

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КРУГОВЫХ ВЫРАБОТОК, СООРУЖАЕМЫХ В ЗОНЕ УПРОЧНЕНИЯ ПОРОД

В. Б. Грибанов

*Тульский государственный университет,
г. Тула (Россия)*

При сооружении выработок закрытым (горным) способом в слабых, трещиноватых или обводненных породах нередко используются специальные способы проходки, связанные с проведением мероприятий по предварительному инъекционному укреплению массива грунта. Это приводит не только к повышению однородности пород, гидроизоляции участка строительства, но и изменению деформационных характеристик пород [1]. В случае необходимости размещения выработок в непосредственной близости друг от друга рациональным проектным решением является создание общей области упрочненных пород. Наличие такой зоны может оказывать

существенное влияние на формирование напряженного состояния массива, окружающего выработки, и должно учитываться на стадии проектирования.

Обзор имеющейся научной литературы показал, что до настоящего времени аналитических методов расчета, позволяющих учитывать общую для двух выработок зону укрепления, не имелось. В связи с этим целью настоящей работы является математическое моделирование формирования напряженного состояния горного массива в окрестности двух параллельных круговых выработок, сооружаемых в зоне упрочненных пород, постановка и получение решения соответствующей задачи теории упругости.

Решение поставленной задачи базируется на современных представлениях механики подземных сооружений [2], в соответствии с которыми исследуемый объект – массив пород и зона укрепления, ослабленная двумя параллельными выработками – рассматривается как единая деформируемая система. Расчетная схема сформулированной задачи представлена на рисунке 1.

Область S_1 , моделирующая зону предварительно укрепленных пород и представляющая собой протяженный круговой цилиндр с двумя ослабляющими его цилиндрическими полостями, моделирующими выработки, помещена в бесконечную линейно-деформируемую весомую среду S_0 , моделирующую горный массив, деформационные свойства которого характеризуются осредненными величинами модуля деформации E_0 и коэффициента Пуассона ν_0 . Зона S_1 укрепленных пород представляет собой в поперечном сечении круг с радиусом R_0 , при этом ослабляющие его две круговые выработки с центрами в точках x_i ($i=1,2$), лежащими на горизонтальной оси, имеют радиусы R_i ($i=1,2$) соответственно. Деформационные характеристики E_1, ν_1 области S_1 отличаются от соответствующих характеристик среды S_0 .

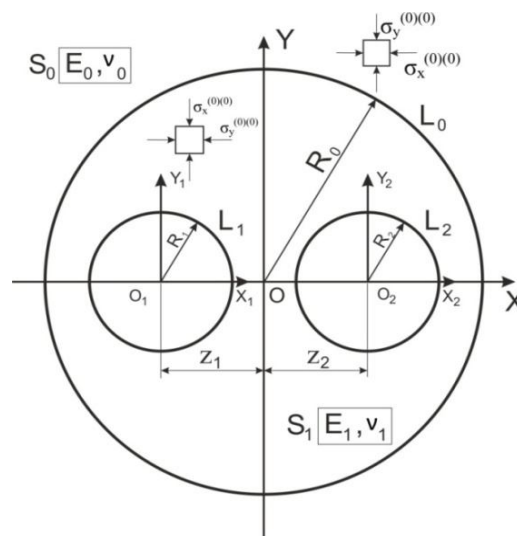


Рис. 1. Расчетная схема

Действие собственного веса пород моделируется наличием в области $S_0 + S_1$ поля начальных напряжений:

$$\sigma_x^{(j)(0)} = -\lambda\gamma H, \quad \sigma_y^{(j)(0)} = -\gamma H, \quad \tau_{xy}^{(j)(0)} = 0 \quad (j=0,1), \quad (1)$$

где γ – удельный вес пород (принимается одинаковым как в естественном массиве, так и в зоне упрочнения), H – глубина заложения выработок, которая превышает их поперечные размеры не менее чем в 5 раз, λ – коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве.

Таким образом, в представленной модели не учитывается изменение удельного веса пород в результате их укрепления, а также влияние земной поверхности.

Полные напряжения в областях S_j ($j=0,1$) представляются в виде сумм:

$$\sigma_x^{(j)*} = \sigma_x^{(j)} + \sigma_x^{(j)(0)}, \quad \sigma_y^{(j)*} = \sigma_y^{(j)} + \sigma_y^{(j)(0)}, \quad \tau_{xy}^{(j)*} = \tau_{xy}^{(j)} + \tau_{xy}^{(j)(0)}, \quad (2)$$

где $\sigma_x^{(j)}$, $\sigma_y^{(j)}$, $\tau_{xy}^{(j)}$ – дополнительные напряжения, обусловленные наличием зоны S_1 и ослабляющих отверстий.

Смещения, следуя работе [2], рассматриваются только дополнительные.

Граничные условия поставленной задачи отражают непрерывность смещений и полных напряжений на наружном контуре L_0 и отсутствие внешних сил на контурах L_j ($j=1, 2$) и записываются в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r^{(1)*} = \sigma_r^{(0)*} \\ \tau_{r\theta}^{(1)*} = \tau_{r\theta}^{(0)*} \\ u^{(1)} = u^{(0)} \\ v^{(1)} = v^{(0)} \end{array} \right. \text{ на } L_0, \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_r^{(j)*} = 0 \\ \tau_{r\theta}^{(j)*} = 0 \end{array} \right. \text{ на } L_j (j=1,2), \quad (3)$$

где $\sigma_r^{(1)*}$, $\sigma_r^{(0)*}$, $\tau_{r\theta}^{(1)*}$, $\tau_{r\theta}^{(0)*}$ – полные напряжения на контуре L_0 соответственно в областях S_j ($j=0,1$) в полярной системе координат с полюсом в точке O ; $u^{(1)}$, $u^{(0)}$, $v^{(1)}$, $v^{(0)}$ – дополнительные горизонтальные и вертикальные перемещения точек контура L_0 соответственно в областях S_j ($j=0,1$).

После введения в рассмотрение комплексных потенциалов $\phi_j(z)$, $\psi_j(z)$ ($j=0,1$), связанных с компонентами напряжений и перемещений точек соответствующих областей известными формулами Колосова – Мусхелишвили, сформулированная задача теории упругости сводится

к краевой задаче теории аналитических функций комплексного переменного.

Для упрощения дальнейших выкладок целесообразно ввести в рассмотрение новые функции $\chi_j(z)$ ($j=0,1$), обладающие свойством инвариантности при переносе систем координат вдоль оси x , выраженные соотношениями:

$$\chi_j = z\varphi'_j(z) + \psi_j(z). \quad (4)$$

Следует отметить, что функция $\chi_0(z)$ введена только с целью общности записи.

Граничные условия поставленной задачи принимают вид на L_0 :

$$\varphi_1(t) + (t - \bar{t})\overline{\varphi'_1(t)} + \overline{\chi_1(t)} = \varphi_0(t) + (t - \bar{t})\overline{\varphi'_0(t)} + \overline{\chi_0(t)}, \quad (5)$$

$$ae_1\varphi_1(t) - (t - \bar{t})\overline{\varphi'_1(t)} - \overline{\chi_1(t)} = \frac{\mu_1}{\mu_0} \left[ae_0\varphi_0(t) - (t - \bar{t})\overline{\varphi'_0(t)} - \overline{\chi_0(t)} \right];$$

на L_j ($j=1,2$)

$$\varphi_1(t) + (t - \bar{t})\overline{\varphi'_1(t)} + \overline{\chi_1(t)} = 0, \quad (6)$$

где

$$t = \begin{cases} R_0\sigma, & \text{на контуре } L_0 \\ R_j\sigma + x_j, & \text{на контуре } L_j (j=1,2) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\sigma = e^{i\theta}, \quad ae_j = 3 - 4\nu_j, \quad \mu_j = \frac{E_j}{2(1 + \nu_j)} \quad (j=0,1).$$

Комплексные потенциалы $\varphi_0(z)$, $\chi_0(z)$, регулярные в среде S_0 , представляются в виде:

$$\varphi_0(z) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n^{(1)(0)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^{-n}, \quad \chi_0(z) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n^{(2)(0)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^{-n}. \quad (8)$$

В свою очередь, потенциалы $\varphi_1(z)$, $\chi_1(z)$, регулярные в кольце S_1 вне отверстий L_1 и L_2 , записываются в форме рядов:

$$\varphi_1(z) = \sum_{j=1}^2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n^{(1)(j)} \left(\frac{z - x_j}{R_0} \right)^{-n} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n^{(3)(1)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^n, \quad (9)$$

$$\chi_1(z) = \sum_{j=1}^2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n^{(2)(1)} \left(\frac{z - x_j}{R_0} \right)^{-n} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n^{(4)(1)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^n.$$

Здесь $c_n^{(s)(j)}$ ($s = \overline{1,4}$; $j = 1,2$; $n = 1,2,\dots$) – коэффициенты, подлежащие определению.

Решение поставленной задачи строится следующим образом. Выражения (8), (9) подставляются в граничные условия (5) на контуре L_0 , откуда после некоторых очевидных преобразований находятся выражения, связывающие коэффициенты $c_k^{(s)(j)}$ ($s = \overline{1,4}$, $j = 1,2$, $k = 1,2,\infty$) и $c_n^{(p)(0)}$ ($p = 1,2$, $n = 1,2,\infty$). Далее полученные соотношения подставляются в граничные условия (6) на контурах L_j ($j = 1,2$). В результате удается прийти к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложений комплексных потенциалов $c_n^{(p)(0)}$ ($p = 1,2$, $n = 1,2,\infty$).

Далее определяются коэффициенты разложений комплексных потенциалов в ряды (8), (9), а по формулам Колосова – Мусхелишвили – дополнительные напряжения в соответствующих областях.

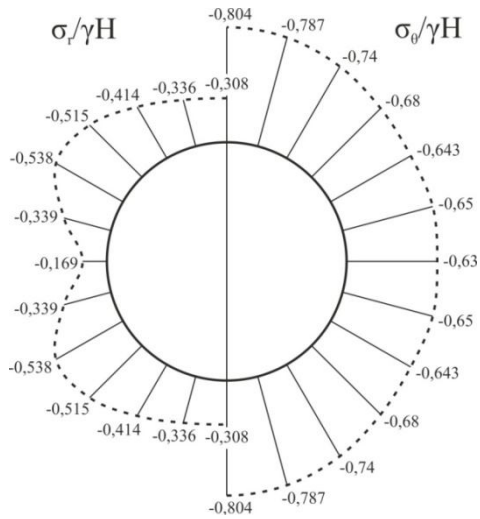
На основе полученного решения составлен полный алгоритм расчета, реализованный в виде соответствующего компьютерного программного обеспечения.

Ниже в качестве примера приводятся результаты расчета напряжений в массиве в окрестности двух одинаковых параллельных выработок радиусами $R_1 = R_2 = 5\text{ м}$, сооруженных в зоне упрочненных пород радиуса $R_0 = 12\text{ м}$ на глубине $H = 42\text{ м}$. Центры выработок расположены на оси x и имеют абсциссы $x_i = 6\text{ м}$ ($i = 1,2$). Остальные данные: $E_0 = 2000\text{ МПа}$, $\nu_0 = 0,35$, $\gamma = 0,017\text{ МН} / \text{м}^3$, $E_1 = 1,5E_0$, $\nu_1 = 0,3$.

Результаты расчета представлены на рисунках 2–4 в виде эпюр напряжений. При этом на рисунке 2 даны контактные радиальные $\sigma_r / \gamma H$ (рис. 2 а) и нормальные тангенциальные напряжений $\sigma_\theta^M / \gamma H$ (рис. 2 б) напряжения в массиве. При этом контактные касательные напряжения $\tau_{r\theta} / \gamma H$ показаны на рисунке 3.

На рисунке 4 приведены нормальные тангенциальные напряжения, действующие на контурах в зоне упрочнения. В силу симметрии соответствующие результаты показаны для левой выработки и правой половины наружного контура.

На рисунке 5 представлены результаты, иллюстрирующие влияние взаимного расположения выработок на напряженное состояние зоны упрочнения. Рассматривались три случая, когда центры выработок размещались на расстояниях $\frac{x_i}{R_i} = 1,05; 1,1; 1,2$. В силу симметрии эпюры нормальных тангенциальных напряжений даны для контура левой выработки.



а) б)

Рис. 2. Эпюры расчетных напряжений в массиве на границе с зоной упрочнения:

- а) радиальных контактных,
б) нормальных тангенциальных

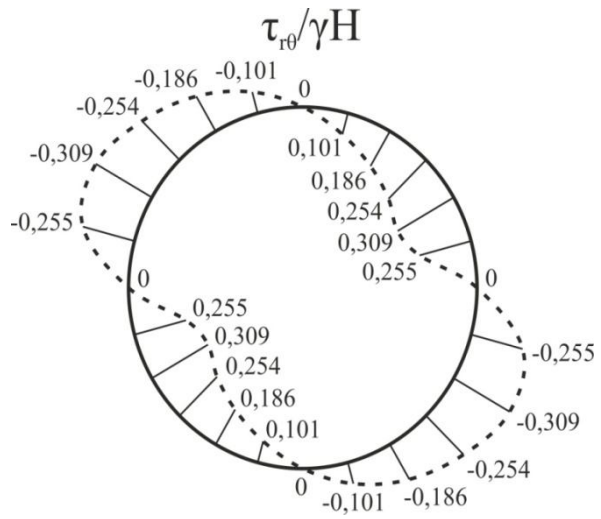
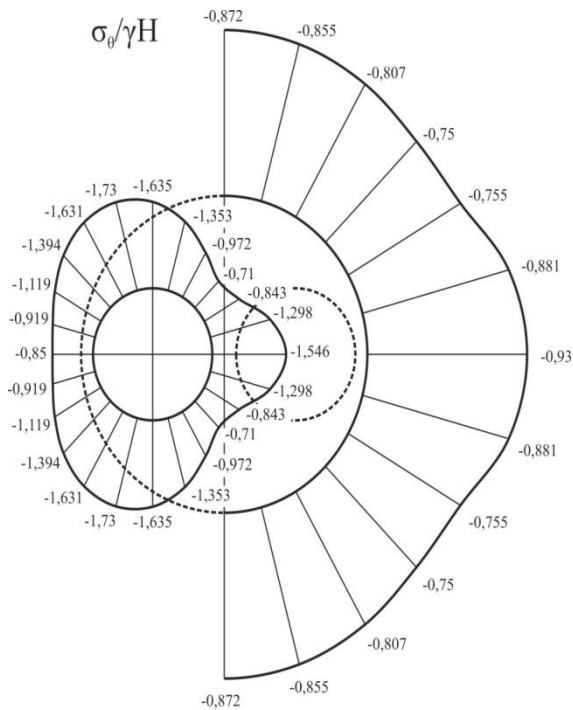


Рис. 3. Эпюра касательных напряжений на границе контакта зоны упрочнения с массивом пород



а) б)

Рис. 4. Расчетные нормальные тангенциальные напряжения в зоне упрочнения: а) на контуре левой выработки, б) на внешнем контуре

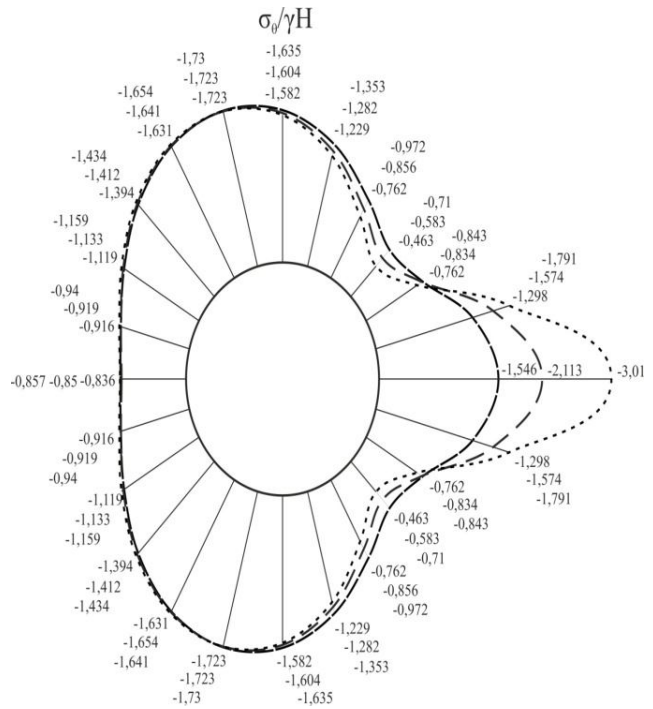


Рис. 5. Эпюры нормальных тангенциальных напряжений на контуре левой выработки при различных значениях

параметра $\frac{x_i}{R_i}$:

при $\frac{x_i}{R_i} = 1,05$, при $\frac{x_i}{R_i} = 1,1$, при $\frac{x_i}{R_i} = 1,2$

Как следует из рисунка 5, уменьшение расстояния между центрами выработок влечет за собой существенный рост максимальных сжимающих нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta} / \gamma H$. Это обстоятельство следует учитывать на этапе проектирования подземного сооружения.

Список литературы

1. Насонов, И. Д. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства : учеб. для вузов / И. Д. Насонов, В. И. Ресин, М. Н. Шуплик, В. А. Федюкин. – 3-е изд., перераб и доп. – М. : Изд-во Академии горных наук, 1998. – 375 с.

2. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений : учеб. для вузов / Н. С. Булычев. – М. : Недра, 1982. – 270 с.