

## РАСЧЕТ ОБДЕЛОК, СОЗДАВАЕМЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА КОЛЛЕКТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ МЕТОДОМ "ТРУБА В ТРУБЕ"

*А.С. Саммаль, О.М. Левищева, Т.Г. Саммаль, Тульский государственный университет, Россия*

Предлагается аналитический метод определения напряженного состояния трехслойных подземных конструкций, создаваемых в результате восстановительного ремонта бестраншейным способом коллекторных тоннелей глубокого заложения. Метод иллюстрируется примерами расчета.

Опыт эксплуатации коммунальных коллекторных тоннелей показывает, что основной причиной их аварий является снижение несущей способности обделок в результате локальных разрушений, приводящих к уменьшению толщины подземной конструкции в лотке, обусловленному истирающим действием находящихся в сточных водах абразивных частиц, и в сводовой части обделки, вследствие биохимической коррозии бетона в высокоагрессивной газовой среде выше уровня стоков [1]. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяется разработке новых способов ремонта обделок коллекторных тоннелей, в том числе - выполняемого без вывода подземного сооружения из эксплуатации.

На сегодняшний день одним из перспективных направлений в технологиях восстановления коллекторных тоннелей является метод «труба в трубе», который позволяет производить ремонтные работы без вскрытия грунта по длине тоннеля и гарантирует сохранность всей инфраструктуры на поверхности. При этом в ходе ремонта внутри старой поврежденной обделки протягивается пластиковая труба, а имеющий место зазор заполняется связующим раствором (как правило, на основе цемента). В результате создается новая трехслойная подземная конструкция, несущая способность которой определяется степенью изношенности старой бетонной обделки, а также параметрами прокладываемой пластиковой трубы и свойствами применяемого материала заполнения.

Следует отметить, что в настоящее время не существует научно-обоснованных методов определения несущей способности реконструированных обделок коллекторных тоннелей, и, следовательно, проблема оценки эффективности восстановительного ремонта подземных сооружений методом «труба в трубе» остается актуальной. В связи с этим в Тульском государственном университете в течение ряда лет ведутся исследования, направленные на разработку теории и методов оценки напряженного состояния таких сооружений. В настоящей работе предлагается новый аналитический метод расчета обделок, создаваемых в результате восстановительного ремонта круговых коллекторных тоннелей глубокого заложения. В основу предлагаемого метода положено строгое решение плоской задачи теории упругости для трехслойного кольца, моделирующего обделку тоннеля, подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой бесконечной среде, моделирующей массив грунта (пород). Общая расчетная схема приведена на рис. 1.

Здесь среда  $S_0$ , деформационные свойства которой характеризуются модулем деформации  $E_0$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_0$ , моделирует массив пород. Кольца переменной толщины  $S_1$  и  $S_2$ , материалы которых имеют деформационные характеристики  $E_j, \nu_j$  ( $j=1, 2$ ), моделируют старую обделку тоннеля, подвергшуюся повреждению в процессе эксплуатации, и заполняющий слой соответственно (принимается, что первоначально тоннель имел круглое поперечное сечение, поэтому наружный контур  $L_0$  представляет собой окружность). Внутреннее круговое кольцо  $S_3$ , имеющее наружный и внутренний радиусы  $R_2$  и  $R_3$ , выполненное из материала с деформационными характеристиками  $E_3, \nu_3$ , моделирует трубу ПВХ. Центр кольца  $S_3$  сдвинут вниз по вертикали относительно общего начала координат, совпадающего с центром контура  $L_0$ ,

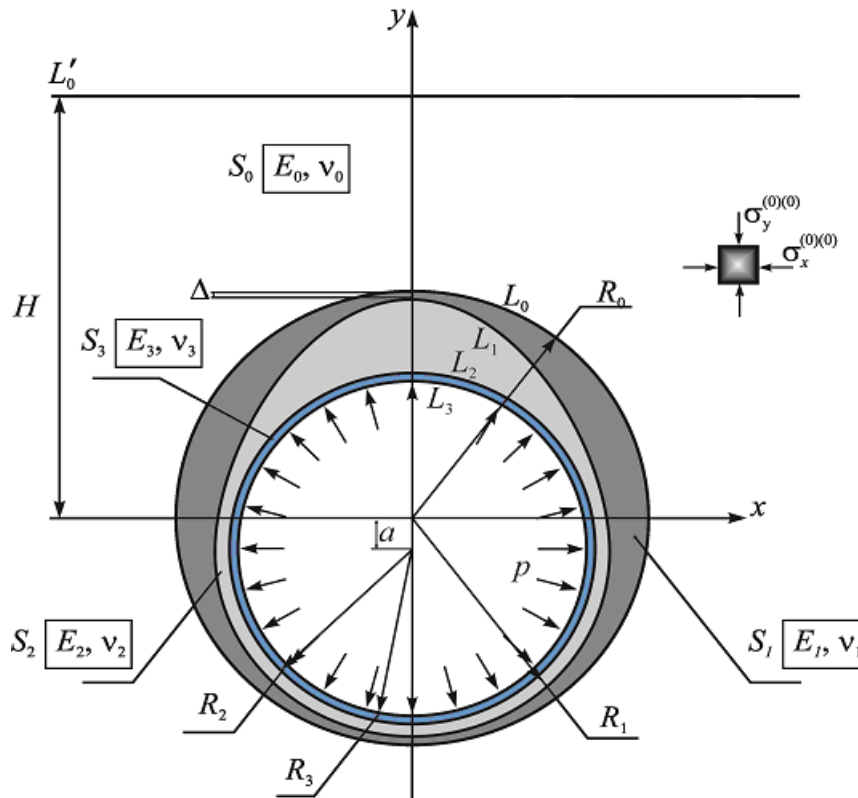


Рис. 1. Расчетная схема обделки коллекторного тоннеля восстановленного методом «труба в трубе»

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 смещение и полных напряжений.

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).

Рассматривается случай глубокого заложения тоннеля, который с точки зрения моделирования напряженного состояния подземной конструкции является более простым, поскольку при больших глубинах принято использовать допущение о том, что величина ординаты  $y$  по сравнению со значительно превосходящей ее глубиной  $H$  считается пренебрежимо малой, при этом можно отказаться от точного выполнения условия на границе  $L'_0$ , то есть определять компоненты напряжений не в полуплоскости, а в бесконечной плоскости [2].

Таким образом, действие собственного веса пород моделируется наличием в области  $S_0+S_1$  начальных напряжений, определяемых формулами:

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

где  $\gamma$  – удельный вес пород,  $H$  – глубина заложения выработки,  $\lambda$  – коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве,  $\alpha^*$  - корректирующий множитель, введенный для учета технологических особенностей сооружения обделки [2].

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

На первом этапе с помощью рациональной функции

$$z = R_1\omega(\zeta) = R_1\left(\zeta + \sum_{v=1}^{n+1} q_v \zeta^{1-v}\right), \quad (2)$$

осуществляется конформное отображение внешности единичной окружности в плоскости переменной  $\zeta$  на внешность контура  $L_1$  в плоскости переменной  $z$  ( $R_1$  – средний радиус не-

кругового контура  $L_1$ ).

Далее, 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  $L_j$  ( $j=0, \dots, 3$ ),

$$t = \begin{cases} R_0\sigma, & \text{на } L_0 \\ R_1\omega(\sigma), & \text{на } L_1 \\ R_j\sigma - ia, & \text{на } L_j \ (j = 2, 3) \end{cases} \quad (3)$$

здесь  $\sigma = e^{i\theta}$  - точка единичной окружности.

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 следующих граничных условиях [3]:

- на  $L_j$  ( $j = 0, 1, 2$ )

$$\tilde{\varphi}_{j+1}(t) + t\overline{\tilde{\varphi}'_{j+1}(t)} + \overline{\tilde{\psi}_{j+1}(t)} = \tilde{\varphi}_j(t) + t\overline{\tilde{\varphi}'_j(t)} + \overline{\tilde{\psi}_j(t)} + f_j(t), \quad (4)$$

$$\alpha_{j+1}\tilde{\varphi}_{j+1}(t) - t\overline{\tilde{\varphi}'_{j+1}(t)} - \overline{\tilde{\psi}_{j+1}(t)} = \frac{\mu_{j+1}}{\mu_j} [\alpha_j\tilde{\varphi}_j(t) - t\overline{\tilde{\varphi}'_j(t)} - \overline{\tilde{\psi}_j(t)}];$$

- на  $L_3$

$$\tilde{\varphi}_3(t) + t\overline{\tilde{\varphi}'_3(t)} + \overline{\tilde{\psi}_3(t)} = f_3(t) \quad (5)$$

Здесь  $\mu_j = \frac{E_j}{2(1 + \nu_j)}$ ,  $\alpha_j = 3 - 4\nu_j$  ( $j = 0, \dots, 3$ ), функции  $f_j(t)$  ( $j = 0, \dots, 3$ ) определяются в зависимости от рассматриваемого вида нагружения [3].

Таким образом, поставленная задача сводится к отысканию трех пар комплексных потенциалов  $\tilde{\varphi}_j(z)$ ,  $\tilde{\psi}_j(z)$  ( $j = 0, \dots, 3$ ) и решается так же, как описано в работе [4].

В силу отсутствия в общем случае геометрической и силовой симметрии задачи относительно действительной оси  $x$  искомые потенциалы представляются в виде [3]

$$\tilde{\varphi}_j(z) = -\frac{X + iY}{2\pi(1 + \alpha_j)} \ln z + \varphi_j(z), \quad \tilde{\psi}_j(z) = \alpha_j \frac{X - iY}{2\pi(1 + \alpha_j)} \ln z + \psi_j(z), \quad (6)$$

где  $X + iY$  - главный вектор действующих сил,  $\varphi_j(z)$ ,  $\psi_j(z)$  - функции регулярные в соответствующих областях  $S_j$  ( $j = 0, \dots, 3$ )

Функции  $\varphi_0(z), \psi_0(z)$ , регулярные вне окружности  $L_0$ , отыскиваются в виде

$$\varphi_0(z) = \sum_{\nu=1}^{\infty} c_{\nu}^{(1)(0)} \left(\frac{z}{R_0}\right)^{-\nu}; \quad \psi_0(z) = \sum_{\nu=0}^{\infty} c_{\nu}^{(2)(0)} \left(\frac{z}{R_0}\right)^{-\nu}. \quad (7)$$

В свою очередь, потенциалы  $\varphi_1(z)$ ,  $\psi_1(z)$ , регулярные в кольце  $S_1$ , представляются на его контурах следующим образом:

- на контуре  $L_0$

$$\varphi_1(t) = \varphi_{1,0}(\sigma) = \sum_{\nu=1}^{\infty} c_{\nu}^{(1)(1)} \sigma^{-\nu} + \sum_{\nu=0}^{\infty} c_{\nu}^{(3)(1)} \sigma^{\nu}, \quad (8)$$

$$\psi_1(t) = \psi_{1,0}(\sigma) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(2)(1)} \sigma^{-k} + \sum_{v=0}^{\infty} c_v^{(4)(1)} \sigma^k ,$$

–на контуре  $L_1$

$$\varphi_1(t) = \varphi_1[R_1\omega(\sigma)] = \varphi_{1,1}(\sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(1)} \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^{-k} [\omega(\sigma)]^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(1)} \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^k [\omega(\sigma)]^k , \quad (9)$$

$$\psi_1(t) = \psi_1[R_1\omega(\sigma)] = \psi_{1,1}(\sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(2)(1)} \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^{-k} [\omega(\sigma)]^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(4)(1)} \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^k [\omega(\sigma)]^k .$$

Далее, используются представления

$$\begin{aligned} [\omega(\sigma)]^{-k} &= \sigma^{-k} + \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(-k)} \sigma^{-v-k} \quad (k = 1, \dots, \infty) \\ [\omega(\sigma)]^k &= \sigma^k + \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(k)} \sigma^{k-v} \quad (k = 0, \dots, \infty), \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты  $q_v^{(k)}$  ( $k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty, v = 1, \dots, \infty$ ) находятся по известным рекуррентным формулам Д.И.Шермана.

В результате, после подстановки соотношений (10) в формулы (9) с учетом выражений (8) удается записать на  $L_1$

$$\begin{aligned} \varphi_{1,1}(\sigma) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(1)} \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^{-k} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(1)} \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(-k)} \sigma^{-k-v} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(1)} \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^k \sigma^k + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(3)(1)} \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(k)} \sigma^{k-v} = \varphi_{1,0} \left( \frac{R_1}{R_0} \sigma \right) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(1)(1)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(3)(1)} \sigma^k \end{aligned} \quad (11)$$

и аналогично

$$\psi_{1,1}(\sigma) = \psi_{1,0} \left( \frac{R_1}{R_0} \sigma \right) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(2)(1)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(4)(1)} \sigma^k , \quad (12)$$

где  $C_k^{(l)(1)}$  ( $l = 1, \dots, 4; k = 1, \dots, \infty$ ) –коэффициенты комплексных рядов, характеризующих отличие контура  $L_1$  от кругового.

Потенциалы  $\varphi_j(z), \psi_j(z)$  ( $j = 2, 3$ ), регулярные в кольцах  $S_j$  ( $j = 2, 3$ ), представляются аналогичным образом:

$$\varphi_j(t) = \varphi_{j,s} \left( \frac{R_s}{R_0} \sigma \right) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(j)} \left( \frac{R_s}{R_0} \right)^{-k} \sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(j)} \left( \frac{R_s}{R_0} \right)^k \sigma^k + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(1)(s)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(3)(s)} \sigma^k \quad (13)$$

$$\psi_j(t) = \psi_{j,s} \left( \frac{R_s}{R_0} \sigma \right) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(2)(j)} \left( \frac{R_s}{R_0} \right)^{-k} \sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(4)(j)} \left( \frac{R_s}{R_0} \right)^k \sigma^k + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(2)(s)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(4)(s)} \sigma^k ,$$

здесь  $C_k^{(l)(s)}$  ( $l = 1, \dots, 4; k = 1, \dots, \infty$ ) –коэффициенты комплексных рядов, характеризующих отличие контура  $L_1$  от кругового (при  $s=1$ ), а также сдвигку круговых контуров  $L_s$  ( $s = 2, 3$ ) относительно общего начала координат.

Далее, с целью общности записи вводя на  $L_0$  вытекающие из (7) представления

$$\varphi_0(t) = \varphi_{0,0}(\sigma) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(1)(0)} \sigma^{-k}, \quad \psi_0(t) = \psi_{0,0}(\sigma) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(2)(0)} \sigma^{-k}, \quad (14)$$

и используя обозначения  $r_j = \frac{R_j}{R_0}$  ( $j=0, \dots, 3$ ), граничные условия (4)–(5) с учетом соотношений (6), (8)–(14) можно представить в виде

$$\overline{\varphi_{j+1,j}(r_j\sigma) + r_j\sigma\overline{\varphi'_{j+1,j}(r_j\sigma)} + \overline{\psi_{j+1,j}(r_j\sigma)}} = \overline{\varphi_{j,j}(r_j\sigma) + r_j\sigma\overline{\varphi'_{j,j}(r_j\sigma)} + \overline{\psi_{j,j}(r_j\sigma)}} + \sum_{k=1}^{\infty} (L_k^{(1)(j)} + \tilde{L}_k^{(1)(j)})\sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} (L_k^{(3)(j)} + \tilde{L}_k^{(3)(j)})\sigma^k \quad (15)$$

при  $j=0, 1, 2$

$$\begin{aligned} \overline{\varphi_{j+1,j}(r_j\sigma) - \frac{R_j}{R_0}\sigma\overline{\varphi'_{j+1,j}(r_j\sigma)} - \overline{\psi_{j+1,j}(r_j\sigma)}} = \frac{\mu_{j+1}}{\mu_j} \left[ \overline{\varphi_{j,j}(r_j\sigma) - r_j\sigma\overline{\varphi'_{j,j}(r_j\sigma)} - \overline{\psi_{j,j}(r_j\sigma)}} \right] \\ + \sum_{k=1}^{\infty} (L_k^{(2)(j)} + \tilde{L}_k^{(2)(j)})\sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} (L_k^{(4)(j)} + \tilde{L}_k^{(4)(j)})\sigma^k \end{aligned}$$

$$\overline{\varphi_{3,3}(r_3\sigma) + r_3\sigma\overline{\varphi'_{3,3}(r_3\sigma)} + \overline{\psi_{3,3}(r_3\sigma)}} = \sum_{k=1}^{\infty} (L_k^{(1)(3)} + \tilde{L}_k^{(1)(3)})\sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} (L_k^{(3)(3)} + \tilde{L}_k^{(3)(3)})\sigma^k \quad (16)$$

где комплексные коэффициенты  $\tilde{L}_k^{(j)(s)}$  ( $j=1, \dots, 4$ ;  $s=0, \dots, 3$ ;  $k=0, \dots, \infty$ ) рядов в правых частях условий (15)–(16) определяются в зависимости от вида рассматриваемой нагрузки, а ряды с коэффициентами  $L_k^{(j)(s)}$  ( $j=1, \dots, 4$ ;  $s=0, \dots, 3$ ;  $k=0, \dots, \infty$ ) отражают влияние отличия внутреннего контура  $L_1$  от кругового, а также сдвижки центра контуров  $L_s$  ( $s=2, 3$ ) относительно общего начала координат.

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 искомым 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  $\varepsilon$ , 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 (при этом, как показывает

опыт, удержание  $N=40$  членов обеспечивает достаточную для практических целей точность расчета), а величина  $\varepsilon$ , наоборот, уменьшается.

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

Ниже в качестве иллюстрации приводится пример определения напряжений в обделке коллекторного тоннеля, восстановленного бестраншейным методом, при действии гравитационных сил в массиве. Принимается, что вследствие газовой коррозии бетона в процессе эксплуатации тоннеля в сводовой его части образовалась локальная зона разрушения, в которой толщина конструкции уменьшилась до 0.05 м. При восстановительном ремонте предполагается прокладка внутри старой обделки трубы из ПВХ Flowtite, причем труба укладывается на лоток старой обделки с небольшим зазором. Пространство между внутренней трубой и обделкой заполняется цементным раствором.

При расчете использовались следующие исходные данные:  $R_0= 1.25$  м,  $R_1= 1.0$  м,  $R_2= 0.924$  м,  $R_3= 0.9$  м;  $a=0.06$  м,  $E_0= 1500$  МПа,  $\nu_0= 0.3$ ;  $E_1= 30000$  МПа,  $\nu_1= 0.2$ ;  $E_2= 17000$  МПа,  $\nu_2=0.2$ ;  $E_3= 5000$  МПа,  $\nu_3= 0.25$ ,  $\lambda=0.6$ .

Результаты расчета представлены на рис. 2, а,б в виде эпюр безразмерных (в долях величины  $\gamma H \alpha^*$ ) расчетных нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем  $\sigma_{\theta}^{(in)}$  и наружном  $\sigma_{\theta}^{(ex)}$  контурах трубы (рис. 2, а), а также в материале заполнителя на контурах, контактирующих с трубой и старой обделкой, обозначенные, как  $\tilde{\sigma}_{\theta}^{(in)}$ ,  $\tilde{\sigma}_{\theta}^{(ex)}$  соответственно (рис. 2,б). В силу симметрии каждая из эпюр дана для половины сечения.

Как следует из приведенных результатов, имевшее место до ремонта локальное уменьшение толщины в сводовой части бетонной обделки оказывает влияние на распределение напряжений в прокладываемой трубе из ПВХ и в слое заполнения. Это обстоятельство, которое может оказаться весьма существенным в других горно-геологических условиях и при применении материалов с другими свойствами, необходимо учитывать при проектировании восстановительного ремонта коллекторных тоннелей бестраншейным способом.

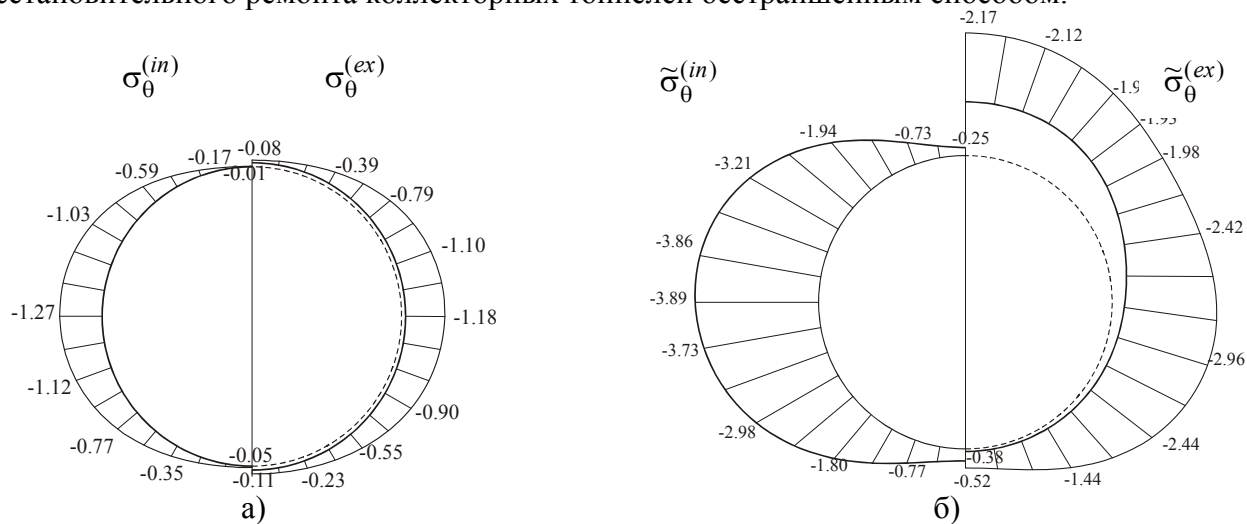


Рис. 2. Расчетные напряжения на контурах поперечного сечения элементов созданной в ходе ремонта обделки коллекторного тоннеля  
а – в трубе ПВХ, б – в слое заполнителя

В заключение отметим, что вычисленные напряжения в соответствии с принципом суперпозиции должны быть просуммированы с результатами расчета на другие виды воздействий (в самых неблагоприятных сочетаниях), после чего может быть произведена оценка несущей способности обделки.

### Список литературы

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЛОКАЛЬНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ СВОДЧАТОГО СЕЧЕНИЯ**

*А.С. Саммаль, О.А. Соловьева, О.В. Афанасова, Тульский государственный университет, Россия*

Приводится описание разработанного авторами аналитического метода расчета обделок тоннелей произвольного поперечного сечения на действие внутреннего локального вертикального давления, и анализируются результаты выполненных с использованием этого метода исследований влияния основных факторов на напряженное состояние обделки сводчатого очертания.

При проектировании тоннелей, особенно сооружаемых в сложных горнотехнических условиях, особую актуальность приобретают вопросы учета влияния внутренних нагрузок большой интенсивности, распределенных локально по контуру выработки, на несущую способность подземной конструкции. К таким нагрузкам можно отнести, например, вес тяжелой техники и складированных материалов, нагрузки от движущихся в тоннеле транспортных средств, усилий домкратов, подъемных устройств и пр. Очевидно, обоснованная оценка влияния таких воздействий на прочность подземных сооружений, необходима для принятия эффективных проектных решений, связанных с их усилением путем локального увеличения толщины конструкции или коэффициента армирования опасных ее сечений.

В настоящей работе на основе обобщения накопленного в Тульском государственном университете опыта математического моделирования напряженного состояния подземных сооружений при различных видах воздействий [1, 2] предлагается новый, базирующийся на современных представлениях геомеханики о взаимодействии подземной конструкции и окружающего массива горных пород как элементов единой деформируемой системы, аналитический метод расчёта обделок тоннелей произвольного поперечного сечения на действие внутреннего вертикального равномерного давления, распределенного по части контура обделки<sup>\*)</sup>.

---

<sup>\*)</sup> Работа выполнена при поддержке грантом МК-164.2009.5