

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ
МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ
БЕСТРАНШЕЙНЫМ СПОСОБОМ**

О. М. Левищева

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

Развитие и успешное функционирование инфраструктуры крупных городов связано с расширением систем канализации и сооружением само-течных тоннельных коллекторов, имеющих, как правило, круговое поперечное сечение и глубину заложения до нескольких десятков метров. Действующими в настоящее время нормативными документами срок службы таких сооружений установлен в 50 лет. Однако анализ имеющихся в научной литературе данных об условиях эксплуатации канализационных тоннелей показывает, что многие из таких сооружений не обладают достаточной несущей способностью и выходят из строя значительно раньше проектных сроков [1].

Основной причиной аварий в коллекторных тоннелях является разрушение обделок в результате коррозии бетона в высокоагрессивной газовой среде выше зеркала сточных вод, следствием которой является локальное уменьшение толщины подземной конструкции и снижению прочности бетона в ее сводовой части, что с течением времени приводит к потере несущей способности и обрушению сооружения. Это влечет за собой существенный материальный ущерб и создает опасность загрязнения окружающей среды. Ситуация также усугубляется отсутствием резервных коллекторов, по которым можно было бы перепустить стоки на время ре-

монтажных работ в обход аварийных участков. В связи с этим в настоящее время особую актуальность приобретает проблема своевременности и эффективности проведения ремонтно-восстановительных работ в коллекторных тоннелях.

В современных условиях наиболее перспективным способом восстановления изношенных прямолинейных участков коммуникаций является метод «труба в трубе», обеспечивающий полную сохранность инфраструктуры на поверхности при минимальном объеме земляных работ, который предусматривает прокладку внутри тоннелей новых труб из ПВХ. В результате восстановленные обделки коллекторных тоннелей представляют собой трехслойные конструкции, в которых в качестве составляющих элементов можно выделить старую обделку, внутреннюю трубу ПВХ и слой бетонного заполнения. Следует отметить, что на сегодняшний день не существует научно обоснованных методов оценки напряженного состояния и несущей способности реконструированных коллекторных тоннелей, и, следовательно, проблема оценки эффективности восстановления таких сооружений остается актуальной задачей геомеханики.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка нового аналитического метода оценки напряженного состояния обделок коллекторных тоннелей, восстанавливаемых бестраншейным способом.

В основу предлагаемого метода положено строгое решение плоской задачи теории упругости для трехслойного кольца, моделирующего восстановленную обделку коллекторного тоннеля, подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой полубесконечной среде, моделирующей массив грунта (пород). Общая расчетная схема приведена на рисунке.

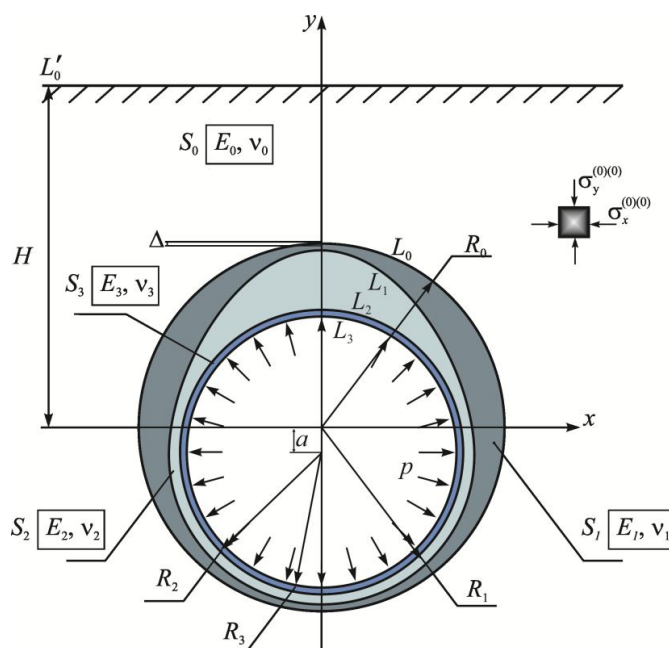


Рис. Расчетная схема обделки коллекторного тоннеля, восстановленного методом «труба в трубе»

Здесь среда S_0 , деформационные свойства которой характеризуются модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 , моделирует массив пород. Кольца переменной толщины S_1 и S_2 , материалы которых имеют деформационные характеристики E_j, ν_j ($j=1, 2$), моделирующие старую обделку тоннеля, подвергшуюся коррозионному повреждению, и дополнительный слой бетона соответственно. Внутреннее кольцо S_3 , имеющее наружный и внутренний радиусы R_2 и R_3 , материал которого обладает деформационными характеристиками E_3, ν_3 , моделирует трубу ПВХ.

Действие собственного веса пород моделируется наличием в области S_0 , моделирующей массив грунта, начальных напряжений, линейно изменяющихся по высоте сооружения, определяемых формулами:

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

где γ – удельный вес пород, H – глубина заложения выработки, λ – коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве, α^* – корректирующий множитель, введенный для учета технологических особенностей сооружения обделки [2].

Давление подземных (грунтовых) вод моделируется наличием в области $S_0+S_1+S_2$ начальных напряжений:

$$\sigma_x^{(0)(0)} = \sigma_y^{(0)(0)} = -\gamma_w(H_w - y), \quad (2)$$

где γ_w – удельный вес грунтовых вод, H_w – уровень грунтовых вод в метрах, отсчитываемый от начала координат.

Полные напряжения в соответствующих областях представляются в виде сумм начальных напряжений (1), (2) и дополнительных, обусловленных наличием отверстия. Смещения рассматриваются только дополнительные.

Внутренний контур L_3 свободен от внешних сил, либо нагружен равномерным нормальным давлением $-p$, моделирующим действие жидкости, заполняющей тоннель (рассматривается наиболее опасный напорный режим работы тоннеля в период водосброса).

Слои кольца S_j ($j = 1, 2, 3$) и среда S_0 деформируются совместно, т. е. на линиях контакта L_j ($j = 0, 1, 2$) выполняются условия непрерывности векторов смещений и полных напряжений.

Решение поставленной задачи получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного, аппарата конформных отображений и свойств комплексных рядов.

После введения комплексных потенциалов $\tilde{\varphi}_j(z)$, $\tilde{\psi}_j(z)$ ($j=0,\dots,3$), характеризующих напряженное состояние областей S_j ($j=0,\dots,3$), связанных с дополнительными напряжениями и смещениями известными формулами Колосова – Мусхелишвили, сформулированные задачи теории упругости сводятся к решению соответствующих краевых задач теории аналитических функций комплексного переменного при граничных условиях:

$$\tilde{\varphi}_0(t) + t \overline{\tilde{\varphi}'_0(t)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t)} = f_0^{(0)}(t) L'_0, \quad (3)$$

$$\tilde{\varphi}_{j+1}(t_j) + t_j \overline{\tilde{\varphi}'_{j+1}(t_j)} + \overline{\tilde{\psi}_{j+1}(t_j)} = \tilde{\varphi}_j(t_j) + t_j \overline{\tilde{\varphi}'_j(t_j)} + \overline{\tilde{\psi}_j(t_j)} - f_j(t_j) \text{ на } L_j \quad (j = 0, \dots, 2), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{j+1} \tilde{\varphi}_{j+1}(t_j) - t_j \overline{\tilde{\varphi}'_{j+1}(t_j)} - \overline{\tilde{\psi}_{j+1}(t_j)} &= \frac{\mu_{j+1}}{\mu_j} \left[\alpha_j \tilde{\varphi}_j(t_j) - t_j \overline{\tilde{\varphi}'_j(t_j)} - \overline{\tilde{\psi}_j(t_j)} \right], \\ \tilde{\varphi}_3(t_3) + t_3 \overline{\tilde{\varphi}'_3(t_3)} + \overline{\tilde{\psi}_3(t_3)} &= -f_3(t_3) \text{ на } L_3, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_j = 3 - 4\nu_j$; $\mu_j = \frac{E_j}{2(1+\nu_j)}$ ($j = 0, \dots, 3$); t_j – аффикс точки контура L_j ($j = 0, \dots, 3$), $f_j(t_j)$ ($j = 0, \dots, 3$) – функции, определяемые в зависимости от вида действующей нагрузки.

Далее с помощью рациональных функций

$$z = \omega_j(\zeta_j) \quad (6)$$

осуществим конформное отображение внешностей единичных окружностей Γ_j в областях переменных ζ_j на внешности контуров L_j ($j = 0, \dots, 3$) в области z .

Принимая во внимание, что наружный контур кольца L_0 имеет круговое очертание, а центр внутреннего кольца S_3 , ограниченного радиусами R_2 , R_3 смещен на расстояние a по вертикали (мнимой оси y) относительно общего начала координат, вводятся следующие представления для точек, принадлежащих соответствующим контурам L_j ($j = 0, \dots, 3$)

$$z = \omega_j(\sigma_j) = \begin{cases} \sigma_0 & i \delta \epsilon j = 0 \\ r_1 \left(\sigma_1 + \sum_{v=0}^n \tilde{q}_v \sigma_1^{-v} \right) & i \delta \epsilon j = 1 \\ r_j \sigma_j + b & i \delta \epsilon j = 2, 3 \end{cases}, \quad (7)$$

где \tilde{q}_v ($v=1, \dots, n$) – коэффициенты, определяются в результате конформного отображения внешности единичного круга на внешность контура L_1 ,

$$r_j = \frac{R_j}{R_0} \quad (j = 0, \dots, 3), \quad b = -\frac{ia}{R_0} \quad (i - \text{мнимая единица}). \quad (8)$$

Граничные условия в преобразованной области (после операции комплексного сопряжения) для всех рассмотренных нагрузок могут быть записаны в общем виде:

$$\bar{\varphi}_{j+1,j}\left(\frac{1}{\sigma}\right) + \frac{\bar{\omega}_j\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'_j(\sigma)}\varphi'_{j+1,j}(\sigma) + \psi_{j+1,j}(\sigma) = \bar{\varphi}_{j,j}\left(\frac{1}{\sigma}\right) + \frac{\bar{\omega}_j\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'_j(\sigma)}\varphi'_{j,j}(\sigma) + \psi_{j,j}(\sigma) - \tilde{\Lambda}_j(\sigma) \quad (j = 0, \dots, 2), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_{j+1}\bar{\varphi}_{j+1,j}\left(\frac{1}{\sigma}\right) - \frac{\bar{\omega}_j\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'_j(\sigma)}\varphi'_{j+1,j}(\sigma) - \psi_{j+1,j}(\sigma) = \\ & = \frac{\mu_{j+1}}{\mu_j} \left[\alpha_j\bar{\varphi}_{j,j}\left(\frac{1}{\sigma}\right) - \frac{\bar{\omega}_j\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'_j(\sigma)}\varphi'_{j,j}(\sigma) - \psi_{j,j}(\sigma) \right] - \tilde{\Omega}_j(\sigma) \end{aligned}$$

$$\bar{\varphi}_{3,3}\left(\frac{1}{\sigma}\right) + \frac{\bar{\omega}_3\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'_3(\sigma)}\varphi'_{3,3}(\sigma) + \psi_{3,3}(\sigma) = \tilde{\Lambda}_3(\sigma), \quad (10)$$

где функции $\tilde{\Lambda}_j(\sigma)$, $\tilde{\Omega}_j(\sigma)$ определяются в зависимости от вида действующей нагрузки.

Таким образом, при решении поставленной задачи необходимо определить 7 пар неизвестных функций $\varphi_{j,j}(\sigma)$, $\psi_{j,j}(\sigma)$ ($j = 0, \dots, 3$), $\varphi_{j+1,j}(\sigma)$, $\psi_{j+1,j}(\sigma)$ ($j = 0, 1, 2$).

В результате, рассматриваемая задача для трехслойного кольца со слоями переменной толщины, сводится к задаче для концентрического трехслойного кругового кольца, подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой среде, при наличии в граничных условиях дополнительных членов, представленных в виде рядов Лорана, которая в предположении, что эти дополнительные члены известны, имеет строгое аналитическое решение. Таким образом, предложенный прием позволяет свести решение исходной задачи к сходящемуся итерационному процессу, при котором в каждом приближении решается соответствующая задача для кругового концентрического трехслойного кольца с дополнительными рядами в граничных условиях, уточняемыми на основе предыдущих приближений (в нулевом приближении коэффициенты $L_k^{(j)(s)}$ ($s = 0, \dots, 3$; $j = 1, \dots, 4$) этих дополнительных рядов полагаются равными нулю). Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока отличия искомых коэффициентов соответственным образом укороченных бесконечных рядов $c_k^{(1)(0)}$ ($k = 1, \dots, N$), $c_k^{(2)(0)}$ ($k = 1, \dots, N + 2$), $c_k^{(j)(s)}$ ($j = 1, 4$; $k = 1, \dots, N$), $c_k^{(j)(s)}$ ($j = 2, 3$; $k = 1, \dots, N + 2$), полученных в двух соседних приближениях, не становятся меньше заданной малой величины ε , например, $\varepsilon = 10^{-6}$.

После отыскания неизвестных коэффициентов рядов напряжения в слоях S_j ($j = 1, \dots, 3$), моделирующих слои обделки, и в среде S_0 , моделирующей массив пород, определяются по формулам Колосова – Мухелишвили. Для проверки точности решения выполняется контроль удовлетворения граничных условий. Если граничные условия выполняются не достаточно точно, число N удерживаемых членов в рядах увеличивается, а величина ε , наоборот, уменьшается. При этом, как показывает опыт, удержание $N = 40$ членов и $\varepsilon = 10^{-6}$ обеспечивают приемлемую для практических целей точность расчета.

Описанное решение реализовано в форме полного алгоритма, на базе которого разработано соответствующее компьютерное программное обеспечение, позволяющее производить эффективные многовариантные расчеты.

Список литературы

1. Дрозд, Г. Я. Надежность канализационных сетей / Г. Я. Дрозд // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995 – № 10. – С. 2–4.
2. Булычев, Н. С. О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах / Н. С. Булычев // Проблемы подземного строительства в XXI в. : мат-лы Междунар. конф. 25–26 апреля 2002 г. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2002. – С. 35–37.
3. Мухелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М. : Наука, 1966. – 708 с.
4. Фотиева, Н. Н. Прогноз снижения несущей способности обделки кругового тоннеля вследствие локального уменьшения ее толщины, обусловленного коррозией бетона / Н. Н. Фотиева, Т. Г. Саммаль // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте : мат-лы IV Междунар. конф. 29–30 июня 1999 г. – СПб., 1999. – С. 197–201.