

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2026. Т. 28. № 2. С. 234–242.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2026; 28 (2): 234–242.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 9.666.7.017

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-234-242>

EDN: XNOCWR

### ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПУТЕМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ИСХОДНОГО ЦЕМЕНТА И ЖИДКОСТИ ЗАТВОРЕНИЯ

Дмитрий Александрович Афанасьев<sup>1</sup>, Александр Викторович Рубанов<sup>2</sup>,  
Николай Петрович Горленко<sup>2</sup>, Юрий Сергеевич Саркисов<sup>2</sup>,  
Бекзотбек Дониёрбек Султонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-исследовательская организация “Сибур-Томскнефтехим”»,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена тем, что повышение эксплуатационных характеристик цементного камня остается одной из ключевых задач современного строительного материаловедения, несмотря на многолетнюю историю изучения цементных систем.

**Цель** работы состоит в изучении влияния химической добавки и ультразвуковой активации жидкости затворения на прочность и другие эксплуатационные характеристики цементного камня. В ходе исследования использовали цементы двух марок – ЦЕМ I 52,5Н и ЦЕМ II/A 42,5Б, а также индивидуальные клинкерные минералы (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF) заводского изготовления (производство РФ).

**Методы.** Испытания на прочность при сжатии выполняли на образцах-кубиках размером (10×10×10)10<sup>-3</sup> м в установленные сроки структурообразования. Распределение частиц по размерам анализировали с помощью лазерного анализатора Horiba LA-950, а дифрактограммы продуктов твердения и исходных веществ снимали на приборе Shimadzu XRD-7000. Ультразвуковую активацию воды проводили на установке УЗТА-0,15/22-ОСу. В качестве химической добавки применяли нанодисперсный оксид кремния и микродисперсный карбонат кальция в соотношении 1:2, вводя ее в цементное тесто в количестве 10 % от массы цемента.

*Результаты* исследования подтвердили, что гидравлическая активность цемента возрастает с повышением его марки. Установлено также, что ультразвуковая обработка жидкости затворения активирует воду по отношению к цементу. Наиболее значимый эффект достигнут при совместном модифицировании цемента и воды: прочность цементного камня увеличилась на 15–30 %. Полученные данные открывают перспективы для оптимизации составов цементных композиций и повышения эксплуатационных свойств строительных материалов.

**Ключевые слова:** цемент, клинкерные минералы, цементный камень, прочность, жидкость затворения, химическая добавка, ультразвуковая активация, дифрактограмма

**Для цитирования:** Афанасьев, Д.А., Рубанов, А.В., Горленко, Н.П., Саркисов, Ю.С., Султонов, Б.Д. Повышение прочности цементного камня путем физико-химической активации исходного цемента и жидкости затворения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 2. С. 234–242. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-234-242>. EDN: XNOCWR

## ORIGINAL ARTICLE

**STRENGTH IMPROVEMENT OF HYDRATED CEMENT BY PHYSICOCHEMICAL ACTIVATION OF INITIAL CEMENT AND MIXING WATER**

Dmitriy A. Afanasyev<sup>1</sup>, Aleksandr V. Rubanov<sup>2</sup>, Nikolai P. Gorlenko<sup>2</sup>, Yuri S. Sarkisov<sup>2</sup>, Bekzodbek D. Sulonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Sibur-Tomskneftekhim Research Organization Limited Liability Company, Tomsk, Russia*

<sup>2</sup>*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract. Purpose:** The purpose of this work is to study the effect from the chemical additive and ultrasonic treatment of mixing water on strength and other performance characteristics of hydrated cement. Cements CEM I 52.5N and CEM II/A 42.5B are used and factory-made individual clinker minerals (C3S, C2S, C3A, C4AF) manufactured in the Russian Federation.

**Methodology/approach:** Compression strength testing is conducted on cubic samples with a size of  $(10 \times 10 \times 10) 10^{-3}$  m. The particle size distribution is analyzed by a Horiba LA 950 laser analyzer. XRD patterns of curing products and starting materials are obtained by a Shimadzu XRD-7000 X-ray Diffractometer. Ultrasonic treatment of mixing water is conducted on a 0.15/22 OS UZTA system. The chemical additive is nanodispersed silicon oxide and microdispersed calcium carbonate taken in the ratio of 1:2, which is added to the cement paste in the amount of 10 wt. %.

**Research findings:** It is confirmed that the cement hydraulic activity grows with its increasing grade. It is found that ultrasonic treatment of mixing water activates water with respect to cement. The most significant effect is achieved with the joint modification of cement and water: the strength of hydrated cement increases by 15–30 %.

**Value:** The obtained data open up prospects for optimizing the cement composition and improving operational properties of building materials.

**Keywords:** cement, clinker mineral, hydrated cement, strength, mixing water, chemical additive, ultrasonic treatment, X-ray diffraction

**For citation:** Afanas'ev, D.A., Rubanov, A.V., Gorlenko, N.P., Sarkisov, Yu.S., Sulonov, B.D. Strength Improvement of Hydrated Cement by Physicochemical Activation

of Initial Cement and Mixing Water. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (2): 234–242. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-234-242>. EDN: XNOCWR

### Введение

Повышение эксплуатационных характеристик цементного камня, несмотря на многолетнюю историю изучения цементных систем, до сих пор является одной из актуальных задач современного строительного материаловедения [1, 2, 3]. В настоящей работе изучено влияние химической добавки и ультразвуковой активации жидкости затворения на прочность и другие эксплуатационные характеристики цементного камня. В качестве сравнения структур твердения были выбраны два вида цементов различных марок, а также образцы цементного камня, полученные на основе индивидуальных клинкерных минералов заводского изготовления (производство РФ).

В качестве объектов исследования использовали цементы двух марок: ЦЕМ I марки 52,5Н и ЦЕМ II/A марки 42,5Б, а также индивидуальные клинкерные минералы  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ . Испытания на прочность при сжатии исследуемых образцов выполняли в установленные сроки структурообразования на образцах-кубиках размером  $(10 \times 10 \times 10) 10^{-3}$  м. Распределение по размерам частиц цементов и индивидуальных клинкерных минералов проводили методом лазерного анализатора размера частиц HORIBA LA-950 [4]. Дифрактограммы продуктов твердения и исходных веществ снимали на приборе Shimadzu XRD-7000 [5]. Ультразвуковую активацию воды проводили на приборе УЗТА-0,15/22-ОСу. В качестве химической добавки использовали нанодисперсный оксид кремния и микродисперсный карбонат кальция в соотношении 1:2. В цементное тесто добавку вводили в количестве 10 % от массы цемента.

### Результаты исследования

На рис. 1–6 представлены результаты лазерного гранулометрического анализа.

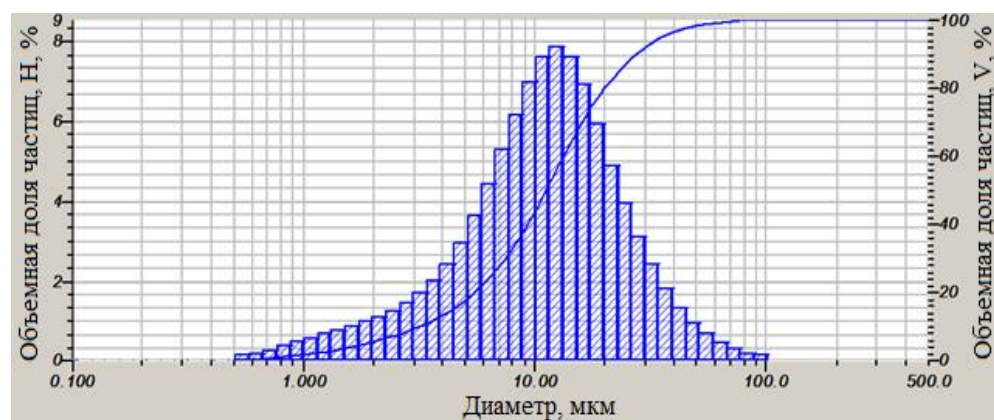


Рис. 1. Распределение размеров частиц образца цемента ЦЕМ II/A 42,5Б  
Fig. 1. Particle size distribution of CEM II/A 42.5B cement sample

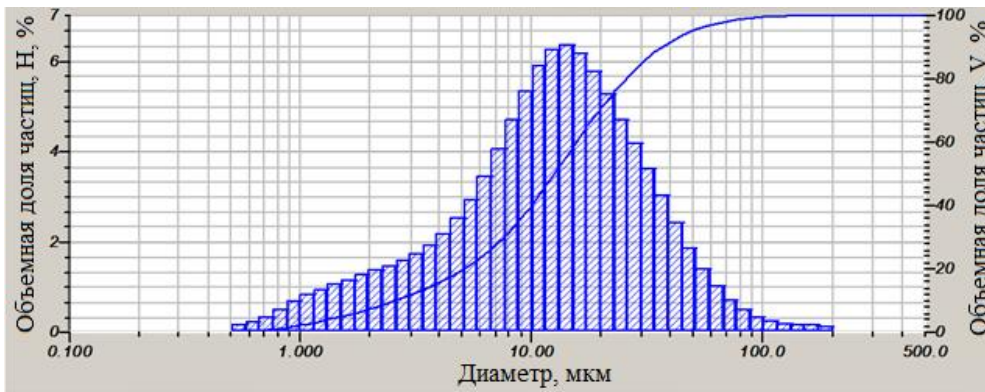


Рис. 2. Распределение размеров частиц образца цемента ЦЕМ I 52,5Н  
 Fig. 2. Particle size distribution of CEM I 52.5N cement sample

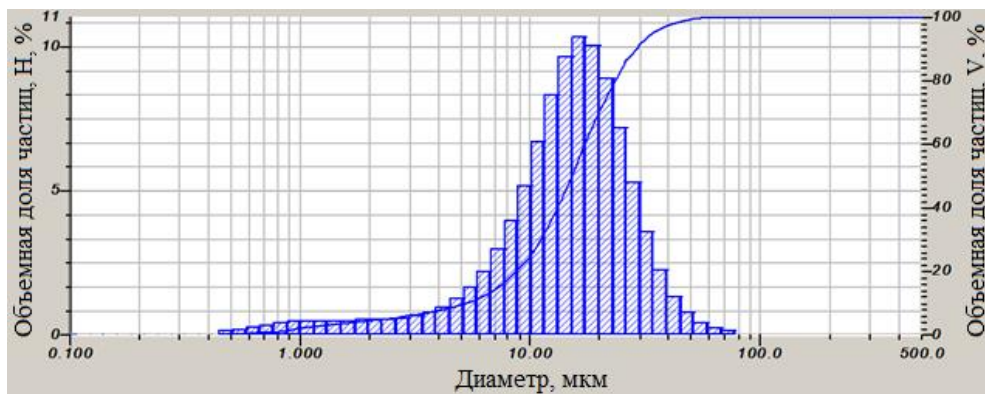


Рис. 3. Распределение размеров частиц минерала C<sub>3</sub>S  
 Fig. 3. Particle size distribution of C<sub>3</sub>S mineral

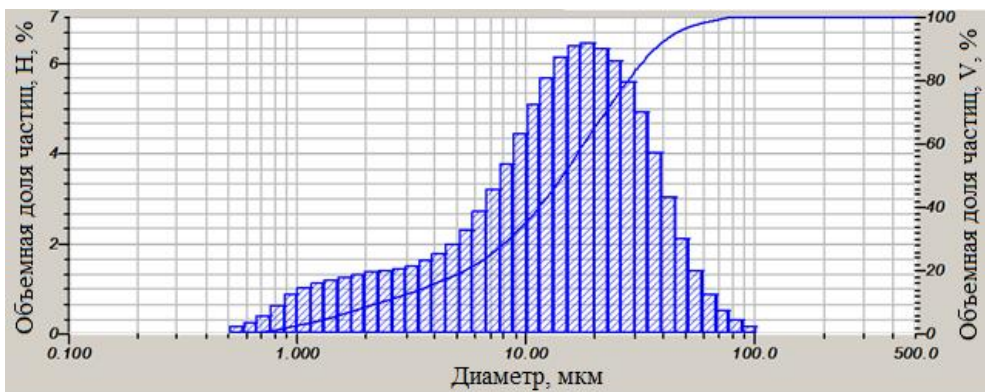
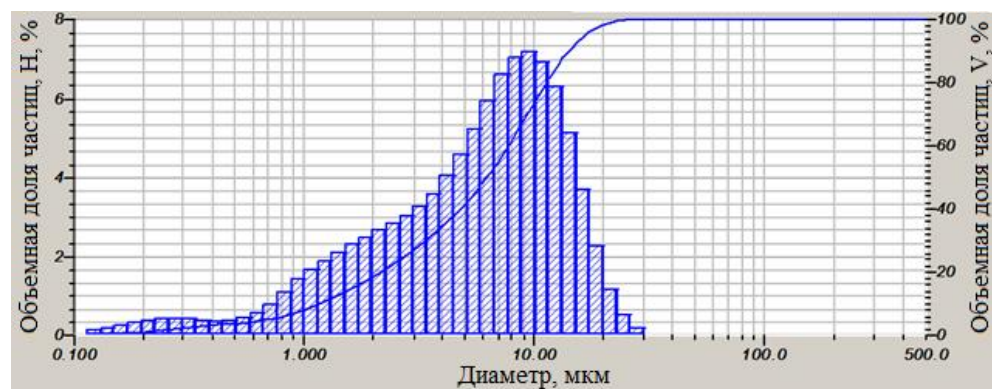
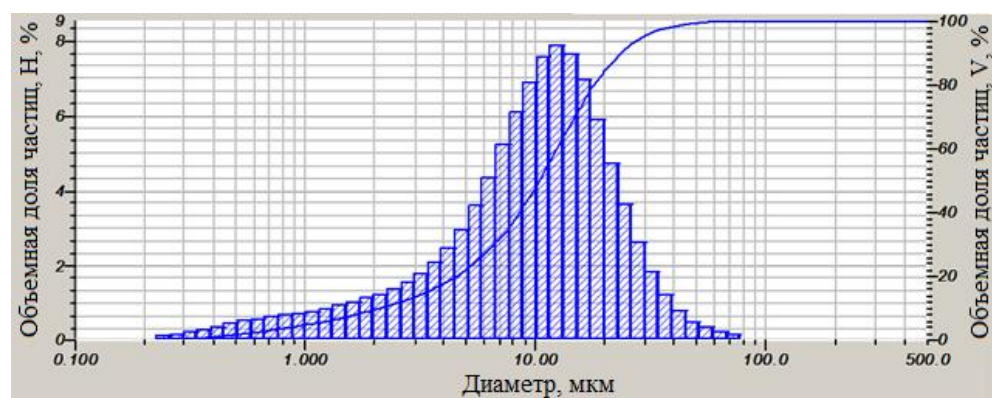


Рис. 4. Распределение размеров частиц минерала C<sub>2</sub>S  
 Fig. 4. Particle size distribution of C<sub>2</sub>S mineral

Рис. 5. Распределение размеров частиц минерала  $C_3A$ Fig. 5. Particle size distribution of  $C_3A$  mineralРис. 6. Распределение размеров частиц минерала  $C_4AF$ Fig. 6. Particle size distribution of  $C_4AF$  mineral

Как видно из рис. 1, 2, характеристический размер частиц находится в диапазоне 10–20 мкм, что обеспечивает основные закономерности процессов гидратации цемента.

Распределение частиц по размерам индивидуальных клинкерных минералов представлено на рис. 3–6.

Как видно из рис. 5, гистограмма трехкальциевого алюмината в отличие от других минералов (рис. 3, 4, 6) глубоко захватывает нанообласть. Этот факт является еще одним доказательством того, что  $C_3A$  обладает самой высокой реакционной способностью по отношению к воде. В результате взаимодействия с жидкостью затворения выделяется 200 Дж на 1 г минерала тепловой энергии.

Дифрактограммы образцов цемента представлены на рис. 7, 8.

Большую долю на представленных дифрактограммах занимает так называемая аморфная фаза (рис. 7, 8). При этом цементы более высокого класса характеризуются большей рентгеноаморфной долей в исходном порошкообразном состоянии. От соотношения рентгеноаморфной и кристаллической фаз зависит реакционная способность цемента и поведение фаз в процессе структурообразования.

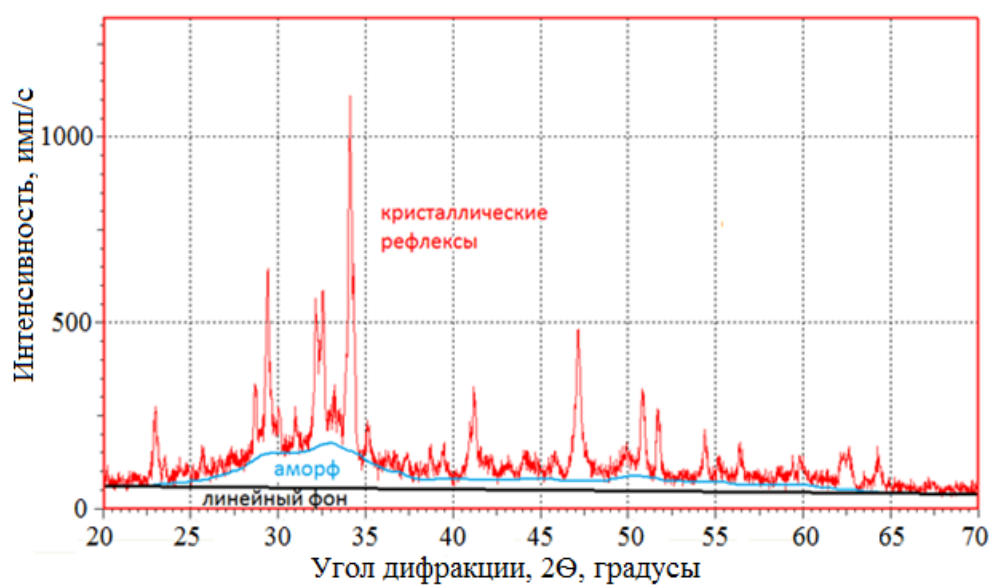


Рис. 7. Дифрактограмма образца цементного камня ЦЕМ II/A 42,5Б

Fig. 7. XRD pattern for hydrated CEM II/A 42.5B cement sample

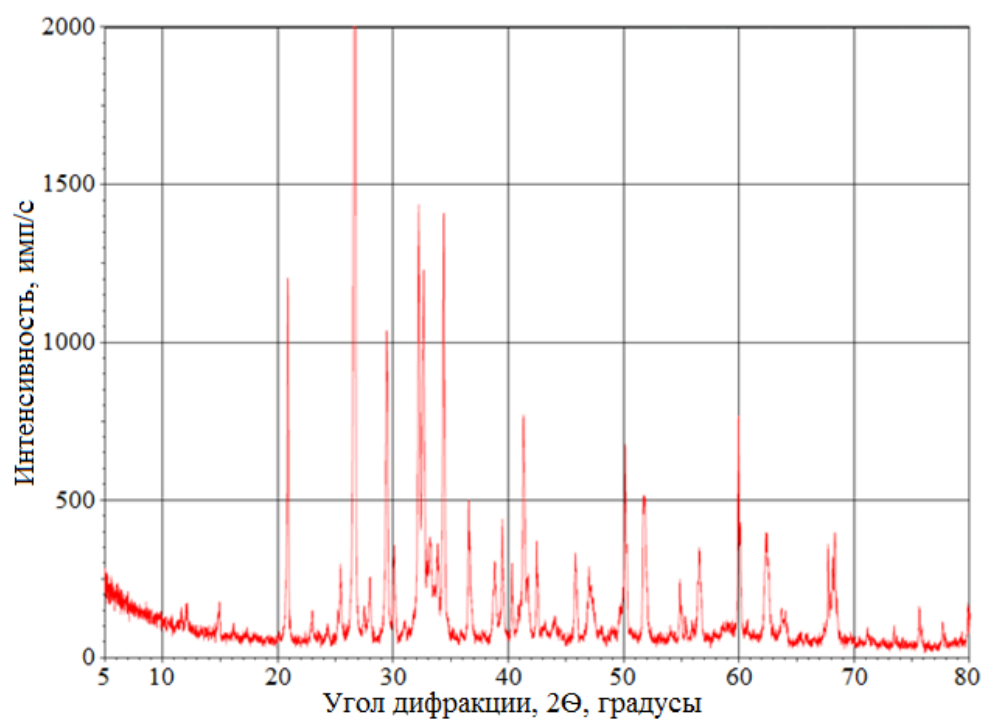


Рис. 8. Дифрактограмма образца цементного камня ЦЕМ I 52,5Н

Fig. 8. XRD pattern for hydrated CEM I 52.5N cement sample

Результаты определения прочности структур твердения для двух исследуемых типов цементов, модифицированных химической добавкой и обработанных ультразвуком, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Прочность при сжатии  $\sigma$  (МПа) модифицированной системы  
цемент ЦЕМ I 52,5Н – вода**

Table 1

**Compressive strength (MPa) of the modified CEM I 52.5N–water system**

Цементный камень	Прочность образцов, МПа, в зависимости от времени твердения, сут			
	1	3	7	28
Контроль	25,0	37,5	47,5	55,0
Химическая добавка	27,5	42,5	52,5	67,5
УЗ-активация	32,5	47,5	57,5	60,0
Совместное модифицирование	47,5	52,5	62,5	72,5

Таблица 2

**Прочность при сжатии  $\sigma$  (МПа) модифицированной системы  
цемент ЦЕМ II/A 42,5Б – вода**

Table 2

**Compressive strength (MPa) of the modified CEM II/A 42.5B –water system**

Цементный камень	Прочность образцов, МПа, в зависимости от времени твердения, сут			
	1	3	7	28
Контроль	19,5	22,5	32,5	45,0
Химическая добавка	22,5	27,5	37,5	47,5
УЗ-активация	25,0	32,5	42,5	50,0
Совместное модифицирование	27,5	37,5	47,5	52,5

Как следует из данных табл. 1 и 2, совместное модифицирование цементной системы химической добавкой и УЗ-активацией воды приводит к повышению прочности на 15–30 % по сравнению с контрольными образцами. При этом чем больше активность цемента, тем выше прирост прочности образцов, что согласуется с данными ряда научных работ [6, 7].

### Заключение

На образцах разных марок цемента различной активности показано влияние на свойства цементного камня добавки одной и той же природы и активации воды ультразвуком. Установлено, что механизм повышения прочности цементного камня заключается в увеличении реакционной способности цемента по отношению к воде путем воздействия ультразвуком на воду и модифицирования цемента химической добавкой. Результаты экспериментальных исследований показали, что совместное модифицирование цементной системы комплексной химической добавкой (нанодисперсный оксид кремния и микродисперсный

карбонат кальция) и активация воды затвердения ультразвуком приводят к повышению прочности на 15–30 % в зависимости от марки цемента по сравнению с контрольными образцами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецова, Т.В., Кудряшов, И.В., Тимашев, В.В. Физическая химия вяжущих веществ. Москва : Высшая школа, 1989. 384 с.
2. Пащенко, А.А. Теория цемента. Киев : Будівельник, 1991. 168 с.
3. Bullard, J.W., Jennings, H.M., Livingston, R.A., Nonat, A., Scherer, G.W., Schweitzer, J.S., Scrivener, K.L., Thomas, J.J. Mechanisms of cement hydration // *Cement and Concrete Research*. 2011. V. 41. P. 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.09.011>
4. Suherman, Ph.M., Riessen, A., O'Connor, B., Li, D., Bolton, D., Fairhurst, H. Determination of amorphous phase levels in Portland cement clinker // *Powder Diffraction*. 2002. V. 17. P. 178–185. <https://doi.org/10.1154/1.1471518>
5. De La Torre, A.G., Bruque, S., Aranda, M.A.G. Rietveld quantitative amorphous content analysis // *Journal of Applied Crystallography*. 2001. V. 34. № 2. P. 196–202. <https://doi.org/10.1107/S0021889801002485>
6. Хмелев, В.Н., Хмелев, С.С., Голых, Р.Н., Шалунов, А.В. Ультразвуковая кавитационная обработка вязких и дисперсных жидких сред // *Ползуновский вестник*. 2014. Т. 2. № 4. С. 110–114. EDN: TUYTEX
7. Лотов, В.А., Сударев, Е.А., Иванов, Ю.А. Тепловыделение в системе цемент-вода при гидратации и твердении // *Строительные материалы*. 2011. № 11. С. 35–37. EDN: OOKVUF

## REFERENCES

1. Kuznetsova, T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V. Physical Chemistry of Binders. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 384 p. (In Russian)
2. Pashchenko, A.A. Theory of Cement. Kyiv: Budivelnik, 1991. 168 p. (In Russian)
3. Bullard, J.W., Jennings, H.M., Livingston, R.A., Nonat, A., Scherer, G.W., Schweitzer, J.S., Scrivener, K.L., Thomas, J.J. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41: 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.09.011>
4. Suherman, Ph.M., Riessen, A., O'Connor, B., Li, D., Bolton, D., Fairhurst, H. Determination of Amorphous Phase Levels in Portland Cement Clinker. *Powder Diffraction*. 2002; 17: 178–185. <https://doi.org/10.1154/1.1471518>
5. De La Torre, A.G., Bruque, S., Aranda, M.A.G. Rietveld Quantitative Amorphous Content Analysis. *Journal of Applied Crystallography*. 2001; 34(2): 196–202. <https://doi.org/10.1107/S0021889801002485>
6. Khmelev, V.N., Khmelev, S.S., Golykh, R.N., Shalunov, A.V. Ultrasonic Cavitation Treatment of Viscous and Dispersed Liquid Media. *Polzunovskii vestnik*. 2014; 2(4): 110–114. EDN: TUYTEX (In Russian)
7. Lotov, V.A., Sudarev, E.A., Ivanov, Yu.A. Heat Generation in Cement-Water System during Hydration and Hardening. *Stroitel'nye materialy*. 2011 (11): 35–37. EDN: OOKVUF (In Russian)

## Сведения об авторах

Афанасьев Дмитрий Александрович, генеральный директор, ООО «НИОСТ», 634067, г. Томск, Кузовлевский тр., 2, rubal06@yandex.ru

Рубанов Александр Викторович, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rubanov@tsuab.ru

Горленко Николай Петрович, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gorlen52@mail.ru

Саркисов Юрий Сергеевич, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sarkisov@tsuab.ru

*Султонов Бекзотбек Дониёрбек*, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rubal06@yandex.ru

**Authors Details**

*Dmitry A. Afanasyev*, Director General, ООО “NIOST”, 2, Kuzovlevsky Tract, 634067, Tomsk, Russia, rubal06@yandex.ru

*Aleksandr V. Rubanov*, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rubanov@tsuab.ru

*Nikolay P. Gorlenko*, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gor-len52@mail.ru

*Yuri S. Sarkisov*, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sarkisov@tsuab.ru

*Bezodbek D. Sultonov*, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rubal06@yandex.ru

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.12.2025  
Одобрена после рецензирования 15.03.2026  
Принята к публикации 18.03.2026

Submitted for publication 22.12.2025  
Approved after review 15.03.2026  
Accepted for publication 18.03.2026