

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.191.814.4
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_89

Определение усилий обделок транспортных тоннелей на заданные нагрузки по гипотезе общих деформаций методами численного моделирования

Анатолий Олегович Кузнецов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, kuzemon91@mail.ru

Аннотация. Определение усилий в обделках транспортных тоннелей – одна из ключевых задач проектировщиков. Существует несколько методов решения этой задачи, в статье рассмотрены следующие: метод строительной механики, аналитические методы механики сплошной среды и методы численного моделирования. Эти методы прописаны в действующих нормативных документах и применяются проектировщиками для расчета обделок транспортных тоннелей.

Автор предлагает смешанный метод, который объединяет элементы методов строительной механики и механики сплошной среды. Этот подход позволяет получать эпюры внутренних усилий, аналогичные рассчитанным методом строительной механики и совпадающие с ними как качественно, так и количественно. Особенность смешанного метода заключается в использовании данных из обоих подходов. Для связи обоих методов коэффициент упругого отпора грунта пересчитывается в модуль деформации грунта, который, в отличие от первого, можно определить лабораторным путем. Проверка смешанного метода проводилась на двух тоннельных обделках – кругового и подковообразного очертаний. Результаты сравнивались с данными, полученными методом строительной механики и методом механики сплошной среды с помощью численного метода конечных элементов в программном комплексе Midas GTS NX. В статье приведено качественное и количественное сравнение результатов трех методов расчета.

В заключение предложены рекомендации по использованию смешанного метода в проектировании транспортных тоннелей. Этот подход можно применять как альтернативу для проверки результатов, полученных методом строительной механики, на заданные нагрузки. Например, смешанный метод будет полезен при научно-техническом сопровождении проектной документации как альтернативный метод расчета.

Ключевые слова: статический расчет тоннеля, коэффициент упругого отпора, деформационные характеристики грунта, строительная механика, метод конечных элементов

Для цитирования: Кузнецов А. О. Определение усилий обделок транспортных тоннелей на заданные нагрузки по гипотезе общих деформаций методами численного моделирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 89–96. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_89.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Determining the forces in the lining of transport tunnel for given loads under the general deformation hypothesis using numerical modeling methods

Anatoly O. Kuznetsov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, kuzemon91@mail.ru

Abstract. Determining the forces in the lining of transport tunnels is one of the key tasks for designers. There are several methods for solving this problem, and the article discusses three of them: the method of structural mechanics, analytical methods of continuum mechanics, and numerical modeling methods. These methods are prescribed in the current regulatory documents and are used by designers to calculate the lining of transport tunnels.

The author suggests a mixed method that combines elements of structural mechanics and continuum mechanics methods. This approach makes it possible to obtain internal force plots similar to the method of structural mechanics, both qualitatively and quantitatively. The special feature of the mixed method is the use of data from both approaches. In order to link both methods, the coefficient of elastic resistance of the soil is recalculated into the modulus of deformation of the soil, which, unlike the first one, can be determined in the laboratory. The mixed method was tested on two tunnel linings – circular and horseshoe-shaped. The results were compared with the data obtained by the method of structural mechanics and the method of continuum mechanics using the numerical finite element method in the Midas GTS NX software package.

The article provides a qualitative and quantitative comparison of the results of the three calculation methods. In conclusion, recommendations on the use of the mixed method in the design of transport tunnels are proposed. This approach can be used as an alternative to test the results of the structural mechanics method for specified loads. For example, the mixed method will be useful in scientific and technical support of project documentation as an alternative calculation method.

Keywords: static analysis tunnel, modulus of subgrade reaction, deformation parameters, analysis of structures, finite-element method

For citation: Kuznetsov A. O. Determining the forces in the lining of transport tunnel for given loads under the general deformation hypothesis using numerical modeling methods. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):89–96. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_89.

Введение

В соответствии с требованиями нормативных документов [1–3] расчет обделок транспортных тоннелей возможно производить по трем методам (рис. 1): 1) методами строительной механики на заданные нагрузки; 2) аналитическими методами механики сплошной среды; 3) методами численного моделирования.

По первому методу конструкция обделки представляет собой изогнутую балку (чаще – с целью упрощения – ломаную линию) переменной жесткости на упругом основании, классическая интерпретация метода расчета изложена в достаточном количестве учебной и научной литературы [4–7]. Следует отметить, что в этом методе грунт на контакте с конструкцией работает по гипотезе Фусса – Винклера, т. е. по гипотезе местных деформаций.

К достоинствам первого метода следует отнести возможность ручного расчета обделки методами строительной механики, в частности методом сил или методом перемещений.

К недостаткам данного метода расчета из-за использования гипотезы местных деформаций следует отнести применение коэффициента пропорциональности k , именуемого

коэффициентом упругого отпора грунта [1–2]. Данный коэффициент возможно получить:

– экспериментальным путем (однако отсутствует стандарт на определение данной характеристики);

– используя справочные значения, приведенные в нормативных документах (табл. 5.13 [1], табл. 5.8 [2]);

– используя формулу Галеркина, связывающую коэффициент упругого отпора и деформационные характеристики грунтового массива [8–10].

Во втором методе рассматривают поле напряженно-деформированного состояния грунтового массива с отверстием в нем и решают контактную задачу. В этом методе грунт на контакте с конструкцией работает в соответствии с гипотезой общих деформаций.

К достоинствам второго метода следует отнести реальную картину напряженно-деформированного состояния системы «грунтовой массив – обделка», так как описание грунтового массива производится известными деформационными характеристиками, в частности модулем деформации и коэффициентом относительной поперечной деформации, получаемым изыскателями лабораторным путем

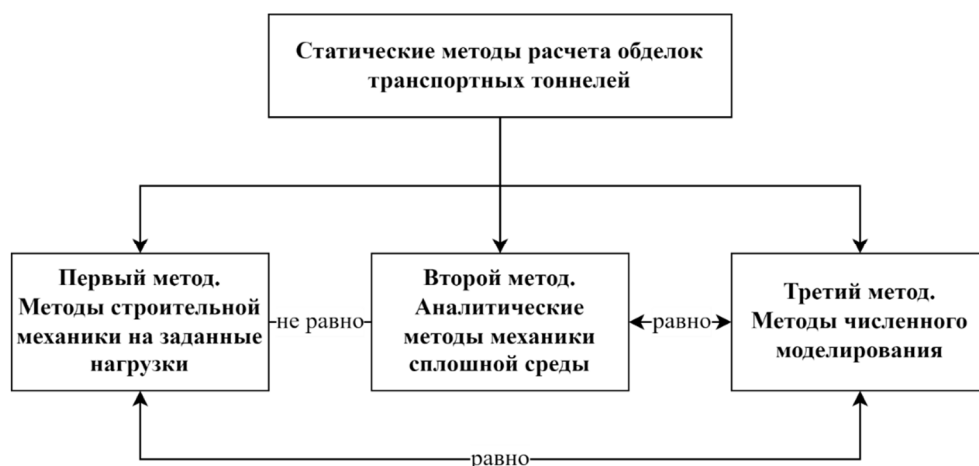


Рис. 1. Методы расчета тоннельных обделок, указанные в нормативных документах

(существуют стандарты на определение данных характеристик [11, 12]).

Недостатками второго метода расчета являются:

- высокий порог входа расчетчика (понимание аналитических методов механики сплошной среды);
- отсутствие учета разгрузки (технологических особенностей разработки выработки) грунтового массива до возведения обделки;
- неопределенности в учете контакта взаимодействия грунтового массива и несущей конструкции.

Третий метод, в частности одну из его разновидностей – метод конечных элементов (МКЭ), можно назвать инструментом для реализации решения задач первого или второго метода.

Третий метод нивелирует достоинства и недостатки первого и второго методов расчета. И позволяет исключить недостаток второго метода проведением научно-технического сопровождения строительства объекта в сочетании с геотехническим мониторингом и сопоставлением графиков равновесных состояний с результатами расчета тоннеля, например β -методом [13]. Следует еще раз отметить, что МКЭ не является отдельным, самостоятельным методом расчета, это инструмент, позволяющий в более оперативном режиме (относительно ручного и аналитического расчетов) принимать инженерно-технические решения.

В Сибирском государственном университете путей сообщения на кафедре «Геотехника, тоннели и метрополитены» на протяжении более 10 лет автором статьи на практических занятиях в курсах «Механика подземных сооружений» и «Математическое моделирование систем и процессов» приводится решение задачи о расчете обделок транспортных тоннелей на заданные нагрузки по гипотезе общих деформаций методами численного моделирования, включающее в себя компоненты всех трех методов, с сопоставлением результатов решения по первому и второму методам. Данный метод получил название *смешанного*, так как не относится ни к первому методу, ни ко второму, а является связывающим эти методы звеном (рис. 2).

Третий метод используется в качестве инструмента для решения задач, в частности МКЭ в программном комплексе Midas GTS NX. Следует отметить, что подобное решение можно реализовать в любом конечно-элементном комплексе, включающем в себя одно- и двумерные конечные элементы. Это сравнение позволило не только ответить на вопрос, почему усилия, рассчитанные методом Метрогипротранса (например, в программе РК-6 – первый метод), не отличаются от усилий, полученных МКЭ (например, в Midas GTS NX – первый метод), но и научить студентов получать такие же усилия в конструкциях обделок альтернативными методами, в частности методом конечных элементов.



Рис. 2. Смешанный метод расчета тоннельных обделок

Суть смешанного метода проста: геометрические характеристики, материал конструкции обделки, нагрузки берут из первого метода, а граничные условия, материал грунта, контакт взаимодействия – из второго (см. рис. 2). С целью недопущения влияния дополнительного вертикального давления от веса грунта предлагается моделировать грунт невесомой средой. Контакт обделка – грунтовый массив моделируют с нулевым (или приближенным к нулю) трением, как и в первом методе расчета.

К достоинствам смешанного метода можно отнести возможность определять усилия обделок транспортных сооружений на основании инженерно-геологических характеристик грунтового массива (модуля деформации и коэффициента относительной поперечной деформации), полученных экспериментальным путем, в условиях гипотезы общих деформаций.

Недостатком смешанного подхода является невозможность качественно оценить состояние грунтового массива возле выработки в силу отсутствия начального поля напряженного-деформированного состояния грунтового массива (невесомая среда).

Метод исследования

При проектировании обделок транспортных тоннелей ключевыми параметрами для расчета являются значения внутренних усилий. Ниже приведено сравнение значений экстремальных внутренних усилий в обделках транспортных тоннелей, смоделированных первым, вторым и смешанным методами. В качестве иллюстрации в статье приводится решение для двух обделок

(кругового и подковообразного очертаний). Для вычисления усилий применялся МКЭ, который реализован в программном комплексе Midas GTS NX 2024 v.1.1.

Исходные данные для двух задач приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Расчетные модели всех трех методов, смоделированных в Midas GTS NX 2024 v.1.1, приведены на рис. 4–6. Размеры граничных условий для каждой расчетной модели подобраны так, чтобы минимизировать влияние краевых эффектов (граничных условий) на результаты расчета. Далее в статье приводятся рисунки расчетных схем, моделей и результатов только для обделки подковообразного очертания, так как моделирование обделки кругового очертания имеет схожий характер.

Результаты исследования

Результаты расчета, в частности эпюра изгибающих моментов и продольных сил и их экстремальные значения, приведены на рис. 7, 8 и в табл. 2.

Как видно из табл. 2 и рис. 7, 8, значения, полученные первым и смешанным методами, имеют более схожие значения. Относительная погрешность экстремальных значений эпюр между этими методами может достигать 10 %. Это связано с тем, что при моделировании грунта плоскими конечными элементами мы получаем приближенное решение, близкое к аналитическому.

Относительная погрешность между первым и вторым методом достигает 325 %, что доказывает их неравенство.

Таблица 1

Исходные данные для расчета обделок

Очертание обделки	Класс бетона обделки по прочности	Гипотеза обрушения грунта	Параметр			
			Высота свода обрушения, м	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коэффициент относительной поперечной деформации	Коэффициент упругого отпора грунта, кН/м ³
Круговое	B40	Свод обрушения, оказывающий только вертикальное давление	2,5	20	0,3	200 000
Подковообразное	B30					
						695 500
						1 020 000

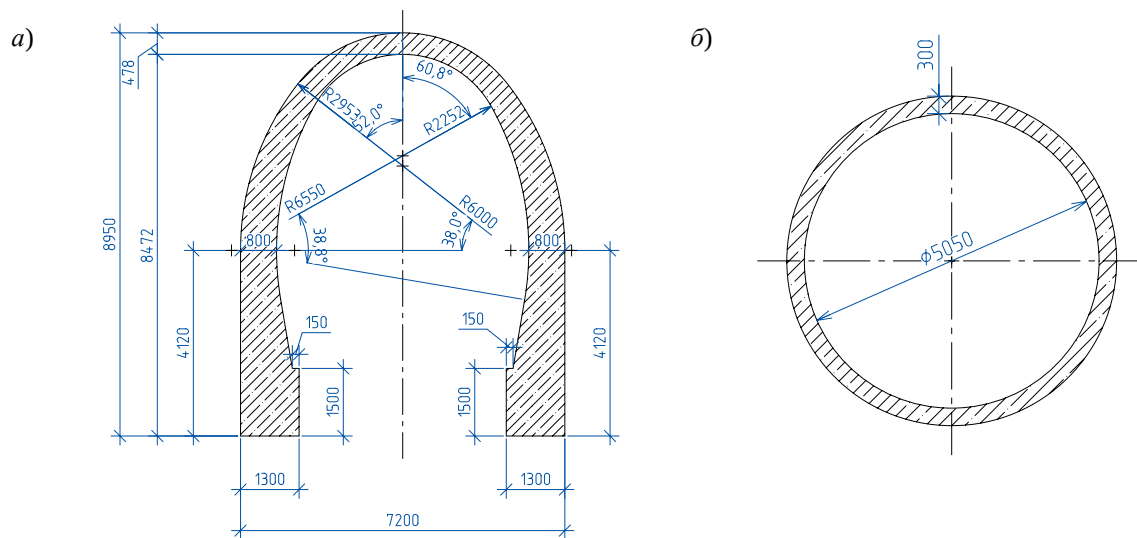


Рис. 3. Геометрические размеры поперечного сечения обделки тоннеля:
 а – подковообразного очертания; б – кругового очертания

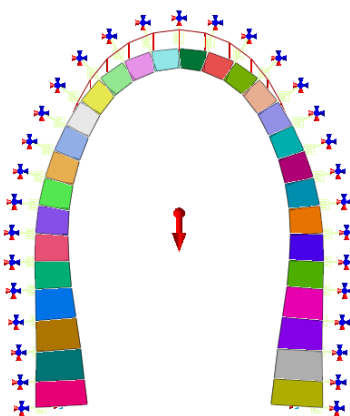


Рис. 4. Расчетная модель обделки тоннеля подковообразного очертания, созданная первым методом

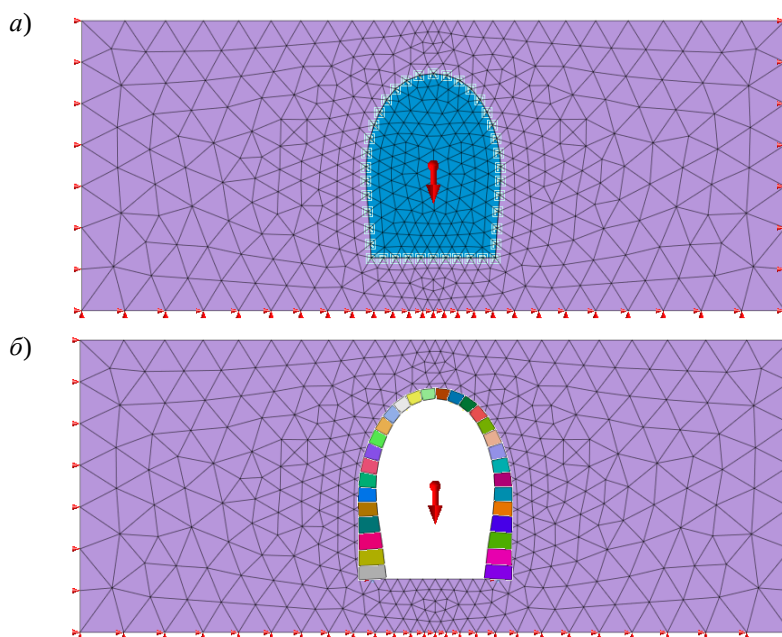


Рис. 5. Расчетная модель обделки тоннеля подковообразного очертания, созданная вторым методом:
 а – стадия моделирования поля начально-напряженно-деформированного состояния грунта;
 б – стадия моделирования экскавации выработки и мгновенного монтажа обделки тоннеля

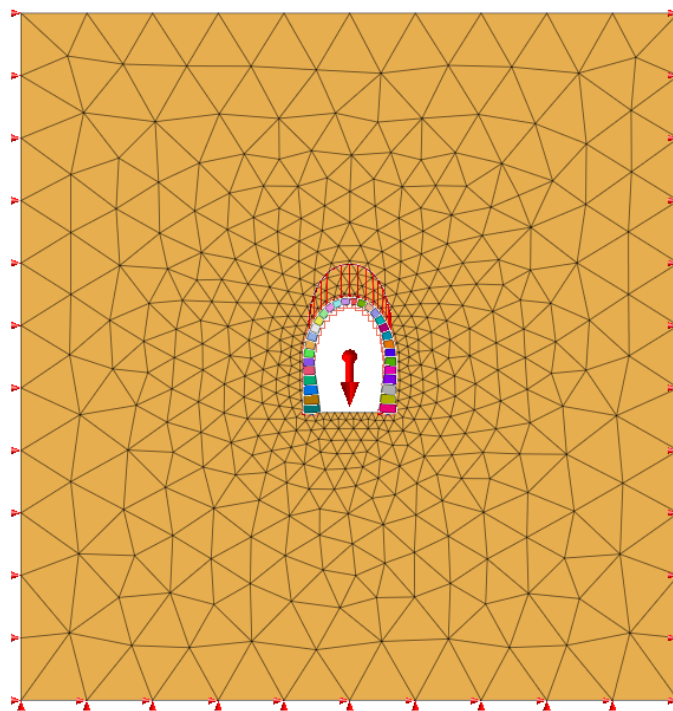
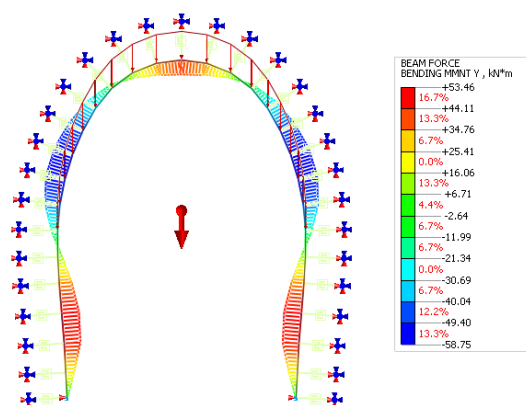
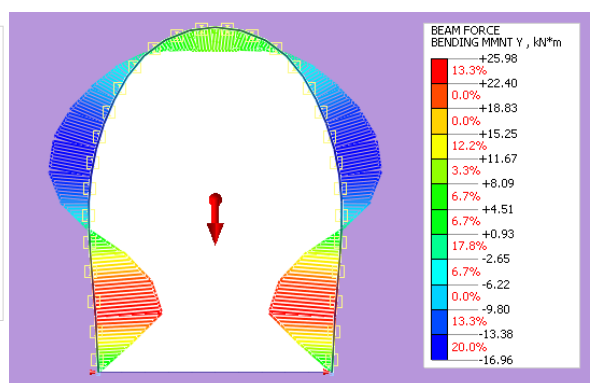


Рис. 6. Расчетная модель обделки тоннеля подковообразного очертания, созданная смешанным методом

а)



б)



в)

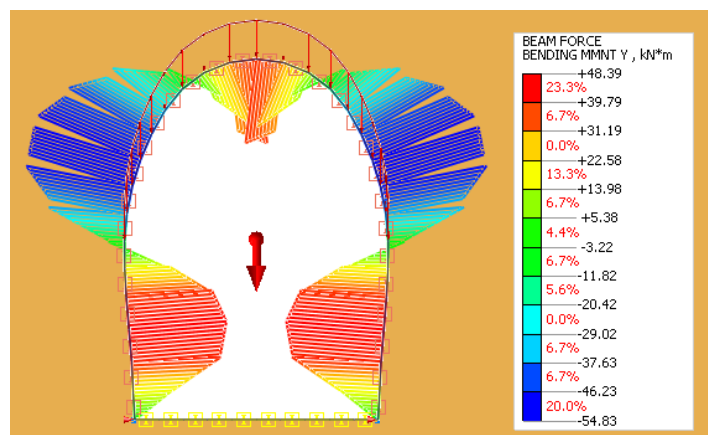


Рис. 7. Эпюры изгибающих моментов в обделке тоннеля подковообразного очертания, полученная по первому (а), второму (б), смешанному (в) методам

Экстремальные усилия в обделке в зависимости от метода расчета и сечения выработки

Выработка	Метод	Усилие в обделке			
		max N , кН	min N , кН	max M , кН·м	min M , кН·м
Круговое очертание	Первый	–81,60	–196,50	25,47	–20,94
	Второй	–90,70	–128,24	7,51	–7,00
	Смешанный	–84,20	–184,33	23,35	–19,75
Подковообразное очертание	Первый	–63,10	–358,10	53,46	–58,76
	Второй	–14,82	–198,68	25,98	–16,96
	Смешанный	–65,77	–355,80	48,39	–54,83

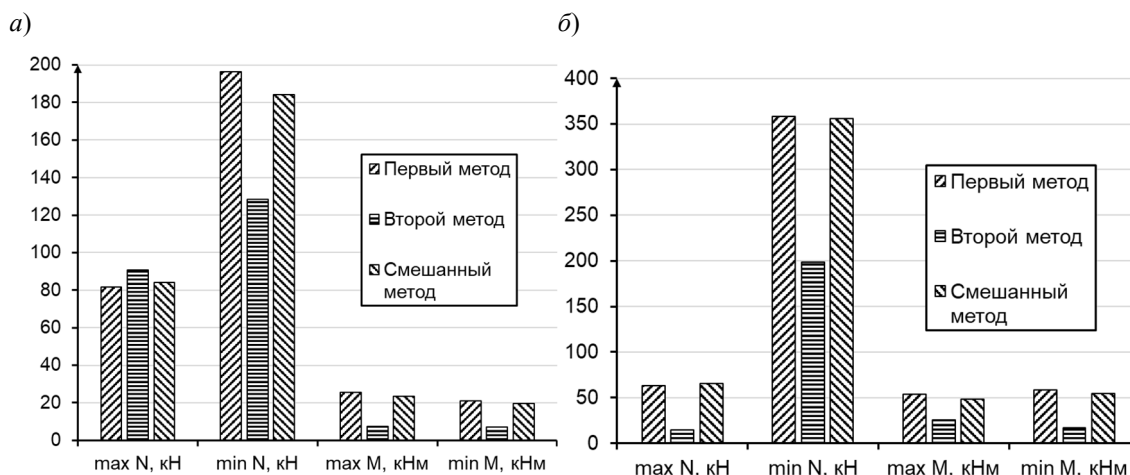


Рис. 8. Абсолютные значения усилий в обделке тоннеля, вычисленные первым, вторым и смешанным методами:

a – обделка кругового очертания; *б* – обделка подковообразного очертания

Выводы

Анализ результатов исследования показывает, что первый метод является консервативным при расчете обделок транспортных тоннелей.

Смешанный метод может служить альтернативой для подтверждения результатов первого метода, особенно при научно-техническом сопровождении проектной документации.

Список источников

- СП 120.13330.2022. Метрополитены : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 декабря 2022 г. № 1131/пр : введены в действие с 28 января 2023 г. Москва : Минстрой России, 2022. 302 с.
- СП 122.13330.2023. Тоннели железнодорожные и автодорожные : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 20 октября 2023 г. № 760/пр : введены в действие с 21 ноября 2023 г. Москва : Минстрой России, 2023. 101 с.
- СП 248.1325800.2023. Сооружения подземные. Правила проектирования : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 января 2024 г. № 2/пр : введены в действие с 10 февраля 2024 г. Москва : Российский институт стандартизации, 2024. 63 с.
- Архангельский М. М., Джинчарадзе Д. И., Курисько А. С. Расчет тоннельных обделок. Москва : Трансжелдориздат, 1960. 344 с.
- Даушвили А. П. Расчет тоннельных обделок в матричной форме. Москва : Транспорт, 1972. 120 с.
- Компаниец С. А., Поправко А. К., Богородецкий А. А. Проектирование тоннелей. Москва : Транспорт, 1973. 320 с.
- Орлов С. А. Методы статического расчета сборных железобетонных обделок тоннелей. Москва : Госстройиздат, 1961. 136 с.
- Каган А. А. Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов. Назначение, методы определения. Ленинград : Стройиздат, 1973. 144 с.
- Казанов Л. Е., Кузнецов А. О. Границы применимости формулы Б. Г. Галеркина для определения удельного коэффициента упругого отпора при расчете подземных сооружений методами строительной механики // Интеллектуальный потенциал Сибири : 30-я Региональная научная студенческая конференция : материалы конференции : в 4 частях, Новосибирск, 23–27 мая 2022 г. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2022. Ч. 3. С. 279–282.

10. Мишанов А. А. Об определении коэффициента удельного упругого отпора в задачах геотехнического проектирования // Наука и молодежь XXI века : материалы регионального форума, Новосибирск, 18–28 ноября 2024 г. : в 2 частях. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2025. С. 20–25.
11. ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2020 г. № 823-ст с 1 июня 2021 г. Москва : Стандартиформ, 2020. 27 с.
12. ГОСТ 12248.4–2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2020 г. № 824-ст с 1 июня 2021 г. Москва : Стандартиформ, 2020. 15 с.
13. Carranza-Torres C., Fairhurst C. Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2000. Vol. 15, No. 2. P. 187–213.

References

1. SP 120.13330.2022. Subways. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 27.12. 2022 No. 1131/pr: introduced on 28.01.2023. Moscow: The Ministry of Construction of Russia; 2022. 302 p. (In Russ.).
2. SP 122.13330.2023. Railways and highway tunnels. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 20.10. 2023 No. 760/pr: introduced from 21.11.2023. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2023. 101 p. (In Russ.).
3. SP 248.1325800.2023. Underground structures. Design principles. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 09.01. 2024 No. 2/pr: introduced on 10.02. 2024. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2024. 63 p. (In Russ.).
4. Arkhangelsky M. M., Jincharadze D. I., Kurisko A. S. Calculation of tunnel lining. Moscow: Transzheldorizdat; 1960. 344 p. (In Russ.).
5. Daushvili A. P. Calculation of tunnel lining in matrix form. Moscow: Transport; 1972. 120 p. (In Russ.).
6. Companiets S. A., Amendment A. K., Bogorodetsky A. A. Tunnel design. Moscow: Transport; 1973. 320 p. (In Russ.).
7. Orlov S. A. Methods of static calculation of precast reinforced concrete lining tunnels. Moscow: Gosstroyizdat; 1961. 136 p. (In Russ.).
8. Kagan A. A. Calculated indicators of physical and mechanical properties of soils. Purpose, methods of determination. Leningrad: Stroyizdat; 1973. 144 p. (In Russ.).
9. Kazanov L. E., Kuznetsov A. O. The limits of applicability of B.G. Galerkin's formula for determining the specific coefficient of elastic resistance in the calculation of underground structures by methods of structural mechanics. *Intellectual Potential of Siberia. The 30th Regional Scientific Student Conference. Proceedings: in 4 parts. Novosibirsk, May 23–27, 2022. Part 3.* Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2022. P. 279–282. (In Russ.).
10. Mishanov A. A. On determining the coefficient of specific elastic resistance in the tasks of geotechnical design. *Science and Youth of the 21 century. Proceedings of the Regional Forum. In 2 parts, Novosibirsk, November 18–28, 2024.* Novosibirsk: Siberian Transport University; 2025. P. 20–25. (In Russ.).
11. GOST 12248.3–2020. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing. Introduced by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated October 14.10.2020 No. 823-st from 01.06. 2021. Moscow: Standartinform; 2020. 27 p. (In Russ.).
12. GOST 12248.4–2020. Soils. Determination of deformation parameters by compression testing. Introduced by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 14.10. 2020 No. 824-st from June 1, 2021. Moscow: Standartinform; 2020. 15 p. (In Russ.).
13. Carranza-Torres C., Fairhurst C. Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2000;15(2):187–213.

Информация об авторе

А. О. Кузнецов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

A. O. Kuznetsov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 05.12.2025; принята к публикации 12.01.2026.

The article was submitted 22.10.2025; approved after reviewing 05.12.2025; accepted for publication 12.01.2026.