

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.17223/19988621/99/12

## Определение динамической прочности на растяжение образцов из тяжелого бетона при ударно-волновом нагружении

Павел Олегович Петров<sup>1</sup>, Александр Анатольевич Козулин<sup>2</sup>,  
Андрей Сергеевич Савиных<sup>3</sup>, Геннадий Валерьевич Гаркушин<sup>4</sup>,  
Илья Александрович Жуков<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 5</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>1</sup> ООО «Союзбетон», Томск, Россия

<sup>3, 4</sup> ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>1</sup> souzbeton\_petrov@mail.ru

<sup>2</sup> kozulyln@ff.tsu.ru

<sup>3</sup> savas@fcp.ac.ru

<sup>4</sup> garkushin@fcp.ac.ru

<sup>5</sup> gofra930@gmail.com

**Аннотация.** Представлены результаты определения прочности на растяжение тяжелого бетона марки М600 в квазистатических и динамических условиях. Эксперименты с массивными цилиндрическими образцами при квазистатических условиях проведены методом Бразильского теста на раскалывание, а при динамических – методом ударно-волнового нагружения при отколе. Определен коэффициент динамического упрочнения для исследуемой марки бетона. В совокупности результаты помогают понять механизмы сопротивления бетона растягивающим динамическим нагрузкам, что может улучшить прогнозирование поведения бетонных конструкций при экстремальных воздействиях.

**Ключевые слова:** тяжелый бетон, ударная волна, прочность на растяжение, Бразильский тест, коэффициент динамического упрочнения

**Благодарности:** Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего Образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01/07/2025).

**Для цитирования:** Петров П.О., Козулин А.А., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Жуков И.А. Определение динамической прочности на растяжение образцов из тяжелого бетона при ударно-волновом нагружении // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2026. № 99. С. 162–177. doi: 10.17223/19988621/99/12

## Determination of dynamic tensile strength of heavyweight concrete specimens under shock-wave loading

Pavel O. Petrov<sup>1</sup>, Alexander A. Kozulin<sup>2</sup>, Andrey S. Savinykh<sup>4</sup>,  
Gennadiy V. Garkushin<sup>3</sup>, Il'ya A. Zhukov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 5</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>1</sup> Souzbeton LLC, Tomsk, Russian Federation

<sup>3, 4</sup> Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry,  
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation

<sup>1</sup> souzbeton\_petrov@mail.ru

<sup>2</sup> kozulya@ff.tsu.ru

<sup>3</sup> savas@fcp.ac.ru

<sup>4</sup> garkushin@fcp.ac.ru

<sup>5</sup> gofra930@gmail.com

**Abstract.** This paper presents the results of experimental studies on the mechanical properties of M600 heavyweight concrete (compliance with EU classification c35/45) under various loading conditions. Massive cylindrical specimens with a diameter of 105 mm and lengths of 500, 200, and 100 mm were tested. The main results include the determination of quasi-static tensile strength obtained from Brazilian tests in the splitting scheme of cylindrical specimens under radial compression, as well as the dynamic tensile strength obtained from spall fracture using shock-wave loading methods applied to the massive specimens.

In processing the quasi-static experimental data, a correction factor recommended for concretes of similar composition containing fly ash was applied. After correction, the uniaxial tensile strength of 4.8 MPa was found, which correlated with available theoretical estimates. Compressive and tensile fracture zones were determined on the remaining fragments of the specimens after shock-wave loading. The average dynamic tensile strength, determined from the free-surface velocity profiles of three specimens of different lengths, was 30 MPa. The calculated dynamic hardening coefficient for the concrete grade under study was 6.3 MPa. The obtained results are consistent with published data for similar concrete grades, complement existing studies, and provide a better understanding of the mechanisms governing the resistance of concrete to deformation under dynamic tensile loading. These findings can be used to more accurately predict the behavior of concrete structures under extreme loading conditions.

**Keywords:** heavyweight concrete, shock wave, tensile strength, Brazilian test, dynamic hardening coefficient

**Acknowledgments:** This research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2025-607).

**For citation:** Petrov, P.O., Kozulin, A.A., Savinykh, A.S., Garkushin, G.V., Zhukov, I.A. (2026) Determination of dynamic tensile strength of heavyweight concrete specimens under shock-wave loading. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 99. pp. 162–177. doi: 10.17223/19988621/99/12

## Введение

Тяжелый бетон широко используется в ответственных инженерных сооружениях благодаря своей высокой прочности, удовлетворительной долговечности и экономичности при стандартных и экстремальных условиях эксплуатации. Его предел прочности является ключевым механическим свойством, определяющим способность выдерживать сжимающие и растягивающие нагрузки до разрушения. Тяжелый бетон как разновидность высокопрочного обычно характеризуется прочностью на сжатие в пределах от 50 до 120 МПа [1–3]. Однако, как и традиционный бетон, он имеет недостатки, такие как высокая хрупкость, низкая прочность на растяжение и недостаточная ударная вязкость, что ограничивает его применение. Из-за чрезмерной хрупкости прочность на растяжение бетона значительно ниже, что делает этот параметр критически важным для анализа процессов растрескивания, поведения конструкций и их долговечности в статических и динамических условиях. Для получения требуемых характеристик бетон подвергается прямому испытанию на растяжение в статических условиях. К образцу прикладывается одноосная растягивающая нагрузка до полного разрушения. Этот метод позволяет наиболее точно определить прочность на растяжение, но его сложно реализовать даже в условиях современной лаборатории. Основные трудности связаны с подготовкой образцов, их выравниванием и приложением нагрузки, что может вызвать вторичные напряжения [4]. Более доступными методами определения прочности на растяжение хрупких материалов являются методы, базирующиеся на раскалывании образцов в форме цилиндров при радиальном сжатии [4–6] и кубов при осевом сжатии через специальный адаптер. Подобные методики раскалывания хоть и используют косвенные оценки, но широко зарекомендовали себя сначала в научной сфере, а после – в национальных стандартах [8–10]. Таким образом, прочность на растяжение при раскалывании образца может служить надежным показателем. Однако при этом существуют ограничения, из-за которых прочность на растяжение конкретного образца не является прочностью на одноосное растяжение материала, а корреляцию этих величин необходимо проводить с использованием дополнительных подходов.

В динамических условиях при сверхкоротких периодах нагрузки прочность на растяжение материала связана с откольными явлениями. Откол вызывается преотражением импульсов от свободной поверхности, что приводит к интерференции падающих и отраженных волн с образованием растягивающих напряжений, формируя откольную пластину [11]. Сопротивление разрушению материала в условиях откола называется откольной прочностью, что ассоциируется с динамической прочностью на растяжение и оценивается с использованием теории волновых взаимодействий [12]. Наиболее часто используемым в мире экспериментальным методом для оценки динамической прочности конструкционных материалов при скоростях деформации до  $10^4 \text{ c}^{-1}$  остается метод Кольского с различными модификациями разрезного стержня Гопкинсона [13–15]. Реже применяются методы метания плоских ударников и генерации ударных волн с использованием легкогазовых пушек и взрывных генераторов [16–21]. Эти подходы обеспечивают высокую точность и надежность результатов, что делает их незаменимыми в современных научных исследованиях и инженерных разработках. Для исследования динамических свойств крупнофракционных композитов, таких как тяжелые бетоны, необходимо

применять альтернативные методы испытаний на крупномасштабных установках. Это связано с тем, что использование стандартных образцов малых размеров (например, цилиндры диаметром до 20 мм и длиной 10 мм) не позволяет адекватно оценить точное механическое поведение материала. В реальных конструкциях размеры элементов значительно больше, и их поведение при воздействии динамических нагрузок существенно отличается от поведения малых образцов. Поэтому применение крупномасштабных установок и образцов, более точно отражающих реальные условия эксплуатации, является важным шагом для получения достоверных данных о динамических свойствах тяжелых бетонов.

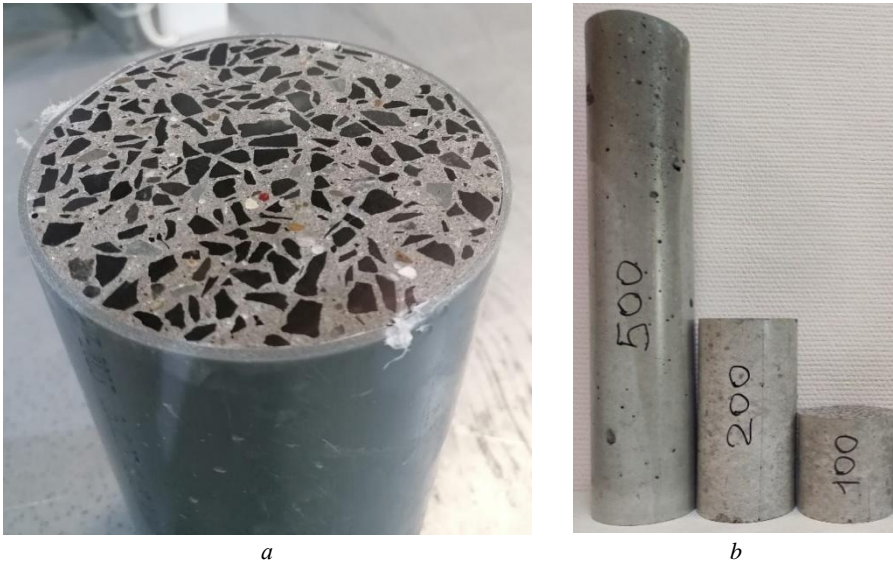
Целью данного исследования стали определение прочностных свойств тяжелого бетона при растяжении в условиях квазистатического и динамического нагружения с использованием массивных образцов и проведение корреляции механических характеристик, полученных в широком диапазоне скоростей воздействия.

### Материалы и методы

Массивные образцы исследуемого бетона изготовлены в лабораторных условиях методами перемешивания в смесителе, литья в пластиковые формы, вибрирования и набора прочности в климатической камере в течение 28 дней. Компоненты смеси и сопутствующее оборудование для изготовления предоставлены ООО «Союзбетон» (Томск) из номенклатуры бетонного завода в количестве, обеспечивающем требования технологического рецепта для изготовления одного кубометра раствора согласно ГОСТ 27006–2019, который включал в себя 380 кг вяжущего компонента Портландцемент ЦЕМ 0 42.5Н (ООО «Топкинский цемент»), 130 кг шлака ЕСОFIL-480 (ООО «Мечел-Материалы»), 700 кг песка для строительных работ, 1 055 кг щебня из плотных горных пород фракцией 5–10 мм, 190 кг очищенной воды затворения и водоредуцирующие добавки Rheoplast PCE 3241 (ООО «Реопласт») в количестве 0.75% от вяжущего, улучшающие показатели удобоукладываемости. Полученная смесь удовлетворяла показателям качества, в числе которых средняя плотность полученного бетона  $\rho_0 = 2\,454 \text{ кг/м}^3$  и удобоукладываемость раствора, сохраняющаяся в течение 180 мин в пределах 240–270 мм.

Подготовленный бетонный раствор заливали в пластиковые формы, обработанные разделительным воском, после чего уплотняли на вибрационном столе. После полного отверждения алмазной пилой из заготовок вырезали образцы разной длины. Торцы шлифовали и полировали для гладкости. На образцы наносили слой ПВА для предотвращения колебаний влагонасыщенности и улучшения адгезии.

На рис. 1, *a* представлено изображение полированного торцевого среза бетонной заготовки в пластиковой форме для литья. На поперечном срезе образца (см. рис. 1, *a*) наблюдается равномерное распределение темных включений в светлой цементной матрице, что свидетельствует о гомогенности их распределения по всему объему. Вибрационное уплотнение, примененное при изготовлении образцов, предотвратило образование крупных пор и воздушных карманов в объеме образца. На рис 1, *b* представлены изображения боковых поверхностей образцов одинакового диаметра и длиной 500, 200, 100 мм, подготовленных для проведения динамических испытаний. На боковых поверхностях обнаружены мелкие воздушные поры (см. рис. 1, *b*), очевидно, возникшие из-за недостаточного смачивания пластиковой формы во время заливки.



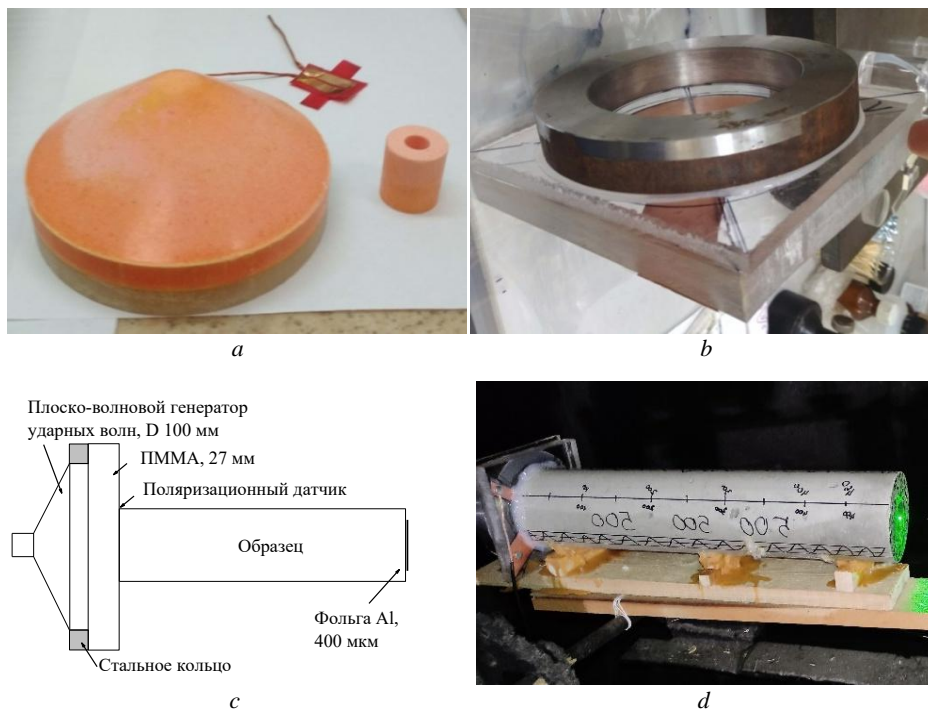
**Рис. 1.** Фотографии среза цилиндрической заготовки из исследуемого бетона в пластиковой литейной форме (а) и готовых цилиндрических образцов диаметром 105 мм с указанием длины стержней в мм (b)

**Fig. 1.** Photographs of (a) a cross-section of the cylindrical specimen made of the concrete under study in a plastic casting mold and (b) ready-assembled cylindrical samples with a diameter of 105 mm and lengths indicated in mm

Для оценки динамических характеристик бетона требовалось знать показатели продольной  $c_l$ , сдвиговой  $c_s$  и объемной  $c_b$  скоростей звука, которые были измерены с использованием прибора производства МГНИВП «Акустика» (Россия). Ультразвуковые измерения проводились на 10 различных участках образца. Объемная скорость звука рассчитана с помощью соотношения  $c_b = \sqrt{c_l^2 - 4c_s^2} / 3$ .

При определении прочности при сжатии использовались контрольные образцы в виде кубов размерами  $100 \times 100 \times 100$  мм<sup>3</sup>. Показатели статической прочности при одноосном сжатии  $\sigma_c$  и растяжении при раскалывании  $\sigma_{ts}$  оценены с использованием испытательного пресса ТП-1-1500 (ООО ТЕСТПРЕСС, Россия). Используемое в работе испытание на раскалывание цилиндрических образцов [8], или Бразильский тест, является косвенным методом определения прочности хрупких, как бетоны, образцов на растяжение. Прочность бетона на растяжение при раскалывании определялась с использованием цилиндров размером  $\text{Ø}105$  мм  $\times$  200 мм. В ходе этого испытания на цилиндр по всей его длине с постоянной скоростью 1.5 МПа/мин до разрушения прикладывалась сжимающая нагрузка в радиальном направлении, вызывающая напряжение растяжения, перпендикулярное приложенной нагрузке. Предел прочности при растяжении цилиндрических образцов рассчитывался на основе максимальной нагрузки, полученной в ходе испытания, и их геометрических размеров, как показано в формуле  $\sigma_{ts} = 2P / (\pi LD)$ , где  $\sigma_{ts}$  – предел прочности при растяжении,  $P$ ,  $L$  и  $D$  – предельная нагрузка, длина и диаметр цилиндра.

Оригинальное оборудование и условия для проведения ударно-волновых экспериментов предоставлены ФИЦ ПХФ и МХ РАН (Черноголовка) [22]. Динамические условия нагружения в области предельно малых длительностей согласно сертифицированным методикам реализованы за счет использования энергии взрыва генератора плоских ударных волн. Регистрация волновых эффектов с высоким пространственным и временным разрешением осуществлялась с использованием Допплеровского интерферометрического измерителя скорости свободной поверхности VISAR [23]. Разработанная для эксперимента оснастка, внешний вид которой представлен на рис. 2, спроектирована так, чтобы при прохождении сжимающего импульса на расстоянии от поверхности входа ударной волны реализуемые деформационные состояния в цилиндрах соответствовали одноосно-напряженным. Длины образцов от 100 мм и более подобраны, исходя из кратности 1, 2 и 5 их диаметров. Это достигалось с целью обеспечения условий, аналогичных тем, что наблюдались другими авторами при испытаниях методом разрезных стержней Гопкинсона [13], что позволяло им более точно и надежно исследовать механические свойства материалов.



**Рис. 2.** Основные компоненты экспериментальной сборки: фотография генератора плоских ударных волн (а); стальное кольцо на ослабителе из ПММА (b); схематическое представление экспериментальной сборки (с); фотография экспериментальной сборки с образцом длиной 500 мм (d)

**Fig. 2.** Main components of the experimental assembly: (a) photograph of the plane shock-wave generator, (b) steel ring on the PMMA attenuator, (c) schematic representation of the experimental assembly, and (d) photograph of the experimental assembly with a 500-mm-long specimen

Основная суть эксперимента заключалась в том, что плоская ударная волна в образце создавалась детонацией генератора ударных волн диаметром 100 мм (см. рис. 2, *a*), размещенного в стальном кольце высотой 20 мм (см. рис. 2, *b*). Ударная волна входила в образец через экран (ослабитель) из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 27 мм (см. рис. 2, *b*). Момент выхода импульса сжатия из ослабителя регистрировался поляризационным датчиком, размещенным между ним и образцом. На рис. 2, *c* показана схема экспериментальной компоновки, на рис. 2, *d* – фотография сборки с образцом бетона длиной 500 мм во взрывной камере.

На протяжении всех экспериментов проводилась регистрация осциллограмм с временным разрешением 1–1.5 нс. Регистрация осциллограмм велась с помощью высокочастотного цифрового осциллографа 1 ГГц DPO5104B (Tektronix, Inc, США). Профиль скорости свободной поверхности  $U_{fs}(t)$  рассчитывался в результате обработки осциллограмм с помощью программного обеспечения на ЭВМ. Отражение регистрируемого лазерного излучения от свободной поверхности бетонного образца стало возможным после наклеивания на его торец алюминиевой фольги.

Используя полученные данные о прочности исследуемого бетона при растяжении в разных условиях нагружения, можно рассчитать коэффициент динамического упрочнения по формуле  $KDU = \langle \sigma_{sp} \rangle / \langle \sigma_t \rangle$ , которая представляет собой отношение значения прочности при растяжении в динамических условиях нагружения к значению прочности на одноосное растяжение в квазистатике.

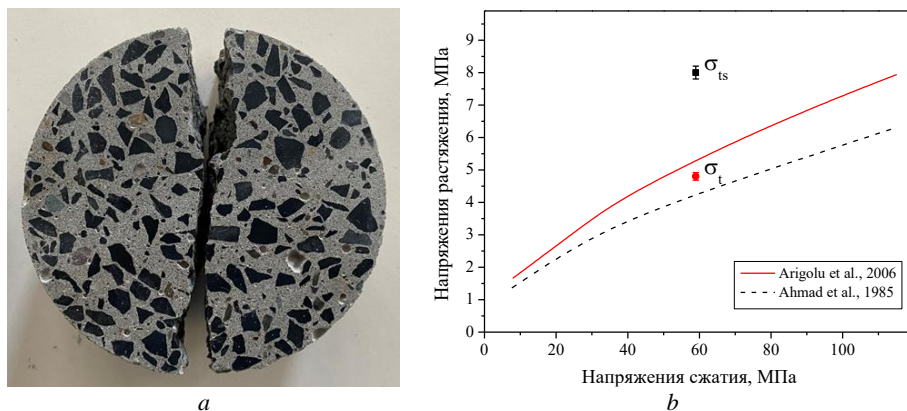
### Результаты статических экспериментов

Средние значения измеренной скорости прохождения продольных  $c_l$  и поперечных ультразвуковых волн  $c_s$  в образцах составили 4 663 и 2 532 м/с соответственно, отсюда рассчитанная объемная скорость звука  $c_b$  оказалась равной 3 633 м/с.

Прочность на сжатие контрольных образцов в форме кубов после 28 сут набора прочности составляла 59 МПа, что соответствовало марке бетона М600 (в европейской классификации соответствует обозначению с35/45).

Экспериментально измеренная прочность на растяжение при раскалывании цилиндрических образцов диаметром 105 мм и длиной 200 мм по схеме Бразильского теста составила в среднем  $8 \pm 0,2$  МПа. Для определения средних значений использовалось три образца одной партии. На рис. 3, *a* показана фотография типичных фрагментов разрушенного цилиндра. Все образцы разрушились по схожему сценарию с показателями прочности в пределах допустимой погрешности. Разрушенные фрагменты имеют формы, соответствующие стандартам, что является критерием успешного проведения экспериментов, а именно цилиндрический образец имеет единственную магистральную трещину, проходящую от места приложения нагрузки до опорной части, с минимальным ветвлением, без вторичных трещин и с небольшим количеством мелких выкрашиваний разрушенного материала на берегах трещины.

В научной литературе описано множество предсказательных моделей для оценки корреляции между прочностью бетона на одноосное сжатие и растяжение. На рис. 3, *b* представлена обобщенная номограмма теоретических оценок, основанная на работе P. Rajbhargari и соавт. [4]. Отмеченный линиями внутренний диапазон оценок по верхнему и нижнему пределам ограничивается математическими моделями N. Arioglu и соавт. [24] и S. Ahmad и соавт. [25] соответственно.



**Рис. 3.** Фотография фрагментов разрушенного цилиндрического образца после квазистатического нагружения (а) и номограмма корреляции максимальных напряжений при одноосных растяжении и сжатии для тяжелых бетонов (b)

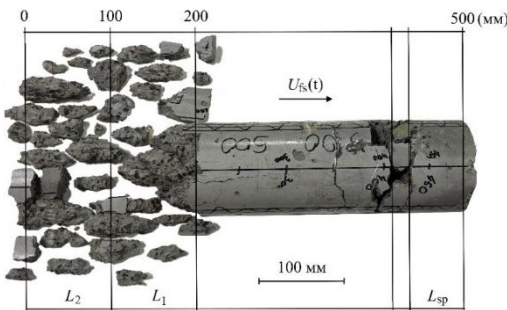
**Fig. 3.** (a) Photograph of fragments of the destroyed cylindrical specimen after quasi-static loading and (b) nomogram of the correlation of maximum stresses under the uniaxial tension and compression for heavyweight concrete

Следует отметить, что полученный в данной работе результат оценки прочности на растяжение  $\sigma_{ts}$  относится к характеристике образца, имеющего цилиндрическую форму, и на представленной номограмме ложится выше значений верхнего диапазона исследуемого бетона марки М600, имеющего прочность на сжатие  $\sigma_c = 59$  МПа. В работе [4] для более точной оценки рекомендуется приводить значения прочности бетонов при растяжении  $\sigma_{ts}$ , полученные при раскалывании, к реальным значениям прочности на одноосное растяжение материала через выражение  $\sigma_t = \lambda \sigma_{ts}$ , где  $\sigma_t$  – предел прочности при одноосном растяжении,  $\lambda$  – коэффициент перерасчета предела прочности при растяжении при раскалывании в предел прочности при одноосном растяжении. Известно, что коэффициент перерасчета  $\lambda$  в большей степени зависит от состава исследуемого бетона, он имеет рекомендательное значение и может варьировать в диапазоне от 0,9 до 0,54. Так, D. Shen и соавт. [26] отметили влияние использования золы уноса и шлаков в качестве замещающих вяжущее в смесях на повышение пластичности бетона, что потенциально может повлиять на его прочность при растяжении. Например, L. Østergaard [27] добавлял золу уноса и микрокремнезем в бетонные смеси и рекомендовал использовать в своих исследованиях значение  $\lambda = 0.61$ . Таким образом, в данной работе перерасчет с учетом принятых рекомендаций для исследованного бетона марки М600 показал значение  $\sigma_t = 4.88 \pm 0.12$  МПа, которое попало в доверительный диапазон на номограмме рис. 3, b и было использовано далее при определении КДУ при растяжении.

### Первичный анализ фрагментов разрушенного образца после ударно-волнового нагружения

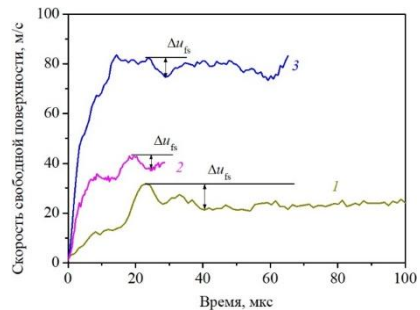
Проведение ударно-волновых экспериментов подразумевает разрушение исследуемых образцов бетона на разное количество фрагментов, которые при визуальном

изучении несут полезную информацию. Поэтому сохранение фрагментов важно для интерпретации экспериментальных результатов. На рис. 4 представлена фотография собранных фрагментов сохранившегося образца длиной 500 мм после ударно-волнового нагружения, стрелкой отмечено направление распространения фронта ударной волны. На фотографии фрагменты выложены в максимально возможном соответствии с их исходным положением в недеформированном образце до начала эксперимента, предварительная маркировка позволила это реализовать. По макровиду образцов и их поверхностей разрушения определено, что разрушение произошло без видимых следов пластической деформации. Во всем объеме образца имело место разрушение двух характерных видов, порожденное явлениями сжатия и откола, второе чаще ассоциируют с растяжением. Установлено, что разрушение при сжатии отличается от разрушения при растяжении формой тыльных поверхностей фрагментов, обращенных в направлении распространения ударной волны. На фрагментах образца ближе к свободной поверхности на длине  $L_{sp}$  идентифицированы трещины отрыва, которые перпендикулярны главной оси образца. Окольный фрагмент образовался по трещинам отрыва после отражения импульса сжатия от свободного торца цилиндрического образца.



**Рис. 4.** Фотография сохранных фрагментов разрушенного бетонного образца длиной 500 мм после испытаний с использованием ударно-волнового нагружения

**Fig. 4.** Photograph of the remaining fragments from the destroyed 500-mm-long concrete specimen after shock-wave loading tests



**Рис. 5.** Экспериментальные профили скоростей свободных поверхностей бетонных образцов длиной:

1 – 500 мм; 2 – 200 мм; 3 – 100 мм

**Fig. 5.** Experimental free-surface velocity profiles of concrete samples with a length of: (1) 500, (2) 200, and (3) 100 mm

Разрушение бетона в образце при сжатии происходило до длины  $L_1$  на участке образца, близком к ослабителю, с образованием характерного конуса с углом к главной оси образца, близким к  $45^\circ$ , с наличием продольных трещин в сохранный части. Разрушение до длины  $L_2$  было полным с фрагментацией на мелкие части. Таким образом, после испытания самого большого образца длиной 500 мм поднимались вопросы, на каком расстоянии происходит разрушение бетона при сжатии и на какой длине определять динамическую прочность при сжатии. В похожих экспериментах на мелкозернистом и фибробетоне в работах [28, 29] определяли эффекты динамического сжатия с использованием коротких образцов длиной до  $L_2$ , считая, что деформационное состояние сформировано чистым сжатием, из этого целесообразность выбора длины подтверждается внешним видом разрушенного образца на рис. 4.

### Обработка результатов ударно-волнового нагружения

Основным результатом проведенных ударно-волновых экспериментов были профили свободных поверхностей для образцов длиной 500, 200 и 100 мм, которые представлены на рис. 5. Оценивая профили скорости свободной поверхности бетонных образцов, представленных на рис. 5., видим, что у образца с длиной  $L_2 = 100$  мм максимальная скорость  $u_{\max}$  свободной поверхности составила 84.6 м/с, а у образца  $L_1 = 200$  мм – 46.2 м/с. Диссипативные процессы в исследуемом материале вносят вклад в разницу между показателями максимальных значений для  $L_1$  и  $L_2$  из-за разницы длин образцов уже в 100 мм. На полученных профилях скорости свободной поверхности зафиксированы признаки откольного разрушения в виде выхода на поверхность образца части волны разгрузки. Это свидетельствует, что в данном фрагменте в волне сжатия бетон не разрушился. В таблице сведены результаты обработки экспериментальных данных, полученных в ходе испытания образцов бетона марки М600 различной длины.

**Сводные результаты анализа профилей свободной поверхности образцов из бетона марки М600**

№	$L$ , мм	$U_{el}$ , км/с	$u_{\max}$ , м/с	$\Delta t_{fs}$ , м/с	$\sigma_{sp}$ , МПа	$\dot{\epsilon}$ , с <sup>-1</sup>
1	101.0	4.721	84.6	7.3	35.4	92
2	201.0	4.685	46.2	4.8	23.3	126
3	501.5	4.652	31.3	7.4	35.9	75

Ранее, при анализе сохранных фрагментов разрушенного образца длиной 500 мм, была определена область  $L_{sp}$  со следами разрушения при растяжении (см. рис. 4), что дает уверенность в наличии откольного эффекта на используемых длинах. Отколовшиеся фрагменты отделились перпендикулярно главной оси в нескольких местах. Длина основного отколовшегося фрагмента, измеренная от свободной поверхности образца, приблизительно равна 60–70 мм. Обращаясь к профилю скорости свободной поверхности этого же образца на рис. 5, мы отчетливо видим выход волны разрежения, инициирующей откольное разрушение при взаимодействии с отраженной волной. Используя эти данные, можно рассчитать длину  $h_{sp}$  отколовшегося фрагмента по формуле [30] и провести сравнение с измеренными инструментально показателями:

$$h_{sp} = \Delta t_{sp} \left( \frac{1}{c} + \frac{1}{U_{el}} \right)^{-1},$$

где  $\Delta t_{sp}$  – длительность импульса нагружения на профиле, подразумевающая время между окончанием откольного разрушения и отражением волны сжатия от свободной поверхности (30 мкс),  $U_{el}$ , – скорость упругой волны Аналитический расчет длины основного отколовшегося фрагмента показал, что  $h_{sp} = 64$  мм. Полученный результат входит в диапазон измеренной длины сохранившегося отколовшегося фрагмента.

Глубины разгрузки на профилях скорости свободной поверхности, показанных на рис. 5 (100, 200, 500 мм), измерялись для расчета значений растягивающих напряжений, действующих в моменты отрывов откольных пластин, используя методику из [11].

Рассчитав глубину разгрузки  $\Delta u_{fs}$  на профиле скорости свободной поверхности из рис. 5, для всех образцов были вычислены значения растягивающих напряжений, действующих в моменты образования откольных фрагментов, которые определяли как показатели динамической прочности на растяжение:

$$\sigma_{sp} = \rho_0 c \frac{\Delta u_{fs}}{2},$$

где  $\Delta u_{fs}$  – разница между максимальным и минимальным значениями скорости свободной поверхности в волне разгрузки. Учитывая значение градиента скорости в волне сжатия  $\dot{u}_{fsc}$  на профиле скорости свободной поверхности, рассчитали скорость деформации при растяжении в волне разрежения по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{V}}{V_0} = \frac{\dot{u}_{fsc}}{2c}.$$

Рассчитанные значения откольной прочности  $\sigma_{sp}$ , приведенные в таблице, зависят от скорости деформации. Разброс данных с погрешностью 15–20% обусловлен сложной композитной структурой, меняющейся от образца к образцу. Предполагается, что откольное разрушение происходит в упругой области и не зависит от длины образца и максимального напряжения сжатия [16]. Разброс значений откольной прочности при близких скоростях деформирования в сравнении с имеющимися в литературе данными, который варьирует от 7 до 30 МПа, объясняется различными составами и способами приготовления исследованных бетонов [14, 17, 29]. Рассчитанное значение КДУ при растяжении исследованного бетона марки М600 составило в среднем 6.3, что коррелирует с доступными результатами других авторов [30].

### Заключение

Получены и проанализированы результаты экспериментальных исследований механических свойств бетона, изготовленного с замещением золошлаковыми добавками доли цемента в вяжущем. Предварительные эксперименты на контрольных образцах показали значение прочности на одноосное сжатие, равное 59 МПа, что соответствовало марке тяжелого бетона М600. Также испытаниям подвергались массивные цилиндрические образцы из полученного бетона. Основным результатом стало определение значений квазистатической прочности на растяжение, полученных с использованием Бразильского теста в схеме раскалывания цилиндрических образцов при радиальном сжатии, и динамической прочности на растяжение, полученных при откольном разрушении методами ударно-волнового нагружения. При обработке данных квазистатических экспериментов для получения значений прочности на одноосное растяжение применялся поправочный коэффициент, рекомендованный для бетонов аналогичного состава с добавлением золы уноса. После коррекции данных значение прочности на одноосное растяжение составило 4.8 МПа, что коррелировало с существующими теоретическими оценками. На сохранившихся фрагментах образцов после ударно-волнового нагружения определялись зоны разрушения при сжатии и отколе, что позволило идентифицировать размеры области растяжения и установить соответствие с аналитическими оценками. Полученные значения максимальных растягивающих напряжений при

отколе принято считать динамическим пределом прочности на растяжение, который составил порядка 30 МПа при средней скорости деформации  $100 \text{ с}^{-1}$ . При сопоставлении результатов квазистатических и динамических экспериментов рассчитан коэффициент динамического упрочнения при сжатии для исследуемой марки бетона, равный 6.3 МПа. Таким образом, проведенные исследования позволили не только определить ключевые механические характеристики тяжелого бетона марки М600, но и углубить понимание механизмов его разрушения при экстремальных воздействиях.

#### Список источников

1. *Shanaka B., Mendis P., Duc Ngo T.* Ductility design of reinforced very-high strength concrete columns (100–150 MPa). Using curvature and energy-based ductility indices // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016. V. 13 (1). P. 13–37. doi: 10.1186/s40069-019-0347-y
2. *Kosmatka S.H., Kerkhoff B., Panarese W.C.* Design and control of concrete mixtures. 14th ed. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002. 358 p.
3. *Mansour A., Mohyeddin A., Lee J.* Load-bearing behaviour of anchors in fibre-reinforced concrete – a state of the art review // *J. Build. Eng.* 2024. V. 91 (5). Art. 109580. doi: 10.1016/j.jobe.2024.109580
4. *Rajbhandari P., Lee J., Pokharel T., Amirsardari A., Gad E.* Tensile performance of headed fasteners in high-strength concrete: Experimental and numerical analysis // *Construction and Building Materials*. 2025. V. 484. Art. 142225. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142225
5. *Padilla A., Najvani M.A., Knight E., Rougier E., Stormont J., Reda Taha M.M.* Correlating damage and cracking with air (gas) permeability in concrete using the Brazilian tension test // *Construction and Building Materials*. 2022. V. 348. Art. 128616. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.1286
6. *Fayed A.S., Sherbini A.S., Abou El-Mal H.S.S.* Mixed mode fracture behavior of fiber reinforced concrete; Experimental and numerical analysis adopting cracked Brazilian disc specimen // *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. V. 14 (9). Art. 102132. doi: 10.1016/j.asej.2023.102132
7. *Ma W., Gao D., Ding C., Wang L., Tang J.* Whole process analysis on splitting tensile behavior and damage mechanism of 3D/4D/5D steel fiber reinforced concrete using DIC and AE techniques // *Construction and Building Materials*. 2024. V. 457. Art. 139295. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139295
8. ASTM D3967–16. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2016. doi: 10.1520/D3967-1/
9. AS 1012.10. Standards Australia, Method 10: determination of indirect tensile strength of concrete cylinders ('Brazil' or splitting test). Standards Australia, 2000.
10. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2018. 32 с.
11. *Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V.* Spall fracture. New York: Springer, 2003. 404 p. doi: 10.1007/b97226
12. *Hall C.A., Chhabildas L.C., Reinhart W.D.* Shock Hugoniot and release states in concrete mixtures with different aggregate sizes from 3 to 23 GPa // *AIP Conf. Proc.* 1998. V. 429. P. 119–122.
13. *Ламзин Д.А., Гонов М.Е., Брагов А.М., Ломунов А.К.* Поведение мелкозернистых фибробетонов при разных режимах механического нагружения // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2023. № 81. С. 97–109. doi: 10.17223/19988621/81/9
14. *Forquin P., Erzar B.* On the Processing of Spalling Experiments. Part I: Identification of the Dynamic Tensile Strength of Concrete // *Int. J. Fract.* 2010. V. 163. P. 193–215. doi: 10.1007/s10704-009-9419-3

15. Schuler H., Mayrhofer C., Thoma K. Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates // *International Journal of Impact Engineering*. 2006. V. 32. P. 1635–1650. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.010
16. Kipp M.E., Chhabildas L.C., Reinhart W.D. Chhabildas and W. D. Reinhart. Elastic shock response and spall strength of concrete // *AIP Conf. Proc.* 1998. V. 429. P. 557–560. doi: 10.1063/1.556664
17. Forquin P., Erzar B. Dynamic fragmentation process in concrete under impact and spalling tests // *Int. J. Fract.* 2010. V. 163. P. 193–215. doi: 10.1007/s10704-009-9419-3
18. Chen J.-Y., Liu C.-C., Dong H.-W., Shi D.-S., Zhang Z.-X., Wang D.-J. Dynamic properties of concrete materials under shock loading // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 39. P. 119–123. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.011
19. Tsembeles K., Proud W.G. The dynamic behavior of micro-concrete // *AIP Conf. Proc.* 2006. V. 845. P. 1496–1499. doi: 10.1063/1.2263608
20. Andrews T., Chapman D.J., Proud W.G. The response of concrete to shock-loading // *AIP Conf. Proc.* 1998. V. 429. P. 119–122. doi: 10.1063/1.556638
21. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments // *Cement & Concrete Composites*. 2015. V. 55. P. 34–44. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011
22. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.
23. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43. P. 4669–4675. doi: 10.1063/1.1660986
24. Arioglu N., Girgin Z.C., Arioglu E. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application // *ACI Materials Journal*. 2006. V. 103 (1). P. 18–24.
25. Ahmad S.H., Shah S.P. Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete // *Journal – Prestressed Concrete Institute*. 1985. V. 30 (6). P. 92–119.
26. Shen D., Shi X., Zhu S., Duan X., Zhang J. Relationship between tensile Young's modulus and strength of Fly ash high strength concrete at early age // *Constr. Build. Mater.* 2016. V. 123. P. 317–326. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.06.145
27. Østergaard L. Early age fracture mechanics and cracking of concrete: experiments and modelling. Technical University of Denmark, 2003. 286 p.
28. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Kanel G.I., Razorenov S.V. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading // *International Journal of Fracture*. 2018. V. 209. P. 109–115. doi: 10.1007/s10704-017-0244-9
29. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Kanel G.I., Razorenov S.V. Compressive and tensile strength of steel fibrous reinforced concrete under explosive loading // *International Journal of Fracture*. 2019. V. 215. P. 129–138. doi: 10.1007/s10704-018-00342-w
30. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Ломунов А.К. Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона. Н/Новгород: Изд-во Нижегород. Ун-та, 2015. 269 с.

### References

1. Shanaka B., Mendis P., Duc Ngo T. (2016) Ductility design of reinforced very-high strength concrete columns (100-150 MPa). Using curvature and energy-based ductility indices. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 13(1). pp. 13–37. doi: 10.1186/s40069-019-0347-y
2. Kosmatka S.H., Kerkhoff B., Panarese W.C. (2002) *Design and Control of Concrete Mixtures*. Illinois: Portland Cement Association.
3. Mansour A., Mohyeddin A., Lee J. (2024) Load-bearing behaviour of anchors in fibre-reinforced concrete – a state of the art review. *Journal of Building Engineering*. 91(5). Article 109580. doi: 10.1016/j.jobe.2024.109580

4. Rajbhandari P., Lee J, Pokharel T., Amirsardari A., Gad E. (2025) Tensile performance of headed fasteners in high-strength concrete: Experimental and numerical analysis. *Construction and Building Materials*. 484. Article 142225. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142225
5. Padilla A., Najvani M.A., Knight E., Rougier E., Stormont J., Reda Taha M.M. (2022) Correlating damage and cracking with air (gas) permeability in concrete using the Brazilian tension test. *Construction and Building Materials*. Article 128616. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.1286
6. Fayed A.S., Sherbini A.S., Abou El-Mal H.S.S. (2023) Mixed mode fracture behavior of fiber reinforced concrete; Experimental and numerical analysis adopting cracked Brazilian disc specimen. *Ain Shams Engineering Journal*. 14(9). Article 102132. doi: 10.1016/j.asej.2023.102132
7. Ma W., Gao D., Ding C., Wang L., Tang J. (2024) Whole process analysis on splitting tensile behavior and damage mechanism of 3D/4D/5D steel fiber reinforced concrete using DIC and AE techniques. *Construction and Building Materials*. 457. Article 139295. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139295
8. ASTM D3967-16 (2016) *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. ASTM International. West Conshohocken. PA. doi: 10.1520/D3967-1/
9. AS 1012.10 (2000) *Standards Australia, Method 10: Determination of Indirect Tensile Strength of Concrete Cylinders ('Brazil' or Splitting Test)*. Standards Australia.
10. GOST 10180-2012 (2018) *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nyim obraztsam* [Concretes. Methods for strength determination using reference specimens]. Moscow: Standartinform.
11. Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. (2003) *Spall Fracture*. New York: Springer. doi: 10.1007/b97226
12. Hall C.A., Chhabildas L.C., Reinhart W.D. (1998) Shock Hugoniot and release states in concrete mixtures with different aggregate sizes from 3 to 23 GPa. *AIP Conference Proceedings*. 429. pp. 119–122.
13. Lamzin D.A., Gonov M.E., Bragov A.M., Lomunov A.K. (2023) Povedenie melkozernistykh fibrobetonov pri raznykh rezhimakh mekhanicheskogo nagruzheniya [Response of fine-grained fiber-reinforced concrete under different mechanical loading conditions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 81. pp. 97–109. doi: 10.17223/19988621/81/9
14. Forquin P., Erzar B. (2010) On the processing of spalling experiments. Part I: Identification of the dynamic tensile strength of concrete. *International Journal of Fracture*. 163. pp. 193–215. doi: 10.1007/s10704-009-9419-3
15. Schuler H., Mayrhofer C., Thoma K. (2006) Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*. 32. pp. 1635–1650. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.010
16. Kipp M.E., Chhabildas L.C., Reinhart W.D. (1998) Elastic shock response and spall strength of concrete. *AIP Conference Proceedings*. 429. pp. 557–560. doi: 10.1063/1.55664
17. Forquin P., Erzar B. (2010) Dynamic fragmentation process in concrete under impact and spalling tests. *International Journal of Fracture*. 163. pp. 193–215. doi: 10.1007/s10704-009-9419-3
18. Chen J.-Y., Liu C.-C., Dong H.-W., Shi D.-S., Zhang Z.-X., Wang D.-J. (2013) Dynamic properties of concrete materials under shock loading. *Construction and Building Materials*. 39. pp. 119–123 doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.011
19. Tsembelis K., Proud W.G. (2006) The dynamic behavior of micro-concrete. *AIP Conference Proceedings*. 845. pp. 1496–1499. doi: 10.1063/1.2263608
20. Andrews T., Chapman D.J., Proud W.G. (1998) The response of concrete to shock-loading. *AIP Conference Proceedings*. 429. pp. 119–122. doi: 10.1063/1.55638
21. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. (2015) Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments. *Cement & Concrete Composites*. 55. pp. 34–44. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011

22. Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. (1996) *Udarnovolnovnye yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Shock-wave phenomena in condensed media]. Moscow: Yanus-K.
23. Barker L.M., Hollenbach R.E. (1972) Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *Journal of Applied Physics*. 43. pp. 4669–4675. doi: 10.1063/1.1660986
24. Arioglu N., Girgin Z.C., Arioglu E. (2006) Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application. *ACI Materials Journal*. 103(1). pp. 18–24.
25. Ahmad S.H., Shah S.P. (1985) Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete. *Journal - Prestressed Concrete Institute*. 30(6). pp. 92–119.
26. Shen D., Shi X., Zhu S., Duan X., Zhang J. (2016) Relationship between tensile Young's modulus and strength of Fly ash high strength concrete at early age. *Construction and Building Materials*. 123. pp. 317–326. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.06.145
27. Østergaard L. (2003) *Early Age Fracture Mechanics and Cracking of Concrete: Experiments and Modelling*. Technical University of Denmark.
28. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Kanel G.I., Razorenov S.V. (2018) Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading. *International Journal of Fracture*. 209. pp. 109–115. doi: 10.1007/s10704-017-0244-9
29. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Kanel G.I., Razorenov S.V. (2019) Compressive and tensile strength of steel fibrous reinforced concrete under explosive loading. *International Journal of Fracture*. 215. pp. 129–138. doi: 10.1007/s10704-018-00342-w
30. Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K. (2015) *Vysokoskorostnaya deformatsiya melkozernistogo betona i fibrobetona* [High-speed deformation of fine-grained concrete and fiber-reinforced concrete]. Nizhny Novgorod: LSUNN.

#### **Сведения об авторах:**

**Петров Павел Олегович** – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: souzbeton\_petrov@mail.ru

**Козулин Александр Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, доцент Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kozulyn@ftf.tsu.ru

**Савиных Андрей Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях, ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия). E-mail: savas@ficp.ac.ru

**Гаркушин Геннадий Валерьевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия). E-mail: garkushin@ficp.ac.ru

**Жуков Илья Александрович** – доктор технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: gofra930@gmail.com

#### **Information about the authors:**

**Petrov Pavel O.** (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: souzbeton\_petrov@mail.ru

**Kozulin Alexander A.** (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kozulyn@ftf.tsu.ru

**Savinykh Andrey S.** (Candidate of Physics and Mathematics, Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation). E-mail: savas@ficp.ac.ru

**Garkushin Gennadiy V.** (Candidate of Physics and Mathematics, Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation). E-mail: garkushin@ficp.ac.ru

**Zhukov Pya A.** (Doctor of Technical Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 05.11.2025; принята к публикации 05.02.2026*

*The article was submitted 05.11.2025; accepted for publication 05.02.2026*