



УДК 691.32

А. Д. МАКАРОВ^{1,2}, ст. преп. кафедры железобетонных, каменных и деревянных конструкций; О. В. РАДАЙКИН¹, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений; Д. М. ЛОБОВ², канд. техн. наук, доц. кафедры железобетонных, каменных и деревянных конструкций; А. С. ТОРОПОВ², доц. кафедры железобетонных, каменных и деревянных конструкций

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФИБРОБЕТОНА ПРИ ОДНООСНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ В РАННИЕ СРОКИ ТВЕРДЕНИЯ

¹ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

Тел.: (843) 519-43-21; эл. почта: olegxxii@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-80; эл. почта: kafgbknngasu@gmail.com

Ключевые слова: бетон, фибробетон, предел прочности бетона, дисперсное армирование, призмная прочность, прочность на растяжение при изгибе.

В работе представлено экспериментальное исследование влияния стеклянной фибры на механические характеристики бетона в раннем возрасте твердения. Проведены испытания бетонных и фибробетонных образцов-призм в возрасте от 0,5 до 7 суток с интервалом в одни сутки. Определялись предел прочности при одноосном сжатии и начальный модуль деформаций. Выполнена аппроксимация экспериментальных данных логарифмическими зависимостями, а также проведена статистическая обработка результатов. Установлено, что введение стеклянной фибры приводит к повышению прочности при сжатии и модуля деформаций преимущественно в первые двое суток твердения. После данного периода различия между бетоном и фибробетоном становятся статистически незначимыми. Полученные результаты подтверждают гипотезу о доминирующем влиянии фибры на ранних стадиях формирования цементного матрикса, когда волокна ограничивают развитие микротрещин и компенсируют недостаточную структурную зрелость цементного камня.

Введение

Фибробетоны являются одним из наиболее эффективных направлений модификации цементных композитов, обеспечивающих повышение трещиностойкости, долговечности и эксплуатационной надежности конструкций. Среди различных типов дисперсного армирования значительный интерес представляют щелочестойкие стеклянные волокна благодаря высокой прочности, коррозионной стойкости и технологичности применения. Современные исследования показывают, что стеклянная фибра наиболее эффективно влияет на структуру бетона на ранних стадиях твердения, ограничивая развитие микротрещин и перераспределяя локальные напряжения в цементной матрице [1]. Основным механизмом действия стеклянных волокон считается сдерживание развития микротрещин и перераспределение локальных напряжений в переходной



зоне. Волокна препятствуют раскрытию микродефектов и способствуют повышению сопротивления материала растягивающим и изгибающим воздействиям [1].

Вместе с тем вопрос влияния стеклянной фибры на прочность и деформационные характеристики бетона при сжатии остается дискуссионным. Большинство исследователей отмечают, что увеличение прочности при одноосном сжатии носит ограниченный характер и существенно зависит от дозировки, геометрии волокон, водоцементного отношения и возраста бетона. В ряде работ установлено, что стеклянная фибра способна повышать прочность на сжатие преимущественно в раннем возрасте твердения, тогда как к 28 суткам различия между обычным бетоном и фибробетоном становятся менее выраженными. Кроме того, в работах [2] отмечено, что при увеличении количества стекловолокна механические характеристики бетона немного снижаются из-за ухудшения удобоукладываемости. Исследователи фибробетонных образцов из «гибридных» волокон [3] выдвинули гипотезу, что в самый ранний период фибра способна компенсировать еще не завершенное формирование матрикса, перехватывая микротрещины, тогда как с уплотнением структуры цементного камня матрикс сам приобретает достаточную плотность и трещиностойкость, и сравнительное преимущество фибробетона нивелируется.

Согласно обзору [2], влияние стеклянной фибры на модуль упругости бетона значительно менее выражено по сравнению с ее воздействием на прочность при растяжении и изгибе. Авторы указывают, что изменение модуля упругости при введении стеклянных волокон обычно не превышает нескольких процентов, а в отдельных исследованиях наблюдается даже незначительное снижение модуля вследствие ухудшения однородности структуры и увеличения пористости смеси при повышенных дозировках волокон. Аналогичные выводы представлены в обзоре [1], где отмечается, что микроармирование наиболее эффективно именно на до-пиковом этапе деформирования и в раннем возрасте твердения, когда цементный камень еще не достиг полной структурной зрелости. Также установлено, что влияние стеклянной фибры на модуль упругости значительно менее выражено по сравнению с воздействием на прочность при растяжении и изгибе [4].

В последние годы особое внимание уделяется исследованию раннего возраста твердения фибробетонов, поскольку именно в этот период происходят интенсивные процессы гидратации цемента, формирование контактной зоны и накопление усадочных деформаций. В работе [5] исследовали развитие прочности и динамического модуля упругости фибробетонов в возрасте до 7 суток и показали, что наличие волокон оказывает наибольшее влияние в первые дни твердения, когда структура цементного камня наиболее чувствительна к процессам трещинообразования.

Несмотря на значительный объем литературных данных, систематических экспериментальных исследований, посвященных одновременному изучению предела прочности при одноосном сжатии и модуля упругости фибробетона и обычного бетона в возрасте от 0,5 до 7 суток с шагом в одни сутки, практически не проводилось. Большинство работ ограничиваются стандартными возрастами испытания (1, 3, 7, 28 суток), что не позволяет в полной мере проследить динамику изменения свойств в критически важный период первых 48 часов после укладки. Кроме того, в литературе остается дискуссионным вопрос о том, с какого



момента твердения различие между фибробетоном и обычным бетоном по прочности при сжатии прекращает быть статистически значимым.

Методы и материалы

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния дисперсного армирования стеклянной фиброй на предел прочности при одноосном сжатии и модуль упругости бетонных образцов-призм в возрасте 0,5–7 суток с интервалом измерений в одни сутки. Экспериментальному определению прочности и модуля упругости бетона посвящены работы [6–8]. Сравнительный анализ результатов для составов с фиброй и без нее позволит установить временную границу, до которой армирование оказывает статистически значимое влияние на указанные характеристики.

В рамках настоящего экспериментального исследования выполнялось изготовление образцов призм размерами 100x100x400 мм. Для изготовления бетонных образцов призм подбирались составы смесей для топинговых бетонов средней прочности классов В20, В25, В30 с заполнением в виде щебня с размером фракции 5–10 мм. Для фибробетонных образцов в состав бетона при изготовлении вводилась стеклофибра в количестве 0,5 кг/м³.

Испытания образцов призм с целью определения призмной прочности бетона, а также модуля упругости на сжатие осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 24452-2023 [9]. Испытания производились на прессе П-125 производства ЗИМ Точмашприбор (Россия, г. Армавир). Измерение продольных осевых деформаций осуществлялось по четырем граням образца призмы с применением специализированной оснастки. Для измерения деформаций применялись индикаторы марки ГТО ИЧЦ 10-0,001 по ГОСТ 9696 [10], обеспечивающие измерение относительных деформаций с точностью 0,001 мм. База измерения продольных деформаций принималась равной 2/3 от высоты образца и располагалась на одинаковом расстоянии от его торцов.

Испытание с целью определения модуля упругости проводилось путем ступенчатого нагружения образцов-призм осевой сжимающей нагрузкой до уровня 30 % от разрушающей нагрузки с измерением в процессе нагружения образцов их деформации. Дальнейшее деформирование образца, за пределами уровня 30 % от разрушающей нагрузки, производилось с целью определения призмной прочности путем непрерывного нагружения. Фотографии испытаний приведены на рис. 1.

Перед началом проведения испытания образец с приборами устанавливался центрально по разметке плиты пресса и регистрировались начальные отсчеты на шкале нагружающего устройства и прибора для измерения деформаций. После чего осуществлялось центрирование образца, в процессе которого необходимо, чтобы в начале испытания от уровня условного нуля до нагрузки, равной $(40 \pm 5 R_p)$ % отклонения деформаций по каждой грани (образующей) не превышали 15 % их среднего арифметического значения. В случае несоблюдения данного требования осуществлялась разгрузка образца и его смещение относительно центральной оси разметки плиты пресса в сторону больших деформаций с последующей повторной проверкой его центрирования по показаниям приборов.



Рис. 1. Испытание образцов призм с целью определения призмной прочности и модуля упругости бетона на сжатие

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных экспериментальных исследований построены графики зависимости среднего значения предела прочности испытанных образцов призм класса В25 на сжатие R_b и значение начального модуля деформаций E (рис. 2) от времени. Показан 95 %-доверительный интервал средних значений и логарифмическая аппроксимация функцией вида:

$$f(t) = A \ln(t/t_0) + B, \quad (1)$$

где A, B – коэффициенты логарифмической регрессии;
 t – время, сут.; $t_0 = 1$ сут.

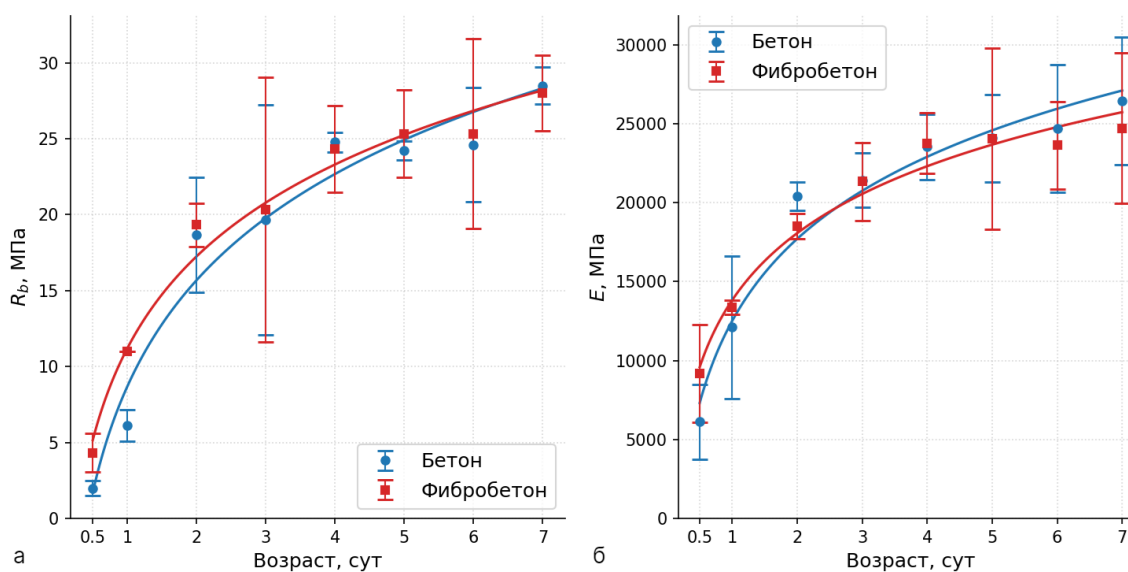


Рис. 2. Графики зависимости призмной прочности образцов на сжатие (а) и начального модуля деформаций (б) от времени



Значения коэффициентов логарифмических регрессий сведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты логарифмических регрессий

Предел прочности	Бетон		Фибробетон	
	A, МПа	B, МПа	A, МПа	B, МПа
R_b , МПа	10,08	8,70	8,73	11,21
E , МПа	7495,80	12511,17	6115,12	13828,09

Для оценки влияния фибры на механические свойства бетона построены графики зависимости отклонений δ средних значений этих характеристик для фибробетонных образцов от соответствующих значений для бетонных образцов при том же времени твердения (рис. 3). Величина δ и 95 %-доверительный интервал вычислены с учетом дисперсии средних значений обоих типов образцов:

$$\delta = \frac{R_{fcon} - R_{con}}{R_{con}} \pm t_{0,975;n-1} \frac{s_{\delta}}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где R_{fcon} , R_{con} – пределы прочности фибробетонных и бетонных образцов соответственно;

$t_{0,975;n-1} \approx 4,303$ – коэффициент распределения Стьюдента для двустороннего 95 %-доверительного интервала при $n = 3$;

n – количество образцов в выборке;

s_{δ} – стандартное отклонение относительного отклонения δ , вычисленное по формуле:

$$s_{\delta} = \sqrt{\left(\frac{s_{fcon}}{R_{con}}\right)^2 + \left(\frac{R_{fcon}s_{con}}{R_{con}^2}\right)^2}, \quad (3)$$

где s_{fcon} – стандартное отклонение предела прочности фибробетона;

s_{con} – стандартное отклонение предела прочности бетона.

Для построения графика для начального модуля деформаций в формулах значение R заменяется соответствующим значением E .

Графики на рис. 3 демонстрируют повышение предела прочности образцов на сжатие и начального модуля деформаций при добавлении фибры только при начальном твердении в интервале до двух суток, после чего наличие фибры не оказывает существенного влияния. Причем для начального модуля деформаций с учетом величин доверительных интервалов этот эффект является статистически незначим. Результаты качественно соответствуют исследованию на составах из «гибридных» волокон [3]. Авторы этого исследования выдвинули гипотезу, согласно которой в самый ранний период фибра способна компенсировать еще не завершённое формирование матрикса, перехватывая микротрещины, тогда как с уплотнением структуры цементного камня матрикс сам приобретает достаточную плотность и трещиностойкость, и сравнительное преимущество фибробетона нивелируется.

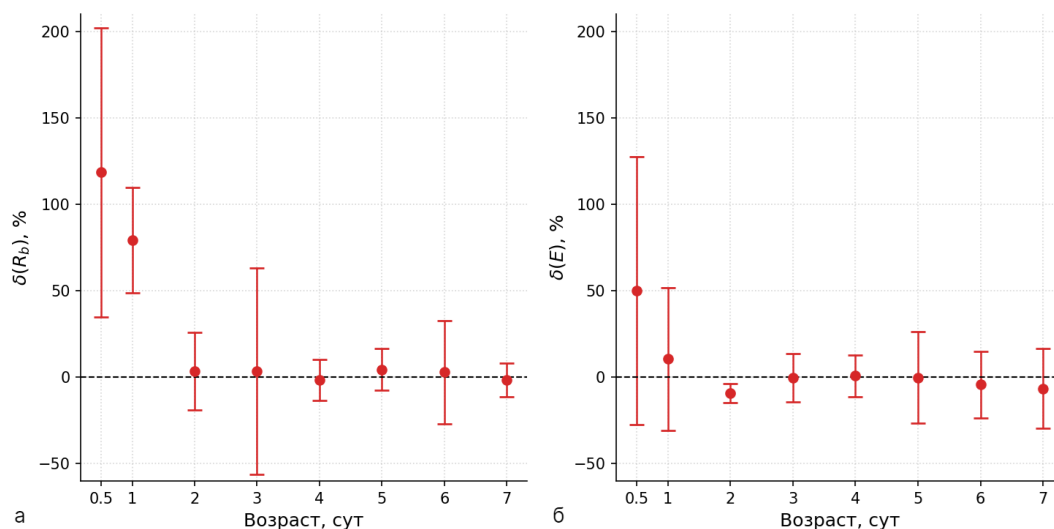


Рис. 3. Графики зависимости отклонений δ призмной прочности на сжатие (а) и начального модуля деформаций (б) от времени

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что дисперсное армирование бетона стеклянной фиброй оказывает наиболее заметное влияние на механические характеристики материала в раннем возрасте твердения. Показано, что в первые двое суток наблюдается повышение предела прочности при одноосном сжатии и начального модуля деформаций фибробетона по сравнению с обычным бетоном.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что эффект микроармирования носит временный характер и постепенно снижается по мере формирования и уплотнения цементного камня. Начиная примерно с возраста 2–3 суток различия между характеристиками бетона и фибробетона становятся статистически незначимыми. Это согласуется с современными представлениями о механизме действия стеклянной фибры, заключающемся преимущественно в ограничении развития микротрещин и перераспределении локальных напряжений на ранних стадиях структурообразования цементной матрицы.

Полученные результаты подтверждают, что применение стеклянной фибры наиболее эффективно именно в ранний период твердения бетона, когда структура материала наиболее чувствительна к процессам трещинообразования. Практическая значимость работы заключается в уточнении временного интервала, в течение которого дисперсное армирование оказывает статистически значимое влияние на прочностные и деформационные характеристики бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shafei, B. State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete / B. Shafei, M. Kazemian, M. Dopko, M. Najimi // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 2. – DOI 10.3390/ma14020409.
2. Ahmad, J. Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis / J. Ahmad, R. A. González-Lezcano, A. Majdi // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 15. – DOI 10.3390/ma15155111.



3. Nassif, H. Restrained Shrinkage of High-Performance Ready-Mix Concrete Reinforced with Low Volume Fraction of Hybrid Fibers / H. Nassif, M. Habib, A. Obeidah, M. Abed // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, № 22. – DOI 10.3390/polym14224934.
4. Blazy, J. Glass Fiber Reinforced Concrete as a Durable and Enhanced Material for Structural and Architectural Elements in Smart City – A Review / J. Blazy, R. Blazy, L. Drobiec // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, № 8. – DOI 10.3390/ma15082754.
5. Castillo, D. Early-age compressive strength and dynamic modulus of FRC based on ultrasonic pulse velocity / D. Castillo, S. Hedjazi // *Materiales de Construcción*. – 2021. – Vol. 71, № 343. – DOI 10.3989/mc.2021.14720.
6. Белов, А. В. Экспериментальное определение прочности и модуля упругости бетона, изготовленного из сырья Ситинского месторождения / А. В. Белов. – Текст : электронный // *Инженерный вестник Дона*. – 2026. – № 3 (135). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-prochnosti-i-modulya-uprugosti-betona-izgotovlennogo-iz-syrya-sitinskogo-mestorozhdeniya?ysclid=mtr4o5gy22485924335>.
7. Моисеенко, Г. А. Изменение призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного сталефибробетона и его матрицы в зависимости от возраста / Г. А. Моисеенко // *Строительные материалы*. – 2020. – № 6. – С. 13–17. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17.
8. Галкин, Ю. Ю. Анизотропия прочностных свойств цементного камня при его кратковременном нагружении в раннем возрасте / Ю. Ю. Галкин, С. А. Удодов, Е. А. Строительева, Г. Ю. Чариков // *Инженерный вестник Дона*. – 2020. – № 9 (69). – С. 196–212.
9. ГОСТ 24452-2023. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 декабря 2023 г. № 1607-ст : дата введения 2024-01-01. – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – 16 с. – Текст : непосредственный.
10. ГОСТ 9696-82. Индикаторы многооборотные с ценой деления 0,001 и 0,002 мм. Технические условия : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 05 февраля 1990 г. № 157* : дата введения 1984-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 7 с. – Текст : непосредственный.

MAKAROV Aleksandr Dmitrievich^{1,2}, senior teacher of the chair of reinforced concrete, stone and wooden structures; RADAYKIN Oleg Valerevich¹, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the chair of energy supply of enterprises, construction of buildings and structures; LOBOV Dmitriy Mikhailovich², candidate of technical sciences, associate professor of the chair of reinforced concrete, stone and wooden structures; TOROPOV Aleksandr Sergeevich², associate professor of the chair of reinforced concrete, stone and wooden structures

INFLUENCE OF DISPERSE REINFORCEMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED CONCRETE UNDER UNIAXIAL STRESS STATE AT EARLY HARDENING PERIOD

¹Kazan State Power Engineering University.

51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia.

Tel.: (843) 519-43-21; e-mail: olegxxii@mail.ru

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-80; e-mail: kafgbknngasu@gmail.com

Key words: concrete, fiber concrete, concrete strength limit, dispersed reinforcement, prismatic strength, flexural tensile strength.

This paper presents an experimental study of the effect of glass fibers on the mechanical properties of concrete at an early stage of curing. Concrete and fiber-reinforced concrete prism specimens were tested at ages ranging from 0.5 to 7 days, with a 24-hour interval. The uniaxial compressive strength and initial modulus were determined. The experimental data were approximated using logarithmic relationships, and the results were statistically processed. It was found that the addition of glass fibers leads to an increase in compressive strength and modulus of deformation, primarily during the first two days of curing. After this period, the differences between concrete and fiber-reinforced concrete become statistically insignificant. The obtained results confirm the hypothesis about the dominant influence of fiber in the early stages of cement matrix formation, when fibers limit the development of microcracks and compensate for the insufficient structural maturity of the cement stone.

REFERENCES

1. Shafei B., Kazemian M., Dopko M., Najimi M. State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 2021, Vol. 14, No. 2. DOI: 10.3390/ma14020409.
2. Ahmad J., González-Lezcano R. A., Majdi A. Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Materials*, 2022, Vol. 15, No. 15. DOI: 10.3390/ma15155111.
3. Nassif H., Habib M., Obeidah A., Abed M. Restrained Shrinkage of High-Performance Ready-Mix Concrete Reinforced with Low Volume Fraction of Hybrid Fibers. *Polymers*, 2022, Vol. 14, No. 22. DOI: 10.3390/polym14224934.
4. Blazy J., Blazy R., Drobiec L. Glass Fiber Reinforced Concrete as a Durable and Enhanced Material for Structural and Architectural Elements in Smart City – A Review. *Materials*, 2022, Vol. 15, No. 8. DOI: 10.3390/ma15082754.
5. Castillo D., Hedjazi S. Early-age compressive strength and dynamic modulus of FRC based on ultrasonic pulse velocity. *Materiales de Construcción*, 2021, Vol. 71, No. 343. DOI: 10.3989/mc.2021.14720.
6. Belov A. V. Eksperimentalnoe opredelenie prochnosti i modulya uprugosti betona, izgotovlennogo iz syrya Sitinskogo mestorozhdeniya [Experimental determination of strength and elastic modulus of concrete made from raw materials of the Sitinskoye deposit]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*. Rostov-on-Don, 2026, № 3 (135). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-prochnosti-i-modulya-uprugosti-betona-izgotovlennogo-iz-syrya-sitinskogo-mestorozhdeniya?ysclid=mtr4o5gy22485924335>.
7. Moiseenko G. A. Izmenenie prizmennoy prochnosti i modulya uprugosti vysokoprochnogo stalefibrobetona i ego matritsy v zavisimosti ot vozrasta [Change in prismatic strength and elastic modulus of high-strength steel fiber concrete and its matrix depending on age]. *Stroitelnye materialy [Construction Materials]*. Moscow, 2020, № 6, P. 13-17. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17.
8. Galkin Yu. Yu., Udodov S. A., Stroiteleva E. A., Charikov G. Yu. Anizotropiya prochnostnykh svoystv tsementnogo kamnya pri ego kratkovremennom nagruzhении v rannem vozraste [Anisotropy of strength properties of cement stone under short-term loading at an early age]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*. Rostov-on-Don, 2020, № 9 (69), P. 196–212.
9. GOST 24452-2023. Metody opredeleniya prizmennoy prochnosti, modulya uprugosti i koeffitsienta Puassona [Methods for determining prismatic strength, elastic modulus and Poisson's ratio]: mezhgosudarstvenny standart: utverzhden i vveden v deystvie Priказом Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 21 dekabrya 2023 g. № 1607-st: data vvedeniya 2024-01-01. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii, 2024, 16 p.



10. GOST 9696-82. Indikatory mnogooborotnye s tsenoy deleniya 0,001 i 0,002 mm. Tekhnicheskie usloviya [Multi-turn indicators with a scale division of 0.001 and 0.002 mm. Specifications]: mezhgosudarstvenny standart: utverzhden i vveden v deystvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po upravleniyu kachestvom produktsii i standartam ot 05 fevrallya 1990 g. № 157*: data vvedeniya 1984-01-01. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov, 2004, 7 p.

© А. Д. Макаров, О. В. Радайкин, Д. М. Лобов, А. С. Торопов, 2026

Получено: 27.05.2026 г.