

УДК 624.048

## Математическое моделирование односводчатой станции метрополитена в объемной постановке

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

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

**Для цитирования:** Ледяев А. П., Коньков А. Н., Сокорнов А. А. Математическое моделирование односводчатой станции метрополитена в объемной постановке // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 906–915. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-906-915

### Аннотация

**Цель:** Моделирование узла сопряжения участка односводчатой станции с торцевой стеной, эскалаторным и перегонными тоннелями в объемной постановке. **Методы:** Математическое моделирование методом конечных элементов. **Результаты:** В процессе исследования была создана объемная модель, включающая в себя грунтовый массив, обделку станции, опорные тоннели, торцевую стену, обделки перегонных и эскалаторного тоннеля. Установлено, что в зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива и способа расчета характеристик интерфейсных элементов деформации станционной обделки и напряжения в блоках могут отличаться в 1,5–2 раза. Уменьшение коэффициентов жесткости интерфейсных элементов приводит к увеличению деформаций и к снижению напряжений в элементах обделки. Таким образом, расчеты на максимальные деформации и максимальные напряжения целесообразно выполнять параллельно друг другу, используя разные характеристики интерфейсных элементов. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования односводчатых станций с применением сборной блочной обделки.

**Ключевые слова:** Метрополитен, односводчатая станция, математическое моделирование, метод конечных элементов, МКЭ.

### Введение

Оносводчатые станции метрополитена, сооружаемые закрытым способом, начали получать распространение в зарубежном метростроении с начала XX в. Большое количество односводчатых станций построено в Париже, Бостоне, Мадриде, Риме, Вашингтоне, Лиссабоне, Токио и других крупных городах. В 1970 г. на основе разработок, проведенных в ЦНИИСе, а также результатов физического моделирования на кафедре «Тоннели и метрополитены» ЛИИЖТа под руководством доктора технических наук, профессора Ю. А. Лиманова в сотрудничестве со специалистами Ленметростроя и Ленметрогипротранса была обоснована конструкция одно-

сводчатой станции для условий Ленинградского метрополитена. В настоящее время в Петербургском метрополитене эксплуатируется 14 односводчатых станций [1].

С точки зрения статической работы конструкция типового участка односводчатой станции представляет собой свод, опретый на массивные опоры, и замыкающий сечение обратный свод. В первом приближении расчетная схема такой конструкции может включать только верхний свод — криволинейный стержень на шарнирных либо жестких опорах, воспринимающий заданные нагрузки [2, 3].

Более точными и объективными являются модели, рассматривающие всю систему «свод —

опоры — обратный свод — грунтовый массив». Такая задача может быть решена как методом Метрогипротранса [4], заменяя грунтовый массив отдельными упругими опорами, так и методом конечных элементов с более детальным заданием физико-механических характеристик грунта [5, 6]. Современные расчетные комплексы, реализующие метод конечных элементов, позволяют выполнять оценку напряженно-деформированного состояния обделки и вмещающего ее грунтового массива на всех этапах раскрытия выработки [7–9]. Объемная постановка задачи позволяет выполнять прогноз изменения напряженно-деформированного состояния системы «обделка — грунтовый массив» с учетом опережения отдельных участков проходческих работ [10]. Но следует отметить, что все приведенные примеры, а также исследования [11–13] рассматривали именно типовой участок односводчатых станций, в то время как сложный узел сопряжения станционной обделки, торцевой стены, эскалаторного и перегонных тоннелей — исследован не так досконально.

Во многом это объясняется тем, что до недавнего времени расчеты таких сложных систем были ограничены возможностями программных комплексов и мощностями компьютерной техники.

Совершенствование инструментов математического моделирования позволило выполнять расчеты целых станционных комплексов, как например, в работе [14]. Вместе с тем особенность конструкций односводчатых станций Петербургского метрополитена, а именно большое количество шарнирных соединений сборных элементов, приводит к неизбежному усложнению модели. Жесткие соединения конечных элементов не в полной мере будут отражать реальную статическую работу конструкции, где отдельные элементы имеют возможность смещаться относительно других.

Целью настоящего исследования являлось моделирование узла сопряжения участка одно-

сводчатой станции с торцевой стеной, эскалаторным и перегонными тоннелями в объемной постановке.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

- создание объемной модели, включающей в себя грунтовый массив, обделку станции, опорные тоннели, торцевую стену, обделки перегонных и эскалаторного тоннеля;
- анализ напряженно-деформированного состояния станционных конструкций в зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива;
- анализ напряженно-деформированного состояния станционных конструкций в зависимости от способа расчета характеристик интерфейсных элементов в стыках сборных элементов конструкций.

## Материалы и методы

Исследование проводилось на примере односводчатой станции Петербургского метрополитена с островной платформой шириной 11,7 м. Обделка свода станции состоит из 14 обычных и 1 распорного блока; высота блоков — 0,7 м, ширина — 0,5 м. Обделка обратного свода станции состоит из 10 обычных и 1 распорного блока; высота блоков — 0,4 м, ширина — 1,0 м. Опирание блоков свода и обратного свода — шарнирное, через винипластовые прокладки. Размеры поперечного сечения станции  $\sim 25$  м по ширине и  $\sim 13,3$  м по высоте (рис. 1). Свод и обратный свод передают нагрузку от горного давления на монолитные опоры, сооруженные в опорных тоннелях.

Доступ на платформу осуществляется от эскалатора, примыкающего к торцу станции, по двухмаршевой лестнице. Обделка эскалаторного тоннеля сопрягается с монолитным бетонным оголовком и примыкает к торцевой стене станции толщиной 1,0 м.

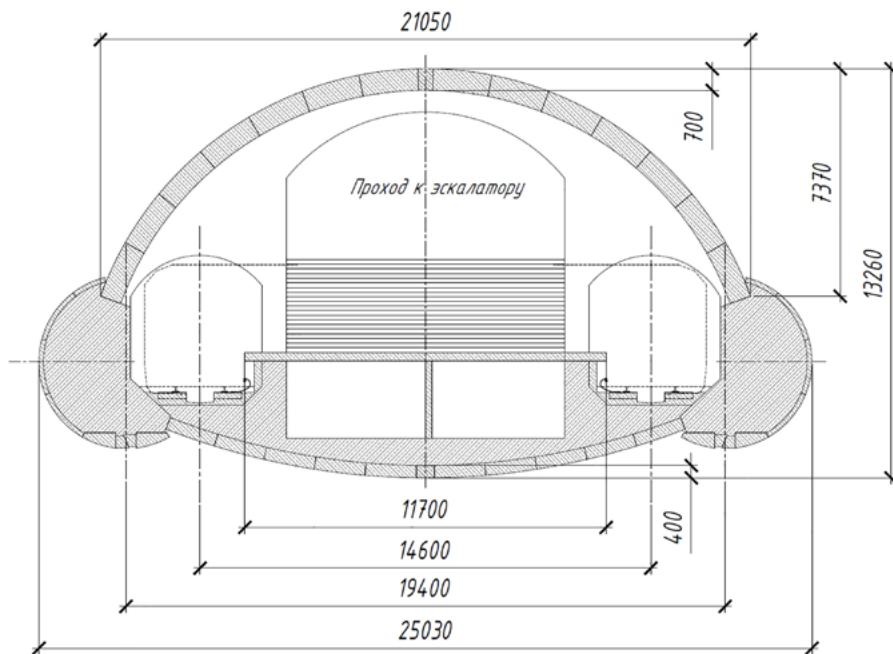


Рис. 1. Поперечное сечение станции

Глубина заложения шелыги свода станции составляет 58 м от дневной поверхности. В геологическом строении рассматриваемой территории принимают участие породы, представленные комплексом четвертичных отложений различного генезиса, залегающие на котлинском горизонте венда верхнекотлинской подсвиты.

Статический расчет тоннеля выполнен в объемной постановке в программном комплексе Midas GTS NX, реализующем метод конечных элементов.

Моделируемая область грунтового массива над шелыгой ограничена высотой 24 м (мощностью протерозойских глин), вес вышележащих слоев грунта моделируется равномерно распределенной нагрузкой, определенной как вес вышележащих грунтов, и был принят равным 680 кПа.

Размеры модели по ширине составляют 80 м, по высоте — 50 м. Длина модели складывается из 10 м станционного участка (включая торцевую стену) и 10 м участка эскалаторного и перегонного тоннелей. Общий вид модели представлен на рис. 2.

Расчеты выполнялись для двух геомеханических моделей грунтового массива — Мора — Кулона и модели упрочняющегося грунта (*Hardening Soil, HS*). В модели *Hardening Soil* возможно учесть пластическую работу грунта, предшествующую его разрушению. Помимо этого, деформирование грунта при нагружении и разгрузке выполняется по разным ветвям (с разными модулями упругости).

Физико-механические свойства конечных элементов приведены в табл. 1.

Обделка станции моделировалась объемными конечными элементами из отдельных блоков. Обделка опорных тоннелей и монолитный бетон опор моделировались едиными телами.

Общий вид станционной обделки показан на рис. 3, а общий вид узла сопряжения строительных конструкций — на рис. 4.

Для учета независимой работы шарнирно опертых блоков встыки между ними были введены линейные интерфейсные элементы, моделирующие работу винилластовых прокладок, — разрывы в сетках конечных элементов,

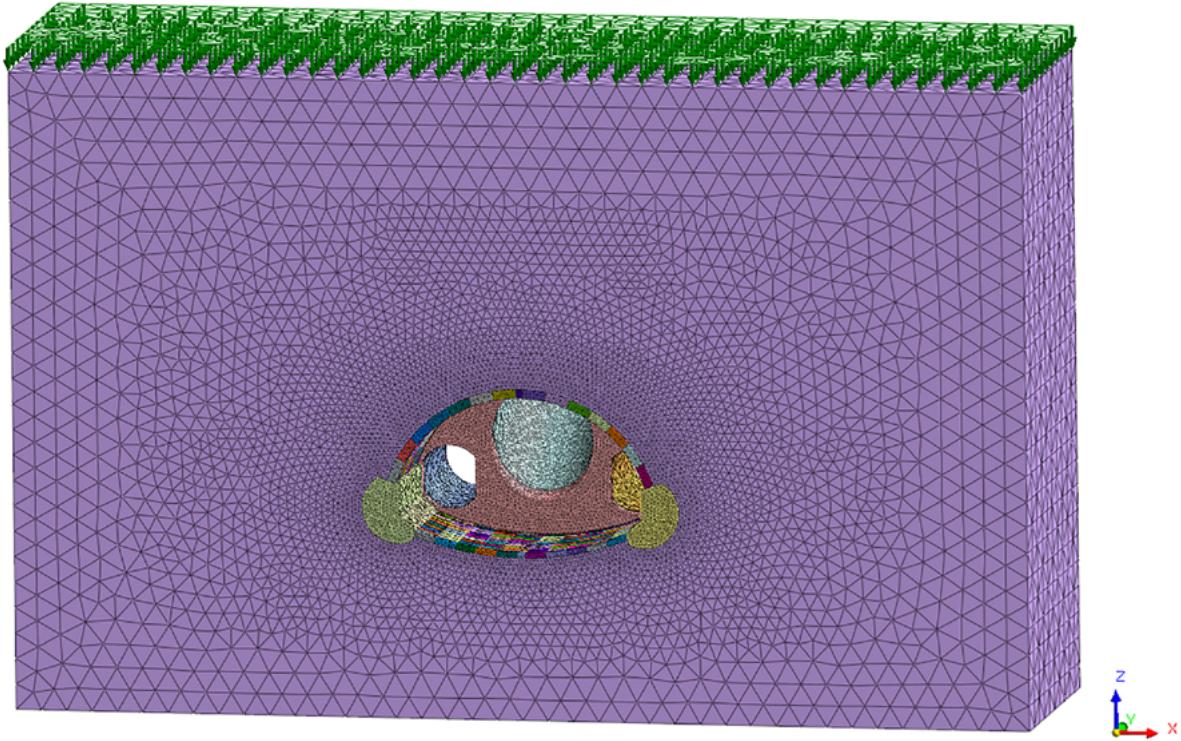


Рис. 2. Общий вид модели

Таблица. 1. Физико-механические характеристики материалов

Характеристика	Грунтовый массив		Обделка станции и опорные тоннели (бетон М400)	Обделка перегонных тоннелей (бетон М600)	Обделка эскалаторного тоннеля (чугун СЧ21-40)
Механическая модель	Мора — Кулона	Hardening Soil	Elastic		
Объемный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	21	21	24,5	24,5	76,5
Модуль упругости $E$ , МПа	—	—	32 500	37 000	110 000
Секущий модуль упругости $E_{50}$ , МПа	200	200	—	—	—
Модуль разгрузки $E_{ur}$ , МПа	—	600	—	—	—
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,23	0,23	0,2	0,2	0,22
Референтное давление $P_{ref}$ , кПа	—	1200	—	—	—
Коэффициент разрушения $R_f$	—	0,9	—	—	—
Степенной показатель жесткости $m$	—	0,5	—	—	—
Угол внутреннего трения $\phi$ , град.	23	23	—	—	—
Сцепление $C$ , кПа	500	500	—	—	—

заполненные виртуальными связями. Работу этих элементов описывают  $K_n$  и  $K_t$  — нормальный и касательный модули жесткости интерфейсного элемента, кПа.

В нашем случае отсутствие связей допускает перемещение блока в стыке по касательной к другому блоку, тем самым принимаем  $K_t = 1$  кН/м<sup>3</sup> (минимальное отличное от нуля значение).

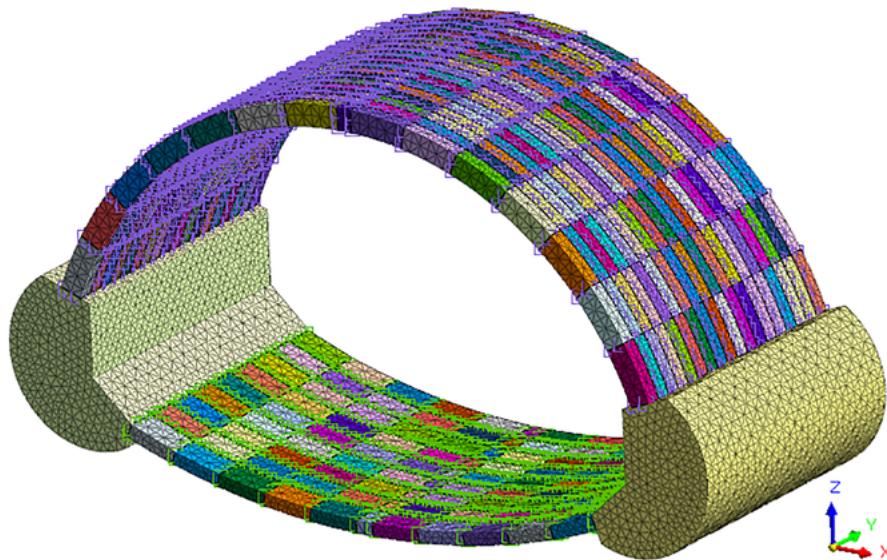


Рис. 3. Общий вид моделируемой станционной обделки (в стыках блоков показаны интерфейсы)

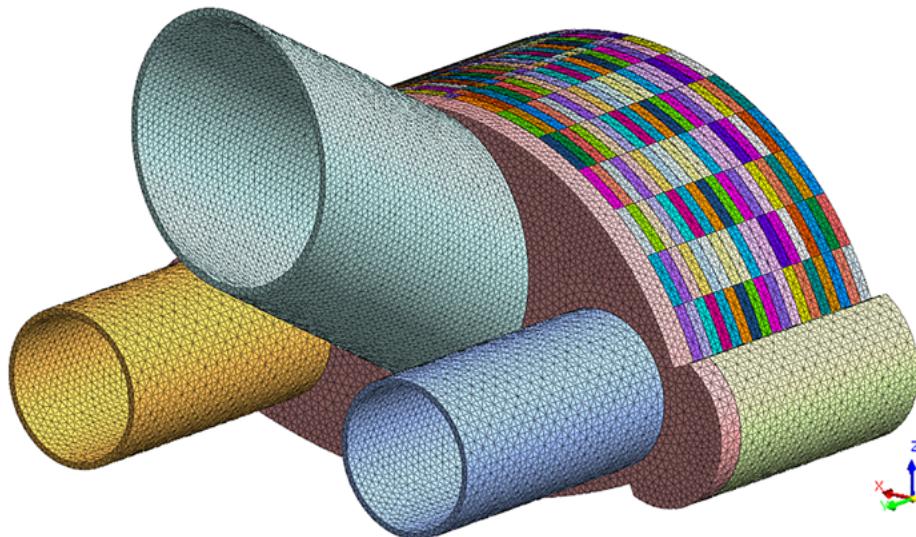


Рис. 4. Общий вид узла сопряжения строительных конструкций

Нормальный модуль жесткости  $K_n$  можно определить двумя способами, как было показано в исследовании [15].

*В первом способе* (в соответствии с рекомендациями программного комплекса) нормальный модуль жесткости определяется через модуль упругости контактирующих элементов и составляет  $\sim 27\,000\text{ MN/m}^3$ .

*Во втором способе* модуль жесткости определяется из предположения разрушения бетона на контакте соприкасающихся поверхностей:

$$K_n = N / (\Delta A),$$

где  $N$  — нормальная сила в стыке, кН;

$\Delta$  — деформация обделки в стыке, м;

$A$  — площадь стыка, м.

В идеальном случае деформация бетона  $\Delta$  является незначительной, поскольку напрямую зависит от модуля деформации бетона и в нашем случае оказывается равной микрометрам. В действительности 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 равным  $\sim 16\,000\text{ МН/м}^3$ .

На первом этапе расчета рассматривался однородный грунтовый массив под нагрузкой от вышележащих грунтов для создания начального поля напряжений. При этом всем конечным элементам присваивались характеристики грунта. По результатам расчета первого этапа все перемещения обнулялись.

На втором этапе расчета моделировалось возведение подземных сооружений. Следует отметить, что конструкции станционного комплекса в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга работают в режиме заданных нагрузок (то есть рассчитаны на восприятие давления от всей толщи вышележащих грунтов), поэтому при математическом моделировании эффекты разгрузки массива при деформировании незакрепленных выработок не учитывались.

## Результаты расчета

По результатам выполненных расчетов определено напряженно-деформированное состояние станционных конструкций и проведена оценка их несущей способности.

По результатам анализа деформаций конструкций (рис. 5) было установлено, что блоки в верхнем и обратном своде обладают шарнирной подвижностью, что вызывает смещения сводов на величину от 20 до 49 мм в зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива и способа расчета характеристик интерфейсных элементов.

В зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива и способа расчета характеристик интерфейсных элементов не только деформации станционной обделки, но и напряжения в блоках могут отличаться в 1,5–2 раза (табл. 2). При этом наблюдаются следующие закономерности:

– применение модели Мора — Кулона приводит к возникновению больших значений дефор-

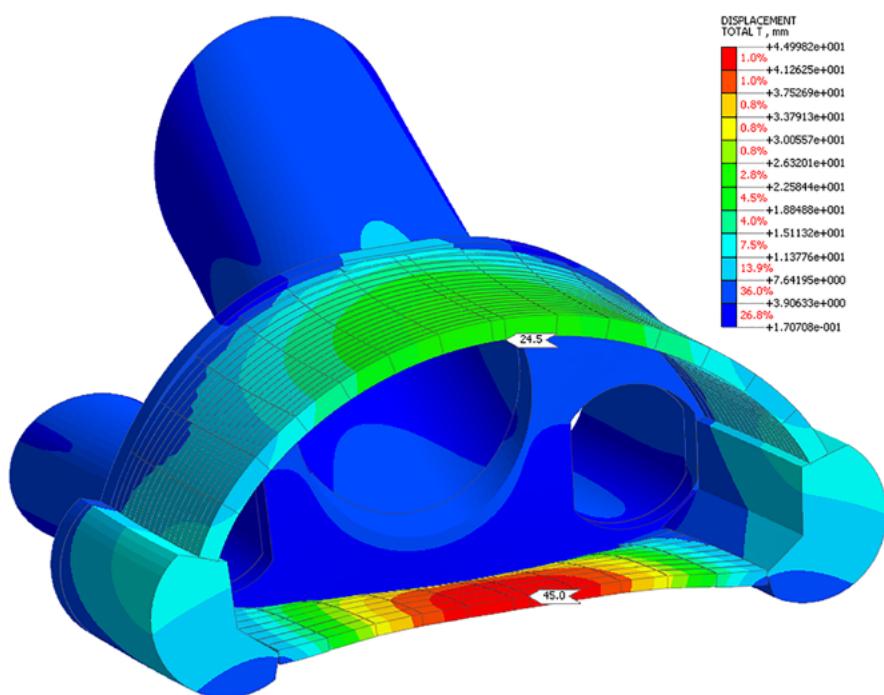


Рис. 5. Вертикальные деформации конструкций (для наглядности увеличены в 50 раз)

Таблица. 2. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния станционной обделки

Геомеханическая модель грунта	Тип интерфейсов			
	Мора — Кулона		Hardening Soil	
	автоматические	настраиваемые	автоматические	настраиваемые
Деформации шельги свода, мм	-24	-31	-19	-24
Деформации обратного свода, мм	45	49	20	21
Вертикальная эллиптичность, мм	69	80	39	45
Максимальные напряжения в блоках свода, МПа	15,6	13,3	13,4	10,7
Максимальные напряжения в блоках обратного свода, МПа	22,8	14,0	16,0	10,4

маций и напряжений по сравнению с моделью Hardening Soil;

– уменьшение коэффициентов жесткости интерфейсных элементов («настраиваемые интерфейсы») приводит к увеличению деформаций и к снижению напряжений в элементах обделки.

## Заключение

В настоящем исследовании выполнен расчет одного ключевого узлового элемента станции с высокой степенью детализации, что позволяет детально проанализировать локальные напряженно-деформированные процессы. Вместе с тем важно подчеркнуть, что целостная оценка надежности и устойчивости сооружения требует комплексного рассмотрения всех конструктивных элементов и их взаимного влияния в рамках полной модели станции метрополитена.

## Выводы

1. Все расчеты выполнены с учетом требований первой и второй групп предельных состояний, что обеспечивает полноту инженерной оценки надежности и долговечности конструкции.

2. Для моделирования грунтов применялись две модели: классическая модель Мора — Кулона и современная модель Hardening Soil, адаптированные к региональным особенностям Санкт-Петербурга.

3. Разброс результатов деформаций и напряжений в пределах 15–20 % обусловлен различи-

ями в физических предпосылках моделей и сложностью инженерно-геологических условий, при этом измерения напряжений учитывали отсутствие концентраций на опорных блоках.

4. Модель Hardening Soil признана более эффективной и универсальной для моделирования грунтовых условий Санкт-Петербурга благодаря учету нелинейного упрочнения, различий при нагружении и разгрузке грунтов, что делает ее более надежным инструментом по сравнению с классической и модифицированной моделью Мора — Кулона.

Выполненное исследование вносит существенный вклад в развитие методического обеспечения расчетов подземных сооружений и помогает закрепить практическую позицию о допуске вариативности в вопросе сходимости альтернативных инженерных расчетов в сложных инженерно-геологических условиях при научно-техническом сопровождении.

## Список источников

1. Кунец Д. В. Обеспечение эксплуатационной надежности конструкций, встроенных в односводчатые станции Петербургского метрополитена: дисс. ... канд. техн. наук: специальность 05.23.11 / Д. В. Кунец. — СПб., 2015. — 164 с.
2. Краев Ю. К. Оптимизация жесткости арки-фермы, применяемой при строительстве станций Екатеринбургского метрополитена / Ю. К. Краев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2009. — № 8. — С. 54–55.

3. Бильченко А. В. Обоснование выбора конструкции односводчатой станции при строительстве метрополитенов методом сквозной проходки / А. В. Бильченко, В. А. Голеско, А. С. Холодцова // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2012. — Т. 3. — С. 355–364.
4. Краев Ю. К. Двухъярусный пересадочный узел в перспективе строительства станции «Театральная» Екатеринбургского метрополитена / Ю. К. Краев, Е. А. Ривкина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2009. — № 2. — С. 63–65.
5. Кунец Д. В. Математическое моделирование деформированного состояния конструкций односводчатых станций метрополитена / Д. В. Кунец // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2009. — № 8. — С. 49–53.
6. Фролов Ю. С. Особенности статической работы обделки и встроенных конструкций односводчатых станций Санкт-Петербургского метрополитена в процессе длительной эксплуатации / Ю. С. Фролов, А. Н. Коньков, Д. В. Кунец // Промышленное и гражданское строительство. — 2011. — № 5. — С. 27–29.
7. Шэнь Ц. Обоснование конструктивно-технологических решений при строительстве односводчатых станций метрополитена в малопрочных скальных грунтах / Ц. Шэнь, Ю. С. Фролов // Подземные горизонты. — 2019. — № 22. — С. 28–32.
8. Шэнь Ц. Решение геомеханических задач при стадийной технологии раскрытия выработок большого пролета в малопрочных скальных грунтах / Ц. Шэнь, Ю. С. Фролов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». — 2019. — № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS319.pdf> (дата обращения: 28.09.2021). — DOI: 10.15862/14SATS319.
9. Фролов Ю. С. Влияние методов поэтапного раскрытия выработки большого пролета на напряженно-деформированное состояние системы «крепь — грунтовый массив» / Ю. С. Фролов, Ц. Шэнь // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 1(48). — С. 73–83.
10. Фролов Ю. С. Прогноз геомеханических процессов при сооружении станции метрополитена в скальных грунтах / Ю. С. Фролов, Ц. Шэнь // Путевой навигатор. — 2020. — № 44(70). — С. 50–59.
11. Yang X. Research on prefabricated metro station structure and key assembly technologies / X. Yang, F. Lin // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2024. — Vol. 153. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106029.
12. Gao D. Failure mechanism of deep-buried and large cross-section subway station tunnel: Geo-mechanical model test and numerical investigation / D. Gao, Y. Shen, P. Zhou, A. Gou et al. // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2025. — Vol. 155, Part 1. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106148.
13. Haixiang L. Support mechanical response analysis and surrounding rock pressure calculation method for a shallow buried super large section tunnel in weak surrounding rock / L. Haixiang, W. Xiuying, T. Zhongsheng, Z. Jinpeng et al. // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. — DOI: 10.1038/s41598-024-64522-6.
14. Sehnalova P. Metro Station Pankrac — Modelling and Analysis in Midas GTS NX / P. Sehnalova, M. Urbankova. — URL: <https://resource.midasuser.com/en/blog/geotech/metro-station-pankrac#complicated> (дата обращения: 28.09.2021).
15. Ледяев А. П. Математическое моделирование блочной обделки тоннеля большого диаметра / А. П. Ледяев, А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 605–615. — DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615.

Дата поступления: 27.09.2025

Решение о публикации: 17.10.2025

#### Контактная информация:

ЛЕДЯЕВ Александр Петрович — д-р техн. наук, проф.; [ledyaev@pgupstm.ru](mailto:ledyaev@pgupstm.ru)  
СОКОРНОВ Антон Александрович — ст. преподаватель; [scarlunch@mail.ru](mailto:scarlunch@mail.ru)  
КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доц.; [anlonkov@pgupstm.ru](mailto:anlonkov@pgupstm.ru)

## Three-Dimensional Mathematical Model of a Single-Vault Metro Station

**A. P. Ledyaev, A. N. Konkov, A. A. Sokornov**

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

**For citation:** Ledyaev A. P., Konkov A. N., Sokornov A. A. Three-Dimensional Mathematical Model of a Single-Vault Metro Station // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 906–915. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-906-915

### Summary

**Purpose:** To model the junction of a single-vault station segment with a diaphragm wall, escalator and interstation tunnels using a three-dimensional framework. **Methods:** Mathematical modelling by the finite element method. **Results:** A comprehensive three-dimensional model has been created, incorporating the ground massive, station lining, support tunnels, and a diaphragm wall, as well as the linings of the interstation and escalator tunnels. The analysis has revealed that the deformations of the station lining and the stresses in the blocks vary by a factor of 1.5 to 2, depending upon the geomechanical model of the ground massive utilised and the approach taken to calculate the characteristics of the interface elements. Notably, a reduction in the stiffness coefficients of the interface elements results in increased deformations and a decrease in the stresses within the lining elements. Therefore, it is recommended to conduct calculations for maximum deformations and maximum stresses concurrently, applying various characteristics of the interface elements. **Practical significance:** The findings of the study can be applied during the design phase of single-vault stations with prefabricated block lining.

**Keywords:** Metro, single-vault station, mathematical modelling, finite elements method, FEM.

### References

1. Kunets D. V. *Obespechenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti konstruktsiy, vstroennykh v odnosvodchatye stantsii Peterburgskogo metropolitena*: diss. ... kand. tekhn. nauk: spetsial'nost' 05.23.11 [Ensuring operational reliability of structures integrated into single-arch stations of the St. Petersburg Metro: diss. ... Cand. Tech. Sci., specialty 05.23.11]. St. Petersburg, 2015, 164 p. (In Russian)
2. Kraev Yu. K. Optimizatsiya zhestkosti arki fermy, primenyaemoy pri stroitel'stve stantsiy Ekaterinburgskogo metropolitena [Optimization of truss arch stiffness used in the construction of Yekaterinburg Metro stations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2009, Iss. 8, pp. 54–55. (In Russian)
3. Bil'chenko A. V., Golesko V. A., Kholodtsova A. S. Obosnovanie vybora konstruktsii odnosvodchatoy stantsii pri stroitel'stve metropolitenov metodom skvoznoy prokhod-ki [Justification of the choice of single-arch station design in metro construction using the through tunneling method]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and Research in the Transport Complex]. 2012, vol. 3, pp. 355–364. (In Russian)
4. Kraev Yu. K., Rivkina E. A. Dvukh'yarusnyy pere-sadochnyy uzel v perspektive stroitel'stva stantsii "Teatral'naya" Ekaterinburgskogo metropolitena [Two-level transfer hub in the perspective of constructing the "Teatralnaya" station of the Yekaterinburg Metro]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2009, Iss. 2, pp. 63–65. (In Russian)
5. Kunets D. V. Matematicheskoe modelirovaniye deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy odnosvod-chatykh stantsiy metropolitena [Mathematical modeling of the deformed state of structures of single-arch metro stations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhur-*

- nal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2009, Iss. 8, pp. 49–53. (In Russian)
6. Frolov Yu. S., Kon'kov A. N., Kunets D. V. Osobennosti staticheskoy raboty obdelki i vstroennykh konstruktsiy odnosvodchatykh stantsiy Sankt-Peterburgskogo metropolitena v protsesse dlitel'noy ekspluatatsii [Features of the static operation of lining and integrated structures of single-arch stations of the St. Petersburg Metro during long-term operation]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2011, Iss. 5, pp. 27–29. (In Russian)
7. Shen' Ts., Frolov Yu. S. Obosnovanie konstruktivno-tehnologicheskikh resheniy pri stroitel'stve odnosvodchatykh stantsiy metropolitena v maloprochnykh skal'nykh gruntakh [Justification of structural and technological solutions in the construction of single-arch metro stations in low-strength rock soils]. *Podzemnye gorizonty* [Underground Horizons]. 2019, Iss. 22, pp. 28–32. (In Russian)
8. Shen' Ts., Frolov Yu. S. Reshenie geomekhanicheskikh zadach pri stadiynoy tekhnologii raskrytiya vyrabotok bol'shogo proleta v maloprochnykh skal'nykh gruntakh [Solving geomechanical problems in staged technology of opening large-span excavations in low-strength rock soils]. *Internet-zhurnal “Transportnye sooruzheniya”* [Online Journal “Transport Structures”]. 2019, Iss. 3. Available at: <https://t-s.today/PDF/14SATS319.pdf> (accessed: September 28, 2021). DOI: 10.15862/14SATS319. (In Russian)
9. Frolov Yu. S., Shen' Ts. Vliyanie metodov poetapnogo raskrytiya vyrabotki bol'shogo proleta na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy “krep” — gruntovyy massiv” [Influence of staged opening methods of large-span excavations on the stress-strain state of the “support — rock mass” system]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2019, Iss. 1(48), pp. 73–83. (In Russian)
10. Frolov Yu. S., Shen' Ts. Prognoz geomekhanicheskikh protsessov pri sooruzhenii stantsiy metropolitena v skal'nykh gruntakh [Forecast of geomechanical processes in the construction of metro stations in rock soils]. *Putevoy navigator* [Track Navigator]. 2020, Iss. 44(70), pp. 50–59. (In Russian)
11. Yang X., Lin F. Research on prefabricated metro station structure and key assembly technologies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, vol. 153. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106029.
12. Gao D., Shen Y., Zhou P., Gou A. et al. Failure mechanism of deep-buried and large cross section subway station tunnel: Geo-mechanical model test and numerical investigation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025, vol. 155, part 1. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106148.
13. Haixiang L., Xiuying W., Zhongsheng T., Jinpeng Z. et al. Support mechanical response analysis and surrounding rock pressure calculation method for a shallow buried super large section tunnel in weak surrounding rock. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14. DOI: 10.1038/s41598-024-64522-6.
14. Sehnalova P., Urbankova M. Metro Station Pankrac — Modelling and Analysis in Midas GTS NX. Available at: <https://resource.midasuser.com/en/blog/geotech/metro-station-pankrac#complicated> (accessed: September 28, 2021).
15. Ledyayev A. P., Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Matematicheskoe modelirovaniye blochnoy obdelki tonnelya bol'shogo diametra [Mathematical modeling of block lining of a large-diameter tunnel]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS, 2025, vol. 22, Iss. 3, pp. 605–615. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615. (In Russian)

Received: September 27, 2025

Accepted: October 17, 2025

#### Author's information:

Alexandr P. LEDYAEV — Dr. Sci in Engineering,

Professor; [ledyaev@pgupstm.ru](mailto:ledyaev@pgupstm.ru)

Alexandr N. KONKOV — PhD in Engineering,

Associate Professor; [ankonkov@pgupstm.ru](mailto:ankonkov@pgupstm.ru)

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer;

[scarlunch@mail.ru](mailto:scarlunch@mail.ru)