

УДК 624.044

Математическое моделирование блочной обделки тоннеля большого диаметра

А. П. Ледяев, А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков

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

Для цитирования: Ледяев А. П., Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Математическое моделирование блочной обделки тоннеля большого диаметра // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 605–615. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615

Аннотация

Цель: Выполнить оценку напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного перегонного тоннеля на участке Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена. **Методы:** Математическое моделирование методом конечных элементов, сравнение с результатами натурных геодезических измерений. **Результаты:** Выполнено моделирование обделки как монолитного кольца эквивалентной жесткости; выполнено моделирование обделки со стыками между блоками двумя способами: с помощью интерфейсов и упругих прокладок в стыках; результаты математического моделирования сопоставлены с результатами натурных геодезических измерений, в результате чего определен наиболее рациональный способ моделирования стыков блочной обделки; выполнена оценка напряженно-деформированного состояния с точки зрения запаса по прочности и по деформациям. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования конструкций сборных железобетонных обделок для тоннелей большого диаметра, а также на этапе эксплуатационного контроля технического состояния для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния обделки.

Ключевые слова: Тоннель, двухпутная обделка, тоннелепроходческий механизированный комплекс, математическое моделирование, метод конечных элементов.

Введение

Двухпутные тоннели метрополитена, пройденные тоннелепроходческим комплексом большого диаметра в толще разнородных четвертичных отложений, являются актуальной темой для научных исследований как с точки зрения вопросов проектирования, так и эксплуатации. Качественная сборка обделки из высокоточных блоков в теории должна обеспечивать работу тоннельной конструкции как единого целого, но на практике на участках тоннеля с ненадлежащим исполнением монтажных соединений блоков возможно появление сдвиговых деформаций и раскрытия стыков. Более

подробно такие дефекты в обделке двухпутного тоннеля метрополитена описаны в [1]. Для оценки их влияния на напряженно-деформированное состояние обделки следует прибегнуть к математическому моделированию методом конечных элементов.

Сдвиговые деформации и раскрытие стыков приводят к нарушению целостности обделки, и отразить этот процесс в механике сплошных сред является нетривиальной задачей. В практике математического моделирования расчетчики прибегают к помощи так называемых «математических костылей» — специальных приемов, позволяющих, находясь формально в области действия

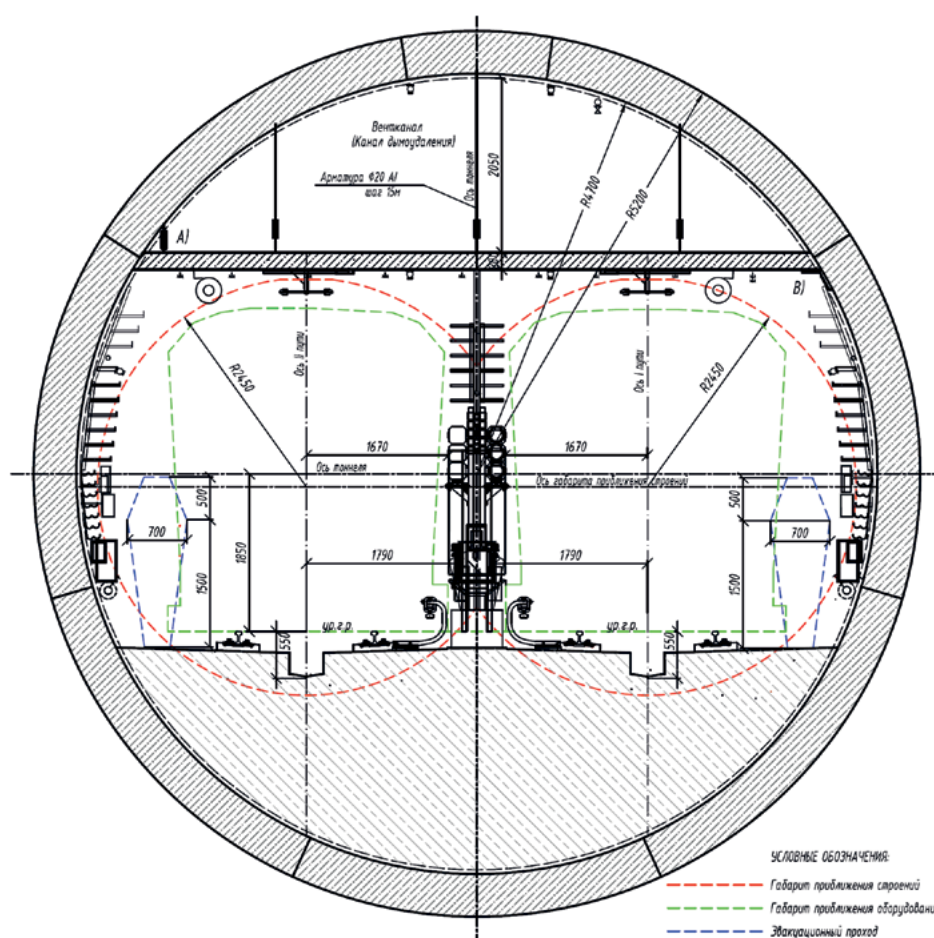


Рис. 1. Поперечное сечение перегонного тоннеля Невско-Василеостровской линии:

A — крепление на подвесе; *B* — крепление на опорном столике

законов механики сплошной среды, моделировать различные структурные нарушения.

Целью настоящего исследования являлась оценка напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного перегонного тоннеля на участке Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена. Для осуществления цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить моделирование обделки как монолитного кольца эквивалентной жесткости для рассмотрения случая надлежащей работы радиальных стыков обделки.

2. Выполнить моделирование обделки из отдельных блоков с разными вариантами учета стыков между ними для оценки влияния некачественной сборки колец.

3. Выполнить оценку прочности обделки и предложить деформационный критерий работоспособности.

4. Сопоставить результаты математического моделирования с натурными геодезическими измерениями, выполненными на стадии эксплуатации двухпутного тоннеля.

Материалы и методы

Двухпутный участок перегонного тоннеля метрополитена выполнен с применением высокоточной сборной железобетонной водонепроницаемой обделки наружным диаметром 10 300 мм, с толщиной блока 450 мм. Ширина кольца обделки изменяется от 1760 до 1840 мм для возможности поворота трассы тоннеля как в профиле, так и в плане. При

моделировании ширина кольца принималась равной среднему значению — 1800 мм. Кольцо обделки состоит из 7 блоков сплошного сечения: четырех нормальных, двух смежных и одного замкового. Водонепроницаемость обделки обеспечивается гидроизолирующими уплотнительными прокладками в стыках, обжимаемых при монтаже обделки и находящихся в упругосжатом состоянии в течение всего периода эксплуатации обделки.

Внутреннее пространство тоннеля разделено на два яруса — зону движения поездов и вентиляционный канал — монолитным железобетонным перекрытием толщиной 200 мм по металлическим балкам. Балки крепятся к обделке тоннеля через закладные детали в центральной части на трех подвесах, а по торцам — на подвесах либо на опорных столиках (рис. 1, *A* и *B* соответственно). Нижняя четверть тоннеля заполнена путевым бетоном жесткого основания.

Математическое моделирование проводилось в программном комплексе Midas GTS NX. Данный комплекс широко распространен в научной среде и применяется в расчетах сложных систем, таких как «фундамент — грунт» или «обделка — грунт», причем результаты математического моделирования в ряде исследований имели высокую сходимость с натурой [2–6].

Физико-механические свойства строительных конструкций были описаны линейно-деформируемой моделью. Модуль упругости обделки был принят как для бетона класса В40, то есть $E = 36\,000$ МПа, а жесткого основания — как для бетона класса В30, то есть $E = 32\,500$ МПа. Коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$, объемный вес железобетона $\gamma = 24,5$ кН/м³.

В качестве инженерно-геологических условий были выбраны суглинки, наиболее характерные для четвертичных отложений Санкт-Петербурга. Свойства грунта были описаны моделью Мора — Кулона, физико-механические характеристики приняты следующими:

- модуль деформации $E = 7$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,37$,
- объемный вес $\gamma = 19$ кН/м³;
- сцепление $C = 14$ кПа;
- угол внутреннего трения $\varphi = 15^\circ$.

Рассматриваемая область грунтового массива должна быть достаточна, чтобы перекрыть зону влияния тоннельной выработки и тем самым исключить влияние границ области на величину рассчитываемых деформаций и напряжений в конструкции. Таким образом, граница влияния тоннельной выработки принята на расстоянии двух диаметров от края конструкции по ширине и одного по глубине. Глубина заложения обделки принята средней для трассы линии мелкого заложения метрополитена, то есть 10 м. Толщина модели принята равной ширине кольца обделки, то есть 1,8 м. Таким образом, размеры модели составили $50 \times 30 \times 1,8$ м.

Грунтовой массив и расположенная в нем конструкция была разбита на сеть объемных конечных элементов, соединенных между собой в узлах. Разбивка на конечные элементы массива выполнена со сгущением сетки вблизи конструкции (рис. 2).

На боковых границах массива установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений.

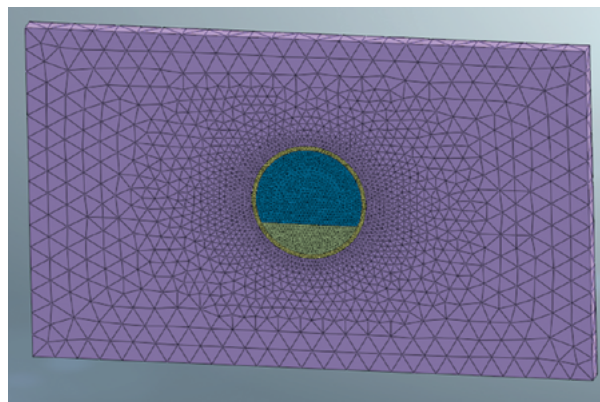


Рис. 2. Общий вид модели

Расчет выполнялся в два этапа. На первом этапе создавалось начальное напряженное состояние грунтового массива до проходки тоннеля. На этом этапе все группы конечных элементов имели свойства грунта. В конце этапа расчета полученные перемещения обнулялись. На втором этапе выполнялся монтаж кольца обделки. На этом этапе конечные элементы грунта внутри тоннеля деактивировались, а группам конечных элементов блоков и жесткого основания присваивались характеристики бетона.

Моделирование обделки было выполнено в трех постановках:

1. Моделирование обделки монолитным кольцом эквивалентной жесткости (случай исправной работы радиальных стыков обделки).

2. Моделирование обделки из отдельных блоков со стыками, допускающими проскальзывание.

3. Моделирование обделки из отдельных блоков со стыками, допускающими раскрытие.

1. Моделирование обделки монолитным кольцом эквивалентной жесткости

В зарубежной практике, в частности в немецких стандартах DIN-1045, в проверочных расчетах сборная обделка представляется как монолитное кольцо эквивалентной жесткости. Эквивалентная жесткость оценивается в зависимости от количества блоков в кольце и моментов инерции стыков по формуле:

$$I_{\text{мон}} = I_{\text{стыка}} + I_{\text{бл}} \left(\frac{4}{m} \right)^2, \quad (1)$$

где $I_{\text{бл}}$ — момент инерции блока обделки:

$$I_{\text{бл}} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1,8 \cdot 0,45^3}{12} = 0,0137 \text{ м}^4,$$

b — ширина кольца;

h — высота сечения блока;

$I_{\text{стыка}}$ — момент инерции стыка:

$$I_{\text{стыка}} = \frac{b \cdot h_1^3}{12} = \frac{1,8 \cdot 0,25^3}{12} = 0,0023 \text{ м}^4,$$

h_1 — рабочая высота стыка;

$m = 7$ — количество блоков в кольце (с учетом замкового блока).

Тогда приведенный к монолитной обделке момент инерции:

$$I_{\text{мон}} = I_{\text{стыка}} + I_{\text{бл}} \left(\frac{4}{m} \right)^2 = 0,0023 + 0,0137 \cdot 0,33 = 0,0068 \text{ м}^4.$$

Отсюда высота сечения приведенного кольца [7, 8]:

$$h_{\text{прив}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{\text{мон}}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 0,0068}{1,8}} = 0,356 \text{ м}.$$

По результатам расчета № 1 было проанализировано напряженно-деформированное состояние обделки. На рис. 3 показаны изополя вертикальных деформаций обделки.

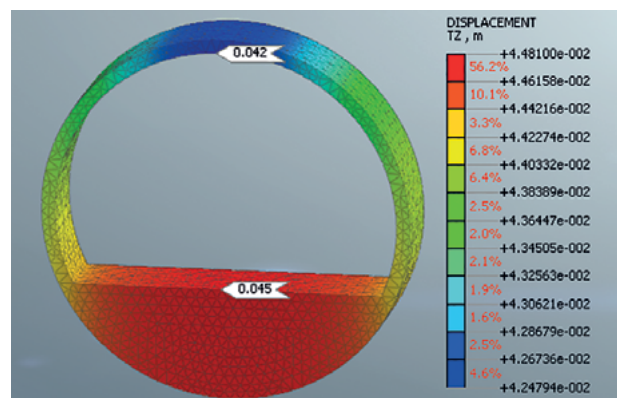


Рис. 3. Расчет № 1: изополя вертикальных деформаций обделки

Таким образом, в случае обеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки деформирование конструкции происходит следующим образом:

- практически равномерное поднятие (всплытие) тоннеля на величину ~ 40 мм;
- деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) составляет 3 мм.

2. Моделирование обделки из блоков со стыками, допускающими деформации

2.1. Моделирование обделки из блоков со стыками, допускающими проскальзывание

В данной постановке задачи моделировалось отсутствие болтовых связей и кольцевой шпонки в радиальных стыках обделки. Возможность смещения блоков друг относительно друга моделировалось установкой особого вида связей между конечными элементами — интерфейсами.

Было установлено, что наибольшие деформации возникают при расположении замкового блока в составе обделки под углом 15° к вертикали (рис. 4).

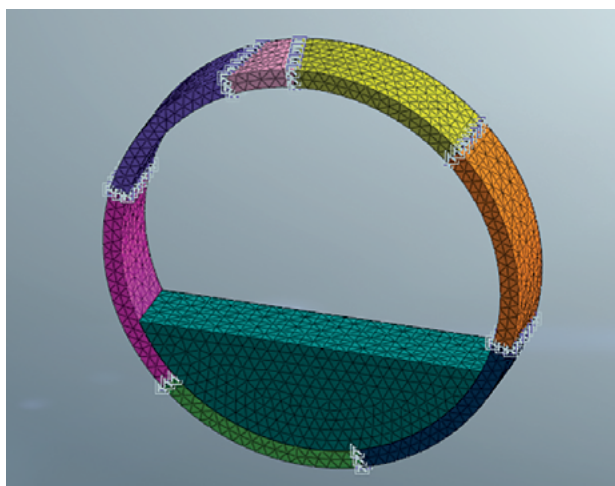


Рис. 4. Расчетная схема с интерфейсами в стыках

Свойства интерфейсов в стыках можно описать двумя параметрами: нормальным модулем жесткости (*Normal stiffness modulus*, K_n , кН/м³) и касательным модулем жесткости (*Shear stiffness modulus*, K_t , кН/м³).

В нашем случае отсутствие связей и шпонки допускает перемещение блока в стыке по касательной к другому блоку, тем самым принимаем $K_t = 1$ кН/м³ (минимальное отличное от нуля значение).

Нормальный модуль жесткости K_n можно определить двумя способами.

В первом способе (в соответствии с разделом «Справка» программного комплекса Midas GTS NX) нормальный модуль жесткости определяется через модуль упругости контактирующих элементов:

$$K_n = E_{oed,i} / t_v, \quad (2)$$

где t_v — виртуальная толщина интерфейсного элемента, задаваемая в пределах 0,01–0,1 м, при этом наименьшее значение соответствует наибольшей разнице между контактирующими элементами; таким образом, в нашем случае $t_v = 0,1$ м;

$$E_{oed,i} = 2G_i(1 - \nu_i) / (1 - 2\nu_i), \quad (3)$$

где ν_i — коэффициент Пуассона интерфейсного элемента, принимаемый равным 0,45;

$$G_i = R G, \quad (4)$$

G — модуль сдвига бетона, кПа, определяемый по формуле:

$$G = E / (2(1 + \nu)), \quad (5)$$

где R — фактор снижения прочности (*Strength Reduction Factor*), принимаемый в случае сдвиговых деформаций равным 0,75.

Тогда:

$$G = 32\,500\,000 / (2(1 + 0,2)) = 13\,541\,670 \text{ кПа.}$$

$$G_i = 0,75 \cdot 13\,541\,670 = 10\,156\,250 \text{ кПа.}$$

$$E_{oed,i} = 2 \cdot 10\,156\,250 \cdot (1 - 0,45) / (1 - 0,9) = 1117\,190 \text{ кПа.}$$

$$K_n = 1117\,190 / 0,1 = 11171\,900 \text{ кН/м}^3.$$

По результатам расчета № 2 можно сделать вывод, что в случае необеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки (отсутствие болтовых связей и кольцевой

шпонки) деформирование конструкции происходит следующим образом:

- поднятие (всплытие) лотка на величину 45 мм и свода на величину 34 мм (рис. 5);
- деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) составляет 9 мм;
- смещение радиальных стыков друг относительно друга составило от 3 до 9 мм (рис. 6).

Во втором способе модуль жесткости можно определить как коэффициент, связывающий нормальное усилие в кольце с деформацией бетона:

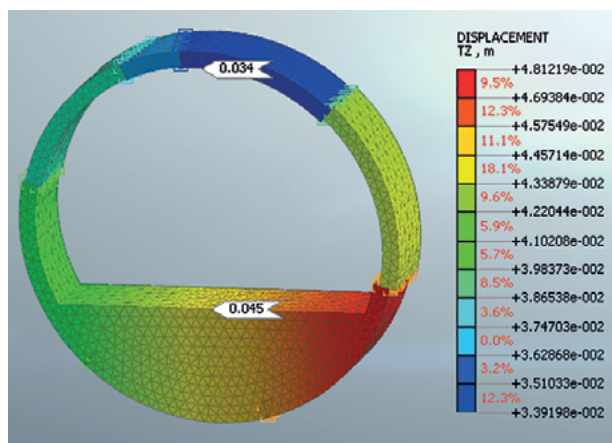


Рис. 5. Расчет № 2: изополя вертикальных деформаций обделки

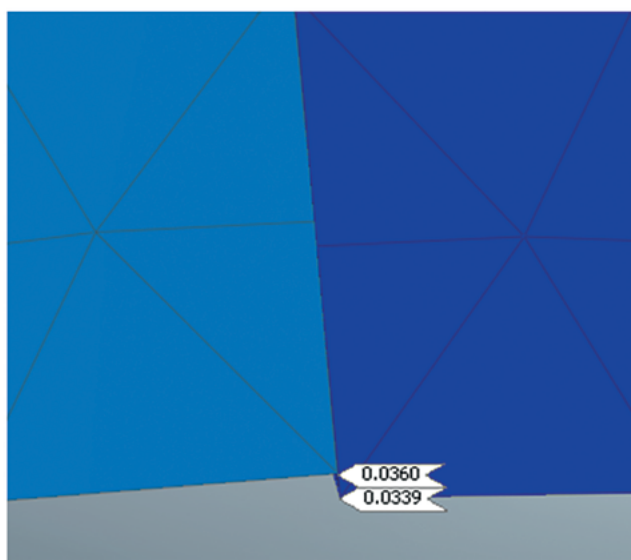
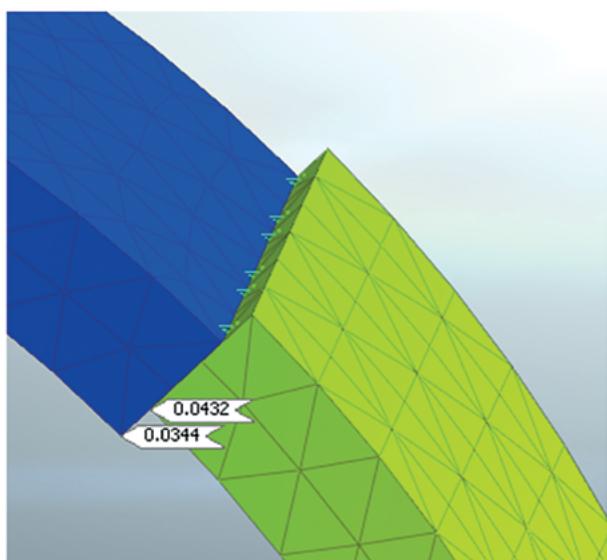


Рис. 6. Расчет № 2: смещение блоков в стыках (укрупненно)

$$K_n = N / (\Delta \cdot A), \quad (6)$$

где N — нормальная сила в стыке, кН;
 Δ — деформация обделки в стыке, м;
 A — площадь стыка, м.

В первом приближении значение нормальной силы может быть приблизительно оценено по формуле:

$$N = R \cdot q \cdot b, \quad (7)$$

где R — внешний радиус обделки, примем равным 5 м;

q — равномерно распределенная вертикальная нагрузка от горного давления, равная весу грунта над сводом тоннеля, кПа;

b — ширина кольца, м.

Тогда:

$$N = 5 \cdot 200 \cdot 1,8 = 1800 \text{ кН.}$$

В идеальном случае деформация бетона Δ является незначительной, поскольку напрямую зависит от модуля деформации бетона и в нашем случае оказывается равной микрометрам. В дей-

ствительности при деформировании обделки на контакте стыков может происходить локальное разрушение и истирание бетона. Приняв такое возможное разрушение равным 1 мм на каждый блок, можно определить нормальный модуль жесткости:

$$K_n = 1800 / (0,002 \cdot 1,8 \cdot 0,45) = 1111100 \text{ кН/м}^3.$$

В этом случае по результатам расчета № 3 можно сделать вывод, что в случае необеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки (отсутствие болтовых связей и кольцевой шпонки, а также возможность хрупкого раз-

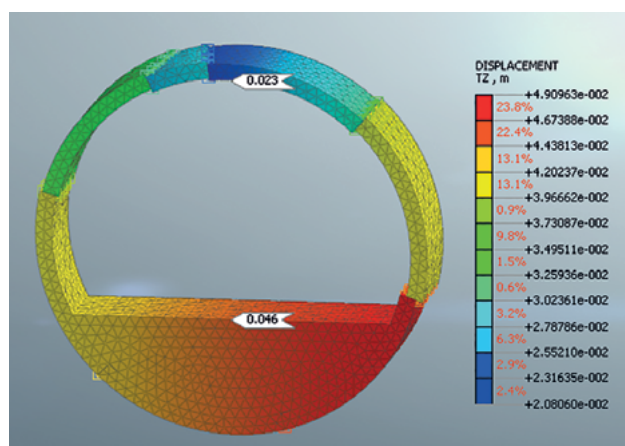
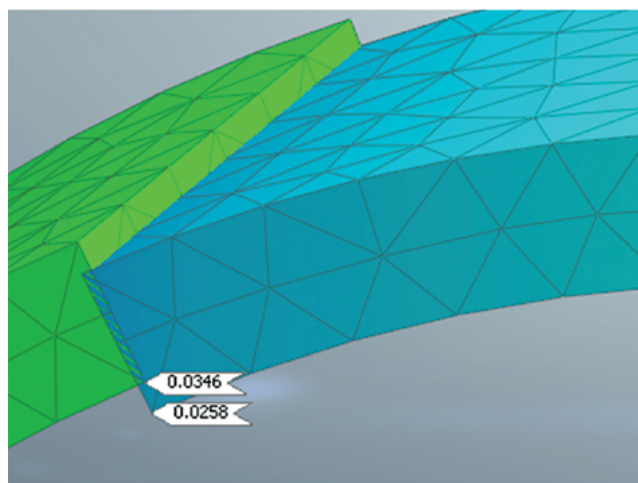


Рис. 7. Расчет № 3: изополя вертикальных деформаций обделки



рушения бетона на контакте) деформирование конструкции происходит следующим образом:

- поднятие (всплытие) лотка на величину 46 мм и свода на величину 23 мм (рис. 7);
- деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) в данной задаче составляет 23 мм;
- смещение радиальных стыков друг относительно друга составило от 6 до 10 мм (рис. 8).

2.2. Расчет обделки из блоков со стыками, допускающими раскрытие

В данной постановке моделировалась возможность раскрытия радиальных стыков обделки с помощью установки прокладки из сверхдеформативного материала между конечными элементами блоков (рис. 9). Сверхдеформативный материал имеет те же характеристики, что и конечные элементы блоков, за исключением модуля упругости, принятого равным 1000 кПа.

По результатам расчета № 4 можно сделать вывод, что в случае необеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки (возможность раскрытия стыков) деформирование конструкции происходит следующим образом:

- поднятие (всплытие) лотка на величину 52 мм и прогиб свода на величину 11 мм (рис. 10);

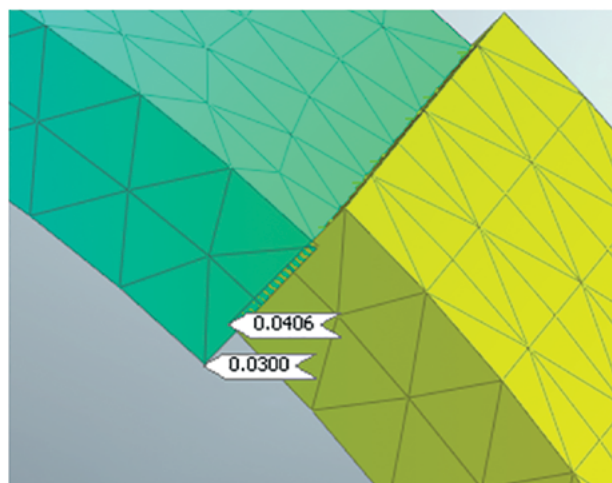


Рис. 8. Расчет № 3: смещение блоков в стыках (укрупненно)

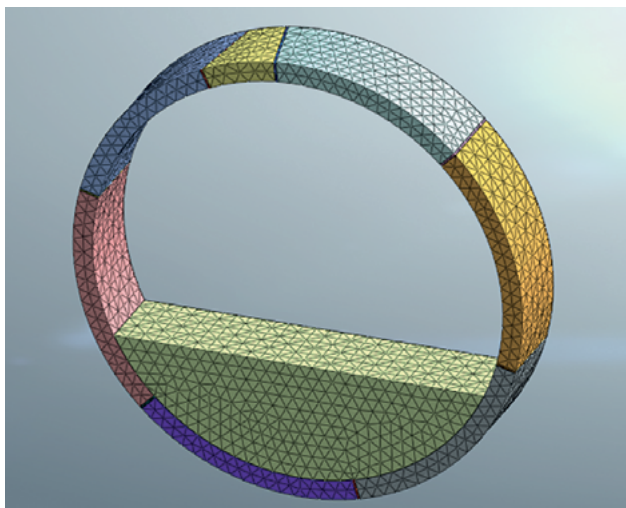


Рис. 9. Расчетная схема со сверхдеформативными прокладками в стыках

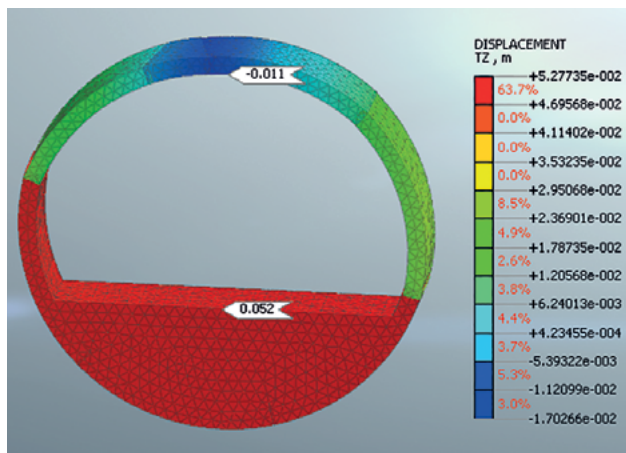


Рис. 10. Расчет № 4: изополя вертикальных деформаций обделки

– деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) в данной задаче составляет 63 мм.

Анализ результатов

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Результаты математического моделирования

Номер расчета	1	2	3	4	Предельные значения
Деформации свода, мм	+42	+32	+23	–11	
Деформации лотка, мм	+45	+45	+46	+52	
Эллиптичность, мм	3	13	23	63	120
Максимальные сжимающие напряжения, МПа	–4,53	–5,26	–3,69	–4,78	–22,0

В качестве прочностного критерия работоспособности тоннеля было принято расчетное сопротивление бетона класса В40 на сжатие в соответствии с СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

По результатам анализа максимальных сжимающих напряжений можно судить о значительном запасе по прочности тоннельной обделки (более чем в 3 раза).

В качестве деформационного критерия работоспособности тоннеля следует принимать такие деформации, после достижения которых нормативная эксплуатация тоннеля будет невозможной. Авторами был предложен следующий критерий: достижение эллиптичности, равной 120 мм, при эксплуатации, поскольку при таком значении плита перекрытия вентканала теоретически сможет приблизиться вплотную к габариту приближения строений. По результатам геодезических наблюдений, выполненных в период с 2018 по 2023 г. в рамках работ по эксплуатационному контролю перегонных тоннелей двухпутного участка Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена [9, 10], максимальная эллиптичность колец, зафиксированная в период эксплуатации, составляет 59 мм.

С точки зрения эксплуатации тоннельных сооружений данное значение указывает на существенный запас конструкции по деформациям. С точки зрения математического моделирования результаты геодезических измерений свидетельствуют о целесообразности моделирования стыков через прокладки сверхдеформативного материала, а не через интерфейсы.

Выводы

В результате исследования было выполнено математическое моделирование сборной обделки из высокоточных блоков.

1. Для рассмотрения случая исправной работы радиальных стыков было выполнено моделирование обделки монолитным кольцом эквивалентной жесткости. Максимальная эллиптичность кольца в этом случае составила 3 мм.

2. Для оценки влияния некачественной сборки колец было выполнено моделирование стыков обделки двумя способами: заданием интерфейсов и упругих прокладок между блоками.

3. По результатам анализа напряженно-деформированного состояния обделки можно судить о значительном запасе как по прочности, так и по деформациям.

4. Наиболее близкие значения к реально зафиксированным значениям эллиптичности оказались в случае моделирования стыков между блоками с помощью упругих прокладок.

Список источников

1. Константинов В. Д. Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра / В. Д. Константинов, А. Л. Новиков, А. А. Сокорнов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — Вып. 3. — С. 609–621. — DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621.

2. Ledyayev A. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo” / A. Ledyayev, V. Kavkazskiy, E. Davidenko // International scientific siberian transport forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. — Cham: Springer, 2022. — Vol. 402. — Pp. 28–37.

3. Vitali O. P. M. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil / O. P. M. Vitali, T. B. Celestino, A. Bobet // Underground Space. — 2022. — Vol. 7. — Iss. 1. — Pp. 1–18. — DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.

4. Shaposhnikov E. A. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms / E. A. Shaposhnikov, Yu. S. Frolov // Russian Journal of Transport Engineering. — 2023. — Vol. 10. —

Iss. 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. — DOI: 10.15862/05SATS123.

5. Mohyla M. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in SuviLahti, Finland / M. Mohyla, E. Hrubesova, B. Martin-kauppi, A. Mäkiranta et al. // Renewable Energy. — 2024. — Vol. 221. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.

6. Wei G. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation / G. Wei, F. Feng, C. Hu, J. Zhu et al. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2023. — Vol. 15. — Iss. 6. — Pp. 1547–1564. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010.

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

8. Konkov A. The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections / A. Konkov, A. Sokornov, K. Korolev // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. — Cham: Springer, 2022. — Vol. 402. — Pp. 568–576. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_62.

9. Технические отчеты «Эксплуатационный контроль перегонных тоннелей двухпутного участка Невско-Васи́леостровской линии Петербургского метрополитена». Этап 1–12 / ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра «Тоннели и метрополитены». — 2018–2021.

10. Технические отчеты «Эксплуатационный контроль перегонных тоннелей двухпутного участка Невско-Васи́леостровской линии Петербургского метрополитена». Этап 1–6 / ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра «Тоннели и метрополитены». — 2022–2023.

Дата поступления: 21.05.2025

Решение о публикации: 10.07.2025

Контактная информация:

ЛЕДЯЕВ Александр Петрович — д-р техн. наук, проф.; ledyaev@pgupstm.ru

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

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доц., anlonkov@pgupstm.ru

A Mathematical Model of a Large-Diameter Tunnel Block Lining

A. P. Ledyayev, A. A. Sokornov, A. N. Konkov

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

For citation: Ledyayev A. P., Sokornov A. A., Konkov A. N. A Mathematical Model of a Large-Diameter Tunnel Block Lining // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 605–615. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615

Summary

Purpose: To evaluate the stress-strain state of a double-track interstation tunnel lining on the Nevsko-Vasileostrovskaya line of St. Petersburg Metro. **Methods:** Mathematical modelling by the finite element method and comparing the results with the field geodetic measurements. **Results:** A model has been created for a monolithic ring lining with the same rigidity. The lining with joints between the blocks has been modelled in two ways by using interfaces and elastic gaskets in the joints. The results of mathematical model and those of field geodetic measurements have been compared. Thus, the most rational model of the block lining joints has been determined. The stress-strain state has been evaluated in terms of safety and deformation margin. **Practical significance:** The results of the study can be used at the design stage of precast reinforced concrete lining structures for large-diameter tunnels, and at the stage of maintenance monitoring to predict changes in the lining stress-strain state.

Keywords: Tunnel, double-track lining, tunnel boring machine, mathematical modelling, finite element method.

References

1. Konstantinov V. D., Novikov A. L., Sokornov A. A. Vydavlivanie zamkovogo bloka pri stroitel'stve transportnykh tonneley bol'shogo diametra [Jacking of the lock block during construction of large-diameter transport tunnels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2024, vol. 21, Iss. 3, pp. 609–621. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621. (In Russian)
2. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo”. *International scientific siberian transport forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham: Springer Publ., 2022, vol. 402, pp. 28–37.
3. Vitali O. P. M., Celestino T. B., Bobet A. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil. *Underground Space*, 2022, vol. 7, Iss. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.
4. Shaposhnikov E. A., Frolov Yu. S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms. *Russian Journal of Transport Engineering*, 2023, vol. 10, Iss. 1. Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123.
5. Mohyla M., Hrubesova E., Martinkauppi B., Mäkiranta A. et al. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvi-lahti, Finland. *Renewable Energy*, 2024, vol. 221. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.
6. Wei G., Feng F., Hu C., Zhu J. et al. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023, vol. 15, Iss. 6, pp. 1547–1564. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010.
7. Kon'kov A. N., Sokornov A. A. Analiz rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya tyubingovykh tunnel'nykh obdelok pri ispol'zovanii privedennykh secheniy [Analysis of the results of mathematical modeling of tubing

tunnel linings using reduced sections]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [III Betancourt International Engineering Forum: proceedings]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 1, pp. 207–209. (In Russian)

8. Konkov A., Sokornov A., Korolev K. 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*. Cham: Springer Publ., 2022, vol. 402, pp. 568–576. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_62.

9. *Tekhnicheskie otchety “Ekspluatatsionnyy kontrol’ peregonnykh tonneley dvukhputnogo uchastka Nevsko-Vasileostrovskoy linii Peterburgskogo metropolitena”. Etap 1–12. FGBOU VO PGUPS, kafedra “Tonneli i metropoliteny”* [Technical reports “Operational inspection of main tunnels of the double-track section of the Nevsko-Vasileostrovskaya line of the St. Petersburg metro”. Stage 1–12. FSBEI HE PGUPS, Department of “Tunnels and Metros”]. 2018–2021. (In Russian)

10. *Tekhnicheskie otchety “Ekspluatatsionnyy kontrol’ peregonnykh tonneley dvukhputnogo uchastka Nevsko-Vasileostrovskoy linii Peterburgskogo metropolitena”. Etap 1–6. FGBOU VO PGUPS, kafedra “Tonneli i metropoliteny”* [Technical reports “Operational inspection of main tunnels of the double-track section of the Nevsko-Vasileostrovskaya line of the St. Petersburg metro”. Stage 1–6. FSBEI HE PGUPS, Department of “Tunnels and Metros”]. 2022–2023. (In Russian)

Received: May 21, 2025

Accepted: July 10, 2025

Author’s information:

Alexandr P. LEDYAEV — PhD in Engineering, Professor;
ledyaev@pgupstm.ru

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer;
scarlunch@mail.ru

Alexandr N. KONKOV — PhD in Engineering, Associate Professor;
ankonkov@pgupstm.ru