

Численное моделирование устойчивости лба забоя в зоне неоднородности при недренированной модели массива

Александр Васильевич АЛЕКСЕЕВ*,
Павел Эдуардович ВЕРБИЛО**

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, Санкт-Петербург

Актуальность работы. Оценка устойчивости обнаженного забоя является актуальной задачей ввиду того, что часть выработок метрополитена возводится горным способом, с креплением лба забоя вручную, в то время как косвенные методы прогнозирования инженерно-геологических и гидрогеологических условий впереди лба забоя свидетельствуют о наличии мест локального разуплотнения и обводнения, способных повлиять на устойчивость.

Цель работы. Оценка зоны влияния и типа дренирования элемента неоднородности на устойчивость проходческого забоя, пройденного в массиве протерозойских глин.

Метод и методология. В качестве метода исследования выбран метод конечных элементов, реализуемый в программном комплексе PLAXIS. В качестве геомеханической модели поведения грунта принята модель упрочняющегося грунта Hardening Soil Small Strain. Рассмотрены расчетные ситуации деформирования незакрепленного лба забоя, приближающегося к водонасыщенному элементу неоднородности, при моделировании элемента мощностью 1 и 4 м и изменении характера фильтрации воды вдоль элемента.

Результаты работы. При различии деформационных свойств расчетных грунтовых элементов на 30 % и заданном уровне грунтовых вод как в случае дренирования, так и недренирования происходит увеличение перемещений при подходе проходческого забоя к зоне влияния неоднородности. Размер зоны влияния зависит от выбранного типа дренирования элемента неоднородности.

Область применения результатов, изложенных в статье. Результаты, изложенные в статье, при условии определения параметров модели, соответствующих условиям проходки, могут быть использованы при оценке устойчивости лба проходческого забоя в зоне неоднородности, являющейся водопроницаемым каналом.

Вывод. При проектировании строительства линейного подземного сооружения в зоне неоднородности необходимо оценивать устойчивость лба забоя с использованием численного моделирования. При моделировании элемента неоднородности необходимо учитывать степень влагонасыщения, мощность элемента неоднородности и характер фильтрации воды вдоль элемента неоднородности.

Ключевые слова: недренированный массив; устойчивость; забой тоннеля; зона неоднородности; численный анализ; метод конечных элементов.

Введение

Понятие «устойчивость» в подземном строительстве имеет множество определений. Рассмотрим основные определения устойчивости, приведенные в учебно-методической литературе и нормативных документах. Условно устойчивость разделяется на устойчивость грунтов и конструкций. Н. С. Бульчев под устойчивостью горных пород понимает «способность сохранить форму и размеры обнажений, образуемых при строительстве горных выработок и подземных сооружений» [1]. А. Г. Протосеня ограничивает устойчивое состояние допустимыми пределами изменения формы и размеров выработки, обусловленными правилами эксплуатации и техникой безопасности. Вместе с тем под устойчивостью обнажений пород понимается состояние, при котором уровни напряженности и деформируемости не приводят к вывалам, разрушениям и смещениям, препятствующим эксплуатации горной выработки [2]. В нормативной документации определение устойчивости изменяется в зависимости от области регулирования. Так, СП «120.13330.2012 Метрополитены» определяет устойчивость как «способность грунтов сохранять в забое (в данных инженерно-геологических условиях, при данном способе горнопроходческих работ и конкретной площади забоя) состояние равновесия без каких-либо явных деформаций в течение времени, необходимого для установки крепления». Понятие явных деформаций остается нераскрытым. Документ, регламентирующий строительство предприятий по добыче полезных ископаемых (СП 91.13330.2012 *Подземные горные выработки*) разделяет устойчивость горной выработки и устойчивость окружающего забоя массива. Под устойчивостью горной выработки понимается «способность выработки функционировать в определенных условиях с заданными параметрами в течение требуемого отрезка времени», тогда как под устойчивостью окружающего забоя массива горных пород – «способность массива в определенных условиях сохранять равновесие». Данное определение схоже с определением, приведенным в документе, устанавливающим основные геотехнические требования и распространяющимся на проектирование новых и реконструкцию существующих подземных сооружений, в котором вводится коэффициент устойчивости γ_{st} , определяемый для конкретной поверхности скольжения как «соотношение сдвиговой прочности грунта к касательным напряжениям, действующим на этой поверхности скольжения» (СП 248.1325800.2016 *Сооружения подземные. Правила проектирования*). Стоит учесть, что документ не распространяется на сооружение специального назначения.

Таким образом, под устойчивостью в дальнейшем будем понимать понятие, закрепленное «СП 120.13330.2012 Метрополитены», и проверяя коэффициент устойчивости, будем ориентироваться на величину деформаций поверхности забоя при установившемся равновесии в массиве.

В общем случае под неоднородностью грунтового массива по какому-либо параметру в пределах рассматриваемого объема понимается зависимость этого параметра от координат точки опробования [2]. Вместе с тем понятие неоднородности имеет относительный характер. По ГОСТ 20522–2012 требуется оценивать неоднородность грунта с помощью коэффициента вариации характеристик грунта¹. Для сравнения неоднородности по разным параметрам может при-

* a1exeev@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2581-4433>

** pashaverbilo@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6776-5866>

меняться сравнительный коэффициент вариации. Вводится термин «элемент неоднородности», определяющий наибольший объем однородной горной породы, отличающейся по своим свойствам от соседней с ней. По классификации, отраженной в пособии по геомеханике [2], различают 4 порядка неоднородности по размеру элемента неоднородности. Для целей проектирования ГОСТ 20522–2012 условно укрупняет порядки неоднородности и определяет расчетный грунтовый элемент (РГЭ) и инженерно-геологический элемент (ИГЭ). Несмотря на то, что задача об определении объема грунта в РГЭ и ИГЭ может потребовать широкого спектра исследований, в процессе строительства метрополитена, в пределах одного ИГЭ могут наблюдаться участки грунта, отличающиеся порядком неоднородности, находящиеся в разуплотненном состоянии и являющиеся водопроводящими каналами. Кроме того, неоднородность возникает в зонах биохимического выветривания и активной жизнедеятельности природной и привнесенной микробиоты [3]. В подобных участках наблюдается изменение деформационных и прочностных свойств в пределах одного инженерно-геологического элемента.

Проходка тоннелей в слабом водоносном грунте особенно требовательна при высоких давлениях воды и в неоднородных образованиях с переменной водопроницаемостью. Гидравлическая неоднородность может привести к локально высоким гидравлическим градиентам, которые неблагоприятны для устойчивости.

Дренажный тип поведения характерен для сухих грунтов, а также для грунтов с высокой водопроницаемостью. Оценка устойчивости по дренажной схеме рекомендуется при прогнозировании долгосрочной реакции грунта [4].

При моделировании недренажного поведения при заданном уровне грунтовых вод скелет грунта имеет связанную воду, в которой формируется избыточное поровое давление. Оценка устойчивости по недренажной схеме рекомендуется проводить при малой водопроницаемости материала и при прогнозировании кратковременной реакции грунта [4].

В литературе отражено множество примеров резкой смены горно-геологических условий [5–8]. В общем на прорыв воды, плывунов и текущих обводненных грунтов в период строительства подземных сооружений в СССР с 1981 по 1990 г. приходилось около 30 % аварийных случаев [7].

Чередующиеся зоны переменной прочности, проницаемости и толщины приводят к изменчивости в геомеханическом поведении грунта во время проходки тоннеля. Отдельные слабые зоны, состоящие из щебня или валуноподобного материала низкого сцепления и проводящие воду, в случае внезапного столкновения могут привести к масштабной потере устойчивости и последующему затоплению значительной части тоннеля.

Подобные чередующиеся зоны были зафиксированы косвенными методами прогнозирования горно-геологических условий. Как отмечают исследователи в публикации [9]: «...во время проходки тоннелей щитом с грунтопригрузом, в г. Санкт-Петербурге, при прогнозе горно-геологических условий впереди лба забоя на трассе тоннеля, длиной 1872 м были выявлены многочисленные интервалы разуплотненных водонасыщенных грунтов, а также участки со скоплением гравийно-галечникового материала и валунов». Характерный разрез представлен на рис. 1.

Таким образом, целью данной статьи является оценка зоны влияния неоднородности и выявление динамики изменения деформирования лба забоя относительно деформирования в однородном массиве при условии моделирования элемента неоднородности дренажным и недренажным. Для достижения данной цели решаются задачи о моделировании элемента неоднородности в двух выше обозначенных состояниях.

Оценку влияния элемента неоднородности массива на деформирование лба проходческого забоя проводили ряд исследователей [6, 10, 11]. В статьях рассмотрено влияние неоднородности относительно параметров анизотропии деформационных свойств, неоднородности по признаку водопроницаемости. Выбор способа повышения устойчивости в зоне неоднородности представлен в публикации [12]. Оценка устойчивости лба забоя при проходке щитом с пригрузом при учете избыточного порового давления представлена в публикации [13].

В качестве метода исследования выбран метод конечных элементов, реализованный в программе PLAXIS 3D 2017, позволяющий моделировать поровое давление. Сетка 10 узловых тетраэдральных элементов имеет сгущение в извлекаемых объемах тоннеля и в элементе неоднородности. Радиально, на расстоянии 4 м от тоннеля, по контуру также имеется сгущение сетки. Таким образом, модель состоит из 25 287 элементов и 37 099 узлов. Проходка тоннеля диаметром $D = 8$ м рассматривается на глубине 30 м. Уровень грунтовых вод H_w задается равным 2 м от поверхности земли (рис. 2). Свойства однородного массива (рис. 2, а – 1) и элемента неоднородности (рис. 2, а – 2), используемые при расчете, представлены в таблице. Мощность элемента неоднородности задавалась 1 и 4 м. Для моделирования деформирования лба забоя выбрана модель грунта Hardening Soil Small Strain, как подходящая для оценки деформаций в массиве [4, 13–16].

Так как элемент неоднородности имеет вертикальную ориентацию, начальные напряжения в массиве рассчитывались под влиянием гравитации. В целях стабилизации деформаций после начального шага расчета задавался шаг расчета (*Plastic*), на котором не происходило никакого изменения объема модели.

Параметры модели подбирались на основании результатов лабораторных испытаний протерозойских глин, отобранных из забоев станций метро «Бухарестская» и «пр. Славы» и проведенных по консолидированно-недренированной схеме с допущением того, что кривые деформирования дренированных и недренажных испытаний, по сути, схожи.

При моделировании элемента неоднородности недренажным однородный массив задавался как сухой кластер. При совместном деформационно-фильтрационном расчете и задании элемента неоднородности дренированным поровое давление однородного массива интерполировалось на каждом шаге расчета.

В случае учета уровня грунтовых вод (рис. 2, а) элемент неоднородности служит водопроводящим каналом, фильтрационные свойства которого также приведены в таблице.

¹ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. 2012.

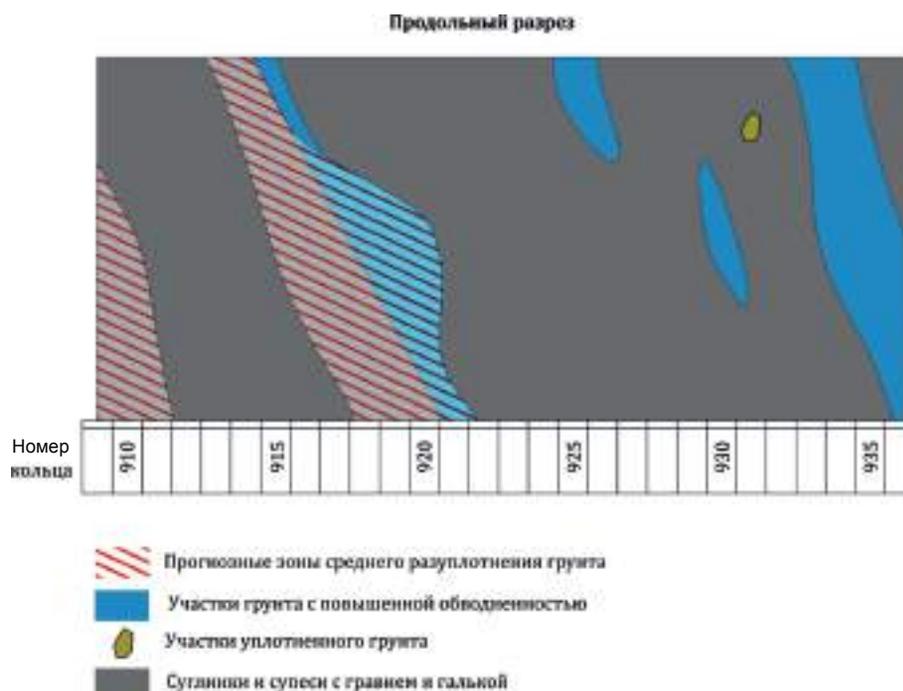


Рисунок 1. Результаты прогноза инженерно-геологических и гидрогеологических условий впереди лба забоя тоннеля [9].
 Figure 1. The results of the forecast of engineering-geological and hydrogeological conditions in front of the forehead of the tunnel face [9].

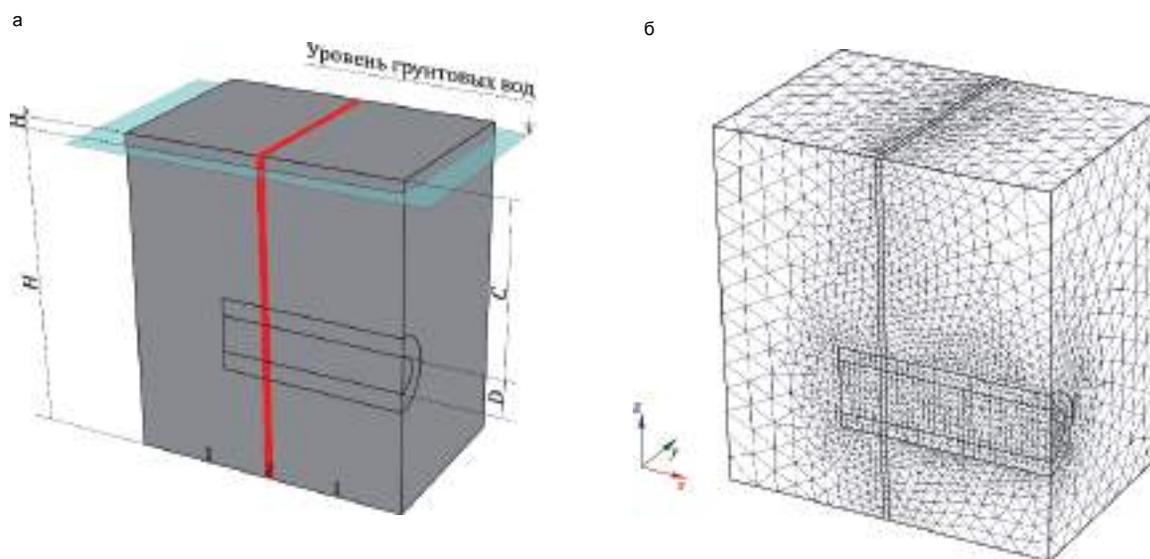


Рисунок 2. Расчетная схема массива – а и сетка конечных элементов – б.
 Figure 2. The design scheme of the array is а and the finite element grid is б.

Результаты

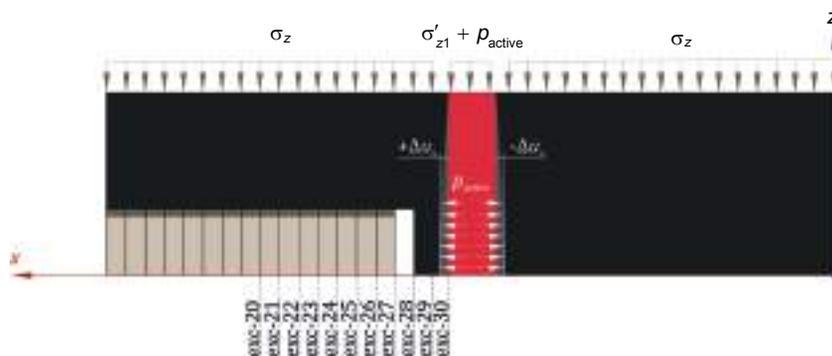
Результаты моделирования представлены на рис. 4–7. Результаты, соответствующие текущей стадии проходки $u_x^{exc(n-1)}$, оценивались относительно фоновых устоявшихся узловых перемещений u_x^{het} , сложившихся в однородном массиве на каждой стадии проходки. Допускаемая погрешность расчетов принималась 1 %. Устоявшимися считались средние перемещения с допустимой погрешностью оценки 5 %. Зона влияния неоднородности определяется в рамках данной статьи как расстояние от элемента неоднородности, начиная с которого узловые перемещения (при условии соблюдения критерия прочности) изменяются более чем на 5 % относительно устоявшихся перемещений.

Результаты представлены для случая обнажения лба забоя на период одной рабочей смены. Время совместного деформационно-фильтрационного расчета, использованного при моделировании неоднородности дренированным массивом, составляло 8 ч. На всех этапах деформирования лба забоя выполнялось условие прочности.

Недостатком использования параметров эффективной прочности c' и φ' в комбинации с типом поведения материала *Undrained (A)* является то, что полученное сопротивление недренированному сдвигу может отличаться от своего реального значения из-за различия фактической и заданной траектории напряжений, поэтому кроме критерия прочности рекомендуется сравнивать полученное напряженное состояние с настоящим реальным сопротивлением сдвигу $|\sigma_1 - \sigma_3| \leq 2s_u$ [2].

**Свойства однородного массива и элемента неоднородности.
Properties of a homogeneous array and an element of heterogeneity.**

Показатель	Однородный массив	Элемент неоднородности	
	(1)	(2)	
Модель материала	HS small strain	HS small strain	
Тип дренирования	Undrained (A)	Drained	Undrained (A)
Объемный вес неводонасыщенного грунта γ_{unsat} , кН/м ³	19,50	19,50	
Объемный вес водонасыщенного грунта γ_{sat} , кН/м ³	21	21	
Секущий модуль деформаций на 50 % прочности E_{50}^{ref} , МПа	350	240	
Касательный модуль при первичном нагружении в условиях изокомпрессионного сжатия E_{oed}^{ref} , МПа	380	260	
Модуль при разгрузке E_{ur}^{ref} , МПа	900	735	
Показатель степени зависимости модуля деформаций от уровня бокового давления m	0,8	0,8	
Начальный коэффициент пористости e_{int}	0,50	0,85	
Эффективное сцепление c' , кПа	1000	1000	
Эффективный угол внутреннего трения ϕ' , град.	23	23	
Пороговое значение сдвиговой деформации $\gamma_{0,72}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	
Опорное значение модуля сдвига при сверхмалых деформациях G_0^{ref} , МПа	1000	735	
Коэффициент Пуассона при разгрузке ν_{ur}	0,20	0,20	
Опорное давление p_{ref} , кПа	100	100	
Коэффициент бокового давления грунта в состоянии нормального уплотнения K_0	0,6093	0,6093	
Коэффициент разрушения R_f	0,45	0,45	
Критерий прочности	Кулон–Мор	Кулон–Мор	
Коэффициент фильтрации k_x , совпадающий с главной осью x, м/сут	$2 \cdot 10^{-3}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$	
Коэффициент фильтрации k_y , совпадающий с главной осью y, м/сут	$2 \cdot 10^{-3}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$	
Коэффициент фильтрации k_z , совпадающий с главной осью z, м/сут	$2 \cdot 10^{-6}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$	



**Рисунок 3. Схема, поясняющая положение забоя в массиве.
Figure 3. Scheme explaining the position of the face in the array.**

По мере приближения проходческого забоя к зоне неоднородности (рис. 3, этапы проходки, соответствующие положению проходческого забоя в положении экс-23–экс-29) увеличивается величина деформаций проходческого забоя, проходимого еще в однородном массиве. Это связано как с формированием избыточного порового давления в неоднородности (рис. 5), воздействующего в свою очередь на разгружаемый проходкой однородный массив, так и с отличием деформационных свойств расчетных элементов. Интересным представляется факт уменьшения величины деформирования после преодоления неоднородности. Это вызвано тем, что активное поровое давление, воздействующее со стороны неоднородности, вызывало увеличение полной величины бокового давления и провоцируя узловые перемещения еще до подхода забоя к неоднородности. При моделировании элемента неоднородности, равного 1 м, зона влияния неоднородности равна одному диаметру тоннеля.

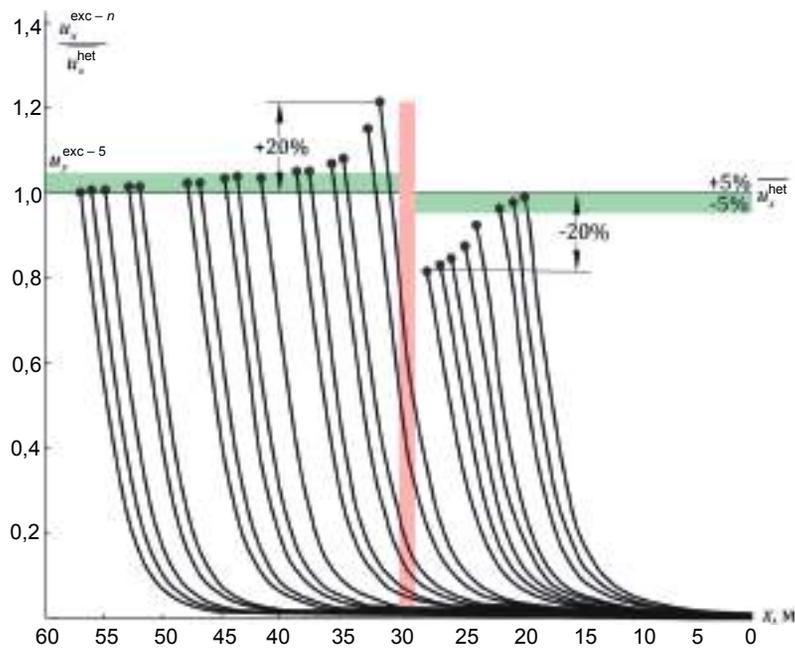


Рисунок 4. Относительное перемещение лба забоя на характерных этапах проходки при моделировании неоднородности (мощность 1 м) как недренированного объема при заданном уровне грунтовых вод.
Figure 4. Relative movement of the forehead of the face at typical stages of penetration while simulation of heterogeneity (thickness is 1 m) as undrained volume at a given level of groundwater.

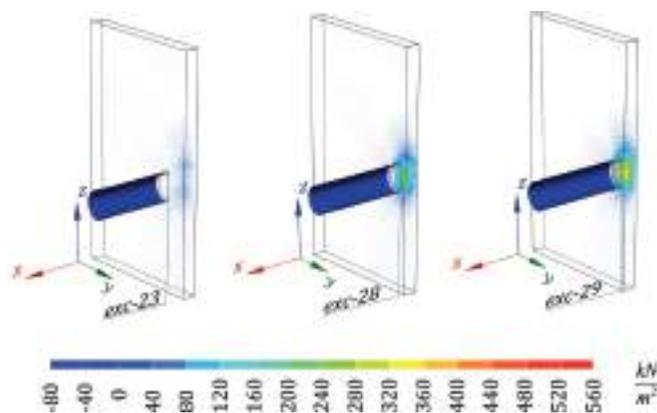


Рисунок 5. Процесс формирования избыточного порового давления при подходе к обводненной неоднородности.
Figure 5. The process of formation of excess pore pressure when approaching water inhomogeneity.

В случае изменения мощности неоднородности до размера 4 метров (рисунок 6), перемещения в однородном грунтовом массиве при подходе забоя к неоднородности увеличиваются на 60%, относительно устоявшихся узловых перемещений. Величина узловых перемещений лба забоя так же, как и в предыдущем случае, после прохождения через элемент неоднородности уменьшается. При моделировании элемента неоднородности равным 4 м, зона влияния при подходе лба забоя, равна одному диаметру проводимого тоннеля.

В случае моделирования неоднородности дренированным массивом с заданным уровнем грунтовых вод (рис. 7) вода свободно фильтруется по элементу неоднородности, создает напор в уровне тоннеля. Зона влияния неоднородности уменьшается до радиуса тоннеля, однако величина смещений резко увеличивается в 9 раз относительно устоявшихся.

Заключение

При моделировании неоднородности в массиве глинистых грунтов необходимо учитывать степень влагонасыщения, мощность элемента неоднородности. При различии деформационных свойств расчетных грунтовых элементов на 30 % и заданном уровне грунтовых вод как в случае дренирования, так и в недренированном случае, происходит увеличение перемещений при подходе проходческого забоя к зоне влияния неоднородности. При строительстве подземных сооружений метрополитена необходимо осуществлять выбор параметров крепления лба забоя исходя из определения устойчивости, приведенного в СП 120.13330.2012, с оговоркой о том, что явными деформациями могут считаться деформации, превышающие (при принятой технологии проходки и инженерно-геологических условиях) средневзвешенные деформации. Под средневзвешенными деформациями следует понимать такой уровень деформаций лба забоя,

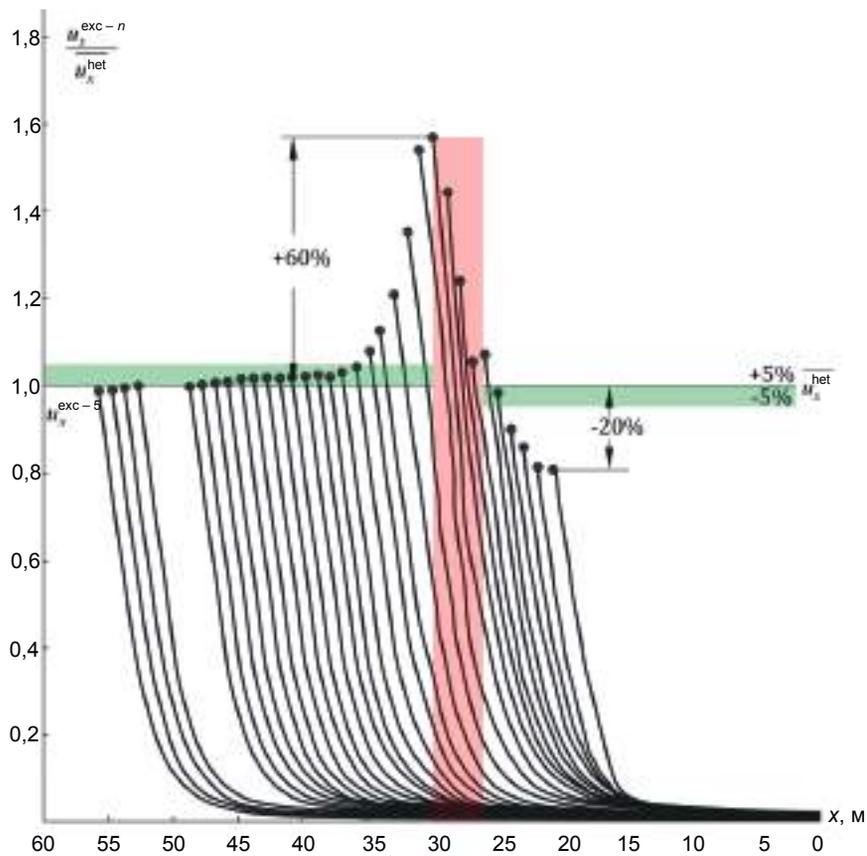


Рисунок 6. Деформирование лба забоя на каждом этапе проходки при моделировании неоднородности (4 м) как недренированного объема и заданном уровне грунтовых вод.
 Figure 6. The deformation of the forehead of the face at each stage of heading while simulation of heterogeneity (4 m) as an undrained volume and a given level of groundwater.

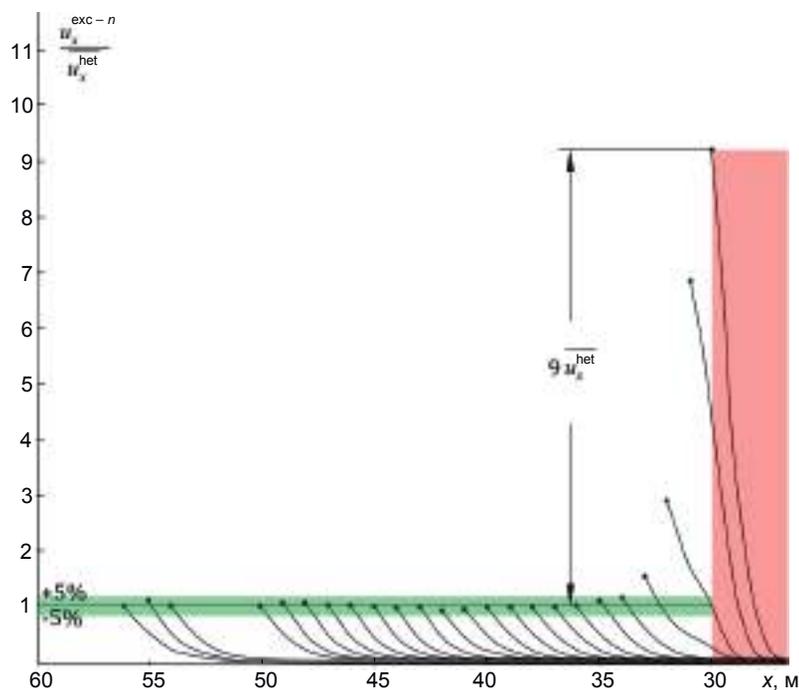


Рисунок 7. Деформирование лба забоя вдоль оси x на каждом этапе проходки при моделировании неоднородности как дренированного объема и заданном уровне грунтовых вод.
 Figure 7. The deformation of the forehead of the face along the x axis at each stage of heading while simulation of heterogeneity as a drained volume and a given level of groundwater.

который по опыту строительства не приводил к недопустимым деформациям как на поверхности, так и в уровне проходимого тоннеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра, 1989. 270 с.
2. Протосеня А. Г., Тимофеев О. В. Геомеханика. СПб.: СПГГИ, 2008. 117 с.
3. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1–47.
4. Brinkgreve R. B. J., Kumarswamy S., Swolfs W. M., Foria F. PLAXIS 3D. Руководство пользователя. СПб.: ООО «НИП-Информатика», 2017. 816 с.
5. Anagnostou G., Schuerch R., Ramoni M. TBM tunnelling in complex rock formations // Interventi e opere nelle formazioni complesse: XV MIR Conference. Torino, 2014. P. 1–25.
6. Zingg S., Anagnostou G. Tunnel face stability and the effectiveness of advance drainage measures in water-bearing ground of non-uniform permeability // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. – Vol. 51, № 1. P. 187–202. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1312-1>
7. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. 2-е изд. М.: ТИМР, 2000. 201 с.
8. Лыхин П. А. Практика тоннелестроения в XX веке. Пермь: ИД «Пресстайм», 2009. 327 с.
9. Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Старков А. Ю. Геотехническое обеспечение при строительстве двухпутного перегонного тоннеля с помощью ТПМК // Метро и тоннели. 2015. № 5. С. 16–18.
10. Cantieni L. Spatial effects in tunneling through squeezing ground. 2011. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006397593>
11. Алексеев А. В. Деформации лба забоя при проходке тоннеля в зоне структурно-механической неоднородности // ГИАБ. 2018. № 12. С. 48–56. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-48-56>
12. Vermeer P. A., Ruse N., Marcher T. Tunnel heading stability in drained ground // Felsbau. 2002. Vol. 20, № 6. P. 8–18.
13. Broere W. Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face // Proceedings of the ITA World Tunneling congress: (Re) Claiming the underground space, Amsterdam: Swets & Zeitlinger B.V., 2003. P. 759–765.
14. Demenkov P. A., Trushko O. V., Potseshkovskaya I. V. Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, № 23. P. 9161–9169.
15. Карасев М. А. Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2017. 307 с.
16. Wang W.D., Li Q., Xu Z.H. Determination of parameters for hardening soil small strain model of Shanghai clay and its application in deep excavations // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, 2017. P. 2065–2068.

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2018 г.

Numerical modeling of stability of the forehead of the face in the area of heterogeneity with undrained array model

Aleksandr Vasil'evich ALEKSEEV*,
Pavel Eduardovich VERBILO**,

Saint Petersburg Mining University

Relevance of the work. Estimation of the stability of free face is an important task due to the fact that part of headings of tube railroad is erected by mining, with the forehead of the face fixed manually, while indirect methods of forecasting engineering-geological and hydrogeological conditions before the forehead of the face indicate the presence of local softening and watering capable affect sustainability.

Purpose of the work. Estimation of the zone of influence and the type of drainage of the element of heterogeneity on the stability of the tunnel face passed in the array of Proterozoic clays.

Method and methodology. The finite element method used in the PLAXIS software package was chosen as the research method. The Hardening Soil Small Strain hardening soil model was selected as a geomechanical model of soil behavior. The design situations of deforming the unfixed forehead of the face approaching the water-saturated element of heterogeneity, are considered when simulating an element with a capacity of 1 and 4 m and changing the nature of water filtration along the element.

Results of the work. When deformation properties of the calculated soil elements differ by 30% with the given level of groundwater, both in the case of drainage and nondrainability, an increase in displacements occurs when the tunneling face approaches the zone of influence of heterogeneity. The size of the zone of influence depends on the chosen type of drainage of the element of heterogeneity.

Applicable scope of the results described in the paper. The results described in the paper (subject to determining the parameters of the model that meet the conditions of penetration) can be used to estimate the stability of the forehead of the tunnel face in the area of heterogeneity, which is the water supply canal.

Conclusion. When designing construction of a linear underground facility in an area of heterogeneity, it is necessary to evaluate the stability of the forehead of the face using numerical modeling. When modeling an element of heterogeneity, it is necessary to take into account the degree of water saturation, the thickness of the element of heterogeneity and the nature of permeability of water along the element of heterogeneity.

Keywords: undrained array; sustainability; tunnel face; zone of heterogeneity; numerical analysis; finite element method.

REFERENCES

1. Bulychev N. S. 1989, *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy v primerakh i zadachakh* [Mechanics of underground facilities in examples and questions]. Moscow, 270 p.
2. Protosenya A. G., Timofeev O. V. 2008, *Geomehanika* [Geomechanics]. Saint-Petersburg, 117 p.
3. Dashko R. E. 2011, Features of engineering-geological conditions of St. Petersburg. R.E. Dashko O. Yu. Alexandrova P. V. Kotyukov V. A. Shidlovskaya. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Urban development and geotechnical construction], no. 1, pp. 1–47. (In Russ.)
4. Brinkgreve R. B. J., Kumaraswamy S., Swolfs W. M., Folia F. 2017, PLAXIS 3D. User manual. Saint-Petersburg, 816 p.
5. Anagnostou G., Schuerch R., Ramoni M. 2014, TBM tunnelling in complex rock formations. Interventi e opere nelle formazioni complesse: XV MIR Conference. Torino, pp. 1–25.
6. Zingg S., Anagnostou G. 2018, Tunnel face stability and the effectiveness of advance drainage measures in water-bearing ground of non-uniform permeability. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 187–202. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1312-1>
7. Vlasov S. N., Makovsky L. V., Merkin V. E. 2000, *Avaryynnye situatsii pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonneley i metropolitenov* [Emergency situations in construction and operation of transport tunnels and subways]. 2nd ed., Moscow, 201 p.
8. Lykhin P. A. 2009, *Praktika tonnelestroyeniya v XX veke* [The practice of tunneling in the XX century], 327 p.
9. Bezrodny K. P., Lebedev M. O., Markov V. A., Starkov A. Yu. 2015, Geotechnical equipment in construction of a double-tracked main line tunnel with the help of TPKM. *Metro i tonneli* [Underground and Tunnels], no. 5, pp. 16–18. (In Russ.)
10. Cantieni L. 2011, Spatial effects in tunneling through squeezing ground. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006397593>
11. Alexeev A. V. 2018, Deformations of the forehead of the tunnel face in the area of structural-mechanical heterogeneity. *Gornyye Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 12, pp. 48–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-48-56>
12. Vermeer P. A., Ruse N., Marcher T. 2002, Tunnel heading stability in drained ground. *Felsbau*, vol. 20, no. 6, pp. 8–18.
13. Broere W. 2003, Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face. Proceedings of the ITA World Tunneling congress: (Re) Claiming the underground space, Amsterdam: Swets & Zeitlinger B. V., pp. 759–765.
14. Demenkov P. A., Trushko O. V., Potseshkovskaya I. V. 2018, Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, no. 23, pp. 9161–9169.
15. Karasev M. A. 2017, *Prognoz geomekhanicheskikh protsessov v sloistykh porodnykh massivakh pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy slozhnoy prostranstvennoy konfiguratsii v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [The forecast of geomechanical processes in layered rocks during construction of underground structures of complex spatial configuration in the conditions of dense urban development]: PhD thesis, Saint-Petersburg, 307 p.
16. Wang W.D., Li Q., Xu Z.H. 2017, Determination of parameters for hardening soil small strain model of Shanghai clay and its application in deep excavations. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, pp. 2065–2068.

The article was received on November 6, 2018

* a1exeev@yandex.ru

id <https://orcid.org/0000-0003-2581-4433>

** pashaverbilo@mail.ru

id <https://orcid.org/0000-0001-6776-5866>