

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Б.Ч. Месхи¹, М.С. Плешко^{1,2}, И.В. Войнов³, Ж.Ж.З. Кайшау²

¹ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

² НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: mixail-stepan@mail.ru

³ Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: При оценке технического состояния тоннелей с большим сроком эксплуатации возникает необходимость проведения качественного и количественного анализа влияния дефектов на запас несущей способности тоннельной обделки. К основным дефектам обделки можно отнести трещины, вывалы, участки сниженной прочности, внутренние пустоты и др. Для их изучения обобщены данные по 22 железнодорожным тоннелям Юга России. На их основе разработаны численные модели тоннелей с дефектной обделкой. В результате расчета моделей установлено, что несковзные внутренние пустоты и поверхностные вывалы в обделке приводят к образованию в ней локальных зон концентраций напряжений. Наиболее опасны глубокие дефекты протяженностью вдоль оси тоннеля 0,25 пролета и более. Эпюра напряжений в обделке в этом случае приобретает асимметричный вид, а количественные значения максимальных напряжений на 15–50% больше, чем в нормальной обделке. Наиболее опасным является случай, когда бетон дефектной зоны дополнительно имеет сниженную фактическую прочность. В этом случае создаются предпосылки для дальнейшего развития дефектов и перехода обделки в неработоспособное состояние из-за формирования зон разрушений и развития чрезмерных деформаций. Это свидетельствует о необходимости при оценке технического состояния тоннельной обделки рассмотрения совместного влияния дефектов.

Ключевые слова: тоннель, обделка, дефект, напряжения, деформации, несущая способность.

Для цитирования: Месхи Б. Ч., Плешко М. С., Войнов И. В., Кайшау Ж. Ж. З. Обеспечение безопасной эксплуатации транспортных тоннелей на основе прогнозного моделирования интенсивных геомеханических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 8. – С. 86–96. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-86-96.

Safe operation of transportation tunnels based on predictive modeling of active geomechanical processes

B.Ch. Meskhi¹, M.S. Pleshko^{1,2}, I.V. Voinov³, J.J.Z. Caixao²

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

² National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: mixail-stepan@mail.ru

³ Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract: Assessment of serviceability status of long-term operating tunnels requires the qualitative and quantitative analysis of effect exerted by different defects on load-bearing margin of tunnel lining. Major defects of lining are cracks, falls, weakening areas, internal voids, etc. The studies involved the generalized data on 22 railway tunnels in the south of Russia. On this base, the numerical models of tunnels with damaged lining are constructed. The modeling has found out that part-through internal voids and surface falls initiate local zones of stress concentration in lining. Deep defects that extend along the tunnel axis by 0.25 span and longer feature the highest hazard. The stress envelope in the lining is asymmetrical in this case, and the values of maximal stresses are higher by 15–50% than in the standard-quality lining. The highest danger is constituted by concrete of reduced actual strength in the zone of a defect. These conditions promote further growth of imperfections and nonserviceability of lining due to formation of fracture zones and development of excessive deformation. Assessment of serviceability of tunnel lining requires analyzing joint impact of different defects.

Key words: tunnel, lining, defect, stresses, strains, load-bearing capacity.

For citation: Meskhi B. Ch., Pleshko M. S., Voinov I. V., Caixao J. J. Z. Safe operation of transportation tunnels based on predictive modeling of active geomechanical processes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):86-96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-86-96.

Введение

В Российской Федерации и соседних странах (Литве, Грузии, Армении) функционирует ряд железнодорожных тоннелей, построенных во второй половине XIX в., начале и середине XX в. Срок их службы уже сегодня превышает нормативные показатели. Они продолжают эксплуатироваться и в среднесрочной перспективе, при этом риски возникновения аварийных ситуаций будут возрастать пропорционально увеличению возраста тоннельных конструкций.

Основной несущей конструкцией тоннеля является обделка, которая воспринимает комплекс постоянных, временных, особых нагрузок и воздействий и обеспечивает безопасную эксплуатацию тоннеля в течение всего жизненного цикла.

Требования к обследованию и оценке технического состояния тоннелей, включая методики выявления и оценки дефектов, расчета и прогнозирования несущей способности обделки, изложены в ряде действующих нормативных документов [1–3].

В зависимости от значимости дефекты обделки принято делить на три группы:

- критические — дефекты, при наличии которых снижается безопасность работ, прочность, надежность и долговечность сооружения; эксплуатация сооружения при данном дефекте практически невозможна;

- значительные — дефекты, несущественно влияющие на безопасность работ, но снижающие прочность, надежность и долговечность сооружения в эксплуатации;

- малозначительные — дефекты, которые не оказывают существенного влияния на безопасность работ, прочность, надежность и долговечность сооружения в эксплуатации.

В месте с тем четких критериев деления дефектов обделки по степени значимости сегодня не существует, а в ряде случаев рекомендации нормативных документов противоречат друг другу. В связи с этим при проведении оценки технического состояния тоннеля необходима двухэтапная оценка несущей способности обделки с последующей окончательной классификацией выделенных дефектов по результатам расчетов [1]:

Этап 1. Расчет проектного напряженно-деформационного состояния конст-

рукций тоннелей и метрополитенов по их проектным характеристикам.

Этап 2. Расчет фактического напряженно-деформированного состояния конструкций объекта с учетом результатов обследования его технического состояния и состояния заобделочного пространства (дефекты конструкций и контактного слоя «грунт–обделка», воздействия нового строительства, ремонтно-восстановительных работ или реконструкции объекта).

Первый этап может быть реализован с помощью аналитических и численных методов расчета. Последние достижения в области применения аналитических методов для расчета тоннельной обделки рассмотрены в работах А.С. Саммаля, С.В. Анциферова, П.В. Деева и др. [6–8, 13, 15].

Наиболее адекватным численным методом для выполнения второго этапа является метод конечных элементов (МКЭ). Сегодня МКЭ применяется для решения самого широкого класса задач при проектировании новых и анализе напряженно-деформированного состояния существующих транспортных тоннелей с помощью современных программных пакетов ANSYS, Лира-Windows, PLAXIS, Robot Millennium, FLAC (Itasca Company), ABAQUS, ADAPT, CRISP, SOFiSTiK, Civil FEM, Midas GTS NX, Z_SOIL и др. Численная модель при этом должна учитывать данные обследования и (или) мониторинга ствола. Целесообразность такого подхода показана, в частности, в работах К.П. Безродного и М.О. Лебедева [9, 10]. Авторами для соблюдения этого требования собраны данные по 22 железнодорожным тоннелям юга России общей протяженностью около 12,5 км.

В ходе визуального и инструментального обследования тоннелей, анализа архивных сведений выявлены, систематизированы и проанализированы следующие дефекты обделки [4, 5]:

1. Сквозные трещины в бетоне обделки с признаками ее деформации на длине тоннеля 10 м и более.

2. Участки потенциальных вывалов монолитной обделки, оконтуренные дугообразной трещиной с выдвиганием бетона внутрь тоннеля на 10 мм и более.

3. Деформации обратного свода на участке тоннеля, значительные разрушения обратного свода.

4. Участки обделки с косыми и дугообразными трещинами, увеличивающимися в размерах.

5. Вывалы бетона несквозные с образованием полости в пределах толщины обделки.

6. Внутренние пустоты (неоднородности) в бетоне обделки размером не менее 0,5 толщины обделки (выявленные методами ультразвуковой томографии или георадиолокации).

7. Поперечные трещины, локальные разрушения в холодных и деформационных швах, с раскрытием более 0,2 мм, в том числе увеличивающиеся, при наличии обводнения.

8. Деструктивный бетон обделки — размороженный или выщелоченный, разбирающийся вручную, глубиной более 20 мм (рис. 1).

9. Отслоение покрытий бетона обделки или выработки (набрызгбетон).

10. Раковины и каверны на поверхности обделки глубиной более 20 мм.

В настоящем исследовании на основании собранных количественных и качественных данных по дефектам выполнена оценка влияния на фактическую несущую способность обделки вывалов и внутренних пустот методом численного моделирования в пространственной постановке.

Разработка численной модели

Разрабатываемая модель должна обеспечивать учет: истории нагружения обделки в процессе эксплуатации; нели-



Рис. 1. Зона деструктивного бетона обделки площадью около 5 м², глубиной до 70 мм
Fig. 1. The area of destructive concrete lining with an area of about 5 m² and a depth of 70 mm

нейность деформирования породного массива; особенности совместных деформаций на контактах крепь — порода и отдельных породных слоев; трещиноватости и нарушенности породного массива; изменения геометрических параметров тоннельной обделки, ее прочности и жесткости, влияние близко расположенных подземных выработок, застройки и др.

Комплексный анализ этих факторов возможен в программном комплексе MIDAS GTS NX, нашедшим широкое применение для геотехнических расчетов [12, 14]. Он принят в качестве основного программного продукта в настоящем исследовании.

Геометрия и размеры численной модели должны приниматься таким образом, чтобы исключить их влияние на результаты анализа НДС в представляющей интерес для численного эксперимента области и обеспечить максимальное подобие взаимодействия всех элементов модели реальным условиям.

С этих позиций размеры граней пространственных моделей приняты не менее $10R$, где R — максимальный размер сечения тоннеля (ширина или высота).

В моделях использовались изопараметрические восьмиузловые конечные

элементы, позволяющие определять параметры напряженно-деформированного состояния как континуальных объектов, так и массивных конструкций.

Граничные условия модели заданы в виде ограничений перемещений узлов внешних нижней и боковых поверхностей породного массива модели в перпендикулярном направлении.

Нагрузки на обделку от горного давления прикладывались в форме контактных напряжений к внешней грани обделки. Для всех тоннельных конструкций задается режим учета собственного веса.

В качестве основной модели грунта и железобетонных конструкций использована идеально-пластическая модель Кулона-Мора. Основные особенности модели заключаются в следующем [11].

Модель позволяет рассмотреть упругую и пластическую стадии деформирования материала. Пластические деформации реализуются после некоторого предела в виде сдвиговых деформаций на площадках скольжения. Этому процессу препятствует структурное сцепление и внутренне трение материала.

Прочность грунта определяется максимальными и минимальными главными напряжениями. Оценка прочности

производится с помощью критерия прочности Кулона-Мора.

Важным преимуществом модели является ее широкое апробирование на практике, а также минимальные требования к исходным характеристикам материала (модуль общей деформации, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, сцепление).

Недостатки модели также общеизвестны. Это одинаковые характеристики материала на стадиях нагружения и разгрузки, учет пластических деформаций только при сдвиговых деформациях и выходе за предельную поверхность.

При выполнении серий расчетов параметры отклонений изменялись ступенчато от наименьших отклонений, площадей и объемов к максимальным. В ходе расчетов определялись все компоненты напряженно-деформированного состояния обделки. Далее рассчитывались главные напряжения и деформации и выполнялся анализ с выявлением основных закономерностей и построением характерных зависимостей. Для количественной оценки влияния отклонений прочности на запас несущей способности обделки дополнительно определялся критерий разрушения Мора-Кулона

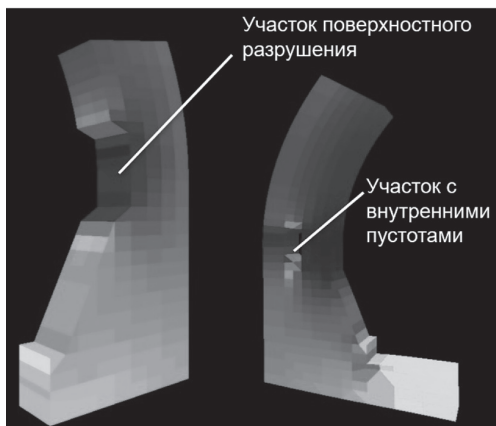


Рис. 2. Фрагменты пространственных моделей дефектных участков обделки

Fig. 2. Fragments of spatial models of defective areas of the lining

$$f = |\tau| + \sigma_n \tan \varphi - c, \quad (1)$$

где $|\tau|$ — касательные напряжения; σ_n — нормальные напряжения; φ — угол внутреннего трения; c — сцепление.

С использованием величин главных напряжений ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) критерий прочности Мора-Кулона также можно представить в виде

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi + c \cos \varphi, \quad (2)$$

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \varphi}{2c \cos \varphi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \varphi}{2c \cos \varphi} = 1; \quad \frac{\sigma_1}{f'_t} - \frac{\sigma_3}{f'_c} = 1$$

где $f'_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ — прочность при одно-

осном сжатии, когда максимальные главные напряжения равны нулю;

$f'_t = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$ — прочность при одноосном растяжении, когда максимальные главные напряжения равны нулю.

В последнее время все большее применение в отечественной практике геомеханических расчетов получает обобщенный критерий прочности Хука-Брауна, однако для его использования необходимо иметь достоверные данные по показателю качества породы RQD [16].

Для адекватной реализации сформулированных выше расчетных случаев необходимо также оперировать деформационными параметрами бетонной обделки. В науке и практике широко используются зависимости модуля деформации бетона от прочности R , имеющие, как правило, вид степенных функций. В настоящем исследовании для определения фактического модуля деформации бетона при продолжительном действии нагрузки использовано выражение [11]:

$$E = \frac{3630}{1 + \varphi_{b,cr}} R^{0,613} \quad (3)$$

где $\varphi_{b,cr}$ — коэффициент ползучести бетона.

Примеры фрагментов моделей обделки с участками дефектов приведены на рис. 2.

Поэтапная калибровка входных параметров модели Кулона-Мора осуществлялась путем предварительного численного моделирования процесса лабораторных испытаний пород и бетона и их сравнения с результатами экспериментов. Для этого дополнительно использованы данные трехосных испытаний, представленные для бетонов в работе [17], для песка и известняка — в работе [18].

Результаты расчета

На рис. 3 представлен пример эпюры нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки. В правой стенке имеется вывал с площадью поверхности $4,2 \text{ м}^2$ и глубиной 200 мм.

Анализ данных моделирования показывает, что несквозные внутренние пустоты и поверхностные вывалы в обделке приводят к образованию в ней локальных зон концентраций напряжений.

Наиболее опасны глубокие дефекты протяженностью вдоль оси тоннеля 0,25 пролета и более.

Эпюра напряжений в этом случае приобретает асимметричный вид, а количественные значения максимальных напряжений на 15–50% больше, чем в бездефектной обделке. При площади поверхности дефекта более $4–5 \text{ м}^2$ снижение фактической несущей способности обделки определяется, прежде всего, относительной толщиной дефекта t_{rel} (отношение глубины дефекта к толщине обделки). Соответствующая зависимость представлена на рис. 4.

Наличие пустот и локальных вывалов в своде приводит к увеличению значений максимальных растягивающих напряжений и расчетных вертикальных деформаций в обделке на дефектном участке.

При рассмотрении одновременного влияния уменьшения толщины обделки и поверхностного или внутреннего дефекта установлено, что их совместное влияние проявляется не только непосредственно на нарушенных участках, но

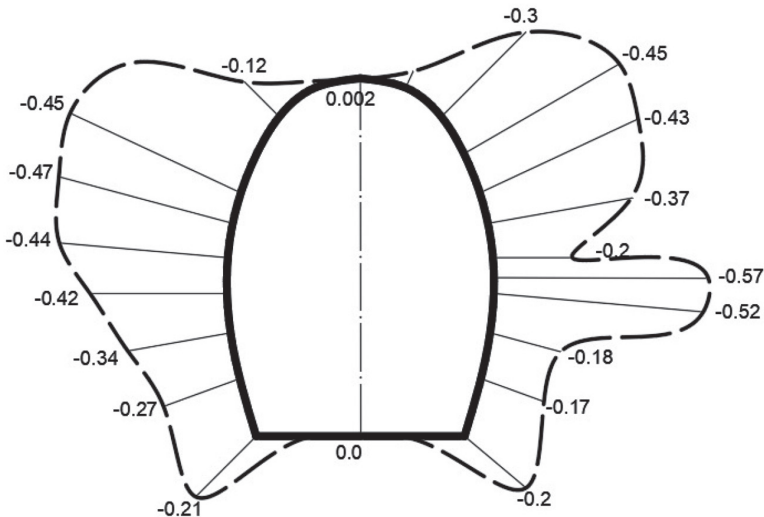


Рис. 3. Эпюра распределения нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре дефектной обделки

Fig. 3. Plot the distribution of normal tangential voltages on the inner contour of the defective lining

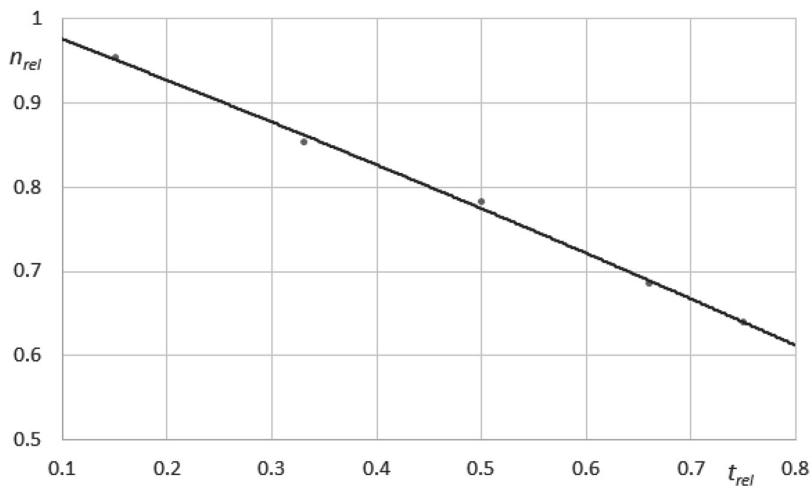


Рис. 4. График зависимости $n_{rel}(t_{rel})$
 Fig. 4. The dependence graph $n_{rel}(t_{rel})$

и в примыкающих к ним участках обделки с проектными параметрами. Средние значения напряжений на этих участках выше на 10–15%. Тем самым создаются предпосылки для дальнейшего развития дефектов и перехода обделки в неработоспособное состояние.

На следующем этапе исследований выполнено моделирование процесса формирования локального вывала грунта в тоннель.

Расчеты выполнялись шагово-итерационным методом. На первой стадии в изначально сплошном слоистом массиве рассмотрен процесс образования заобделочных пустот в надтоннельном массиве в слое известняков путем выключения из работы соответствующих конечных элементов. Это в свою очередь приводит к перераспределению напряжений в массиве и увеличению нагрузок на обделку из-за перехода от расчетной схемы сво-

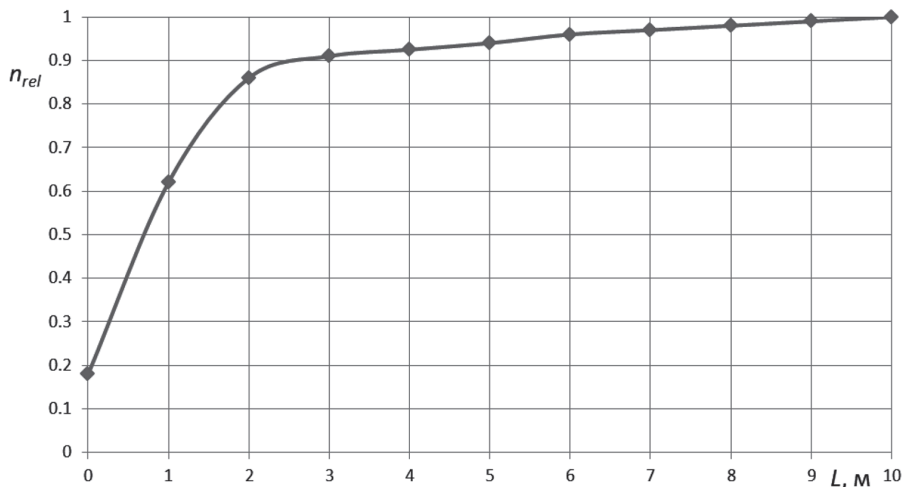


Рис. 5. График зависимости параметра $n_{rel}(L)$
 Fig. 5. The dependence of the parameter $n_{rel}(L)$

дообразования к схеме давления полного столба породы на контакте с дефектом участком.

Рост нагрузок приводит к потере несущей способности свода обделки. После наступления предельного состояния соответствующие конечные элементы также выключаются из работы. В тоннеле, таким образом, формируется закрытый вывал, который в дальнейшем может перейти в открытый с образованием мульды оседания земной поверхности.

Влияние вывала также приводит к росту напряжений в своде обделки по трассе тоннельного участка и снижению ее несущей способности. Соответствующая зависимость приведена на рис. 5. Здесь L — это расстояние рассматриваемой точки сечения тоннели участка вывала.

Полученные данные показывают, что локальные вывалы и внутренние пустоты в обделке можно отнести к категории значимых дефектов.

Наиболее опасным является случай, когда бетон дефектной зоны дополнительно имеет сниженную фактическую прочность. В этом случае создаются предпосылки для дальнейшего развития дефектов и перехода обделки в неработоспособное состояние с развитием процесса разрушения на дефектном участке тоннеля.

Заключение

Выполненные вычислительные эксперименты показывают, что дефекты структуры и фактические свойства материала обделки тоннелей оказывают существенное влияние на техническое состояние тоннеля и безопасность его дальнейшей эксплуатации.

Вместе с тем проведение таких расчетов на большой протяженности трасс тоннелей по данным сплошного инструментального обследования является трудоемким и дорогостоящим. На помощь здесь приходит современный аппарат

теории надежности с использованием вероятностных подходов, которые часто, а в ряде случаев полностью позволяют заменить затратные натурные исследования, камеральную обработку данных и компьютерное моделирование с построением сложных пространственных моделей.

Например, нашедший широкое применение в имитационной геомеханике метод Монте-Карло предусматривает выполнение многократно повторяющихся расчетов численных моделей с последующей сортировкой и отбраковкой грубых погрешностей, задание геомеханических критериев оценки технического состояния и определение фактической надежности (и) или долговечности.

Для упрощения рассматриваемой задачи может быть применена комбинация методов конечных элементов, Монте-Карло и метод уменьшения модуля упругости (elastic modulus reduction method (EMRM)) [19], получивший достаточную апробацию в зарубежных исследованиях для оценки надежности строительных конструкций различного функционального назначения.

Метод уменьшения модуля упругости (EMRM) является относительно простым и эффективным, при этом подходит для анализа больших геомеханических систем.

Стратегия регулировки модуля упругости каждого элемента в каждый шаг итерации основана на принципе сохранения энергии деформации в сочетании с методом линейных упругих конечных элементов:

$$E_{k+1} = E_k \left(\frac{A}{B} \right)^q, \quad (4)$$

где E_k — начальный модуль упругости на k -ом шаге; E_{k+1} — начальный модуль упругости на $k+1$ -ом шаге итерации; q — коэффициент, учитывающий скорость деградации бетона, изменяется в диа-

пазоне 1,0–3,0; A, B – коэффициенты (индексы) надежности обделки соответственно на шаге итерации $k+1$ и с проектными параметрами.

В результате шагово-итерационного моделирования формируется массив значений по внутренним усилиям, момен-

там и напряжениям в обделке, статистическая обработка которого позволяет оценить техническое состояние тоннеля при отсутствии точных данных о внутренней структуре обделки и окружающего массива и их физико-механических свойствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ Р 57208-2016* Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации. – М., 2016.

2. *ГОСТ 31937-2011* Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М., 2011.

3. *Руководство по техническому диагностированию автодорожных тоннелей.* – М., 2001.

4. *Pleshko M., Voinov I., Revyakin A.* Assessment of the impact of railway tunnel lining defects with a long working lifespan on its carrying capacity // *MATEC Web of Conferences.* 2017. Vol. 106. Article 05004. DOI: 10.1051/mateconf/201710605004.

5. *Плешко М. С., Плешко М. В., Войнов И. В.* Оценка технического состояния железнодорожных тоннелей с большим сроком эксплуатации // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2018. – № 1. – С. 34–40. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-34-40.

6. *Безродный К. П., Лебедев М. О., Саммаль А. С.* Современный опыт применения теоретических подходов геомеханики в подземном строительстве, базирующихся на методах механики сплошной среды // *Метро и тоннели.* – 2018. – № 4. – С. 20–21.

7. *Деев П. В., Саммаль А. С., Анциферов С. В., Шелепов Н. В.* Влияние величины технологического зазора на напряженное состояние обделок тоннелей // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле.* – 2018. – № 4. – С. 287–293.

8. *Панкратенко А. Н., Саммаль А. С., Анциферов С. В., Деев П. В.* Учет технологических особенностей щитового способа проходки при расчете обделок тоннелей // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2017. – № S1. – С. 212–224.

9. *Безродный К. П., Лебедев М. О.* Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей Северного Кавказа // *Науковедение. Интернет-журнал.* – 2014. – № 5 (24). – С. 21.

10. *Безродный К. П., Лебедев М. О.* Натурные исследования напряженно-деформированного состояния систем «обделка-массив» в составе горно-экологического мониторинга // *Метро и тоннели.* – 2011. – № 6. – С. 28–30.

11. *Булычев Н. С.* Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: Недра, 1989. – 272 с.

12. *Mohammed J., Hrubesova E.* Numerical modelling for twin horizontal circle tunnels under static and dynamic loads / *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2019. Vol. 9, pp. 111–124.

13. *Tiwari R., Chakraborty T., Matsagar V.* Analysis of curved tunnels in soil subjected to internal blast loading // *Acta Geotechnica.* 2018. Vol. 15. Pp. 509–528.


14. *Torres A. C., Padilla E. A.* Physical and numerical experimental study of stress-strain state of the structure lining of a shallow tunnel / *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.* 2014, pp. 191–195.

15. *Xu G., He C., Lu D., Wang S.* The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata // *Thin-Walled Structures.* 2019. Vol. 144. Article 106282.

16. Хажыылай Ч. В., Еременко В. А., Косырева М. А., Янбеков А. М. Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна и программы RocData // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 92–101. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-92-101.

17. Корсун В. И., Недорезов А. В., Макаренко С. Ю. Сопоставительный анализ критериев прочности для бетонов // Современное промышленное и гражданское строительство. — 2014. — Т. 10. — № 1. — С. 65–78.

18. Зарецкий К. Ю., Карабаев М. И. Расчетная оценка взаимодействия экспериментальных свай с основанием и сравнение результатов испытаний // Вестник МГСУ. — 2006. — № 1. — С. 93–99.

19. Chen L., Liu Y., Yang P., Cen Z. Limit analysis of structures containing flaws based on a modified elastic compensation method // European Journal of Mechanics – A/Solids. 2008. Vol. 27. No 2. Pp. 195–209. 

REFERENCES

1. *Tonneli i metropoliteny. Pravila obsledovaniya i ustraneniya defektov i povrezhdeniy pri ekspluatatsii GOST R 57208-2016* [Neise, Tunnels and subways. Rules for inspection and elimination of defects and damages during operation, State Standart R 57208–2016], Moscow, 2016.

2. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya GOST 31937-2011* [Neise, Buildings and structures. Rules of inspection and monitoring of technical conditions, State Standart 31937-2011], Moscow, 2011.

3. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu diagnostirovaniyu avtodorozhnykh tonneley* [Guidance on the technical diagnosis of road tunnels], Moscow, 2001.

4. Pleshko M., Voinov I., Revyakin A. Assessment of the impact of railway tunnel lining defects with a long working lifespan on its carrying capacity. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 106. Article 05004. DOI: 10.1051/mateconf/201710605004.

5. Pleshko M. S., Pleshko M. V., Voinov I. V. Estimation of technical state of long-term service railway tunnels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 1, pp. 34–40. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-34-40.

6. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O., Sammal' A. S. Modern experience in the application of theoretical approaches of geomechanics in underground construction, based on the methods of continuum mechanics. *Metro i tonneli*. 2018, no 4, pp. 20–21. [In Russ].

7. Deev P. V., Sammal' A. S., Antsiferov S. V., Shelepov N. V. The influence of the technological gap on the stress state of the tunnel lining. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018, no 4, pp. 287–293. [In Russ].

8. Pankratenko A. N., Sammal' A. S., Antsiferov S. V., Deev P. V. Consideration of the technological features of the shield method of penetration in calculating of the tunnel lining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no S1, pp. 212–224. [In Russ].

9. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O. Mining and environmental monitoring during the construction and operation of the North Caucasus transport tunnels. *Naukovedenie. Internet-zhurnal*. 2014, no 5 (24), pp. 21. [In Russ].

10. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O. Field studies of the stress-strain state of the systems «lining-array» as part of the mining-environmental monitoring. *Metro i tonneli*. 2011, no 6, pp. 28–30. [In Russ].

11. Bulychev N. S. *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy v primerakh i zadachakh* [Mechanics of underground structures in the examples and tasks], Moscow, Nedra, 1989, 272 p.

12. Mohammed J., Hrubesova E. Numerical modelling for twin horizontal circle tunnels under static and dynamic loads. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. Vol. 9, pp. 111–124.

13. Tiwari R., Chakraborty T., Matsagar V. Analysis of curved tunnels in soil subjected to internal blast loading. *Acta Geotechnica*. 2018. Vol. 15. Pp. 509–528.

14. Torres A. C., Padilla E. A. Physical and numerical experimental study of stress-strain state of the structure lining of a shallow tunnel. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2014, pp. 191 – 195.

15. Xu G., He C., Lu D., Wang S. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata. *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 144. Article 106282.

16. Khazhyylay Ch. V., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Yanbekov A. M. In-situ rock mass failure envelope plotting using the Hoek–Brown criterion and RocData software toolkit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 12, pp. 92–101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-92-101.

17. Korsun V. I., Nedorezov A. V., Makarenko S. Yu. Comparative analysis of strength criteria for concrete. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. Vol. 10, no 1, pp. 65 – 78. [In Russ].

18. Zaretskiy K. Yu., Karabaev M. I. Estimated interaction of experimental piles with the base and comparison of test results. *Vestnik MGSU*. 2006, no 1, pp. 93 – 99. [In Russ].

19. Chen L., Liu Y., Yang P., Cen Z. Limit analysis of structures containing flaws based on a modified elastic compensation method. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2008. Vol. 27. No 2. Pp. 195 – 209. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Месхи Бесарион Чохоевич¹ – д-р техн. наук, профессор,
ректор, e-mail: reception@donstu.ru,

Плешко Михаил Степанович^{1,2} – д-р техн. наук, доцент;
профессор, e-mail: mixail-stepan@mail.ru,

Войнов Иван Вячеславович – аспирант,
Ростовский государственный университет путей сообщения,
e-mail: voinov_22@mail.ru,

Кайшау Ж.Ж.Э.² – аспирант, e-mail: jjacintlos@gmail.com,

¹ Донской государственный технический университет,

² НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Плешко М.С., e-mail: mixail-stepan@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*B.Ch. Meskhi*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector,
e-mail: reception@donstu.ru,

M.S. Pleshko^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor;
Professor, e-mail: mixail-stepan@mail.ru,

I. V. Voinov, Graduate Student, e-mail: voinov_22@mail.ru,
Rostov State Transport University, 344038, Rostov-on-Don, Russia,

*Johan Jacinto Zeca Caixao*², Graduate Student,
e-mail: jjacintlos@gmail.com,

¹ Don State Technical University, 344023, Rostov-on-Don, Russia.

² National University of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: M.S. Pleshko,
e-mail: mixail-stepan@mail.ru.

Получена редакцией 19.04.2019; получена после рецензии 06.04.2020; принята к печати 20.07.2020.

Received by the editors 19.04.2019; received after the review 06.04.2020; accepted for printing 20.07.2020.