

УДК 69.035.4

**А.Н. Левченко**

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ  
СВОЙСТВ НЕСУЩЕГО СЛОЯ ОБДЕЛОК  
МАГИСТРАЛЬНЫХ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ  
ТОННЕЛЕЙ**

Сооружения канализационной сети городов подпадают под действие Федеральных законов Российской Федерации "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" № 116-ФЗ и "О безопасности гидротехнических сооружений" № 117-ФЗ [8]. Второй закон относится непосредственно ко всем видам гидротехнических сооружений, включая подземные сооружения.

В соответствии с Федеральным законом "О безопасности гидротехнических сооружений" [8], необходимо составлять декларацию о соответствии гидротехнического сооружения критериям безопасности [7]. Применяемые в настоящее время методики определения уровня безопасности гидросооружений содержат необходимые элементы оценки надежности и риска, но не дают полного решения этой задачи. Конструкция обделки магистрального канализационного тоннеля глубокого заложения для условий аварийного напорного режима пропуска сточных вод была описана в работах [1, 6].

Повышение надежности тоннельных конструкций осуществляется в двух направлениях:

- совершенствование существующих конструкций;
- разработка и внедрение новых технологий производства элементов,

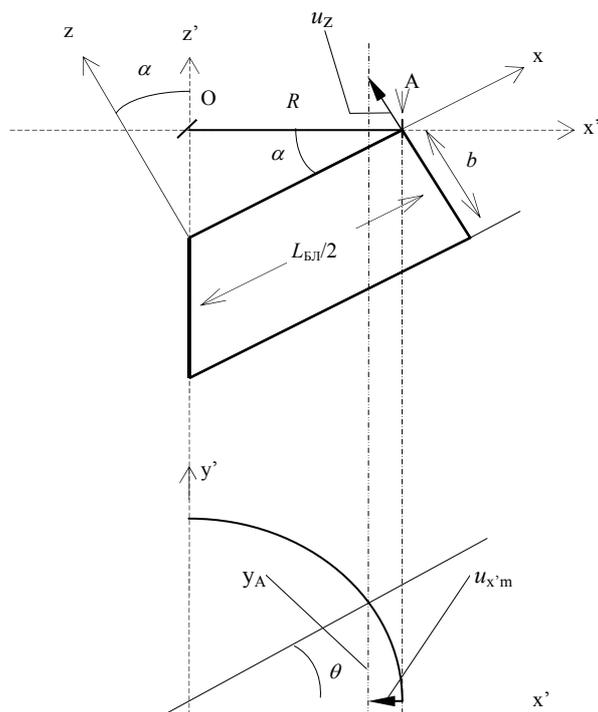
сборки и защиты всей конструкции от коррозии и истирания.

Рассмотрим элементы содержания первого направления.

В соответствии с современными требованиями о долговечности конструкций подземных гидротехнических сооружений необходимо применять многослойные тоннельные конструкции [9, 11]. Надежность подобной конструкции для магистрального коллектора глубокого заложения для условий аварийного напорного режима пропуска сточных вод рассмотрена в работе [6]. Для условий неглубокого заложения также целесообразно оценить надежность многослойной конструкции с внутренним защитным слоем, представляющим из себя футеровочный слой из блоков каменного литья [1]. При оценке такой надежности существует необходимость в определении параметров поведения несущего слоя в рамках метода расчета, приведенного в работе [3].

**Определение параметров несущего слоя**

Рассмотрим деформации и внутренние усилия в несущем слое. Кольца собраны из блоков трапециевидной формы с перевязкой швов. Задача проводимого анализа состоит в том, чтобы учесть влияние угла наклона боков трапеции на деформационное



поведение колец. При исследовании поведения блоков трапециевидной формы при деформации собранного из них кольца в работе [10] было обнаружено, что эти деформации имеют сложный характер: помимо раскрытия стыков и перемещений в радиальном направлении, трапециевидные блоки стремятся выйти из плоскости кольца с перекрещиванием стыковых сечений. Отмечается, что именно это обстоятельство является той особенностью, которая отличает характер деформаций кольца обделки из трапециевидных блоков от характера деформаций кольца обделки из прямоугольных блоков.

Однако в литературе отсутствуют результаты по исследованию деформационных характеристик колец с учетом угла наклона боков трапеции.

Проведем упрощенный анализ поведения колец из блоков трапециевидной формы при ограничении их

**Рис. 1.** К расчету “возможных” продольных смещений кольцевых граней в направлении по оси тоннеля

деформаций в осевом направлении тоннеля.

При повороте блока как жесткого тела относительно, например, оси  $z'$  точка «А» перемещается по оси  $x'$  к точке «О», что в «тоннельных» координатах “ $x-z$ ” означало бы появление “возможного” перемещения середины блока по направлению к следующему кольцу по оси тоннеля (рис. 1). Величина этого “возможного” перемещения равна

$$u_{zm} = x_A \sin \alpha = (R - \sqrt{R^2 - y_A^2}) \sin \alpha$$

здесь  $\alpha$  – угол наклона боков трапеции,

$R = (L_{БЛ} \cos \alpha - b \sin \alpha) / 2$ ,  $L_{БЛ}$  – длина блока,  $b$  – его ширина,  $x_A$ ,  $y_A$  – текущие в процессе деформации координаты положения точки «А».

С учетом малости деформаций и угла  $\alpha$  будут иметь место равенства

$$R \cong (L_{БЛ} / 2) \cos \alpha; \quad y_A \cong R\theta; \quad (1)$$

$$u_{zm} \cong \frac{L_{БЛ}}{4} \alpha \theta^2.$$

Расчеты с применением МКЭ показали, что имеет место равенство (по схеме рис. 2)

$$q_m = \frac{4E}{(1-\nu^2)b} \kappa(L) u_{zm}, \quad (2)$$

$$\text{где } \kappa(L) = 0,03(L_{БЛ} / b) + 0,12. \quad (3)$$

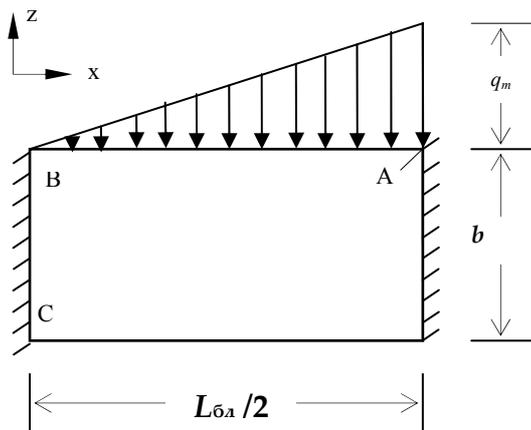
На сторону ВС нагрузка передается в виде

$$N_x = (0,5\nu + 0,02) q_m b t. \quad (4)$$

Здесь  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Таким образом,

$$N_x = \frac{(0,5\nu + 0,02)}{(1-\nu^2)} E t [0,03(L_{БЛ} / b) + 0,12] L_{БЛ} \alpha \theta^2.$$



**Рис. 2. К расчету передачи нагрузок на кольцевых гранях на бока блоков**

Здесь  $L_о$  – длина опорного стержня.

**Результаты определения смещений и внутренних усилий в несущем слое**

Ниже приведены результаты расчетов по схеме рис. 3 (с тремя стыками в т. А, В и С) для следующих условий:

- коэффициент Пуассона

$$\nu=0,2;$$

- ширина кольца  $b = 1$  м;
- толщина блока  $t = 0,2$  м;
- площадь сечения блока  $A=0,2$  м<sup>2</sup>;
- количество блоков  $n=8$ ;
- угол трапеции  $\alpha = 10^\circ$ .

Смещения в характерных точках в шельге (т.А) и боках (т.С) (рис. 3-4) для различных отношений момента инерции сплошного сечения к моменту инерции в стыке ( $I/I_j$ ).

Для расчета внутренних усилий (моменты  $M$  и нормальные силы  $N$ ) вместо распределенных по контуру пружин отпора (равенство (6)) использовались пружины, помещаемые в стыки с жесткостями

$$k_s = k_s(\theta)(L_{бл}b/2). \quad (8)$$

Алгоритм поиска решения состоит в том, что в ходе решения изменяются моменты сечения в стыках  $I_j$  от начального значения отношения  $I/I_j = 1$  через увеличенные значения. На каждом шаге определялись повороты сечений в стыках  $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ , по значениям которых определялись жесткости пружин (ф-ла (8)) для определения хода изменения смещений в т.А. -  $V_A$ . Процесс был остановлен в точке с отношением примерно  $I/I_j = 2 \cdot 10^4$  когда смещения  $V_A$  стали равняться

Усилие  $N_x$  создается в кольце радиуса  $R$  и шириной  $b$  под действием внешней нагрузки, равной

$$p_{гэв} = \frac{N_x}{bR}.$$

Таким образом, наличие у блоков трапециевидной формы, при деформировании собранного из них кольца, производится введением воздействия эквивалентной внешней нагрузки, равной

$$p_{гэв} = \frac{(0,5\nu + 0,02)}{(1-\nu^2)} E \left(\frac{t}{b}\right) \times \\ \times [0,03(L_{бл}/b) + 0,12] \frac{L_{бл}}{R} \alpha \theta^2.$$

Или с учетом того, что  $L_{бл} = 2\pi R/n$ , получим

$$p_{гэв} = \frac{(0,5\nu + 0,02)}{(1-\nu^2)} E \left(\frac{t}{b}\right) \times \\ \times [0,03(2\pi r/nb) + 0,12] \frac{2\pi}{n} \alpha \theta^2. \quad (5)$$

Здесь  $n$  - количество блоков в кольце.

С расчетной точки зрения более эффективным является введение эквивалентного отпора с коэффициентом

$$k_s(\theta) = \frac{(0,5\nu + 0,02)}{2(1-\nu^2)(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{1}{L_s} E \left(\frac{t}{b}\right) \times \\ \times [0,03(2\pi r/nb) + 0,12] \frac{2\pi}{n} \alpha \theta^2. \quad (6)$$

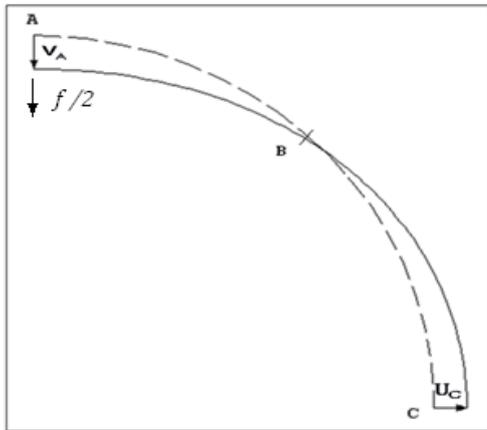


Рис. 3. Смещения в обделке в точках по контуру

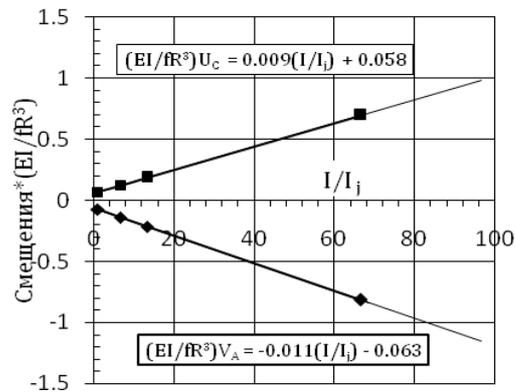


Рис. 4. Смещения в характерных точках

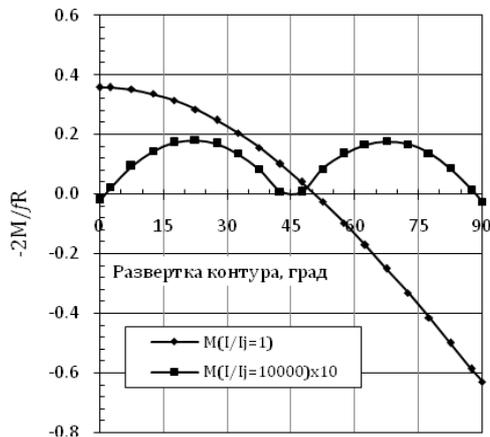


Рис. 5. Распределение значений моментов по контуру сечения сплошной обделки и обделки с шарнирными стыками

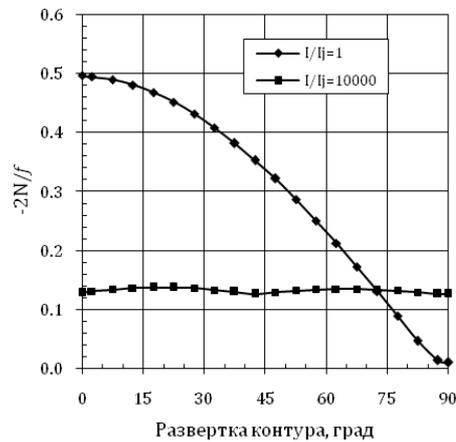


Рис. 6. Распределение значений нормальных сил по контуру сечения сплошной обделки и обделки с шарнирными стыками

значению для случая сплошного кольца. В результате на рис. 5 и 6 показано сравнение внутренних усилий, действующих в сплошном кольце и усилий, возникающих в шарнирной обделке с трапециевидными блоками с углом наклона боков трапеции  $10^\circ$ .

Для сплошного кольца используемая программа вычислений давала

результаты с большой степенью схожести с классическими результатами

$$\frac{2M}{fR} = \left( \frac{2}{\pi} - \cos\psi \right), [5], \quad \frac{2N}{f} = -\cos\psi. [4].$$

Здесь угол  $\psi$  отсчитывается от горизонтального диаметра.

Для значений моментов в шарнирной обделке с 8-ю трапециевидными

блоками по ее контуру с параметрами, приведенными выше, можно предложить зависимость

$$\frac{2M}{fR} = -1,81 \cdot 10^{-2} |\sin(4\psi)|.$$

Для нормальных сил

$$\frac{2N}{f} \cong 0,13.$$

Как видно из рис. 5 и 6 и приведенных соотношений внутренние усилия в такой обделке как качественно, так и количественно значительно отличаются от внутренних усилий в сплошной (бесшарнирной) обделке.

Особо следует отметить практически одинаковые значения для жесткости рассмотренных обделок. В случае прямоугольности блоков с выпукловогнутыми стыками такое соответствие отсутствует в принципе.

#### *Вывод*

Установлено, что при одинаковых значениях жесткостей сплошной (бесшарнирной) обделки и шарнирной обделки из трапециевидных блоков значения внутренних усилий по контуру обделок как качественно, так и количественно значительно отличаются друг от друга.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Борисов В.Н., Левченко А.Н., Павлов О.Н. Выбор и обоснование конструктивных параметров обделки и гидроизоляции магистрального канализационного тоннеля глубокого заложения в г. Москве // Проблемы строительной геотехнологии "Строительство и эксплуатация подземных сооружений и шахт" - М.: Изд-во МГГУ - 2000. - с. 75-81.
2. Борисов В.Н., Левченко А.Н., Павлов О.Н. Расчет сборной ж/б обделки шитовых тоннелей с учетом характеристик стыковых соединений / Межд. конф. «Проблемы освоения подземного пространства», г. Тула, 5-7 апреля 2000г - Изд-во ТГУ: 2000г. - с. 85-89.
3. Булычев Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок. - М.: Недра. 1986. - 288 с.
4. Коллати Л. Задачи на собственные значения (с техническими приложениями). - М.: Наука, 1968. - 504 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VII. Теория упругости: Учеб. пособие. - 4-е изд., испр. и доп. - М.: Наука. Физматгиз, 1987. - 248 с.
6. Левченко А.Н. Прогнозирование надежности комбинированных обделок канализационных тоннелей и обоснование их конструктивных параметров.- Дисс... канд. техн. наук. - Москва, 2003. - 128 с.
7. Мостков В.М. Безопасность подземных гидротехнических сооружений. - М.: НТФ "Энергопрогресс" // "Гидротехническое строительство", 2001. - 83 с.
8. О безопасности гидротехнических сооружений. Федеральный закон Российской Федерации от 23 июня 1997 года // Гидротехническое строительство - 1997. - №12. - С. 1-7.
9. Руководство по проектированию гидротехнических тоннелей / Гидропроект им. С.Я. Жука, Минэнерго СССР. - М.: Стройиздат, 1982. - 288 с.
10. Сергеев В.К. Экспериментально-теоретические исследования круговых обделок коммунальных тоннелей из железобетонных блоков трапециевидной формы // Дисс. ... канд. техн. наук, Москва, 1974. - 204 с.
11. СНиП 2.06.09 - 84. Туннели гидротехнические / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. - 19 с. **ГИАС**

#### **Коротко об авторе**

Левченко А.Н. – кандидат технических наук, профессор, Московский государственный горный университет,

Рецензент д-р техн. наук, проф. Б.И. Федунец.