



УДК 624.042.13

Физическое моделирование как инструмент верификации при решении задач геомеханики

А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Физическое моделирование как инструмент верификации при решении задач геомеханики // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 874–890. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-874-890

Аннотация

Цель: выполнить верификацию математической модели участка сопряжения перегонного и станционного тоннеля метрополитена путем создания физической модели методом эквивалентных материалов. Проанализировать формирование вертикальных нагрузок от горного давления на обделку тоннелей с учетом выбранной последовательности производства работ. По результатам моделирования сделать вывод о влиянии станционного тоннеля и торцевой стены на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля, определить размеры этой области влияния. **Методы:** метод конечных элементов в комбинации с аналитическим методом (математическое моделирование), метод эквивалентных материалов (физическое моделирование). **Результаты:** выявлены закономерности распределения нагрузок от вертикального горного давления на обделку перегонного тоннеля на участке сопряжения с пилонной станцией глубокого заложения. Установлено, что на подходе к торцевой стене станции обделка перегонного тоннеля воспринимает вертикальную нагрузку от горного давления, превышающую нагрузку на обделку вне области влияния станции примерно в 2–4 раза. При этом установлено, что начальные деформации станционной выработки приводят к увеличению нагрузки на перегонный тоннель. Таким образом, прогноз нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля рационально выполнять с учетом начальных деформаций станционной выработки. Установлено, что граница области влияния станционного тоннеля на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля на участке их сопряжения практически не зависит от глубины заложения и может быть принята равной 7 м. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования узла сопряжения перегонного и станционного тоннелей для определения протяженности участка перегонного тоннеля с усиленной обделкой.

Ключевые слова: метод конечных элементов, метод эквивалентных материалов, метрополитен, перегонный тоннель, станционный тоннель

Введение

Основным методом решения задач механики подземных сооружений (геомеханики) в настоящее время является метод конечных элементов, относящийся к области математического моделирования. Параллельное развитие высокопроизводительной компьютерной техники и специализированных расчетных программных

комплексов привело к повсеместному распространению метода конечных элементов как в инженерной, так и в научной среде, а проведение процедуры сертификации обеспечивает достоверность получаемых результатов при использовании программного комплекса и минимизирует вероятность ошибок расчета.

Вместе с тем у математического моделирования существует недостаток на самом фундаментальном, методологическом уровне. Оно является методом абстрагирования, при котором объекты физической реальности заменяются их математическими абстракциями, например, стержнями, оболочками, пружинами. Таким образом, при решении сложных задач, к которым относятся задачи механики подземных сооружений, перед ученым встает вопрос о правомерности самых базовых утверждений: гипотезы сплошной среды, модели местных деформаций и т. п.

В свою очередь, физическое моделирование можно назвать отражением реальности посредством создания уменьшенных копий тех или иных объектов, имеющих ту же физическую природу. Так, в методе эквивалентных материалов через закон подобия определяются значения основных физико-механических характеристик уменьшенных копий объектов моделирования, после чего подбираются их физические эквиваленты [1]. Применительно к задачам геомеханики главным преимуществом метода эквивалентных материалов является возможность создания грунтовых массивов, наиболее приближенных к реальным: с естественной неоднородностью физико-механических характеристик, с анизотропией, проявляющейся в слоистости грунтов, с повышением плотности и прочности грунта от верхних слоев к нижним.

С точки зрения научной методологии физическое моделирование может являться инструментом верификации математического моделирования при решении сложных задач или разработке новых алгоритмов расчета [2–9].

Одна из таких задач была решена на кафедре «Тоннели и метрополитены» в рамках исследования напряженно-деформированного состояния узла сопряжения перегонного

и стационарного тоннелей метрополитена на глубоком заложении в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

Построение математической модели

По причине больших пролетов станций и наличия над верхнекотлинскими глинами слабых слоев четвертичных отложений стационарные конструкции рассчитываются на полный вес вышележащих грунтов. В то же время над перегонными тоннелями метрополитена непосредственно на подходе к станциям мощность слоя верхнекотлинских глин колеблется в зависимости от типа и глубины заложения станции в пределах 15–35 м, что является достаточным для формирования нагрузок от горного давления непосредственно вблизи обделки перегонного тоннеля.

В рамках математического моделирования рассмотрен узел сопряжения обделки перегонного тоннеля метрополитена с торцевой стеной глухого участка бокового тоннеля пилонной станции (рис. 1).

В принятой схеме производства работ вначале выполнялась проходка перегонного тоннеля, а затем — навстречу ему проходка стационарного тоннеля с устройством торцевой стены.

Обделка перегонного тоннеля состоит из железобетонных усиленных тубингов наружным диаметром 5,64 м, обделка стационарного тоннеля — из железобетонных тубингов наружным диаметром 9,8 м. Толщина торцевой стены была принята равной 1 м.

В настоящее время для упрощения инженерных расчетов сборные блочные обделки тоннелей принято моделировать пространственными трубами сплошного сечения [10–12]. Такой подход оправдан для принципиальной оценки геомеханических процессов системы «обделка — грунтовый массив» [13,

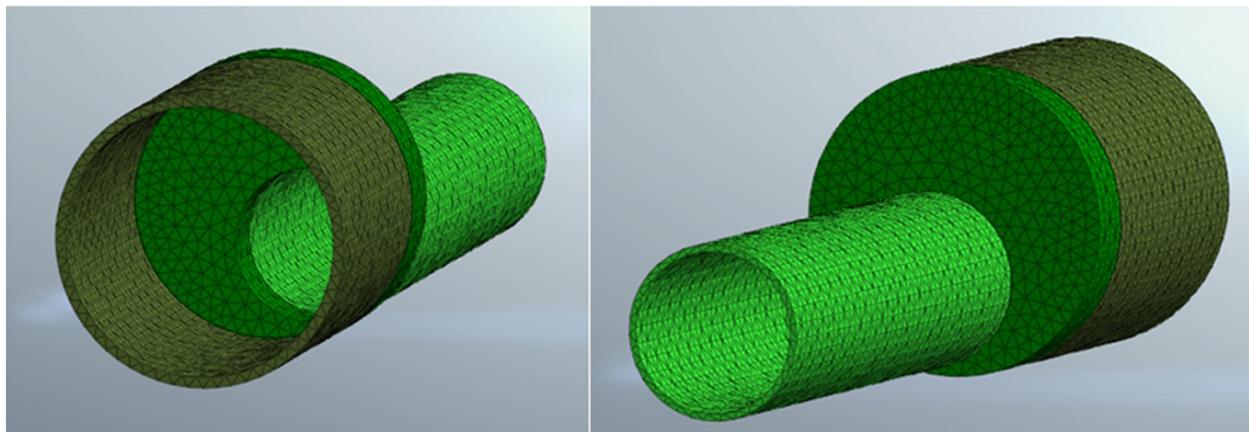


Рис. 1. Конечно-элементная модель участка сопряжения перегонного и стационарного тоннелей (грунтовый массив не показан)

14] и для определения осадок дневной поверхности [15]. В случае тьюбинговых тоннельных обделок расчетные сечения моделируемой обделки также можно заменить на сплошные (приведенные), исходя из следующего равенства жесткостей:

$$EI = E \frac{bh^3}{12}, \quad (1)$$

откуда высота сечения сплошной обделки приведенной жесткости определяется как

$$h = \sqrt[3]{\frac{12I}{b}}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости обделки;

I — момент инерции расчетного сечения тьюбинговой обделки;

b — ширина кольца обделки.

Авторами было выполнено исследование правомерности такого упрощения [16, 17]. Установлено, что моделирование тьюбинговых обделок кольцами эквивалентной жесткости позволяет предварительно оценить порядок напряжений, тогда как детальный расчет показывает наличие концентраций напряжений в конкретных элементах тьюбигов, причем их значения существенно отличаются от среднего уровня напряжений. Одновременно с этим в части напряжений

на контакте обделки и массива (нагрузки от горного давления) не наблюдается значимой разницы при представлении элементов обделки тьюбингами или приведенными сечениями.

Математическое моделирование было выполнено в специализированном расчетном геотехническом комплексе MIDAS GTS NX. Физико-механические характеристики конечных элементов обделки приняты как для бетона класса В45 следующими:

- модуль упругости $E = 37500$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$;
- объемный вес $\gamma = 2,5$ т/м³.

Грунтовый массив рассматривался как однородный, изотропный, квазисплошной. Применяемая геомеханическая модель в MIDAS GTS NX — модель Кулона — Мора. Значения физико-механических характеристик верхнекотлинских глин принимались следующими:

- объемный вес грунта $\gamma = 2,2$ т/м³;
- усредненный объемный вес вышележащих грунтов $\gamma_Q = 1,9$ т/м³;
- угол внутреннего трения в массиве $\varphi = 23^\circ$;
- сцепление $C = 81$ кПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$;
- секущий модуль упругости $E_{50} = 200$ МПа.

Грунтовый массив и расположенная в нем конструкция разбиты на конечное число элементов со сгущением сетки вблизи конструкции. На боковых границах массива установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений.

Толща ненарушенных верхнекотлинских глин над обделкой станционного тоннеля принята равной 10 м. Вышележащие слои грунта заменены равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к верхней границе массива. В нашем случае нагрузка прикладывалась переменной: 380, 570 и 760 кПа, что соответствует мощности четвертичных отложений 20, 30 и 40 м соответственно.

Программный комплекс MIDAS GTS NX способен выполнять расчеты с учетом стадийности проходки, что позволяет делать оценку напряженно-деформированного состояния массива и конструкций подземных сооружений на всех ключевых этапах строительства.

На I этапе расчета рассматривался однородный грунтовый массив для создания начального поля напряжений. При этом конечным элементом, моделирующим обделку, присваивались характеристики грунта. По результатам расчета I этапа все перемещения обнулялись с сохранением бытовых напряжений.

На II этапе расчета моделировалось свободное деформирование незакрепленной выработки при сооружении перегонного тоннеля, в результате которого происходит перераспределение напряжений на ее контуре: снижение напряжений в сводовой части и увеличение в боках выработки. Для создания начальных деформаций контура выработки в модели выключались конечные элементы выемки и обделки, а на грунт изнутри тоннеля прикладывалось противодавление βp , определенное аналити-

ческим методом (подробнее про β -метод и его модернизацию см. [18]).

На III этапе расчета моделировалось возведение обделки перегонного тоннеля путем включения соответствующих конечных элементов и присвоения им характеристик железобетона.

На следующих этапах выполнялось моделирование участка станционного тоннеля. При этом возможны два способа включения станционной конструкции в работу с грунтовым массивом:

- с учетом свободного деформирования незакрепленной выработки по аналогии с проходкой перегонного тоннеля;
- путем активации конечных элементов конструкций непосредственно в напряженном массиве.

Для наиболее полного сравнительного анализа результатов применялись оба этих способа. Для этого в программном комплексе MIDAS GTS NX был создан еще один расчетный случай, отличающийся от первого введением дополнительного этапа расчета III'.

На этапе III' по аналогии с II этапом моделировалось свободное деформирование незакрепленной выработки при сооружении станционного тоннеля и торцевой стены с применением аналитического метода.

На заключительном, IV этапе расчета моделировалось возведение обделки станционного тоннеля и торцевой стены путем включения соответствующих конечных элементов и присвоения им характеристик железобетона.

Таким образом, в первом расчетном случае при моделировании сооружения участка пилонной станции этап III' учитывался, а во втором программный комплекс пропускал этот этап, сразу переходя к заключительному, IV этапу.

В результате решения задач были получены изополя напряжений и деформаций в грунтовом

массиве и строительных конструкциях. При этом основным исследуемым параметром являлась вертикальная составляющая напряжения в массиве на контакте «обделка — грунт» в шельге свода перегонного тоннеля, торцевой стены и станционного тоннеля (рис. 2).

По результатам моделирования установлено, что учет начальных деформаций выработки приводит к уменьшению результирующего горного давления на обделку станционного тоннеля примерно в 2 раза по сравнению с начальными напряжениями в массиве. Такой результат полностью согласуется с физикой геомеханических процессов, но не учитывает более сложного поведения реального грунтового массива. Результаты натурных исследований, обобщенные К. П. Безродным, Н. И. Кулагиным и П. А. Деменковым [19–21], указывают на то, что длительные реологические процессы в протерозойских глинах приводят к посте-

пенному увеличению вертикальных нагрузок от горного давления на обделку станционных тоннелей от 0,5 γH сразу после строительства станции до 0,8–1,0 γH спустя один-два года наблюдений.

Таким образом, с точки зрения прогноза развития нагрузок от горного давления на обделку более достоверным является расчет без учета начальных деформаций выработки станционного тоннеля.

При этом для оценки НДС обделки перегонного тоннеля следует учитывать начальные деформации выработки станционного тоннеля, поскольку они оказывают значительное влияние на формирование вертикальной нагрузки на обделку перегонного тоннеля. Так, величина нагрузок на обделку перегонного тоннеля оказывается выше в 2 раза при учете начальных деформаций выработки станционного тоннеля.

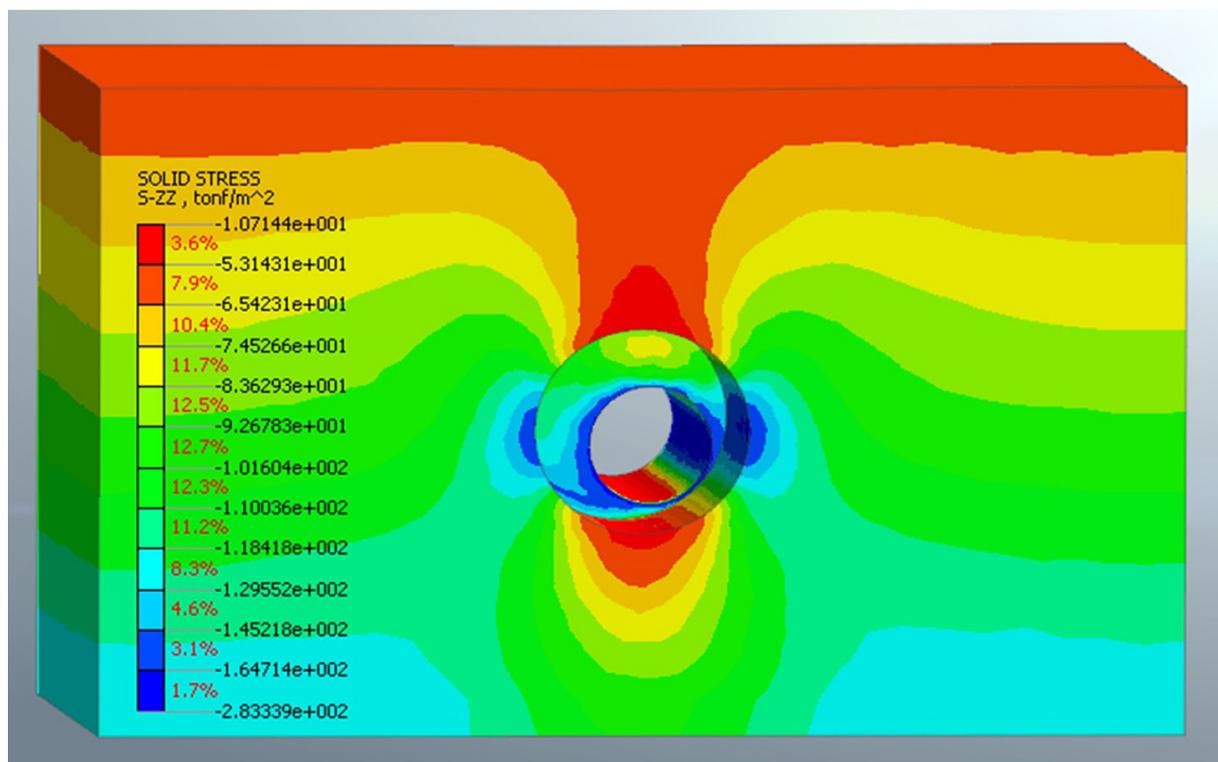


Рис. 2. Изополя вертикальных напряжений в массиве на заключительном этапе расчета

Построение физической модели

С целью верификации методики математического моделирования выполнено физическое моделирование участка сопряжения перегонного и станционного тоннелей с учетом выбранной технологической схемы проходки с применением метода эквивалентных материалов.

Подбор эквивалентного материала грунта выполнен с учетом масштаба моделирования 1:20 в соответствии с формулами теории подобия [1]:

$$E_{\text{ом}} = \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} \cdot \frac{l}{L} \cdot E_{\text{он}}, \quad (3)$$

$$C_{\text{м}} = \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} \cdot \frac{l}{L} \cdot C_{\text{н}}, \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{м}} = \varphi_{\text{н}}, \quad (5)$$

где $\frac{l}{L}$ — масштаб моделирования; E_0 — модули общей деформации; C — сцепления; φ — углы внутреннего трения модели и натуре.

Обделки моделировались пространственными гипсовыми трубами с толщиной стен, приведенной к изгибной жесткости тьюбинговой обделки:

$$E_{\text{м}} I_{\text{м}} = \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} \cdot \frac{l_{\text{м}}^5}{L_{\text{н}}^5} \cdot E_{\text{н}} I_{\text{н}}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости, I — момент инерции сечения обделки.

По результатам сдвиговых и стабилметрических испытаний определены значения физико-механических характеристик материала грунта [22, 23]. Результаты сравнения фактических характеристик состава с расчетными представлены в табл. 1.

Испытательный стенд моделирования (рис. 3) выполнен в виде металлической рамной конструкции из элементов стального проката. Ограждающие конструкции фронтальных и боковых стенок собраны из швеллеров,

уголков и плит из толстой фанеры и оргстекла. Во фронтальных стенках имеются вырезы по формам конструкций обделок станционного и перегонного тоннелей.

Ширина фронтальных стенок стенда принята равной 1600 мм. Таким образом, боковые стенки отстоят от перегонного тоннеля более чем на два его диаметра и тем самым ограничивают зону влияния выработки перегонного тоннеля. Расстояние от низа перегонного тоннеля до лотка стенда было принято равным одному диаметру. Высота моделируемого грунтового массива принята 10 м, как и в математической модели. Ширина боковых стенок стенда определена с учетом размещения участка сопряжения станционного и перегонного тоннелей, а также конструкции торцевой стены и составляет 800 мм.

Подобранный эквивалентный материал уложен в стенд в разогретом состоянии слоями 3 см с последующей укаткой.

Далее выполнялись пригруз стенда до величины нагрузки от полного веса столба грунта над тоннелем и выдержка его до полной стабилизации напряжений в массиве. Переменная мощность четвертичных отложений над кровлей верхнекотлинских глин (соответствующие в натуре 20 м, 30 м и 40 м) моделировалась пригрузом чугунами отливками. Влияние городской застройки при данной постановке эксперимента не учитывалось, поскольку ее вклад в горное давление оценивается величиной не более 2–5 % [24].

В индивидуальных деревянных опалубках изготавливались обделки перегонного и станционного тоннелей участками по 10 см (для удобства последующего монтажа). В дальнейшем эти участки склеивались между собой эпоксидным клеем с оставлением зазоров для вывода датчиков измерения контактного давления.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические характеристики грунта натуры и модели

Физико-механические характеристики	Натуры	Модели		Погрешность
		Расчетные	Подобранные	
Плотность	$\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 1,66 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 1,66 \text{ г/см}^3$	–
Угол внутреннего трения	$\varphi = 23^\circ$	$\varphi = 23^\circ$	$\varphi = 23^\circ$	0 %
Сцепление	$C = 100 \text{ кПа}$	$C = 3,62 \text{ кПа}$	$C = 3,2 \text{ кПа}$	13 %
Модуль общей деформации	$E = 100 \text{ МПа}$	$E = 3,62 \text{ МПа}$	$E = 3,2 \text{ МПа}$	13 %

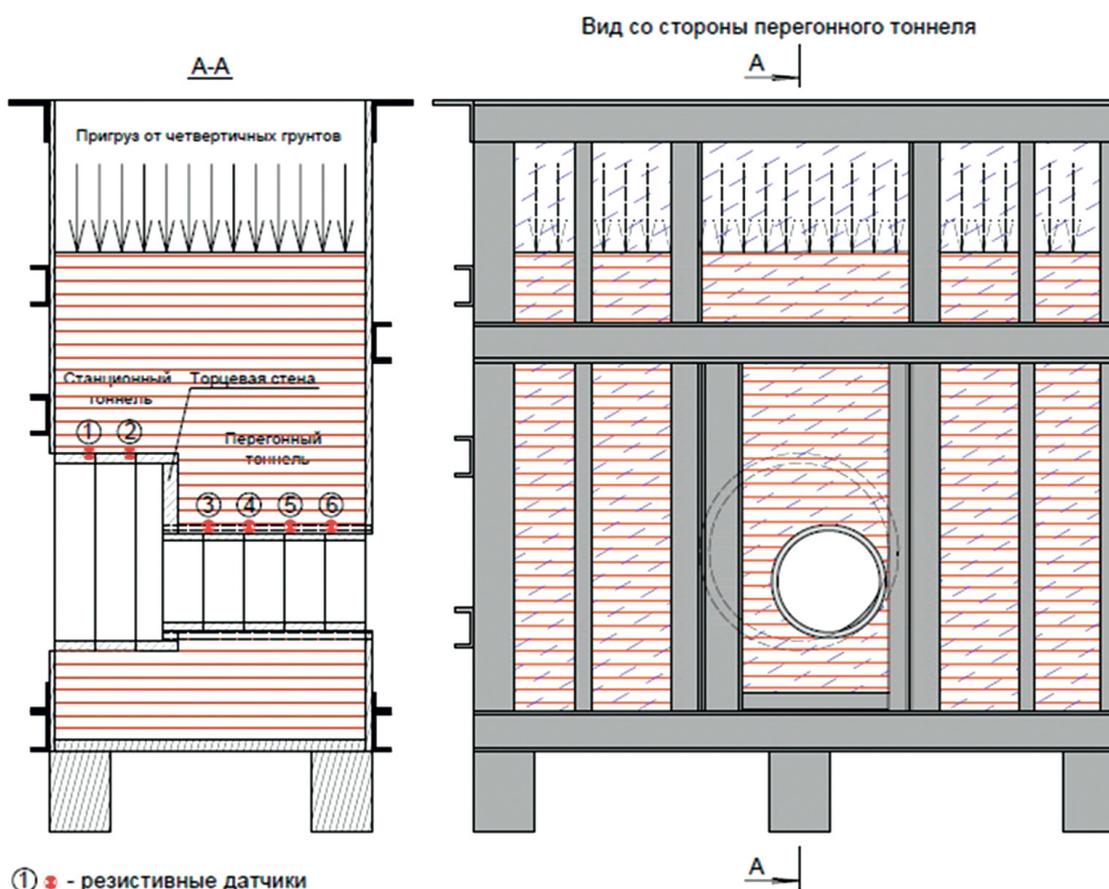


Рис. 3. Принципиальная схема испытательного стенда

В продольном направлении участок сопряжения обделок перегонного и станционного тоннелей разбит на шесть измерительных профилей с установленными на обделки датчиками контактного давления FSR-402 фирмы Interlink Electronics. Датчик представляет собой тонкую и гибкую печатную плату с круглой активной областью диаметром 1,47 см.

Она выполнена в виде двухслойной конструкции, каждый слой которой состоит из гибкого основания (полиэфирная пленка толщиной 0,2 мм), слоя проводящего материала (серебро) и слоя резистивной пленки. Серебряный слой простирается от активной области к паяным разъемам на конце датчика, которые позволяют включать его в цепь.

Датчики устанавливались на наружную поверхность моделей обделок с выводом проводов внутрь тоннелей через стыки обделок (рис. 4а, 4б).

Торцевая стена (рис. 4в) изготавливалась в индивидуальной опалубке с обеспечением зазоров величиной ~10 мм по всему перимет-

ру для последующего заполнения свежим гипсовым раствором при моделировании проходки тоннелей. Толщина торцевой стены была принята равной 50 мм, что соответствует 1 м в натуре.

Разработка грунта выполнялась от калотты к лотку на величину заходки 50 мм (1 м



Рис. 4. Моделирование обделок перегонного и станционного тоннелей:

а, б — обделки перегонного и станционного тоннелей соответственно с установленными датчиками давления; в — модель торцевой стены; г — рама продавливания, установленная на стенд со стороны перегонного тоннеля

в натуре) с доработкой контура выработки специальными ножами, вырезанными из листовой стали. Ножи имели вырез, равный толщине обделок с учетом зазора в 2 мм. Таким образом, общий зазор между обделкой и грунтом составлял ~4–5 мм, что соответствует 80–100 мм в натуре.

После каждой заходки модели обделок задвигались в испытательный стенд домкратом рамы продавливания (рис. 4г). Этапы моделирования проходки перегонного и стационарного тоннелей представлены на рис. 5.

По завершении проходки перегонного и стационарного тоннелей со стороны станции

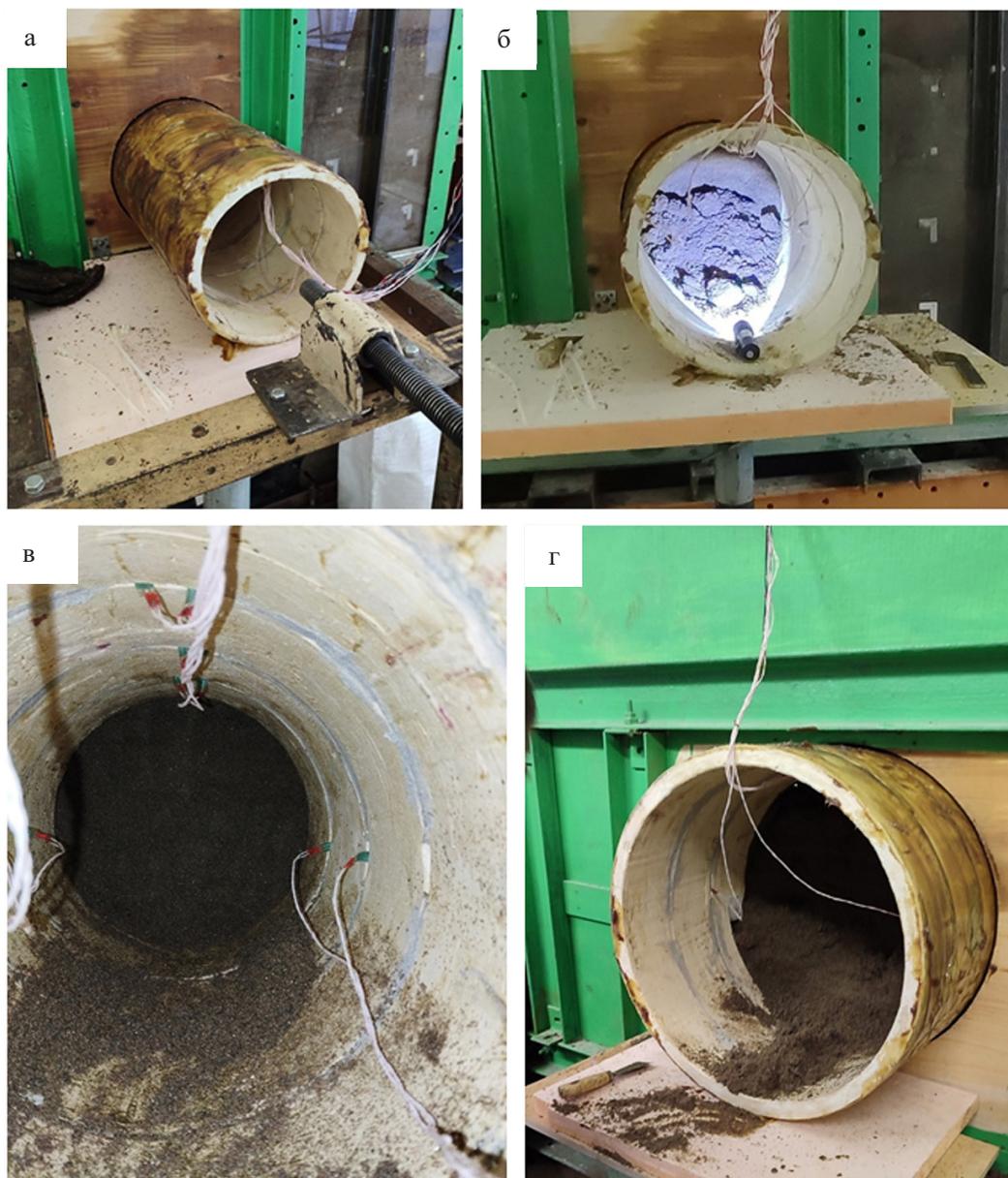


Рис. 5. Моделирование проходки перегонного и стационарного тоннелей:

а, б — разработка грунта с постепенным задавливанием обделки перегонного тоннеля в грунтовый массив; в — вид на забой из перегонного тоннеля; г — проходка стационарного тоннеля

устанавливалась торцевая стена с заполнением зазоров между ней и обделками тоннелей свежим гипсовым раствором (рис. 6).

Общий вид физической модели после выполнения проходки тоннелей представлен на рис. 7. Для дополнительного контроля измерений были установлены четыре датчика перемещений в сводах и лотках станционного и перегонного тоннеля.

По завершении моделирования тоннельных конструкций снимались начальные показания по датчикам, после чего выполнялся пригруз модели нагрузкой, эквивалентной

весу 20 м четвертичных отложений. Через трое суток показания с датчиков снимались повторно, после чего добавлялась нагрузка, эквивалентная еще 10 м четвертичных отложений. Эта процедура повторялась еще через трое суток.

Результаты эксперимента представлены на рис. 8 в виде графиков, соотнесенных с результатами математического моделирования.

По результатам физического моделирования нагрузка от горного давления на обделку станционного тоннеля оказалась ближе к результатам математического моделирования

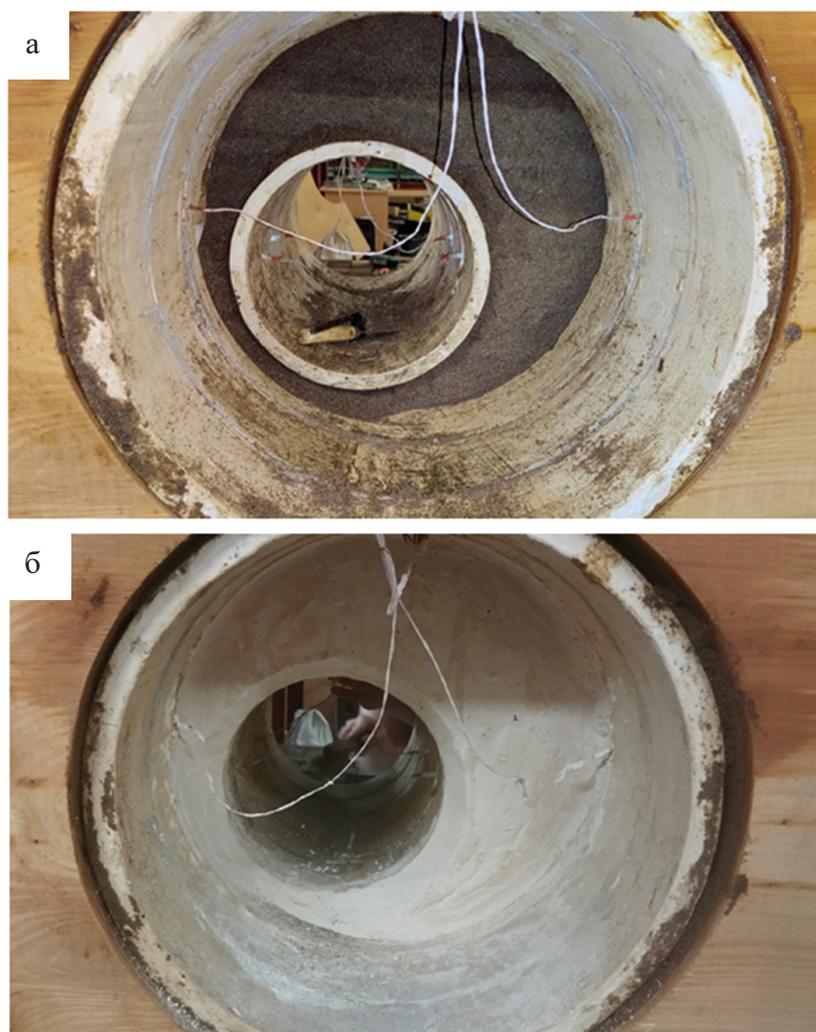


Рис. 6. Моделирование создания торцевой стены: а — момент сбойки станционного и перегонного тоннелей; б — монтаж модели торцевой стены



Рис. 7. Общий вид физической модели узла сопряжения перегонного и станционного тоннеля:
а — вид со стороны перегонного тоннеля; б — вид со стороны станционного тоннеля

без учета начальных деформаций станционной выработки (синие кривые на графиках).

Вместе с тем нагрузка от горного давления на обделку перегонного тоннеля по результатам физического моделирования оказалась выше, чем при математическом моделировании без учета начальных деформаций станционной выработки, то есть ближе к красным кривым.

Кажущееся противоречие может быть обусловлено тем, что в физическом эксперименте по периметру установленной торцевой стены предусматривались зазоры, впоследствии заполняемые гипсовой смесью. Также зазоры образовались и на контакте торцевой стены с грунтовым массивом. Эти зазоры могли вызвать некоторые деформации обделок и грунта вблизи торцевой стены, что и нашло отражение

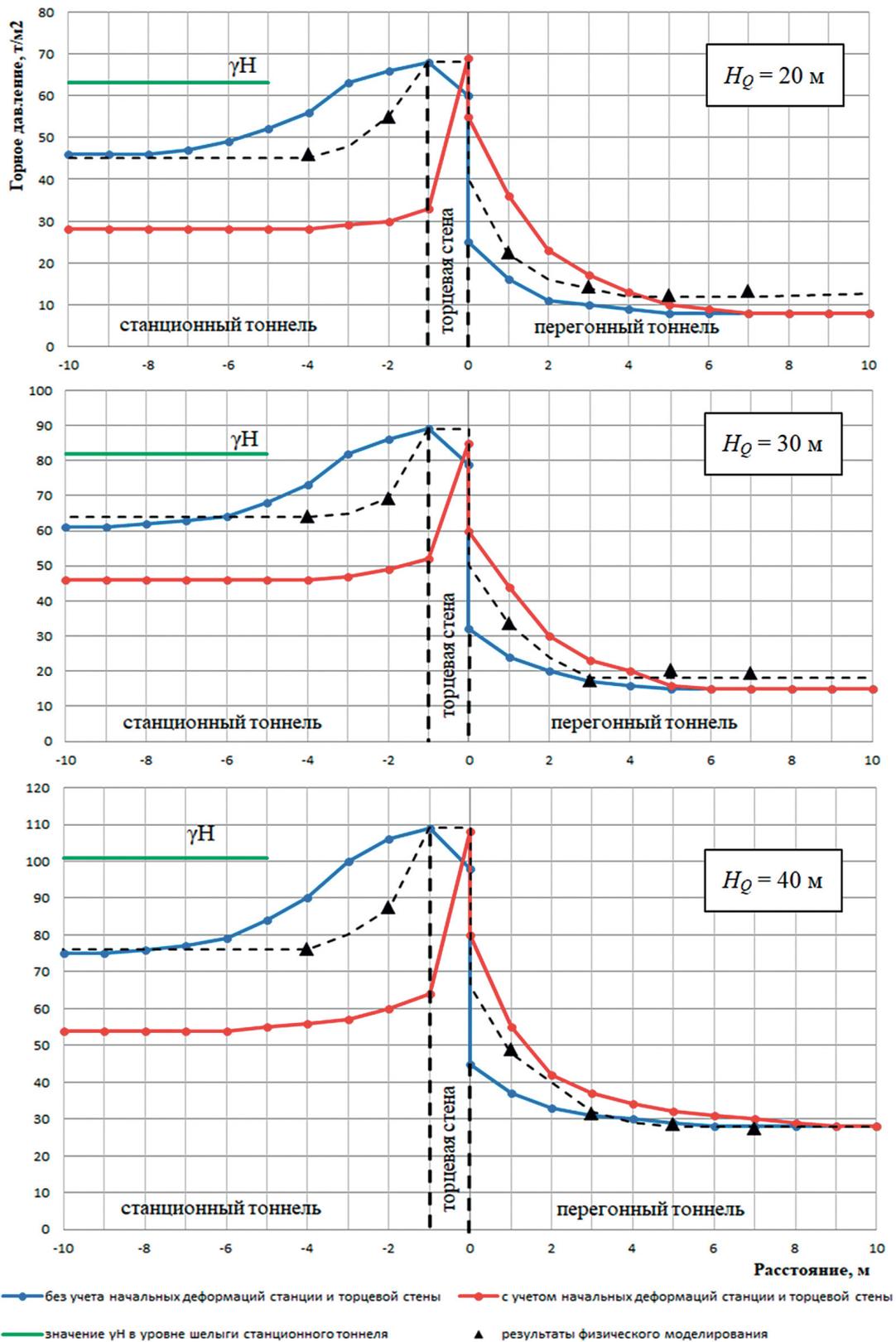


Рис. 8. Вертикальная нагрузка от горного давления на свод станционного и перегонного тоннеля

в росте нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля. Таким образом, такое «противоречие» только подтверждает корректность рассмотренных математических моделей.

Протяженность области влияния станции на перегонный тоннель составляет приблизительно 5–7 м. Размеры этой области практически не зависят от уровня напряжений в массиве (от глубины заложения), то есть в первую очередь определяются геометрией системы. Результаты выполненного исследования можно распространить и на колонные станции глубокого заложения ввиду принципиальной схожести их геометрии в части расположения перегонных тоннелей.

Выводы

1. По результатам математического моделирования и последующей верификации на физической модели выявлены закономерности распределения нагрузок от вертикального горного давления на обделку перегонного тоннеля на участке сопряжения с пилонной станцией глубокого заложения при схеме производства работ, заключающейся в сооружении перегонного, а затем станционного тоннеля.

1.1. На подходе к торцевой стене станции обделка перегонного тоннеля воспринимает вертикальную нагрузку от горного давления, превышающую нагрузку на обделку вне области влияния станции примерно в 2–4 раза. При этом установлено, что начальные деформации станционной выработки приводят к увеличению нагрузки на перегонный тоннель.

1.2. Обделка станционного тоннеля вне торцевой стены воспринимает нагрузку от горного давления в значении $0,5–0,8 \gamma H$, где нижняя граница соответствует расчету с учетом начальных деформаций выработки станционно-

го тоннеля, верхняя — без учета начальных деформаций, что является более доверительным в отношении прогноза напряженно-деформированного состояния станционной обделки. Вместе с тем прогноз нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля рационально выполнять с учетом начальных деформаций станционной выработки.

2. Установлено, что граница области влияния станционного тоннеля на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля на участке их сопряжения практически не зависит от глубины заложения и может быть принята равной 7 м.

3. Результаты выполненного исследования можно распространить и на колонные станции глубокого заложения ввиду принципиальной схожести их геометрии в части расположения перегонных тоннелей. Перспективным направлением развития темы является разработка конструктивно-технологических решений участка сопряжения перегонного тоннеля и торцевой стены станции при других вариантах организации схемы производства работ.

Библиографический список

1. Моделирование проявлений горного давления / Г. Н. Кузнецов [и др.]. Ленинград: Недра, 1968. 280 с.
2. Huang G., Qiu W., Zhang H. Numerical simulation of mechanism behavior of the horizontal stratum tunnel adopting 3 Dimensional Element Code (3DEC) // *Underground — the way to the future!* World Tunnel Congress. Geneva, 2013. P. 830–835.
3. Hwang Ch. H., Jung Ch. G., Lee S. D. Behaviour of the cut-and-cover tunnel in unsymmetrical condition // *World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”*. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
4. Фролов Ю. С., Коньков А. Н., Ларионов А. А. Решение задач геомеханики методом физического

моделирования при строительстве метрополитена в Санкт-Петербурге // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 71–73.

5. Frolov Y.S., Konkov A.N., Larionov Frolov A.A. Scientific substantiation of constructive-technological parameters of St. Petersburg subway underground structures // Transportation Geotechnics and Geoecology, TGG 2017 (17–19 May 2017). Saint Petersburg, 2017. P. 673–680.

6. Dong K. K., Bum J. O., Lee S.-D. Optimal pillar width of twin tunnels in horizontal jointed rock // World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.

7. Kim H.-M., Lee S.-D. Load on pillar and block displacement during two-arch tunnel excavation in jointed rock mass // World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.

8. A study of the invert tunnel’s behavior in a weathered-rock using laboratory model test and numerical analysis / K. J. Kim [at al.] // Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 501–506.

9. Loads on the center pillar of two-arch tunnel under the influence of discontinuity planes in the ground // S. D. Lee [at al.] // Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 533–537.

10. Structural forces in segmental linings: process-oriented tunnel advance simulations vs. conventional structural analysis / A. Marwan [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 111.

11. Study on Mechanical Behavior and the Model Test of Segmental Linings for the Shield Tunnel Undercrossing the Yellow River / Y. Fang [at al.] // Procedia Engineering. 2016. Vol. 166. P. 19–31.

12. Simulating tunnel support integrity using FEM and FDEM based on laboratory test data / H. Johnson [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 111.

13. Study on the long-term performance of cement-sodium silicate grout and its impact on segment lining structure in synchronous backfill grouting of shield tunnels / Sh. Wang [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 92.

14. Minimum cover depth estimation for underwater shield tunnels / G. Panpan [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 115.

15. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of mechanized twin tunnels in soil-rock mass mixed ground / Z. Zhong [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 110.

16. Коньков А. Н., Сокорнов А. А. Анализ результатов математического моделирования тубинговых тоннельных обделок при использовании приведенных сечений // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов: в 2 т. СПб.: ПГУПС, 2021. Т. 1. С. 207–209.

17. Konkov A. N., Sokornov A. A., Korolev K. V. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced sections // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 402. Springer, Cham, 2022. Vol. 1. P. 568–576.

18. Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов // Путь навигатор. 2022. № 50 (76). С. 36–44.

19. Кулагин Н. И. Исследование рациональных методов сооружения односводчатых станций метрополитена в протерозойских глинах: дисс. ... канд. техн. наук. Ленинград: ЛГИ, 1977.

20. Безродный К. П. Исследование особенностей статической работы элементов конструкции односводчатых станций метрополитена в протерозойской глине: дисс. ... канд. техн. наук. Ленинград: ЛГИ, 1978.

21. Деменков П. А. Геомеханическое обоснование метода расчета нагрузок на станции колонного типа метрополитена глубокого заложения: дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТИ, 2004.

22. Sokornov A. A., Shaposhnikov E. A., Konkov A. N. Laboratory test of equivalent material as artificial ground // E3S Web Conf. Vol. 157. Key Trends in Transportation Innovation (КТТИ-2019), 2020.

23. Сокольников А. А., Шапошников Е. А., Коньков А. Н. Лабораторные испытания искусственных грунтов // Путь навигатор. 2019. № 41 (67). С. 49–55.

24. Определение добавочного давления на подземные сооружения метрополитена от наземного

строительства / А. А. Сокольников [и др.] // Путь навигатор. 2020. № 42 (68). С. 36–41.

Дата поступления: 11.08.2024

Решение о публикации: 21.09.2024

Контактная информация:

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент; anlonkov@pugpstm.ru

Physical modeling as a verification tool for geomechanical tasks solving

A. A. Sokornov, A. N. Kon'kov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Physical modeling as a verification tool for geomechanical tasks solving // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 874–890. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-874-890

Abstract

Purpose: to verify the mathematical model of the interstation and station subway tunnels junction section by creating a physical model using the method of equivalent materials. To analyze the formation of vertical loads from ground pressure on the tunnel linings, taking into account the selected sequence of work. To establish the station tunnel and its face wall influence on the interstation tunnel lining stress-strain state, and determine the size of this area of influence based on the simulation results. **Methods:** the finite element method in combination with the analytical method (mathematical modeling), the method of equivalent materials (physical modeling). **Results:** patterns of load distribution from vertical ground pressure on the interstation tunnel lining at the interface with the deep shallow pylon station have been revealed. It was found that on the approach to the face wall of the station, the interstation tunnel lining perceives the vertical load from the ground pressure, exceeding the load on the lining outside the area of the station influence by about 2–4 times. In addition, it was found that the initial deformations of the station workings lead to an increase in the load on the interstation tunnel. Thus, it is rational to forecast the load from the ground pressure on the interstation tunnel lining, taking into account the initial deformations of the station workings. It is established that the boundary of the station tunnel influence area on the stress-strain state of the interstation tunnel lining practically does not depend on the depth of laying and can be assumed to be 7 m. **Practical significance:** the results of the study can be used at the design stage of the interstation and station tunnel junction to determine the length of the interstation tunnel section with reinforced lining.

Keywords: finite element method, equivalent materials method, subway, interstation tunnel, station tunnel

References

1. Modelirovanie proyavlenij gornogo davleniya / G. N. Kuznecov [i dr.]. Leningrad: Nedra, 1968. 280 s. (In Russian)
2. Huang G., Qiu W., Zhang H. Numerical simulation of mechanism behavior of the horizontal stratum tunnel adopting 3 Dimensional Element Code (3DEC) // *Underground — the way to the future!* World Tunnel Congress. Geneva, 2013. P. 830–835.
3. Hwang Ch. H., Jung Ch. G., Lee S. D. Behaviour of the cut-and-cover tunnel in unsymmetrical condition // *World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”*. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
4. Frolov Yu.S., Kon'kov A.N., Larionov A.A. Reshenie zadach geometriki metodom fizicheskogo modelirovaniya pri stroitel'stve metropolitena v Sankt-Peterburge // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. No. 9. S. 71–73. (In Russian)
5. Frolov Y.S., Konkov A.N., Larionov Frolov A.A. Scientific substantiation of constructive-technological parameters of St. Petersburg subway underground structures // *Transportation Geotechnics and Geoecology, TGG 2017 (17–19 May 2017)*. Saint Petersburg, 2017. P. 673–680.
6. Dong K. K., Bum J. O., Lee S.-D. Optimal pillar width of twin tunnels in horizontal jointed rock // *World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”*. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
7. Kim H.-M., Lee S.-D. Load on pillar and block displacement during two-arch tunnel excavation in jointed rock mass // *World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”*. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
8. A study of the invert tunnel's behavior in a weathered-rock using laboratory model test and numerical analysis / K. J. Kim [at al.] // *Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises*. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 501–506.
9. Loads on the center pillar of two-arch tunnel under the influence of discontinuity planes in the ground // S. D. Lee [at al.] // *Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises*. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 533–537.
10. Structural forces in segmental linings: process-oriented tunnel advance simulations vs. conventional structural analysis / A. Marwan [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111.
11. Study on Mechanical Behavior and the Model Test of Segmental Linings for the Shield Tunnel Undercrossing the Yellow River / Y. Fang [at al.] // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 166. P. 19–31.
12. Simulating tunnel support integrity using FEM and FDEM based on laboratory test data / H. Johnson [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111.
13. Study on the long-term performance of cement-sodium silicate grout and its impact on segment lining structure in synchronous backfill grouting of shield tunnels / Sh. Wang [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 92.
14. Minimum cover depth estimation for underwater shield tunnels / G. Panpan [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 115.
15. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of mechanized twin tunnels in soil-rock mass mixed ground / Z. Zhong [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 110.
16. Kon'kov A.N., Sokornov A.A. Analiz rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya tyubingovyh tonnel'nyh obdelok pri ispol'zovanii privedennyh sechenij // *III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov: v 2 t. SPb.: PGUPS, 2021. T. 1. S. 207–209*. (In Russian)
17. Kon'kov A.N., Sokornov A.A., Korolev K. V. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced sections // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol 402. Springer, Cham, 2022. Vol. 1. P. 568–576.

18. Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Modelirovanie prohodki tonnelya glubokogo zalozheniya v metode konechnyh elementov // Putevoj navigator. 2022. No. 50 (76). S. 36–44. (In Russian)
19. Kulagin N. I. Issledovanie racional'nyh metodov sooruzheniya odnosvodchatyh stancij metropolitena v proterozojskih glinah: diss. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LGI, 1977. (In Russian)
20. Bezrodnyj K. P. Issledovanie osobennostej staticheskoj raboty elementov konstrukcii odnosvodchatyh stancij metropolitena v proterozojskoj gline: diss. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LGI, 1978. (In Russian)
21. Demenkov P. A. Geomekhanicheskoe obosnovanie metoda rascheta nagruzok na stancii kolonnogo tipa metropolitena glubokogo zalozheniya: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: SPbGGI, 2004. (In Russian)
22. Sokornov A. A., Shaposhnikov E. A., Konkov A. N. Laboratory test of equivalent material as artificial ground // E3S Web Conf. Vol. 157. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019), 2020.
23. Sokornov A. A., Shaposhnikov E. A., Kon'kov A. N. Laboratornye ispytaniya iskusstvennyh gruntov // Putevoj navigator. 2019. № 41 (67). S. 49–55. (In Russian)
24. Opredelenie dobavochnogo davleniya na podzemnye sooruzheniya metropolitena ot nazemnogo stroitel'stva / A. A. Sokornov [i dr.] // Putevoj navigator. 2020. № 42 (68). S. 36–41. (In Russian)

Received: 11.08.2024

Accepted: 21.09.2024

Author's information:

Anton A. SOKORNOV — senior lecturer;
scarlunch@mail.ru

Alexandr N. KON'KOV — PhD of Engineering,
Associate Professor; ankonkov@pgupstm.ru