

ВЛИЯНИЕ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАБОЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ ЩИТОВЫМИ ПРОХОДЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ В СМЕШАННЫХ ЗАБОЯХ

Протосеня А.Г., Кумов В.В.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: тоннелепроходческие щиты с грунтопригрузом, зона сдвижений породного массива, поровое давление, смешанный забой, строительство тоннелей.

Аннотация. В статье представлено решение пространственной упругопластической задачи по определению устойчивости грунтового массива в призабойной зоне двухпутного перегонного тоннеля метрополитена, строящегося щитовым проходческим комплексом в смешанном забое. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения влияния подземного строительства, используемого в условиях плотной городской застройки, на окружающий его массив, и как следствие на земную поверхность. Численное моделирование проводилось на основе метода конечных элементов в программном комплексе Plaxis 3D для геолого-структурных условий схожими с Санкт-Петербургским регионом и различных условий залегания грунтовых вод. Результаты моделирования, представлены в виде диаграмм и изополей напряжений. В заключении отображены характерные особенности изменения напряженно-деформированного состояния смешанного забоя в зависимости от принятых геологических и технологических условий строительства двухпутного перегонного тоннеля метрополитена.

THE EFFECT OF PORE PRESSURE ON THE STABILITY OF THE FACE DURING THE CONSTRUCTION OF TUNNELS BY SHIELD TUNNELING COMPLEXES IN MIXED FACES

Protosenya A.G., Kumov V.V.

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: tunneling shields with ground cargo, rock mass displacement zone, pore pressure, mixed face, tunnel construction.

Abstract. The article presents a solution to the spatial elastic-plastic problem of determining the stability of a soil massif in the bottomhole zone of a double-track subway tunnel under construction by a shield tunneling complex in a mixed face. The relevance of the study is due to the need to reduce the impact of construction on the surrounding massif, as well as on the earth's surface, which arises due to dense urban development over tunnels under construction. Numerical modeling was carried out on the basis of the finite element method in the Plaxis 3D software package for geological and structural conditions similar to the St. Petersburg region and various groundwater conditions. The simulation results are presented in the form of diagrams and stress isofields. In conclusion, the characteristic features of the change in the stress-strain state of the mixed face are displayed depending on the accepted geological and technological conditions for the construction of a double-track subway tunnel.

Введение. Одной из главных задач при строительстве подземных сооружений в условиях плотной городской застройки является уменьшение величины оседаний земной поверхности. Данного результата можно добиться благодаря снижению влияния строительства на окружающий его грунтовый массив. Подавляющее число аварий в строящихся и эксплуатируемых подземных сооружениях обусловлено недостаточным учетом или неверной оценкой природных и техногенных факторов [1, 2]. Ранее для снижения аварийности работ применялось множество низкотехнологичных способов обеспечения устойчивости забоя [3]. Сегодня для проходки, снижающей влияние строительства на окружающий его массив и практически исключая оседания земной поверхности в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях, используются механизированные щиты с грунтовым пригрузом забоя [4, 5]. Малые величины оседаний при применении данной технологии обусловлены созданием на забое уравновешивающего давления.

Однако важную роль в образовании баланса между давлением грунтопригруза и активным давлением грунта является поровое давление воды в грунтовом массиве, создающееся в процессе проникновения жидкой фазы грунтопригруза в поры грунтового массива в призабойной зоне и снижающее её устойчивость [6, 7]. В том числе это явление прослеживается в песках и глинах [8, 9]. Объясняется это проявлением эффекта Ребиндера, объясняющем снижение прочности пород. При этом если поровое вещество находится под давлением, несущая способность горной породы дополнительно снижается из-за растягивающего действия, которое и создает в скелете горной породы поровое давление [10]. В Санкт-Петербурге, на примере структурно-геологических условий которого проводится данное исследование, циркулирующие в грунтах подземные воды оказывают негативное воздействие на устойчивость подземного пространства. При самом неблагоприятном исходе это явление может привести к техногенным авариям [11].

Повышение точности прогнозирования напряженно-деформированного состояния массива впереди забоя тоннеля, а также точности определения технологических параметров проходческого щита и управления ими является залогом обеспечения наименьшего влияния строительства на окружающий его массив [12-15]. При выборе параметров для создания необходимого опорного давления важно учитывать множество влияющих на него геологических условий [16]. Одними из самых важных параметров являются физико-механические свойства грунтов, конфигурация инженерно-геологических элементов и поровое давление жидкости, снижающее устойчивость грунтового массива.

Согласно натурным экспериментальным исследованиям Morton K. и Simons N. для участка сложенными плотными глинами, около 60% осадок реализуется мгновенно [17]. Что говорит о важности исследований воздействия проходческого щита на забой тоннеля.

Целью данного исследования является определение влияния порового давления на устойчивость смешанного забоя строящегося двухпутного тоннеля метрополитена для геологических условий Санкт-Петербурга, проходка которого производится в условиях смешанного забоя. Важность данного направления исследования поднималась А.Н. Труфановым и Rohola Hasanpour, подтверждающими по результатам обширных научных исследований недостаточно точный учет влияния порового давления для слабофильтрующих грунтов и аллювиальных грунтов в отечественной и зарубежной практике [18, 19]. О росте смещений грунта при увеличении влажности аллювиальных грунтов говорят исследования Liu Jun-Cheng и Дашко Р., лишней раз подтверждая необходимость исследований влияния порового давления жидкости на устойчивость смешанных забоев тоннелей [20, 21].

Для прогноза изменений напряженно-деформированного состояния массива наиболее рациональными методами моделирования, используемыми в настоящее время, являются физическое и численное моделирование. Методы физического моделирования нашедшие наиболее частое использование основаны на эквивалентных материалах и оптически активных материалах [22]. Однако, из-за высокой сложности, трудоемкости и стоимости создания таких моделей и необходимости в дорогостоящем специализированном оборудовании использование физических методов является сильно ограниченным и чаще всего находит свое применение при моделировании больших объектов, например, плотин, сооружений с большими поперечными сечениями и т.д. [23].

Множество задач геомеханики решаются при помощи численных методов моделирования, а именно: методом конечных разностей, граничных условий, материальной точки и конечных элементов [24-27].

Для решения поставленной задачи предлагается использование метода конечных элементов, являющимся наиболее проработанным на сегодняшний день, удовлетворяя всем четырем основным требованиям, необходимым для теоретического решения: равновесие сил, непрерывность перемещений, описание поведения материала и задание граничных условий [28].

Цель работы достигается путем расчета численных конечно-элементных моделей в программном комплексе Plaxis 3D, и анализом результатов, представленных в виде эпюр и картин напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Моделирование с

использованием данного программного комплекса в трехмерной постановке задачи позволяет получить полное представление о напряженно-деформированном состоянии от начального этапа моделирования до конечного [29].

Метод численного моделирования в программе Plaxis 3D. Численное моделирование в работе проводилось с учетом возможного нестабильного состояния грунтов, вызванного насыщением грунта водой и его консолидацией с возникновением избыточного порового давления воды в грунте.

Рассматриваемый тоннель залегает на глубине 14 м от земной поверхности до свода выработки в четвертичном структурном этаже, сложенном песчано-глинистыми отложениями, мощность которого в Санкт-Петербурге составляет от 20 м до 70 м. Осадочные отложения венда, кембрия и ордовика залегают почти горизонтально [7, 30].

Для оценки влияние порового давления на устойчивость грунтового массива, влияющие на задачу факторы были разделены на геологические и технологические.

Геологические факторы включают в себя структурно-геологические условия и условия залегания грунтовых вод. Часто исследования в данном направлении направлены на изучение сплошной среды, однако грунты в Санкт-Петербурге сильно отличаются друг от друга физико-механическими свойствами грунтов, слагающих их, своей конфигурацией и гидрогеологическими свойствами [31-33].

Принятая мощность модели равна 37 м, а в качестве инженерно-геологических элементов были выбраны: песок мощностью 6 м, глина мощностью 12,25 м, плотный песок мощностью 18,75 м.

В качестве модели поведения грунта была выбрана упруго-пластическая модель Soft Soil для учета переходной степени консолидации грунта, использующая логарифмическую зависимость между объемной деформацией и средним эффективным напряжением, позволяющей обеспечить более высокую точность отображения сжимаемости слабых грунтов.

Решение задачи выполнено с учетом возможного формирования порового давления по условиям залегания грунтовых вод из таблицы 1.

Для моделирования строительства тоннеля в наиболее близких к реальным условиям были подобраны технологические параметры щитовой проходки: давление грунтопригруза на забое 90 кН/м^2 с увеличением нагрузки на 14 кН/м^2 с каждым метром высоты столба жидкости; давление тампонажа 100 кН/м^2 с увеличением нагрузки на 20 кН/м^2 с каждым метром высоты столба жидкости производится на 6 кольца крепи от забоя; давление домкратов равное 640 кН/м^2 осуществляется на переднюю плоскость установленного кольца обделки; внешний диаметр обделки тоннеля 8,5 м при толщине крепи в 0,25 м; ширина колец обделки 1,5 м.

Табл. 1. Возможные условия залегания грунтовых вод

Порядковый номер возможного варианта залегания грунтовых вод	Диапазон глубин залегания грунтовых вод, м	Значение порового давления воды в своде тоннеля, кН/м^2	Значение порового давления воды в почве тоннеля, кН/м^2
1	2 ÷ 37	120	205
2	4 ÷ 37	100	185
3	6 ÷ 37	80	165
4	8 ÷ 37	60	145
5	10 ÷ 37	40	125

Вышеприведенные технологические параметры были подобраны для соблюдения моделями условия минимизации образования вертикальных смещений земной поверхности, то есть при их отсутствии или допущении их значения не более 5 мм, что очень важно по причине строительства в условиях плотной городской застройки и за чем производит наблюдение множество авторов [32-34].

Расчетная схема при строительстве тоннеля представлена на рисунке 1.

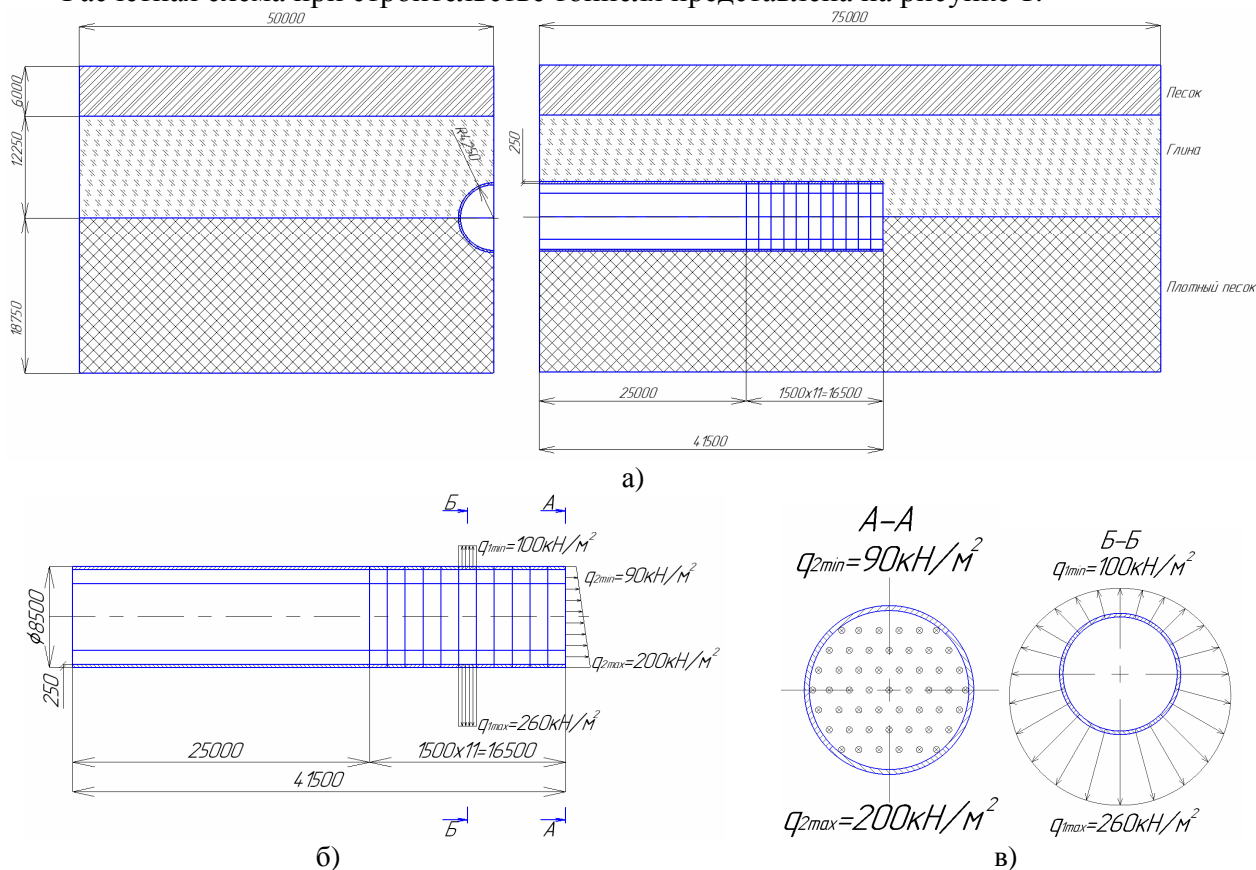


Рис. 1. а) пространственное расположение тоннеля в грунтовом массиве; б) расчетная схема тоннеля; в) разрез А-А с указанным на нем давлением грунтопригруза на забое, разрез Б-Б с указанным на нем давлением тампонажа

На основе анализа вышеприведенных данных был построен ряд конечно-элементных моделей в пространственной постановке симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через горизонтальную продольную ось тоннеля (рис. 2), со следующими граничными условиями:

- верхняя поверхность свободно перемещается во всех трех направлениях;
- боковые поверхности не перемещаются по направлениям к их нормали;
- нижняя плоскость имеет запрет на перемещение в вертикальном направлении.

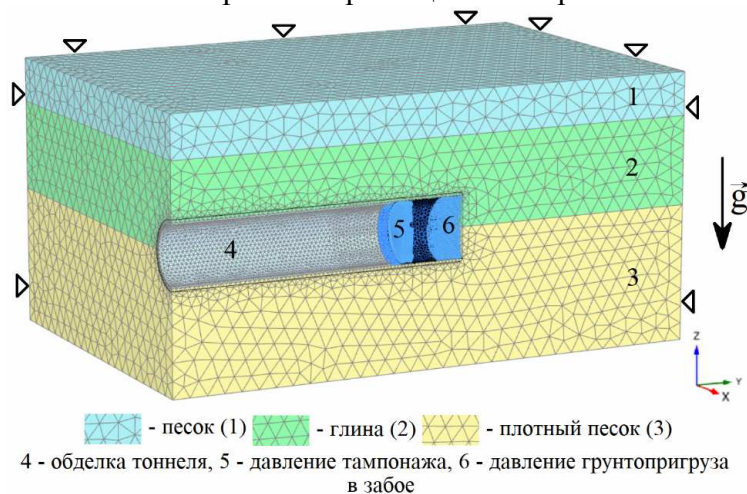


Рис. 2. Пространственная модель строящегося двухпутного тоннеля в смешанном забое

Результаты моделирования. В ходе исследований был построен ряд численных конечно-элементных моделей двухпутного тоннеля, строящегося с применением

проходческого щита с грунтопригрузом. Результаты моделирования представлены на картине распределения вертикальных смещений грунтового массива над сводом тоннеля (рис. 3) в виде изолиний, ограничивающих зоны сдвижений значением до -4 мм относительно вертикальной оси, картине распределения горизонтальных смещений в плоскости забоя относительно горизонтальной оси u , параллельной горизонтальной продольной оси тоннеля (рис. 4), а также на эпюре распределения нормальных и максимальных касательных напряжений в плоскости забоя тоннеля (рис. 5) и на графиках распределения нормальных и максимальных касательных напряжений (рис. 6).

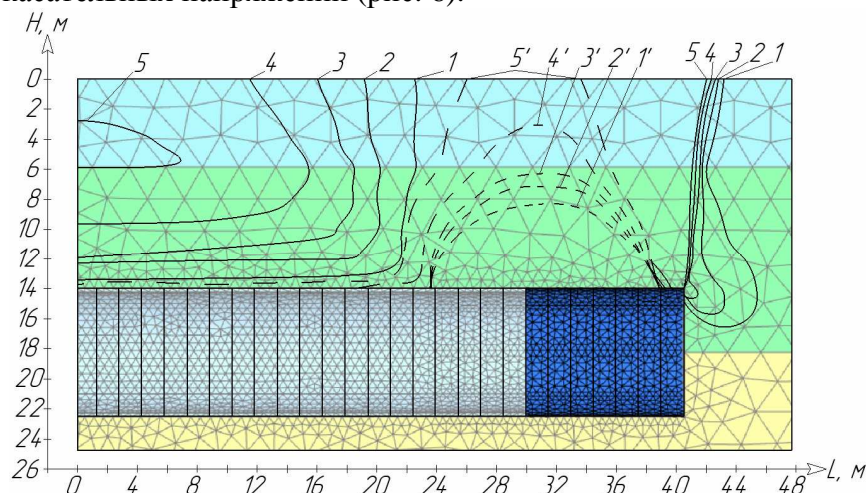


Рис. 3. Изолинии вертикальных сдвижений грунтового массива при строительстве двухпутного тоннеля: 1, 1' – внешние и внутренние изолинии при залегании грунтовых вод от -2 м до -37 м; 2, 2' – от -4 м до -37 м; 3, 3' – от -6 м до -37 м; 4, 4' – от -8 м до -37 м; 5, 5' – от -10 м до -37 м

Из картины распределения горизонтальных сдвижений массива в плоскости забоя (рис. 4) видно, что при снижении уровня грунтовых вод, то есть порового давления воды в грунтовом массиве, устойчивость забоя увеличивается, о чем свидетельствует изменение смещения забоя вглубь тоннеля на 5,2 мм при максимальном значении порового давления на 1,6 мм вглубь массива при минимальном поровом давлении жидкости. Важно заметить, что при минимальном поровом давлении воды вглубь массива деформировалась нижняя часть забоя, представляющая собой плотный песок по причине его менее упругого поведения, чем у глин, а также более высокого уровня давления грунтопригруза из-за действия силы тяжести.

При снижении порового давления мульда оседаний земной поверхности увеличилась в размерах при неизменной величине вертикальных деформаций, что видно на картине распределения вертикальных сдвижений над сводом тоннеля (рис. 3) и говорит об увеличении значения радиуса кривизны земной поверхности.

На рисунке 5 изображены эпюры распределения нормальных σ_1 и максимальных касательных напряжений на контакте крепь-грунт в плоскости забоя от пяти условий задания порового давления, указанных ранее.

Согласно полученной эпюре распределения напряжений видно, что значение главных нормальных и максимальных касательных напряжений увеличивается при приближении рассматриваемой точки на контуре забоя к значению 0,5 его высоты. Это объясняется пролеганием там границы глин и плотных песков, являющейся концентратором напряжений из-за разницы в физико-механических свойствах слоев.

Для более детального исследования распределений напряжений в призабойной зоне были зафиксированы нормальные и касательные напряжения на расстоянии до 10 м от плоскости забоя тоннеля с шагом в 1 м.

Графики распределения напряжений в призабойной зоне тоннеля в зависимости от изменения порового давления показаны на рисунке 6.

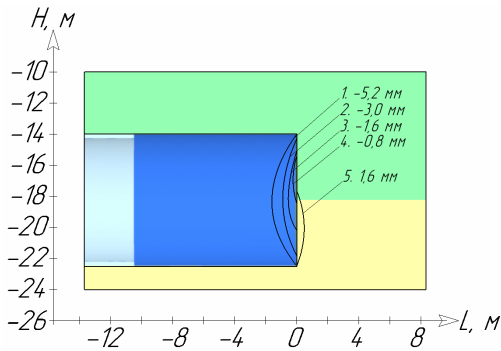


Рис. 4. Изолинии горизонтальных сдвижений грунтового массива при строительстве двухпутного тоннеля:

1 – при поровом давлении жидкостби в забое тоннеля от 120 кН/м² до 205 кН/м²; 2 - от 100 кН/м² до 185 кН/м²; 3 - от 80 кН/м² до 165 кН/м²; 4 - от 60 кН/м² до 145 кН/м²; 5 - от 40 кН/м² до 125 кН/м²

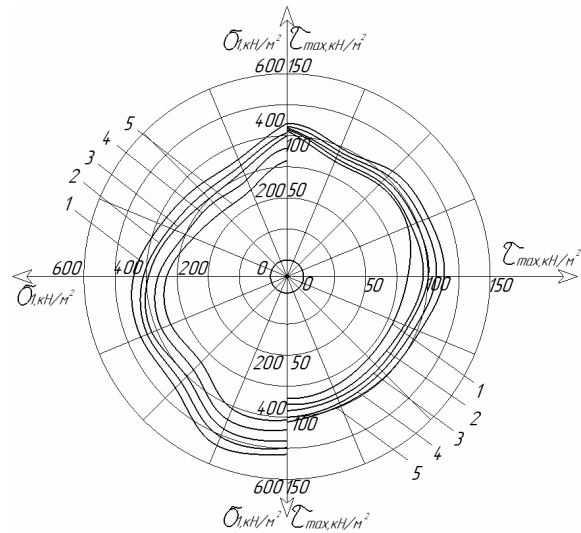
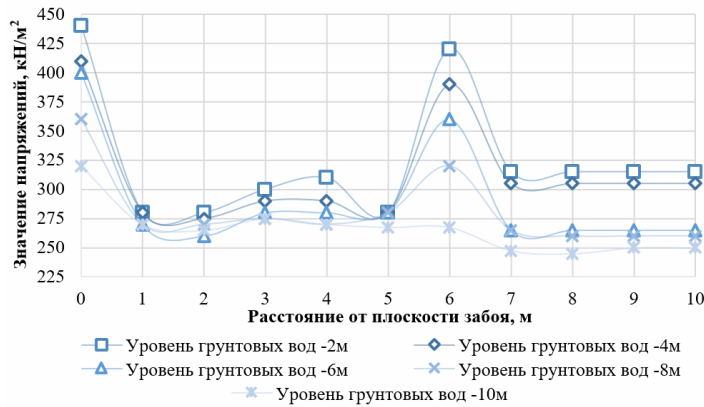
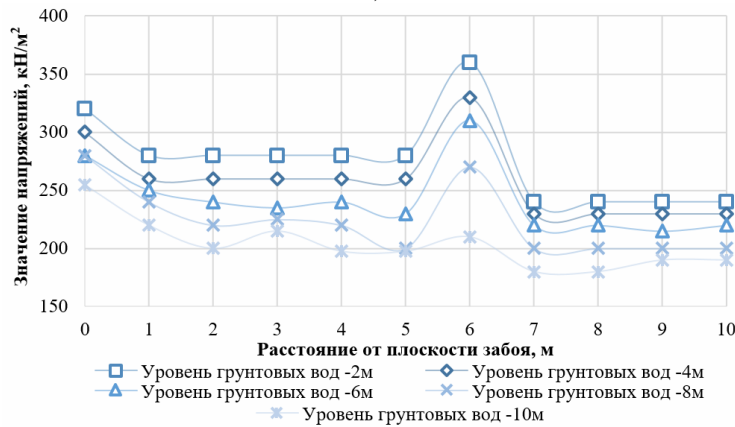


Рис. 5. Эпюры распределения нормальных (слева от оси) и максимальных касательных напряжений (справа от оси) в плоскости забоя: 1 – поровое давление жидкостби в забое двухпутного тоннеля от 120 кН/м² до 205 кН/м²; 2 - от 100 кН/м² до 185 кН/м²; 3 - от 80 кН/м² до 165 кН/м²; 4 - от 60 кН/м² до 145 кН/м²; 5 - от 40 кН/м² до 125 кН/м²



а)



б)

Рис. 6. Графики распределения напряжений в призабойной зоне тоннеля в зависимости от пяти различных условий залегания грунтовых вод: а) нормальные напряжений σ_1 ; б) нормальные напряжений σ_2

Из графиков распределения напряжений в призабойной зоне тоннеля (рис. 6) видно, что максимальные значения напряжений локализуются в непосредственной близости от зон приложения нагрузки к массиву со стороны проходческого щита. Также повышение

устойчивости массива при снижении порового давления в нем дополнительно подтверждается снижением при этом общего уровня напряжений в массиве, что явно наблюдается при рассмотрении графиков (рис. 6).

Для подтверждения данного результата было проведено сопоставление полученных значений напряжений с коэффициентом запаса устойчивости в точке грунтового массива, а именно в своде тоннеля в плоскости забоя при различных поровых давлениях воды в массиве [35]:

$$K_t = \frac{\sin \varphi}{\sin \nu},$$

где φ – угол внутреннего трения грунта в предельном состоянии; ν – угол внутреннего трения грунта в допредельном состоянии.

$$\sin \nu = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2 + 2C \operatorname{ctg} \varphi}.$$

где σ_1, σ_2 – главные напряжения, МПа, C – сцепление грунта, МПа.

Согласно принятому к сравнению коэффициенту запаса устойчивости грунтового массива наблюдается значительное снижение коэффициента запаса устойчивости забоя тоннеля при уменьшении порового давления воды в массиве (рис. 7), что подтверждает полученные ранее результаты.

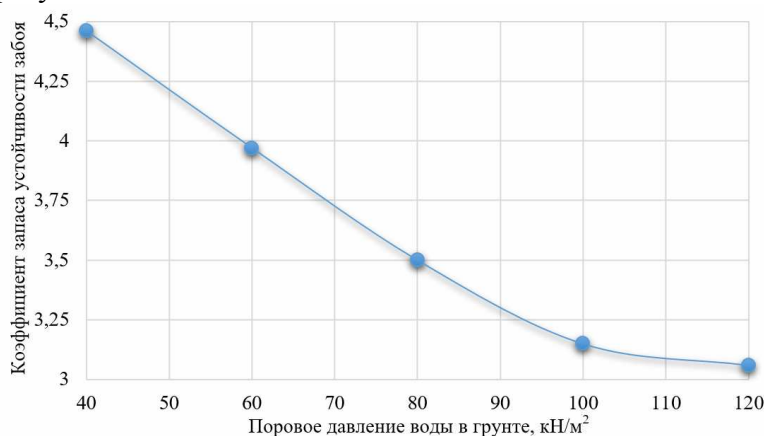


Рис. 7. График изменения коэффициента запаса устойчивости забоя при увеличении порового давления воды в грунтовом массиве

Закключение. В результате проведенного исследования был проанализирован ряд пространственных численных конечно-элементных моделей строительства двухпутного перегонного тоннеля метрополитена для геологических условий Санкт-Петербурга и технологических параметров, позволяющих реализовать безосадочную технологию их строительства.

Для заданных геологических условий были подобраны необходимые технологические параметры щитовой машины, представленные выше.

В ходе численного моделирования и сопоставления его результатов с расчетами коэффициента запаса устойчивости массива было изучено влияние порового давления на устойчивость смешанного забоя тоннеля при его строительстве щитовым проходческим комплексом с грунтопригрузом.

Из картины распределения горизонтальных сдвижений массива в плоскости забоя видно, что при снижении уровня грунтовых вод, то есть порового давления воды в грунтовом массиве, устойчивость забоя увеличивается. Также было отмечено, что при минимальном заданном поровом давлении воды вглубь массива деформировалась лишь нижняя часть забоя, представляющая собой плотный песок по причине его менее упругого поведения, чем у глин, а также более высокого уровня давления грунтопригруза из-за действия силы тяжести.

При снижении порового давления мульда оседаний земной поверхности увеличилась в размерах при неизменной величине вертикальных деформаций, что видно на картине распределения вертикальных сдвижений над сводом тоннеля и говорит об увеличении значения радиуса кривизны земной поверхности.

При изучении эпюр распределения главных и касательных напряжений в плоскости забоя и графиков распределения напряжений в призабойной зоне тоннеля в зависимости от пяти различных условий залегания грунтовых вод было установлено, что напряженно-деформированное состояние грунтового массива в призабойной зоне при смешанном забое в значительной степени зависит от величины порового давления. Так при снижении порового давления с 120 кН/м^2 до 40 кН/м^2 в своде тоннеля:

– главные нормальные напряжения в призабойной зоне в своде выработки уменьшаются с 440 кН/м^2 до 320 кН/м^2 , то есть на 27%;

– нормальные напряжения σ_2 в призабойной зоне в своде выработки уменьшаются с 325 кН/м^2 до 255 кН/м^2 , то есть на 22%.

– значение главных нормальных и максимальных касательных напряжений увеличивается при приближении рассматриваемой точки на контуре забоя к значению 0,5 его высоты. Граница глин и плотных песков, пролегающая на данном уровне, является концентратором напряжений из-за разницы в физико-механических свойствах слоев.

– значительное снижение нормальных напряжений (22-27%) говорит о переходе смешанного забоя в более стабильное состояние со снижением уровня порового давления жидкости в грунтовом массиве.

Согласно принятому к сравнению коэффициенту запаса устойчивости грунтового массива наблюдается значительное снижение коэффициента запаса устойчивости забоя тоннеля при увеличении порового давления воды в массиве, что подтверждает полученные ранее результаты.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния изменения конфигурации мощностей грунтовых слоев в смешанном забое на его устойчивость, влияние изменения порового давления жидкости на сцепление грунтов и вывод аналитической методики для более точного подбора технологических параметров проходческих машин, что позволит снизить влияние строительства тоннеля на окружающий его грунтовый массив.

Список литературы

1. Картозия Б.А., Корчак А.В., Левицкий А.М., Лернер В.Г., Малышев Ю.Н., Рахманинов Ю.П., Резуненко В.И., Смирнов В.И., Федунец Б.И., Филимонов Б.А., Шуплик М.Н. Шахтное и подземное строительство. Том 1. – М.: МГТУ, 2003. – 607 с.
2. Дашко Р.Э., Коробко А.А. Инженерно-геологическое обоснование безопасности строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой низменности (Западная часть Ленинградской области) // Записки Горного института – 2013. – Т. 206. – С. 95-100.
3. Мартиросянц Е. Показатели устойчивости обнажений протерозойских глин в забоях тоннелей // Записки Горного Института. – 2009. – Т. 180. – С. 87-91.
4. Новоженина С.У., Выстрчил М.Г. Новый метод прогнозирования осадки поверхности эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена, вырытых ЕРВ ТВМ. // Международная конференция по промышленному инжинирингу. – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – С. 2266-2271. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.283.
5. Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Тхай Д.Н. Разработка метода прогноза давления пригруза забоя и осадок земной поверхности при строительстве тоннелей механизированными проходческими комплексами // Записки Горного Института. – 2015. – Т. 211. – С. 53-63.
6. Broer. W. Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face. – Amsterdam, 2003. – P. 759-765.
7. Губин В.Н., Ковалев А.А., Сладкопцевцев С.А., Ясовеев М.Г. Недр России. Том 2. Экология геологической среды. – Минск: БГУ, 2002. – 120 с.
8. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. – М., 1958. – 608 с.
9. Дашко Р.Э., Котюков П.В., Шидловская А.В. Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей // Записки Горного института – 2012. – Т. 199. – С. 9-16.
10. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. – М.: Недра. 1985. – 224 с.

11. Мазеин С.В., Потапов М.А. Измерение давления пеногрунтовой компенсации в забое тоннелепроходческого щита для прогноза аварийных ситуаций техногенного характера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – №9. – С. 245-250.
12. Поляков А.В., Жабин А.Б., Чеботарев П.Н., Хачатурян В.Г. Особенности проектирования щитовых машин с грунтопригрузом // Известия ТулГУ. – 2019. – № 4. – С. 150-156.
13. George J. Tsekouras, John Kukulis, Maria-Katerina Nikolinaku, Nikos E. Mastorakis. Prediction of Face Settlement During Tunneling Excavation Using Artificial Neural Network // Proceedings of the WSEAS International Conference on engineering mechanics, structures, engineering geology (emeseg '08). – Cambridge: Cambridge University, 2008. – P. 33-39.
14. Jiankang L., Yujing C. and Osama S. Influence of geological conditions of rock mass ahead of tunnel face on the prediction performance of uniaxial compressive strength prediction model // Conference Series: Earth and Environment Science. 2021, vol. 861, p. 042116. – DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042116.
15. Kang-Hyun L., Hyung-Joon S., Park J., Park J., In-Mo L. Probabilistic estimation of predicting the state of the soil in front of TBM tunnels, combining each method of geophysical forecasting. // Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association. 2016, vol. 18(3), pp. 257-272. DOI: 10.9711/KTAJ.2016.18.3.257.
16. Алексеев А.В., Вербило П.Э., Протосеня А.Г. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 252-260. – DOI: 10.31897/PMI.2022.26.
17. Карасев М.А. Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей // Записки Горного Института – 2011. – Т. 190. – С. 163-171.
18. Труфанов А.Н. Поровое давление в водоупорных слоях грунтов // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в российской федерации». – М.: Геомаркетинг, 2019. – С. 57-73.
19. Roholla H., Jamal R., Babak S. Prediction of face support pressure and required thrust force in TBM tunneling through alluvial ground // 2nd International Conference on Tunneling Machines in Difficult Soils. Istanbul. 2016, pp. 1-11.
20. Jun K.L., Tan Yu., Xiang-hua S., Dong D.F., Liu T.R. Effects of through-wall leaking during excavation in water-rich sand on lateral wall deflections and surrounding environment // Journal of Zhejiang University(Engineering Science). 2023, vol. 27(3), pp. 530-541. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023.03.011.
21. Дашко Р.Э., Стуккеи А.Г. К вопросу о влиянии природно-техногенного режима Нижнекотлинского водоносного горизонта в Санкт-Петербурге на безопасность эксплуатации наземных и подземных сооружений // Записки Горного института – 2007. – Т. 172. – С. 197-200.
22. Кумов В.В. Физическое моделирование и его важность в сфере образования для горного инженера // XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: сборник материалов. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 192-194.
23. Ignatiev S., Sudarikov A.E., Imashev A.J. Determination of the stress-strain state of a rock mass and a zone of inelastic deformations around an underground mine using modern numerical modeling methods // Journal of Sustainable Mining. 2021, vol. 20, iss. 3, pp. 220-227. DOI: 10.46873/2300-3960.1324.
24. Беляков Н. А, Емельянов И.А. Развитие подхода к обработке результатов измерений напряженного состояния методом кольцевой разгрузки // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – №2. – С. 192-207. – DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.
25. Беликов А.А., Беляков Н.А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №4. – С. 20-34. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
26. Беляков Н.А., Беликов А.А. Прогноз целостности водозащитной толщи на верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №6-2. – С. 33-46. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.
27. Катеров А.М. Протосеня А.Г. Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №6-1. – С. 100-113. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.
28. Протосеня А.Г., Огородников Ю.Н., Деменков П.А. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг. – СПб: СПГГУ-МАНЭБ, 2011. – 355 с.
29. Komolov V., Belikov A., Kankhva V., Mezina N. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 918, p. 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012027.
30. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института – 2022. – Т. 254. – С. 180-190.
31. Волохов Е.М., Гусев В.Н., Ю.В. Лир. К вопросу выбора граничного критерия для мульды сдвижения горных пород в массиве над сооружаемым тоннелем // Записки Горного Института – 2007. – Т. 172. – С. 167-171.

32. Волохов Е.М. Учет вертикальной асимметрии распределения сдвижений в массиве горных пород, окружающем сооружаемый тоннель // Записки Горного Института – 2007. – Т. 172. – С. 162-166.
33. Волохов Е.М., Бах Н.С. Расчет сдвижений и деформаций горных пород, возникающих при строительстве тоннелей с учетом вертикальной асимметрии в распределении сдвижений // Записки Горного Института – 2011. – Т. 190. – С. 278-283.
34. Komolov V., Belikov A., Demenkov P.A. Investigation of the behavior of load-bearing structures when excavating a pit under the protection of a "Wall in the ground" // Technological achievements in construction. 2022, vol. 180, pp. 313-323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8.
35. Bogomolova O.A., Zhidelev A.V. Determination of the value of the stability margin coefficient based on the analysis of the stressed state of the soil mass within the framework of the linear theory of elasticity // Construction and geotechnics. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 58-72. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.05.

References

1. Kartoziya B.A., Korchak A.V., Levitsky A.M., Lerner V.G., Malyshev Yu.N., Rachmaninov Yu.P., Rezunenko V.I., Smirnov V.I., Fedunets B.I., Filimonov B.A., Shuplik M.N. Mine and underground construction. Vol. 1. – M.: MSTU, 2003. – 607 p.
2. Dashko R.E., Korobko A.A. Engineering and geological substantiation of the safety of construction and operation of structures for various purposes within the Preglint lowland (Western part of the Leningrad region) // Journal of Mining Institute. 2013, vol. 206, pp. 95-100.
3. Martirosyants E. Indicators of stability of Proterozoic clay outcrops in tunnel faces // Journal of Mining Institute. 2009, vol. 180, pp. 87-91.
4. Novozhenina S.U., Vystrchil M.G. A new method for predicting surface precipitation of escalator tunnels of the St. Petersburg Metro dug by EPB TBM // International Conference on Industrial Engineering. – Chelyabinsk: SUSU, 2016. – P. 2266-2271. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.283.
5. Protosenya A.G., Belyakov N.A., Thai D.N. Development of a method for predicting the pressure of the face loading and the sediment of the Earth's surface during the construction of tunnels by mechanized tunneling complexes // Journal of Mining Institute. 2015, vol. 211, pp. 53-63.
6. Broer. W. Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face. – Amsterdam, 2003. – P. 759-765.
7. Gubin V.N., Kovalev A.A., Sladkopevtsev S.A., Yasoveev M.G. The Bowels of Russia. Vol. 2. Ecology of the geological environment. – Minsk: BSU, 2002. – 120 p.
8. Tertsagi K., Peck R. Soil mechanics in engineering practice. – M., 1958. – 608 p.
9. Dashko R.E., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. The influence of hydrogeological conditions on the safety of underground space development during the construction of transport tunnels // Journal of Mining Institute. 2012, vol. 199, pp. 9-16.
10. Stavrogin A.N., Protosenya A.G. Mechanics of deformation and destruction of rocks. – M.: Nedra. 1985. – 224 p.
11. Mazein S.V., Potapov. M.A. Measuring the pressure of foam-ground compensation in the bottom of a tunneling shield for predicting man-made emergencies // Mining information and analytical bulletin. 2012, no. 9, pp. 245-250.
12. Polyakov A.V., Zhabin A.B., Chebotarev P.N., Khachaturian V.G. Design features of panel machines with ground cargo // News of TulSU. 2019, no. 4, pp. 150-156.
13. George J. Tsekouras, John Kukulis, Maria-Katerina Nikolinaku, Nikos E. Mastorakis. Prediction of Face Settlement During Tunneling Excavation Using Artificial Neural Network // Proceedings of the WSEAS International Conference on engineering mechanics, structures, engineering geology (emeseg '08). – Cambridge: Cambridge University, 2008. – P. 33-39.
14. Jiankang L., Yujing C. and Osama S. Influence of geological conditions of rock mass ahead of tunnel face on the prediction performance of uniaxial compressive strength prediction model // Conference Series: Earth and Environment Science. 2021, vol. 861, p. 042116. – DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042116.
15. Kang-Hyun L., Hyung-Joon S., Park J., Park J., In-Mo L. Probabilistic estimation of predicting the state of the soil in front of TBM tunnels, combining each method of geophysical forecasting. // Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association. 2016, vol. 18(3), pp. 257-272. DOI: 10.9711/KTAJ.2016.18.3.257.
16. Alekseev A.V., Verbilo P.E., Protosenya A.G. Prognosis of the stress-strain state and stability of the tunnel face forehead at the intersection of disturbed zones of the soil massif // Journal of Mining Institute. 2022, vol. 254, pp. 252-260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.
17. Karasev M.A. Analysis of the causes of deformation of the Earth's surface and the nature of the formation of subsidence caused by the construction of transport tunnels // Journal of Mining Institute. 2011, vol. 190, pp. 163-171.
18. A.N. Trufanov. Pore pressure in water-resistant layers of soils // Materials of the XV All-Russian scientific and Practical Conference "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation". – M.: Geomarketing, 2019. – P. 57-73.
19. Roholla H., Jamal R., Babak S. Prediction of face support pressure and required thrust force in TBM tunneling through alluvial ground // 2nd International Conference on Tunneling Machines in Difficult Soils. Istanbul. 2016, pp. 1-11.

20. Jun K.L., Tan Yu., Xiang-hua S., Dong D.F., Liu T.R. Effects of through-wall leaking during excavation in water-rich sand on lateral wall deflections and surrounding environment // Journal of Zhejiang University(Engineering Science). 2023, vol. 27(3), pp. 530-541. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023.03.011.
21. Dashko R.E., Stukkei A.G. On the question of the influence of the natural and technogenic regime of the Nizhnekotlinsky aquifer in St. Petersburg on the safety of operation of ground and underground structures // Journal of Mining Institute. 2007, vol. 172, pp. 197-200.
22. Kumov V.V. Physical modeling and its importance in the field of education for a mining engineer // XI Forum of universities of engineering and technological profile of the Union State: collection of materials. – Minsk: BNTU, 2022. – P. 192-194.
23. Ignatiev S., Sudarikov A.E., Imashev A.J. Determination of the stress-strain state of a rock mass and a zone of inelastic deformations around an underground mine using modern numerical modeling methods // Journal of Sustainable Mining. 2021, vol. 20, iss. 3, pp. 220-227. DOI: 10.46873/2300-3960.1324.
24. Belyakov N. A., Emelyanov I.A. Development of an approach to processing the results of measurements of the stressed state by the ring unloading method // News of TulSU. Earth sciences. 2022, no. 2, pp. 192-207. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.
25. Belikov A.A., Belyakov N.A. Methodology for predicting the stress-strain state of inter-chamber pillars secured with a pliable cable support // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 4, pp. 20-34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
26. Belyakov N.A., Belikov A.A. Forecast of the integrity of the water-protective layer at the Verkhnekamsk potash ore deposit // Mining information and analytical Bulletin. 2022, no. 6-2, pp. 33-46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.
27. Katerov A.M. Protosenya A.G. Development of the stress-strain state of the combined support of a vertical shaft traversed in a salt massif // Mining information and Analytical Bulletin. 2022, no. 6-1, pp. 100-113. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.
28. Protosenya A.G., Ogorodnikov Yu.N., Demenkov P.A. Mechanics of underground structures. Spatial models and monitoring. – SPb.: SPSMU-MANEB, 2011. – 355 p.
29. Komolov V., Belikov A., Kankhva V., Mezina N. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 918, p. 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012027.
30. Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. Verkhnekotlinsky clays of the St. Petersburg region as the foundation and environment of unique structures: engineering-geological and geotechnical analysis // Journal of Mining Institute, 2022, vol. 254, pp. 180-190.
31. Volokhov E.M., Gusev V.N., Yu.V. Lir. On the issue of choosing a boundary criterion for the mulda of rock movement in the massif above the tunnel under construction // Journal of Mining Institute, 2007, vol. 172, pp. 167-171.
32. Volokhov E.M. Accounting for the vertical asymmetry of the distribution of displacements in the rock mass surrounding the tunnel under construction // Journal of Mining Institute, 2007, vol. 172, pp. 162-166.
33. Volokhov E.M., Bach N.S. Calculation of displacements and deformations of rocks arising during tunnel construction taking into account vertical asymmetry in the distribution of displacements // Journal of Mining Institute, 2011, vol. 190, pp. 278-283.
34. Komolov V., Belikov A., Demenkov P.A. Investigation of the behavior of load-bearing structures when excavating a pit under the protection of a "Wall in the ground" // Technological achievements in construction. 2022, vol. 180, pp. 313-323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8.
35. Bogomolova O.A., Zhidelev A.V. Determination of the value of the stability margin coefficient based on the analysis of the stressed state of the soil mass within the framework of the linear theory of elasticity // Construction and geotechnics. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 58-72. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.05.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Протосеня Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СГПИПС	Protosenya Anatoly Grigorievich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of CME&US
Кумов Всеволод Васильевич – аспирант vshuk1@mail.ru	Vsevolod Vasilievich Kumov – postgraduate student

Получена 21.05.2023