

УДК 658.2

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ОБЛИЦОВКУ ТУННЕЛЯ ГОРНОПРОХОДЧЕСКОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА БОЛЬШОЙ ГЛУБИНЕ

Ц. Янь\*, Ч. Чзан\*\*, В. Ву\*, Я. Чзан\*, Т. Ма\*\*\*

\* Юго-Западный университет Цзяотун, 610031 Чэнду, Китай

\*\* Хьюстонский университет, TX 77204 Хьюстон, США

\*\*\* Китайская железнодорожная компания округа Эрюан, 610031 Чэнду, Китай

E-mails: yanqixiang@home.swjtu.edu.cn, zhangchuan@my.swjtu.edu.cn,

wuwang@my.swjtu.edu.cn, yanyang.zhang@swjtu.edu.cn, tingtingmaswjtu@163.com

Построено аналитическое решение осесимметричной упругой задачи об определении напряженно-деформированного состояния трубы, находящейся под действием горного давления, с учетом фильтрационных сил. С использованием построенного решения определено напряжение, действующее на облицовку туннеля горнопроходческой машины при наличии контролируемого дренажа. На основе этого решения установлена связь между проницаемостью горного массива и дренажным стоком, а также зависимость дренажного стока от модуля упругости горной породы. Проведено сравнение результатов, полученных на основе решения с учетом фильтрационных сил и решения без учета фильтрационных сил.

Ключевые слова: облицовка туннеля, горнопроходческая машина, подземные воды, контролируемый дренаж, внешняя нагрузка, фильтрационные силы, упругое решение.

DOI: 10.15372/PMTF20190121

**Введение.** Как правило, находящиеся на большой глубине под землей длинные туннели находятся ниже уровня грунтовых вод, поэтому действующее на такие туннели большое гидростатическое давление может приводить к просачиванию в них грунтовых вод и разрушению облицовки [1]. Существует три метода борьбы с грунтовыми водами: полный дренаж, полная герметизация и контролируемый дренаж (дренаж с использованием контролирующих устройств) [2]. Однако применение метода полного дренажа может привести к возникновению экологических проблем [3]. При полной герметизации на облицовку туннеля действует большое гидростатическое давление, что приводит к ее быстрому износу, в результате чего возникает угроза просачивания воды. Использование метода полной герметизации также создает сложности при проектировании облицовки туннелепроходческой машины (ТПМ) [4]. Таким образом, следует применять метод контролируемого дренажа, позволяющий уменьшить экологические риски [5]. Однако в случае туннелей, расположенных на большой глубине, использование обычных способов дренажа существенно

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 51678500) и Китайской железнодорожной корпорации (грант № 2014G004-H).

© Янь Ц., Чзан Ч., Ву В., Чзан Я., Ма Т., 2019

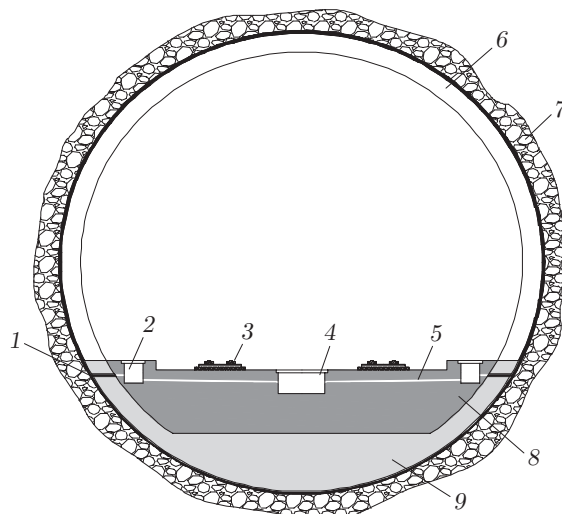


Рис. 1. Схема дренажной системы сегментной облицовки:

1 — дренажная трубка, 2 — боковая канавка, 3 — балластный слой, 4 — центральная канавка, 5 — разделительная труба (градиент равен 2 ‰), 6 — монолитная бетонная облицовка, 7 — горная порода, 8 — бетонный сегмент, 9 — предварительно изготовленный инвертированный сегмент

затруднено, поскольку периферийная дренажная система не работает. Поэтому в случае глубоких туннелей необходимы специальные способы дренажа. Одним из таких способов является использование контактной дренажной системы, которая была успешно применена при строительстве железнодорожного туннеля Большой Бельт (Storebaelt) в Скандинавии [6]. В ряде работ выполнено численное моделирование контактной дренажной системы (см., например, [7]). В работах [8, 9] предложена эффективная конструкция дренажной системы облицовки туннеля: на сегментной облицовке располагаются выходные отверстия для уменьшения и контроля большого гидростатического давления. Экспериментально и путем численного моделирования изучено влияние разгружающего потока на величину гидростатического давления при такой системе дренажа. На рис. 1 показана схема дренажной системы сегментной облицовки туннеля ТПМ.

Для ТПМ, находящихся под действием высокого гидростатического давления, целесообразно использовать метод контролируемого дренажа.

Внешние силы, действующие на облицовку туннеля ТПМ, представляют собой сумму эффективных напряжений и порового давления. Аналитическое выражение для порового давления в случае установившейся фильтрации в окрестности туннелей, расположенных на большой глубине под землей, получено ранее. В [10] методом изображений получена формула для порового давления в случае кругового туннеля, находящегося под действием большого гидростатического давления.

В [11] исследовано напряженное состояние в облицовке ТПМ при различных режимах фильтрации. В работе [12] с использованием отображения Мебиуса и преобразования Фурье получены аналитические решения задач фильтрации. В [13] с помощью конформного отображения найдено аналитическое решение задачи о фильтрации в дренированный круговой туннель, расположенный в полубесконечном водоносном слое, при краевых условиях двух типов. В указанных выше работах получены аналитические выражения для порового давления, при этом влияние эффективных напряжений на напряженное состояние облицовки не учитывалось. В [14] найдены аналитические и полуаналитические решения задачи о распределении перемещений и напряжений в окрестности кругового туннеля, рас-

положенного в однородном упругопластическом горном массиве. При этом влияние напора фильтрационного потока на эффективное напряжение не учитывалось.

Представляет интерес изучение напряженного состояния в облицовках туннеля ТПМ с учетом действия как горного давления, так и фильтрационных сил.

В данной работе с использованием результатов исследований, представленных в работах [8, 9], получено аналитическое решение упругой задачи о напряженном состоянии в дренированной облицовке туннеля ТПМ с учетом действия горного давления и фильтрационных сил. Фильтрационные силы рассматриваются как массовые силы. На основе полученного решения исследовано влияние расхода потока и внешних сил на напряженное состояние облицовки. Проведено сравнение полученного решения с приближенным решением, в котором внешнее удаленное поле рассматривается в качестве нагрузки, приложенной на границе области.

**1. Аналитическое решение, учитывающее фильтрационные силы.** Ниже приводится аналитическое решение исследуемой задачи.

1.1. *Основные предположения.* Аналитическое решение задачи строится при следующих предположениях.

1. Материалы окружающей горной породы и облицовки являются однородными изотропными и упругими.

2. Рассматривается осесимметричная задача о плоской деформации (все искомые величины не зависят от полярного угла  $\theta$ , касательные напряжения  $\tau_{r\theta}$ , деформации сдвига  $\gamma_{r\theta}$  и смещение в окружном направлении  $\mu_\theta$  равны нулю).

3. Жидкость является несжимаемой и справедлив закон Дарси. Течение считается установившимся. Коэффициент проницаемости окружающей горной породы не зависит от направления. Фильтрационный поток имеет радиальное направление.

4. Диаметр туннеля ТПМ пренебрежимо мал по сравнению с глубиной залегания туннеля, поэтому принимается осесимметричное распределение давления в окрестности облицовки.

5. Облицовка является непроницаемой, и гидростатическое давление внутри туннеля равно нулю.

1.2. *Аналитическое выражение для сил фильтрации.* На рис. 2 показана модель фильтрации, используемая при построении аналитического решения задачи о распределении фильтрационных сил в окружающей горной породе ( $r_a$  — внутренний радиус облицовки,  $r_b$  — внешний радиус облицовки,  $r_c$  — радиус удаленного поля (радиус области, в которой строится решение),  $h_b$ ,  $h_c$  — гидростатическое давление на облицовке и границе

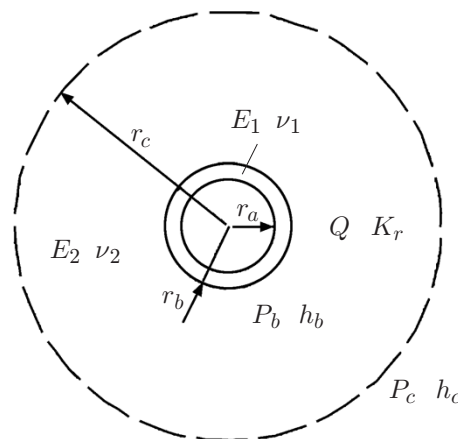


Рис. 2. Модель фильтрации в грунте

удаленного поля соответственно,  $Q$  — дренажный сток через выходные отверстия,  $K_r$  — проницаемость горной породы,  $P_b$  — эффективное напряжение на границе между облицовкой и горной породой,  $P_c$  — эффективное напряжение на внешней границе удаленного поля,  $E_1, \nu_1$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона сегментной облицовки,  $E_2, \nu_2$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона горной породы).

Дифференциальное уравнение и краевые условия осесимметричной задачи установившейся фильтрации соответственно имеют вид [15]

$$\frac{\partial^2 H(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H(r)}{\partial r} = 0; \quad (1)$$

$$Q(r)|_{r=r_b} = Q, \quad H(r)|_{r=r_c} = h_c. \quad (2)$$

Решение задачи (1), (2) записывается в следующем виде:

$$h_b = h_c + \frac{Q}{2\pi K_r} \operatorname{Ln} \left( \frac{r_b}{r_c} \right); \quad (3)$$

$$H(r) = h_c + \frac{Q}{2\pi K_r} \operatorname{Ln} \left( \frac{r}{r_c} \right). \quad (4)$$

Дифференцируя (4), получаем

$$F_r = -\gamma_w \frac{d(\xi h)}{dr} = -\gamma_w \xi \left( \frac{Q}{2\pi K_r} \frac{r_c}{r} \frac{1}{r_c} \right) = -\frac{\gamma_w \xi Q}{2\pi K_r r}, \quad (5)$$

где  $F_r$  — массовые силы фильтрационного потока;  $\xi$  — эффективный коэффициент порового давления;  $\gamma_w$  — удельный вес воды.

1.3. *Аналитическое решение задачи о распределении напряжений и смещений.* Рассматривая фильтрационные силы в качестве массовых, дифференциальные уравнения равновесия в осесимметричной задаче о плоской деформации можно записать в виде

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{\gamma_w \xi Q}{2\pi K_r r} = 0, \quad (6)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta$  — радиальное и окружное напряжения в горном массиве соответственно. При этом соответствующие деформации определяются по формулам

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U_r}{\partial r} = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta), \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r}{r} = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r).$$

Краевые условия имеют следующий вид:

$$(\sigma_r)|_{r=r_b} = -P_b, \quad (\sigma_r)|_{r=r_c} = -P_c. \quad (7)$$

Сформулированная краевая задача может быть решена с использованием функции напряжения Эри [16]. В соответствии с этим решением выражение для радиального смещения в горном массиве на внешней границе облицовки  $U_r|_{r=r_b}$  имеет вид

$$U_r|_{r=r_b} = \frac{-A_1 + A_2 r_c^2 / r_b^2}{r_c^2 / r_b^2 - 1} r_b + \frac{(A_1 - A_2) r_c^2}{(2\nu_2 - 1)(r_c^2 / r_b^2 - 1)} \frac{1}{r_b} + \frac{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)}{E_2(1 - \nu_2)} \frac{\gamma_w \xi Q}{4\pi K_r} r_b \operatorname{Ln} r_b, \quad (8)$$

где

$$A_1 = \frac{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)}{E_2} \left[ -\frac{\gamma_w \xi Q}{4\pi K_r} \left( \frac{\operatorname{Ln} r_b}{1 - \nu_2} + 1 \right) - P_b \right],$$

$$A_2 = \frac{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)}{E_2} \left[ -\frac{\gamma_w \xi Q}{4\pi K_r} \left( \frac{\operatorname{Ln} r_c}{1 - \nu_2} + 1 \right) - P_c \right].$$

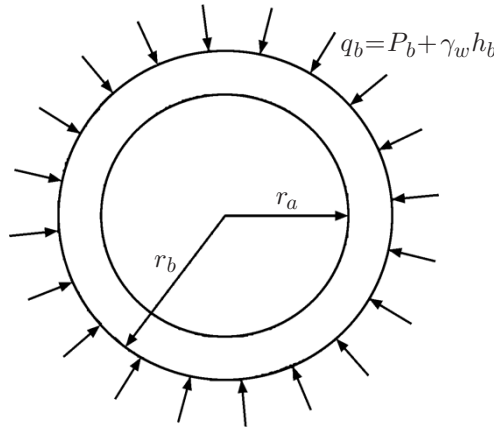


Рис. 3. Схема нагружения облицовки

Смещение  $U_r$  зависит от величин  $Q$ ,  $P_c$  и неизвестного давления  $P_b$ . Выражение для радиального смещения облицовки  $u_r$  при  $r = r_b$  можно получить, используя решение упругой задачи о деформировании тонкостенного цилиндра под действием внешнего равномерного осесимметричного давления (рис. 3):

$$u_r|_{r=r_b} = \frac{r_b}{E'_1(r_b^2 - r_a^2)} \left[ -r_b^2(1 - \nu'_1)q_b - r_a^2(1 + \nu'_1)q_b \right] = \frac{-r_b[r_b^2(1 - \nu'_1) + r_a^2(1 + \nu'_1)]}{E'_1(r_b^2 - r_a^2)} \left[ P_b + \gamma_w \left( h_c - \frac{Q}{2\pi K_r} \text{Ln} \frac{r_c}{r_b} \right) \right]. \quad (9)$$

Здесь  $E'_1 = E_1/(1 - \nu_1^2)$ ;  $\nu'_1 = \nu_1/(1 - \nu_1)$ .

Предположим, что между облицовкой и горным массивом имеет место жесткое сцепление. В этом случае

$$U_r|_{r=r_b} = u_r|_{r=r_b}. \quad (10)$$

Подставляя (8), (9) в равенство (10), получаем выражение для эффективного напряжения на границе между облицовкой и горным массивом

$$P_b = \frac{K_1 + K_2 K_3 K_4 + K_5 K_6 + K_7 K_5 K_8}{K_2 K_3 - K_7 K_5}, \quad (11)$$

где

$$K_1 = (2\nu_2 - 2)A_2 r_c^2, \quad K_2 = r_c^2 - (2\nu_2 - 1)r_b^2, \quad K_3 = (1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)/E_2, \\ K_4 = -\frac{\gamma_w \xi Q}{4\pi K_r} \left( \frac{\text{Ln} r_b}{1 - \nu_2} + 1 \right), \quad K_5 = (2\nu_2 - 1)(r_c^2 - r_b^2), \quad K_6 = \frac{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)}{E_2(1 - \nu_2)} \frac{\gamma_w \xi Q}{4\pi K_r} \text{Ln} r_b, \\ K_7 = \frac{[r_a^2 + r_b^2(1 - 2\nu_1)](1 + \nu_1)}{E_1(r_b^2 - r_a^2)}, \quad K_8 = \gamma_w h_c - \frac{\gamma_w Q}{2\pi K_r} \text{Ln} \frac{r_c}{r_b}.$$

Как известно, радиальное контактное напряжение на границе между облицовкой и горным массивом есть сумма эффективного напряжения и порового давления:

$$q_b = P_b + \gamma_w h_b. \quad (12)$$

## 2. Приближенное аналитическое решение без учета фильтрационных сил.

Если не учитывать фильтрационные силы, действующие в горном массиве, то поставленную задачу можно упростить, а именно решить задачу о напряженно-деформированном

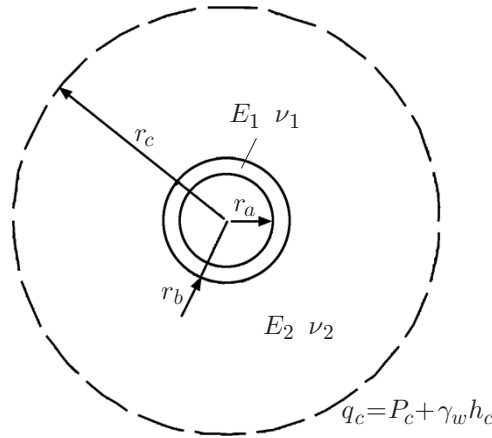


Рис. 4. Схема нагружения облицовки без учета фильтрационных сил

состоянии толстостенного цилиндра, находящегося под действием равномерно распределенных радиальных давлений, приложенных на внутренней ( $q_b$ ) и внешней ( $q_c$ ) поверхностях цилиндра соответственно (рис. 4). В предположении, что касательные напряжения на границе между облицовкой и горной породой равны нулю, выражения для напряжений и смещения в облицовке имеют вид

$$\sigma'_r = \frac{A'}{r^2} + 2D', \quad \sigma'_\theta = -\frac{A'}{r^2} + 2D', \quad u_r = \frac{1}{E'_1} \left[ -(1 + \nu'_1) \frac{A'}{r} + 2(1 - \nu'_1) D' r \right],$$

где  $A'$ ,  $D'$  — константы, подлежащие определению;  $\sigma'_r$ ,  $\sigma'_\theta$  — радиальное и окружное напряжения;  $u_r$  — радиальное смещение облицовки. В задаче о плоской деформации выполняются соотношения

$$\begin{aligned} E'_1 &= E_1 / (1 - \nu_1^2), & \nu'_1 &= \nu_1 / (1 - \nu_1); \\ (\sigma'_r)|_{r=r_b} &= -q_b, & (\sigma'_r)|_{r=r_a} &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом краевых условий (13) получаем

$$A' = \frac{r_a^2 r_b^2 q_b}{r_b^2 - r_a^2}, \quad D' = \frac{r_b^2 q_b}{2(r_a^2 - r_b^2)}.$$

Выражения для напряжений и смещений в горном массиве имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_r &= A/r^2 + 2D, & \sigma_\theta &= -A/r^2 + 2D; \\ U_r &= [-(1 + \nu'_2) A/r + 2(1 - \nu'_2) D r] / E'_2, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $A$ ,  $D$  — константы, подлежащие определению;  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  — радиальное и окружное напряжения;  $U_r$  — смещение облицовки. В задаче о плоской деформации выполняются соотношения

$$E'_2 = E_2 / (1 - \nu_2^2), \quad \nu'_2 = \nu_2 / (1 - \nu_2).$$

Константы в выражениях (14) определяются из краевых условий

$$(\sigma_r)|_{r=r_c} = -q_c, \quad (\sigma_r)|_{r=r_b} = -q_b.$$

С учетом краевых условий (14) получаем

$$A = \frac{r_b^2 r_c^2 (q_b - q_c)}{r_b^2 - r_c^2}, \quad D = \frac{r_c^2 q_c - r_b^2 q_b}{2(r_b^2 - r_c^2)}. \quad (15)$$

На контактной границе между горным массивом и облицовкой выполняется условие

$$(U_r)|_{r=r_b} = (u_r)|_{r=r_b}.$$

С использованием этого условия определяется давление на внешней поверхности облицовки

$$q_b = \frac{2dq_c r_c^2 N_3}{N_1 + dN_2 N_3},$$

где

$$d = \frac{r_b^2 - r_a^2}{r_c^2 - r_b^2}, \quad N_1 = \frac{r_a^2 + r_b^2(1 - 2\nu_1)}{1 - \nu_1}, \quad N_2 = \frac{r_c^2 + r_b^2(1 - 2\nu_2)}{1 - \nu_2}, \quad N_3 = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}.$$

**3. Анализ результатов исследования.** Ниже на основе построенного решения анализируется зависимость внешних напряжений, действующих на облицовку, от водопроницаемости облицовки. Полученные результаты сравниваются с результатами аналитического решения, найденного без учета фильтрационных сил. Анализ результатов проводится для туннеля, имеющего следующие механические, геометрические и гидравлические параметры:  $r_a = 4,65$  м,  $r_b = 5,05$  м,  $r_c = 30,0$  м,  $\nu_1 = 0,20$ ,  $\nu_2 = 0,25$ ,  $\xi = 1,0$ ,  $E_1 = 33,5$  ГПа,  $E_2 = 16,0$  ГПа,  $\gamma_w = 10,0$  кН/м<sup>3</sup>,  $P_c = 10,0$  МПа.

3.1. *Зависимость между коэффициентом проницаемости и максимально допустимым дренажным стоком.* Максимально допустимый дренажный сток зависит от максимальной мощности водослива, позволяющего максимально уменьшить гидростатическое давление в определенном дренажном отверстии в туннеле. Мощность системы водослива сегментной облицовки зависит от скорости дренажного стока и размеров дренажных отверстий, которые в свою очередь зависят от максимально допустимого дренажного стока. Ниже с использованием уравнения (3) изучается связь между коэффициентом проницаемости горной породы и максимально допустимым дренажным стоком при значениях высоты водяного столба  $h_c = 100, 200, 300, 400$  м.

На рис. 5 приведены зависимости дренажного стока  $Q$  от коэффициента проницаемости  $K_r$ . Максимально допустимый дренажный сток увеличивается по линейному закону с увеличением коэффициента проницаемости при фиксированной высоте водяного столба.

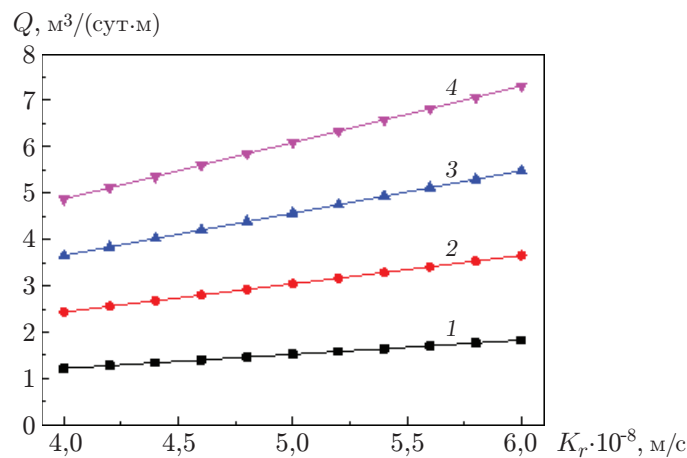


Рис. 5. Зависимость максимально допустимого дренажного стока от коэффициента проницаемости горной породы при различных значениях высоты водяного столба:

1 —  $h_c = 100$  м, 2 —  $h_c = 200$  м, 3 —  $h_c = 300$  м, 4 —  $h_c = 400$  м

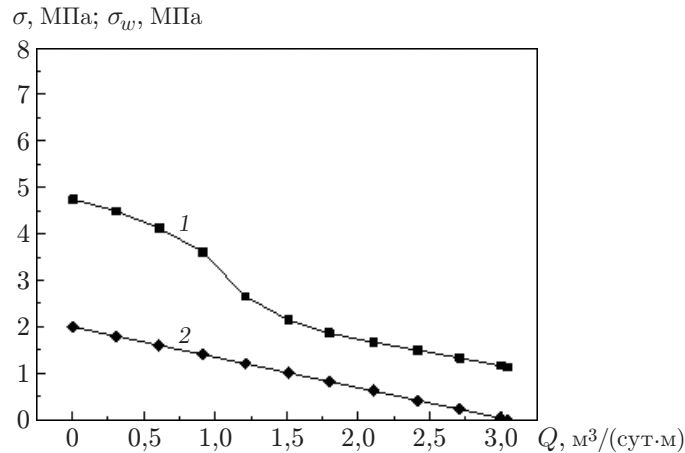


Рис. 6. Зависимости контактных напряжений  $\sigma$  (1) и давления воды на облицовку  $\sigma_w$  (2) от контролируемого дренажного стока

При фиксированном коэффициенте проницаемости чем больше высота водяного столба, тем больше максимально допустимый дренажный сток.

3.2. *Связь между внешним напряжением, действующим на облицовку, и дренажным стоком.* Как известно, наличие дренажных отверстий приводит к уменьшению действующих на облицовку туннеля внешних напряжений, которые представляют собой сумму давления воды и эффективных напряжений, действующих со стороны горного массива. Ниже на основе решений (11), (12) при  $K_r = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с и  $h_c = 200$  м анализируется связь между полным напряжением, действующим на облицовку, и дренажным стоком, изменяющимся от нуля до максимально допустимого. На рис. 6 приведены зависимости контактных напряжений и давления воды на облицовку от контролируемого дренажного стока. С увеличением контролируемого стока давление воды изменяется по линейному закону, а контактные напряжения — по нелинейному. При увеличении значений дренажного стока  $Q$  от 0 до  $1,25 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$  эффективное напряжение быстро уменьшается с увеличением скорости его уменьшения. При  $1,25 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м}) < Q < 1,50 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$  скорость уменьшения эффективного напряжения постепенно уменьшается и становится практически равной скорости уменьшения давления воды. При  $Q > 1,5 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$  эффективное напряжение практически не меняется с увеличением дренажного стока.

3.3. *Влияние характеристик горного массива на эффективное и контактное напряжения, действующие на облицовку.* На рис. 7 представлена зависимость отношения эффективного напряжения к внешнему напряжению  $P_b/q_b$  от модуля упругости горной породы при различных значениях дренажного стока  $Q$ . Зависимости получены на основе решений (11), (12) упругой задачи при  $K_r = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с,  $h_c = 200$  м. На рис. 7 видно, что отношение  $P_b/q_b$  существенно зависит от модуля упругости горной породы. При фиксированном значении модуля упругости с увеличением дренажного стока отношение  $P_b/q_b$  уменьшается. Чем меньше дренажный сток, тем быстрее убывает отношение  $P_b/q_b$  с увеличением модуля упругости. Таким образом, при больших значениях модуля упругости эффективное напряжение составляет незначительную долю полного напряжения, действующего на облицовку.

3.4. *Влияние фильтрационных сил на внешнюю нагрузку, действующую на облицовку.* Ниже проводится анализ влияния сил фильтрации на величину контактного напряжения, действующего на облицовку. Сравниваются результаты, полученные на основе аналитического решения упругой задачи с учетом фильтрационных сил (соотношения (11), (12)



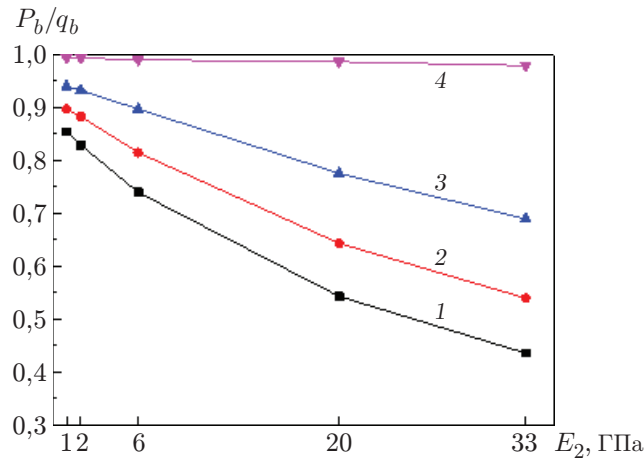


Рис. 7. Зависимость отношения  $P_b/q_b$  от модуля упругости при различных значениях дренажного стока:

1 —  $Q = 0$ , 2 —  $Q = 1 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ , 3 —  $Q = 2 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ , 4 —  $Q = 3 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$

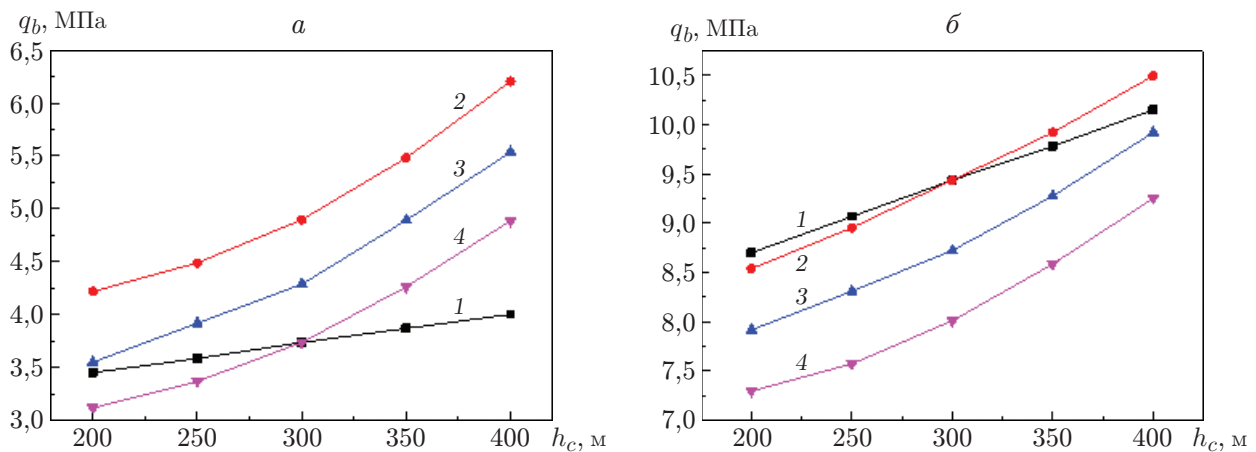


Рис. 8. Зависимости внешнего напряжения от гидростатического давления на границе удаленного поля, вычисленные с использованием двух решений:

*a* —  $E_2 = 16$  ГПа, *б* —  $E_2 = 4$  ГПа; 1 — решение 1 ( $Q = 0$ ), 2–4 — решение 2 (2 —  $Q = 1 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ , 3 —  $Q = 2 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ , 4 —  $Q = 3 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ )

(решение 1)) с результатами решения упрощенной задачи без учета фильтрационных сил (соотношения (15) (решение 2)). Решения получены при следующих значениях параметров задачи:  $K_r = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$ ,  $E_2 = 16, 4 \text{ ГПа}$ ,  $Q = 1, 2, 3 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ . На рис. 8 приведены зависимости внешнего напряжения от высоты водяного столба, вычисленные по двум различным решениям. Из приведенных зависимостей следует, что действующее на облицовку внешнее напряжение, вычисленное по решению 1, увеличивается по линейному закону с увеличением гидростатического давления, в то время как внешнее напряжение, вычисленное по решению 2, резко возрастает по нелинейному закону с увеличением гидростатического давления. Из результатов, приведенных на рис. 8, *a*, следует, что внешнее напряжение, вычисленное на основе упрощенного решения без учета фильтрационных сил, значительно меньше напряжения, вычисленного на основе решения, в котором учитываются фильтрационные силы. Различие этих значений наиболее существенно при малых значениях дренажных стоков. В случае  $E_2 = 16 \text{ ГПа}$ ,  $Q = 1 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ ,  $h_c = 400 \text{ м}$  на-

пряжение, вычисленное на основе решения 1, может в два раза превышать напряжение, вычисленное на основе решения 2. Из зависимостей, приведенных на рис. 8,б, следует, что при  $E_2 = 4$  ГПа напряжения, вычисленные на основе решения 2, существенно больше напряжений, вычисленных на основе решения 1. Чем больше дренажный сток, тем больше различие напряжений, вычисленных по двум решениям.

**Заключение.** В работе построено аналитическое решение упругой задачи с учетом фильтрационных сил, используемых в уравнении равновесия в качестве массовых сил. Решение позволяет вычислить полное напряжение, действующее на облицовку туннеля ТПМ. Установлена зависимость между проницаемостью горного массива и максимально допустимым дренажным стоком. Определена зависимость внешнего напряжения, действующего на облицовку, от дренажного стока и модуля упругости горной породы. Проведено сравнение результатов, полученных на основе решений с учетом фильтрационных сил и без их учета.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Максимально допустимый дренажный сток изменяется по линейному закону с увеличением коэффициента проницаемости. Чем больше гидростатическое давление, тем больше максимально допустимый дренажный сток.

При увеличении дренажного стока от 0 до  $1,25 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$  внешнее напряжение, действующее на облицовку, резко уменьшается. При дальнейшем увеличении дренажного стока скорость уменьшения внешних напряжений падает и при значении дренажного стока, большем  $1,5 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$ , скорость уменьшения внешнего напряжения становится практически равной скорости уменьшения давления воды. Изменение дренажного стока при его больших значениях незначительно влияет на внешнее напряжение и существенно влияет на внешнее напряжение при малых значениях дренажного стока.

С увеличением модуля упругости горной породы отношение  $P_b/q_b$  уменьшается. С уменьшением дренажного стока скорость уменьшения отношения  $P_b/q_b$  увеличивается. Установлено, что характеристики горной породы оказывают существенное влияние на величину отношения  $P_b/q_b$ . Чем больше модуль упругости горного массива, тем меньше отношение  $P_b/q_b$ .

Внешнее напряжение, вычисленное на основе решения без учета фильтрационных сил, может быть как существенно больше, так и существенно меньше внешнего напряжения, вычисленного на основе решения, учитывающего фильтрационные силы. Из проведенного сравнения результатов, полученных на основе двух решений, следует, что результаты, полученные на основе решения, учитывающего фильтрационные силы, являются удовлетворительными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Wang J. X., Feng B., Hu L. S., et al.** Model test of the tunnel subjected to high water pressure in Jinping second cascade hydropower station, China // *Sci. China Technol. Sci.* 2011. V. 54, N 1. P. 192–198.
2. **Aj H.** Report on the damaging effects of water on tunnels during their working life // *Tunnell. Underground Space Technol.* 1991. V. 6, N 1. P. 11–76.
3. **Lunardi P., Focaracci A.** Action to reduce the hydrogeological impact produced by underground works // *Proc. of the AITES-ITA 2001 World tunnel congress “Progress in tunnelling after 2000”*, Milan (Italy), 10–13 June 2001. S. 1.: Sci. Committee, 2001. P. 509–515.
4. **Shin J. H., Potts D. M., Zdravkovic L.** The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed // *Canad. Geotech. J.* 2005. V. 42, N 6. P. 1585–1599.

5. **Huang Y., Fu Z., Chen J., et al.** The external water pressure on a deep buried tunnel in fractured rock // Tunnell. Underground Space Technol. 2015. V. 48. P. 58–66.
6. **Doran S. R., Hartwell D. J., Kofoed N., Warren S.** Storebaelt Eastern railway tunnel-Denmark: design of cross passage ground treatment // Proc. of the 11th Europ. conf. on soil mechanics and foundation engineering, Copenhagen (Denmark), 28 May — 1 June 1995. Copenhagen: Danish Geotech. Soc., 1995.
7. **Shin H. S., Youn D. J., Chae S. E., Shin J. H.** Effective control of pore water pressures on tunnel linings using pin-hole drain method // Tunnell. Underground Space Technol. 2009. V. 24, N 5. P. 555–561.
8. **Yan Q., Meng Z., Xi C.** Study of model test for water pressure distribution character behind drainage segment lining // Chinese J. Rock Mech. Engng. 2013. V. 32. P. 2617–2623. (in chinese).
9. **Yan Q. X., Cheng X., Zheng J., He C.** Analysis on fluid-structure interaction of drainage segment lining under different drainage schemes // J. China Railway Soc. 2012. V. 34, N 6. P. 95–100. (in chinese).
10. **Harr M. E.** Groundwater and seepage. N. Y.: McGraw-Hill, 1962. P. 249–255.
11. **Bobet A.** Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading // Tunnell. Underground Space Technol. 2003. V. 18, N 4. P. 377–393.
12. **Tani M. E.** Circular tunnel in a semi-infinite aquifer // Tunnell. Underground Space Technol. 2003. V. 18, N 1. P. 49–55.
13. **Park K. H., Owatsiriwong A., Lee J. G.** Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: a revisit // Tunnell. Underground Space Technol. 2008. V. 23, N 2. P. 206–209.
14. **Brown E. T., Bray J. W., Ladanyi B., Hoek E.** Ground response curves for rock tunnels // J. Geotech. Engng. 1983. V. 109, N 1. P. 15–39.
15. **Bear J.** Dynamics of fluids in porous media. N. Y.: Dover Publ. Inc., 1988. P. 222–235.
16. **Wu J.** Elasticity. Beijing: Higher Educat. Press, 2001. P. 151–159. (in chinese).

*Поступила в редакцию 1/VIII 2017 г.,  
после доработки — 15/V 2018 г.  
Принята к публикации 28/V 2018 г.*

---