УДК 622.02: 624.1

И.И. Шорников

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСИЛИЙ ПРОДАВЛИВАНИЯ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ: ОЦЕНКА КОНЦЕВЫХ СИЛ ПРИ ОСТАНОВЕ РАБОТ ПО ПРОХОДКЕ–I

Построена модель формирования во времени концевых сил сопротивления страгивания продавливаемой системы на прямолинейных участках в период останова проходческих работ. Модель основана на приближенном решении пороупругой контактной задачи в плоской постановке для жесткого цилиндра, прижимаемого собственным весом непосредственно к контуру отверстия в водонасыщенной среде. Построена зависимость и дано ее формульное выражение для силы, воспринимаемой скелетом грунта от комплексного временного параметра, определяемого коэффициентом консолидации грунта и начальным размером контакта щит-грунт. Получена зависимость увеличения размера контакта со временем. Построены зависимости, полезные для определения размера контакта для машин серии AVN. Результаты позволяют проводить более точный анализ значений фрикционной составляющей усилий продавливания и их чувствительности к изменениям параметров продавливания.

Ключевые слова: тоннельная обделка, водонасыщенный грунт, усилие продавливания, фрикционная составляющая, пороупругий контакт, оседание корпуса щита, щитовой зазор, плавучесть, зона контакта щит-грунт, щиты серии AVN, Herrenknecht AG.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-70-76

В практике продавливания тоннельных обделок в водонасыщенных породах при ведении проходческих работ широко известен факт увеличения усилий продавливания (на 60—80%) при перезапуске этого процесса после остановов [1]. В имеющихся нормативных документах (напр. [2]) учет этого фактора не производится.

Традиционно усилия продавливания подразделяются на две составляющие: забойную и фрикционную [1, 2]. Прогнозные оценки фрикционной составляющей с привлечением имеющихся методов дали заниженные по сравнению с измеренными значениями в 10 раз при учете ее полной плавучести [напр., 3], что говорит о недостаточном учете следующих двух факторов: сопротивления на сдвиг по контакту грунт-обделка в условиях плавучести и сопротивления страгивания по контакту в системе «оболочка щита — водонасыщенный грунт — смазочный материал».

В настоящей статье представлены результаты по определению вклада в оценку прогнозных значений усилий продавливания второго из упомянутых фак-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 4. С. 70–76.

торов: силы сопротивления страгивания по контакту щит–грунт и ее изменение в период останова работ по выемке грунта. При этом оценки проводятся без учета следующих временных факторов: спада во времени исходного порового давления при дилатансии грунта в процессе образования зоны сдвига ниже контакта со щитом при его движении, инфильтрации водного компонента смазочного материала в грунт.

В модели принимается, что к моменту останова в массиве восстановилось исходное поровое давление, и исследуется динамика спада во времени избыточного порового давления на контакте щит–грунт, возникшего под действием прижимной силы от веса головной части щита после его останова. Учет формирования и рассеивания избыточного порового давления в процессе движения щита по контакту является предметом отдельного исследования.

В работе [4] предложено разделять фрикционную составляющую усилия продавливания на две составляющие: концевое и остаточное усилия. Вторая из названных величин в условиях плавучести определяется размером контакта обделка-грунт и остаточной прочностью на сдвиг в критическом состоянии τ_r по этому контакту. Концевое усилие F_ω при этих условиях определяется длиной корпуса головной части МТПК (микротоннелепроходческий комплекс) L_{AS} (при всплытии хвостовой части), поперечным размером его контакта с водонасыщенным грунтом A_s (м^2/м) и силой сопротивления T по контакту сталь–грунт. Эта сила представляет силу страгивания корпуса головной части. Считаем ее равномерно распределенной по длине головной части щита. Как и все силы сопротивления в механике грунтов [5], она определяется действием эффективных напряжений, т.е. напряжений, действующих в скелете грунта и коэффициентом статического трения μ_s. Согласно принципу эффективных напряжений [5] прижимная сила W_T от головной части щита в водонасыщенном грунте воспринимается твердым скелетом в виде силы W_S и поровой жидкостью с давлением p в виде силы W_F. Таким образом, $T = \mu_s W_S = \mu_s \cdot (W_T - W_F)$. Со временем при останове при фильтрации жидкости под областью контакта и рассеивания порового давления (уменьшения силы W_F и соответствующего возрастания $T = \mu_s W_S$) происходит осадка головной части в грунт. При этом погруженная в грунт головная часть будет находиться в состоянии, при котором для начала ее движения кроме преодоления сопротивления $\mu_s W_S$ будет необходимым преодолеть силу, характерную для т.н. процессов «пропахивания» перед передней кромкой контакта [6]. Это эффект требует отдельного рассмотрения. Учет неравномерной по длине осадки щита уже производился в работе [7], однако, только с целью определения параметров управления положением щита. Далее будем учитывать равномерное по длине распределение осадки корпуса щита.

При работе щита периферийные резцы роторного рабочего органа при переборе забойного сечения оформляют вокруг корпуса щита т.н. щитовой зазор размером t_{ov}, который при правильно спроектированных обратных скребках заполняется отработанным грунтом с минимальным наполнением [8]. Будем в первом приближении считать, что свойства обработанного пригрузной жидкостью грунта в кольцевом зазоре таковы, что он под действием собственного веса головной части щита выдавливается по контуру контакта снизу в стороны и вверх от подошвы. Тем самым будем полагать наличие непосредственного контакта материала (стали) оболочки щита с нетронутым работами грунтом и рассеивание избыточного порового давления будет происходить не по грунту в зазоре, а в грунтовом массиве. Поэтому прижимную силу W_T от головной части щита в водонасыщенном грунте будем представлять собственным весом щита W_{sh}.

Далее используются решения модельной задачи [6, 9] о внедрении жесткого цилиндра радиуса R_m (радиус щита), находящегося в отверстии плоскости радиусом $R_m + t_{ov}$, приводится к задаче внедрения в полуплоскость цилиндра с эквивалентным радиусом $R \cong R_m^2/t_{ov}$. Одним из характерных параметров контактной задачи является отношение $\kappa = W/E_s t_{ov}$, где W — распределенный по длине головной части L_{AS} ее вес W_{sh} ($W = W_{sh}/L_{AS}$), E_s — модуль упругости грунта.

Будем следовать работе [10], где используется гипотеза Герца о малости параметра $\alpha_s = A_s/(\pi D_{sh})$ — отношения размера контакта A_s (м^2/м) к размеру внедряемого тела πD_{sh}, где D_{sh} — диаметр щита (модельного жесткого цилиндра), т.е. $\alpha_s \cong (2/\pi)\sqrt{\kappa}$ [6]. На рис. 1 приведен результат оценки использования этой гипотезы на примере МТПК серии AVN фирмы Herrenknecht AG с параметрами, приведенными в технических характеристиках серии [11] и книге [12] относительно значений t_{ov}. Оценки проведены следуя методу и результатам работы [9].

В работе [10], где дается аналитическое решение задачи определения во времени хода роста размера области контакта и эффективных напряжений на контакте при внедрении сферического индентора в насыщенное жидкостью уплотняемое полупространство. Вместо осесимметричной постановки указанной работы приведем приближенное решение плоской задачи. Задача решается для плоскости, которая перпендикулярна оси тоннеля. Используются уравнения равновесия, уравнения совместности деформаций и материальные соотношения для насыщенных жидкостью уплотняемых пористых сред в плоской постановке.

Граничные условия представлены отсутствием потока жидкости на контакте, вне контакта нулевыми нормальными и касательными напряжениями и нулевым значением избыточного давления поровой жидкости. При этом, для упрощения анализа, как в [10], коэффициент Пуассона полагается равным нулю. Влияние этого предложения состоит в увеличении оседания грунта, частичным оправданием такого выбора коэффициента Пуассона может служить положения, сформулированные в работе [13], где в представленной теории это обстоятельство увеличивает оседание.

Таким образом, рассмотрим жесткий цилиндр радиуса R, прижимаемый распределенным по оси z распределенным собственным весом W (Н/м) к поверх-

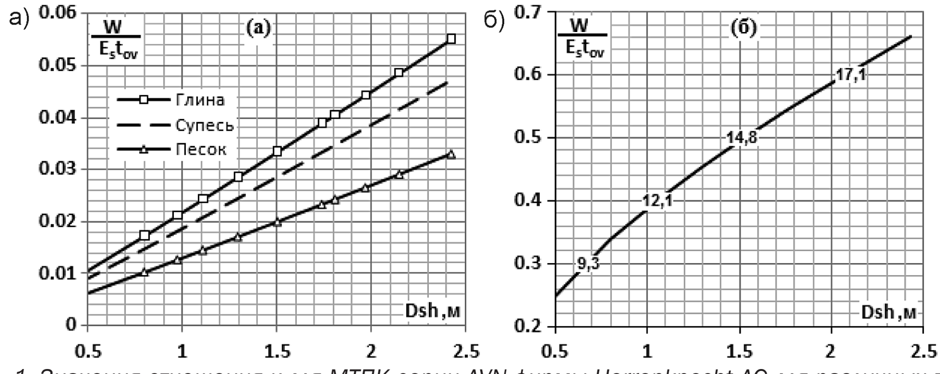

Рис. 1. Значения отношения κ для МТПК серии AVN фирмы Herrenknecht AG для различных грунтов в зависимости от диаметра щита: минимальные (а); максимальные значения (цифры на графике означают величины ошибки применения теории Герца) (б)

ности (y = 0, $-\infty < x < \infty$) насыщенной пористой полуплоскости. В соответствии с геометрией цилиндра, оседание поверхности в области контакта со временем t имеет вид

$$w(x, t) = \delta(t) - (x^2/2R)H(t), \qquad (1)$$

где $\delta(t) = a^2(t)/R$ обозначает осадку самой низкой точки цилиндра; $a(t)$ — полуширина области контакта; $H(t)$ — единичная ступенчатая функция Хевисайда.

Насыщенная пористая полуплоскость ($y \geq 0$), поверхность которой (y = 0) подвергнута давлению $\sigma(r, t)$ и возникшему избыточному поровому давлению $p(r, t)$ на поровую жидкость.

Введем безразмерные переменные $\rho = x/a(t)$ и $\gamma = \sqrt{ct} / a(t)$, где с — коэффициент консолидации грунта (м^2/с). Давление по поверхности полуплоскости подчиняется соотношению

$$\sigma(\rho,t)/\sigma_0^{(0)} = \begin{cases} \left(1-\rho^2\right)^{1/2}, & 0 \leq \rho < 1 \\ 0, & \rho > 1 \end{cases} \qquad (2)$$

Здесь введено начальное значение давления в центре контакта $\sigma_0^{(0)} = 2W/\pi a_0$. По поводу выбора начального полуширины контакта a_0 речь шла выше и она определяется из равенства $\alpha_s \cong (2/\pi)\sqrt{\kappa}$.

Преобразование Фурье давления $\sigma(\rho, t)$ с учетом (2) имеет вид

$$I_F(u) = (2/\pi)\int_0^1 \sigma(\rho,t)\cos(u\rho)\,d\rho = \\ = c_F u^{-1} J_1(u) \qquad (3)$$

Здесь $c_F = 2W/(\pi a(t))$, $J_1(u)$ — функция Бесселя 1-го порядка. Используем полученную в работе [10] рабочую функцию

$$X(s) = 1 - \frac{1}{\sqrt{5}}\sum_{i=1}^{2}(-1)^{i+1}\alpha_i \exp\left(\alpha_i s^2\right)\times \\ \times\left[1 - erf(\alpha_i s)\right] \qquad (4)$$

где $erf(s) = \left(2/\sqrt{\pi}\right)\int_0^s \exp\left(-\lambda^2\right)d\lambda$ — функция ошибок,

$$\alpha_1 = \left(1+\sqrt{5}\right)/2, \; \alpha_1 = \left(1-\sqrt{5}\right)/2.$$

Смещение поверхности с учетом (3) определяется выражением

$$\frac{w(\xi,t)}{\alpha(t)} = \frac{c_F R}{2Ga(t)}\times \\ \times\int_0^\infty Z(\gamma u)\cos(\xi u)u^{-2}J_1(u)\,du \qquad (5)$$

в котором $Z(s) = 1 + X(s)\mathrm{erf}(s)$.

При ξ = 0 с учетом (3) из (5) будем иметь

$$1 = \frac{w(0,t)}{\alpha(t)} = \frac{c_F R}{2Ga(t)}\times \\ \times\int_0^\infty Z(\gamma u)u^{-2}J_1(u)\,du.$$

Т.е. будет иметь место соотношение

$$a^2(t) - a_0^2 = a_0^2\int_0^\infty Y(\gamma u)u^{-2}J_1(u)\,du.$$

Здесь $Y(s) = Z(s) - 1$.

Введем обозначение для вспомогательной функции

$$f_a(\gamma) = \int_0^\infty Y(\gamma u)u^{-2}J_1(u)\,du = \\ = \gamma\int_0^\infty Y(s)s^{-2}J_1(s/\gamma)\,ds \qquad (6)$$

Тогда $a(t) = A_s(t) = a(\gamma) = a_0[1 + f_a(\gamma)]^{1/2}$ и $a(\infty)/a_0 = a_\infty/a_0 = \sqrt{2}$.

Используем аппроксимацию для $Y(s)s^{-2} \approx (4/\pi)e^{-\beta s}$ со значением β = $= (2/\pi)^{1/2} \approx 0{,}7979$, что дает достоверность аппроксимации R^2 = 0,988. Тогда при подстановке в (6) и используя формулу 6.611.1 из [14] получим

$$f_a(\gamma) \approx (4/\pi)\gamma^2\left(1 - \gamma/\sqrt{\gamma^2 + \pi/2}\right). \qquad (7)$$

Эта функция изменяется в диапазоне (0÷1). Изменение ширины контакта во времени следует зависимости

$$a(t) = A_s(t) = a_0[1 + f_a(\gamma)]^{1/2}.$$

Эффективные напряжения с учетом (3) и (4) определяются выражением

$$\tau(\xi,t) = \int_0^\infty X(\gamma u)\cos(\xi u)I_F(u)\,du = \\ = c_F\int_0^\infty X(\gamma u)\cos(\xi u)u^{-1}J_1(u)\,du \qquad (8)$$

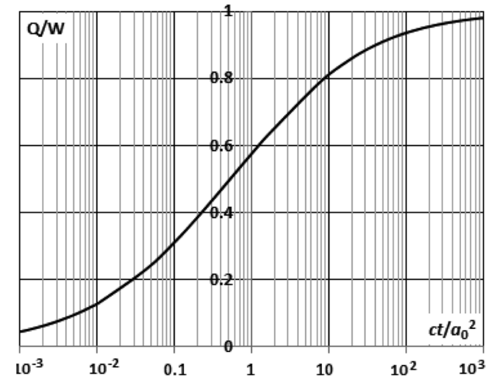

Рис. 2. Зависимость во времени силы, воспринимаемой скелетом грунта в концевой зоне во время останова

Для рабочей функции $X(s)$ в (4) используем аппроксимацию

$$X(s) = 1 - \exp(-\alpha s),$$

где с достоверностью $R^2 = 0{,}9807$ $\alpha = 1{,}372$. С учетом этого проинтегрируем выражение (8) по ξ от –1 до 1. Получим следующее выражение для силы Q, воспринимаемой твердым скелетом грунта:

$$\frac{Q}{W} = \frac{2}{\pi} \times \left\{ \frac{\pi}{2} - 2\int_0^\infty \exp(-\alpha\gamma u)\sin(u)u^{-2}J_1(u)du \right\} \quad (9)$$

Здесь использован табличный интеграл

$$\int_0^\infty \sin(u)u^{-2}J_1(u)du = \pi/4$$

(формула 6.693.4 в [14]). Для интеграла в скобках табличной формулы не нашлось, но при использовании мнимой части выражения 4.14.(6) из [15] получим для этого интеграла выражение:

$$2\int_0^\infty \exp(-\alpha\gamma u)\sin(u)u^{-2}J_1(u)du = \quad (10)$$

$$= \varphi + \frac{\sin 2\varphi}{2|R|^2}$$

Здесь $\varphi = \mathrm{arctg}(R_2/R_1)$,

$$|R|^2 = R_1^2 + R_2^2,\quad r_1 = \sqrt{\alpha\gamma(q + \alpha\gamma)/2},$$

$$r_2 = \sqrt{\alpha\gamma(q - \alpha\gamma)/2},\quad q = \sqrt{(\alpha\gamma)^2 + 4},$$

$$R_1 = \alpha\gamma + r_1,\ R_2 = 1 + r_2.$$

На рис. 2 приведена временная зависимость для Q/W. Вместо безразмерного времени γ, которое использовалось в [10] во всех представленных там временных зависимостях, введена более обозримая величина $\tau = ct/a_0^2$.

Для условий, показанных на рис. 1, *а* (агрегат AVN2000AC) в плотных песках с коэффициентом консолидации равным 10 м^2/с, характерное время $\tilde{\tau} = a_0^2/c$ составит величину порядка 0,1 с, т.е. практически через 10 с сила Q возрастет на 95%.

Ход изменения во времени силы, воспринимаемой скелетом грунта, определяющей силу страгивания продавливаемой системы, можно аппроксимировать зависимостью

$$Q/W = 1 - \left\{ \left(1 + 1{,}882\gamma^2\right)^{1/2} - 1{,}372\gamma \right\} \quad (11)$$

Величина γ определяется из приведенного выше текста.

Выводы

В работе построена модель формирования во времени концевых сил сопротивления страгивания продавливаемой системы на прямолинейных участках в период останова проходческих работ. Эти силы определяются частью собственного веса проходческой машины, передаваемой на скелет грунта. Модель основана на приближенном решении пороупругой контактной задачи в плоской постановке для жесткого цилиндра, прижимаемого собственным весом к контуру отверстия в водонасыщенной среде. Построена зависимость и дано ее формульное выражение для силы, воспринимаемой скелетом грунта от комплексного временного параметра, определяемого коэффициентом консолидации грунта и начальным размером контакта щит-грунт. Для справки построены зависимости, полезные для определения размера контакта для машин серии AVN фирмы Herrenknecht AG.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microtunneling and horizontal drilling: French national project «Microtunnels» recommendations / French Society for Trenchless Technology. London: ISST Ltd, 2006. 343 p.

2. *Коллекторы* и тоннели канализационные. Требования к проектированию, строительству, контролю качества и приемке работ. СТО НОСТРОЙ 2.17.66-2012. — М.: Изд-во «БСТ», 2013. — 101 с.

3. *Sheil B. B.*, *Curran B. G.*, *McCabe B. A.* Experiences of utility microtunnelling in Irish limestone, mudstone and sandstone rock // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 51. No.1. pp. 326—337.

4. *Шорников И. И.* Прогнозирование усилий продавливания тоннельных обделок в технологии микротоннелирования: оценка граничных значений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4. — С. 82—87.

5. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. N. Y. Wiley&Sons. 526 p. Русск. перевод: Терцаги К. Теоретическая механика грунтов. — М.: Стройиздат, 1961. — 507 с.

6. *Johnson K. L.* Contact mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 462 p. Русск. перевод: Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 510 с.

7. *Oreste P. P., Peila D., Marchionni V., Sterling R.* Analysis of the problems connected to the sinking of micro-TBMS in difficult ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2002. Vol. 16. No. 1. pp. 33—45.

8. *Maidl B., Thewes M., Maidl U.* Handbook of Tunnel Engineering. Vol. 1: Structures and Methods. Berlin: Ernst&Sohn, 2013. 480 p.

9. *Каландия А. И.* Математические методы двумерной упругости. — М.: Наука, Физматлит, 1973. — 304 с.

10. *Agbezuge L. K.*, Dersiewicz H. On the indentation of a consolidation half-space // Israel Journal of technology. 1974. Vol. 12. pp. 322—338.

11. Herrenknecht AG. Technical data sheet: AVN 1200 TB — AVN 1800 TB. Pipe Jacking.

12. Praetorius S., Schößer B. Bentonite Handbook: Lubrication for Pipe Jacking. Berlin: Ernst & Sohn, 2017. 242 p.

13. Verruijt A. Theory and problems of poroelasticity. Delft University of Technology, 2016. 274 p.

14. *Градштейн И. С.*, *Рыжик И. М.* Таблицы интегралов. сумм, рядов и произведений. — М.: Физматлит, 1963. — 1109 с.

15. *Tables* of integral transforms, v. I, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1954. 402 p. Русск. перевод: Таблицы интегральных преобразований. Т. 1 / Под ред. Г. Бейтмен, А. Эрдейи. — М.: Наука, 1969. — 344 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Шорников Иван Игоревич — кандидат технических наук, доцент,
МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: shornicovivan@gmail.com.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 4, pp. 70–76.

I.I. Shornikov

PREDICTION OF PUSH FORCES DURING CASING INSTALLATION IN THE TECHNOLOGY OF MICROTUNNELING: ESTIMATION OF TERMINAL FORCES AT WORK STOPPAGE—I

In practice of casing installation in water-inundated soil by pushing, it is commonly known that push forces are increased in the restart of the process after stoppage. The time behavior of the terminal forces of breakaway resistance in the straight line sections of the installed system during pushing stoppage is modeled. The mentioned forces are governed by the portion of tunnel boring machine weight transferred to soil matrix. The model is based on solving a plane problem for poroelastic contact in terms of a rigid cylinder pressed by its own weight to the walls of a hole made in a water-inundated medium. The curve and its formula are obtained for the force taken by the soil matrix versus an integrate time parameter determined by the soil consolidation coefficient and initial size of the shield–soil contact. The contact size–time relation is obtained. For the referential use, the relationships are plotted to determine the contact size for AVN tunnel boring machine from Herrenknecht. The results enable a more accurate evaluation of the friction component of the push forces and their sensitivity to the change in the pushing process parameters.

Key words: tunnel casing, water-inundated soil, push force, friction component, poroelastic contact, breakaway resistance forces, shield subsidence, shield clearance shield–soil contact zone, AVN shield TBMs, Herrenknecht AG.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-70-76

AUTHOR

Shornikov I.I., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: shornicovivan@gmail.com.

REFERENCES

1. *Microtunneling and horizontal drilling: French national project «Microtunnels» recommendations*. French Society for Trenchless Technology. London: ISST Ltd, 2006. 343 p.

2. *Kollektory i tonneli kanalizatsionnye. Trebovaniya k proektirovaniyu, stroitel'stvu, kontrolyu kachestva i priemke rabot. STO NOSTROY 2.17.66-2012* (Sewers and sewer tunnels. Designing, construction, quality supervision and acceptance of works STO NOSTROI 2.17.66-2012), Moscow, BST, 2013, 101 p.

3. Sheil B.B., Curran B.G., McCabe B.A. Experiences of utility microtunnelling in Irish limestone, mudstone and sandstone rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 51. No. 1. pp. 326—337.

4. Shornikov I.I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 4, pp. 82—87.

5. Terzaghi K. *Theoretical soil mechanics*. N. Y. Wiley&Sons. 526 p.

6. Johnson K.L. *Contact mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 462 p.

7. Oreste P.P., Peila D., Marchionni V., Sterling R. Analysis of the problems connected to the sinking of micro-TBMS in difficult ground. T*unnelling and Underground Space Technology*. 2002. Vol. 16. No. 1. pp. 33—45.

8. Maidl B., Thewes M., Maidl U. *Handbook of Tunnel Engineering*. Vol. 1: Structures and Methods. Berlin: Ernst&Sohn, 2013. 480 p.

9. Kalandiya A.I. *Matematicheskie metody dvumernoy uprugosti* (Mathematical methods of two-dimensional elasticity), Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1973, 304 p.

10. Agbezuge L.K., Dersiewicz H. On the indentation of a consolidation half-space. *Israel Journal of technology*. 1974. Vol. 12. pp. 322—338.

11. Herrenknecht AG. *Technical data sheet*: AVN 1200 TB AVN 1800 TB. Pipe Jacking.

12. Praetorius S., Schößer B. *Bentonite Handbook: Lubrication for Pipe Jacking*. Berlin: Ernst & Sohn, 2017. 242 p.

13. Verruijt A. *Theory and problems of poroelasticity*. Delft University of Technology, 2016. 274 p.

14. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* (Tables of integrals, series and products), Moscow, Fizmatlit, 1963, 1109 p.

15. *Tables of integral transforms*, vol. I, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1954, 402 p.

FIGURES

1. Ratios of k and shield diameter for AVN microtunnel boring machines from Herrenknecht for different soils: (a) minimum values; (b) maximum values (figures in the diagram stand for the Hertz theory errors).

2. Time history of force taken by soil matrix in the end zone during process stoppage.