

УДК 624.191.6

Н.С. Булычёв, П.В. Школьников

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫБОР
Ж.Б. ТРУБ ДЛЯ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ**

Приводятся расчёты основных параметров обделки микротоннеля на действия собственного веса грунта, нагрузок на тоннель с поверхности земли и осевых усилий от домкратных станций. Также приведена методика выбора расчётным путём сечения арматуры для стального каркаса продавливаемой железобетонной трубы и количества промежуточных домкратных станций.

Ключевые слова: микротоннель, многослойное кольцо, теория упругости, осевое усилие, сечение арматуры, домкратная станция.

В период строительства тоннель, сооружаемый методом микротоннелирования, испытывает нагрузки не только от массива пород и сооружений, находящихся на поверхности над тоннелем, но и значительные осевые давления от домкратных станций, которые носят кратковременный характер. В период эксплуатации микротоннель нагружен только массивом пород и сооружениями на поверхности. При выборе железобетонной трубы для сооружения тоннеля сочетание эксплуатационных нагрузок и осевых усилий от домкратных установок являются решающими факторами.

Предлагаемая методика определения напряженного состояния обделок тоннелей для микротоннелирования при действии собственного веса грунта основана на современных представлениях механики подземных сооружений [1] о взаимодействии подземной конструкции и окружающего массива пород как элементов единой деформируемой системы и представлена поэтапно (см. рис. 1).

Первый этап. Определяем нагрузки на тоннель от массива пород.

Исходными данными для расчёта на действие собственного веса грунта служат геометрические размеры микротоннеля (радиусы слоёв R_i). Модули деформации E_i и коэффициенты Пуассона ν_i слоёв, параметры начального поля напряжений γH и λ .

1. Определяем начальное поле напряжения:

$$\sigma_r^{(0)} = p_0^{(0)} + p_2^{(0)} \cos 2\theta; \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = q_2^{(0)} \sin 2\theta,$$

где $p_0^{(0)} = \gamma H \frac{1+\lambda}{2}$, $p_2^{(0)} = \gamma H \frac{1-\lambda}{2}$, $q_2^{(0)} = -p_2^{(0)} = -\gamma H \frac{1-\lambda}{2}$

2. Находим дополнительное поле напряжений:

$$\sigma_r^{(1)} = p_0^{(1)} + p_2^{(1)} \cos 2\theta \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = q_2^{(1)} \sin 2\theta,$$

где $p_0^{(1)} = -\gamma H \frac{1+\lambda}{2}$ $p_2^{(1)} = -\gamma H \frac{1-\lambda}{2}$ $q_2^{(1)} = \gamma H \frac{1-\lambda}{2}$

3. Определяем коэффициенты передачи напряжений на контурах слоёв кольца по следующим формулам, причём для каждого i -того слоя отдельно, начиная с внешнего, равного нулю:

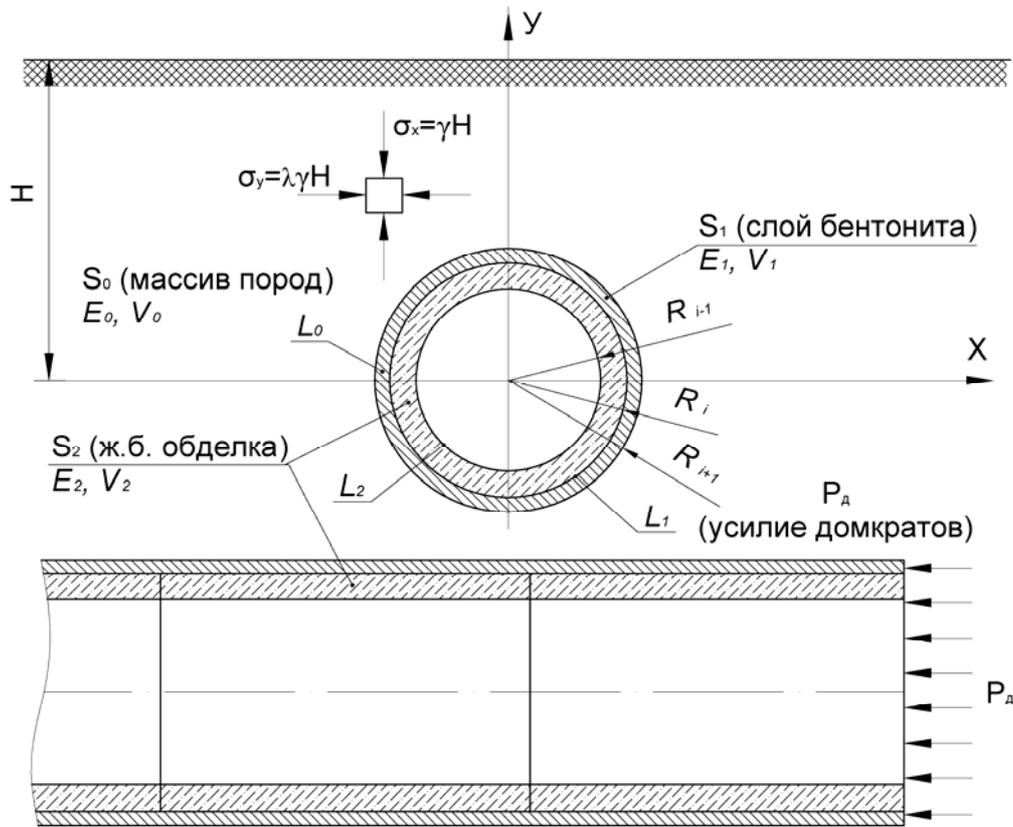


Рис. 1. Общая расчётная схема: R_{i+1} , R_i , R_{i-1} – радиусы слоев кольца (м); E_i ($i = 1, 2$) – модули деформации материалов слоев кольца (МПа); ν_i ($i = 1, 2$) – коэффициенты Пуассона материалов слоев кольца; λ – коэффициент бокового давления в ненарушенном массиве грунта; H – глубина заложения тоннеля (м); γ – удельный вес грунта ($кН/м^3$); θ – угол поворота (градусы).

$$K_{0(i)}^* = \frac{d'_{2(i)}}{d'_{1(i)} + \chi_0 (d'_{2(i+1)} - K_{0(i+1)}^* d'_{1(i+1)})}$$

$$K_{11(i-1)}^* = \frac{(b_3 + 3b_3') - (a_3 + 3a_3')}{(b_1 + 3b_1') - (a_1 + 3a_1')}; \quad K_{12(i-1)}^* = \frac{(b_4 + 3b_4') - (a_4 + 3a_4')}{(b_1 + 3b_1') - (a_1 + 3a_1')};$$

$K_{21(i-1)}^* = K_{22(i-1)}^* = 0$ (т.к. $q_{2(i)} = 0$, условие работы бентонитовой рубашки)

где $a_1 = c^2(c^2 + 3)$; $a'_1 = c^2(2c^4 + c^2 + 1)$; $a_2 = c^2(3 - c^2)$; $a'_2 = c^2(c^2 + 1)$;
 $a_3 = 3c^2 + 1 + D$; $a'_3 = 2c^2 + c^6 + c^4 - D$; $a_4 = 3c^2 - 1 - D$; $a'_4 = c^4(c^2 + 1) - D$;
 $b_1 = c^4(3 - c^2) + D$; $b'_1 = 2c^4 + c^2 + 1 + D$; $b_2 = c^4(3 - c^2) + D$; $b'_2 = c^2 + 1 + D$;
 $b_3 = c^2(3c^2 + 1)$; $b'_3 = c^2(c^2 + 1) + 2$; $b_4 = c^2(3c^2 - 1)$; $b'_4 = c^2(c^2 + 1)$;

$$D = \frac{(c^2 - 1)^3}{\aleph + 1}, \quad \aleph = 3 - 4\nu, \quad c = R_1/R_2.$$

$$d_1 = c^2(\aleph + 1); \quad d_2 = 2c^2 + \aleph - 1; \quad d'_1 = c^2(\aleph - 1) + 2; \quad d'_2 = \aleph + 1.$$

4. Зная коэффициенты передачи напряжений, находим дополнительные напряжения на контурах слоёв:

$$\text{при } r=R_1: p_{0(1)}^{(1)} = -\gamma H \frac{1+\lambda}{2} K_{0(1)}^*; p_{2(1)}^{(1)} = -\gamma H \frac{1-\lambda}{2} (K_{11(1)}^* - K_{12(1)}^*)$$

$$\text{при } r=R_2: p_{0(2)}^{(1)} = -\gamma H \frac{1+\lambda}{2} K_{0(1)}^* \cdot K_{0(2)}^*; p_{2(2)}^{(1)} = -\gamma H \frac{1-\lambda}{2} \cdot (K_{11(1)}^* - K_{12(1)}^*) (K_{11(2)}^* - K_{12(2)}^*)$$

5. Дополнительные напряжения на контактах слоёв суммируются с начальными напряжениями, и получаем полные контактные напряжения:

$$\text{при } r=R_1: p_{0(1)} = \gamma H \frac{1+\lambda}{2} (1 - K_{0(1)}^*); p_{2(1)} = \gamma H \frac{1-\lambda}{2} (1 - K_{11(1)}^* + K_{12(1)}^*)$$

$$\text{при } r=R_2: p_{0(2)} = \gamma H \frac{1+\lambda}{2} (1 - K_{0(1)}^* K_{0(2)}^*); p_{2(2)} = \gamma H \frac{1-\lambda}{2} (1 - (K_{11(2)}^* + K_{12(2)}^*) (K_{11(1)}^* + K_{12(1)}^*))$$

6. По величине полных напряжений на контактах слоёв определяем нормальные тангенциальные напряжения в каждом слое обделки микротоннеля:

$$\text{при } r=R_{i-1}: \sigma_\theta = p_{0(i)} m_1 - p_{0(i-1)} m_2 - (p_{2(i)} n_1 - q_{2(i)} n_2 - p_{2(i-1)} n_3 + q_{2(i-1)} n_4) \cos 2\theta$$

$$\text{при } r=R_i: \sigma_\theta = p_{0(i)} m'_1 - p_{0(i-1)} m'_2 - (p_{2(i)} n'_1 - q_{2(i)} n'_2 - p_{2(i-1)} n'_3 + q_{2(i-1)} n'_4) \cos 2\theta$$

где $m_1 = \frac{2c^2}{c^2-1}$; $m_2 = \frac{c^2+1}{c^2-1}$; $m'_1 = m_2$; $m'_2 = \frac{2}{c^2-1}$. $n_1 = 4c^2 \frac{c^2+1}{(c^2-1)^2}$; $n_2 = \frac{4c^2}{(c^2-1)^2}$;
 $n_3 = \frac{c^4+6c^2+1}{(c^2-1)^2}$; $n_4 = 2 \frac{c^4+2c^2-1}{(c^2-1)^2}$; $n'_1 = n_3$; $n'_2 = 2 \frac{2c^2-c^4+1}{(c^2-1)^2}$; $n'_3 = 4 \frac{c^2+1}{(c^2-1)^2}$; $n'_4 = n_2$.

По данному алгоритму можно составить программу для вычисления нормальных тангенциальных напряжений в каждом слое обделки микротоннеля, варьируя различными величинами (глубиной заложения, геометрическими размерами тоннеля, слоями обделок, начальными напряжениями).

Второй этап. Определяем дополнительные нагрузки на тоннель, действующие с поверхности земли.

Дополнительная приведённая нагрузка от воздействия на тоннель авто- и железнодорожного транспорта [2] вычисляется по формуле:

$$P_{прив} = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arctg \frac{H}{a} - \frac{H/a}{1 + \left(\frac{H}{a}\right)^2} \right) \cdot P \cdot (1+\mu)$$

где H – глубина заложения тоннеля, м; a – половина размера приложенной к земной поверхности нагрузки вдоль оси тоннеля, м; P – действительная нагрузка на поверхности земли;

Коэффициент (1+μ) учитывает динамическое воздействие на обделку нагрузки типа НК-80 (колёсный транспорт), НГ-60 (гусеничный транспорт) и СК-14 (железнодорожный транспорт).

Третий этап. По расчётному сопротивлению бетона сжатию определяем диаметр арматуры для арматурного каркаса под расчётную нагрузку.

Расчёт производится согласно п. 3.15 [3]. Вычисляем значение α_m :

$$\alpha_m = \frac{M}{R_b b h_0^2}$$

где M – расчётный максимальный изгибающий момент, кН·м; R_b – расчётное сопротивление бетона сжатию для предельных состояний первой группы,

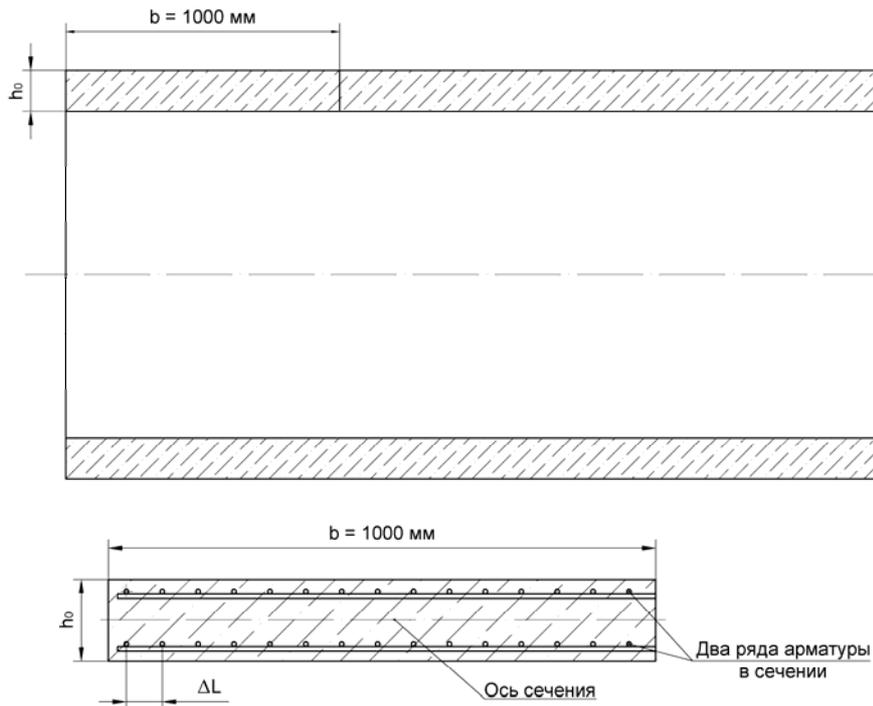


Рис. 2. Расчётная схема для определения шага навивки арматуры

МПа; h_0 – рабочая высота сечения (толщина трубы), мм; b – ширина сечения (по длине трубы), равная 1000 мм (см. рис. 2).

При заданном значении α_m находим по таблице в пособии значение ζ . Необходимую общую площадь сечения арматуры определяем по формуле:

$$A_s = \frac{M \cdot 10^6}{R_s \cdot \zeta \cdot h_0}$$

Т.к. растянутая зона может располагаться как внутри, так и снаружи обделки трубы, арматуру второго ряда принимаем такой же.

Следовательно, полученную общую площадь сечения арматуры делим на два ряда. Варьируя диаметром (от 6 до 12 мм) или количеством витков, подбираем шаг армирования $A'_s = \frac{A_s}{2}$, где A'_s – общая площадь армирования на один ряд в расчётном сечении.

Определяем количество витков K на один погонный метр обделки:

$$K = \frac{A'_s}{A_{\text{арм}}}$$

где $A_{\text{арм}}$ – площадь принятого сечения одного витка арматуры для кольцевой навивки.

Определяем шаг армирования ΔL :

$$\Delta L = \frac{b}{K}$$

Четвёртый этап. Проверяем условие прочности обделки трубы на воздействие от домкратных установок.

Необходимые данные для расчёта труб на действие усилий от домкратной станции следующие: N – максимальное усилие домкратов, действующее на торец трубы (МН); F – площадь поперечного сечения трубы (м^2); E – модуль деформации бетона (МПа); $[\sigma]$ – предел прочности бетона на сжатие (МПа); t – толщина обделки (стен трубы) (м); r – средний радиус обделки (стен трубы) (м); b – длина трубы (м).

1. Условие соблюдения прочности обделки (стенки трубы) в зависимости от осевого давления домкратной станции [4] следующее:

$$[\sigma] \leq \sigma = \gamma_f \cdot \frac{N}{F}$$

2. Определяем дополнительные нормальные тангенциальные и радиальные напряжения в стенке трубы от воздействия домкратной станции:

$$\sigma_z^* = \gamma_f \frac{N}{F} = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$$

$$\sigma_\theta^{in} = \sigma_r = Q = \gamma F b; \quad \sigma_\theta^{ex} = \sigma_\theta = (\sigma - Q)\gamma$$

3. Находим силовые факторы, возникающие в стенках трубы от осевого давления:

$$M = \frac{(\sigma_\theta^{in} - \sigma_\theta^{ex})}{12} b \cdot t^2; \quad N = \frac{(\sigma_\theta^{in} + \sigma_\theta^{ex})}{2} b \cdot t$$

или для более точного расчёта:

$$M = \left(\frac{((p_0(i)^{m1} - p_0(i-1)^{m2} - (p_2(i)^{n1} - q_2(i)^{n2} - p_2(i-1)^{n3} + q_2(i-1)^{n4}) \cos 2\theta))}{12} - \frac{(p_0(i)^{m1} - p_0(i-1)^{m2} - (p_2(i)^{n1} - q_2(i)^{n2} - p_2(i-1)^{n3} + q_2(i-1)^{n4}) \cos 2\theta)}{12} \right) b \cdot t^2$$

$$N = \left(\frac{((p_0(i)^{m1} - p_0(i-1)^{m2} - (p_2(i)^{n1} - q_2(i)^{n2} - p_2(i-1)^{n3} + q_2(i-1)^{n4}) \cos 2\theta))}{2} + \frac{(p_0(i)^{m1} - p_0(i-1)^{m2} - (p_2(i)^{n1} - q_2(i)^{n2} - p_2(i-1)^{n3} + q_2(i-1)^{n4}) \cos 2\theta)}{2} \right) b \cdot t$$

4. Проверяем условие прочности обделки. Оно будет обеспечено, если выполняется условие:

$$[\sigma] \leq \sigma = \gamma_f \frac{N_1}{F_1}$$

Если условие прочности не соблюдено, повышаем прочностные характеристики трубы в соответствии с расчётной нагрузкой, затем проверяем условие прочности ещё раз.

Важным элементом при строительстве тоннеля является определение необходимого количества домкратных станций.

Усилие продавливания става труб домкратной станцией МТПК зависит от бокового сопротивления трения труб по бентонитовому раствору на всей длине участка проходки, а также от горно-геологических условий проходки.

$$P > R_{бет} \cdot K,$$

где K – коэффициент запаса, принимаемый в зависимости от полноты исходных данных в пределах $1 \div 1,1$.

Сопротивление става труб при продавливании определяется по формуле [5]:

$$R_{бет} = [(2 \cdot (q + p) \cdot D_n + G) \cdot f_{бет} + \pi \cdot D_n \cdot C_{бет}] \cdot L,$$

где q – вертикальная составляющая горного давления, кН/м^2 ; p – горизонтальная составляющая горного давления, кН/м^2 ; $f_{бет} = 0,1$ – коэффициент трения железобетона по бентонитовому раствору; $C_{бет}$ – коэффициент сцепление железобетона с бентонитовым раствором; D_n – наружный диаметр, м; G – вес 1 п. м. трубы, кН [8]; L – длина трассы (продавливаемого участка труб), м; N – общая сила продавливания применяемой основной домкратной станции.

Приведём простой пример. При проходке тоннеля на некоторой глубине с использованием основной домкратной станции усилием $N = 5100 \text{ кН}$ (510 тонн) на длину $L = 250 \text{ м}$ возникает расчётное сопротивление $R_{бет} = 8020 \text{ кН}$.

Условие, при котором достаточно одной основной домкратной станции: $R_{бет} < N$, $8020 > 5100$, не соблюдено. Поэтому необходима установка дополнительных промежуточных станций.

Промежуточная домкратная станция развивает усилие продавливания порядка 3000 кН . Следовательно, усилий основной и одной дополнительной станций будет достаточно для завершения работ ($8020 < 8100$). Но необходимо наличие запаса по мощности (порядка 25-30%) на преодоление непредвиденных препятствий. Поэтому одной промежуточной станции не достаточно, необходимо установить две. Также важно правильно установить промежуточные домкратные станции в тоннеле. Путём несложных вычислений можно определить, что основная домкратная станция способна продавить став труб на длину максимум 159 м , а промежуточная – максимум на 93 м . Учитывая технологические особенности микротоннелирования, после продавливания основной станцией 70 м става труб необходима установка первой промежуточной домкратной станции, причём продавливающее усилие на незадействованные 23 м (25%) – технологический запас по мощности. После продавливания основной и первой промежуточной станциями интервала в 140 м , необходима установка второй промежуточной домкратной станции, причём продавливающее усилие на незадействованные 23 м (25%) – также является технологическим запасом по мощности. Таким образом, основная домкратная станция должна продавить последние 110 м става труб в массиве грунта с технологическим запасом – 46 м (29%), и в этом случае обеспечивается успешное завершение работ.

Разработанная математическая модель позволяет проводить расчёт основных технологических параметров ж.б. труб для микротоннелирования, таких как эксплуатационные и осевые нагрузки, нагрузки с поверхности земли, конструкций арматурного каркаса, а также делать выводы о её прочности в массиве.

Вышеприведённые расчёты позволяют за относительно короткое время подобрать необходимые типоразмеры и параметры ж.б. труб для микротоннелирования для реального объекта, используя данные горнотехнических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычёв Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов. - М.: Недра, 1989, 270 с.
2. Осетрова О.В. Метод расчёта труб, прокладываемых с применением бестраншейных технологий // Дис. канд. техн. наук. - Тула: ТулГУ. - 1999. - 130 с.
3. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжёлых и лёгких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84).
4. Копылов С.И. «Расчёт несущей способности обделки железобетонной трубы Ш1100 мм при сооружении канализационного коллектора в городе Зеленограде с применением микрошитового комплекса» - Тула: ТулГУ, каф. СПС 2002 г.
5. «Расчёт усилий продавливания тоннеля», «Метрострой» №4, 1981 г., с. 19-21.
6. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы / Госстрой СССР.-М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. - 200 с.
7. Московские городские строительные нормы МГСН 6.01-03 «Бестраншейная прокладка коммуникаций с применением микротоннелепроходческих комплексов и реконструкция трубопроводов с применением специального оборудования». - М.: Изд. Правительство Москвы, 2003.
8. РК 2411-02. Выпуск 2. Конструкции железобетонных труб для прокладки методом микротоннелирования. Рабочие чертежи труб d=1200 мм, d=1500 мм. Москва, 2002 г., 45 с. **ИДБ**

Коротко об авторах

Булычёв Н.С. – доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехнология и строительство подземных сооружений» Тульского Государственного Университета, академик Горной академии России, академик РАЕН,
Школьников П.В. – аспирант кафедры «Геотехнология и строительство подземных сооружений» Тульского государственного университета, инженер-проектировщик ООО "СПЕЦПРОМТЕХНОЛОГИИ", г. Тула, shcolnikovpv@mail.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР РАН			
БУНИН Игорь Жанович	Теоретические основы воздействия наносекундных электромагнитных импульсов на процессы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов и извлечения благородных металлов из руд	25.00.13	д.т.н.