

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ И КОНСТРУКЦИОННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ

М.А. Карасев¹, Тай Тиен Нгуен², М.А. Маринченко¹

¹ Санкт-Петербургский Горный университет имени императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: mikhailmarincenko@gmail.com

² Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам

Аннотация: Представлен подход к расчету напряженно-деформированного состояния сборных обделок тоннелей с учетом физической и конструкционной нелинейностей. Рассмотрены три типа конструкций сборных обделок, применяемых в Санкт-Петербургском метрополитене: железобетонная тубинговая обделка диаметром 9,8 м, чугунная тубинговая обделка диаметром 5,5 м и железобетонная блочная обделка 5-БНЛ-2 диаметром 5,62 м. На основе метода конечных элементов выполнено численное моделирование напряженного состояния сегментов обделки, учитывающее контактное взаимодействие между ними. При выполнении расчетов приняты нелинейные модели деформирования строительных материалов: модель пластического деформирования серого чугуна и упругопластическая модель деформирования бетона с накоплением повреждений. Получены зависимости изменения достигнутой величины изгибающего момента от угла раскрытия стыка и графики поворотной жесткости при различных уровнях осевой нагрузки. Установлено, что влияние осевой нагрузки на поворотную жесткость стыков существенно различается для разных типов обделок: от 15% для чугунной обделки до трехкратного увеличения для железобетонной тубинговой обделки. Выявлена асимметрия поведения стыков при положительных и отрицательных углах раскрытия, обусловленная конфигурацией болтовых соединений. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации конструктивных решений сборных обделок транспортных тоннелей.

Ключевые слова: сборная обделка, взаимодействие, напряжение, нелинейность, жесткость, тоннель, контактная модель.

Для цитирования: Карасев М. А., Тай Тиен Нгуен, Маринченко М. А. Расчет напряженно-деформированного состояния обделок тоннелей с учетом физической и конструкционной нелинейностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 53–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_53.

Stress-strain assessment of tunnel lining with regard to physical and structural nonlinearity

M.A. Karasev¹, Tay Tien Nguyen, M.A. Marinchenko¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: mikhailmarincenko@gmail.com

² Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

Abstract: The article describes an approach to stress-strain assessment of precast tunnel lining with regard to physical and structural nonlinearity. The analysis involved three types of precast lining used in the Saint-Petersburg Metro: reinforced concrete segmental lining with a diameter of 9.8 m, cast-iron segmental lining with a diameter of 5.5 m and reinforced concrete block lining 5-BNL-2 with a diameter of 5.62 m. Using the finite element method, numerical stress-strain modeling of the lining segments was performed with regard to the contact interaction between them. The calculation involved nonlinear models of deformation of structural materials: model of plastic deformation of gray cast iron and elastoplastic model of deformation of concrete with accumulation of defects. The dependences of the achieved value of a bending moment on the included angle and the graphic charts of a rotational stiffness and axial loads are obtained. It is found that the influence of the axial load on the rotational stiffness greatly differs in different types of lining: from 15% in the cast-iron lining to a three-time increase in the reinforced concrete lining. The asymmetry is revealed in the behavior of joints at the positive and negative included angles, conditioned by a configuration of bolting. The research findings can be used for optimizing structural designs of precast lining for transportation tunnels.

Key words: precast lining, interaction, stress, nonlinearity, stiffness, tunnel, contact model.

For citation: Karasev M. A., Tay Tien Nguyen, Marinchenko M. A. Stress-strain assessment of tunnel lining with regard to physical and structural nonlinearity. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):53-70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_53.

Введение

Современные методы расчета обделок тоннелей совершенствуются в направлении повышения точности моделирования взаимодействия конструкции с окружающим массивом и учета нелинейных эффектов при деформировании строительных материалов в контактных зонах [1]. Перспективным направлением для выполнения ресурсоемких параметрических исследований НДС также становится использование суррогатных моделей машинного обучения, позволяющих существенно ускорить процесс вычислений по сравнению с прямым методом конечных элементов [2, 3].

В данном обзоре анализируются ключевые подходы, представленные в научной литературе по тематике публикации. Фундаментальные основы расчета напряженно-деформированного состояния обделок сформулированы при выводе аналитических решений [4, 5]. Поэтому в этом обсуждении мы сосредоточимся на аналитических решениях, получен-

ных с помощью дискретно-континуальных моделей. Многие аналитические решения основаны на некоторых упрощениях и допущениях, в результате чего получается дискретно-континуальная модель [6]. Аналитические решения для моделей сплошных сред имеют богатую историю [7, 8]. Шмид был одним из первых, кто предложил решения по расчету обделок тоннелей [9]. Впоследствии несколько исследователей представили аналитические решения для поиска изгибающих моментов и нормальных сил в обделке тоннелей [10, 11].

При работе с монолитными бетонными обделками тоннелей кругового очертания расчет деформаций и напряжений определяется при ее представлении как сплошного кольца, однако в тоннелях, которые закреплены сборной обделкой, влияние стыков оказывает существенное влияние на ее НДС. Работа сборных обделок достаточно хорошо изучена, и установлено, что стыки существенно влияют на ее общее поведение [12, 13].

Один из первых подходов к учету влияния шарниров в стыках сегментов, который до сих пор широко используется, был разработан Мьюром Вудом в 1975 г. [14]. Этот метод учитывает снижение жесткости в зависимости от количества шарниров и их геометрии [15]. Эти исследования позволили получить ценные сведения о работе таких систем при различных условиях нагружения [16].

Вопросом контактного взаимодействия между сегментами, а именно поведением стыков сборной обделки [17], занимались многие исследователи. Помимо экспериментов, осуществляемыми перечисленными учеными, другие исследователи проводили испытания с болтами и без них, и было показано, что болтовые связи не оказывают значительного влияния на зависимость между моментом и поворотом сегментов относительно друг друга, то есть мало влияют на жесткость стыка сегментов [2].

Множество исследований по данной тематике проводились для изучения контактного взаимодействия между сегментами разного типа. Изучалось определение максимальных перемещений кольца сборной обделки [7]. А. Вербут определил действующую осевую нагрузку в железнодорожном тоннеле Ботлек, что в дальнейшем легло в основу полномасштабной модели, в итоге были построены диаграммы жесткости стыков сегментов. Эти исследования характеризуют принципиальные признаки поведения стыков сборной обделки. Также другой группой ученых было проведено детальное исследование чугунной обделки Ø4 м. Новизной этого исследования являлось приложение нагрузки не через давление от домкратов, как в предыдущих исследованиях, а через давление на грунт, окружающий экспериментальное кольцо. Используя численное моделирование, российские ученые провели работу по расчету контактного взаимо-

действия чугунной обделки Ø9,5 м транспортного тоннеля с учетом затяжки болтовых связей и влияния их на общую жесткость системы [18].

Результаты оценки контактного взаимодействия, полученного по различным методикам, позволили рассмотреть [19]: формирование фактических нагрузок на физическую модель; контактное взаимодействие на моделях с использованием численного моделирования [20]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что проведение исследований о влиянии условий контактного взаимодействия между сегментами сборной обделки на ее напряженное состояние является актуальной задачей для строительства конструкций тоннелей [9, 18].

В то же время необходимо отметить, что представленные выше подходы и методы расчета обделок не могут без должной адаптации быть использованы для расчета произвольной конструкции сборных обделок и следует определять коэффициенты передачи усилий от одного сегмента обделки другому для каждой из рассматриваемых конструкций кольца сборной обделки. В настоящей работе предложен подход к расчету напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля и изучению характера взаимодействия между отдельными сегментами кольца обделки на основании применения численных методов анализа [21]. Рассмотрены три варианта конструкции сборных обделок — сборная блочная со связями растяжения, сборная блочная без связей растяжения и тубинговая обделка. На основании выполненных исследований получена картина формирования напряжений в обделке, а также изучена особенность передачи усилий между сегментами [22].

Постановка задачи исследования

Обделка тоннеля состоит из нескольких основных элементов, которые опре-

деляют характер формирования ее напряженно-деформированного состояния. К ним можно отнести геометрические размеры и форму сегментов сборной обделки, форму контактирующих поверхностей между отдельными сегментами обделки и их размеры, наличие связей растяжения и их конструкцию. Необходимо отметить, что такие важные факторы, как геомеханические условия строительства тоннелей, особенности технологии строительства тоннеля, качество заполнения заобделочные пространства тампонажным раствором и ряд других факторов, также существенно влияют на напряженное состояние обделки, но в настоящей работе в явном виде не рассматриваются [23].

С расчетной точки зрения обделка тоннеля представляет собой набор сегментов, представленных стержневыми элементами, оболочками или твердотельными элементами, связанными между

собой через определенные контактные условия. При этом при идеализации сегментов обделки в виде стержневых элементов и оболочек контактные условия представляются односторонними или двухсторонними уравнениями связи, тогда как при формировании твердотельных объектов взаимодействие между ними обычно реализуется через контактные модели. Болтовые связи при этом в стержневых моделях задаются через усредненную жесткость вращения одного сегмента относительно другого, в то время как для оболочек и твердотельных объектов допустимо такие связи реализовывать в более общем виде [24].

Так как целью настоящей работы является изучение влияния условий взаимодействия между отдельными сегментами сборных обделок, то принято, что решение задачи будет выполняться с применением численного метода анали-

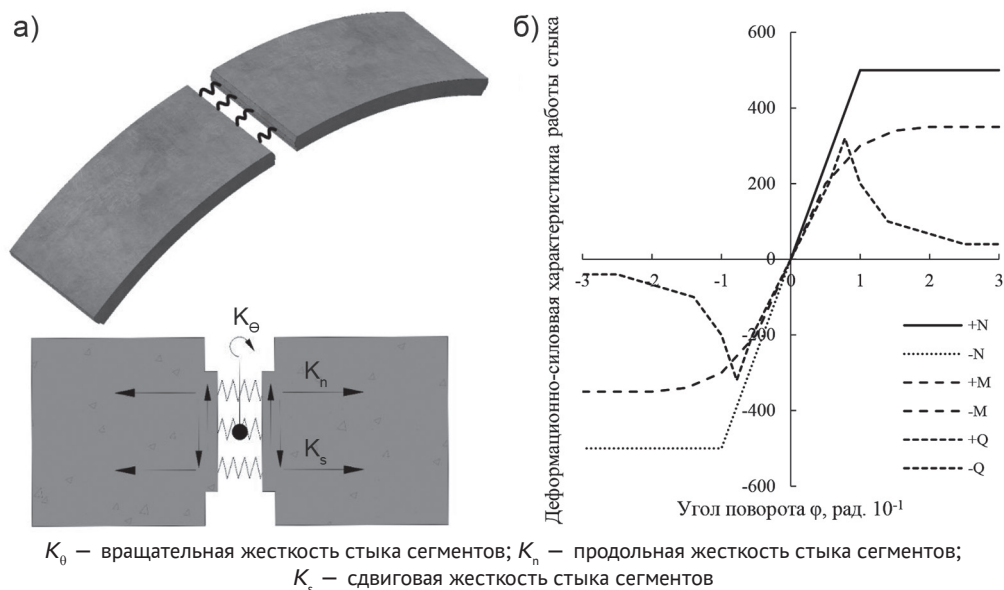


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема сборной обделки при идеализации ее сегментов в виде твердотельных элементов конечных размеров (а) и механизм деформирования стыка сегментов обделки (б) [составлено авторами]

Fig. 1. Schematic calculation diagram of a prefabricated lining with its segments idealised as rigid elements of finite dimensions (a) and the mechanism of deformation of the lining segment joint (b) [compiled by authors]

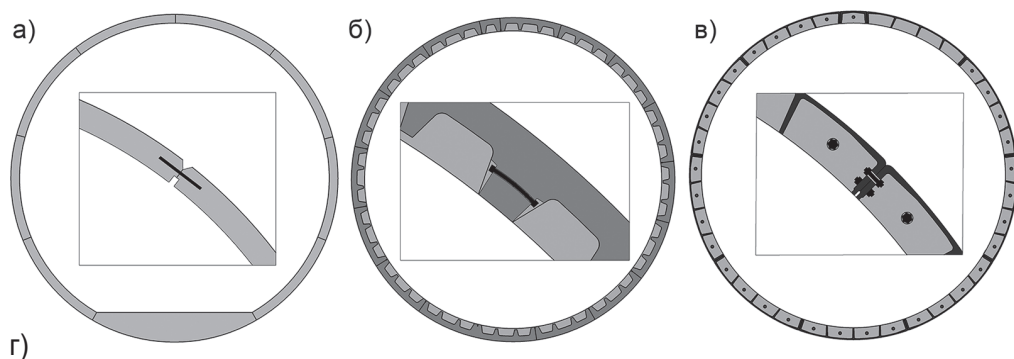
за (метод конечных элементов), а сама задача будет рассматриваться в пространственной постановке [25]. Основное внимание при построении конечно-элементных моделей будет уделяться форме торцевых участков обделки, а также параметрам болтовых связей. Все элементы обделки связаны друг с другом через контактные модели, которые позволяют формировать и разрывать контакт между отдельными участками поверхности конечных элементов в процессе расчета [26]. Принципиальная схема расчета напряженно-деформированного состояния сегментов обделки представлена на рис. 1.

Построение расчетных конечно-элементных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния обделок тоннелей

В настоящем исследовании в качестве конструкций сборных обделок приняты к рассмотрению типовые конструкции для условий строительства Санкт-Петербургского метрополитена (рис. 2): железобетонная тюбинговая обделка Ø9,8 м; чугунная тюбинговая обделка Ø5,5 м; железобетонная блочная обделка, разжимаемая на породу, 5-БНЛ-2 Ø5,62 м. Железобетонная сборная обделка Ø9,8 м включает 16 нормальных тюбингов и 1 ключевой; ключевой тюбинг устанавливается со смещением от центральной оси тоннеля по часовой или против часовой стрелки перевязки в шахматном порядке. Внешний диаметр собранного кольца составляет 9,8 м, внутренний 9,0 м [27]. Кольцо обделки из чугунных тюбингов Ø5,5 м состоит из 9 нормальных тюбингов и 1 ключевого; ключевой тюбинг устанавливается со смещением от центральной оси тоннеля по часовой или против часовой стрелки перевязкой в шахматном порядке. Внешний диаметр собранного кольца составляет

5,5 м, внутренний 5,1 м. Сборная железобетонная обделка 5-БНЛ-2 состоит из 8 нормальных блоков, двух лотковых, четырех клиньев, вкладыша и прокладки. Внешний диаметр собранного кольца составляет 5,63 м, внутренний 5,33 м. Взаимодействие между сегментами сборной обделки в значительной степени определяется формой контактирующих поверхностей смежных сегментов, величиной контактных напряжений, а также дополнительными элементами (болтовые связи, шпильки и т.д.), формируемыми сопротивлением перемещению поверхностей обделок относительно друг друга. В обделке Ø5,62 м из блоков 5-БНЛ-2 болтовые связи отсутствуют, и формирование начального контакта между сегментами создается за счет разжатия обделки на породу. В сборных железобетонной и чугунной тюбинговых обделках существенно влияние должны оказывать болтовые связи. При подготовке численных моделей расчета НДС для обделок из железобетонных и чугунных тюбингов приняты болты М24, класс по прочности 10.8 [28]. Общий вид сегментных колец, стыков и геометрических характеристик сечений продемонстрирован на рис. 2.

При выполнении численных расчетов для обделок, сделанных из железобетона, принят бетон класса по прочности В45. При рассмотрении чугунной обделки принят чугун СЧ-35. В качестве модели деформирования чугуна принята упругопластическая модель деформирования Cast iron plasticity. Модель позволяет учесть различные пределы текучести при растяжении и сжатии [18]. При действии растягивающих усилий предел текучести зависит от максимального главного напряжения, а при сжатии — от интенсивности нормальных напряжений. При выполнении расчета НДС железобетонных обделок в качестве модели деформирования бетона



Наименование сборной обделки	Геометрические параметры тубинга					Инерционные характеристики сечения тубинга		
	d , м	b_p , м	δ_r , м	a_p , м	h_p , м	A , см ²	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴
5-БНЛ-2	5,63	1,0	0,15	—	—	1500	125 000	28 125
9,8 — Ж/Б	9,8	0,75	0,06	0,065	0,4	892	730 990	133 120
5,5 — СЧ-20	5,5	1,0	0,03	0,04	0,2	504	563 620	17 281

d , м — диаметр по оси обделки (наружный или по центрам тубингов); b_p , м — ширина тубинга вдоль оси тоннеля (длина кольца тубингов); δ_r , м — толщина стенки тубинга (толщина спинки или основной панели); a_p , м — ширина поперечного ребра тубинга (если есть, обычно для ребристых тубингов); h_p , м — высота поперечного ребра тубинга (от спинки до верхней кромки ребра); A , см² — площадь поперечного сечения одного тубинга; I_x , см⁴ — осевой момент инерции поперечного сечения по горизонтальной оси; I_y , см⁴ — осевой момент инерции поперечного сечения по вертикальной оси

Рис. 2. Конструкции сборных обделок, принятых для оценки влияния условий передачи усилий между сегментами обделки на их напряженно-деформированное состояние: железобетонная блочная обделка, разжимаемая на породе, 5-БНЛ-2 Ø5,62 м (а); железобетонная тубинговая обделка Ø9,8 м (б); чугунная тубинговая обделка Ø5,5 м (в); геометрические характеристики сечения (г) [составлено авторами]

Fig. 2. Precast lining structures used to assess the effect of force transfer conditions between lining segments on their stress-strain state: reinforced concrete block lining, expanded onto rock 5-BNL-2 Ø5.62 m (a); reinforced concrete tubing lining Ø9.8 m (b); cast iron tubing lining Ø5.5 m (v); geometric characteristics of the cross-section (g) [compiled by authors]

принята модель Concrete damaged plasticity [29], которая позволяет воспроизводить нелинейное поведение бетона при растяжении и сжатии, более точно, чем консервативнее нелинейные модели деформирования бетона [30]. Механические характеристики материалов boltовых связей (табл. 1) задавались по обобщенной расчетной диаграмме работы стали [28], с учетом предельных усилий boltовой связи в работе стыка. Во всех обделках, кроме 5-БНЛ-2, при выполнении расчета НДС обделки учитывалось влияние высокопрочных boltов. Характеристики материалов для фи-

зического моделирования приведены в табл. 1.

Для анализа НДС сборных обделок подготовлены два варианта их представления в рамках численного моделирования [31, 32]. При подготовке численных моделей по первому варианту кривизна обделки не учитывается (рис. 3); обделка представлена прямолинейной конструкцией, при этом условия контактного взаимодействия для различных конструкций обделок полностью воспроизводятся на таких моделях.

Данный подход соответствует стендовым испытаниям, выполненным Янссе-

Таблица 1

Сводная информация о параметрах модели поведения чугунных тубингов, бетонных тубингов, болтов [составлено авторами]

Summary information about the parameters of the behavior model of cast iron tubings, the behavior of concrete tubings, and the behavior of bolts [compiled by authors]

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение
Cast iron plasticity (чугунные тубинги)			
E	Модуль упругости, МПа	МПа	130 000
ν	Коэффициент Пуассона	—	0,25
ν_{pl}	Пластический коэффициент Пуассона	—	0,06
σ_{yc}	Предел текучести: сжатие, МПа	МПа	710
ε_{plc}	Пластическая деформация: сжатие	—	0,05
σ_{yt}	Предел текучести: растяжение, МПа	МПа	250
ε_{plt}	Пластическая деформация: растяжение	—	0,015
Concrete damaged plasticity (железобетонные тубинги)			
E	Модуль упругости, МПа	МПа	37 000
ν	Коэффициент Пуассона	—	0,2
ψ	Угол дилатации, градусы	градусы	35
e (ε)	Эксцентриситет поверхности потенциала	—	0,1
f_{b0}/f_{c0}	Отношение напряжений σ_{b0}/σ_{c0}	—	1,16
K_c	Отношение инвариантов K_c	—	0,667
μ	Параметр вязкости, с	секунда	0,0001
σ_c	Напряжение сжатия, МПа	МПа	45
ε_{cin}	Неупругая деформация дробления	—	0,003645
σ_t	Напряжение растяжения, МПа	МПа	4,5
ε_{tcr}	Деформация трещинообразования	—	0,00132
$\check{u}_{tcr}$	Перемещение трещины, мм		Зависит от размера КЭ
G_f	Энергия трещинообразования, Н/мм	Н/мм	0,15
d_c	Переменная сжимающего повреждения	—	0—1,0
w_t	Коэффициент восстановления жесткости растяжения	—	0
d_t	Переменная растягивающего повреждения	—	0—1,0
w_c	Коэффициент восстановления жесткости сжатия	—	0
Plasticity steel (болтовые соединения)			
E	Модуль упругости, МПа	МПа	210 000
ν	Коэффициент Пуассона	—	0,3
R_y	Предел текучести, МПа	МПа	880
R_m	Предел прочности, МПа	МПа	1080
ε_t	Относительное удлинение	—	0,09

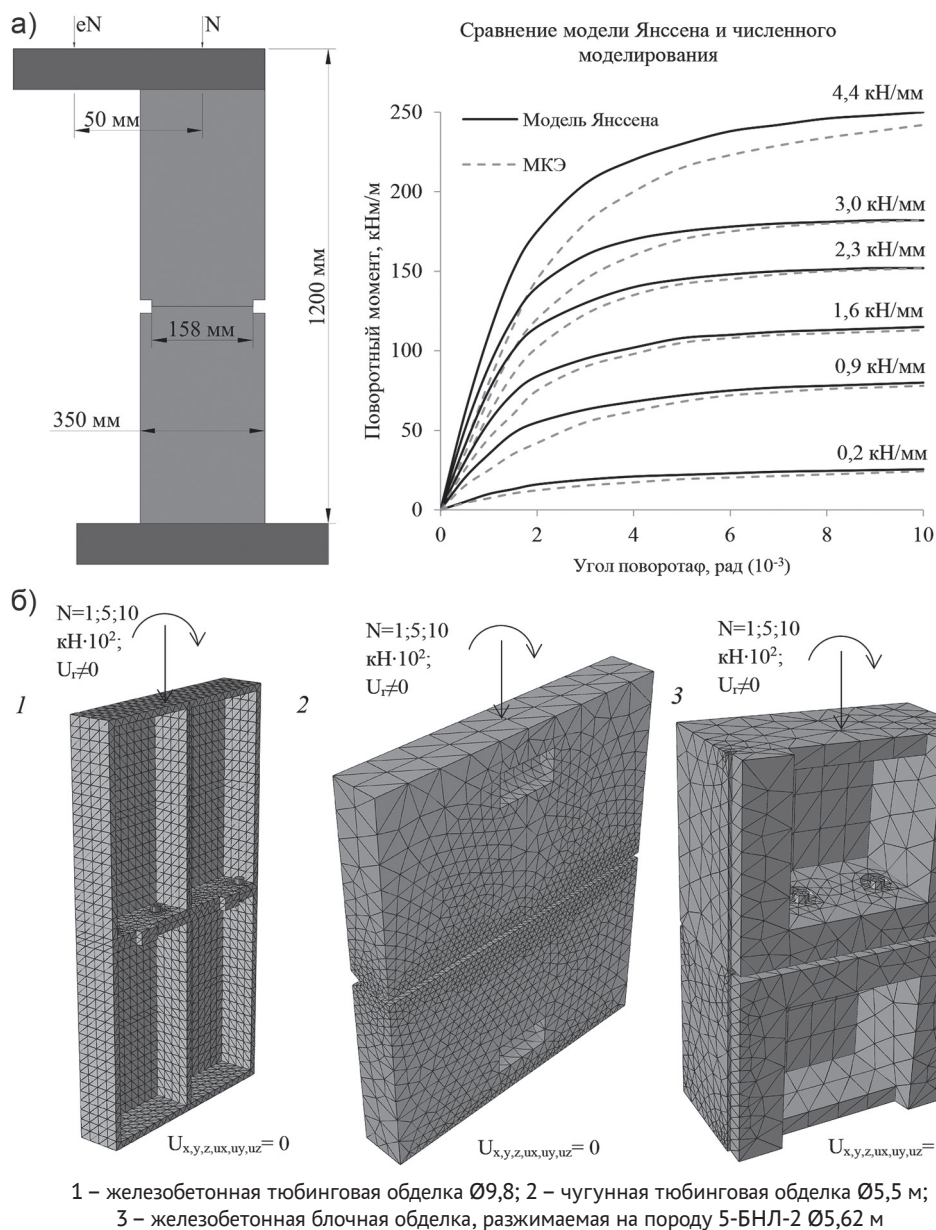


Рис. 3. Схема проведения стендового эксперимента (а) и конечноэлементные модели прогноза НДС сборной обделки при первом варианте ее представления (б) [составлено авторами]

Fig. 3. Diagram of the bench experiment (a) and finite element models for predicting the stress-strain behaviour of the precast lining in the first version of its representation (b) [compiled by authors]

ном, где он на масштабных физических моделях изучал особенности передачи усилий от одного сегмента к другому. Это позволило верифицировать предло-

женный авторами подход к построению численных моделей прогноза НДС сборных обделок на основании сравнения расчетных результатов с данными стен-

довых испытаний, а также при сравнении особенностей формирования НДС в обделке исключить влияние кривизны и размеров тоннеля [33]. Нормальное напряжение на контакте между сегментами сборной обделки задавалось за счет приложения сосредоточенной нагрузки к поверхности верхнего сегмента. Моделирование поворота одного сегмента сборной обделки относительно другого выполнялось за счет задания вынужденного вращения, при этом точка приложения вращения соответствовала середине поверхности верхнего сегмента [34, 35]. Последовательность численного моделирования расчета НДС обделки включает следующие основные этапы: формирование фиктивной величины осевой нагрузки для введения рассматриваемых сегментов обделки в контактное взаимодействие; задание граничных условий, моделирующих симметричную затяжку болтовых соединений; формирование НДС обделки под действием осевой нагрузки, приложенной к торцевой поверхности верхнего тубинга; задание изгибающего момента за счет поворота (в точке приложения осевой нагрузки) одного сегмента сборной обделки относительно другого [35].

Экспериментальная методика предусматривала приложение возрастающих изгибающих моментов при различных значениях нормальной силы. Поскольку болтовые соединения устанавливались только с одной стороны сегмента, испытания проводились для двух направлений поворотного момента: положительного и отрицательного. Влияние болтовых соединений на ротационную способность контактного шва также подвергалось детальному анализу. Измерение деформаций осуществлялось в четырех точках: по две с каждой стороны сегмента на расстояниях 50, 600 и 1200 мм от контактного шва. Процедура испытаний включала первоначальное увеличение

нормальной силы до требуемого уровня с построением диаграмм деформации от нормальной силы. После достижения стабилизации деформаций выполнялись испытания на поворот. Расчет углов поворота базировался на измерениях, выполненных непосредственно у контактного шва на расстоянии 50 мм. Сопоставление результатов измерений на расстояниях 50, 600 и 1200 мм показало незначительные различия, что подтверждает репрезентативность данных, полученных на расстоянии 50 мм для характеристики реальных поворотов в соединении. Диапазон нормальных сил варьировался от 0,2 до 4,4 кН/мм. Для сравнения: средняя нормальная сила в железнодорожном тоннеле Ботлек составляет 1,5 кН/мм, а в полномасштабных испытаниях — 0,7 кН/мм [22]. Расчетная схема моделируется на основе практических опытов Хордейка и Гийсберса, где два образца сегментов железобетонной обделки подвергнуты возрастающим изгибающим моментам при различных нормальных силах [36].

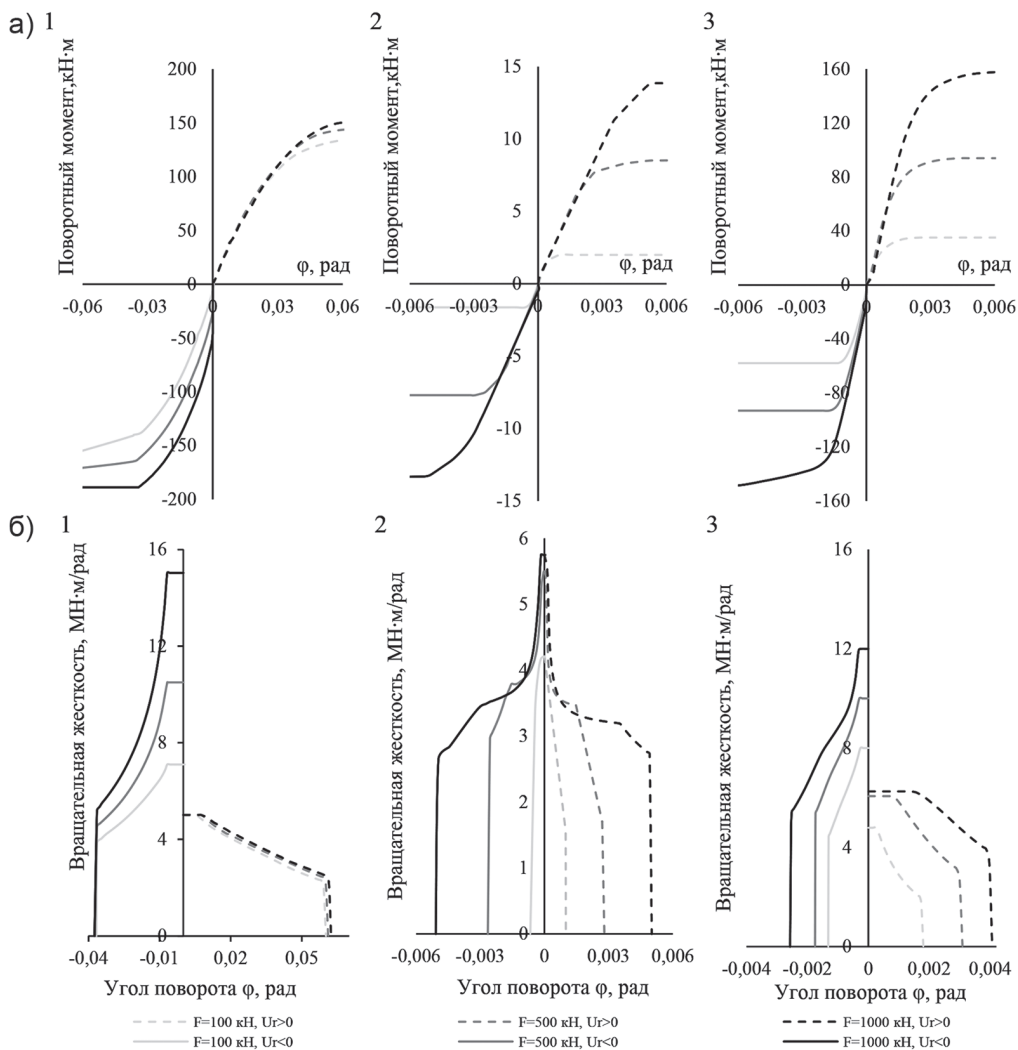
Результаты исследований

По полученным результатам были построены графики (рис. 4) зависимостей момента в стыке от угла раскрытия ($M-\theta$) и соответствующие кривые поворотной жесткости ($K-\theta$) для всех исследуемых конфигураций сборной тоннельной обделки. Итоговые представленные диаграммы позволяют провести комплексный анализ поведения стыков при различных типах нагружения (осевая нагрузка и поворотный момент) и сравнить эффективность конструктивных решений для чугунной и железобетонной обделки разных диаметров.

Верхний ряд графиков представляет нелинейные зависимости момента, возникающего в стыке сегментов, от угла их взаимного раскрытия. Эти кривые демонстрируют сложное нелинейное по-

ведение, которое определяется изменением эпюры контактных напряжений при раскрытии стыка по внутренним и внешним граням. Нижний ряд графиков отображает зависимости жесткости узла сегментов при положительном и отрицательном вращательном моменте от величины угла раскрытия стыка.

Для чугунной обделки получены деформационно-силовые характеристики работы стыков обделки, демонстрирующие асимметричность относительно нулевого положения стыка. При положительных углах раскрытия наблюдается монотонный рост момента от нуля до приблизительно 150 кН·м, характе-



1 – чугунная тубинговая обделка Ø5,5 м; 2 – железобетонная блочная обделка разжимаемая на породе 5-БНЛ-2 Ø5,62 м; 3 – железобетонная тубинговая обделка Ø9,8 м

Рис. 4. Графики зависимости момента от угла раскрытия стыка (а) и зависимости показателей поворотной жесткости от угла раскрытия стыка (б) [составлено авторами]

Fig. 4. Graphs of the moment dependence on the joint opening angle (a) and the dependence of the rotary stiffness on the joint opening angle (b) [compiled by the authors]

ризуемый постепенным увеличением наклона кривой. При отрицательных углах раскрытия кривая демонстрирует более крутой наклон в начальной части с максимальным моментом порядка 180 кН·м. Асимметрия момента относительно нулевого положения существенна: абсолютное значение момента при сжатии на 20% превышает момент при растяжении при одинаковых угловых деформациях. Это обусловлено влиянием пространственной конфигурации болтовых связей в зависимости от направления действия момента. Поворотная жесткость для данного типа обделки в основном обусловлена несущей способностью болтовых соединений в зоне контакта сегментов. Анализ кривых поворотной жесткости на графике показывает, что осевая нагрузка почти не влияет на площадь контакта между сегментами и, соответственно, на жесткость стыка при повороте. При увеличении нагрузки с 100 до 1000 кН усредненная жесткость возрастает лишь на 15%.

Для обделки 5-БНЛ-2 характерна нелинейная зависимость изменения поворотной жесткости. Такой нелинейный характер поведения указывает на смену режимов работы стыка в процессе деформирования: от жесткого полного контакта в начале деформирования к уменьшению площади полного контакта с перераспределением давления при больших углах раскрытия стыка сегментов. Данная обделка имеет наименьший показатель поворотной жесткости и обладает наименьшей несущей способностью по поверхности контакта между сегментами, и, таким образом, увеличение осевой нагрузки с 100 до 1000 кН приводит к увеличению средней жесткости приблизительно на 45%, причем основной прирост жесткости происходит при увеличении продольной силы от 100 к 500 кН. Дальнейшее увеличение осевой нагрузки (до 1000 кН) обес-

печивает дополнительный прирост жесткости лишь на 8–10% из-за пластического характера поведения бетона на контакте.

Для железобетонной обделки диаметром 9,8 м свойственна асимметричность деформационно-силовых характеристик стыка обделки в зависимости от уровня осевой нагрузки, что свидетельствует о включении в работу болтовых связей и смещении контактной поверхности по стыку между смежными сегментами. Анализ трех деформационно-силовых характеристик позволяет количественно оценить влияние осевой нагрузки на поворотную жесткость стыка, увеличение осевой нагрузки с 100 до 1000 кН приводит к возрастанию средней жесткости в 3,75 раза. За счет наибольшей площади контакта сегментов а также за счет меньшего влияния болтовых связей на жесткость при повороте, данная крепь обладает наибольшими равнозначными значениями жесткости в двух направлениях при раскрытии стыков сегментов. Верификация представленных результатов в расчетном комплексе Abaqus, приведена на рис. 3, где сопоставлены деформационно-силовые характеристики, полученные при стендовых испытаниях — в результате математического моделирования [37–39].

После проведения основной серии испытаний и исследования показателей поворотной жесткости для различных типов сегментов были построены графики формирования напряжения на поверхности контакта для трех выбранных сегментов (рис. 5).

Графики напряжения представлены для двух этапов нагружения:

- формирование напряжений при воздействии осевой нагрузки;
- развитие напряжений при воздействии следующим шагом поворотного момента.

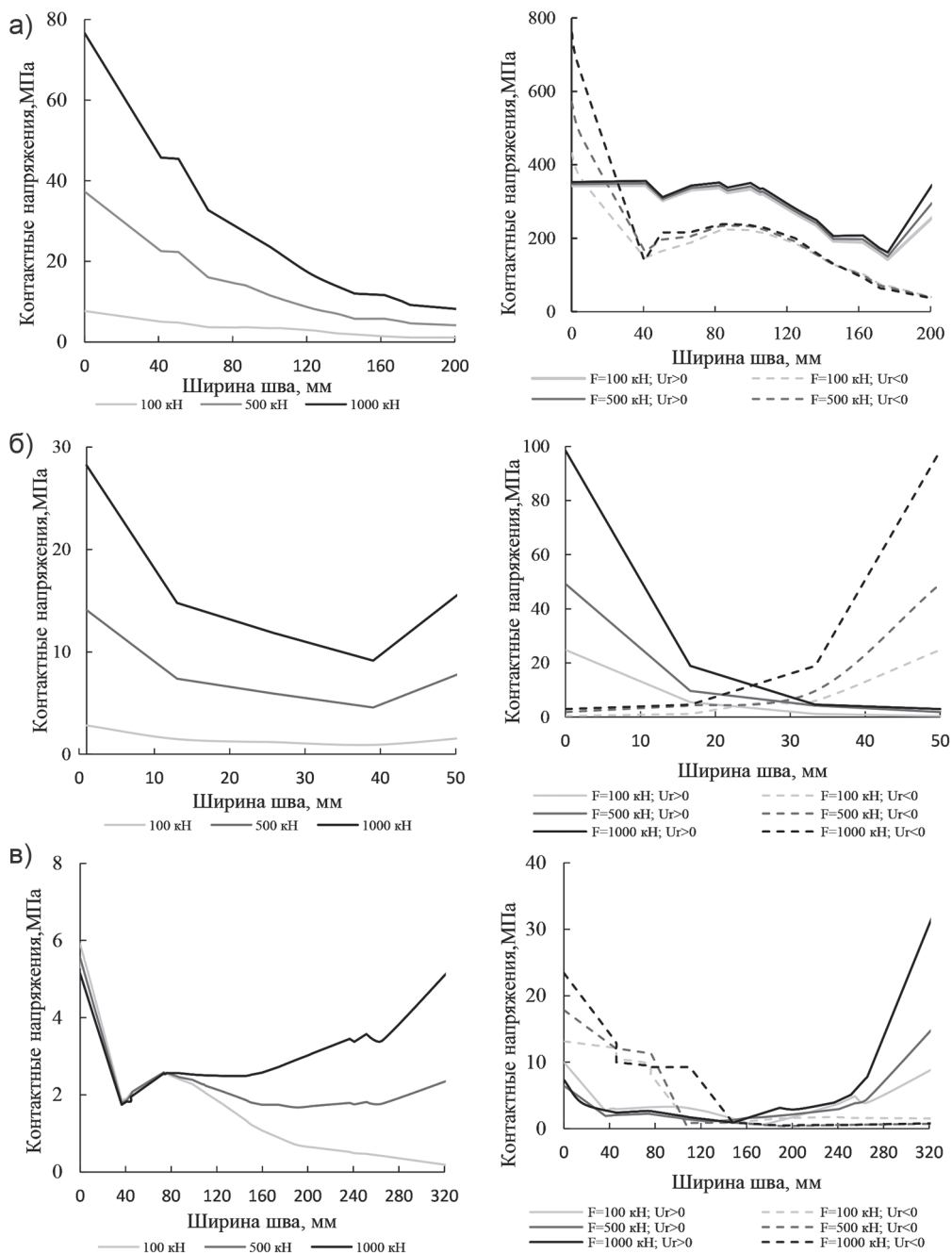


Рис. 5. Графики формирования напряжений на контакте (слева первый этап; справа второй этап): чугунная тубинговая обделка Ø5,5 м (а); железобетонная блочная обделка, разжимаемая на породу 5-БНЛ-2 Ø5,62 м (б); железобетонная тубинговая обделка Ø9,8 м (в) [составлено авторами]

Fig. 5. Graphs showing stress formation at the contact point (left: first stage; right: second stage): cast iron tubing lining Ø5.5 m (a); reinforced concrete block lining, expanded to rock 5-BNL-2 Ø5.62 m (b); reinforced concrete tubing lining Ø9.8 m (v) [compiled by authors]

На графиках отображены кривые формирования контактного напряжения в месте стыка, носящие нелинейный характер, а также увеличение контактных напряжений ближе к краям шва стыка по мере возрастания поворотного момента при действующей осевой нагрузке [6]. Такое распределение обусловлено геометрией и физической жесткостью узла: наличием болтовых соединений, шпонок, перфорацией и т.д. [36]. Второй существенный вывод касается принципиальной нелинейности поворотной жесткости сегментных узлов [22, 37]. Величина жесткости варьируется в зависимости от осевого усилия, изгибающего момента, предварительного натяжения болтов и направления приложенной нагрузки.

Исследования выявили четырехстадийное поведение узлов: упругое деформирование, упругопластический переход, пластическое деформирование и потеря устойчивости [6].

Установлено, что болтовые соединения выполняют функцию ограничения раскрытия стыков, что позволяет получить более равномерную картину передачи усилий между смежными сегментами. При асимметричных нагрузках напряжения в болтах нарастают быстрее [29].

Заключение

Полученные диаграммы поворотной жесткости стыков и распределения контактных напряжений для трех типовых конструкций обделок, используемых в метрополитенах и транспортных тоннелях Санкт-Петербурга, позволяют судить о фактической картине передачи усилий между сегментами сборной обделки.

Выявленные закономерности формирования напряжений при различных соотношениях осевых нагрузок и моментов дают возможность оптимизировать конструктивные решения, в частности выбор параметров болтовых соедине-

ний и геометрии контактных поверхностей.

При выполнении научного исследования использован комплекс нелинейных моделей деформирования строительных материалов, а также увеличена детализация геометрического представления сегментов обделки, что позволило существенно повысить детализацию прочностных расчетов.

Тем самым проведенное исследование дало возможность получить комплексное описание напряженно-деформированного состояния стыка сборных тоннельных обделок при учете нелинейного поведения материалов и контактного взаимодействия.

Основные выводы:

1. Геометрия контактных поверхностей и конфигурация болтовых соединений играют решающую роль в формировании поворотной жесткости стыков и определяют асимметрию поведения конструкции при нагружении в различных направлениях.

2. Влияние осевой нагрузки на поворотную жесткость существенно различается для разных типов обделок: от 15% для чугунной обделки до трехкратного для железобетонной тубинговой обделки.

3. Стыки сборных обделок демонстрируют четырехстадийное поведение: упругое деформирование, упругопластический переход, пластическое деформирование и потерю устойчивости. Учет этих стадий критичен для надежного прогнозирования поведения конструкции.

4. Болтовые соединения являются критическим элементом конструкции, определяющим несущую способность и жесткость узлов. Их предварительное натяжение, качество установки и коррозионная стойкость требуют особого внимания при проектировании и строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jusoh S., Mohamad H., Marto A., Kasim F. Assessment on segment joint to improve soil-tunnel interaction // Proceedings of the MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 250, article 01005. DOI: 10.1051/mateconf/201825001005.
2. Yang F., Liu G., Liu W., Liu K., Wang Y.-qiao, Yao H. Modeling the segmental lining behavior using an analytical segmental joint model // Buildings. 2024, vol. 14, no. 11, article 3542. DOI: 10.3311/PPci.37309.
3. Protosenya A., Ivanov A. Data-driven prediction of stress-strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models. Preprints. 2025, 2025120880. DOI: 10.20944/preprints202512.0880.v1.
4. Li X., Yang S., Dai R., Ai Z. Analytical solutions for the internal forces of lining structure in shallow double-arched tunnel subject to unsymmetrical loads // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1214–1225. DOI: 10.1088/1755-1315/570/5/052029.
5. Shi L., Wang D., Zhang Y., Han F. An analytical solution for internal forces of shallow circular low-to-vacuum tunnel linings in soft soils // Scientific Reports. 2024, vol. 15, article 10234. DOI: 10.1038/s41598-024-83062-7.
6. Yang F., Cao S., Li Q. An analytical model for the rotational behavior of concrete segmental joints with gaskets // Journal of Bridge Engineering. 2019, vol. 24, no. 5, article 04019030. DOI: 10.1177/1369433219852566.
7. Zhang j., Mang H., Liu X., Yuan Y. On a nonlinear hybrid method for multiscale analysis of a bearing-capacity test of a real-scale segmental tunnel ring // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2019, vol. 43, no. 5, pp. 1120–1139. DOI: 10.1002/nag.2894.
8. Xiaodi Z., Wang J., Chen Q., Lim Z. Analytical method for segmental tunnel linings reinforced by secondary lining considering interfacial slippage and detachment // Journal of Engineering Mechanics. 2021, vol. 147, no. 6, article 04021027. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002025.
9. Han X., Xia Y., Wang X., Chai L. Complex variable solutions for forces and displacements of circular lined tunnels // Computers and Geotechnics. 2018, vol. 101, pp. 45–57. DOI: 10.1155/2018/2037845.
10. Amjad R., Zhang Y., Liu X. An analytical solution for shear bearing capacity of circumferential joints of precast concrete segmental tunnel linings considering dowel action // Canadian Journal of Civil Engineering. 2024, vol. 51, no. 8, pp. 625–637. DOI: 10.1002/suco.202400250.
11. Tang J., He M., Bian H., Qiao Y. Analytical solution for longitudinal seismic responses of circular tunnel crossing fault zone // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024, vol. 150, article 105831. DOI: 10.1002/nag.3841.
12. Moreno-Martínez J. Y., Galván A., Peña F., Carpio F. Practical model proposed for the structural analysis of segmental tunnels // Materials. 2020, vol. 13, no. 24, article 5749. DOI: 10.3390/app10238514.
13. Lakirouhani A. Evaluation of analytical solutions and two-dimensional models in estimating the internal forces of tunnel lining against seismic loading, compared with three-dimensional analysis // Journal of Earthquake Engineering. 2022, vol. 26, no. 6, pp. 3182–3204. DOI: 10.1007/S12517-022-10385-Y.
14. Jiang X., Luo W., Zhu B., Yan J., Liu T. Evaluation of longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel with residual jacking force // Underground Space. 2023, vol. 12, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.03.002.
15. Rossi M., Mroueh H., Bian H., Cormey F. Synthesis of numerical methods for the design of segmental tunnel lining // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2019, vol. 295, article 03008. DOI: 10.1051/mateconf/201929503008.
16. Zhang W., De Corte W., Liu X., Taerwe L. Influence of rotational stiffness modeling on the joint behavior of quasi-rectangular shield tunnel linings // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no. 23, article 8396. DOI: 10.3390/app10238396.
17. Wu L., Li M., Bai H., Yun Y., Li H., Feng Y. An iterative calculation method for internal forces and deformation of curved tunnel lining // KSCE Journal of Civil Engineering. 2024, vol. 28, pp. 1522–1533. DOI: 10.1007/s12205-024-0302-6.
18. Topchiy D., Yurgaytis A., Sayadova J., Shinkarenko A. Basic prerequisites for technical inspection of castiron lining elements in the construction of Moscow Metro facilities // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 164, no. 1, article 02027. DOI: 10.1051/e3sconf/202016402027.

19. Li W., Li P., Xie X., Cao Y. A novel back-analysis approach for the external loads on shield tunnel lining in service based on monitored deformation // *Advances in Civil Engineering*. 2023, vol. 2023, article 5571682. DOI: 10.1155/2023/8128701.
20. Protosenya A., Kumov V. Geomechanical substantiation of soil stability during tunnel construction by shield tunneling complexes in layered massifs // *Eng.* 2026, vol. 7, no. 3, article 108. DOI: 10.3390/eng7030108.
21. Majdi A., Ajamzadeh H., Nadimi S. Investigation of moment-rotation relation in different joint types and evaluation of their effects on segmental tunnel lining // *Arabian Journal of Geosciences*. 2016, vol. 9, no. 7, article 512. DOI: 10.1007/s12517-016-2538-z.
22. Petraroi D., Mark P. Variable, full-scale tester for tunnel linings // *Structural Concrete*. 2021, vol. 22, no. 6, pp. 3353–3367. DOI: 10.1002/suco.202000806.
23. Yu Y., Wang J., Hu X. Damage evolution and failure mechanism of segmental tunnel lining // *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 8. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-08-03.
24. Zhang Y., Ai S., Yang X., Zhou L. Mechanical properties of segmental joints strengthened by assembled reinforcement structures for shield tunnel linings // *Journal of Zhejiang University – Science A*. 2024, vol. 25, pp. 1037–1050. DOI: 10.1631/jzus.A2300455.
25. Protosenya A., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach // *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 137–147. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.12.
26. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev A., Tan H. Numerical simulation of the mechanical behavior of fiber-reinforced cement composites subjected dynamic loading // *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 3, article 1112. DOI: 10.3390/app11031112.
27. Волохов Е. М., Кожухарова В. К., Зеленцов С. Н., Мукминова Д. З., Исаев А. А. Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге // *Записки Горного института*. — 2025. — Т. 276. — Вып. 1. — С. 16–29.
28. Shi Q., Liu Y., Wang Z., Peng Z. Failure analysis of high-strength bolts in spherical joint assembly under in-plane quasi-static loading // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2023. DOI: 10.1007/s11668-023-01656-1.
29. Iovlev G., Katerov A., Andreeva A., Ageeva A. Concrete damage plasticity model application to predict stress-strain behavior of waterproof strata in deep rock salt deposits. Preprints 2026, 2026030207. DOI: 10.20944/preprints202603.0207.v1.
30. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Onate E. Concrete damaged plasticity model: everything you need to know // *Journal of Engineering Mechanics*. 1989, vol. 113, no. 10, pp. 1548–1565. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)113:10(1548).
31. Trushko V. L., Klimov V. Y., Baeva E. K., Ozhigin A. Y. Geomechanical substantiation of the technology of constructing modular pile foundations of technological platforms in permafrost rocks // *Geotechnics*. 2025, vol. 5, article 79. DOI: 10.3390/geotechnics5040079.
32. Протосеня А. Г., Алексеев А. В., Вербилло П. Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 254. — С. 252–260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.
33. Карасев М. А., Нгуен Т. Т. Метод прогноза напряженного состояния обделки подземных сооружений квазипрямоугольной и арочной форм // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 257. — С. 807–821. DOI: 10.31897/PMI.2022.17.
34. Miyachi T., Fukuda T. Numerical simulation and simplified analytical model for the longitudinal joint bending stiffness of a tunnel considering axial force // *Structural Concrete*. 2021, vol. 22, no. 6, pp. 3368–3384. DOI: 10.1002/suco.202000796.
35. Wang Y., Yang F., Liu G., Liu W., Liu K.-qiao, Yao H. Modeling the segmental lining behavior using an analytical segmental joint model // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2025, vol. 69, no. 1, pp. 280–292. DOI: 10.3311/PPci.37309.
36. Liu Y., Huang B., Yuan M., Xu Y., Wang W. Analytical solution to the problem of lining void in deeply buried circular tunnel // *Mechanics of Solids*. 2024, vol. 59, pp. 873–884. DOI: 10.1134/S0025654423602537.
37. Demenkov P. A., Romanova E. L. Regularities of plastic deformation zone formation around unsupported shafts in tectonically disturbed massive rock // *Geosciences*. 2025, vol. 15, no. 1, article 23. DOI: 10.3390/geosciences15010023.

38. Беликов А. А., Беляков Н. А. Метод обеспечения геомеханической безопасности при подработке водозащитной толщи // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 115—125. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-115-125.

39. Trushko O. V., Trushko V. L., Demenkov P. A. Arrangement of multistory underground parking garages in complex engineering and geological environment // International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences. 2020, vol. 5, no. 5, pp. 897—912. DOI: 10.33889/IJMEMS.2020.5.5.069. **УДК**

REFERENCES

1. Jusoh S., Mohamad H., Marto A., Kasim F. Assessment on segment joint to improve soil-tunnel interaction. *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 250, article 01005. DOI: 10.1051/mateconf/201825001005.

2. Yang F., Liu G., Liu W., Liu K., Wang Y.-qiao, Yao H. Modeling the segmental lining behavior using an analytical segmental joint model. *Buildings*. 2024, vol. 14, no. 11, article 3542. DOI: 10.3311/Ppci.37309.

3. Protosenya A., Ivanov A. *Data-driven prediction of stress-strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models*. Preprints. 2025, 2025120880. DOI: 10.20944/preprints202512.0880.v1.

4. Li X., Yang S., Dai R., Ai Z. Analytical solutions for the internal forces of lining structure in shallow double-arched tunnel subject to unsymmetrical loads. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1214—1225. DOI: 10.1088/1755-1315/570/5/052029.

5. Shi L., Wang D., Zhang Y., Han F. An analytical solution for internal forces of shallow circular low-to-vacuum tunnel linings in soft soils. *Scientific Reports*. 2024, vol. 15, article 10234. DOI: 10.1038/s41598-024-83062-7.

6. Yang F., Cao S., Li Q. An analytical model for the rotational behavior of concrete segmental joints with gaskets. *Journal of Bridge Engineering*. 2019, vol. 24, no. 5, article 04019030. DOI: 10.1177/1369433219852566.

7. Zhang J., Mang H., Liu X., Yuan Y. On a nonlinear hybrid method for multiscale analysis of a bearing-capacity test of a real-scale segmental tunnel ring. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019, vol. 43, no. 5, pp. 1120—1139. DOI: 10.1002/nag.2894.

8. Xiaodi Z., Wang J., Chen Q., Lim Z. Analytical method for segmental tunnel linings reinforced by secondary lining considering interfacial slippage and detachment. *Journal of Engineering Mechanics*. 2021, vol. 147, no. 6, article 04021027. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002025.

9. Han X., Xia Y., Wang X., Chai L. Complex variable solutions for forces and displacements of circular lined tunnels. *Computers and Geotechnics*. 2018, vol. 101, pp. 45—57. DOI: 10.1155/2018/2037845.

10. Amjad R., Zhang Y., Liu X. An analytical solution for shear bearing capacity of circumferential joints of precast concrete segmental tunnel linings considering dowel action. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2024, vol. 51, no. 8, pp. 625—637. DOI: 10.1002/suco.202400250.

11. Tang J., He M., Bian H., Qiao Y. Analytical solution for longitudinal seismic responses of circular tunnel crossing fault zone. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024, vol. 150, article 105831. DOI: 10.1002/nag.3841.

12. Moreno-Martínez J. Y., Galván A., Peña F., Carpio F. Practical model proposed for the structural analysis of segmental tunnels. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 24, article 5749. DOI: 10.3390/app10238514.

13. Lakirouhani A. Evaluation of analytical solutions and two-dimensional models in estimating the internal forces of tunnel lining against seismic loading, compared with three-dimensional analysis. *Journal of Earthquake Engineering*. 2022, vol. 26, no. 6, pp. 3182—3204. DOI: 10.1007/S12517-022-10385-Y.

14. Jiang X., Luo W., Zhu B., Yan J., Liu T. Evaluation of longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel with residual jacking force. *Underground Space*. 2023, vol. 12, pp. 1—15. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.03.002.

15. Rossi M., Mroueh H., Bian H., Cormey F. Synthesis of numerical methods for the design of segmental tunnel lining. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 2019, vol. 295, article 03008. DOI: 10.1051/mateconf/201929503008.

16. Zhang W., De Corte W., Liu X., Taerwe L. Influence of rotational stiffness modeling on the joint behavior of quasi-rectangular shield tunnel linings. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 23, article 8396. DOI: 10.3390/app10238396.

17. Wu L., Li M., Bai H., Yun Y., Li H., Feng Y. An iterative calculation method for internal forces and deformation of curved tunnel lining. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024, vol. 28, pp. 1522 – 1533. DOI: 10.1007/s12205-024-0302-6.
18. Topchiy D., Yurgaytis A., Sayadova J., Shinkarenko A. Basic prerequisites for technical inspection of castiron lining elements in the construction of Moscow Metro facilities. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 164, no. 1, article 02027. DOI: 10.1051/e3sconf/202016402027.
19. Li W., Li P., Xie X., Cao Y. A novel back-analysis approach for the external loads on shield tunnel lining in service based on monitored deformation. *Advances in Civil Engineering*. 2023, vol. 2023, article 5571682. DOI: 10.1155/2023/8128701.
20. Protosenya A., Kumov V. Geomechanical substantiation of soil stability during tunnel construction by shield tunneling complexes in layered massifs. *Eng.* 2026, vol. 7, no. 3, article 108. DOI: 10.3390/eng7030108.
21. Majdi A., Ajamzadeh H., Nadimi S. Investigation of moment-rotation relation in different joint types and evaluation of their effects on segmental tunnel lining. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016, vol. 9, no. 7, article 512. DOI: 10.1007/s12517-016-2538-z.
22. Petraroì D., Mark P. Variable, full-scale tester for tunnel linings. *Structural Concrete*. 2021, vol. 22, no. 6, pp. 3353 – 3367. DOI: 10.1002/suco.202000806.
23. Yu Y., Wang J., Hu X. Damage evolution and failure mechanism of segmental tunnel lining. *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 8. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-08-03.
24. Zhang Y., Ai S., Yang X., Zhou L. Mechanical properties of segmental joints strengthened by assembled reinforcement structures for shield tunnel linings. *Journal of Zhejiang University – Science A*. 2024, vol. 25, pp. 1037 – 1050. DOI: 10.1631/jzus.A2300455.
25. Protosenya A., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach. *The Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 137 – 147. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.12.
26. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev A., Tan H. Numerical simulation of the mechanical behavior of fiber-reinforced cement composites subjected dynamic loading. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 3, article 1112. DOI: 10.3390/app11031112.
27. Volokhov E. M., Kozhukharova V. K., Zelentsov S. N., Mukminova D. Z., Isaev A. A. Assessment of foundation-base interaction effects by numerical modeling methods under undermining conditions of the Mariinsky Theatre building in St. Petersburg. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 276, issue 1, pp. 16 – 29. [In Russ].
28. Shi Q., Liu Y., Wang Z., Peng Z. Failure analysis of high-strength bolts in spherical joint assembly under in-plane quasi-static loading. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2023. DOI: 10.1007/s11668-023-01656-1.
29. Iovlev G., Katerov A., Andreeva A., Ageeva A. Concrete damage plasticity model application to predict stress-strain behavior of waterproof strata in deep rock salt deposits. Preprints 2026, 2026030207. DOI: 10.20944/preprints202603.0207.v1.
30. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Onate E. Concrete damaged plasticity model: everything you need to know. *Journal of Engineering Mechanics*. 1989, vol. 113, no. 10, pp. 1548 – 1565. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)113:10(1548).
31. Trushko V. L., Klimov V. Y., Baeva E. K., Ozhigin A. Y. Geomechanical substantiation of the technology of constructing modular pile foundations of technological platforms in permafrost rocks. *Geotechnics*. 2025, vol. 5, article 79. DOI: 10.3390/geotechnics5040079.
32. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252 – 260. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.
33. Karasev M. A., Nguyen T. T. Method for predicting the stress state of the lining of underground structures of quasi-rectangular and arched shapes. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 807 – 821. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.17.
34. Miyachi T., Fukuda T. Numerical simulation and simplified analytical model for the longitudinal joint bending stiffness of a tunnel considering axial force. *Structural Concrete*. 2021, vol. 22, no. 6, pp. 3368 – 3384. DOI: 10.1002/suco.202000796.
35. Wang Y., Yang F., Liu G., Liu W., Liu K.-qiao, Yao H. Modeling the segmental lining behavior using an analytical segmental joint model. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2025, vol. 69, no. 1, pp. 280 – 292. DOI: 10.3311/PPci.37309.

36. Liu Y., Huang B., Yuan M., Xu Y., Wang W. Analytical solution to the problem of lining void in deeply buried circular tunnel. *Mechanics of Solids*. 2024, vol. 59, pp. 873–884. DOI: 10.1134/S0025654423602537.

37. Demenkov P. A., Romanova E. L. Regularities of plastic deformation zone formation around unsupported shafts in tectonically disturbed massive rock. *Geosciences*. 2025, vol. 15, no. 1, article 23. DOI: 10.3390/geosciences15010023.

38. Belikov A. A., Belyakov N. A. Method for ensuring geomechanical safety during under-mining of waterproof strata. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 115–125. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-115-125.

39. Trushko O. V., Trushko V. L., Demenkov P. A. Arrangement of multistory underground parking garages in complex engineering and geological environment. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2020, vol. 5, no. 5, pp. 897–912. DOI: 10.33889/IJMEMS.2020.5.5.069.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Карасев Максим Анатольевич¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: karasevma@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,

Тай Тиен Нгуен — канд. техн. наук, преподаватель,
Ханойский горно-геологический университет,
Ханой, Вьетнам, e-mail: taitien12@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-5246-9252,

Маринченко Михаил Александрович¹ — аспирант,
e-mail: mikhailmarincenko@gmail.com,

¹ Санкт-Петербургский Горный университет имени императрицы Екатерины II.

Для контактов: Маринченко М.А., e-mail: mikhailmarincenko@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Karasev¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: karasevma@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,
Tay Tien Nguyen, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer,
Hanoi University of Mining and Geology,
Hanoi, Vietnam, e-mail: taitien12@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-5246-9252,

M.A. Marinchenko¹, Graduate Student,
e-mail: mikhailmarincenko@gmail.com,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: M.A. Marinchenko, e-mail: mikhailmarincenko@gmail.com.

Получена редакцией 25.02.2026; получена после рецензии 25.05.2026; принята к печати 10.09.2026.

Received by the editors 25.02.2026; received after the review 25.05.2026; accepted for printing 10.09.2026.

