

С.В. Анциферов, А.С. Саммаль, В.Б. Грибанов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБДЕЛОК КОЛЛЕКТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ И МАССИВА ГРУНТА, ПОДВЕРЖЕННОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ УКРЕПЛЕНИЮ

Предложен метод расчета монолитных обделок близко расположенных параллельных тоннелей кругового поперечного сечения, сооружаемых закрытым способом в общей зоне укрепленного грунта. Метод базируется на математическом моделировании совместной работы массива грунта, его укрепленной зоны и обделок тоннелей как элементов единой деформируемой системы. В основу метода расчета положено новое аналитическое решение соответствующей плоской задачи теории упругости для многосвязной кусочно-однородной области, моделирующей массив грунта и подземные сооружения, полученное с применением математического аппарата теории аналитических функций комплексного переменного, свойств степенных рядов Лорана. Метод реализуется в виде компьютерной программы на алгоритмическом языке FORTRAN в среде разработки Microsoft Visual Studio 2008, позволяющей выполнять многовариантные расчеты обделок проектируемых тоннелей. Приведены результаты проведенного численного исследования напряженного состояния массива грунта вокруг двух выработок, пройденных в общей зоне укрепленного грунта – приведены зависимости максимальных растягивающих и сжимающих нормальных тангенциальных напряжений от отношения модулей деформации грунта в естественном состоянии и укрепленного грунта и от размеров зоны укрепленного грунта.

Ключевые слова: напряженное состояние, массив грунта, инъекционное укрепление, обделка, теория упругости, плоская задача, теория функций комплексного переменного, программа расчета.

Подземное строительство в слабых грунтах или трещиноватых породах требует выполнения специальных мероприятий по консолидации и уплотнению массива. Для улучшения условий проходки тоннелей в сложных гидрогеологических условиях нормативными документами, например [3], рекомендуется применение предварительной цементации из забоя. В результате укрепительной цементации происходит закрепление неустойчивых горных пород по трассе тоннеля, повышаются их прочностные и деформационные характеристики, а также однородность и изотропность грунта в зоне заданной глубины, уменьшается водоприток в период строительства. Укрепительная цементация позволяет в конкретных условиях рационально уменьшать толщины обделок, существенно ослаблять агрессивное воздействие подземных вод на материал обделки.

При разработке проектов цементации тоннеля должны быть изучены условия залегания горных пород (грунтов), характеристика их трещиноватости и заполнителя трещин пород. Возможность применения цементации определяется технико-экономической и технологической целесообразностью – размером трещин, типом и проницаемостью пород, окружающих туннель, и химическим составом подземных вод. Проект цементации может быть уточнен на основании данных дополнительных изысканий – натурных и лабораторных исследова-

ний, а также результатов мониторинга напряженного состояния возведенной тоннельной обделки.

При проектировании подземных объектов в условиях существующей городской застройки возникает проблема размещения параллельных участков тоннелей в непосредственной близости друг относительно друга [1, 5], а в ряде случаев возможно создание общей для них зоны укрепленного грунта.

В настоящее время в ТулГУ разработан метод, позволяющий оценить напряженное состояние массива грунта в окрестности двух параллельных неподкрепленных круговых выработок, сооруженных в общей зоне укрепления [6]. Строгого метода расчета обделок параллельных тоннелей при наличии подобной зоны не имеется.

В работе приведены результаты математического моделирования взаимодействия обделок двух параллельных тоннелей кругового поперечного сечения, сооружаемых в общей зоне цементации грунта, имеющей круговое сечение, и окружающего их массива, необходимые для разработки соответствующего аналитического метода расчета.

При разработке модели использованы современные представления геомеханики и механики подземных сооружений о совместной работе массива грунта, его упрочненной зоны и обделок параллельных тоннелей как элементов единой деформируемой системы [2], что позволяет в более полной мере использовать несущую способность грунта, учитывать как влияние зоны укрепленного грунта, так и взаимное влияние близко расположенных тоннелей.

В основу метода положено новое аналитическое решение плоской задачи теории упругости для многосвязной области, расчетная схема которой представлена на рис. 1, поскольку рассматриваются достаточно протяженные участки параллельных тоннелей.

В расчетной схеме бесконечная однородная изотропная линейно деформируемая весомая среда S_0 из материала, имеющего удельный вес γ и осредненные величины модуля деформации E_0 и коэффициента Пуассона ν_0 , моделирует массив грунта, не подверженный укреплению. Круговая область S_1 , ограниченная наружным контуром L_0 радиуса R_0 , и двумя отверстиями с контурами $L_{0,j}$ радиусами $R_{0,j}$ ($j = 1, 2$) с центрами в точках z_j ($j = 1, 2$), моделирует зону предварительно укрепленного грунта, а также пройденные выработки. Материал области S_1 имеет деформационные характеристики E_1, ν_1 , отличающиеся от соответствующих характеристик E_0 и ν_0 . Об-

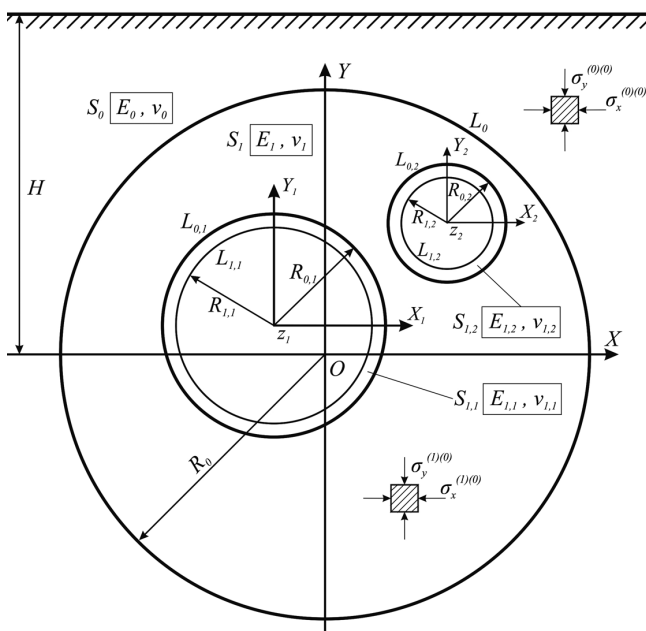


Рис. 1. Расчетная схема

делки тоннелей моделируются концентрическими кольцами $S_{1,j}$ внутреннего радиуса $R_{1,j}$, выполненными из материалов с характеристиками $E_{1,j}$ и $\nu_{1,j}$ ($j = 1, 2$). Собственным весом обделок тоннелей пренебрегаем.

Комплекс тоннелей располагаются на глубине H , значительно превышающей поперечные размеры общей зоны цементации, поэтому в расчетах влиянием на напряженное состояние тоннельных обделок земной поверхности пренебрегаем. Таким образом, ниже приведена постановка задачи и граничные условия для обделок тоннелей глубокого заложения.

На контурах $L_0, L_{0,j}$ ($j = 1, 2$) выполняются условия непрерывности векторов полных напряжений и смещений

$$\sigma_r^{(1)*} = \sigma_r^{(0)*}, \quad \tau_{r\theta}^{(1)*} = \tau_{r\theta}^{(0)*}, \quad u^{(1)} = u^{(0)}, \quad v^{(1)} = v^{(0)} \quad \text{на } L_0; \quad (1)$$

$$\sigma_r^{(1,j)} = \sigma_r^{(1)*}, \quad \tau_{r\theta}^{(1,j)} = \tau_{r\theta}^{(1)*}, \quad u^{(1,j)} = u^{(1)}, \quad v^{(1,j)} = v^{(1)} \quad \text{на } L_{0,j} \quad (j = 1, 2); \quad (2)$$

на внутренних контурах $L_{1,j}$ ($j = 1, 2$) внешние нагрузки отсутствуют

$$\sigma_r^{(1,j)} = 0, \quad \tau_{r\theta}^{(1,j)} = 0, \quad \text{на } L_{1,j} \quad (j = 1, 2). \quad (3)$$

В условиях (1)–(3) символами $\sigma_r^{(0)*}, \sigma_r^{(1)*}, \tau_{r\theta}^{(0)*}, \tau_{r\theta}^{(1)*}$ обозначены полные напряжения на контурах $L_0, L_{0,m}$ ($m = 1, 2$) в соответствующих областях S_j ($j = 0, 1$) в полярной системе координат с полюсом в точке O ; $u^{(0)}, u^{(1)}, v^{(0)}, v^{(1)}$ – горизонтальные и вертикальные составляющие векторов дополнительных перемещений точек контуров $L_0, L_{0,m}$ ($m = 1, 2$) в областях S_j ($j = 0, 1$); $\sigma_r^{(1,j)}, \tau_{r\theta}^{(1,j)}, u^{(1,j)}, v^{(1,j)}$ – соответственно дополнительные напряжения и смещения на контурах $L_{0,m}, L_{1,m}$ ($m = 1, 2$).

Действие собственного веса грунта моделируется наличием в областях S_0 и S_1 поля начальных напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(0)(0)} &= \sigma_x^{(1)(0)} = -\lambda\gamma H; \\ \sigma_y^{(0)(0)} &= \sigma_y^{(1)(0)} = -\gamma H; \\ \tau_{xy}^{(0)(0)} &= \tau_{xy}^{(1)(0)} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где γ – удельный вес грунта, принимаемый одинаковым для грунта как в естественном массиве, так и в зоне упрочнения; λ – коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве.

Полные напряжения в точках областей $\phi_0(z)$ представляются в виде сумм

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(j)*} &= \sigma_x^{(j)} + \sigma_x^{(j)(0)}; \\ \sigma_y^{(j)*} &= \sigma_y^{(j)} + \sigma_y^{(j)(0)}; \quad (j = 1, 2), \\ \tau_{xy}^{(j)*} &= \tau_{xy}^{(j)} + \tau_{xy}^{(j)(0)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\sigma_x^{(j)}, \sigma_y^{(j)}, \tau_{xy}^{(j)}$ ($j = 1, 2$) – дополнительные напряжения в точках соответственно областей S_0 и S_1 , обусловленные наличием зоны упрочненного грунта и ослабляющих отверстий. Смещения в областях, моделирующих грунт и обделки, рассматриваются только дополнительные.

Решение поставленной плоской задачи теории упругости получено с использованием математического аппарата теории функций комплексного переменного, свойств степенных рядов Лорана [4].

Для этого вводятся в рассмотрение комплексные потенциалы $\phi_0(z), \psi_0(z); \tilde{\phi}_1(z), \tilde{\psi}_1(z)$, характеризующие напряженно-деформированное состояние областей S_0 и S_1 , моделирующих соответственно массив грунта в естественном

состоянии и зону укрепленного грунта, и потенциалы $\tilde{\phi}_1(z), \tilde{\psi}_1(z)$, характеризующие напряженно-деформированное состояние областей $S_{1,j}$ ($j = 1, 2$), моделирующих обделки тоннелей. Комплексные потенциалы связаны с дополнительными напряжениями и смещениями в точках этих областей известными формулами Колосова-Мусхелишвили [4].

Граничные условия краевой задачи теории аналитических функций комплексного переменного примут вид:

$$\begin{cases} \tilde{\phi}_1(t_0) + t_0 \overline{\tilde{\phi}'_1(t_0)} + \overline{\tilde{\psi}_1(t_0)} = \phi_0(t_0) + t_0 \overline{\phi'_0(t_0)} + \overline{\psi_0(t_0)} \\ \alpha_1 \tilde{\phi}_1(t_0) - t_0 \overline{\tilde{\phi}'_1(t_0)} - \overline{\tilde{\psi}_1(t_0)} = \frac{\mu_1}{\mu_0} \left[\alpha_0 \phi_0(t_0) - t_0 \overline{\phi'_0(t_0)} - \overline{\psi_0(t_0)} \right] \text{ на } L_0; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \tilde{\phi}_j(t_{0,j}) + t_{0,j} \overline{\tilde{\phi}'_j(t_{0,j})} + \overline{\tilde{\psi}_j(t_{0,j})} = \\ = \tilde{\phi}_1(t_{0,j}) + t_{0,j} \overline{\tilde{\phi}'_1(t_{0,j})} + \overline{\tilde{\psi}_1(t_{0,j})} + f_j(t_{0,j}) \\ \alpha_{1,j} \tilde{\phi}_j(t_{0,j}) - t_{0,j} \overline{\tilde{\phi}'_j(t_{0,j})} - \overline{\tilde{\psi}_j(t_{0,j})} = \\ = \frac{\mu_{1,j}}{\mu_1} \left[\alpha_1 \tilde{\phi}_1(t_{0,j}) - t_{0,j} \overline{\tilde{\phi}'_1(t_{0,j})} - \overline{\tilde{\psi}_1(t_{0,j})} \right] \text{ на } L_{0,j} (j = 1, 2); \end{cases} \quad (7)$$

$$\tilde{\phi}_j(t_{1,j}) + t_j \overline{\tilde{\phi}'_j(t_{1,j})} + \overline{\tilde{\psi}_j(t_{1,j})} = 0 \text{ на } L_{1,j} (j = 1, 2), \quad (8)$$

где

$$t_0 = R_0 e^{i\theta} = R_0 \sigma \text{ на } L_0;$$

$$t_{l,j} = z_j + R_{l,j} e^{i\theta} = z_j + R_{l,j} \sigma \text{ на } L_{l,j} \quad (l = 0, 1; j = 1, 2); \quad (9)$$

$$\alpha_m = 3 - 4\nu_m; \quad \mu_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (m = 0, 1), \quad (10)$$

$$\alpha_{1,j} = 3 - 4\nu_{1,j}; \quad \mu_{1,j} = \frac{E_{1,j}}{2(1 + \nu_{1,j})} \quad (j = 1, 2). \quad (11)$$

Функции $f_j(t_{0,j})$, входящие в граничные условия (7) и отвечающие за скачок напряжений на контурах $L_{0,j}$ ($j = 1, 2$), определяются по формуле

$$f_j(t_{0,j}) = i \int_0^s (X_n^{(0,j)(0)} + i Y_n^{(0,j)(0)}) ds_j, \quad (12)$$

где $X_n^{(0,j)(0)}, Y_n^{(0,j)(0)}$ – компоненты главного вектора усилий, действующих на контурах $L_{0,j}$ ($j = 1, 2$); ds_j – дифференциалы дуг контуров $L_{0,j}$ ($j = 1, 2$).

Используя выражения для начальных напряжений (1), определим компоненты главного вектора усилий

$$\begin{cases} X_n^{(0,j)(0)} = \sigma_x^{(0,j)(0)} \cos(n_j, x) + \tau_{xy}^{(0,j)(0)} \cos(n_j, y) = -\lambda \gamma H \cos(n_j, x) \\ Y_n^{(0,j)(0)} = \tau_{xy}^{(0,j)(0)} \cos(n_j, x) + \sigma_y^{(0,j)(0)} \cos(n_j, y) = -\gamma H \cos(n_j, y) \end{cases} \quad (13)$$

Тогда окончательно функции $f_j(t_{0,j})$ примут вид

$$f_j(t_{0,j}) = -\gamma H R_{0,j} \left[\frac{1 + \lambda}{2} \cdot \frac{t_{0,j} - z_j}{R_{0,j}} + \frac{1 - \lambda}{2} \cdot \left(\frac{t_{0,j} - z_j}{R_{0,j}} \right)^{-1} \right] \quad (j = 1, 2). \quad (14)$$

Комплексные потенциалы $\varphi_0(z)$, $\psi_0(z)$, регулярные в бесконечной области S_0 вне кругового контура L_0 , представим в виде рядов следующего вида:

$$\begin{aligned}\varphi_0(z) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(0)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^{-k}, \\ \psi_0(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(2)(0)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^{-k}.\end{aligned}\quad (15)$$

Для комплексных потенциалов $\tilde{\varphi}_1(z)$, $\tilde{\psi}_1(z)$ с учетом того, что функция $\tilde{\psi}_1(z)$ неинвариантна при переносе начала координат, используем представление:

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}_1(z) &= \varphi_1^*(z) + \sum_{m=1}^2 \varphi_{1,m}(z - z_m); \\ \tilde{\psi}_1(z) &= \psi_1^*(z) + \sum_{m=1}^2 \left[\psi_{1,m}(z - z_m) - \bar{z}_m \varphi'_{1,m}(z - z_m) \right].\end{aligned}\quad (16)$$

Входящие в (16) функции $\varphi_1^*(z)$, $\psi_1^*(z)$, регулярные внутри контура L_0 , раскладываются по положительным степеням соответствующей переменной:

$$\begin{aligned}\varphi_1^*(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(1)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^k; \\ \psi_1^*(z) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(4)(1)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^k,\end{aligned}\quad (17)$$

а каждый из потенциалов $\varphi_{1,m}(z - z_m)$, $\psi_{1,m}(z - z_m)$ ($m = 1, 2$), регулярных вне каждого из контуров $L_{0,m}$ ($m = 1, 2$), записываются в виде

$$\begin{aligned}\varphi_{1,m}(z - z_m) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(1,m)} \left(\frac{z - z_m}{R_{0,m}} \right)^{-k}, \\ \psi_{1,m}(z - z_m) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(2)(1,m)} \left(\frac{z - z_m}{R_{0,m}} \right)^{-k}.\end{aligned}\quad (18)$$

Комплексные потенциалы $\tilde{\varphi}_j(z)$, $\tilde{\psi}_j(z)$, регулярные в кольцах S_j , с учетом неинвариантности функций $\tilde{\psi}_j(z)$ ($j = 1, 2$) при переносе начала координат отыскиваются в виде

$$\tilde{\varphi}_j(z) = \varphi_j(z - z_j), \quad \tilde{\psi}_j(z) = \psi_j(z - z_j) - \bar{z}_j \varphi'_j(z - z_j), \quad (19)$$

а функции $\varphi_j(z - z_j)$, $\psi_j(z - z_j)$ ($j = 1, 2$), в свою очередь, представляются в виде рядов Лорана:

$$\begin{aligned}\varphi_j(z - z_j) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(j)} \left(\frac{z - z_j}{R_{1,j}} \right)^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(j)} \left(\frac{z - z_j}{R_{1,j}} \right)^k; \\ \psi_j(z - z_j) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(2)(j)} \left(\frac{z - z_j}{R_{1,j}} \right)^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(4)(j)} \left(\frac{z - z_j}{R_{1,j}} \right)^k.\end{aligned}\quad (20)$$

Подстановка представлений (15)–(20) в граничные условия (6), (7) позволяет получить соотношения между коэффициентами разложений комплексных потенциалов, характеризующих напряженно-деформированное состояние смежных областей, в степенные ряды, а граничное условие (8) – в конечном итоге прийти к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложений комплексных потенциалов в среде S_0 . Решение задачи сведено к итерационному процессу, на каждом шаге которого определяются указанные коэффициенты разложений из специальным образом укороченной системы, свободные члены которой уточняются в каждом приближении по установленному алгоритму [1].

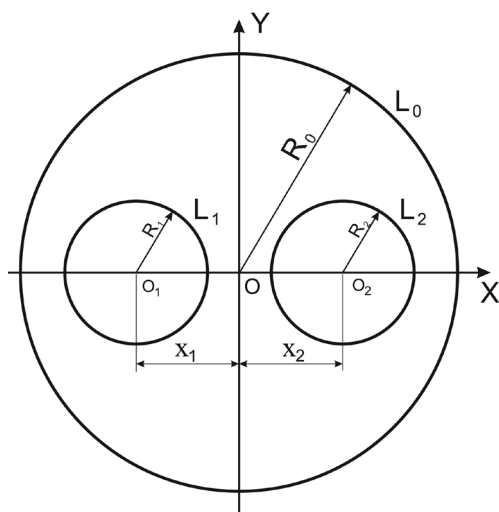


Рис. 2. Расчетная схема

Таким образом, появляется возможность вычисления коэффициентов разложения комплексных потенциалов в каждой из областей $S_1, S_{1,j} (j = 1, 2)$, что позволяет определять компоненты напряжений в точках рассматриваемых областей, применяя формулы Колосова-Мусхелишвили [4].

Ниже приведены результаты исследования влияния различных факторов на напряженное состояние массива в окрестности двух параллельных круговых выработок, сооруженных в зоне укрепленного грунта, полученные на основе выполненных многовариантных расчетов.

Расчетная схема представлена на рис. 2. Общие исходные данные: глубина заложения выработок $H = 42$ м, радиус зоны упрочнения $R_0 = 12$ м, радиусы выработок $R_1 = R_2 = 5$ м, координаты центров поперечного сечения выработок $x_1 = -6$ м, $x_2 = 6$ м, $y_1 = y_2 = 0$; деформационные характеристики массива грунта – $E_0 = 2000$ МПа, $\nu_0 = 0,35$, $\gamma = 0,017$ МН/м³, деформационные характеристики массива после укрепления принимаются: $E_0 = 3000$ МПа, $\nu_0 = 0,3$.

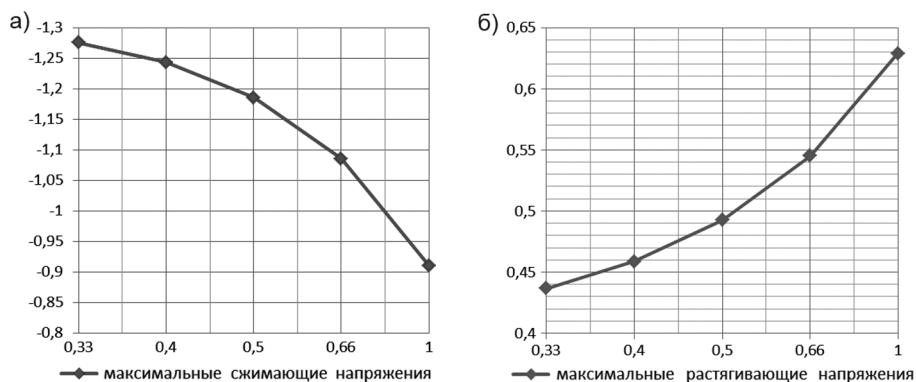


Рис. 3. Зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений на контурах выработок от отношения модулей деформации массива в естественном состоянии и упрочненного E_0/E_1

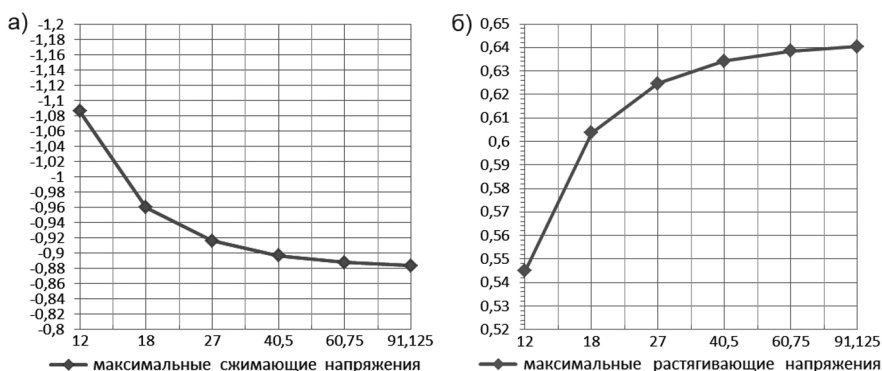


Рис. 4. Зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений на контурах выработок от размера R_0 общей зоны упрочнения

Выполнено исследование зависимости максимальных сжимающих и растягивающих нормальных тангенциальных напряжений от величины отношения E_0/E_1 , и размера R_0 общей зоны упрочнения.

На рис. 3, а показана зависимость максимальных сжимающих нормальных тангенциальных напряжений в точках с угловыми координатами $\theta = 0^\circ$, а на рис. 3, б – максимальных растягивающих нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^{\max} / \gamma H$ в точках при $\theta = 45^\circ, 315^\circ$ (угол θ отсчитывается от оси X против хода часовой стрелки для каждого отверстия) на контуре первой выработки L_1 от отношения модулей деформации массива и материала обделки E_0/E_1 . Очевидно, что представленные результаты справедливы и для второй выработки с учетом симметрии.

Как видно из рис. 3, увеличение отношения модулей деформации массива в естественном состоянии и упрочненного E_0/E_1 приводит к уменьшению максимальных сжимающих и увеличению растягивающих нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^{\max} / \gamma H$ в точках контуров выработок.

На рис. 4, а показаны зависимости максимальных сжимающих нормальных тангенциальных напряжений в точках при $\theta = 0^\circ$, а на рис. 4, б – максимальных растягивающих нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^{\max} / \gamma H$ в точках при $\theta = 45^\circ, 315^\circ$ на контуре первой выработки L_1 от размера общей зоны упрочнения R_0 .

Из рис. 4 следует, что увеличение размера общей зоны упрочнения R_0 приводит к уменьшению максимальных сжимающих и увеличению растягивающих нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^{\max} / \gamma H$ на контурах выработок.

Разрабатываемый метод расчета позволит определить напряженное состояние обделок тоннелей, что позволит, в конечном итоге, на основе выполнения условий прочности обосновать выбор толщин обделок, применяемых материалов, определить минимальное расстояние между продольными осями тоннелей и размер зоны упрочненного грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов С.В. Метод расчета многослойных обделок параллельных тоннелей кругового поперечного сечения мелкого заложения: монография. – Тула: ТулГУ, 2014. – 298 с.
2. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994. – 382 с.

3. ВСН 03-74. Указания по проектированию цементации в гидротехнических туннелях. Минэнерго СССР. Энергия. Ленинградское отделение. – 1975. – 24 с.
4. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
5. Саммал А.С., Анциферов С.В., Деев П.В. Аналитические методы расчета подземных сооружений: монография. – Тула: ТулГУ, 2013. – 111 с.
6. Саммал А.С., Грибанов В.Б., Капунова Н.А. Оценка напряженного состояния массива пород в окрестности двух параллельных круговых выработок, сооружаемых в общей зоне укрепления // Известия ТулГУ. Серия Естественные науки. – 2013. – Вып. 3. – С. 323–332. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Анциферов Сергей Владимирович – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: antsser@mail.ru,

Саммал Андрей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: sammal@mm.tsu.tula.ru,

Грибанов Вадим Богданович – аспирант, магистр, e-mail: vadim_gribanov@mail.ru, Тульский государственный университет.

UDC 622.26

MATHEMATICAL MODEL OPERATION OF LINING THE COLLECTOR TUNNELS AND SOIL MASS, SUBJECT TO PRIOR STRENGTHENING

Antsiferov S.V.¹, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: antsser@mail.ru, Sammal A.S.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sammal@mm.tsu.tula.ru, Gribanov V.B.¹, e-mail: vadim_gribanov@mail.ru,

¹ Tula State University, Tula, Russia.

A method for calculating the monolithic lining of closely spaced parallel tunnels of circular cross-section, constructed by the closed method in the general area of reinforced soil. The method is based on mathematical modeling teamwork array of soil, its fortified area and lining tunnels as elements of a single deformable system. The basis of the method of calculation put a new analytical solution of the corresponding plane problem of elasticity theory for multi piecewise homogeneous area, simulating an array of ground and underground structures obtained using the mathematical apparatus of the theory of analytic functions of complex variables, properties Laurent power series. The method is implemented as a computer program on the algorithmic language FORTRAN in the development environment Microsoft Visual Studio 2008 that allows to perform multiple calculations lining of the Tunnel. The paper presents the results of a numerical study of the stressed state of the soil around the two mines, passed a total area of reinforced soil – shows the maximum tensile and compressive tangential stresses from the normal ratio of the absolute of deformation of soil in its natural state and strengthening of soil and the size of the zone of reinforced soil.

Key words: stress state, the array of soil injection reinforcement, lining, theory of elasticity, plane problem of the theory of functions of a complex variable, the calculation program.

REFERENCES

1. Antsiferov S.V. *Metod rascheta mnogosloynnykh obdelok parallel'nykh tonnelei krugovogo poperechnogo secheniya melkogo zalozheniya*: monografiya (Method of calculation of multilayer lining parallel tunnels of circular crosssection of shallow: a monograph), Tula, TulGU, 2014, 298 p.
2. Bulychев N.S. *Mekhanika podzemnykh sooruzhenii*: Uchebnik dlya vuzov (Mechanics of underground structures: Textbook for high schools), Moscow, Nedra, 1994, 382 p.
3. *Ukazaniya po proektirovaniyu tsementatsii v gidrotekhnicheskikh tunnelyakh VSN 03-74* (Guidelines for the design of cementation in hydraulic tunnels VSN 03-74), Minenergo SSSR. Energiya. Leningradskoe otделение. 1975, 24 p.
4. Muskhelishvili N.I. *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti* (Some basic problems of the mathematical theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1966, 707 p.
5. Sammal' A.S., Antsiferov S.V., Deev P.V. *Analiticheskie metody rascheta podzemnykh sooruzhenii*: monografiya (Analytical methods of calculation of underground structures: a monograph), Tula, TulGU, 2013, 111 p.
6. Sammal' A.S., Gribanov V.B., Kapunova N.A. *Izvestiya TulGU. Seriya Estestvennye nauki*. 2013, issue 3, pp. 323–332.