

УДК 622.272

**И.В. Баклашов, О.Н. Павлов, И.И. Шорников**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ  
ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЕЙ ПРИ ЕЕ ПРОДАВЛИВАНИИ  
В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ**

*В рамках МКЭ приведено построение численной модели определения усилий продавливания обделки тоннелей в технологии микротоннелирования.*

*Ключевые слова: микротоннелирование, усилие продавливания, жесткостные характеристики стыкового соединения, поверхность раздела «труба-порода», свойства породного массива, сопротивление продавливанию.*

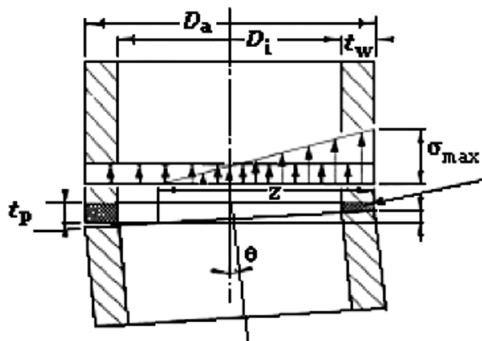
---

**Д**альнейшее развитие технологии требует разработки метода прогнозирования усилий продавливания. По этому вопросу в обзоре [1] приведены результаты теоретических исследований, натурных экспериментов, а также применений различных численных методик. В последнем случае, в частности, проводилось моделирование нормальных и касательных контактных напряжений в системе «труба – порода». Значительное внимание уделялось разработке численных моделей для прогнозирования фрикционной составляющей усилий продавливания.

В работах [2, 3] отмечается возможность влияния величин локального отклонения труб от проектной оси по трассе продавливания на значения дополнительного трения по поверхности раздела «труба – порода». Под отклонением от проектной оси тоннеля понимается отклонение направления центральных осей труб, измеренное в линейных или угловых единицах. В идеальном случае такие отклонения не возникали бы, но на практике из-за нерегулярности в свойствах пород, способах выемки породы, наличия строительного зазора и т.д., головная часть щита неизбежно отклоняется от проектного курса. Для поддержания заданного направления с помощью управляющих домкратов непрерывно производятся корректировки.

В работе [2] на пяти объектах произведено измерение локальных отклонений, но вклад во фрикционную составляющую усилий продавливания не определялся. Измерялись углы разворота труб в стыках  $\theta$  (в трех измерениях) вдоль трасс. Типичные значения для углов раскрытия стыка располагались в диапазоне  $0 \div 0,3^\circ$ , с максимальными значениями  $0,5^\circ$ . Производились измерения контактных напряжений в стыках, также как и в работе [3]. Они имели распределение достаточно близкое к треугольному, как и в расчетной модели работы [4].

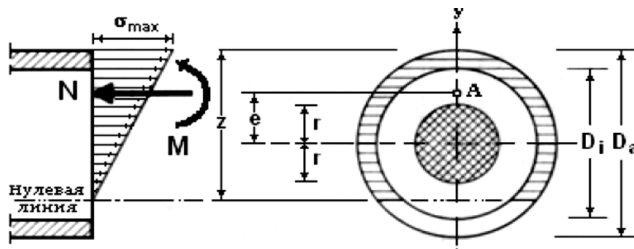
Для исследования влияния конструкции стыкового соединения на статическую работу тоннельной обделки целесообразно провести учет взаимного разворота смежных труб в стыке при передаче усилий продавливания. На схеме рис. 1 показана эпюра распределения контактных напряжений по длине  $z$  при



**Рис. 1. Схема разворота труб**

развороте труб на угол  $\theta$ . Здесь  $D_a$  – внешний диаметр труб,  $D_i$  – внутренний диаметр труб,  $t_w$  – толщина стенки труб,  $t_p$  – толщина прокладки,  $\sigma_{max}$  – максимальное значение контактных напряжений. В плоскости стыка схема выглядит как показано на рис. 2.

Сила  $N$  прикладывается в т. А с эксцентриситетом  $e$ . Момент  $M = Ne$  действует в плоскости  $u$ . Здесь радиус ядра сечения [4]



$$r = \frac{D_a}{8} \left[ 1 + \left( \frac{D_a}{D_i} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

$$\sigma_{max} = \left( 1 + \frac{e}{r} \right) \frac{N}{A_w}. \quad (2)$$

Имеют место соотношения [4]:

при отсутствии раскрытия стыка  $e \leq r$   $z = D_a$

**Рис. 2. Силовые и геометрические характеристики**

угол разворота смежных труб

$$\theta \cong \frac{\sigma_{max}(z)}{z} \cdot \frac{t_p}{E_p}. \quad (3)$$

Критическое значение угла разворота, при превышении которого начинается раскрытие стыка (при  $z = D_a$ ,  $e = r$ )

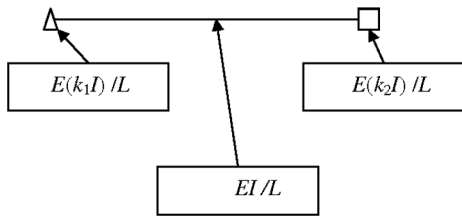
$$\sigma_{max} = \sigma_{max}^* = \frac{2N}{A_w}, \quad \theta_{cr} = \frac{2N}{A_w} \cdot \frac{t_p}{D_a E_p}. \quad (4)$$

Найдем зависимости  $\sigma_{max}(z)$ . Полагая распределение контактных напряжений по оси  $u$  треугольным проинтегрируем их по заштрихованной площади чтобы получить силу  $N$  и их произведение на  $u$  чтобы получить момент  $M$ . В итоге получим следующие соотношения:

$$\frac{\sigma_{max}(z)}{z} = \frac{2N}{A_w} \cdot \Phi(z_1); \quad (5)$$

$$z_1 = 2z/D_a, \quad \Phi(z_1) = \frac{\pi}{f_1(z_1) - (1 - z_1)f_2(z_1)}; \quad (6)$$

$$f_1(z_1) = [(2 - z_1)z_1]^{1/2}, \quad f_2(z_1) = \frac{\pi}{2} - \arcsin(1 - z_1); \quad (7)$$



**Рис. 3. Балочный элемент с податливыми соединениями [4]**

$$M = M_{cr} \Phi(z_1) \Psi(z_1); \quad M_{cr} = \frac{ND_a}{4},$$

$$\Psi(z_1) = \frac{f_2(z_1) + (5 + 3z_1)f_1(z_1)}{\pi}; \quad (8)$$

При  $z < D_a$   $\theta = \theta_{cr} \Phi(z_1)$ . Расчет показывает, что имеет место весьма точные соотношения:

$$z_1 = 2,053(\theta/\theta_{cr})^{-0,64}, \quad (9)$$

$$M = M(\theta) = \begin{cases} M_{cr} \theta/\theta_{cr}, & \theta < \theta_{cr} \\ M_{cr} [2 - (\theta_{cr}/\theta)], & \theta \geq \theta_{cr} \end{cases}. \quad (10)$$

Приведем основные результаты.

Для расчетной оценки усилий в трубах введем характеристики:

- поворотная жесткость  $C_D$ ;
- жесткость при линейных деформациях  $C_L$ .

Поворотная жесткость  $C_D$  связывает угол поворота смежных труб относительно друг друга с возникающим при этом моменте. Жесткость при линейных деформациях  $C_L$  связывает нормальную силу со смещениями в области стыка по оси труб (вдоль действия нормальной силы).

Жесткость при линейных деформациях  $C_L$  для плоского стыка определяется жесткостью прокладки:

$$C_L = \frac{E_p A_W}{t_p}, \quad (11)$$

где  $E_p$  – модуль упругости материала прокладки;  $A_W$  – площадь поперечного сечения трубы, равная  $\pi(D_a^2 - D_i^2)/4$ .

Основной характеристикой при развороте смежных труб на угол  $\theta$  является раскрытие стыка и появление эксцентриситета  $e$  передачи нормальной силы. Схема передачи сил при повороте в стыке приведена на рис.1,2.

Поворотная жесткость стыка определяется для двух случаев его работы: при отсутствии раскрытия (или изменения начальной области контакта) стыка и при наличии раскрытия. Введем параметр  $m = M/ND_a = e/D_a$ .

При отсутствии раскрытия стыка ( $e \leq r$ ,  $m \leq 1/4$ ,  $\theta \leq \theta_{cr}$ )

$$C_D \cong \frac{E_p A_W D_a^2}{t_p}. \quad (12)$$

При раскрытии имеют место соотношения, следующих из (10)

$$\theta = \theta_{cr} / 2(1 - 2m), \quad C_D = (4M_{cr} / \theta_{cr})(1 - 2m)^2. \quad (13)$$

Таким образом, в схеме МКЭ с балочными элементами можно поведение стыка моделировать введением пружин с жесткостями  $C_L$  и  $C_D$ .

Более единообразный подход осуществим применением способа, описанного в работе [5].

В балочной модели обделки из труб с наличием стыков (рис. 3) матрица жесткости балочного элемента будет иметь вид

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3}\beta_{22} & \frac{6EI}{L^2}\beta_{23} & 0 & -\frac{12EI}{L^3}\beta_{22} & \frac{6EI}{L^2}\beta_{26} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2}\beta_{23} & \frac{4EI}{L}\beta_{33} & 0 & -\frac{6EI}{L^2}\beta_{23} & \frac{2EI}{L}\beta_{36} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3}\beta_{22} & -\frac{6EI}{L^2}\beta_{23} & 0 & \frac{12EI}{L^3}\beta_{22} & -\frac{6EI}{L^2}\beta_{26} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2}\beta_{26} & \frac{2EI}{L}\beta_{36} & 0 & -\frac{6EI}{L^2}\beta_{26} & \frac{4EI}{L}\beta_{66} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Здесь  $E$ ,  $A = A_W$ ,  $I$ ,  $L$  – модуль упругости, площадь, момент инерции и длина элемента трубы.  $I = \pi(D_a^4 - D_i^4)/4$ .

Кроме того,

$$\begin{aligned} \beta_{22} &= (k_1 k_2 + k_1 + k_2) / k & \beta_{23} &= (k_1 k_2 + 2k_1) / k & \beta_{26} &= (k_1 k_2 + 2k_2) / k \\ \beta_{33} &= (k_1 k_2 + 3k_1) / k & \beta_{66} &= (k_1 k_2 + 3k_2) / k & \beta_{36} &= k_1 k_2 / k \\ k &= k_1 k_2 + 4(k_1 + k_2) + 12 \end{aligned} \quad (15)$$

Целесообразно различать четыре типа элементов по жесткости стыков:

Тип 0 – (жесткий/жесткий):  $k_1 = k_2 = \infty$ ;

Тип 1 – (податливый/жесткий):  $k_1 \neq 0$ ;  $k_2 = \infty$ ;

Тип 2 – (жесткий / податливый):  $k_1 = \infty$ ;  $k_2 \neq 0$ ;

Тип 3 – (шарнир/шарнир):  $k_1 = k_2 = 0$ .

Удобно ввести показатель защемленности стыка  $p$  в форме [6]

$$p = 1/(1+3kk),$$

где  $kk$  либо  $1/k_1$ , либо  $1/k_2$ , так что для жесткого соединения  $p = 1$ , для шарнирного  $p = 0$ . Для вышеприведенных формул введем параметры:

$$kap0 = \frac{3p}{4-p}; \quad kap1 = \frac{1+2p}{4-p}; \quad kap2 = \frac{2+p}{4-p}; \quad kap3 = \frac{3}{4-p}.$$

Формулы (15) для двух типов элементов будут иметь вид, приведенный в таблице.

Тип элемента	$\beta_{22}$	$\beta_{23}$	$\beta_{26}$	$\beta_{33}$	$\beta_{36}$	$\beta_{66}$
1	kap1	kap2	kap2	kap0	kap0	kap3
2	kap1	kap2	kap0	kap3	kap0	kap0

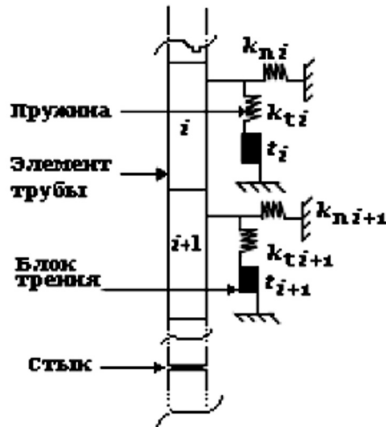


Рис. 5. Конечно-элементарная модель продавливаемой тоннельной обделки

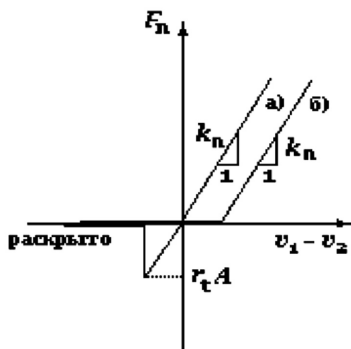


Рис. 6. Поведение в направлении нормали [7]: а – элемент с прочностью на растяжение  $r_t$ ; б – элемент с начальным раскрытием  $t_g$

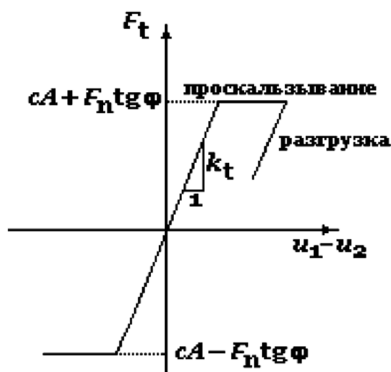


Рис. 7. Поведение в касательном направлении [7]

В расчетах, использующих показатель зашечленности стыка  $p$  при  $m \leq 1/4$ ,  $p=1$ , при  $j < m \leq 0.5$   $p \approx 10(1-2m)^2$ ; при  $m > 0.5$   $p=0$ .

Зависимость  $p$  от  $m$  представлена на рис. 4. В ней

$$h(x) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(400x) \right\},$$

$$p_0(x) = (1-2x)^2.$$

Тогда

$$p(m) = (0,5 + \operatorname{arctg}(400(1 - 6m))) / \pi + (1-2m)^2 (0,5 + \operatorname{arctg}(400(6m-1))) / \pi. \quad (16)$$

Рассмотрим конечно-элементную модель продавливаемой тоннельной обделки (рис. 5). В схеме рис. 5 применяются двухузловые «контакт-элементы» работы [7], которые моделируют проскальзывание, отрыв и соприкосновение (вход в контакт в системе «труба-порода»). Растягивающие напряжения считаются положительными.

В модели используются следующие критерии:

(1) критерий прочности на растяжение:

$$F_n \geq -r_t \cdot A, \quad (17)$$

где  $r_t$  – прочность на растяжение;  $A$  – площадь поверхности трубы, отведенная для пружинного элемента.

(2) критерий трения Кулона-Мора:

$$|F_t| \leq |c \cdot A + F_n \operatorname{tg} \phi|, \quad (18)$$

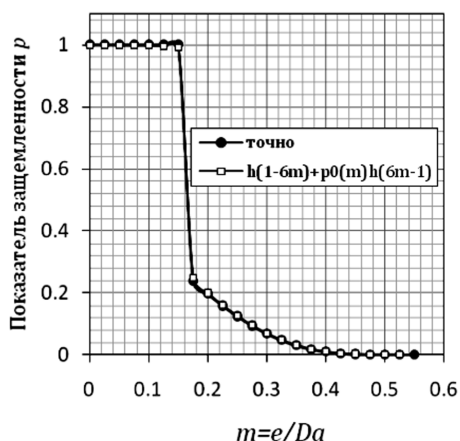
где  $c$  – сцепление по поверхности раздела,  $\phi$  – угол трения по ней.

(3) критерий раскрытия:

$$v_1 - v_2 \leq t_g,$$

где  $t_g$  – начальное раскрытие поверхности раздела (строительный зазор).

Эти критерии представлены на рис. 6, 7.



**Рис. 4. Зависимость показателя защищенности стыка от величины отношения эксцентриситета к диаметру трубы**

Решение системы уравнений с нелинейностями типа, приведенными на рис. 6, 7, производится по алгоритмам, описанным в работе [8]. В результате по длине тоннеля получают значения внутренних усилий  $M$ ,  $N$  и углы разворота труб  $\theta$  как на прямолинейных, так и на криволинейных участках. Имеется возможность задавать начальные значения для отклонений, т.е. разворотов, для проведения

анализа их изменения с увеличением длины тоннеля и влияния на фрикционную составляющую усилий продавливания, т.е.  $N$  в начале трассы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шорников И.И. Прогнозирование усилий продавливания обделки тоннелей в технологии микротоннелирования: современное состояние // Горный журнал, 2011. – №9.
2. Milligan G.W.E. and Norris P. The performance of concrete jacking pipes during installation / Report No. OUEL 1986/93. – University of Oxford, Department of Engineering Science. – Oxford, 1993. – 56p.
3. Bosseler B., Falter B. – Simulation of pipe-jacking: Computer models and 1:1 scale tests // Mediterranean NO DIG 2007 – XXVth International Conference & Exhibition – Roma, 10/12 Settembre, 2007. – 12 p.
4. Scherle M., Rohrvortrieb/Band 2: Statik, Planung, Ausführung. – Bauverlag GmbH: Wiesbaden, Berlin, 1977. – 613 p.
5. Ливсли Р. Матричные методы строительной механики: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Проценко. – М.: Стройиздат, 1980. – 224 с.
6. Временные рекомендации по расчетному прогнозированию конструктивной надежности комбинированных и высокоточных обделок кабельных и канализационных коллекторов / Авт: Павлов О.Н., Левченко А.Н., Корчак А.В., Мельникова С.А., Франкевич Г.С., Курганский М.Н., Загоршменный А.И. – М.: МГТУ, 2008. – 44с.
7. Frank R., Gvenot A., Humbert P. Numerical analysis of contacts in geomechanics // Numerical methods in geomechanics. – Proc. 4<sup>th</sup> Intern. Conf. Numer. Meths. in Geomechanics / Edmonton, Canada / 1982. vol.1. – pp. 37–45.
8. Owen D.R.J., Hinton E. Elasto-plastic finite element analysis. – Swansea, Pineridge Press, 1983. – 648 p.

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Баклашов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор,  
 Павлов Олег Николаевич – кандидат технических наук, консультант;  
 Шорников Иван Игоревич – аспирант,  
 Московский государственный горный университет;  
 Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru