

УДК 625.042; 539.383

**ДЕФОРМАЦИИ ОСНОВАНИЙ ТОННЕЛЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ В НАКЛОННО-СЛОИСТЫХ
СРЕДАХ И МЕРЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ИМ**

Ян Цзюньшэн¹, Сян Маолун¹, У Цзянь², Ли Юйвэй³, Се Ипэн¹, Фу Цзиньян¹

¹Центральный южный университет,

E-mail: ypxie2020@csu.edu.cn, 410075, г. Чанша, Китай

²Исследовательский институт рельсового транспорта, 611731, г. Чэнду, Китай

³Ляонинский университет, 110036, г. Шеньян, Китай

На основе исследований механизмов деформирования оснований тоннелей, построенных в наклонно-слоистых породных массивах, предложены ограничения и требования к совершенствованию конструкций тоннелей для высокоскоростных поездов Китая. Разработана физическая модель основания, проведены эксперименты и определено взаимодействие среды с элементами тоннелей при разных условиях нагружения. С помощью численного моделирования исследовано влияние кривизны обратного свода обделки тоннелей на деформации основания тоннеля и установлена эффективность углубления обратного свода на деформации подстилающего пространства основания тоннеля. Представлена система контроля и противодействия деформационным нарушениям оснований тоннелей, расположенных в наклонно-слоистых породах.

Тоннель, основание тоннеля, пологий наклон, слоистые горные породы, деформации, меры противодействия

DOI: 10.15372/FTPRPI20240206

EDN: NLFABP

Один из важнейших факторов безопасной эксплуатации высокоскоростных железнодорожных путей — поддержка оснований тоннелей в надлежащем состоянии. Прежде всего это касается деформации нижней обделки тоннеля, сопровождаемой поднятием, растрескиванием и повреждением материалов его основания [1–6]. Это приводит к образованию неровностей путей, ограничениям скорости движения поездов, ставит под угрозу безопасность эксплуатации самих поездов [7–9]. Согласно [10–12], если процесс поднятия дна тоннеля начался, он сам по себе уже не прекратится.

Большинство областей Китая находятся в местностях с горным рельефом и слоистыми скальными образованиями, поэтому строительство железнодорожных тоннелей часто проводится в наклонно-слоистых массивах пород. Однако строительство тоннелей по типовым про-

ектам в таких условиях без понимания особенностей строения и механизмов разрушения может быть опасным, особенно в высоконапряженных слоистых породах [13–18]. В отличие от однородных горных массивов слоистые являются трансверсально-изотропными средами и их деформирование и разрушение при сложных напряжениях разнятся [19–28]. Необходимо проводить систематические исследования механизмов поднятия и деформирования оснований транспортных тоннелей в указанных породах.

Цель настоящей работы — экспериментальное и численное изучение механизмов деформирования основания тоннеля в наклонно-слоистых породах, установление эффективности способов контроля, а также предложение мер по восстановлению структуры оснований.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Типичные случаи деформаций оснований тоннелей. В Китае большое количество тоннелей располагается в юго-западной части, имеющей слоистое строение горных массивов. Здесь разрушение оснований тоннелей происходит по причине поднятия почвы. В табл. 1 приведены стандартные случаи, в которых наблюдались вспучивания и вызванные этим событием различные степени деформации и разрушения структуры в процессе эксплуатации тоннелей. Поскольку тоннели находятся в наклонных и многослойных средах и подвержены высоким тектоническим напряжениям, они в большей степени испытывают горизонтальные геонапряжения, а не вертикальные. Массивы горных пород, в которых строятся тоннели, состоят из чередующихся слоев геоматериалов, основная часть которых — мягкие породы. При их вспучивании в основании тоннеля происходит значительная деформация. Для устранения последствий необходимо ограничить скорость движения поездов, но есть и другой выход. Для эффективного решения проблемы необходим регулярный контроль деформации поднятия почвы и исправление обнаруженных дефектов.

ТАБЛИЦА 1. Стандартные случаи поднятия основания тоннелей

Тоннель	Геологические особенности	Случаи вспучивания почвы
Лаошишан	Высокое геологическое выдавливание, слоистое развитие	Растрескивание безбалластной железнодорожной плиты, максимальное поднятие 10.3 мм
Сифаншан	Синклинальная тектоника, высокое горизонтальное геонапряжение, слоистое развитие	Высота рельсового пути превышает проектную, что затрудняет точную настройку пути
Хуама	Общее и послойное развитие, высокое геонапряжение	Образование трещин в заполнении обратного свода, максимальное поднятие 18 см
Баоаньин	Развитая складчатая тектоника, субгоризонтальные слои горных пород, тонкие слои	Образование трещин в заполнении обратного свода, очень сильное поднятие
Баоташан	Высокое тектоническое напряжение, наклонно-слоистая среда	Вспучивание, продольное растрескивание, перекос основания тоннеля

Контроль за сдвижением породы в основании тоннелей. К концу 2022 г. общая протяженность железных дорог Китая, включая высокоскоростные, составляла 155 тыс. км. Это требует обеспечения безопасности при их эксплуатации. Один из факторов надежности и комфорта передвижения по железной дороге — гладкость рельсового пути, на которую влияет вспучивание или поднятие оснований тоннелей.

В Китае следуют строгим правилам укладки путей, с соблюдением геометрических оценок железнодорожных рельсов. В табл. 2 приведены допустимые и предельные поднятия железнодорожного полотна, учитываемые при разных режимах движения поездов [29, 30]. Пороговые поднятия рельсового полотна на высокоскоростных путях не должны превышать 2 мм/сут. Если данный показатель увеличивается до 8 мм/сут, то необходимо понизить скорость движения поездов с 250–350 до 200 км/ч. Таким образом, при эксплуатации железнодорожных магистралей, особенно высокоскоростных, учет поднятия полотна должен контролироваться с точностью до миллиметров.

ТАБЛИЦА 2. Предельно допустимые показатели поднятия рельсового полотна при разных скоростях движения поездов

Скорость, км/ч	Допустимое значение, мм	Текущий ремонт, мм	Срочный ремонт, мм	Предельное значение, мм	Предельная скорость, км/ч
250–350	2	4	7	8	200
160–250	2	5	8	11	160
120–160	4	6	11	15	120
80–120	4	6	15	19	80

МЕХАНИЗМ ПОДНЯТИЯ ДНИЩА ТОННЕЛЯ

Для экспериментального изучения механизмов деформации оснований тоннелей в скальной наклонно-слоистой среде сконструирована физическая модель тоннеля, помещенного в стальной короб. По отношению к реальной ситуации коэффициент подобия при моделировании составил 1:30. Физическая модель имела ширину 1.5 м, высоту 1.5 м, толщину 0.5 м (рис. 1). Короб с податливыми боковыми стенками позволял сжимать модель под действием гидравлических цилиндров, которые задавали требуемую нагрузку. Чтобы определить влияние разных по величине геонагрузок и видов нагружения, каждый цилиндр нагружался по своей программе. Конструкция испытательного стенда представляет собой усиленную стальную раму, к которой крепятся гидравлические цилиндры. Смещения при поднятии днища измерялись в трех фиксированных точках: одна находилась в центре обратного свода тоннеля, две другие — на осевых линиях слева и справа от центра свода. Чтобы датчики смещений показывали достоверные данные, их изолировали от стенда.

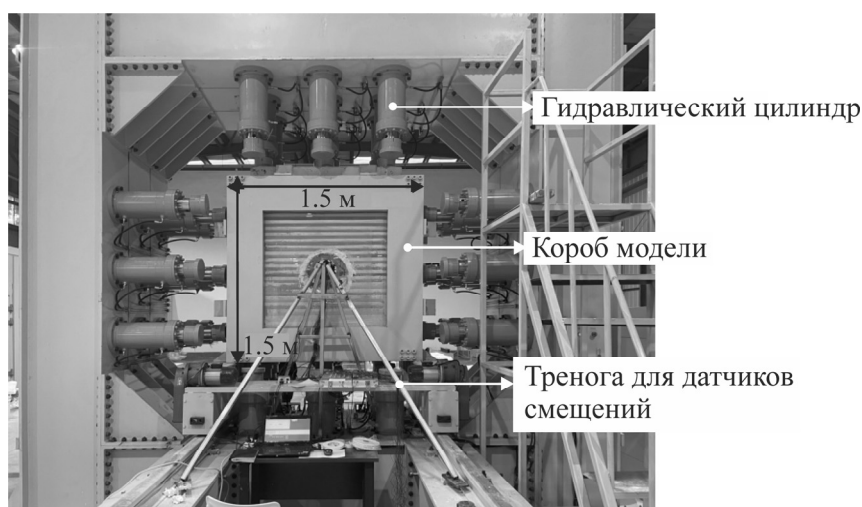


Рис. 1. Экспериментальная модель для контроля смещений при поднятии днища тоннеля

Жесткие слои модели, контактирующие с основанием тоннеля, изготавливались из гипсового материала. Данный материал в виде раствора заливался в специально подготовленную форму, затвердевал в ней, затем извлекался и в течение 7 сут оставался при комнатной температуре. Слоистая среда создавалась путем чередования слоев мягких и жестких материалов. Для создания мягких прослоек мягкие материалы смешивались с водой и цементирующими составами. Полученная суспензия заливалась в форму на жесткие прослойки, после затвердевания получалась слоистая среда с толщиной слоев 2.5 см.

Исследовались три стандартных условия нагружения при разных отношениях горизонтальных и вертикальных напряжений, задаваемых с помощью коэффициента бокового распора K (0.5, 1.0, 1.5). Вертикальное напряжение соответствовало глубине расположения тоннеля, равной 300 м. Параметры нагружений приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Нагружения в экспериментальной модели, кПа

Условие	Нагружение		Коэффициент бокового распора
	вертикальное	горизонтальное	
1	215.0	107.5	0.5
2	215.0	215.0	1.0
3	215.0	322.5	1.5

В процессе испытаний определялись величины поднятия днища тоннеля (рис. 2). Пересчет на реальные условия нагружения массива пород проводился с применением коэффициента подобия, равного 1 : 30. При $K=0.5$ поднятие днища не наблюдалось, происходила незначительная осадка. Отметим, что наличие наклонно-слоистых структур не приводит к поднятию пород при отсутствии заметных тектонических напряжений и тоннели в этих средах безопасны. При $K=1.0$ отмечалось незначительное поднятие днища. Максимальная высота поднятия днища тоннеля (6.36 мм) фиксировалась в центре обратного свода. Поднятие днища вдоль левой и правой стенок физической модели составило 4.32 и 4.14 мм, но это ниже предельных значений, указанных в табл. 2. Тем не менее при таких показателях требуется текущий ремонт тоннеля. При $K=1.5$ происходило максимальное поднятие днища (до 48.32 мм) в центре обратного свода. Показатели по левой и правой стенкам также превосходили допустимые значения. Это свидетельствует о том, что при высоком горизонтальном давлении риск поднятия днища тоннеля остается большим.



Рис. 2. Поднятие днища тоннеля при трех режимах нагружения

Основной фактор, влияющий на поднятие днища тоннеля в наклонно-слоистых средах, — высокое тектоническое напряжение. При нагрузках $K=1.5$ основание тоннеля претерпевает большие деформации и разрушения за счет изгиба и вспучивания. На рис. 3 зафиксирован момент разрушения модели тоннеля при $K=1.5$ со значительным изгибом структурных слоев.



Рис. 3. Разрушение слоистого днища тоннеля при большом горизонтальном напряжении

Численное моделирование применялось для определения способов предотвращения поднятия породы в основании тоннеля за счет возможного увеличения высоты обратного свода. Данный способ известен как метод увеличения кривизны арки обратного свода или как метод увеличения отношения высоты к ширине обратного свода. При численном моделировании находится напряженно-деформированное состояние днища тоннеля при высоких тектонических нагрузках. Для расчетов использовалась вычислительная платформа Flac, основанная на конечно-разностных схемах.

Математическая модель тоннеля представлена на рис. 4. Предполагалось, что тоннель расположен на глубине 300 м, ширина и высота расчетной области 150×150 м. На рис. 4а показаны граничные условия задачи, сверху приложено равномерное давление $P=5036$ кПа. Среда состоит из чередующихся между собой мягких и жестких слоев толщиной 30 см. Слои моделируют наклонно-слоистый породный массив. Контактное взаимодействие слоев определялось по смещениям между ними. Расчетные параметры для материалов, составляющих слоистую среду, приведены в табл. 4.

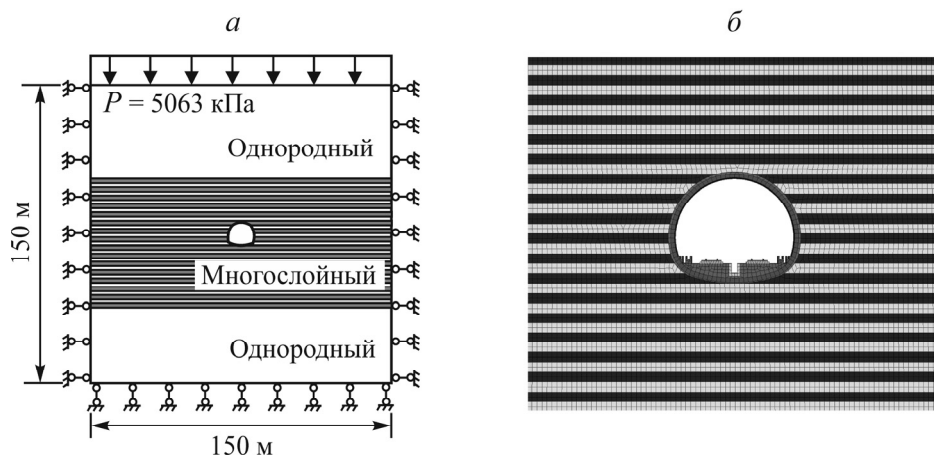


Рис. 4. Численная расчетная модель: а — обобщенная модель объекта с граничными условиями; б — расчетная модель тоннеля в слоистой среде

ТАБЛИЦА 4. Характеристики материалов

Материал	Масса, кН/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа
Мягкая порода	22.0	4.30	0.28	33.0	0.450
Твердая порода	24.0	13.00	0.20	44.5	1.100
Однородная порода	23.0	8.65	0.24	39.0	0.775
Временная крепь	23.0	25.00	0.20	—	—
Обделка	24.0	30.00	0.20	—	—
Обратный свод	23.4	29.50	0.20	—	—
Заполнение обратного свода	23.4	28.00	0.20	—	—

Расчеты выполнялись для трех условий нагружения: первое — модель типичной конструкции тоннеля с отношением высоты к ширине обратного свода 1 : 12, второе — 1 : 10, третье — 1 : 8. На рис. 5 показаны результаты расчета высот поднятия центрального водосточного желоба и рельсовых плит с левой и правой сторон. Видно, что в случае, когда тоннель типовой конструкции, с отношением высоты к ширине $H = 1 : 12$, поднятия основания значительно превышают те, которые указаны как предельные, и следует переходить к другим скоростям движения, представленным в табл. 2. Если сравнить результаты экспериментов, то поднятия основания, полученные на основе численного моделирования, несколько выше достигнутых в результате экспериментов, однако характер остается прежним. При увеличении отношения высоты к ширине до 1 : 10 показатели подъема основания снижаются почти вдвое, свидетельствуя о том, что увеличение высоты обратного свода существенно уменьшает поднятие основания тоннеля. При увеличении этого отношения до 1 : 8 максимальный подъем центрального желоба составил 4.18 мм, подъем правой рельсовой плиты — 3.25 мм, подъем левой рельсовой плиты — 3.16 мм, что меньше пороговых значений, указанных в табл. 2.

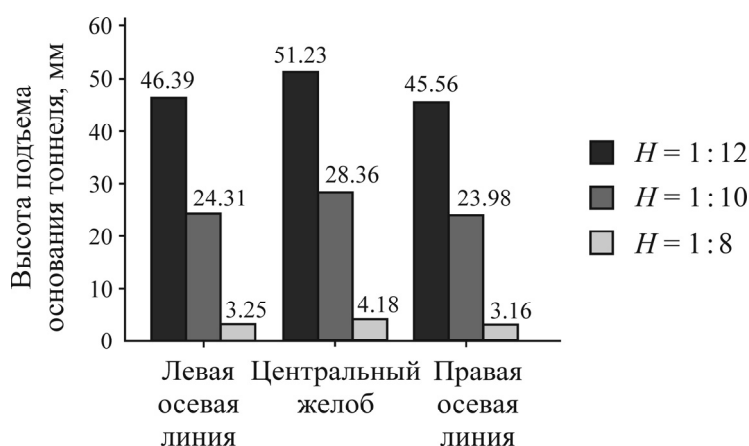


Рис. 5. Поднятие основания тоннеля при разных отношениях высоты к ширине обратного свода

Согласно численным расчетам, увеличение отношения высоты обратного свода к ширине — эффективное средство, препятствующее поднятию основания тоннеля, а увеличение отношения высоты обратного свода к его ширине до 1 : 8 может остановить этот процесс.

МЕРЫ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ПОДЪЕМА ОСНОВАНИЯ ТОННЕЛЯ

Анализируя разные случаи поднятия оснований тоннеля и опыт борьбы с такими деформациями, выделим активные и пассивные методы контроля и предотвращения вспучивания оснований тоннеля. К методам пассивного контроля и предотвращения подъема оснований отнесем изменения в конструкции самого основания, например увеличение высоты свода. Активные методы включают в себя укрепление породы, окружающей основание тоннеля, уменьшение давления на него. В табл. 5 приведены пассивные и активные методы контроля деформации основания тоннеля. Наиболее эффективной мерой для предотвращения изгибных деформаций основания тоннеля следует считать увеличение кривизны (увеличение высоты) обратного свода обделки.

ТАБЛИЦА 5. Меры по предотвращению поднятия конструкции основания тоннеля

Методы контроля	Методы предотвращения	Конкретные меры
Пассивные	Увеличение высоты обратного свода	Увеличение кривизны арки обратного свода (увеличение отношения ширины обратного свода к его высоте)
	Упрочнение обратного свода	Утолщение обратного свода, повышение прочности железобетона
	Оптимизация структуры основания	Улучшение соединения между стенками тоннеля и обратным сводом и т. д.
Активные	Укрепление горной породы вокруг основания тоннеля	Укрепление окружающих пород с помощью комбинирования анкеровки и армирования цементным раствором
	Снижение нагрузки среды вокруг основания тоннеля	Своевременная установка опорной конструкции с целью ослабления давления на окружающую породу

Меры профилактики деформаций в основании тоннеля можно разделить на превентивные и восстановительные. Превентивные включают в себя меры на этапе инженерных изысканий и проектирования, восстановительные применяются во время строительства и эксплуатации, когда деформации основания уже произошли. Превентивные меры, как и восстановительные, могут быть активными и пассивными. Исходя из опыта изучения механизмов деформации основания тоннеля в наклонно-слоистой породе, следует считать, что профилактические меры наиболее действенны. Поднятие пород за счет высокого горизонтального напряжения ведет к деформации основания тоннеля, поэтому слоистые породы с высокой боковой нагрузкой, в которых проложен тоннель, необходимо укреплять заранее.

ВЫВОДЫ

Проанализированы распространенные случаи деформации оснований тоннелей в наклонных и многослойных средах, подверженных высоким тектоническим напряжениям. Представлены системы контроля и противодействия деформационным изменениям оснований тоннелей в процессе эксплуатации и управления железными дорогами, когда даже миллиметровое поднятие основания тоннеля может привести к ограничительным мерам по снижению скорости высокоскоростных поездов. Основным фактором, вызывающим деформации основания обделки тоннеля, является высокое боковое напряжение. Под действием высокого горизонтального давления происходит деформация основания тоннеля и его разрушение. С помощью численных расчетов показана эффективность метода увеличения высоты обратного свода для предотвращения деформации оснований тоннелей.

Предложены пассивные и активные меры по предотвращению деформации основания тоннеля в процессе строительства и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Li L., Yang J., Wu J., Wang S., Fang X., and Zhang C.** Failure mechanism and countermeasures of an operational railway tunnel invert in horizontally stratified rock masses, *Int. J. Geomech.*, 2022, Vol. 22, No. 2. — 04021280.
2. **Moussaiea N., Sharifzadehb M., Sahriarc K., and Khosravi M. H.** A new classification of failure mechanisms at tunnels in stratified rock masses through physical and numerical modeling, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2019, Vol. 91. — 103017.
3. **Feng J., Gong L., Wang L., Zhou P., Zhang P., Li Y., and Liu Z.** Study on failure mechanism and treatment measures of floor heave of high-speed railway tunnel in the interbedded surrounding rock with high geostress, *Eng. Fail. Anal.*, 2023, Vol. 150. — 107365.
4. **Ma K., Zhang J., Zhang J., Dai Y., and Zhou P.** Floor heave failure mechanism of large-section tunnels in sandstone with shale stratum after construction: a case study, *Eng. Fail. Anal.*, 2022, Vol. 140. — 106497.
5. **Mo S., Ramandi H. L., Oh J., Masoumi H., Canbulat I., Hebblewhite B., and Saydam S.** A new coal mine floor rating system and its application to assess the potential of floor heave, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2020, Vol. 128. — 104241.
6. **Zhang B., Tao Z., Guo P., Yang K., and Yang Y.** Model test on deformation and failure mechanism of tunnel support with layered rock mass under high ground stress, *Eng. Fail. Anal.*, 2023, Vol. 150. — 107296.
7. **Fang H., Yang J., Xiang M., Zhang X., and Li L.** Model test and numerical simulation on the invert heave behaviour of high-speed railway tunnels with rainstorm, *Transp. Geotech.*, 2022, Vol. 37. — 100891.
8. **Li L., Yang J., Fu J., Wang S., Zhang C., and Xiang M.** Experimental investigation on the invert stability of operating railway tunnels with different drainage systems using 3D printing technology, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 2022, Vol. 14, No. 5. — P. 1470–1485.
9. **Liu Y., Song H. L., Sun X. D., Xing H. P., Feng C. Y., Liu J. F., and Zhao G. T.** characteristics of rail deformation caused by tunnel floor heave and corresponding running risk of high-speed train, *Constr. Build. Mater.*, 2022, Vol. 346. — 128385.
10. **Du M., Wang X., Zhang Y., Li L., and Zhang P.** In-situ monitoring and analysis of tunnel floor heave process, *Eng. Fail. Anal.*, 2020, Vol. 109. — 104323.
11. **Mo S., Tutuk K., and Saydam S.** Management of floor heave at bulga underground operations — a case study, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2019, Vol. 29, No. 1. — P. 73–78.
12. **Ou X., Ouyang L., Xu X., and Wang L.** Case study on floor heave failure of highway tunnels in gently inclined coal seam, *Eng. Fail. Anal.*, 2022, Vol. 153. — 107598.
13. **Li J., Wang Z., Wang Y., and Chang H.** Analysis and countermeasures of large deformation of deep-buried tunnel excavated in layered rock strata: A case study, *Eng. Fail. Anal.*, 2023, Vol. 146. — 107057.
14. **Ma K., Zhang J., Zhang J., Dai Y., and Zhou P.** Floor heave failure mechanism of large-section tunnels in sandstone with shale stratum after construction: A case study, *Eng. Fail. Anal.*, 2022, Vol. 140. — 106497.
15. **Feng J., Gong L., Wang L., Zhou P., Zhang P., Li Y., and Liu Z.** Study on failure mechanism and treatment measures of floor heave of high-speed railway tunnel in the interbedded surrounding rock with high geostress, *Eng. Fail. Anal.*, 2023, Vol. 150. — 107365.
16. **Yang J. P., Chen W. Z., Zhao W. S., Tan X. J., Tian H. M., Yang D. S., Ma C. S.** Geohazards of tunnel excavation in interbedded layers under high in situ stress, *Eng. Geol.*, 2017, Vol. 230, No. 29. — P. 11–22.

17. **Sun X. M., Zhao C. W., Tao Z. G., Kang H. W., and He M. C.** Failure mechanism and control technology of large deformation for muzhailing tunnel in stratified rock masses, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2021, Vol. 80. — P. 4731–4750.
18. **Tian Y., Shu X., Tian H., He L., Jin Y., and Huang M.** Effect of horizontal stress on the mesoscopic deformation and failure mechanism of layered surrounding rock masses in tunnels, *Eng. Fail. Anal.*, 2023, Vol. 148. — 107226.
19. **Fortsakis P., Nikas K., Marinos V., and Marinos P.** Anisotropic behaviour of stratified rock masses in tunnelling, *Eng. Geol.*, 2012, Vol. 141. — P. 74–83.
20. **Shen P. W., Tang H. M., Zhang B. C., Ning Y. B., and He C.** Investigation on the fracture and mechanical behaviors of simulated transversely isotropic rock made of two interbedded materials, *Eng. Geol.*, 2021, Vol. 268. — 106058.
21. **Kulatilake P. H. S. W., Malama B., and Wang J.** Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2001, Vol. 38, No. 5. — P. 641–657.
22. **Nasseri M. H. B., Rao K. S., and Ramamurthy T.** Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, Vol. 40. — P. 3–23.
23. **Li J., Wang Z., Wang Y., and Chang H.** Analysis and countermeasures of large deformation of deep-buried tunnel excavated in layered rock strata: a case study, *Eng. Fail. Anal.*, 2023, Vol. 146. — 107057.
24. **Song S., Li S., Li L., Shi S., Zhou Z., Liu Z., Shang C., and Sun H.** Model test study on vibration blasting of large cross-section tunnel with small clearance in horizontal stratified surrounding rock, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2021, Vol. 92. — 103013.
25. **Zhao D., He Q., Ji Q., Wang F., Tu H., and Shen Z.** Similar model test of a mudstone-interbedded-sandstone-bedding rock tunnel, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2023, Vol. 140. — 105299.
26. **Nunes M. A. and Meguid M. A.** A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2009, Vol. 24. — P. 716–722.
27. **Sun X., Chen F., He M., Gong W., Xu H., and Lu H.** Physical modelling of floor heave for the deep-buried roadway excavated in ten degree inclined strata using infrared thermal imaging technology, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2017, Vol. 63. — P. 228–243.
28. **Sun X., Zhao C., Zhang Y., Chen F., Zhang S., and Zhang K.** Physical model test and numerical simulation on the failure mechanism of the roadway in layered soft rocks, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2021, Vol. 31, No. 2. — P. 291–302.
29. **TG/GW102-2019.** Rules for maintenance of ordinary speed railway lines, China Railway Publishing House, Beijing, China, 2019.
30. **TG/GW115-2012.** Rules for maintenance of ballastless track lines of high-speed railways, China Railway Publishing House, Beijing, China, 2012.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 28/II 2024

Принята к публикации 14/III 2024