

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ  
«МАССИВ ГРУНТА – ОБДЕЛКА ТОННЕЛЯ –  
ЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН ИЗ ТРУБ»**

***Анциферов С.В.***

*доцент, доктор технических наук,  
заведующий кафедрой механики материалов*

***Трещева О.В.***

*аспирант кафедры механики материалов*

***Феклин А.А.***

*магистрант кафедры механики материалов  
Тульский государственный университет, Тула*

*В работе рассматривается расчетная схема и приводится постановка задачи теории упругости, аналитическое решение которой позволяет разработать метод определения напряженно-деформированного состояния элементов геомеханической системы «массив грунта - обделка тоннеля - защитный экран из труб». Решение получено с использованием математического аппарата теории комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили.*

*Ключевые слова: массив грунта, обделка тоннеля, защитный экран, трубы, теория упругости, постановка задачи, теория функций комплексного переменного, потенциалы Колосова-Мусхелишвили*

**STRESS-DEFORMED STATE OF THE SYSTEM «SOIL MASSIF – LINING  
OF THE TUNNEL – PROTECTIVE PIPE SHIELD»**

*The paper discusses the design scheme and provides the formulation of the elasticity theory problem, the analytical solution of which allows the development of a method for determining the stress-strain state of the elements of the geomechanical*

*system “soil mass - tunnel lining - pipe protection screen”. The solution was obtained using the mathematical apparatus of the Kolosov-Muskhelishvili complex potentials theory.*

*Keywords: soil massif, tunnel lining, protective shield, pipes, theory of elasticity, problem statement, theory of complex variable functions, Kolosov-Muskhelishvili potentials*

При строительстве подземных сооружений закрытым способом при неблагоприятных геологических условиях проходку тоннелей выполняют под защитой предварительно установленного экрана из труб [6, 8]. Это позволяет повысить устойчивость массива грунта вблизи забоя. Применение экрана из труб для укрепления грунтового массива особенно эффективно при строительстве тоннелей мелкого заложения на застроенных городских территориях в слабых и неустойчивых грунтах, когда использование открытого способа затруднительно или невозможно [4]. Защитный экран позволяет значительно уменьшить влияние выполняемых работ на деформацию и осадку земной поверхности и, соответственно, на расположенные в зоне строительства здания и сооружения.

Защитные экраны различаются способами возведения и конструктивными особенностями - формой и размерами, диаметром и материалом труб, наличием или отсутствием замковых элементов и др. Наиболее часто применяют экраны, выполненные из стальных труб с бетонным или железобетонным заполнением, труб из железобетона или композитных материалов.

При устройстве экранов применяют технологии продавливания или прокола для труб малого диаметра; горизонтальное бурение; микротоннелирование, а также щитовую проходку для труб большого диаметра [7, 8].

Технология строительства тоннелей под защитой экрана из труб предусматривает обустройство вспомогательного котлована, шахты или выработки, в которых монтируется необходимое технологическое

оборудование – буровые и домкратные установки. Стальные трубы продавливают вдоль оси выработки по периметру, либо его части. В устойчивых грунтах трубы располагают с зазорами, составляющими 150...200 мм. При продавливании труб в неустойчивых грунтах их соединяют между собой с помощью различных замковых устройств.

Дальнейшая разработка, погрузка и удаление грунта, а также возведение постоянной крепи при проходке тоннеля производятся под защитой экрана.

При сооружении тоннелей небольшой протяженности трубы экрана продавливаются на всю длину параллельно направлению проходки, их торцы жестко заделываются с обеих сторон в припортальные стальные рамы, либо в железобетонные порталы. Технология проходки под защитой экрана позволяет возводить выработки различных форм и сечений длиной до 100 м, для увеличения длины экранов сооружаются дополнительные промежуточные котлованы.

В ряде случаев опережающие экраны создаются непосредственно из забоя подземной выработки путем бурения наклонных под углом  $4...6^\circ$  к оси подземной выработки (реже горизонтальных) скважин и задавливания в них труб. Экраны устраивают секциями по 10...15 м с перекрытием соседних секций на 1...3 м. В таком случае труба с одной стороны опирается на раму временного крепления, а другим – на ненарушенный грунт призабойной зоны [7].

При проектировании конструкции защитного экрана необходимо определение его рациональных параметров, а также прогноз осадки дневной поверхности.

Методы расчета, основанные на подходах сопротивления материалов и строительной механики, позволяют оценить прочность труб защитных экранов, используя расчетные схемы балок на упругом основании. Очевидно, что эти методы не применимы для оценки напряженно-деформированного состояния всех элементов геомеханической системы «массив грунта – обделка тоннеля – экран из труб».

Для решения этой проблемы применяются получившие достаточно широкое распространение в современной практике проектирования подземных сооружений проблемно-ориентированные программные комплексы, реализующие численные методы расчета, например, метод конечных элементов (МКЭ).

Следует отметить, что результаты, получаемые с помощью МКЭ, требуют дополнительной верификации и интерпретации, т.к. существенно зависят от целого ряда специфических факторов. К ним можно отнести квалификацию специалиста, выполняющего расчет, вид применяемой расчетной схемы – плоская или пространственная, размер используемой конечно-элементной области, способы закрепления ее границ и т.д. Результаты расчета одного и того же объекта, выполненные с использованием различных пакетов, реализующих МКЭ, казалось бы, с единых исходных позиций, могут существенно различаться.

Это делает актуальной разработку метода определения напряженно-деформированного состояния элементов рассматриваемой геомеханической системы в рамках дальнейшего развития теории и аналитических методов расчета подземных сооружений, основанного на использовании современных научно-методологических положений геомеханики, механики подземных сооружений [3] и применении математического аппарата комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили [5, 2] для решения соответствующих задач теории упругости. Использование теоретических положений механики сплошных сред делает возможным учет несущей способности грунта и влияния на напряженно-деформированное состояние массива и обделки тоннеля целого ряда факторов: наличие близко расположенной земной поверхности; глубина заложения и размеры поперечного сечения обделки тоннеля; деформационные характеристики массива грунта; поле начальных напряжений в массиве, обусловленных его собственным весом; деформационные характеристики материала обделки; количество труб защитного экрана и размеры их поперечных сечений; расположение труб экрана относительно сечения тоннеля;

деформационные характеристики материала заполнения труб. Помимо этого разработанная модель позволяет учесть ряд технологических факторов - последовательность и очередность монтажа труб экрана и проходки тоннеля; отставание возведения обделки от забоя тоннеля.

Расчетная схема плоской задачи теории упругости приведена на рис. 1.

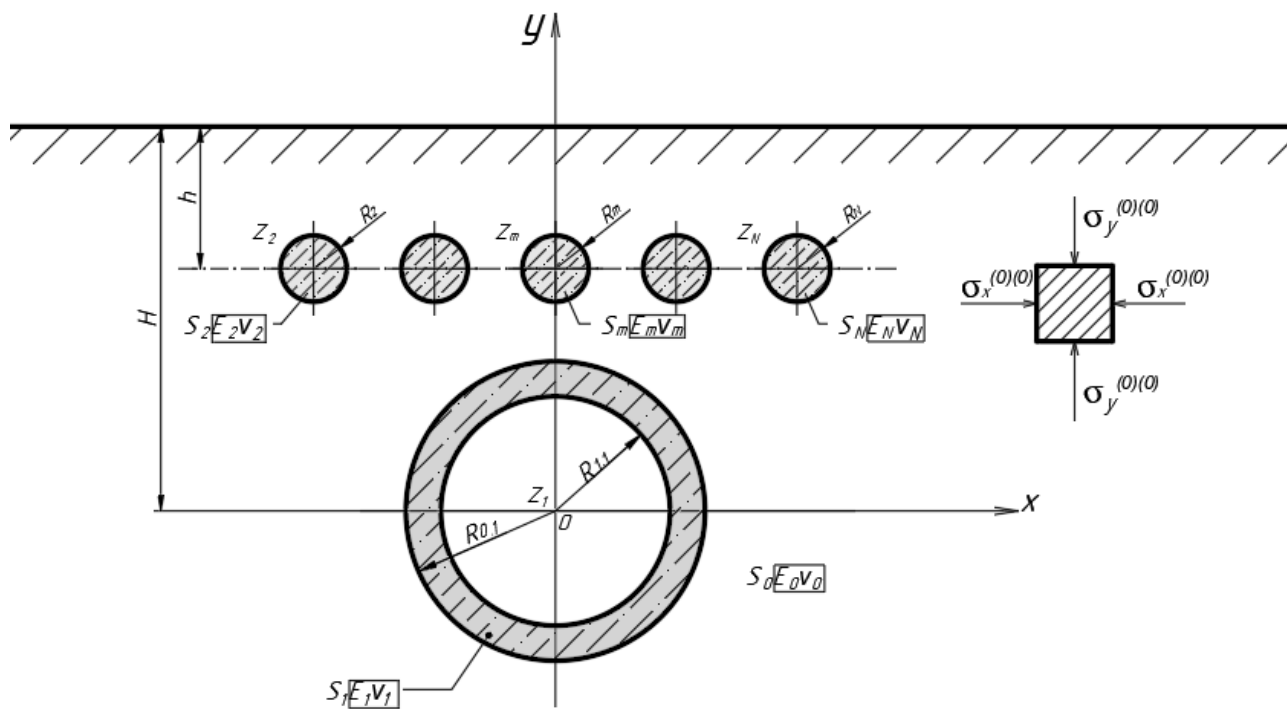


Рис.1. Расчетная схема

Полубесконечная однородная весома линейно-деформируемая среда  $S_0$  ограничена горизонтальной прямой  $L'_0$  и контуром  $L_1$  отверстия радиусом  $R_1$ , моделирующего поперечное сечение выработки тоннеля, а также круговыми включениями с контурами  $L_j$  радиусами  $R_j$  ( $j=2, \dots, N$ ), моделирующими трубы экрана с заполнением.

Центры каждого из отверстий расположены в точках  $z_j = x_j + iy_j$  комплексной плоскости. Начало прямоугольной системы координат  $xOy$  совпадает с центром поперечного сечения отверстия, моделирующего выработку тоннеля, расположенного на расстоянии  $H$  от линии  $L'_0$ .

Среда  $S_0$  характеризуется объемным весом  $\gamma$ , коэффициентом бокового

давления  $\lambda$ , модулем деформации  $E_0$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_0$ .

Отверстие, моделирующее выработку, подкреплено концентрическим кольцом  $S_1$ , с внутренним контуром  $L_{1,1}$  радиусом  $R_{1,1}$ . Материал кольца  $S_1$  имеет модуль деформации  $E_1$  и коэффициент Пуассона  $\nu_1$ . Защитный экран моделируется круговыми включениями  $S_j$  с радиусами  $R_j$  ( $j=2, \dots, N$ ). Области  $S_j$  имеют приведенные деформационные характеристики  $E_j, \nu_j$  ( $j=2, \dots, N$ ), определяемые в соответствии с [3].

Полные напряжения  $\sigma_x^{(0)*}, \sigma_y^{(0)*}, \tau_{xy}^{(0)*}$  в области  $S_0$  представляются в виде:

$$\sigma_x^{(0)*} = \sigma_x^{(0)} + \sigma_x^{(0)(0)}; \sigma_y^{(0)*} = \sigma_y^{(0)} + \sigma_y^{(0)(0)}; \tau_{xy}^{(0)*} = \tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy}^{(0)(0)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x^{(0)}, \sigma_y^{(0)}, \tau_{xy}^{(0)}$  - дополнительные напряжения, обусловленные наличием в среде  $S_0$  подкрепленного отверстия  $S_1$  и включений  $S_j$  ( $j=2, \dots, N$ ), определяемые из решения задачи теории упругости;  $\sigma_x^{(0)(0)}, \sigma_y^{(0)(0)}, \tau_{xy}^{(0)(0)}$  - начальные напряжения в среде  $S_0$ , обусловленные наличием гравитационных сил в ненарушенном массиве грунта. Формулы, учитывающие изменение напряжений по высоте выработки тоннеля мелкого заложения (глубина заложения выработки соизмерима с ее диаметром) в системе координат  $xOy$ , имеют вид [1]:

$$\sigma_y^{(0)(0)} = -\gamma(H - y); \sigma_x^{(0)(0)} = \lambda \sigma_y^{(0)(0)} = -\lambda \gamma(H - y); \tau_{xy}^{(0)(0)} = 0. \quad (2)$$

В областях  $S_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) начальные напряжения отсутствуют, т.е. весом материала обделки и заполнения труб пренебрегаем. Смещения в системе рассматриваются только дополнительные.

Граничные условия задачи имеют вид:

- линия  $L_0$  свободна от действия внешних сил

$$\sigma_y^*|_{y=H} = 0, \tau_{xy}^*|_{y=H} = 0; \quad (3)$$

- на контурах  $L_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) выполняются условия непрерывности векторов полных напряжений и дополнительных смещений в точках границ областей с различными деформационными характеристиками

$$\left. \begin{aligned} &u_i^*|_{L_j} = u_i^*|_{L_j}, \\ &v_i^*|_{L_j} = v_i^*|_{L_j}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

- внутренний контур  $L_{1,1}$  кольца  $S_1$  свободен от действия внешних сил

$$\sigma_r^{(1,1)*} = 0, \tau_{r\theta}^{(1,1)*} = 0. \quad (5)$$

В условиях (3) - (5) использованы следующие обозначения:  $\sigma_y^*, \tau_{xy}^*$  - полные вертикальные и касательные напряжения в декартовой системе координат;  $\sigma_r^{(p)*}, \tau_{r\theta}^{(p)*}$  - полные радиальные и касательные напряжения в полярных системах координат, полюса которых совпадают с центрами отверстия или круговых включений  $S_p$ ;  $u^{(p)}, v^{(p)}$  - радиальные и окружные смещения в точках границ соответствующих областей  $S_p$  ( $p = 0, 1, \dots, N$ ).

Решение задачи теории упругости получено с применением математического аппарата теории аналитических функций комплексного переменного (ТФКП), использующего комплексные потенциалы Колосова-Мусхелишвили, связанные с напряжениями и смещениями известными формулами [5].

Для перехода к соответствующей краевой задаче ТФКП в рассмотрение вводятся следующие пары комплексных потенциалов, характеризующие напряженно-деформированное состояние:  $\tilde{\varphi}_0(z), \tilde{\psi}_0(z)$  - полубесконечной среды  $S_0$ , моделирующей массив грунта;  $\tilde{\varphi}_1(z), \tilde{\psi}_1(z)$  - кольца  $S_1$ , моделирующего обделку тоннеля;  $\varphi_j(z), \psi_j(z)$  - областей  $S_j$  ( $j = 2, \dots, N$ ), моделирующих трубы защитного экрана.

Граничные условия краевой задачи ТФКП имеют вид:

$$\tilde{\varphi}_0(t_0) + t_0 \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_0)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_0)} = 0 \text{ на } L'_0; \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{\varphi}_1(t_1) + t_1 \overline{\tilde{\varphi}_1'(t_1)} + \overline{\tilde{\psi}_1(t_1)} &= \tilde{\varphi}_0(t_1) + t_1 \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_1)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_1)} + A(t_1), \\ \alpha_1 \tilde{\varphi}_1(t_1) - t_1 \overline{\tilde{\varphi}_1'(t_1)} - \overline{\tilde{\psi}_1(t_1)} &= \frac{\mu_1}{\mu_0} [\alpha_0 \tilde{\varphi}_0(t_1) - t_1 \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_1)} - \overline{\tilde{\psi}_0(t_1)}] \end{aligned} \right. \text{ на } L_1; \quad (9)$$

$$\tilde{\varphi}_1(t_{1,1}) + t_{1,1} \overline{\tilde{\varphi}_1'(t_{1,1})} + \overline{\tilde{\psi}_1(t_{1,1})} = 0 \text{ на } L_{1,1}; \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_m(t_m) + t_m \overline{\varphi_m'(t_m)} + \overline{\psi_m(t_m)} &= \tilde{\varphi}_0(t_m) + t_m \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_m)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_m)} + \frac{\mu_m}{\mu_0} [\alpha_0 \tilde{\varphi}_0(t_m) - t_m \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_m)} - \overline{\tilde{\psi}_0(t_m)}], \\ \alpha_m \varphi_m(t_m) - t_m \overline{\varphi_m'(t_m)} - \overline{\psi_m(t_m)} &= \frac{\mu_m}{\mu_0} [\alpha_0 \tilde{\varphi}_0(t_m) - t_m \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_m)} - \overline{\tilde{\psi}_0(t_m)}] \end{aligned} \right. \text{ на } L_m \text{ (} m = 2, \dots, N \text{)}. \quad (11)$$

В условиях (8) - (11) введены обозначения  $t_0 = x + iH$ ;  $\sigma = e^{i\theta}$  - аффикс точки единичной окружности;  $t_m = z_m + R_m \sigma$  ( $m = 1, 2, \dots, N$ );  $t_{1,1} = R_{1,1} \sigma$ ;

$$\alpha_l = 3 - 4\nu_l; \mu_l = \frac{E_l}{2(1+\nu_l)} \text{ (} l = 0, 1, \dots, N \text{)}. \quad (12)$$

Функции  $f_m(t_m)$  в граничных условиях (9), (11), обусловленные наличием в среде  $S_0$  на соответствующих контурах  $L_m$  главных векторов усилий  $X_n^{(0,m)(0)}$ ,  $Y_n^{(0,m)(0)}$  ( $m = 1, 2, \dots, N$ ), определяются по формулам

$$f_m(t_m) = -\frac{\mu R_m^2}{2} \left\{ -i \frac{1-\lambda}{4} \cdot \sigma^{-2} + \frac{H_m}{R_m} (1-\lambda) \cdot \sigma^{-1} + (1+\lambda) \frac{H_m}{R_m} \sigma + \right. \\ \left. + i \frac{1+\lambda}{4} \sigma^2 - i \ln \sigma \right\}. \quad (13)$$

Решение краевой задачи ТФКП получено на основе метода Арамановича И.Г. [2], развитого в работах [9, 10, 1], включающего аналитическое продолжение комплексных потенциалов через границу полуплоскости, использование свойств интегралов типа Коши и рядов Лорана.

Особенностью модифицированного метода является сведение решения поставленной задачи теории упругости для полубесконечной среды, содержащей подкрепленное концентрическим кольцом отверстие и круговые включения, выполненные из материалов с отличающимися деформационными характеристиками, к процессу последовательного решения ряда задач для полной плоскости либо с одним подкрепленным отверстием, либо с одним включением. Граничные условия этих задач имеют вид (9) – (11), в правых частях которых содержатся ряды Лорана с неизвестными коэффициентами, отвечающими за влияние прямолинейной границы, подкрепленного отверстия и остальных включений [1]. Предложенный итерационный процесс решения задачи в целом обладает сходимостью, позволяющей получать результаты при достаточно малых величинах  $H$  и малых расстояниях между включениями.

Полученное аналитическое решение поставленной задачи теории упругости положено в основу метода определения напряженного состояния обделки тоннеля, сооружаемого закрытым способом с использованием защитного экрана из труб в непосредственной близости от земной поверхности, а также оценки деформированного состояния окружающего массива грунта.

В настоящее время разрабатывается оригинальная компьютерная программа расчета, реализующая предлагаемый метод, позволяющая



производить многовариантные расчеты для определения рациональных параметров защитного экрана из труб, необходимых при выборе и обосновании принимаемых технологических решений.

### Список литературы

1. Анциферов С.В. Метод расчета многослойных обделок параллельных тоннелей кругового поперечного сечения мелкого заложения: монография. – Тула: ТулГУ, 2014. – 298 с.
2. Араманович И.Г. О распределении напряжений в упругой плоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием// Докл. АН СССР. - М., 1955. - Т. 104. - №3. - С. 372 - 375.
3. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений: учебник для вузов. - М.: Недра, 1994. - 382 с.
4. Маковский Л.В. Современные технологии проходки в сложных инженерно-геологических условиях. – М.: Метро и тоннели, 2002. №5. - С. 21-23.
5. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. – 707 с.
6. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов/ Под ред. Ильичева В.А. – М.: ГУП НИАЦ, 2004. – 206 с.
7. Рекомендации по применению опережающих экранов из труб при сооружении транспортных тоннелей/ Под ред. Букова Н. Э., Матрохина Г.С. - М.: ЦНИИС, 1988. – 47 с.
8. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. – М.: Минрегион России, 2012. – 112 с.
9. Фотиева Н.Н. Аналитические методы расчета обделок тоннелей мелкого заложения// Подземное строительство России на рубеже XXI века. Труды Юбилейной научно-практической конференции, Москва, 15 – 16 марта 2000 г. – М. – 2000. – С. 123 – 132.

10. Фотиева Н.Н., Саммаль А.С., Анциферов С.В. Оценка прочности обделки тоннеля мелкого заложения при возведении вблизи него сооружения на поверхности// Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2001. – №11. - С. 136 - 138.