



ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛКИ ТРАНСПОРТНОГО ТОННЕЛЯ

М. О. Лебедев

*ОАО “Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт “Ленметрогипротранс”,
E-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru, ул. Большая Московская 2/1, г. Санкт-Петербург 191002, Россия*

По результатам длительных исследований при строительстве и последующей эксплуатации железнодорожного тоннеля с использованием автоматизированной системы мониторинга получены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния постоянной обделки, выполненной из монолитного железобетона. Установлено, что вибродинамические нагрузки, передаваемые от транспорта на основание тоннеля, влияют на исключение временной незамкнутой крепи из работы с вмещающим массивом.

Транспортный тоннель, вибродинамические нагрузки, напряженно-деформированное состояние, длительные исследования, обделка

**EFFECT OF OPERATING LOADS ON CHANGES IN STRESS-STRAIN STATE
OF TRANSPORT TUNNEL LINING**

M. O. Lebedev

*JSC Research, Design and Survey Institute Lenmetroprotrans,
E-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru, ul. Bolshaya Moskovskaya 2/1, St. Petersburg 191002, Russia*

Based on the results of long-term researches in construction and subsequent operation of a railway tunnel using the automated monitoring system, the formation pattern of the stress-strain state of permanent lining made from cast reinforced concrete was obtained. It is found that vibrodynamic loads from transport to the tunnel foundation affect the exclusion of temporary unclosed support from the work with surrounding rock mass.

Transport tunnel, vibrodynamic loads, stress-strain state, long-term researches, lining

Нормативно-техническая документация РФ не дает ответ на вопрос о том, как распределяются усилия между временными и постоянными несущими конструкциями транспортных тоннелей при взаимодействии с вмещающим массивом в условиях эксплуатации, тем более если временные крепи являются незамкнутыми. Требования к проектированию транспортных тоннелей изложены в [1], где в части расчетов обделок тоннелей даются указания по применяемым методам, но отсутствует информация о том, как учитывать распределение усилий между временными и постоянными конструкциями. Это приводит к необходимости необоснованного исключения временных конструкций из расчетов при обосновании параметров постоянной обделки на стадии проектных работ, либо их учету при расчетах в составе многослойных конструкций.

Так, в Методических рекомендациях [2] отмечено, что при использовании набрызг-бетона, анкеров и металлических арок в качестве временной крепи их рекомендуется учитывать при расчете обделки тоннеля как составную часть всей конструкции”, а при использовании в качестве временной крепи металлических арок в сильнотрещиноватых и слабых грунтах, когда демонтировать арки нельзя по условиям техники безопасности и устойчивости грунтового

массива, их следует учитывать при расчете тоннельной обделки в качестве конструкции, принимающей на себя часть эксплуатационной нагрузки. Там же говорится, что вследствие малого опыта учета временной крепи при расчете постоянной обделки каждый такой случай требует специального теоретического и натурного исследования.

К сожалению, все исследования проводились только при строительстве тоннелей за счет Заказчика строительства или Подрядчика. При эксплуатации транспортных тоннелей формирование напряженно-деформированного состояния обделки прямыми методами (с использованием закладных датчиков) не исследовалось.

Информацию по фактическим величинам напряжений в железобетонной обделке можно получить методом разгрузки на внутреннем контуре [3, 4], но судить по ним о напряженном состоянии обделки без знания величин напряжений на внешнем контуре можно весьма приблизительно. Использование численных методов для подбора схемы нагружения обделки, при которой расчетные напряжения на внутреннем контуре совпадут с напряжениями, определенными методом разгрузки в контрольных точках, тоже решение не идеальное, позволяющее получить требуемый результат с разными комбинациями исходных данных.

Фактическое напряженно-деформированное состояние обделки можно контролировать при помощи измерений конвергенции внутреннего контура с последующим определением напряженно-деформированного состояния кольца по специальным программам и получением коэффициента запаса прочности конструкции при сопоставлении с прочностными характеристиками материала [5]. Но такие работы проводятся, как правило, для тоннелей метрополитенов, которые находятся в эксплуатации долгое время. И здесь возникает вопрос — расчеты выполняются из условия идеальной круглой формы после установки кольца в проектное положение, а так ли это на самом деле? Ведь информации по геометрии кольца после его монтажа нет. Задача значительно усложняется для тоннелей произвольной формы поперечного сечения и при наличии многослойных конструкций. К тому же доступ только к внутренней поверхности обделки не дает возможности судить о работе временной крепи в случае ее наличия.

Цель работы — определение закономерности изменения напряженно-деформированного состояния постоянной монолитной железобетонной обделки транспортного тоннеля при его эксплуатации и причинно-следственных связей полученных изменений.

Объект, методика и результаты исследований. При строительстве Олимпийских тоннелей на трассе Адлер–Альпика–Сервис осуществлялся горно-экологический мониторинг [6]. Одним из тоннелей был железнодорожный тоннель № 1 длиной 2484.34 м (рис. 1), который сооружался в коренных породах казачебродской свиты верхнего мела и мацестинской свиты верхнего палеогена. Наиболее прочными породами — глинистыми и рифогенными известняками казачебродской свиты (K₂kz_b) слагались южная, центральная и большая доля северной части тоннеля, менее прочными — карбонатными серыми аргиллитами с тонкими прослоями алевролитов и песчаников мацестинской свиты (P₃mc) — северный участок тоннеля. Эти породы дополнительно раздроблены и ослаблены под влиянием тектонических нарушений и процессов выветривания.

В соответствии с инженерно-геологическими изысканиями на 47% длины тоннеля породы прочные, слаботрещиноватые, коэффициент крепости по устойчивости $f = 5.0$. На 18.9% длины породы трещиноватые, участками сильно трещиноватые, средней и малой прочности, коэффициент крепости по устойчивости $f = 1.5 - 2.5$. На 34.1% длины породы сильнотрещиноватые, выветрелые мацестинской свиты. Известковистые аргиллиты малой прочности в воздушно-сухом и очень низкой прочности в водонасыщенном состоянии ($R_c = 8.7$ МПа, $R_c^B = 0.45$ МПа). Плотность пород меняется незначительно, в среднем 2.45 г/см³. Породы размягчаемые, коэффициент крепости по устойчивости $f = 0.8 - 1.5$.

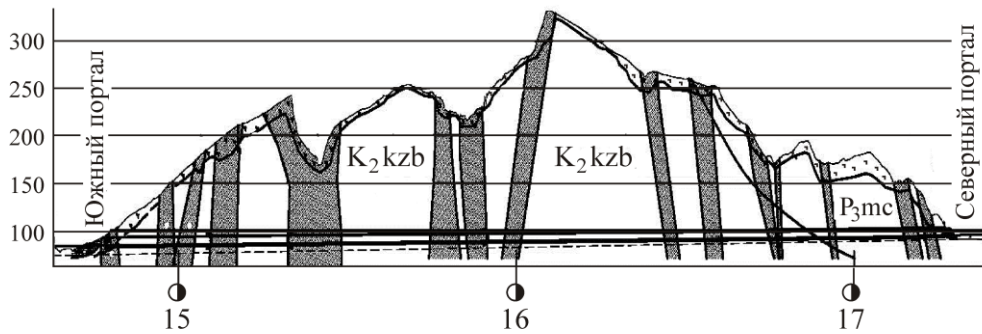


Рис. 1. Продольный разрез тоннеля (темные области — тектонические зоны)

Проходка железнодорожного тоннеля осуществлялась с обоих порталов встречными забоями с разделением сечения тоннеля на части. Сначала проходила калоттная часть с отставанием до 300 м — штрессовая часть. Постоянную обделку из монолитного железобетона возводили после окончания проходки тоннеля на всю длину с использованием стальной передвижной опалубки на рельсовом ходу типа “Saga Cogio”. Перед монтажом арматурного каркаса постоянной обделки по внутреннему контуру временного крепления фиксировали рулонную гидроизоляцию. Проходку вели стреловым проходческим комбайном Alpine Miner AM 75 и ATM 105, на участках прочных пород — буровзрывным способом. Временная крепь на припортальных участках и в тектонических зонах сделана из двутавровых арок N24(27) с шагом 1 м и заполнением межрамного пространства тяжелым бетоном класса B25, либо набрызгбетоном на остальной части тоннеля — из треугольных арматурных арок с шагом 0.53 – 1.5 м и набрызгбетона класса B25.

Одна из задач горно-экологического мониторинга — определение напряженно-деформированного состояния крепи и обделки. Для этого применялись закладные струнные датчики типа ТБ-200. Опытные участки размещались во всех литологических типах пород и тектонических зонах. По длине тоннеля датчиками было оснащено 21 сечение временной крепи и 21 сечение постоянной обделки. Во временной крепи датчики располагались в четырех сечениях на внешнем и внутреннем контурах калоттной и штрессовой частей при использовании арко-бетонной крепи и в восьми сечениях в центре поперечного сечения при использовании арматурных арок с набрызгбетоном. В постоянной обделке в каждом сечении установлено четыре датчика: два на внешнем контуре и два — на внутреннем (рис. 2а).

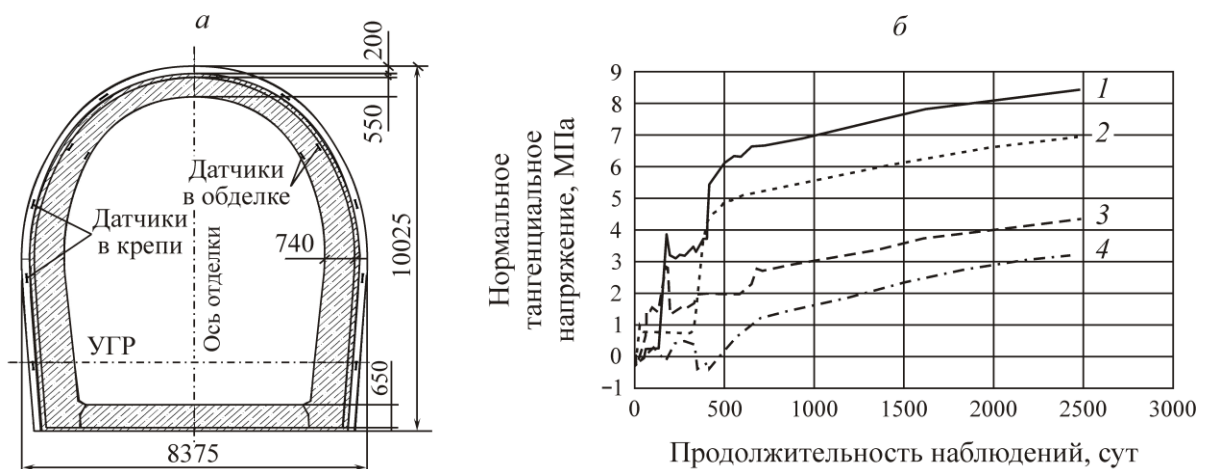


Рис. 2. а — поперечное сечение тоннеля с размещением датчиков в крепи и обделке; б — кривые изменения нормальных тангенциальных напряжений в постоянной обделке в тектонической зоне на средней части тоннеля: 1 — на внешнем контуре с левой стороны; 2 — на внутреннем контуре с левой стороны; 3 — на внешнем контуре с правой стороны; 4 — на внутреннем контуре с правой стороны (УГР — уровень головки рельсов)

На период эксплуатации все датчики, установленные в постоянную обделку, были подключены к автоматизированной системе мониторинга с частотой опроса 1 раз в час. На рис. 2б показаны типовые кривые изменения нормальных тангенциальных напряжений в бетоне постоянной обделки, характерные для большинства опытных участков. На этих кривых можно увидеть участок, соответствующий периоду строительства тоннеля продолжительностью около одного года; большую часть наблюдений составляет период эксплуатации тоннеля.

На момент окончания строительства напряженно-деформированное состояние постоянной обделки стабилизируется. После ввода тоннеля в эксплуатацию выделяется первый год, в течение которого усилия в обделке увеличиваются вдвое, а затем происходит уменьшение скорости приращения усилий, хотя они продолжают увеличиваться.

На рис. 3 показаны кривые изменения нормальных тангенциальных напряжений в бетоне временной крепи. В данном примере опытный участок расположен в той же тектонической зоне, что и опытный участок постоянной обделки, для которого результаты исследований приведены на рис. 2. Здесь также представлен период строительства тоннеля, на котором можно проследить сначала разработку калоттной части тоннеля, а затем раскрытие на полное сечение, и участок, соответствующий периоду эксплуатации тоннеля. Для участка эксплуатации можно отметить, что хотя напряжения по периметру калоттной части крепи увеличились, но это приращение сравнительно незначительное — около 1.5–2.0 МПа (15–20% от напряжений на момент окончания строительства).

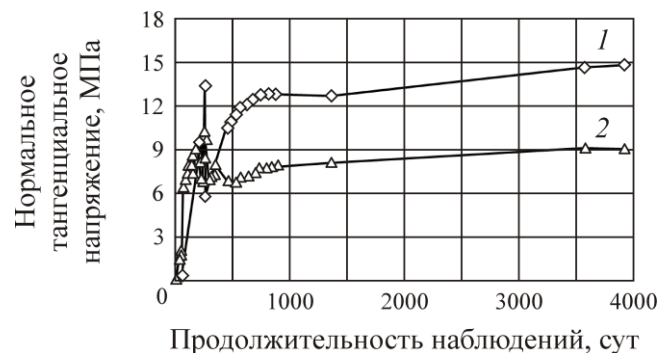


Рис. 3. Кривые развития нормальных тангенциальных напряжений в бетоне временной крепи калоттной части в тектонической зоне на средней части тоннеля: 1 — в своде калотты; 2 — в боку калотты

Анализ результатов исследований. Кривые изменения напряженно-деформированного состояния постоянной обделки при эксплуатации (рис. 2б) характерны для всех опытных участков по длине тоннеля. В работе [7] для тоннеля, расположенного в известняках, показано, что даже с изменением трещиноватости массива абсолютные значения напряжений в обделке отличаются незначительно, а закономерность изменения усилий в обделке после начала эксплуатации аналогичная. Для рассматриваемого тоннеля абсолютные величины напряжений в обделке существенно отличаются лишь при смене литологии. Так, в районе северного портала, где массив представлен аргиллитами, напряжения в обделке в 1.2–1.5 раза больше, чем на участках, где массив представлен известняками. И это несмотря на то, что глубина заложения тоннеля в районе северного портала значительно уступает остальной части тоннеля.

Вибродинамические нагрузки, которые передаются от подвижного состава через обделку на вмещающий массив, способствуют изменению физико-механических свойств пород в приконтурной зоне. Наибольшее влияние в этом случае оказывается на пяту в основании незамкнутой временной крепи, где за счет опорного давления напряжения были максимальными. В процессе

происходящих разрушений отпор в основании крепи снижается и нагрузки, ранее воспринимаемые временной крепью, постепенно передаются на постоянную обделку. При этом за счет значительных касательных напряжений по периметру временной крепи на контакте с окружающим массивом снижения нормальных тангенциальных напряжений в боках и своде крепи не отмечается, что видно на рис. 3. Таким образом временная крепь становится частью вмещающего массива, находящегося в своем напряженном состоянии.

Такие же последствия вызывает еще один фактор — водонасыщение вмещающего массива. В ряде лабораторных исследований свойств горных пород [8–11], в частности известняков, определено, что влагонасыщение образцов существенно влияет на физико-механическое состояние горных пород. Испытания образцов известняка на одноосных прессах [12] показывают, что значения пределов прочности для сухого и водонасыщенного образцов отличаются примерно в 2.5 раза, а модуля упругости — примерно в 1.4 раза.

При раскрытии сечения тоннеля породы находятся в сухом состоянии, но в соответствии с исполнительной геологической документацией на всем протяжении тоннеля фиксировалось наличие капеза по существующей и техногенной системе трещиноватости. Постепенно по контакту “крепь – вмещающий массив” происходит обводнение всего периметра тоннеля с указанными ранее последствиями.

Воздействие вибродинамических нагрузок от подвижного состава рассматривается в работах [13–15], в которых изучается влияние сейсмических волн техногенной природы на вмещающий массив. Циклическое нагружение многократного приложения к горным породам приводит к эффекту усталости и снижению прочностных свойств [16, 17].

В работе [18] приведены результаты испытаний образцов известняка на циклическое нагружение. При времени одного цикла 40–50 с минимальная нагрузка за цикл составляла 2 МПа (10% предела прочности), а максимальная — 10 МПа (65% прочности). Данные измерений прочности образцов в процессе испытаний представлены на рис. 4, где видно, что за первые 50 циклов прочность образцов снизилась на 30%, а затем она стабилизировалась. В таком виде результаты лабораторных исследований к натурным применить невозможно из-за несоответствия максимальных и минимальных нагрузок, наличия объемного напряженного состояния в натурных исследованиях, кроме того, максимальное количество циклов в лабораторных условиях меньше количества циклов от подвижного состава в тоннеле за одни сутки. В реальных условиях этот процесс намного продолжительнее. Тем не менее, закономерности аналогичные, поэтому необходимо формулировать постановку задач для дальнейших исследований, обосновывающих качественное и количественное изменение напряженно-деформированного состояния обделки транспортных тоннелей при их эксплуатации в условиях вибродинамических нагрузок от подвижного состава.

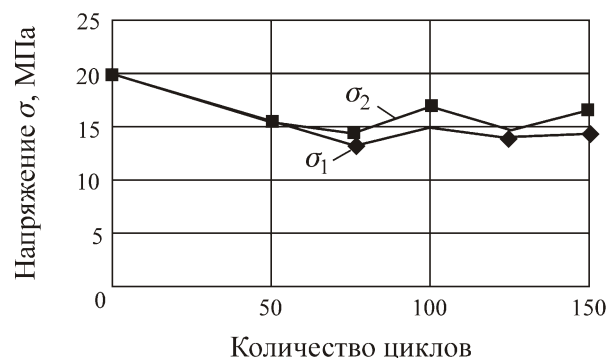


Рис. 4. Результаты измерения прочности образцов после циклических нагружений в одном σ_1 и в двух σ_2 направлениях в зависимости от количества циклов [18]

ВЫВОДЫ

В результате длительных исследований напряженно-деформированного состояния временной крепи и постоянной обделки железнодорожного тоннеля, расположенного в известняках, выявлено, что водонасыщение пород и вибродинамические нагрузки, которые передаются от подвижного состава через обделку на вмещающий массив, способствуют изменению физико-механических свойств пород в приконтурной зоне. Наибольшее влияние в этом случае оказывается на пяту в основании незамкнутой временной крепи, где за счет опорного давления напряжения и так были максимальными. В процессе происходящих разрушений отпор в основании крепи снижается и нагрузки, ранее воспринимаемые временной крепью, постепенно передаются на постоянную обделку. Данные исследования согласуются с результатами лабораторных исследований отечественных и зарубежных ученых по влиянию влажности пород и наличия техногенных сейсмических (вибродинамических) нагрузок на изменение деформационно-прочностных свойств массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Set of rules 122.13330.2012. Tunnels railway and road, Moscow, 2012, 132 pp.** [СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. — М., 2012. — 132 с.]
2. **Recommended Practice for Design of Initial Tunnel Support Systems, Moscow, TsNIIS of the USSR Ministry of Transport, 1984, 62 pp.** [Методические рекомендации по расчету временной крепи тоннельных выработок. — М.: ЦНИИС Минтранстроя СССР, 1984. — 62 с.]
3. **Bezrodnyi K. P. and Lebedev M. O.** The field surveys of the stress-strain state of the “timbering-solid mass” during construction of the transport tunnels, *Fundamental and Applied Mining Science, Novosibirsk, 2011, pp. 233–238.* [Безродный К. П., Лебедев М. О. Натурные исследования напряженно-деформированного состояния системы обделка–массив при строительстве транспортных тоннелей // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — Новосибирск, 2011. — С. 233–238.]
4. **Bykova N. M., Isaikin A. S., Morgunov A. N., and Zainagabdinov D. A.** Measurement of deformations in walls of timbering and in concrete of the railway track of the North Muisky tunnel using the photoelastic sensors, *State of the art technologies, System analysis, Irkutsk, Simulation. Irkutsk state transport university, 2007, no. 1(13), pp. 69–74.* [Быкова Н. М., Исайкин А. С., Моргунов А. Н., Зайнагабдинов Д. А. Измерения деформаций в стенах обделки и путевом бетоне Северо-Муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — Иркутск: ИрГУПС, 2007. — № 1(13). — С. 69–74.]
5. **Garber V. A.** The Metro. Life duration of the tunnel structures during operation and urban construction, Moscow, Scientific and research center “Tunnels and Metro” Central scientific research institute of construction JSC, 1998, 172 pp. [Гарбер В. А. Метрополитен долговечность тоннельных конструкций в условиях эксплуатации и городского строительства. — М.: НИЦ “Тоннели и метрополитены” АО ЦНИИС, 1998. — 172 с.]
6. **Bezrodnyi K. P. and Lebedev M. O.** Mining and environmental monitoring during the construction and operation of the North Caucasian transport tunnels. *Internet-Journal “Naukovedenie”, 2014, no. 5 (24).* [Безродный К. П., Лебедев М. О. Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей Северного Кавказа // Интернет-журнал “Науковедение”. — 2014. — № 5 (24) – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik5/24.pdf>]
7. **Lebedev M. O.** Stress-strain state of supports and linings of a transport tunnel in limestones, *Bulletin of the Tula State University, Earth Sciences, Tula, 2019, vol. 4, pp. 258–268.* [Лебедев М.О. Напряженно-деформированное состояние крепей и обделок транспортного тоннеля в известняках // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — Тула, 2019. — Вып. 4. — С. 258–268.]

8. **Lu Y., Wang L., Sun X., and Wang J.** Experimental study of the influence of water and temperature on the mechanical behavior of mudstone and sandstone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, vol. 76, pp. 645–660.
9. **Si W., Di B., Wei J., and Li Q.** Experimental study of water saturation effect on acoustic velocity of sandstones, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 33, pp. 37–43.
10. **Carpinteri A., Iacidogna G., Borla O., Manuello A., and Niccolini G.** Electromagnetic and neutron emissions from brittle rocks failure: experimental evidence and geological implications, *Sadhana*, 2012, vol. 37, no. 1, pp. 59–78.
11. **Rabat A., Cano M., and Tomas R.** Effect of water saturation on strength and deformability of building calcarenite stones: Correlations with their physical properties. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 232, 117259.
12. **Blokhin D. I., Ivanov P. N., and Dudchenko O. L.** Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation, *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 3–11. [Блохин Д. И., Иванов П. Н., Дудченко О. Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 3–11].
13. **Tulebaev K. K.** The destruction of the free surface of a rock mass under the action of seismic waves. *Vzryvnoe delo*, 2012, no. 107/64, pp. 289–295. [Тулебаев К. К. Разрушение свободной поверхности массива горных пород под действием сейсмических волн // Взрывное дело. — 2012. — № 107/64. — С. 289–295].
14. **Cerfontaine B. and Collin F.** Cyclic and Fatigue Behaviour of Rock Materials: Review, Interpretation and Research Perspectives. *Rock Mech Rock Eng.*, 2018, vol. 51, pp. 391–414.
15. **Braunagel M. J. and Griffith W. A.** The Effect of Dynamic Stress Cycling on the Compressive Strength of Rocks, *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 49, issue 12, pp. 6479–6486.
16. **Jamali S., Hashemolhosseini H., Baghbanan A., Khoshkam M., and Haghgoei H.** Evaluating Fatigue in Crystalline Intact Rocks under Completely Reversed Loading. *Geotechnical Testing Journal*. 2017, vol. 40, no 5, pp. 789–797.
17. **Wang S., Xu W., Sun M., and Wang W.** Experimental investigation of the mechanical properties of fine-grained sandstone in the triaxial cyclic loading test. *Environmental Earth Science*, 2019, 78(14):416.
18. **Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., and Tavostin M. N.** Peculiarities of the impact of consecutive periodic biaxial cyclic loading on the strength and acoustic properties of limestone, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2019, no. 10, pp. 117–130. [Вознесенский А. С., Красилов М. Н., Куткин Я. О., Тавостин М. Н. Особенности воздействия последовательных периодических двухосных циклических нагружений на прочность и акустические свойства известняков // ГИАБ. — 2019. — № 10. — С. 117–130.]