

УДК 69.035.4

**Т.В. Воронина**

## **РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОТОННЕЛЕЙ**

*Получены по результатам математического моделирования граничные условия долговечности железобетонных, стальных и полимерных обделок микротоннелей.*

*Ключевые слова: подземные коммуникации, микротоннели, граничные условия, полимерные обделки.*

**Семинар № 19**

**T.V. Voronina**  
**THE CALCULATION OF THE BOUNDARY CONDITIONS OF THE MICROTUNNEL COMPONENT LONGEVITY**

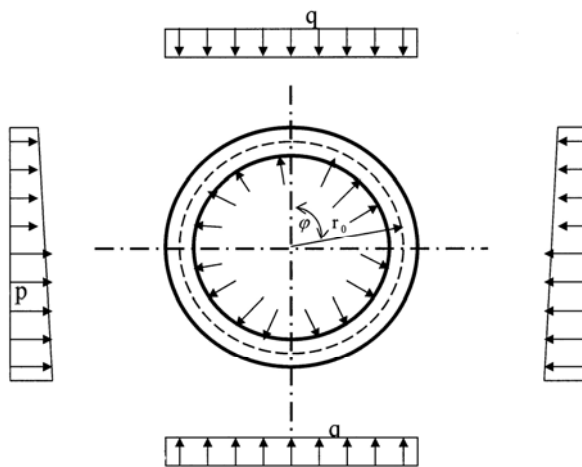
*The boundary conditions of the longevity of the iron, concrete, steel and polymer lining of the microtunnels are received.*

*Key words: underground pipelines, microtunnels, boundary conditions, polymer linings.*

**В** настоящее время функционирование инженерных коммуникаций различного назначения способствует дальнейшему развитию современного городского хозяйства. Общий объем проведения подземных коммуникаций в Москве не менее 75-80 км/год, которые распределяются следующим образом: около 20% относится к тоннелям, имеющим диаметр 1,5-2 м, 23% - от 1 до 1,5 м, 45% - от 0,5 до 1 м. Проведение такого количества тоннелей малого диаметра в условиях плотной городской застройки осуществляют методом микротоннелирования. Распространение микротоннелирования в подземном строительстве ставит перед городским хозяйством важный вопрос о надежности и долговечности тоннелей, сооружаемых этим способом. Отсутствие (в связи с коротким сроком эксплуатации) статистических данных о количестве и характере отказов микротоннелей не позволяет решать проблему тра-

диционными методами теории надежности. В этой связи на кафедре «Строительство подземных сооружений и шахт» предприняты попытки решения данной проблемы на базе анализа физико-химического взаимодействия материала продавливаемых труб с вмещающей тоннель и содержащейся в нем средой с целью определения характера и времени появления опасных дефектов, исключая дальнейшую эксплуатацию микротоннелей. По известным закономерностям и разработкам были рассчитаны граничные условия - моменты возникновения угрозы разрушения элементов микротоннелей.

Срок службы микротоннелей зависит от характера физического и химического взаимодействия их с внутренней (протекающей по коллектору) и внешней (окружающей коллектор) средой. Предельным состоянием для железобетонных обделок микротоннелей следует считать момент достижения полной карбонизации защитного слоя или нарушение пассивности арматуры в наиболее слабом месте. Для металлических футляров микротоннелей предельное состояние выражается в изменении толщины конструкции в результате коррозии металла на определенной площади, которое приводит к смятию и последующему обрушению металлического футляра. В результате реакций деструкции (старения) происходят химические превращения в полиме-



**Рис. 1. Расчетная схема конструкции**

рах, снижающие физико-механические показатели полимерных обделок, их растрескивание, что и является пределом прочности этих микротоннелей.

Нахождение граничных условий для микротоннелей из различного материала (железобетон, сталь, полимеры) производили по расчету сплошных кольцевых обделок [6]. Монолитная железобетонная, стальная и полимерная труба относятся к кольцевым бесшарнирным конструкциям. Рассматриваем расчетную схему конструкции в виде упругого кольца, нагруженного равномерно распределенной вертикальной  $q$  и горизонтальной  $p$  нагрузками (рис. 1), а также учитываем нагрузку от веса воды, заполняющей тоннель без напора.

Величину горного давления на обделку тоннелей в глинистых грунтах следует принимать от веса грунта,

заключенного в пространстве, ограниченном контуром свода. Нагрузку от нормативного горного давления на обделку принимают равномерно распределенной по диаметру (т.к. микротоннели имеют круглое сечение). При этом, нормативное горное давление вертикальное  $q^n$  и горизонтальное  $p^n$ , следует определять по формулам [6]:

$$q^n = K_p \gamma h_1;$$

$$p^n = \gamma (K_p h_1 + 0.5h) t g^2 \left( 45 - \frac{\varphi_K}{2} \right),$$

где  $K_p$  – коэффициент условий работы грунтового массива, принимаемый в глинистых грунтах – по таблице СНиП 32-04-97 «Тоннели железнодорожные и автодорожные»;  $\gamma$  – удельный вес грунта,  $\text{кН/м}^3$ ;  $h$  – диаметр выработки, м;  $L$  – величина пролета;  $h_1$  – высота свода обрушения над верхней точкой выработки, следует определять согласно [6; 4]:

$$L = B + 2htg^2 \left( 45 - \frac{\varphi_K}{2} \right); h_1 = L/2f$$

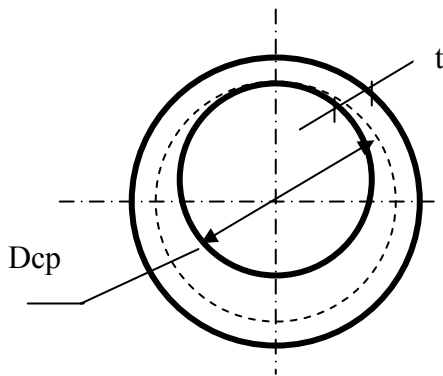
Нормативную вертикальную нагрузку от собственного веса конструкции вычисляли по размерам конструкции и удельному весу ее материала:

$$q_{с.в.}^n = A \cdot \gamma_b,$$

Таблица 1

**Расчетные нагрузки, действующие на обделки микротоннелей**

| Обделки микротоннелей | Внешний/внутренний диаметры обделок микротоннелей, мм | Расчетные нагрузки, действующие на обделку микротоннелей     |  |
|-----------------------|---|--|--|
|                       |   | Вертикальная равномерно распределенная $q$ , $\text{кН/м}^2$ | Горизонтальная равномерно распределенная $p$ , $\text{кН/м}^2$ |
| Железобетонные        | D=1495/1200   | 95,17  | 16,9   |
| Стальные              | D=1220/1200   | 81,56  | 16,9   |
| Полимерные            | D=1200/1154   | 76,03  | 16,2   |



**Рис. 2**

где  $A$  – площадь поперечного сечения, вычисляем по формуле

$$A = \pi \cdot D_{cp} \cdot t, \text{ м}^2 \text{ [2] (рис. 2)}$$

$T$  – толщина стенки трубы, м;  $\gamma_6$  – удельный вес трубы, кН/м<sup>3</sup> (учитываем материал трубы – железобетон, сталь, ПНД).

В результате расчетов получены следующие значения нагрузок для железобетонных, стальных и полимерных обделок (табл. 1). Временная нагрузка от подвижного колесного транспорта не учитывалась.

Согласно методике [6] усилия в трубах от действующих нагрузок в вертикальной плоскости определены как для замкнутого статически неопределимого кольца с учетом упругого отпора грунта.

Далее определили внутренние усилия в бетонной обделке тоннеля заданного диаметра при исходных данных: вертикальная и горизонтальная нагрузка (см. табл. 1). Трубы для микротоннельной прокладки рассчитаны на проходку в грунтах со следующими характеристиками: объемный вес грунта

$\gamma = 1,9 \text{ т/м}^3$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ , модуль упругости грунта  $E = 240 \text{ кгс/см}^2$  (24 МПа), коэффициент Пуассона пород  $\mu = 0,25$ . Материал обделки бетон класса В40 с нормативными характеристиками по СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции»: модулем упругости

$E_b = 3,6 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ , объемный вес железобетонной трубы  $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$ , призматической прочностью  $R_b = 22,0 \text{ МПа}$  и расчетным сопротивлением на растяжение  $R_{bt} = 1,4 \text{ МПа}$ .

Результаты расчетов сводим в строки 3 и 4 табл. 2. Единичные изгибающие моменты  $\bar{M}_\psi$  (строка 5) и нормальные силы  $\bar{N}_\psi$  (строка 6). Реальные усилия получили по формулам:  $M_\psi = qr_0^2 \sum \bar{M}_\psi$ ,  $N_\psi = qr_0 \sum \bar{N}_\psi$ .

Результаты расчетов для бетонной обделки от вертикального и горизонтального давления полного столба грунта в природном залегании и полного веса трубы приведены в строках 7 и 8 табл. 2 и графически представлены в виде эпюр внутренних усилий на рис. 2.

Исходные данные для

1) стального футляра – сталь обыкновенного качества марки Ст 3сп класса прочности С 255 с нормативными характеристиками по СНиП II-23-81 «Стальные конструкции»: пределом текучести  $\sigma_m = 255 \text{ МПа}$ , временным сопротивлением  $\sigma_s = 380 \text{ МПа}$ , модулем упругости  $E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ , объемный вес стальной трубы  $\gamma_n = 7,85 \text{ т/м}^3$ , Нормативное сопротивление  $R_{уп}$  принято равным пределу текучести стали  $\sigma_m = 255 \text{ МПа}$ , т.е.  $R_{уп} = 255 \text{ МПа}$ . Момент инерции сечения

$$J = 0,3926 D_{cp}^3 \cdot t, \text{ м}^4;$$

2) полимерных обделок: модуль упругости  $E = 1,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ , объемный вес материала полиэтиленовой трубы  $\gamma_n = 0,96 \text{ т/м}^3$ , прочность на растяжение  $340\text{-}350 \text{ кг/мм}^2$ .

В строках 9, 10 табл. 2, 3, 4 приведены значения реальных усилий для железобетонных, стальных и полимерных обделок соответственно от давления сточных вод, протекающих по микротоннелю

340 Таблица 2  
**К расчету железобетонной обделки кольцевого очертания диаметром 1495 (1200) мм**

| №<br>п/п | $\psi$                | 0      | 15      | 30      | 45     | 60      | 75      | 90      |
|----------|-----------------------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
|          |                       | 180    | 165     | 150     | 135    | 120     | 105     |         |
| 1        | $\bar{M}_{\psi}^a$    | -0,205 | -0,1775 | -0,1025 | 0      | 0,1025  | 0,1775  | 0,205   |
| 2        | $\bar{N}_{\psi}^a$    | 0,18   | 0,2348  | 0,385   | 0,59   | 0,795   | 0,945   | 1       |
| 3        | $\bar{M}_{\psi}^{OT}$ | 0,0032 | 0,0028  | 0,0017  | 0      | -0,0022 | -0,0039 | -0,0045 |
| 4        | $\bar{N}_{\psi}^{OT}$ | 0,0011 | 0,01    | 0,0094  | 0,0076 | 0,005   | 0,0035  | 0,0031  |
| 5        | $\sum \bar{M}_{\psi}$ | -0,202 | -0,1747 | -0,1108 | 0      | 0,1003  | 0,1736  | 0,2005  |
| 6        | $\sum \bar{N}_{\psi}$ | 0,191  | 0,2448  | 0,3944  | 0,6026 | 0,8025  | 0,9485  | 1,0031  |
| 7        | $M_{\psi}^z$ , кНм    | -8,73  | -7,55   | -4,35   | 0      | 4,33    | 7,5     | 8,66    |
| 8        | $N_{\psi}^z$ , кН     | 12,24  | 15,69   | 25,29   | 38,65  | 51,46   | 60,83   | 64,33   |
| 9        | $M_{\psi}^e$ , кНм    | 0,78   | 0,69    | 0,48    | 0,14   | -0,25   | -0,61   | -0,88   |
| 10       | $N_{\psi}^e$ , кН     | -7,95  | -7,63   | -7,51   | -7     | -6,45   | -6,11   | -5,51   |

Таблица 3  
**К расчету стального футляра кольцевого очертания диаметром 1220(1200) мм.**

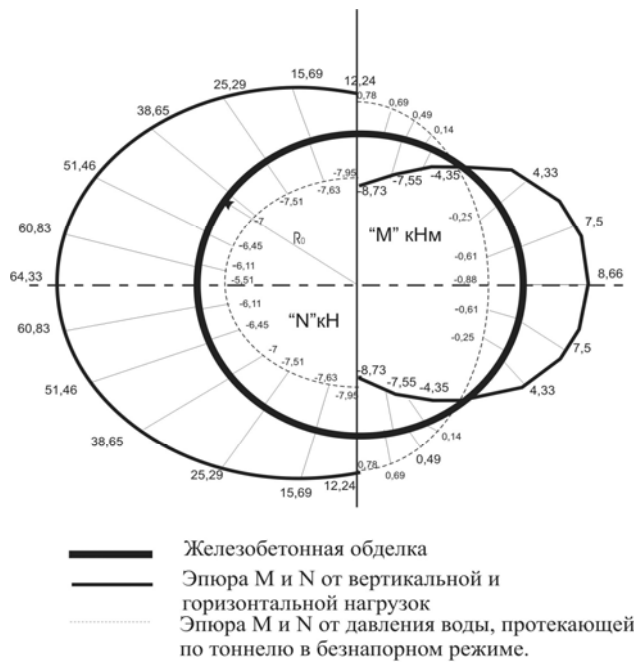
| №<br>п/п | $\psi$                | 0        | 15        | 30       | 45       | 60         | 75        | 90        |
|----------|-----------------------|----------|-----------|----------|----------|------------|-----------|-----------|
|          |                       | 180      | 165       | 150      | 135      | 120        | 105       |           |
| 1        | $\bar{M}_{\psi}^a$    | -0,1983  | -0,1717   | -0,099   | 0        | 0,099      | 0,1717    | 0,1983    |
| 2        | $\bar{N}_{\psi}^a$    | 0,207    | 0,26      | 0,4053   | 0,6035   | 0,8018     | 0,9439    | 1         |
| 3        | $\bar{M}_{\psi}^{OT}$ | 0,000011 | 0,0000097 | 0,000006 | 0        | -0,0000074 | -0,000013 | -0,000016 |
| 4        | $\bar{N}_{\psi}^{OT}$ | 0,000037 | 0,000036  | 0,000032 | 0,000026 | 0,000019   | 0,000013  | 0,000011  |

|    |                     |          |          |          |          |          |          |          |
|----|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5  | $\sum \bar{M}_\psi$ | -0,19829 | -0,17169 | -0,09899 | 0        | 0,09899  | 0,17168  | 0,19828  |
| 6  | $\sum \bar{N}_\psi$ | 0,207037 | 0,260036 | 0,405332 | 0,603526 | 0,801819 | 0,943913 | 1,000011 |
| 7  | $M_\psi^z$ , кНм    | -5,92    | -5,13    | -2,96    | 0        | 2,95     | 5,13     | 5,92     |
| 8  | $N_\psi^z$ , кН     | 10,21    | 13,03    | 20,14    | 29,8     | 39,57    | 46,58    | 49,34    |
| 9  | $M_\psi^e$ , кНм    | 0,54     | 0,49     | 0,33     | 0,095    | -0,17    | -0,43    | -0,62    |
| 10 | $N_\psi^e$ , кН     | -6,3     | -6,21    | -5,83    | -5,56    | -5,11    | -4,69    | -4,37    |

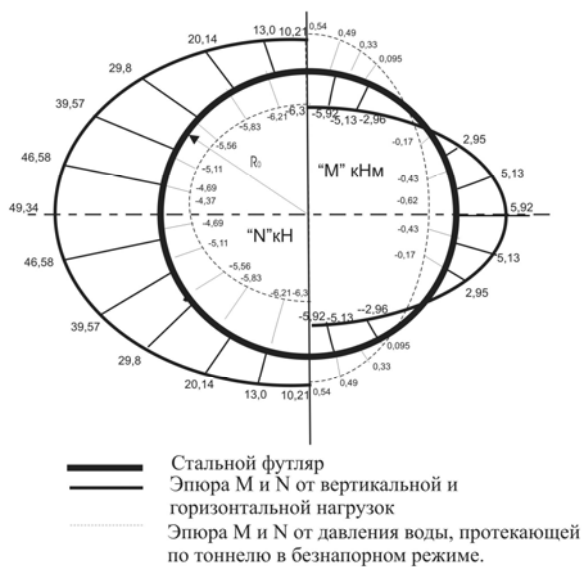
Таблица 4

**К расчету полимерной обделки кольцевого очертания диаметром 1200 (1154) мм.**

| №<br>п/п | $\psi$              | 0        | 15        | 30        | 45       | 60        | 75        | 90        |
|----------|---------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|          |                     | 180      | 165       | 150       | 135      | 120       | 105       |           |
| 1        | $\bar{M}_\psi^a$    | -0,1968  | -0,1703   | -0,0984   | 0        | 0,0984    | 0,1703    | 0,1968    |
| 2        | $\bar{N}_\psi^a$    | 0,213    | 0,266     | 0,41      | 0,606    | 0,803     | 0,947     | 1         |
| 3        | $\bar{M}_\psi^{OT}$ | 0,00001  | 0,000009  | 0,000005  | 0        | -0,000007 | -0,000012 | -0,000014 |
| 4        | $\bar{N}_\psi^{OT}$ | 0,000033 | 0,000032  | 0,000029  | 0,000023 | 0,000017  | 0,000012  | 0,0000096 |
| 5        | $\sum \bar{M}_\psi$ | -0,19679 | -0,170291 | -0,098395 | 0        | 0,098393  | 0,170288  | 0,196786  |
| 6        | $\sum \bar{N}_\psi$ | 0,213033 | 0,266032  | 0,410029  | 0,606023 | 0,803017  | 0,947012  | 1,00001   |
| 7        | $M_\psi^z$ , кНм    | -5,18    | -4,484    | -2,59     | 0        | 2,591     | 4,484     | 5,18      |
| 8        | $N_\psi^z$ , кН     | 9,53     | 11,09     | 18,34     | 27,11    | 35,93     | 42,37     | 44,74     |
| 9        | $M_\psi^e$ , кНм    | 0,48     | 0,43      | 0,29      | 0,084    | -0,15     | -0,38     | -0,55     |
| 10       | $N_\psi^e$ , кН     | -5,83    | -5,74     | -5,51     | -5,14    | -4,73     | -4,34     | -4,05     |



**Рис. 3. Эпюра изгибающих моментов и нормальных усилий для железобетонной обделки диаметром 1495(1200) мм**



**Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов и нормальных усилий для стального футляра микротоннеля диаметром 1220 (1200) мм**

в безнапорном режиме, рассчитанных по формулам [5]:

$$M_{\psi}^e = r^3 \Delta (0,5 - 0,25 \cos \psi - 0,5 \psi \sin \psi), \text{ кНм};$$

$$N_{\psi}^e = -r^2 \Delta (1 - 0,25 \cos \psi - 0,5 \psi \sin \psi) - \Delta r^2, \text{ кН},$$

где  $r$  - внутренний радиус трубы;  $\Delta$  - удельный вес заполнителя трубы.

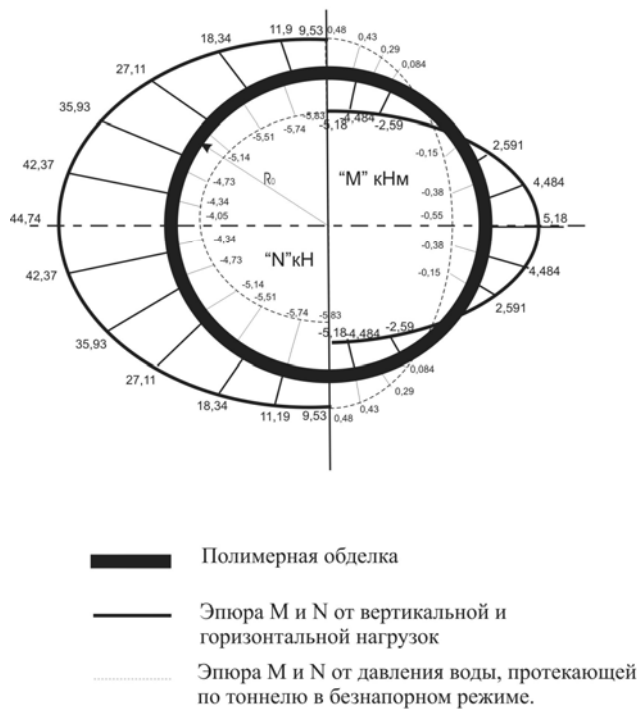
Для расчетов принят наихудший вариант заполнения труб - полное заполнение. Графически результаты расчетов представлены в виде эпюр для железобетонных обделок на рис. 3, для стальных - на рис. 4, для полимерных - на рис. 5.

После определения внутренних усилий в железобетонных, стальных и полиэтиленовых обделках микротоннелях от вертикальной и горизонтальной нагрузок и от давления воды, протекающей по тоннелю, проверяем прочность наиболее загруженного сечения при  $\psi = \frac{\pi}{2}$ , где действуют максимальные усилия  $M_{\psi}$ , кНм и  $N_{\psi}$ , кН.

При проверке железобетонного микротоннеля рассматриваем полусвод обделки как бесшарнирную арку на основании указаний СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции». Прочность сечения проверяем по растягивающим напряжениям из условия [3]:

$$N_{max}, \text{ кН} \leq \frac{1,75 \cdot \gamma_{b2} \cdot R_{bt} \cdot t \cdot b}{\frac{6e_0 \eta}{t} - 0,8},$$

кН,



**Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов и нормальных усилий для полимерных обделок диаметром 1200 (1154) мм**

При проверке прочности наиболее загруженного сечения при  $\psi = \frac{\pi}{2}$  условие прочности для стальных конструкций [3,6]:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \leq \gamma_s R_y,$$

Момент сопротивления вычисляем по формуле для тонкостенного кольцевого сечения, когда толщина стенки  $t$  во много раз меньше среднего диаметра сечения [2]:

$$W_p = \frac{\pi D_{cp}^2 t}{4}, \text{ м}^3.$$

Условие прочности наиболее загруженного сечения при  $\psi = \frac{\pi}{2}$  для полимерных обделок [1,7]:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \leq m_c R^n,$$

$R^n$  - нормативное длительное сопротивление материала труб определяется (при  $t=20^\circ\text{C}$  и сроке службы 50 лет):  $R^n = \sigma_{50} / k_3$ ,

где  $\sigma_{50}$  - показатель длительной прочности при 50-летнем сроке службы для труб из ПНД составляет 6,5 МПа;

После проверки прочности наиболее загруженных сечений проверили прочность сечения по растягивающим напряжениям при коррозионном разрушении обделки и находим значение, при котором обделка теряет свою несущую способность, т.е. может произойти авария в микротоннеле.

Применяя вышеизложенный метод расчетов, находим граничные условия для железобетонных обделок из бетонов классов В35, В45, В50. Бетоны класса В35, В45, В50 имеют нормативные характеристики по СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции». После расчетов толщины обделки, при которой наступит потеря ее несущей способности, результаты сведены в табл. 5. Рассчитали при какой толщине стали футляра потеряет свою несущую способность, для чего уменьшаем толщину и по условию прочности для стальных конструкций проверяем несущую способность. При выполнении расчетов видно, что после 7 мм резко уменьшается прочность конструкции, и потеря несущей способности наступает при коррозии футляра на глубину 7,8 мм. Расчеты по глубине нейтрализации стали приведены в табл. 5.

Особенностью полимерных обделок является их старение по всей массе и

Таблица 5

**Граничные условия для обделок микротоннелей, при которых наступает потеря их несущей способности**

| Материал обделок микротоннелей | Диаметр микротоннелей, мм | Глубина коррозии обделок (футляров), мм | Критическая прочность, МПа |
|--------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|
| Железобетон                    | B35                       | 1200                                    | 9                          |
|                                | B40                       | 1200                                    | 14                         |
|                                | B45                       | 1200                                    | 17                         |
|                                | B50                       | 1200                                    | 21                         |
| Сталь                          | 1200                      | 3,9                                     |                            |
| Полимер                        | 1154                      | -                                       | 4,99                       |

разрушение одновременное и полностью. В связи с этим мы исследовали не глубину деструкции, а при каком напряжении в стенке обделки произойдет отказ. Деструкция полимерных обделок наступит при максимальном напряжении в стенке трубы, равном 4,99 МПа, резкое возрастание

напряжения по нашим расчетам наступает после 3,97 МПа.

Как результат математического моделирования получили граничные условия долговечности железобетонных, стальных и полимерных обделок микротоннелей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапчев В.И., Виноградов Д.А. Трубопроводы из полимерных и композиционных материалов. – М.: Интер, 2004.
2. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 2000.
3. Баклашов И.В., Борисов В.Н. Проектирование и строительство горнотехнических зданий и сооружений. – М.: Недра, 1990.
4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. 2-е издание. – М.: Недра, 1992.
5. Волков В.П., Наумов С.Н., Пирожкова А.Н., Храпов В.Г. Тоннели и метрополитены. – М.: Транспорт, 1975.
6. Картозия Б.А., Борисов В.Н. Инженерные задачи механики подземных сооружений. – М.: МГУ, 2001.
7. Сладков А.В. Проектирование и строительство наружных сетей водоснабжения и канализации из пластмассовых труб. – М.: Стройиздат, 1988. **ИДБ**

#### Коротко об авторе

Воронина Т.В. - аспирантка кафедры «Строительство подземных сооружений и шахт» МГУ. Московский государственный горный университет. ud@msmu.ru

