ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(4-1):52–61
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 620.179.17+539.421 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_52

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Н. Г. Борисов[1], О. Д. Белов[1], А. А. Гапеев[1]

[1] Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»
Горный институт, Москва, Россия

Аннотация: Ужесточение требований к безопасности зданий и сооружений критической инфраструктуры требует корректной оценки физико-механических свойств строительных материалов и определения критериев предельного состояния их работоспособности, при котором возможны образования магистральных трещин. В работе проведены механические испытания кернов цементных элементов, отобранных с разных глубин, для которых определены средние значения прочности на одноосное сжатие и растяжение, найдены модули деформации. Для образцов бетона С28/35 в виде дисков толщиной 5–10 мм исследована внутренняя структура на автоматизированном лазерном ультразвуковом дефектоскопе УДЛ 2М, измерены скорости продольных волн, значения которых лежали в пределах 3820–4330 м/с. Показано, что во внутренней структуре наблюдаются трещины не более 3 мм. Оставшаяся серия образцов подвергались одноосному сжатию с одновременной регистрацией акустической эмиссии. Установлено, что резкое увеличение активности акустической эмиссии наблюдалось, если напряжение достигало $0{,}7R_c$ и $0{,}7R_p$, где R_c и R_p – пределы прочности, соответственно, на одноосное сжатие и растяжение. Последующее исследование образцов на рентгеновском томографе показало, что при $0{,}7R_c$ и $0{,}7R_p$ в них появляются магистральные трещины. Показано, что если в модели Кулона-Мора при расчете напряженно-деформированного состояния учитывать предельное состояние работоспособности, а R_c и R_p заменить, соответственно, на $0{,}7R_c$ и $0{,}7R_p$, то в 1,5 раза уменьшается сцепление, со значения 7,5 МПа до 5 Мпа, и на 3 % уменьшается угол внутреннего трения.

Ключевые слова: образцы бетона, предел прочности при одноосном сжатии, лазерный ультразвук, скорости продольных волн, акустическая эмиссия, активность, рентгеновская томография, внутренняя структура..

Для цитирования: *Борисов Н. Г., Белов О. Д., Гапеев А. А.* Исследование процесса образования магистральных трещин в образцах бетона при механических испытаниях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4-1. – С. 52–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_52.

Research of the process of formation of main cracks in samples of concrete during mechanical tests

N. G. Borisov[1], O. D. Belov[1], A. A. Gapeev[1]

[1] National University Science of Technology MISIS, Mining Institute, Moscow, Russia

© Н. Г. Борисов, О. Д. Белов, А. А. Гапеев. 2021

Abstract: More strict safety requirements for buildings and structures of critical infrastructures imply that the physical and mechanical properties of construction materials should be correctly assessed and criteria should be established for their durability limit conditions under which main cracks may appear. The paper describes mechanical tests of cores from cement elements obtained from different depths, determining the average values of uniaxial compressive strength, tensile strength, and deformation moduli. The internal structure of C28/35 concrete specimens (disks 5–10 mm thick) was examined with a UDL 2M automated laser ultrasonic flaw detector; longitudinal wave velocities were measured, the values of which ranged from 3820 m/s to 4330 m/s. Cracks no more than 3 mm long were detected in the specimens. The remaining specimens were subjected to uniaxial compression and their acoustic emission was simultaneously measured. A sharp increase in the activity of acoustic emission was observed when the stress reached 0.7Rc and 0.7Rp, where Rc and Rp are the ultimate uniaxial compressive and tensile strengths, respectively. Subsequent examination of the specimens with X-ray showed that main cracks appear at $0.7R_c$ and $0.7R_p$. It is shown that cohesion decreases from 7.5 MPa to 5 MPa and the angle of internal friction decreases by 3 % if stress-state simulation using the Coulomb-Mohr model takes into account the limit state of concrete durability and replaces R_c and R_p by $0.7R_c$ and $0.7R_p$, respectively.

Key words: concrete samples, axial compression strength, laser ultrasound, longitudinal wave velocities, acoustic emission, activity, x-ray tomography.

For citation: Borisov N. G., Belov O. D., Gapeev A. A. Research of the process of formation of main cracks in samples of concrete during mechanical tests. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):52–61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_52.

Введение

Ужесточение требований к безопасности зданий и сооружений привело к необходимости улучшения физико-механических свойств и долговечности строительных материалов, применяемых при строительстве, реконструкции и ремонте. Наиболее широко применяемые цементные бетоны, обладая высокой прочностью на сжатие, имеют сравнительно низкие показатели прочности при растяжении и изгибе [1, 2]. Задачи получения высокопрочных и высококачественных бетонов прочностью на сжатие 100 МПа и выше, необходимых при строительстве высотных зданий, платформ для нефтедобычи в морях и на океанических шельфах и других уникальных сооружений, стали очень актуальными.

С другой стороны, интенсификация строительства объектов критической инфраструктуры в условиях плотной городской застройки привела к необходимости улучшения физико-механических свойств бетонов, используемых для укрепления фундаментов существующих зданий и грунтов, а также контроля их состояния и структуры [3–5].

Растрескивание и появление трещин является распространенным явлением в бетонных конструкциях [1, 2]. Поэтому любой контроль начинается с визуального осмотра для выявления и классификации поверхностных трещин, который является субъективным, и ограничен доступными местоположениями нарушенности структуры [3–5]. Дальнейшее исследование объектов из гетерогенных материалов связано с разрушающими методами при различных схемах нагружения [6], а также полуразрушающим механическим испытанием с одновременным измерением акустической эмиссии (АЭ) [7] или с неразрушающем контролем, например, на основе георадиолокации [8], термографии [9], сейсмотомографии [5, 10], ультразвука [10, 11].

Усовершенствованные стратегии проектирования и численного моделирования состояния бетонных конструкций должны включать не только критерии расчета их предельного состояния [12], но и критерия предельного состояния работоспособности, при котором становится возможным образование магистральных трещин [13].

Поведение образцов хрупких материалов при одноосном сжатии можно разделить на несколько этапов. На первом этапе при одноосном сжатии наблюдается закрытие ранее существовавших трещин и соответствующий данному процессу низкий уровень АЭ. На втором этапе при дальнейшем увеличении приложенной нагрузки напряжения и деформации связаны линейной зависимостью, рост микротрещин практически не происходит, активность АЭ также незначительна. На третьем этапе наблюдается стабильное распространение микроразрывов и дилатансия. Данные явления приводят к увеличению АЭ активности C_{Σ}. Зависимость суммарного счета АЭ от напряжения квазилинейна, и можно оценить значение тангенса угла наклона прямой C_{Σ}. Наконец, происходит нестабильное распространение микротрещин, стремительное увеличение активности АЭ, сопровождающееся резким увеличением тангенса угла наклона прямой C_{Σ} [14]. Разрушение образца при этом еще не происходит, но появляются магистральные трещины, приводящие к потере работоспособности объекта.

В настоящей работе с использованием АЭ, лазерной ультразвуковой структуроскопии и рентгеновской томографии исследован процесс трещинообразования в образцах бетона и выполнена оценка напряжения при одноосном сжатии образцов, при котором в них появляются магистральные трещины.

Материал и методы

Исследовались 16 образцов бетона, выбуренных из нескольких свай фундамента. С использованием пресса ТП-1—1500 и тензостанции был измерен предел прочности при одноосном сжатии и построены кривые деформирования для 8 цилиндрических образцов (диаметром 42±2 мм и высотой 80±2 мм). С использованием деформационных кривых были найдены статический модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν. Данные статических измерений приведены в табл. 1. Среднее значение предела прочности при одноосном сжатии составило 44,2 МПа при дисперсии 1,8 МПа, что соответствовало классу бетона С28/35. Для четырех образцов был определен предел прочности на растяжение при раскалывании, среднее значение которого составило R_p = 8,9 МПа. Из двух образцов были изготовлены диски толщиной 5–10 мм, внутренняя структура которых исследовалась в дальнейшем на лазерном ультразвуковом дефектоскопе УДЛ 2М. Оставшиеся 4 образца подвергались одноосному сжатию с одновременной регистрацией акустической эмиссии и последующей рентгеновской томографией.

Исследование внутренней структуры образцов бетонов проводилось на автоматизированном лазерно-ультразвуковом дефектоскопе. В оптико-акустическом генераторе дефектоскопа возбуждались широкополосные ультразвуковые импульсы [15]. Данные импульсы рассеивалась и отражались от неоднородностей среды. Регистрировались акустические треки, состоящие из данных импульсов, по которым строились изображения внутренней структуры образцов [16–18]. Скорость продольных ультразвуковых волн в исследуемом образце определялась

Таблица1
Физико-механические свойства исследуемых образцов
Physico-mechanical properties of the studied samples

№	Плотность ρ, кг/м³	Модуль упругости *E*, ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	Предел прочности, R_c, МПа
1	2520	35,6	0,17	43,3
2	2560	37,2	0,16	45,7
3	2480	34,8	0,18	43,9
4	2570	36,3	0,17	45,2
5	2490	33,7	0,16	42,8
6	2470	33,5	0,16	44,6
7	2540	35,1	0,17	43,5
8	2580	35,3	0,17	44,5

по разности времен прихода на пьезоприемник минимума ультразвукового импульса, отраженного от тыльной поверхности образца, и экстремума импульса, отраженного от границы раздела оптико-акустический источник — образец (максимума — в случае, когда акустический импеданс исследуемой среды больше импеданса источника, и минимума — в противоположном случае). Регистрация параметров сигналов АЭ осуществлялась с использованием системы контроля СДС1008 с пьезопреобразователем GT-1200. Управление всеми блоками системы, регистрация, обработка, анализ и графическое отображение всей информации о наблюдаемой АЭ осуществлялось с персонального компьютера с программным обеспечением «Маэстро». Общий вид системного блока СДС1008 представлен на рис. 1, предусилитель с пьезопреобразователем, прикрепленном к образцу, приведены на рис. 2.

Результаты

Измерения скоростей распространения продольных волн в образцах бетона проводились с шагом 2 мм по поверхности. Их значения лежали в пределах 3820–4330 м/с. Столь значительный разброс в скоростях (почти в 13 %) был обусловлен наличием микротрещин. На рис. 3 приведено 2D изображение внутренней структуры

Рис. 1. АЭ система СДС1008
Fig. 1. AE system SDS1008

Рис. 2. Образец, пьезопреобразователь и предусилитель
Fig. 2. Sample, piezoelectric transducer and preamplifier

одного из образцов бетона, построенное по измеренным акустическим трекам. Сканирование проводилось по области протяженностью 28 мм. Более темные области свидетельствовали либо о незначительном разуплотнении (рис. 3), либо о наличии трещин до проведения испытаний. Так на глубине порядка 4 мм наблюдалась трещина протяженностью 3 мм.

Таким образом, несмотря на то, что предел прочности на одноосное сжатие достигал величины 44,5 МПа, в образцах бетона изначально присутствовали области разуплотнения и микротрещины.

Для определения напряжений, приводящих к формированию магистральных трещин, в данных образцах исследовалась АЭ. На рис. 4 для одного из образцов приведен график зависимости АЭ активности C_{Σ} от приложенного напряжения σ. Видно, что данный график можно аппроксимировать двумя касательными, пересекающимися в точке, соответствующей напряжению порядка 30 МПа. При значениях напряжений, больших 30 МПа резко возрастает активность АЭ, что свидетельствует о переходе процесса трещинообразования в нестационарный режим. Данный режим должен приводить к слиянию микротрещин в магистральную. Для подтверждения развития этого процесса дальнейшее нагружение образцов прекращалось, а их внутренняя структура исследовалась на компьютерном рентгеновском микротомографе.

На рис. 5 для того же самого образца приведены два среза: до воздействия (рис. 5, *а*) и после снятия напряжения, равного 32,5 МПа (рис. 5, *б*). На рис. 5, *б* видна магистральная трещина, образовавшаяся в данном образце при напряжении, составляющем всего лишь $0{,}73R_c$. Аналогичные результаты получились и при тестах на растяжение раскалыванием: магистральная трещина появлялась при $0{,}70R_p$.

Обсуждение

Исследование серии образцов бетона показало, что при их одноосном сжатии магистральные трещины образуются, если напряжение достигает 69–74 % от предела прочности. При наличии магистральной трещины образец, хотя и не распадается на отдельные части, теряет свою работоспособность.

Все приведенные в лабораторных условиях эксперименты нужны, в первую очередь, для того, чтобы с их помощью определить значения тех параметров, которые закладываются в различные программные пакеты для численного моделирования устойчивости грунтов и выработок. Оценим, как изменяются данные параметры, если вместо предельного состояния использовать предельное состояние работоспособности.

Рассмотрим простейшую модель устойчивого состояния Кулона — Мора, в которую вводится четыре величины: модуль упругости, коэффициент Пуассона, сцепление, угол внутреннего трения. Если учитывать предельное состояние работоспособности, и при построении кругов Мора R_c и R_p заменить, соответственно, на $0{,}7R_c$ и $0{,}7R_p$, то должны измениться сцепление и угол внутреннего трения. Построенные таким образом круги приведены на рис. 6. Из построения видно, что угол внутреннего трения меняется незначительно. Другая ситуация наблюдается со сцеплением. Если при построении по ГОСТ 21153.8—88 значение сцепления составило 7,5 МПа, то при учете предела работоспособности, связанного с образованием магистральных трещин, данное значение уменьшилось до 5 МПа, то есть в 1,5 раза. Угол внутреннего трения изменился всего на 3 %.

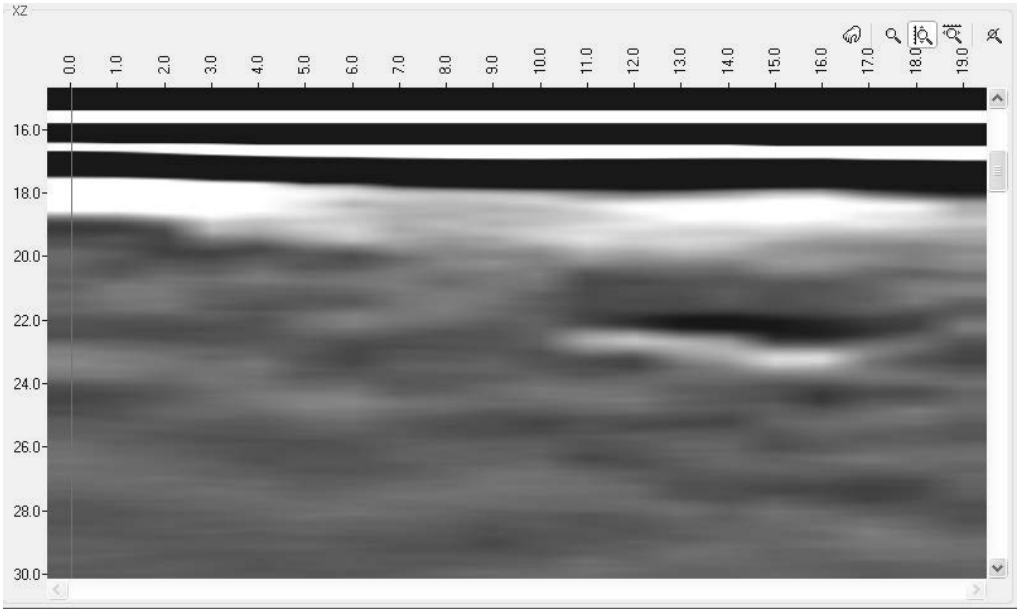


Рис. 3. 2D изображение внутренней структуры одной из областей образца
Fig. 3. 2D image of the internal structure of one of the sample areas

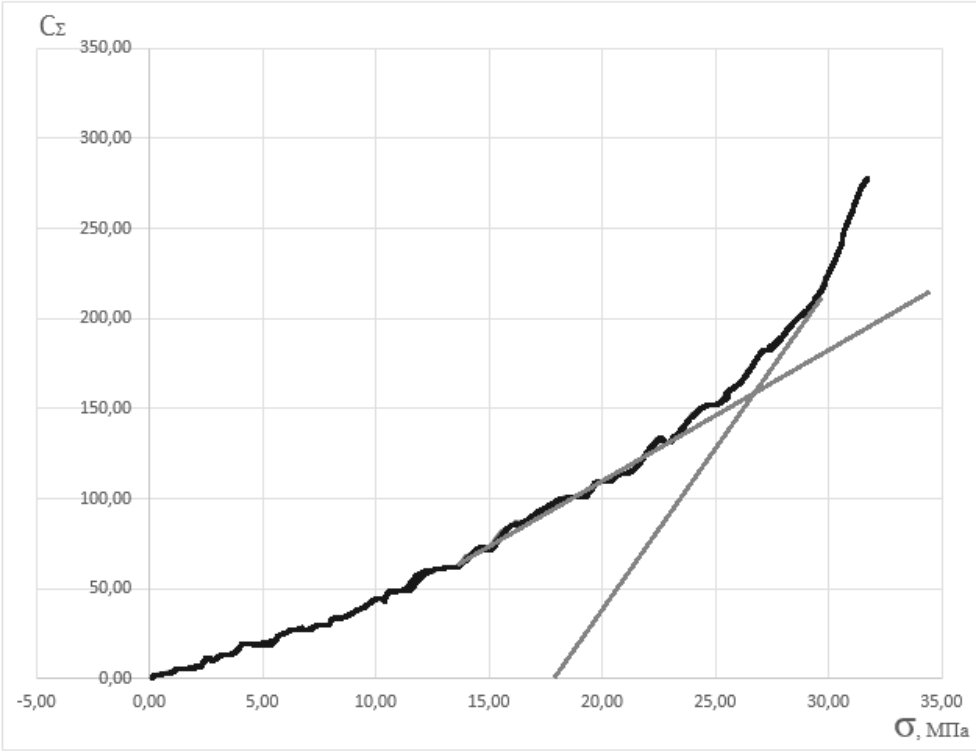
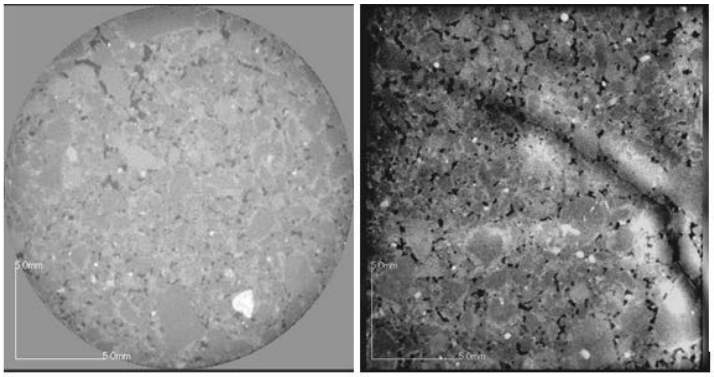


Рис. 4. Зависимость АЭ активности от напряжения
Fig. 4. Dependence of AE activity from stress



а б

Рис. 5. Два томографических среза на глубине 20 мм: а — до воздействия, б — после воздействия

Fig. 5. Two tomographic sections at a depth of 20 mm: a — before exposure, b — after exposure

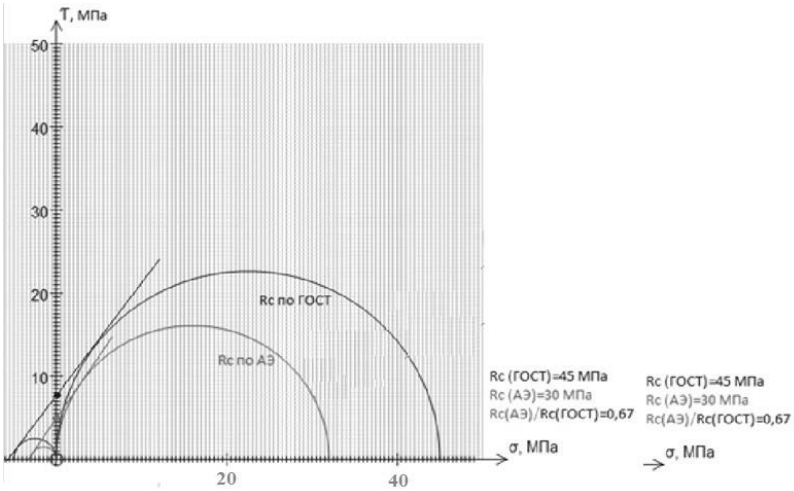


Рис. 6. Круги Мора, построенные согласно ГОСТ 21153.8—88 с использованием R_c и R_d (большие круги), а также $0{,}7R_c$ и $0{,}7R_d$ (малые круги)

Fig. 6. Mohr circles constructed by GOST 21153.8—88 using R_c and R_d (large circles) and $0{,}7R_c$ and $0{,}7R_d$ (small circles)

Заключение

Проведенное исследование показало, что при проектировании объектов критической инфраструктуры необходимо учитывать возможность образования магистральных трещин в изделиях из бетона. Последние образовываются при значениях напряжения, примерно в 1,4 раза меньших, чем предел прочности на одноосное сжатие.

Сцепление также при этом уменьшается в 1,5 раза. Менее чувствительным оказался угол внутреннего трения: его значение практически не изменилось.

В работе показано, что одним из наиболее чувствительных методов определения напряжений, при которых происходит образование магистральных трещин, является АЭ, активность которой резко возрастает в случае

нестабильного распростанения и слияния микротрещин.

Таким образом, при проектировании сложных объектов необходимо учитывать предел работоспособности, а не предел прочности на одноосное сжатие.

Благодарности

Авторы признательны д.т.н проф. Е. Б. Черепецкой (НИТУ «МИСиС») за внимание к работе и помощь при проведении лазерно-ультразвуковых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hou T.-C.*, *Lynch J. P.* Electrical impedance tomographic methods for sensing strain fields and crack damage in cementitious structures // Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, Vol. 20, no. 11, pp. 1363–1379. DOI: 10.1177/1045389X08096052.

2. *Bosque I. F.*, *Heede P. V.*, *Belie N. D.*, *Sanchezde M. I.*, *Medina R. C.* Freeze-thaw resistance of concrete containing mixed aggregate and construction and demolition waste-additioned cement in water // Construction and Building Materials, 2020, Vol. 259. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119772.

3. *Li V.*, *Herbert E.* Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure // Journal of Advanced Concrete Technology, 2012, Vol. 10, no. 6, pp. 207—218. DOI: 10.3151/jact.10.207.

4. *Mengel L.*, *Krauss H. W.*, *Lowke D.* Water transport through cracks in plain and reinforced concrete — Influencing factors and open questions // Construction and Building Materials, 2020, Vol. 254. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118990.

5. *Шейнин В. И.*, *Блохин Д. И.*, *Гайсин Р. М.*, *Максимович И.* Б, Максимович Ил. Б., *Ходарев В. В.* Комплексная диагностика технического состояния монолитной «стены в грунте» после длительной консервации // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2014. — № 4. — С. 19—24. DOI: 10.1007/s11204—014—9277—5.

6. *Шейнин В. И.*, *Дзагов А. М.*, *Костенко Е. С.*, *Манжин А. П.*, *Блохин Д. И.*, *Максимович И.* Б, *Соболева В. Н.* Определение прочностных характеристик бетона буровых свай по испытаниям образцов из выбуренного керна // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2016. — № 2. — С. 26—30. DOI: 10.1007/s11204-016-9374-8.

7. *Tschegg E. K.*, *Schneemayer A.*, *Merta I.*, *Rieder K. A.* Energy dissipation capacity of fibre reinforced concrete under biaxial tension compression load. Part II: Determination of the fracture process zone with the acoustic emission technique // Cement and Concrete Composites, 2015, Vol. 62, pp. 187—194. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.07.003.

8. *Lai W. W.-L.*, *Derobert X.*, *Annan P.* A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis // NDT & E International, 2018, Vol. 96, pp. 58—78. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.04.002.

9. *Чулков А. О.*, *Вавилов В. П.*, *Московченко А. И.* Активный тепловой контроль отслоений в теплозащитных конструкциях // Дефектоскопия. — 2019. — № 3. — С. 58—65. DOI: 10.1134/S0130308219030102.

10. *Melnikov N. N.*, *Mesyats S. P.*, *Ostapenko S. P.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Shibaev I. A.*, *Morozov N. A.*, *Kravcov A. N.*, *Konvalinka A.* Investigation of disturbed rock zones in open-pit mine walls by seismic tomography // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 755, pp. 147—152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.147.

11. *Шейнин В. И.*, *Дзагов А. М.*, *Блохин Д. И.*, *Смилянский А. Л.* Оценка качества и прочности бетона с использованием данных ультразвуковых испытаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2012. — № 4. — С. 6—11. DOI: 10.1007/s11204-012-9179-3.

12. *Черданцев Н. В.* Исследование предельно напряженного состояния пласта в его краевой зоне методами механики сыпучей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 45–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-45-57.

13. *Shilko E. V.*, *Dimaki A. V.*, *Psakhie S. G.* Strength of shear bands in fluid-saturated rocks: a nonlinear effect of competition between dilation and fluid flow // Scientific Reports, 2018, Vol. 8. Article number: 1428. DOI: 10.1038/s41598-018-19843-8.

14. *Лавров А. В.*, *Шкуратник В. Л.*, *Филимонов Ю. Л.* Акусто-эмиссионный эффект памяти в горных породах. — Москва: Издательство МГГУ, 2004. — 456 с.

15. *Shibaev I. A.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Bychkov A. S.*, *Zarubin V. P.*, *Ivanov P. N.* Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser ultrasonic tomography // International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018, Vol. 9, pp. 84—92.

16. *Karabutov A. A.*, *Podymova N. B.*, *Cherepetskaya E. B.* Determination of Uniaxial Stresses in Steel Structures by the Laser-Ultrasonic Method // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2017, Vol.58, Issue 3, pp. 503—510. DOI: 10.15372/PMTF20170315.

17. *Zarubin V.*, *Bychkov A.*, Simonova, V., *Zhigarkov V.*, *Karabutov A.*, *Cherepetskaya E.* A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser-ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile // Applied Physics Letters, 2018, Vol. 112, № 214102,. DOI: 10.1063/1.5030586.

18. *Kravcov A.*, *Svoboda P.*, *Konvalinka A.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Sas I. E.*, *Morozov N. A.*, *Zatloukal J.* Evaluation of crack formation in concrete and basalt specimens under cyclic uniaxial load using acoustic emission and computed X-Ray Tomography // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 722, pp. 247—253.DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.247. ГИАБ

REFERENCES

1. Hou T.-C. Lynch J. P. Electrical impedance tomographic methods for sensing strain fields and crack damage in cementitious structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, Vol. 20, no. 11, pp. 1363–1379. DOI: 10.1177/1045389X08096052.

2. Bosque I. F. Heede P. V. Belie N. D. Sanchezde M. I. Medina R. C. Freeze-thaw resistance of concrete containing mixed aggregate and construction and demolition waste-additioned cement in water. *Construction and Building Materials*, 2020, Vol. 259. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119772.

3. Li V. Herbert E. Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2012, Vol. 10, no. 6, pp. 207—218. DOI: 10.3151/jact.10.207.

4. Mengel L. Krauss H. W. Lowke D. Water transport through cracks in plain and reinforced concrete — Influencing factors and open questions. *Construction and Building Materials*, 2020, Vol. 254. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118990.

5. Sheinin V. I. Blokhin D. I. Gaisin R. M. Maksimovich I. B. Maksimovich Il. B. Khodarev V. V. Complex diagnostics of the technical condition of a monolithic “diaphragm-wall” after long-term conservation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2014, Vol. 56, no. 4, pp. 196 — 203. https://doi.org/10.1007/s11204-014-9277-5 [In Russ.

6. Sheinin V. I. Dzagov A. M. Kostenko E. S. Manzhin A. P. Blokhin D. I. Maksimovich I. B. Soboleva V. N. Determining the Strength Characteristics of Concrete in Drilled Piles from Tests on Extracted Core Specimens. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, Vol. 53, no. 2, pp. 119—124. https://doi.org/10.1007/s11204-016-9374-8 [In Russ.

7. Tschegg E. K. Schneemayer A. Merta I. Rieder K. A. Energy dissipation capacity of fibre reinforced concrete under biaxial tension compression load. Part II: Determination of the fracture process zone with the acoustic emission technique. Cement and Concrete Composites, 2015, Vol. 62, pp. 187—194. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.07.003.

8. Lai W. W.-L. Derobert X. Annan P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. NDT & У International, 2018, Vol. 96, pp. 58—78. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.04.002.

9. Chulkov A. O. Vavilov V. P. Moskovchenko A. I. Active thermal control of delamination in thermal protection structures. *Russian Journal of no.ndestructive Testing*, 2019, no. 3, pp. 58 — 65. [In Russ]. DOI: 10.1134/S0130308219030102. [In Russ

10. Melnikov N. N. Mesyats S. P. Ostapenko S. P. Cherepetskaya E. B. Shibaev I. A. Morozov N. A. Kravcov A. N. Konvalinka A. Investigation of disturbed rock zones in open-pit mine walls by seismic tomography. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 755, pp. 147 — 152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.147.

11. Sheinin V. I. Dzagov A. M. Blokhin D. I. Smilyanskii A. L. Use of ultrasonic-test data for quality and strength evaluation of concrete. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2012, Vol. 49, no. 4, pp. 124 — 131. https://doi.org/10.1007/s11204-012-9179-3 [In Russ

12. Cherdancev N. V. Investigation of the stress state of the edge zone of the reservoir by the methods of mechanics of a granular medium. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 45–57. [In Russ] DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-45-57. [In Russ

13. Shilko E. V. Dimaki A. V. Psakhie S. G. Strength of shear bands in fluid-saturated rocks: a nonlinear effect of competition between dilation and fluid flow. Scientific Reports, 2018, Vol. 8. Article number: 1428. DOI: 10.1038/s41598 — 018 — 19843 — 8.

14. Lavrov A. V. Shkuratnik V. L. Filimonov Yu. L. *Akusto-emissionnyj effekt pamyati v gornyh porodah* [Acoustic emission memory effect in rocks], Moscow, Publishing house MGGU, 2004, 456 p. [In Russ].

15. Shibaev I. A. Cherepetskaya E. B. Bychkov A. S. Zarubin V. P. Ivanov P. N. Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser ultrasonic tomography. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, Vol. 9, pp. 84 — 92.

16. Karabutov A. A. Podymova N. B. Cherepetskaya E. B. Determination of Uniaxial Stresses in Steel Structures by the Laser-Ultrasonic Method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, Vol.58, Issue 3, pp. 503 — 510; 146 — 155. DOI: 10.15372/PMTF20170315.

17. Zarubin V. Bychkov A. Simonova V. Zhigarkov, V. Karabutov A. Cherepetskaya E. A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser-ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile. Applied Physics Letters, 2018, Vol. 112, no. 214102,. DOI: 10.1063/1.5030586.

18. Kravcov A. Svoboda P. Konvalinka A. Cherepetskaya E. B. Sas I. E. Morozov N. A. Zatloukal J. Evaluation of crack formation in concrete and basalt specimens under cyclic uniaxial load using acoustic emission and computed X-Ray Tomography. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 722, pp. 247 — 253.DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.247

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисов Никита Геннадьевич[1] — аспирант, bng@sste.ru;
Белов Олег Дмитриевич[1] — инженер;
Гапеев Артем Андреевич[1] — инженер;
[1] Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Borisov N. G.[1], PhD-student, bng@sste.ru;
Belov O. D.[1], engineer;
Gapeev A. A.[1], engineer;
[1] National University Science of Technology MISIS, Mining Institute, Moscow, Russia.

Получена редакцией 20.01.2021; получена после рецензии 23.02.2021; принята к печати 10.03.2021.
Received by the editors 20.01.2021; received after the review 23.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.