

И.И. Шорников

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСИЛИЙ ПРОДАВЛИВАНИЯ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ НА ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ: СТАЦИОНАРНАЯ ТЕОРИЯ

Приведена постановка задачи и представлены принципы определения характеристик реакции системы «обделка – породный массив» на жесткое нагружение в рамках стационарной теории перехода равновесных состояний. Для характеристик контакта «обделка – породный массив» используется 3-х параметрическая зависимость «напряжение сдвига – продольное перемещение» с падающим участком. Представлено решение краевой задачи в виде нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения. Даются в виде графиков результаты численного счета. Они представляют зависимости смещений в плоскости забоя и фрикционной составляющей усилия продавливания от принудительных смещений от нагружающего устройства. Показано, что распределение смещений и напряжений сдвига по контакту качественно и количественно отличаются от результатов, полученных при линейной постановке задачи.

Ключевые слова: стационарная теории перехода равновесных состояний, усилие продавливания, фрикционная составляющая, характеристическая длина, пиковая прочность, остаточная прочность, падающий участок.

Введение

В настоящей статье представлена стационарная теория для прогнозирования усилий продавливания в развитие результатов работы [1]. В книгах [2, 3], на основе которых строились зависимости работы [1], используется идея о наличии вдоль контакта «труба (обделка) – породный массив» двух зон: зоны сцепления – покоя (упругой пробки) и зоны проскальзывания, после возникновения нарушения сцепления по этому контакту, обусловленного силой трения покоя. В этих работах, как и в [4], получены т.н. квазистатические решения для положения границы раздела указанных зон в зависимости

от параметров задачи: коэффициентов трения покоя и скольжения, продольной и боковой нагрузок, а также упругих характеристик контактной пары.

Качественно картина перехода из равновесного состояния со сцеплением по всему контакту к равновесному состоянию с наличием зоны проскальзывания с трением скольжения представлена на рис. 1.

На этом рисунке в виде зависимостей продольного усилия N_0 от перемещения нагружаемого сечения u_0 показаны характеристики нагружающего устройства (по теме настоящей статьи это – система «домкратная станция – упорная стенка – крепь стартовой шахты – породный массив») в виде нисходящих прямых. Характеристика системы «обделка – породный массив» представлена кривой «OABC» с двумя ветвями: восходящей OA до некоторого предела N_m и нисходящей ABC до предела N_r . Восходящая ветвь описывает накопление напряжений в контактной паре, а нисходящая разгрузку от накопленных напряжений в результате появления и развития нарушения сцепления. При увеличении внешней нагрузки может образоваться два равновесных состояния: «A₁» – неустойчивое и «B₁» – устойчивое.

Определение характеристик системы «домкратная станция – упорная стенка – крепь стартовой шахты – породный массив» представляет предмет отдельного исследования, равно как и динамическое описание процесса появления и развития зон нарушения сцепления. Поэтому целью настоящей статьи является постановка задачи и представление принципов определения характеристик N_0-u_0 системы «обделка – породный массив» в рамках стационарной теории перехода равновесных состояний.

Представление характеристик контакта «обделка – породный массив»

Принимаем зависимость между касательными напряжениями и перемещениями в виде 3-х параметрической зависимости (параметры – τ_r, u_1, u_2) [2]

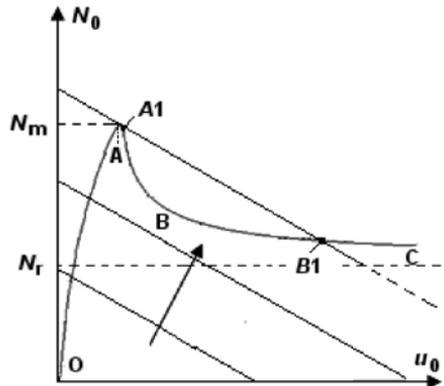


Рис. 1. Качественная картина смены равновесных состояний

$$\tau = \tau_r f(u), \quad (1)$$

где

$$f(u) = \frac{u(u + u_1)}{(u + u_2)^2}. \quad (2)$$

Здесь параметры τ_r – остаточная прочность контакта «обделка–порода», а u_1 и u_2 определяют форму кривых.

Введем безразмерные величины $v = u/u_*$; $\varepsilon = u_1/u_2 > 2$ (условие наличия падающего участка).

Максимальное значение для $f(u)$ будет в точке u_* :

$$u_* = \frac{u_1 u_2}{u_1 - 2u_2} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 2} u_2.$$

При этом

$$f(u_*) = k = \frac{\tau_p}{\tau_r} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon - 1}.$$

Здесь τ_p – пиковое значение сдвиговой прочности контакта «порода–труба».

Легко видеть, что форм-фактор k связан с величиной ε соотношением

$$\varepsilon = 2k \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{k}} \right).$$

Тогда вместо (2) будем иметь зависимость

$$f(v) = \frac{v(v + a)}{(v + d)^2}. \quad (3)$$

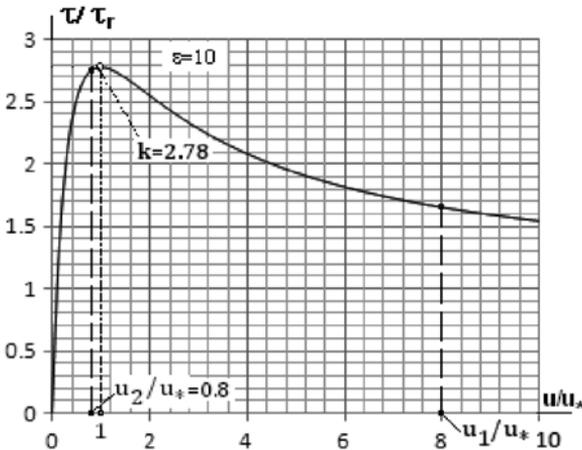


Рис. 2. Пример зависимости (3)

Здесь $a \stackrel{\text{def}}{=} (\varepsilon - 2)$, $d = a/\varepsilon$. В качестве примера на рис. 2 для $\varepsilon = 10$ ($k = 2,777..$) приведена зависимость (3).

Основное уравнение и его решение

Рассмотрим задачу, связанную с определением продольных перемещений тоннельной обделки при продавливании в однородной породной среде.

Под действием сил от домкрата N_0 и сопротивления забоя N_f (рис. 3) участок обделки деформируется в пределах длины L .

Расположим начало координат в сечении O . Выделив на расстоянии x от него бесконечно малый элемент обделки dx , составим условие равновесия этого элемента. Обозначим нормальные напряжения по оси тоннеля σ ; E_p , A_p и A_s — соответственно модуль упругости, площадь поперечного сечения и площадь контакта в системе «труба-порода» на 1 м тоннеля ($\text{м}^2/\text{м}$). Подобно выводу работ [1, 2] будем иметь дифференциальное уравнение для продольных смещений v

$$\frac{(d^2v)}{(d\xi^2)} - \beta^2 f(v) = 0. \quad (4)$$

Здесь безразмерные величины $\xi = x/L$; $\beta^2 = \frac{A_s \tau_p L^2}{A_p E_p k u_*} = \left(\frac{L}{L_*}\right)^2$

и характеристическая длина $L_* = \sqrt{A_p E_p k u_* / A_s \tau_p}$.

Продольные усилия представляются в виде

$$N = -\frac{A_p E_p u_*}{L} \frac{dv}{d\xi}. \quad (5)$$

Граничные условия возьмем в виде

$$\begin{cases} \xi = 0 & v = v_0, \\ \xi = 1 & \frac{dv}{d\xi} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Как видно из условий (6) принимается нулевая жесткость призабойной зоны породного массива и $N_f = 0$. Учет ее конеч-

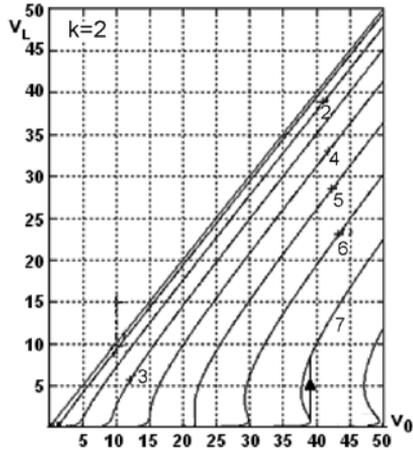


Рис. 3. Зависимость « $v_L - v_0$ »

ной величины является предметом дальнейшего исследования в рамках используемых принципов настоящей работы.

Нелинейное уравнение (4) решается методом книги [5]. Вычислим

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv.$$

Этот интеграл имеет вид

$$F(v) = v + c_1 \ln \left(1 + \frac{v}{d} \right) + c_2 \frac{1}{v+d} - c_3.$$

Здесь $c_1 = a - 2d$, $c_2 = d(a - d)$, $c_3 = (a - d)$.

Пусть

$$G(\varepsilon, v_L, v) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{v_L}^v f(v) dv = [F(v) - F(v_L)].$$

или, при $\rho \stackrel{\text{def}}{=} d + v_L$ и $w \stackrel{\text{def}}{=} v - v_L$ $w_0 = v_0 - v_L$ $w_L = 0$

$$G(\varepsilon, \rho, w) = w + c_1 \ln \left(1 + \frac{w}{\rho} \right) - c_2 \frac{w}{\rho(w + \rho)}. \quad (7)$$

Решим уравнение (4).

$$\left(\frac{dv}{d\xi} \right)^2 = 2\beta^2 [F(v) - F(v_L)] = 2\beta^2 G(\varepsilon, \rho, w).$$

v_L — перемещение при $x = L$.

$$\frac{dv}{d\xi} = \pm \sqrt{2}\beta \sqrt{G(\varepsilon, \rho, w)} \quad (8)$$

Далее

$$1 - \xi = \int_{v_L}^v \frac{dv}{\sqrt{2}\beta \sqrt{F(v) - F(v_L)}} = \int_0^w \frac{dw}{\sqrt{2}\beta \sqrt{G(\varepsilon, \rho, w)}}. \quad (9)$$

При $\xi = 0$ получим в неявном виде зависимость перемещения на забое v_L от значения перемещения v_0 со стороны нагружающего устройства:

$$\beta = \int_{v_L}^{v_0} \frac{dv}{\sqrt{2}\sqrt{F(v) - F(v_L)}} = \int_0^{w_0} \frac{dw}{\sqrt{2}\sqrt{G(\varepsilon, \rho, w)}}. \quad (10)$$

Пусть

$$G(\varepsilon, \rho, w) = wH(\varepsilon, \rho, w),$$

где

$$H(\varepsilon, \rho, \omega) = 1 + \frac{c_1}{\omega} \ln \left(1 + \frac{\omega}{\rho} \right) - c_2 \frac{1}{\rho(\omega + \rho)}. \quad (11)$$

Далее

$$\beta = \int_0^{\omega_0} \frac{d\omega}{\sqrt{2}\sqrt{\omega}\sqrt{H(\varepsilon, \rho, \omega)}} = \sqrt{2} \int_0^{\sqrt{\omega_0}} \frac{dx}{\sqrt{H(\varepsilon, \rho, x^2)}}.$$

Аналогично для функции $v(\xi)$ в неявном виде получим

$$\xi = 1 - \frac{\sqrt{2}}{\beta} (J1 + J2),$$

где

$$J1 = \int_0^{\sqrt{\xi}} \frac{dx}{\sqrt{H(\varepsilon, \rho, x^2)}}; \quad J2 = \int_{\sqrt{\xi}}^{\sqrt{\omega}} \frac{dx}{\sqrt{H(\varepsilon, \rho, x^2)}}.$$

Введем параметры

$$A = 1 + c_1/\rho - c_2/\rho^2; \quad B = c_2/\rho^2 - c_1/2\rho; \quad C = c_1/3\rho - c_2/\rho^2;$$

$$E = B/6A\rho; \quad F = (3B^2/8A^2 - C/2A)/5\rho^2.$$

$J1$ вычисляется по формуле

$$J1 = \left(\sqrt{\xi} - E\sqrt{\xi^3} + F\sqrt{\xi^5} \right) / \sqrt{A},$$

$J2$ вычисляется по программам численного интегрирования [6].

Кроме того, используя выражения (5) и (8) можно получить,

что

$$N = -\frac{E_p A_p u_*}{L} \frac{dv}{d\xi} = N_* \sqrt{G(\varepsilon, \rho, \omega)}. \quad (12)$$

Здесь $N_* = \sqrt{2E_p A_p A_s \tau_r u_*}$.

На рис. 3 показаны зависимости смещений в плоскости забоя v_L от принудительных смещений от нагружающего устройства v_0 при значении форм-фактора k при различных значениях параметра β . Из графиков видно, что для значений параметра β в диапазоне до 4 ход кривых носит плавный характер, тогда как для значений, равных и

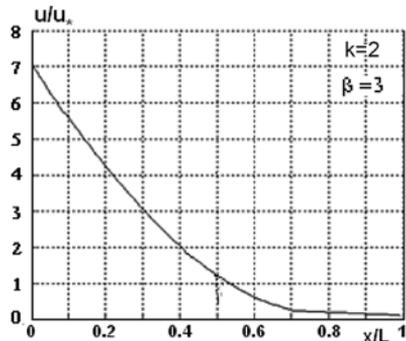


Рис. 4. Ход изменения продольных смещений

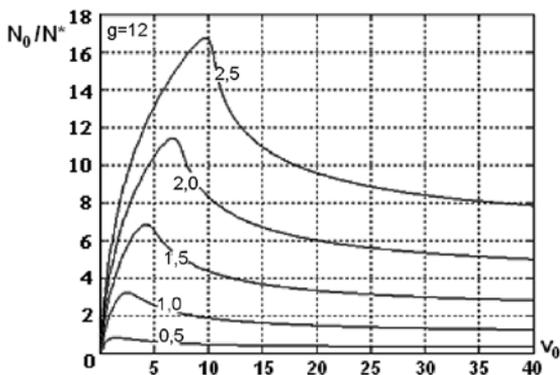


Рис. 5. Зависимость « N_0-v_0 » для $\beta \leq 2,5$

больших 5 имеют изгиб вовнутрь. Это говорит о том, что в этих условиях возможен скачок значений v_L (показан стрелкой для $\beta = 7$). Ход изменения продольных смещений вдоль обделки для частных случаев $k = 2$ и $\beta = 3$ показан на рис. 4.

На рис. 5–6 приведены зависимости для усилий и перемещений в плоскости действия нагружающего устройства при различных значениях параметра β .

Максимальные значения усилий в зависимости от параметра β представлены на рис. 7. В первом приближении эти усилия можно считать оценками фрикционной составляющей усилия продавливания.

Для касательных напряжений имеем

$$\tau = \frac{A_p E_p}{A_s} \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{A_p E_p u_*}{A_s L^2} \frac{d^2 v}{d\xi^2} = \tau_r f(v(\xi))$$

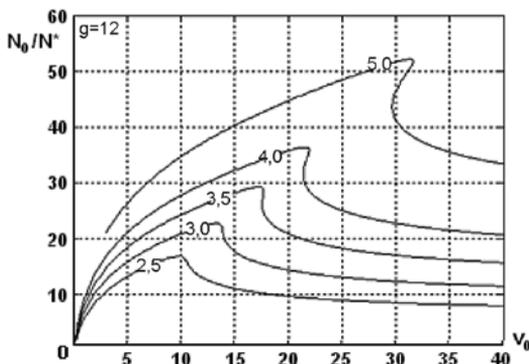


Рис. 6. Зависимость « N_0-v_0 » для $\beta \geq 2,5$

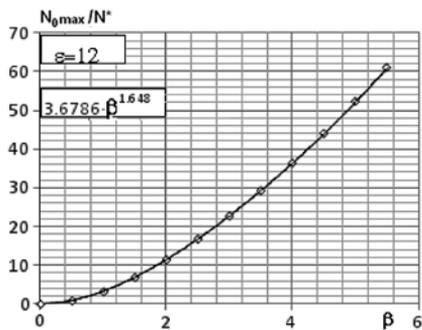


Рис. 7. Зависимость « $N_{0max} - \beta$ »

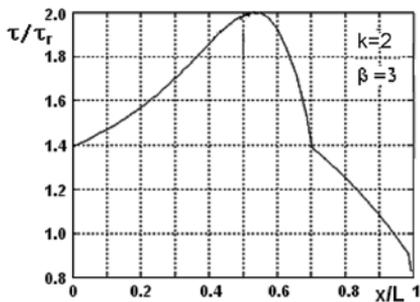


Рис. 8. Изменение τ вдоль обделки

Ход изменения напряжений сдвига по контакту «обделка – порода» вдоль обделки приведен на рис. 8. Для линейной зависимости $\tau = k_i \mu$ такой ход будет иметь вид [1]

$$\tau = \frac{N_0}{A_s L_*} \frac{1}{\text{sh}(L / L_*)} \text{ch} \left\{ \frac{L}{L_*} \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right\}$$

Как видно, эта форма кривой сильно отличается от показанной на рис. 8, где максимум, равный пиковому значению прочности, приходится на середину длины обделки. В линейном же случае максимум приходится на сечение, где действует силовая установка.

Выводы

Нелинейность в зависимости между касательными напряжениями и перемещениями с падающим участком приводит к эффектам, которые не имеют место при линейной зависимости. Это выражается, в частности, в появлении максимума значений фрикционной составляющей усилия продавливания, в отличии форм распределения продольных перемещений и напряжений сдвига вдоль обделки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шорников И. И. Обоснование и разработка метода прогнозирования усилий продавливания обделки в бестраншейной технологии строительства коллекторных тоннелей. – Дисс. на соиск. канд. техн. наук. – М.: МГУ, 2012.
2. Бородавкин П. П. Подземные магистральные трубопроводы. – М.: Недра, 1982. – 384 с.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
4. Пановко Я. Г. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, Физматгиз, 1985. – 288 с.

5. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, Физматгиз, 1976. – 376 с.

6. Мэтьюз Д. Г., Финк К. Д. Численные методы. Использование MATLAB. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 715 с. **ПИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Шорников Иван Игоревич – кандидат технических наук, доцент, технический руководитель, АО «СК Тоннель»,
e-mail: shornicovivan@gmail.com.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 222–224.

UDC 622.272

I.I. Shornikov

JACKING FORCES PREDICTION FOR TUNNEL LINING IN MICROTUNNELLING TECHNOLOGY: FACTOR METHOD

Statement of a problem is resulted and principles of evaluation of characteristics of reaction of system «lining – rock mass» on rigid loading within the stationary theory of equilibrium state transition are presented. For contact characteristics « lining – rock mass » is used 3 parameter dependence «shear stress – longitudinal displacement» with a softening phase. The solution of a regional problem in the form of the nonlinear ordinary differential equation is presented. Results of the numerical counting are yielded in the form of plots. They represent dependences of displacement in plane of a face and a frictional component of jacking force from forced displacement from the loading device. It is shown that distribution of displacement and shear stress on contact qualitatively and quantitatively differ from the results received at linear statement of a problem.

Key words: stationary theory of equilibrium state transition, jacking force, a frictional component, characteristic length, peak strength, residual strength, softening phase.

AUTHOR

Shornikov I.I., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Technical Manager, Construction Company JSC «IC Tunnel», Moscow, Russia, e-mail: shornicovivan@gmail.com.

REFERENCES

1. Shornikov I. I. *Obosnovanie i razrabotka metoda prognozirovaniya usilii prodavlivaniya obdelki v bestransheynoy tekhnologii stroitel'stva kollektornykh tonneley* (Rationale and development of a method to predict the effort of pushing the lining in trenchless technology, construction of collector tunnels), Candidate's thesis, Moscow, MGGU, 2012.

2. Borodavkin P.P. *Podzemnye magistral'nye truboprovody* (Underground pipelines), Moscow, Nedra, 1982, 384 p.

3. Dzhonson K. *Mekhanika kontaktного vzaimodeystviya*: Per. s angl. (Mechanics of contact interaction: English–Russian translation), Moscow, Mir, 1989, 510 p.

4. Panovko Ya.G. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* (Mechanics of deformable solids), Moscow, Nauka, Fizmatgiz, 1985, 288 p.

5. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam* (Handbook on ordinary differential equations), Moscow, Nauka, Fizmatgiz, 1976, 376 p.

6. Met'yuz D.G., Fink K.D. *Chislennyye metody. Ispol'zovanie MATLAB* (Numerical methods. The use of MATLAB), Moscow, Izd. dom «Vil'yams», 2001, 715 p.