта.

При укладке трубопровода в насыпь вследствие роста насыпи происходит обжатие грунта,

находящегося сбоку от трубопровода [Л. 3]. Так как деформируемость трубопровода в целом обычно меньше деформируемости грунта, то приходится учитывать концентрацию напряжений у трубопровода, вследствие которой приходящаяся на него нагрузка оказывается в этом случае большей, чем собственный вес столба грунта, лежащего непосредственно выше трубопровода.

Ниже мы рассмотрим случай, соответствующий укладке трубопровода в широкую траншею или насыпь, простирающуюся на значительное расстояние в обе стороны от трубопровода.

На глубине  $H$  от поверхности (рис. 2) вертикальное давление  $P$  будет складываться из давления от веса скелета столба грунта  $P_{ск}$  и воды  $P_v$ . Если положение уровня воды, насыщающей поры грунта, не совпадает с положением дневной поверхности, то вес грунта, находящегося выше горизонта воды, опреде-

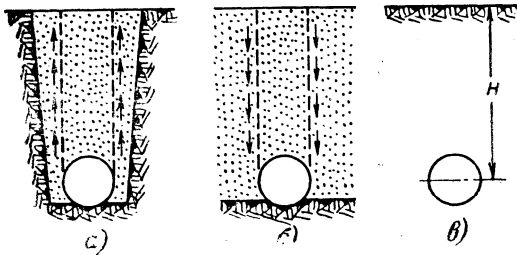


Рис. 1.

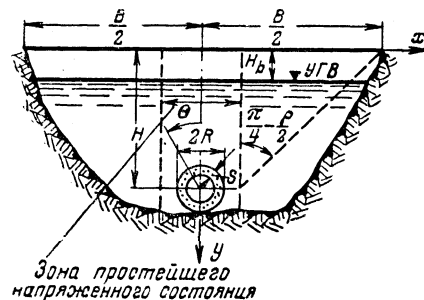


Рис. 2.

ляется с учетом его влажности  $w$ . Таким образом,

$$P_{\text{ск}} = \Delta_{\text{ск}}(1-n)H + w\Delta_{\text{ск}}(1-n)H_{\text{в}} = \Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + wH_{\text{в}}), \quad (2)$$

где  $\Delta_{\text{ск}}$  — удельный вес скелета грунта;  
 $n$  — его пористость.

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

$$P_{\text{в}} = \Delta_{\text{в}}n(H - H_{\text{в}}), \quad (3)$$

где  $\Delta_{\text{в}}$  — удельный вес воды.

Таким образом, суммарное вертикальное давление  $P$  на глубине  $H$  от веса столба, расположенного выше грунта, будет

$$P = P_{\text{ск}} + P_{\text{в}} = \Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + wH_{\text{в}}) + \Delta_{\text{в}}n(H - H_{\text{в}}). \quad (4)$$

Боковое давление грунта на ограждающую поверхность  $q$  выражается следующей зависимостью:

$$q = \xi_0 P_{\text{эфф}} + P_{\text{нейтр}}, \quad (5)$$

где  $\xi_0$  — коэффициент бокового давления скелета грунта, определяемый экспериментально.

Эффективное давление  $P_{\text{эфф}}$  — давление в скелете грунта, которое исчисляется с учетом его взвешивания в воде. Оно равно

$$P_{\text{эфф}} = \Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + wH_{\text{в}}) - \Delta_{\text{в}}(1-n)(H - H_{\text{в}}) - \Delta_{\text{в}}h. \quad (6)$$

Нейтральное давление — давление в воде, насыщающей грунт. Оно равно

$$P_{\text{нейтр}} = \Delta_{\text{в}}(H - H_{\text{в}}) + \Delta_{\text{в}}h. \quad (7)$$

В формулах (6) и (7)  $h$  — избыточный против гидростатического напор, возникающий вследствие незавершенности процесса консолидации, а  $\Delta_{\text{в}}h$  — так называемое поровое давление [Л. 4].

Подставляя (6) и (7) в (5), получим выражение величины бокового давления:

$$q = \xi_0 [\Delta_{\text{ск}}(1-n)(H + wH_{\text{в}}) - \Delta_{\text{в}}(1-n)(H - wH_{\text{в}}) - \Delta_{\text{в}}h] + \Delta_{\text{в}}(H - H_{\text{в}} + h). \quad (8)$$

Величину  $h$  тогда целесообразно учитывать при расчетах, применяя модель грунтовой массы [Л. 1], когда коэффициент фильтрации грунта достаточно мал и определение давления производится для временного трубопровода или когда материал, из которого он изготовлен (например, железобетон), упрочняется во времени.

Введем в расчет величину условного коэффициента бокового давления  $\xi$ , определяемого следующим образом:

$$\xi = \frac{q}{P}, \quad (9)$$

где  $q$  берется согласно (8), а  $P$  — согласно (4).

Совершенно очевидно, что  $\xi > \xi_0$  и лишь в случае отсутствия воды в грунте  $\xi = \xi_0$ . Чем ближе величина  $\xi$  к единице, тем в более хороших в статическом отношении условиях работает трубопровод, тем более можно облегчить его сечение. Из формулы (8) следует, что чем больше разность  $H - H_{\text{в}}$ , а также  $h$ , тем больше  $q$  и, следовательно,  $\xi$ . Для определения величины  $h$  целесообразно использовать решение одномерной задачи об уплотнении постепенно увеличивающегося по своей мощности слоя водонасыщенного грунта [Л. 5]. Используя решение одномерной задачи, мы предполагаем тем самым, что отфильтрование воды, насыщающей поры грунта, происходит только вертикально вверх.

В силу того что использование модели нелинейно деформируемой сплошной среды для задачи о распределении напряжений в грунтовом массиве пока не представляется возможным в силу значительных трудностей математического характера, мы сочли возможным для решения поставленной задачи применить теорию упругости.

В данном случае рассматривается полуплоскость, находящаяся под действием собственного веса, на некоторой глубине  $H$  от границы которой вделана относительно тонкая упругая облицовка круглого поперечного сечения. Под действием собственного веса грунта эта облицовка деформируется, причём из совместной работы массива грунта и облицовки получаем необходимые пограничные условия, заключающиеся в приравнивании нормальных и касательных напряжений и перемещений на внешней поверхности облицовки.

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 и затем решения канонической системы уравнений деформаций кольца, воспользоваться полученным в замкнутом виде решением для кольца при действии нормальной и касательной нагрузок, которые могут быть представлены рядом Фурье в функции полярного угла  $\theta$ , отсчитываемого от вертикальной оси (рис. 2). Такое решение было получено для кольца

А. И. Сегалем [Л. 6] и использовано в диссертации для решения задачи о совместной работе упругих кольца и бесконечной пластинки С. А. Ивановым.

В нашем случае радиальная нормальная нагрузка на кольцо  $\sigma$  и касательная  $\tau$  представляются следующими выражениями:

$$\sigma = P_0 + P_1 \cos \theta + P_2 \cos 2\theta + P_3 \cos 3\theta; \quad (10)$$

$$\tau = -P_1 \sin \theta + t_2 \sin 2\theta + P_3 \sin 3\theta. \quad (11)$$

В соответствии с этим, если радиус кольца  $R$ , то изгибающие моменты  $M$  и нормальные силы  $N$  равны:

$$M = \frac{R^2}{6} [(2P_2 + t_2) \cos 2\theta + P_3 \cos 3\theta]; \quad (12)$$

$$N = \frac{R}{6} [2(P_2 + 2t_2) \cos 2\theta + 3P_3 \cos 3\theta - 6P_0]. \quad (13)$$

Соответственно радиальные  $u$  и тангенциальные  $v$  перемещения будут равны:

$$u = \frac{P_0 R^2}{E_0 S} + \frac{R^4 (1 - \mu_0^2)}{E_0 S^3} \frac{4}{3} \left( P_2 + \frac{t_2}{2} \right) \times \left[ \cos 2\theta + \frac{1}{4} P_3 \cos 3\theta \right];$$

$$v = \frac{2R^4 (1 - \mu_0^2)}{E_0 S^3} \left[ \frac{1}{3} (P_2 + 2t_2) \sin 2\theta + \frac{1}{8} P_3 \sin 3\theta \right]. \quad (14)$$

В формулах  $E_0$  — модуль упругости и  $\mu_0$  — коэффициент Пуассона материала обделки;  $S$  — толщина обделки;  $\xi$  — коэффициент бокового давления.

Производя приравнивание величин напряжений и перемещений на контуре упругой обделки и полуплоскости, для которой они определяются формулами теории упругости [Л. 8, стр. 129], мы получим следующие выражения для коэффициентов, входящих в формулы (10) — (14):

$$P_0 = \frac{1 + \xi}{1 + \xi_0 + \alpha \left( \frac{S}{R} \right)^2} P; \quad (15)$$

$$P_1 = -\frac{PR}{2H};$$

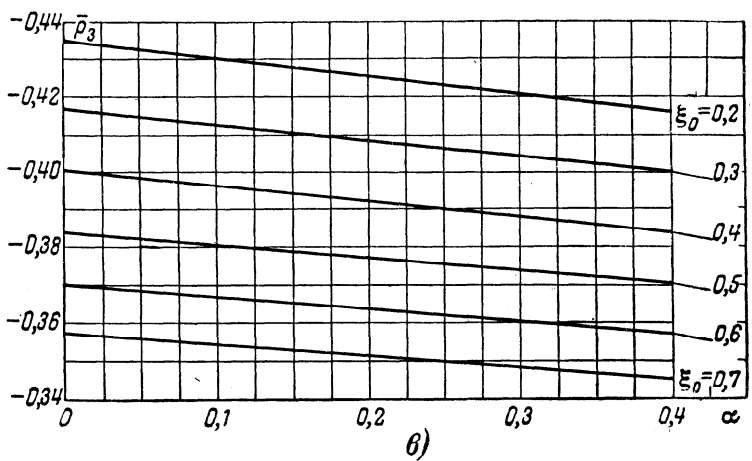
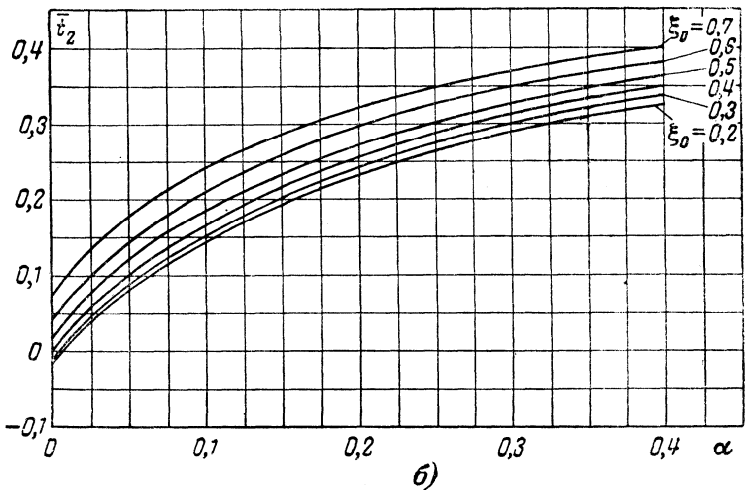
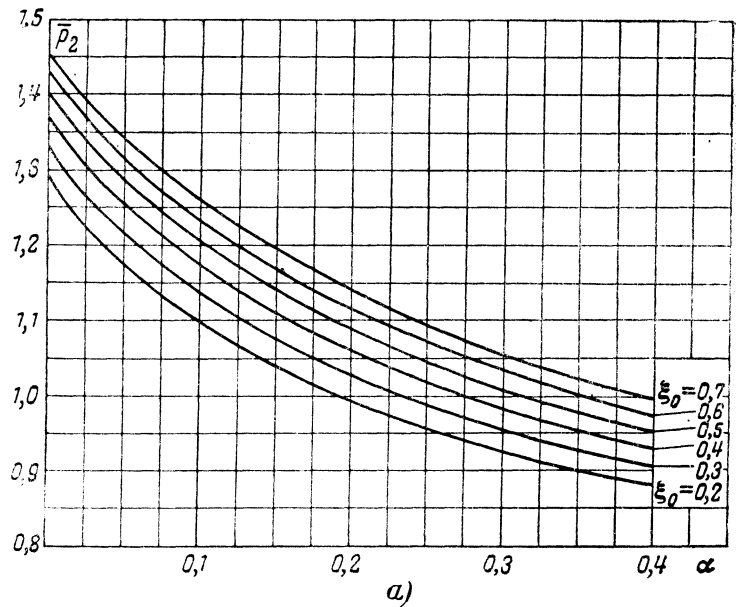


Рис. 3.

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= (1 - \xi) \bar{P}_2 P; \\ P_3 &= (1 - \xi) \bar{P}_3 \frac{R}{H} P; \\ t_2 &= (1 - \xi) \bar{t}_2 P; \\ a &= \frac{R^3 E_1 (1 - \mu_0^2)}{S^3 E_0}, \end{aligned} \right\} (15)$$

где  $\bar{P}_2$ ,  $\bar{t}_2$ ,  $\bar{P}_3$  — коэффициенты, берущиеся по графикам (рис. 3 а — в).

Из формулы (15) видно, что члены с коэффициентами  $P_1$  и  $P_3$  могут оказать существенное влияние на результаты расчета при  $H$ , близких к  $R$ . С увеличением отношения  $\frac{H}{R}$  влияние их падает, и поэтому практически при  $\frac{H}{R} > 5$  ими можно пренебрегать. Необходимо отметить также, что полученное решение является приближенным в том смысле, что на свободной поверхности грунта вместо отсутствия напряжений мы получаем их значения, отличающиеся от нуля. Однако расчетами установлено, что с погрешностью, не превышающей 4% при  $H > 5R$  и 1% при  $H > 10R$ , можно принять, что данное решение соответствует решению для полуплоскости, у которой на границе полностью отсутствуют напряжения.

В выражениях (15)  $P$  берется согласно (4),  $\xi$  — по (9). В приведенных выше формулах не учитываются влияние на трубопровод веса воды, транспортирующей по нему, а также собственный вес трубопровода. Это легко можно сделать путем введения дополнительных членов непосредственно в зависимости (12) и (13). Представляет интерес также вопрос об учете характера опирания трубопровода на основание. Выше был рассмотрен случай, когда трубопровод круглого поперечного сечения закладывается в однородный грунт на спрофилированное ложе. Если имеется трубопровод с лотковым опиранием, то его также можно рассчитать с некоторым приближением с помощью приведенных выше формул. Однако в этом случае необходимо пользоваться не окончательными формулами для  $M$  и  $N$  [(12) и (13)], а формулами для определения давления на трубопровод (10) и (11), а затем, пользуясь методами строительной механики, на эти давления уже рассчитывать впоследствии сам трубопровод с учетом его переменной жесткости.

**Пример расчета.** Требуется произвести расчет временного коллектора, подлежащего эксплуатации в течение 12 лет, при равномерном намыве сверх него толщи грунта мощностью 70 м в течение 10 лет. Коэффициент фильтрации  $K = 1 \cdot 10^{-6}$  см/сек. Горизонт воды,

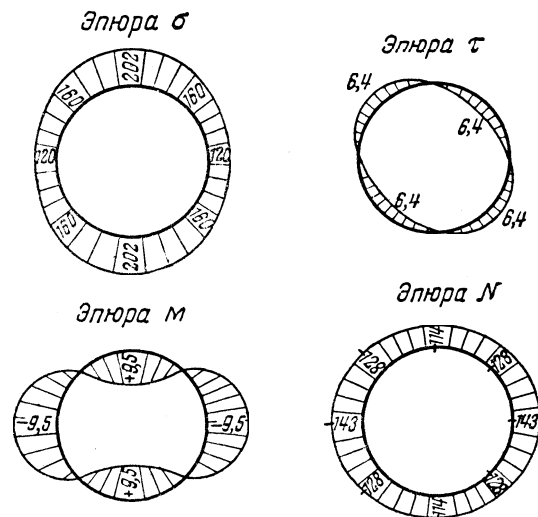


Рис. 4.

насыщающей грунт, совпадает со свободной поверхностью ( $H_B = 0$ ). Удельный вес скелета грунта  $\Delta_{ск} = 2,7$  т/м<sup>3</sup>; коэффициент бокового давления скелета, определенный экспериментально,  $\xi_0 = 0,4$ ; модуль деформации грунта  $E_1 = 210$  кг/см<sup>2</sup>; наружный диаметр коллектора  $2R = 1,8$  м; толщина стенки 20 см; бетон — марки 150 с модулем упругости  $E_0 = 165\,000$  кг/см<sup>2</sup> и коэффициент Пуассона  $\mu_0 = 0,17$ . Пористость грунта  $n = 48\%$ ; коэффициент уплотнения  $a = 0,0065$  см<sup>2</sup>/кг. Расчетным будет являться конечный период, т. е. 12-й год, так как при этом мы будем иметь максимальные значения вертикальной нагрузки при наименьшем боковом давлении. По формуле (4)  $P = 132$  т/м<sup>2</sup> и по (8) при величине  $h$ , определенной по [Л. 5]  $h = 3,9$  м;  $q = 97,3$  т/м<sup>2</sup>.

По (9)  $\xi = 0,73$ . Производя далее вычисление  $a$ , получаем:  $a = 0,112$  и, следовательно,  $\bar{P}_2 = 1,155$ ;  $\bar{t}_2 = 0,180$ ;  $\bar{P}_3 = -0,396$ .

По формулам (5) вычисляем далее:  $P_0 = 160,5$  т/м<sup>2</sup>;  $P_1 = -0,8$  т/м<sup>2</sup>;  $P_2 = 41,1$  т/м<sup>2</sup>;  $t_2 = 6,4$  т/м<sup>2</sup>;  $P_3 = -0,2$  т/м<sup>2</sup>. Подставляя эти величины в (12), получим при  $\theta = 0$   $M_{\max} = 9,4$  т/пог. м и  $N = -114,6$  т/пог. м. При этом моменты и нормальные силы вычислены для среднего радиуса кольца  $R = 0,8$  м. Необходимый процент армирования при действующих усилиях составляет для сжатой арматуры 1,15% и для растянутой 0,2%.

В данном случае за счет концентрации напряжений вертикальные усилия увеличиваются в 1,5 раза, а боковые в 1,25 раза. Полученные эпюры давлений  $\sigma$  и  $\tau$  по контуру кольца, а также эпюры  $M$  и  $N$  приведены на рис. 4.

**Выводы.** 1. При определении давления грунтов на трубопроводы следует учитывать влияние концентрации напряжений у трубопровода, в связи с чем вертикальное давление окажется в большинстве случаев не только не меньшим, а даже большим, чем вес столба грунта, расположенного над ним.

2. При определении вертикального и бокового давлений следует учитывать водонасыщенность грунта.

3. В случаях временных сооружений при наличии грунтов со слабой водоотдачей целе-

целесообразно учитывать наличие избыточного напора. Последнее можно осуществить, используя модель грунтовой массы.

4. Для улучшения статической работы трубопроводов их целесообразно замывать наиболее тонкозернистыми фракциями.

#### Литература

1. В. А. Флорин, Теория уплотнения земляных масс, Стройиздат, 1948.

2. В. В. Соколовский, Статика сыпучей среды, Гостехиздат, 1954.

3. Г. К. Клейн, Расчет труб, уложенных в земле, Госстройиздат, 1957.

4. Н. Я. Денисов и В. М. Жукова, Поровое давление и сопротивление сдвигу глинистых пород, Информационные материалы № 3 лаборатории геотехники, Издание ин-та «ВОДГЕО», 1957.

5. М. В. Малышев, Уплотнение водонасыщенного грунта при постепенном увеличении толщины слоя, «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1959, № 3.

6. А. М. Сегаль, Расчет замкнутого кольца как статически определимой системы. Сб. Исследования по теории сооружений, № 3, Госстройиздат, 1939.

7. С. П. Тимошенко, Теория упругости, ОНТИ, 1934.