

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*

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

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.

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.

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

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-Мухелишвили [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.

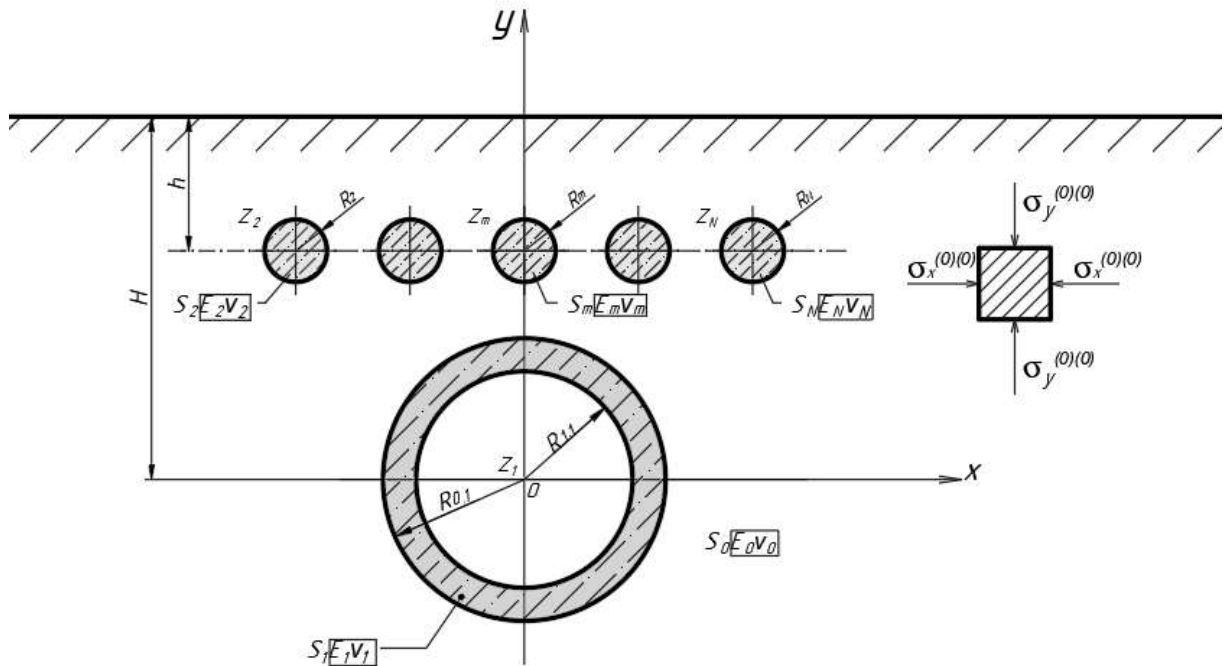


Рис.1. Расчетная схема

Полубесконечная однородная весомая 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 $z_j = x_j + i y_j$ 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 γ , коэффициентом бокового давления λ , модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_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 ν_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, ν_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

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

- 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

$$\begin{cases} \sigma_r^{(j)*} = \sigma_r^{(0)*}, \tau_{r\theta}^{(j)*} = \tau_{r\theta}^{(0)*}; \\ u^{(j)} = u^{(0)}, v^{(j)} = v^{(0)}; \end{cases} \quad (4)$$

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

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

В условиях (3) - (5) использованы следующие обозначения: σ_y^* , τ_{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-Мухелишвили, 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:

$$\overline{\tilde{\varphi}_0(t_0)} + t_0 \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_0)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_0)} = 0 \text{ на } L_0'; \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\tilde{\varphi}_1(t_1)} + t_1 \overline{\tilde{\varphi}_1'(t_1)} + \overline{\tilde{\psi}_1(t_1)} = \overline{\tilde{\varphi}_0(t_1)} + t_1 \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_1)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_1)} + f_1(t_1), \\ \mathfrak{a}_1 \overline{\tilde{\varphi}_1(t_1)} - t_1 \overline{\tilde{\varphi}_1'(t_1)} - \overline{\tilde{\psi}_1(t_1)} = \frac{\mu_1}{\mu_0} \left[\mathfrak{a}_0 \overline{\tilde{\varphi}_0(t_1)} - t_1 \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_1)} - \overline{\tilde{\psi}_0(t_1)} \right] \end{array} \right. \text{ на } L_1; \quad (9)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\varphi_m(t_m)} + t_m \overline{\varphi_m'(t_m)} + \overline{\psi_m(t_m)} = \\ = \overline{\tilde{\varphi}_0(t_m)} + t_m \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_m)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_m)} + f_m(t_m); \text{ на } L_m \text{ (} m=2, \dots, N \text{)}. \\ \mathfrak{a}_m \overline{\varphi_m(t_m)} - t_m \overline{\varphi_m'(t_m)} - \overline{\psi_m(t_m)} = \\ = \frac{\mu_m}{\mu_0} \left[\mathfrak{a}_0 \overline{\tilde{\varphi}_0(t_m)} - t_m \overline{\tilde{\varphi}_0'(t_m)} - \overline{\tilde{\psi}_0(t_m)} \right] \end{array} \right. \quad (11)$$

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

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

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

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

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 полуплоскости, 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.