

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСИЛИЙ ПРОДАВЛИВАНИЯ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ: ОЦЕНКА КОНЦЕВЫХ СИЛ ПРИ ОСТАНОВЕ РАБОТ ПО ПРОХОДКЕ — II

И.И. Шорников

МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: shornicovivan@gmail.com

**Аннотация:** Прогнозирование усилий продавливания является необходимой процедурой при разработке проектов строительства тоннелей в водонасыщенных грунтах с использованием технологии микротоннелирования с продавливанием тоннельных обделок. Вместе с тем, широко известный факт увеличения усилий продавливания при перезапуске процесса продавливания после останова работ по проходке в нормативных документах не отражен. Требуется рассмотрение физических процессов, в частности, происходящих в контактной зоне между оболочкой щита и грунтовым массивом и формирующих рост сопротивления страгивания системы щит-обделка. Построена модель формирования во времени концевых сил сопротивления страгивания продавливаемой системы на прямолинейных участках в период останова проходческих работ при наличии в щитовом зазоре материала, представляющего смесь воды и пригрузной среды (грунтобентонитовый шлам или пеногрунтовая паста). Эти силы определяются частью собственного веса проходческой машины, передаваемой на скелет грунта. Модель основана на приближенном решении контактной задачи фильтрационной консолидации в плоской постановке для жесткого цилиндра, прижимаемого собственным весом непосредственно к слою материала в щитовом зазоре с учетом течения флюида в слое материала в щитовом зазоре, так и оттока флюида в окружающий массив. Построены зависимости для силы, инициирующей формирование сопротивления страгивания, от продолжительности останова работ по проходке для разных комплексных временных параметров, определяемых коэффициентом консолидации материала в щитовом зазоре, гидравлическим сопротивлением грунтового массива. Результаты позволяют проводить более точный анализ значений фрикционной составляющей усилий продавливания и их чувствительности к изменениям параметров продавливания.

**Ключевые слова:** тоннельная обделка, останов, водонасыщенный грунт, усилие продавливания, фрикционная составляющая, формирование концевых сил сопротивления страгивания, оседание корпуса щита, щитовой зазор, зона контакта щит-материал щитового зазора — грунт, коэффициент консолидации, гидравлическое сопротивление, щиты серии AVN, Herrenknecht AG.

**Для цитирования:** Шорников И. И. Прогнозирование усилий продавливания тоннельных обделок в технологии микротоннелирования: оценка концевых сил при останове работ по проходке — II // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7. — С. 42–52. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-42-52.

---

# Driving force prediction in microtunneling technology with slurry shields: Estimation of end forces at tunneling shutdowns—II

I.I. Shornikov

<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,  
e-mail: shornicovivan@gmail.com

---

**Abstract:** Prediction of driving forces is a requisite procedure in tunneling design in water-saturated ground using technology of microtunneling with slurry shields. In this regard, the commonly known increase in the driving force in restart of work after shutdowns is never represented in regulator documents. It is necessary to study physical process, in particular in the contact zone of slurry shield and soil, which induce an increase in starting resistance of the slurry shield tunneling system. The model is constructed to describe formation of ends forces of starting resistance in time in the driven system in straight-line portions in the period of tunneling shutdown given the shield clearance is filled with mixture of water and weight material (soil–bentonite slurry or foam soil paste). These forces are governed by the tunneling machine weight transferred to the ground matrix. The model is based on solution of the two-dimensional approximated contact problem on filtration consolidation for a rigid cylinder pressed by its own weight to a layer of material in the shield clearance with regard to fluid flow in this layer and to fluid outflow to enclosing ground. The relations are derived for the initiation force of starting resistance versus duration of the tunneling shutdown for different integrated time parameters determined by consolidation coefficient of material in the shield clearance and by the hydraulic resistance of soil. The obtained results enable more accurate analysis of the friction component of driving forces and their sensitivity to change in the tunneling process parameters.

**Key words:** tunnel casing, shutdown, water-saturated soil, driving force, friction component, starting resistance end force formation, slurry shield subsidence, shield clearance, slurry shield—clearance material—soil contact zone, consolidation coefficient, hydraulic resistance, AVN slurry shields.

**For citation:** Shornikov I. I. Driving force prediction in microtunneling technology with slurry shields: Estimation of end forces at tunneling shutdowns—II. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7):42-52. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-42-52.

---

## Введение

При строительстве тоннелей в технологии микротоннелирования с продавливанием тоннельных обделок в водонасыщенных грунтах широко известен факт увеличения усилий продавливания (на 60–80%) в периоды остановов ведения проходческих работ [1]. В имеющихся нормативных документах, например, [2], учет этого фактора не приводится.

Усилия продавливания традиционно подразделяются на две составляющие: забойную и фрикционную [1, 2]. Прогнозные оценки фрикционной составляющей при учете полной плавучести обделки с привлечением имеющихся методов показали значения в 10 раз заниженные по сравнению с измеренными значе-

ниями, например, [3]. Это 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 — материал в щитовом зазоре».

В статье представлены результаты по определению вклада в оценку прогнозных значений усилий продавливания второго из упомянутых факторов: силы сопротивления страгивания по контакту «щит — материал в щитовом зазоре» и ее изменение в период останова работ по выемке грунта.

При работе щита периферийные резцы роторного рабочего органа при переборе забойного сечения оформляют

вокруг корпуса щита так называемый щитовой зазор размером  $t_{ov}$ , равный разнице радиуса положения внешней кромки периферийных резцов и радиуса оболочки щита. Это зазор заполняется материалом пригрузной среды с некоторым наполнением [4, 5].

В зависимости от применяемого способа активного пригруза забоя, свойств нетронутого работами грунта, разницы давления пригрузной среды и исходного давления поровой воды в щитовом зазоре формируются физические свойства вдавливаемого материала. В работе [4] при изучении причин появления эффекта зажимания передовой части продавливаемой системы щит-обделка обнаружено наличие измельченной породы с уходом бентонитового раствора в нетронутый массив с использованием суспензионного пригруза и оттоком воды из кондиционированной грунтовой пасты с применением грунтового пригруза. Указанный эффект зажимания проявился даже при использовании промежуточной домкратной станции, смонтированной непосредственно за хвостовой частью щита. В работе [5] при изучении износа периферийных резцов роторного рабочего органа комплекса с грунтовым пригрузом обнаружено наличие слабого грунта в щитовом зазоре по всему его периметру.

В работах [6, 7] исследованы вопросы развития давления в материале в щитовом зазоре. Установлено, что в случае использования при проходке выработок щитовых машин с суспензионным пригрузом материалом в щитовом зазоре является смесь отработанный грунт — бентонит — вода, причем бентонит просачивается вплоть до конца хвостовой части щита. Рассмотрены характеристики нестационарных процессов оттока воды и бентонита в грунтовый массив и образования фильтрационной корки на границе с ним [6]. В случае использова-

ния при проходке выработок щитовых машин с грунтопригрузом материалом в щитовом зазоре служит пеногрунтовая паста, причем при исследовании давления на корпус щита в системе «щитовой зазор — зона проходных отверстий ротора — пригрузная среда» в рабочей камере обнаружена гидравлическая связь [7]. При этом изменения давления в материале щитового зазора строго соответствуют изменениям давления на герметичной перегородке.

### **Моделирование наращивания сил страгивания во времени**

В представленном ниже методе моделирования для проведения оценок наращивания сил страгивания во времени в период останова работ по проходке учитывается процесс выдавливания суспензии при действии веса щитовой машины путем фильтрации флюида по слою материала в щитовом зазоре и его оттока из области контакта в нетронутый грунтовый массив. Учет деформации слоя материала в щитовом зазоре при конвергенции контура выработки требует отдельного исследования. При оттоке суспензии в окружающий грунтовый массив обычно имеют место три процесса:

- мгновенная фильтрация [8];
- образование внутренней фильтрационной корки путем совместного действия осаждения и срыва частиц суспензии в так называемой зоне кольматации [8–12];
- образование внешней фильтрационной корки.

В модели принимается действие только процесса мгновенной фильтрации, при которой происходит отток основного объема суспензии [8]. Также учитывается то, что к моменту останова в массиве восстановилось исходное поровое давление, и исследуется динамика спада во времени избыточного порового давления на контакте «щит — материал в щи-

товом зазоре», возникшего под действием веса головной части щита после его останова.

Учет формирования и рассеивания избыточного порового давления в процессе движения щита по такому контакту является предметом отдельного исследования.

В работе [13] предложено разделять фрикционную составляющую усилия продавливания на две составляющие: концевое и остаточное усилия. Концевое усилие будет определяться длиной корпуса головной части МТПК (микротоннельпроходческий комплекс) при всплытии хвостовой части, размером контакта с водонасыщенным грунтом по его периметру  $A_s$  ( $m^2/m$ ) и силой сопротивления  $T$  по контакту сталь — материал в щитовом зазоре. Эта сила представляет силу страгивания корпуса головной части. Распределение этой силы по длине головной части щита считаем равномерным. Согласно принципу эффективных напряжений [14] прижимная сила  $W_T$  от веса головной части щита в водонасыщенном грунте воспринимается твердым скелетом от действия эффективных напряжений в виде силы  $W_s$  и поровой жидкостью с давлением  $p$  в виде силы  $W_F$ . Тогда сила сопротивления  $T$  определится выражением

$$T = \mu_s W_s = \mu_s \cdot (W_T - W_F),$$

где  $\mu_s$  — коэффициент статического трения.

Со временем при останове проходки в результате 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 материал в щитовом зазоре. При этом погруженная в него головная часть будет находиться в состоянии, при котором для начала ее движения, кроме преодоления сопротивления  $\mu_s W_s$ , будет необходимо преодолеть силу, характерную для так

называемых процессов «пропахивания» грунта перед передней кромкой контакта [15]. Этот эффект требует отдельного рассмотрения при учете несоосного с проектным направлением трассы положения щитового комплекса. Далее будем учитывать равномерное по длине распределение осадки корпуса щита.

Будем в первом приближении считать, что свойства материала в щитовом зазоре таковы, что материал под действием собственного веса головной части щита остается упругим и водонасыщенным. Тем самым будем полагать наличие контакта материала (стали) оболочки щита со слоем материала в щитовом зазоре. Расчетная схема для анализа поведения избыточного порового давления представлена на рис. 1. Тоннельная выработка  $H_w$  находится на глубине от уровня грунтовых вод. Предполагается, что материал в зазоре идеально связан с проницаемым грунтовым массивом (см. рис. 1, б), а контакт между материалом и цилиндром рассматривается как лишенный трения. Цилиндр и массив считаются идеально жесткими. Модель строится в рамках стесненной геометрии, т.е. полагаем, что размер нагружаемого участка контакта  $a(t)$  намного меньше размера щитового зазора  $t_{ov}$  (т.е.  $a/t_{ov} \gg 1$ ) (на рис. 1 размер  $t_{ov}$  отражается длиной отрезка  $BD$ ). В результате из всех компонент смещений в пределах толщины слоя материала учитывается только вертикальная компонента смещений и принимается условие стесненности деформаций по осям  $x$  и  $y$ , т.е. будем полагать, что деформации  $e_x = 0$  и  $e_y = 0$ . Полагается также, что вне зоны контакта отсутствуют как напряжения, так и деформации.

Неустановившееся поведение материала в зазоре описывается согласно теории Био [например, 17]. Соответственно этому материал в щитовом зазоре рассматривается как пористый континуум с поровым давлением в качестве пере-

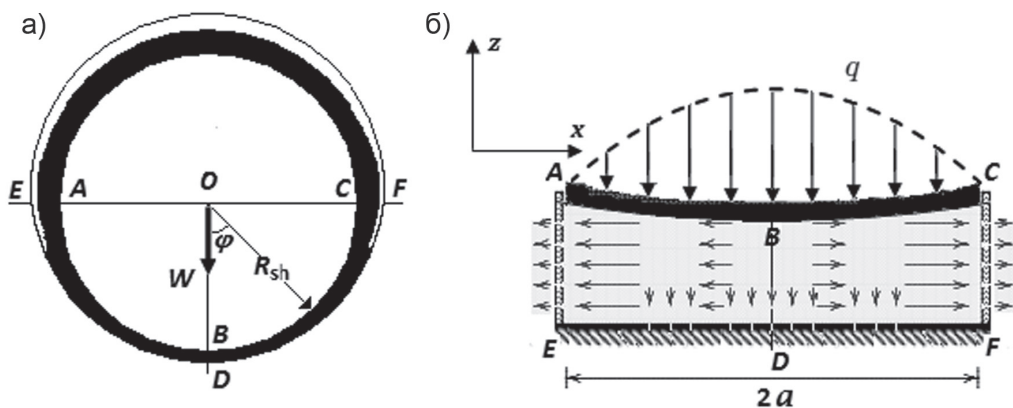


Рис. 1. Расчетная схема для анализа поведения избыточного порового давления в период останова: естественная геометрия (а); развертка по длине контура (стрелки в контактной зоне обозначают направление движения флюида) (б)

Fig. 1. The design diagram for analysis of behaviour of an excess pore pressure at stoppage: (a) natural geometry; (b) development on length of a contour (arrows in contact material show directions of fluid flow)

менной состояния. Для переноса жидкости используется закон Дарси.

Будем также полагать, что свойства материала в щитовом зазоре (сжимаемость и коэффициент фильтрации) и грунтовом массиве таковы, что рассеивание избыточного порового давления будет происходить в слое материала в зазоре с учетом оттока жидкости в грунтовый массив. Прижимную силу  $W_T$  от головной части щита во флюидонасыщенном материале будем представлять собственным весом щита  $W_{sh}$ . Т.о., в условиях, когда размер щитового зазора много меньше размера контакта ( $t_{ov} \ll A_s$ ), задача приводится к решению уравнения консолидации для одномерного случая с учетом как движения флюида по материалу в зазоре, так и перетока флюида из зазора в массив [16, 17].

В момент времени  $t = 0$ , нормальная сила вдавливания  $W = W_T$  (см. рис. 1, а) мгновенно прикладывается к материалу в зазоре с начальной толщиной  $t_{ov}$  с созданием контакта размером  $a_0$ . Учитывая, что  $R_{sh} \gg t_{ov}$ , (см. рис. 1, а) цилиндрический индентор аппроксимирован параболой. Вертикальное смещение  $u_z$  в пределах слоя материала можно, таким

образом, выразить как  $u_z(z, x, t) = z\varepsilon(x, t)$  при  $x \leq a$ , и  $u_z(z, x, t) = 0$  при  $x > a$ . Здесь вертикальная деформация  $\varepsilon$  (в силу условий стесненности объемная деформация равна  $\varepsilon$ ) будет иметь вид

$$\varepsilon(x, z) = \frac{a^2(t)}{D_{sh} t_{ov}} Z(x). \quad (1)$$

Здесь  $Z(x) = (1 - x^2/a^2)$ .

Будем рассматривать распределенный по длине головной части ее вес  $W$  (кН/м). Предположим, что распределение нагрузки по контакту имеет вид (см. рис. 1, б)

$$q(x, t) = q_0(t) \cdot Z(x). \quad (2)$$

По периметру контакта длиной  $2a$  вес распределяется таким образом, чтобы имело место равенство (см. рис. 1)

$$W = 2q_0 \int_0^a Z(x) dx = (4/3) q_0(t) a(t) \quad (3)$$

Т.е.  $q_0(t) = 3W/4a(t)$ .

В насыщенной пористой полосе, поверхность которой ABC подвергнута давлению  $q(x, t)$ , возникает избыточное поровое давление  $p(x, t)$  поровой жидкости.

В книге [17] приводится уравнение, подобное для описания рассматриваемой ситуации

$$\frac{\gamma_f}{k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{p}{\lambda^2}. \quad (4)$$

Здесь  $\varepsilon$  — объемная деформация,  $k$  — коэффициент фильтрации материала в зазоре и  $\gamma_f$  — удельный вес рассматриваемого флюида. Величина квадрата характерной длины перетока поровой жидкости из зазора в грунтовый массив

$$\lambda^2 = kt_{ov}c.$$

Здесь величину гидравлического сопротивления окружающего грунтового массива с определим в первом приближении для условия радиального оттока жидкости из выработки в массив [6]:

$$c \cong (2H_w/k_s) \cdot (1/\xi) \cdot \ln \xi$$

где  $\xi = 2H_w/D_{sh}$ ;  $k_s$  — коэффициент фильтрации грунта в массиве;  $H_w$  — перепад отметок глубины центральной оси тоннеля и УГВ.

В качестве материального соотношения возьмем связь объемной деформации с эффективными напряжениями через коэффициент податливости материала в зазоре  $m_v$ , замеряемого в стабилометре:

$$\varepsilon = m_v(q - p) \quad (5)$$

Интегрируя выражение (1) по  $x$  в пределах зоны контакта, получим вспомогательную величину  $J$

$$J = (4a^3(t)/3D_{sh}t_{ov}) = m_v(W - W_F) = m_vW_s \quad (5a)$$

Введем также величину  $l = dJ/dt$

$$l = \frac{4a^2}{D_{sh}t_{ov}} \dot{a}. \quad (6)$$

Здесь точка над символом ( $\dot{\phantom{a}}$ ) обозначает дифференцирование по времени. Распределение порового давления в жидкости представим в виде  $p(x, t) = p_0(t)Z(x)$ . Тогда  $p_0(t) = 3W_F/4a(t)$ . Используя величину  $J$  и выражения (3) и (5), получим

$$\frac{4a^3(t)}{m_vD_{sh}t_{ov}} + 4p_0(t) \cdot a(t) = 3W \quad (7)$$

Проинтегрируем уравнение (4), используя величину  $l$  из (6). Получим выражение

$$4p_0(t) \cdot a(t) \left[ \frac{1}{3\lambda^2} + \frac{1}{a^2} \right] = \frac{\gamma_f}{k} \frac{4a^2}{D_{sh}t_{ov}} \dot{a} \quad (8)$$

Объединяя это соотношение с выражением (7), и вводя в рассмотрение коэффициент консолидации слоя материала в щитовом зазоре  $C_v = k/m_v\gamma_f$  получим дифференциальное уравнение для нахождения полуразмера зоны контакта  $a(t)$ :

$$2a^3 + \frac{2}{C_v} a^2 \cdot \dot{a} \left[ \frac{1}{3\lambda^2} + \frac{1}{a^2(t)} \right]^{-1} = \frac{3}{2} m_v D_{sh} t_{ov} W$$

Когда  $t \rightarrow \infty$ ,  $\dot{a} \rightarrow 0$  и окончательное выражение для полуразмера зоны контакта  $a_\infty$  определится из выражения

$$a_\infty = \left( \frac{3}{4} m_v D_{sh} t_{ov} W \right)^{1/3} \quad (9)$$

Определим, какую долю периметра оболочки щита занимает ее контакт с материалом в щитовом зазоре  $\eta = 2a_\infty/\pi D_{sh}$ . Для этого оценим диапазон значений, принимаемых величиной  $a_\infty$ . Для величины  $m_v$  в качестве единиц измерения используются  $\text{м}^2/\text{кН}$ , для веса головной части щита  $W$  —  $\text{кН/м}$ , для  $t_{ov}$  — метры. Для  $m_v$  использовались данные из [4–7, 14, 17]. Для  $t_{ov}$  — данные из книги [19]. Для произведения  $(D_{sh}W)^{1/3}$  в качестве примера значения вычислялись по построенной нами зависимости  $W(D_{sh}) = 17,44 \cdot (D_{sh})^{16}$  для щитов серии AVN фирмы Herrenknecht AG с параметрами, приведенными в технических характеристиках этой серии [18]. Все диапазоны сведены в табл. 1.

Таким образом, будем считать величину  $a_\infty$  заданной и определяемой толь-



Таблица 1

**Диапазоны значений параметров, указанных в формуле для  $a_\infty$**   
**Intervals of parameters values for  $a_\infty$  in (9)**

| 0                 | 1             | 2                | 3                  | 4         |
|-------------------|---------------|------------------|--------------------|-----------|
| Величина          | $(m_v)^{1/3}$ | $(t_{ov})^{1/3}$ | $(D_{sh} W)^{1/3}$ | $\eta$    |
| Диапазон значений | 0,1 ÷ 0,4     | 0,4 ÷ 0,55       | 2,6 ÷ 6,0          | 0,1 ÷ 0,5 |

ко размером проходимой выработки и равной приблизительно  $a_\infty = \eta \pi D_{sh}$ .

Введем безразмерные величины  $\Delta$  и  $T$  таким образом, что будут иметь место равенства

$$a = \Delta a_\infty, t = \tau T, \tau = a_\infty^2 / C_v \text{ и } \alpha^2 = a_\infty^2 / 3\lambda^2.$$

В первом приближении принимается, что  $a_0 = 0$ . Это следует из принятого в механике грунтов положения [14], что в момент приложения нагрузки она действует только на жидкую фазу грунта с коэффициентом Пуассона, равным 0,5, т.е. на несжимаемый объект. Оценка точного значения  $a_0$  проводится методами теории пороупругости с учетом сжимаемости как жидкой, так и твердой фаз грунта.

Окончательное дифференциальное уравнение будет иметь вид

$$\Delta^4 \cdot \frac{d\Delta}{dT} = (1 - \Delta^3)(1 + \alpha^2 \Delta^2) \quad (10)$$

Решением этого уравнения будет функция  $T(\Delta)$ :

$$T(\Delta) = \int_0^\Delta \frac{x^4 dx}{(1 - x^3)(1 + \alpha^2 x^2)} \quad (11)$$

Здесь в качестве начального условия берется не фактическое значение площади контакта корпуса щита со слоем материала в щитовом зазоре, а ее приращение к той площади, которая сформировалась к концу передвижки корпуса с процессом сдвига по контакту сталь — тонкая полоса, сдвига в слое материала в зазоре. В полосе сдвига в результате значительных перемещений, как известно, формируется поровое давление жидкости, которая уже перешла в основной объем слоя.

## Результаты

Из равенств (5а) и (9) следует основное соотношение для оценки поведения во времени силы, инициирующей сопротивление страгивания  $W_s$ :

$$W_s(t) = W \cdot \Delta^3(t) \quad (12)$$

Решение в виде (11) представляет из себя сумму от произведений параметра  $\alpha$  в различных степенях на следующие функции:

$$\Delta^n \quad (n = 1, \dots, 5), \arctg(\alpha \Delta), \ln(1 + \alpha^2 \Delta^2),$$

$$\arctg\left[\frac{(1 + 2\Delta)}{\sqrt{3}}\right], \ln(1 - \Delta^3),$$

$$\ln\left[\frac{(1 - \Delta)^2}{(1 + \Delta + \Delta^2)}\right].$$

Из-за громоздкости выражения решение было получено численным интегрированием.

Интерес представляет зависимость решения от параметра  $\alpha$ .

Введем обозначение:  $\zeta = W_s/W$ . Продифференцируем (12) по времени и получим с учетом уравнения (10)

$$\dot{\zeta} = 3\Delta^2 \dot{\Delta} = 3(1 - \zeta)\left(1/\zeta^{2/3} + \alpha^2\right) \quad (13)$$

Проанализируем это уравнение. При  $\zeta \rightarrow 0$  имеем  $dT = \zeta^{2/3} d\zeta$  что дает соотношение, справедливое при малых временах останова  $\zeta \approx T^{3/5}$  в котором нет зависимости от параметра  $\alpha$ . С другой стороны, при  $\zeta \rightarrow 1$  заменим  $1 - \zeta = \varepsilon$  будем иметь  $d\varepsilon/\varepsilon = -3(1 + \alpha^2)dT$  и получим соотношение  $\zeta \approx 1 - e^{-3(1 + \alpha^2)T}$ . Таким образом, зависимость от параметра  $\alpha$  получается при больших временах.

Рассмотрим характерное время останова  $T_{90}$ , за которое сила  $W_s$  достигает 90% значения силы  $W$ .

Таблица 2

**Диапазоны значений параметров, указанных в скобках формулы для  $\alpha^2$**   
**Intervals of parameters values in brackets for  $\alpha^2$**

| 0                 | 1                   | 2                 | 3                    |
|-------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| Скобка            | $k_s/k$             | $(t_{ov})^{-1/3}$ | $1/\ln(2H_w/D_{sh})$ |
| Диапазон значений | $10^{-2} \div 10^2$ | $1,9 \div 2,7$    | $0,4 \div 1$         |

Проведем оценки значений параметра  $\alpha^2 = a_\alpha^2 / 3\lambda^2$ . Используя соотношения из текста статьи для величин в этой формуле, получим выражение

$$\alpha^2 \cong 0,3(k_s/k)(m_v)^{2/3}(t_{ov})^{-1/3} \cdot [(D_{sh})^{-1/3} W^{2/3}] (1/\ln(2H_w/D_{sh}))$$

Приведем оценки диапазона изменения этой величины. Для последней скобки при значениях отношения  $2H_w/D_{sh}$  порядка единицы для этой скобки значение принималось равным 1, так как длина пути фильтрации в среднем составляет величину порядка  $H_w \sim D_{sh} / 2$ .

Для скобки  $[(D_{sh})^{-1/3} W^{2/3}]$  значения вычислялись по приведенной выше зависимости  $W(D_{sh}) = 17,44 \cdot (D_{sh})^{1,6}$  для щитов серии AVN фирмы Herrenknecht AG с параметрами, приведенными в технических характеристиках этой серии [18]. Для скобки  $(t_{ov})^{-1/3}$  — по данным книги [19]. Все диапазоны сведены в таблицу.

Как видно из табл. 2, ориентировочный диапазон значений для величины  $\alpha^2$  будет иметь вид  $(1,0 \div 10)$  ( $k_s/k$ ). Таким образом, определяющим параметром поведения во времени силы  $W_s$ , инициирующей сопротивление страгивания корпуса щита, будет отношение  $(k_s/k)$  проницаемостей грунтового массива и материала в щитовом зазоре.

На рис. 2 в безразмерных переменных показаны зависимости силы, инициирующей сопротивление страгивания корпуса щита, от продолжительности останова работ по выемке для различных значений параметра  $\alpha$  от 0,001 до 1000 (кривые для  $\alpha = 0,001, 0,01$  и  $0,1$  практически сливаются). Можно показать, что при малых временах останова рост этих сил пропорционален  $T^{3/5}$ . При этом, характерное безразмерное время останова  $T_{90}$ , за которое сила  $W_s$  достигает 90% веса головной части щита, практически остается постоянным при изменении па-

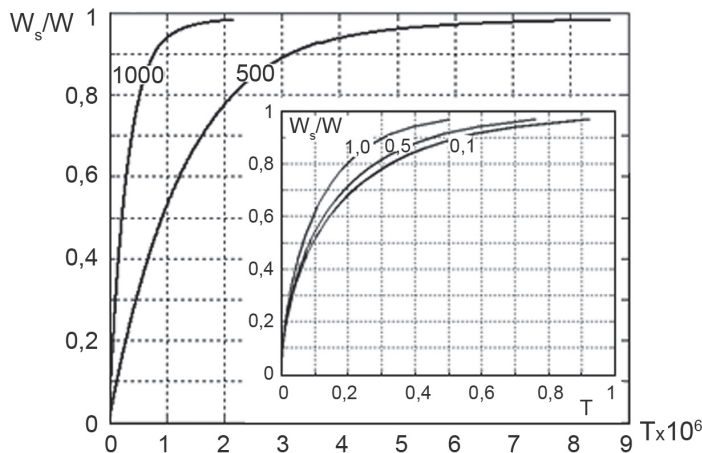


Рис. 2. Сила, инициирующая сопротивление страгивания от продолжительности останова  
 Fig. 2. The force initiating a breakout resistance v. s. stoppage duration



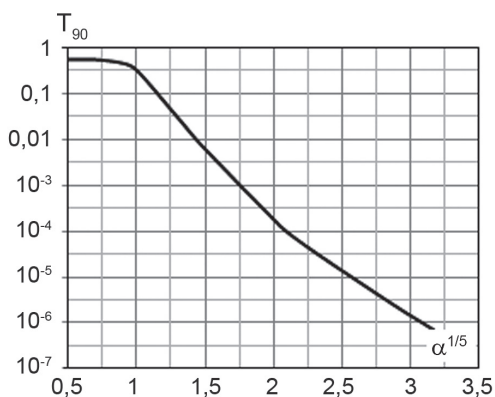


Рис. 3. Зависимость характерного времени останова от параметра  $\alpha$

Fig. 3. Dependence of characteristic time of stoppage on parameter  $\alpha$ .

параметра  $\alpha$  от 0,001 до 0,5, но затем при его больших значениях резко падает до очень малых значений (рис. 3).

Подробный анализ зависимости этого времени для различных сочетаний грунтовых условий и вида применяемого активного пригруза забоя при проходке в водонасыщенных грунтах остается вне рамок настоящей работы.

### Выводы

В работе построена модель формирования во времени концевых сил сопро-

тивления страгивания продавливаемой системы на прямолинейных участках в период останова работ по выемке грунта при наличии в щитовом зазоре материала, представляющего смесь воды и смеси пригрузной среды (грунтобentonитовый шлам или пеногрунтовая паста) и вынимаемого грунта. Эти силы определяются частью собственного веса проходческой машины, передаваемой на скелет грунта. Модель основана на приближенном решении контактной задачи фильтрационной консолидации в плоской постановке для жесткого цилиндра, прижимаемого собственным весом непосредственно к слою материала в щитовом зазоре с учетом оттока флюида в окружающей массив. Построенные зависимости отражают поведение силы, инициирующей формирование сопротивления страгивания, от двух комплексных временных параметров, определяемых коэффициентом консолидации материала в щитовом зазоре и гидравлическим сопротивлением грунтового массива. Выделены диапазоны значений этих параметров, в одном из которых останов сопровождается относительно постоянным ростом сил сопротивления, а в другом — их резким возрастанием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Microtunneling and horizontal drilling: French national project «Microtunnels» recommendations / French Society for Trenchless Technology. London: ISST Ltd, 2006. 343 p.*
2. *Микротоннелирование. Правила и контроль выполнения, требования к результатам работ. СТО НОСТРОЙ 2.27.124-2013. — М.: Изд-во «БСТ», 2015. — 93 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. *Babendererde L. Problems of TBMs in Water Bearing Ground / Proceedings of Summer-school 2003 on Rational Tunnelling, University of Innsbruck, 2003. 20 p.*
5. *Gharahbagh E. A., Mooney M. A., Frank G., DiPonio M. A. Periodic inspection of gauge cutter wear on EPB TBMs using cone penetration testing // Tunnelling and Underground Space Technology. 2013, vol. 38, pp. 279–286.*
6. *Talmon A. M., Bezuijen A. Simulating the consolidation of TBM grout at Noordplaspolder// Tunnelling and Underground Space Technology. 2009, vol. 24. No 9. pp. 493–499.*
7. *Mori L. Advancing understanding of the relationship between soil conditioning and earth pressure balance tunnel boring machine chamber and shield annulus behavior. PhD thesis. Colorado School of Mines, 2016. 206 p.*

8. Talmon A. M., Mastbergen D. R., Huismatt M. Invasion of pressurized clay suspensions into granular soil // *Journal of Porous Media*. 2013. Vol. 16. No. 4. pp. 351–365.
9. Никифоров А. И., Садовников Р. В., Никифоров Г. А. О переносе дисперсных частиц двухфазным фильтрационным потоком // *Вычислительная механика сплошных сред*. — 2013. — Т. 6. — № 1. — С. 47–53.
10. Кузьмина Л. И., Осипов Ю. В. Математическая модель движения частиц в фильтре // *Вопросы прикладной математики и вычислительной механики: сборник научных трудов*. Т. 17. — М.: МГСУ, 2014. — С. 295–304.
11. Леонтьев Н. Е., Татаренкова Д. А. Точные решения нелинейных уравнений течения суспензии в пористой среде // *Вестник Московского университета. Математика, механика*. — 2015. — № 3. — С. 49–54.
12. Леонтьев Н. Е. Точные решения задачи о фильтрации суспензии с замедлением скачка концентрации в рамках нелинейной двухскоростной модели // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. — 2017. — № 1. — С. 168–174.
13. Шорников И. И. Прогнозирование усилий продавливания тоннельных обделок в технологии микротоннелирования: оценка граничных значений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 4. — С. 82–87.
14. Terzaghi K. *Theoretical soil mechanics*. N. Y. Wiley&Sons. 526 p. Русск. перевод: Терцаги К. *Теоретическая механика грунтов*. — М.: Стройиздат, 1961. — 507 с.
15. 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.
16. Delavoipière J., Verneuil E., Tran Y., Chateauminois A. Poroelastic indentation of mechanically confined hydrogel layers // *Journal of the Royal Society of Chemistry. Soft Matter*. 2016. Vol. 12, pp. 8049–8058.
17. Strack O. D. L. *Analytical Groundwater Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. 2017. 448 p.
18. Herrenknecht Allgemeine Gesellschaft. Technical data sheet: AVN 1200 TB — AVN 1800 TB. Pipe Jacking.
19. Praetorius S., Schöber B. *Bentonite Handbook: Lubrication for Pipe Jacking*. Berlin: Ernst & Sohn, 2017. 242 p. 

## REFERENCES

1. *Microtunneling and horizontal drilling: French national project «Microtunnels» recommendations*. French Society for Trenchless Technology. London: ISST Ltd, 2006. 343 p.
2. *Mikrotonnelirovanie. Pravila i kontrol' vypolneniya, trebovaniya k rezul'tatam rabot. STO NOSTROY 2.27.124-2013* [Microtunneling. Execution of works regulations and control, work results requirements) STO NOSTROI 2.27.124-2013], Moscow, Izd-vo «BST», 2015, 93 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. Babendererde L. Problems of TBMs in Water Bearing Ground. *Proceedings of Summer-school 2003 on Rational Tunnelling, University of Innsbruck*, 2003. 20 p.
5. Gharahbagh E. A., Mooney M. A., Frank G., Walter B., DiPonio M. A. Periodic inspection of gauge cutter wear on EPB TBMs using cone penetration testing. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013, vol. 38, pp. 279–286.
6. Talmon A. M., Bezuijen A. Simulating the consolidation of TBM grout at Noordplaspolder. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009, vol. 24. No 9. pp. 493–499.
7. Mori L. *Advancing understanding of the relationship between soil conditioning and earth pressure balance tunnel boring machine chamber and shield annulus behavior*. PhD thesis. Colorado School of Mines, 2016. 206 p.
8. Talmon A. M., Mastbergen D. R., Huismatt M. Invasion of pressurized clay suspensions into granular soil. *Journal of Porous Media*. 2013. Vol. 16. No. 4. pp. 351–365.
9. Nikiforov A. I., Sadovnikov R. V., Nikiforov G. A. About transport of dispersed particles by a two-phase filtration flow. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2013. Vol. 6, no 1, pp. 47–53. [In Russ].

10. Kuz'mina L. I., Osipov Yu. V. *Matematicheskaya model' dvizheniya chastits v fil'tre. Voprosy prikladnoy matematiki i vychislitel'noy mekhaniki: sbornik nauchnykh trudov.* T. 17 [Mathematical model of particle motion in the filter. Problems of applied mathematics and computational mechanics. Collection of scientific papers. Vol. 17], Moscow, MGSU, 2014, pp. 295–304.

11. Leont'ev N. E., Tatarenkova D. A. Exact solutions to nonlinear equations of suspension flow through a porous medium. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Matematika, mekhanika.* 2015, no 3, pp. 49–54. [In Russ].

12. Leont'ev N. E. Exact solutions to the problem of deep-bed filtration with retardation of a jump in concentration within the framework of the nonlinear two-velocity model. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza.* 2017, no 1, pp. 168–174. [In Russ].

13. Shornikov I. I. Jacking forces prediction for tunnel lining in microtunnelling: boundary values estimation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'.* 2017, no 4, pp. 82–87. [In Russ].

14. Terzaghi K. *Theoretical soil mechanics.* N. Y. Wiley&Sons, 1961, 526 p.

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

16. Delavoipière J., Verneuil E., Tran Y., Chateauminois A. Poroelastic indentation of mechanically confined hydrogel layers. *Journal of the Royal Society of Chemistry. Soft Matter.* 2016. Vol. 12, pp. 8049–8058.

17. Strack O. D. L. *Analytical Groundwater Mechanics.* Cambridge: Cambridge University Press. 2017. 448 p.

18. *Herrenknecht Allgemeine Gesellschaft.* Technical data sheet: AVN 1200 TB – AVN 1800 TB. Pipe Jacking.

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

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.I. Shornikov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia, e-mail: shornicovivan@gmail.com.



---

## РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

### ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА ТОКА СТАТОРА

(№ 1198/07–19 от 04.06.2019; 11 с.)

Косарева-Володько Ольга Владимировна<sup>1</sup> — к.т.н., канд. техн. наук, доцент,

Герасимов Андрей Андреевич<sup>2</sup> — магистрант,

<sup>1</sup> МГИ НИТУ «МИСиС».

Рассмотрен принцип спектрального анализа тока статора трехфазного асинхронного двигателя, возможность диагностики скрытых неисправностей электродвигателя и возможная техническая реализация устройства для проведения диагностики.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный двигатель, спектральный анализ, датчик тока, аналогово-цифровой преобразователь, быстрое преобразование Фурье.

### DIAGNOSTICS OF THE STATE OF THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS USING THE STATOR CURRENT SPECTRUM RESEARCH METHOD

O.V. Kosareva-Volodko<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor; A.A. Gerasimov<sup>2</sup>, Master's Degree Student,  
<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The principle of spectral analysis of the stator current of a three-phase asynchronous motor, the ability to diagnose latent faults in the electric motor and the possible technical realization of the device for diagnostics are considered.

Key words: three-phase asynchronous motor, spectral analysis, current sensor, analog-digital converter, fast Fourier transform.