

Ю.В. ПУХАРЕНКО^{1,3}; В.И. ТКАЧЕНКО^{1,3}; М.К. КУДОБАЕВ^{1,2}

¹СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург, Россия

²ООО «ПГС», г. Санкт-Петербург, Россия

³НИИСФ РААСН, г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО НАНОМОДИФИКАТОРА НА УСАДКУ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

Аннотация. В статье рассматривается влияние комплексного наномодификатора на усадочные деформации цементно-песчаного бетона. Указывается, что введение в смесь определенного количества целлюлозных нановолокон сдерживает деформации цементной матрицы и, таким образом, существенно уменьшает усадку, однако одновременно может приводить к снижению прочности композита в раннем возрасте. С целью компенсации негативных последствий изучена возможность применения комплексной модифицирующей системы, включающей суперпластификатор, наноцеллюлозу и модификатор, состоящий из наночастиц различной природы. Представлены результаты исследований влияния состава комплексного наномодификатора на усадку и прочность мелкозернистого бетона. Установлено рациональное сочетание компонентов, обеспечивающее снижение усадочных деформаций при сохранении прочностных характеристик материала.

Ключевые слова: цементный бетон, наноцеллюлоза, комплексная добавка, наномодификатор, усадка, прочность.

Для цитирования: Пухаренко Ю.В., Ткаченко В.И., Кудобаев М.К. Влияние комплексного наномодификатора на усадку мелкозернистого бетона // Строительство и реконструкция. 2026. №4. С. 122-129. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-126-4-122-129. EDN: VSAEWF

© Пухаренко Ю.В., Ткаченко В.И., Кудобаев М.К., 2026



Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons NonCommercial license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Research Article

YU.V. PUKHARENKO^{1,3}; V.I. TKACHENKO^{1,3}; M.K. KUDOBAEV^{1,2}¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint Petersburg, Russia²PGS LLC, Saint Petersburg, Russia³Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia

EFFECT OF A COMPLEX NANOMODIFIER ON THE SHRINKAGE OF FINE-GRAINED CONCRETE

Abstract. The article discusses the effect of a complex nano modifier on shrinkage deformations of cement-sand concrete. It is indicated that the introduction of a certain number of cellulose nanofibers into the mixture inhibits the deformation of the cement matrix and, thus, significantly reduces shrinkage, but at the same time can lead to a decrease in the strength of the composite at an early age. In order to compensate for the negative effects, the possibility of using a complex modifying system, including a superplasticizer, nanocellulose and a modifier consisting of nanoparticles of various nature, has been studied. The results of studies of the effect of the composition of a complex nanomodifier on shrinkage and strength of fine-grained concrete are presented. A rational combination of components has been established to reduce shrinkage deformations while maintaining the strength characteristics of the material.

Keywords: cement concrete, nanocellulose, complex additive, nano modifier, shrinkage, strength.

For citation: Pukharensko Yu.V., Tkachenko V.I., Kudobaev M.K. Effect of a complex nanomodifier on the shrinkage of fine-grained concrete. *Building and Reconstruction*. 2026; 4: 122-129. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-126-4-122-129. EDN: VSAEWF

Введение

Усадка цементных композитов является одной из причин образования трещин, повышения проницаемости и снижения долговечности строительных конструкций [1-4]. Перспективным способом снижения усадочных деформаций является направленное управление процессами структурообразования цементной матрицы и ее дисперсное армирование волокнами различной природы [3, 5, 6].

В последние годы для этих целей все чаще применяется наноцеллюлоза, представляющая собой систему наноразмерных волокон с развитой поверхностью и высоким отношением длины к диаметру [7-9].

В ходе предварительных экспериментов авторы данной работы подтвердили, что введение наноцеллюлозы, даже в небольших концентрациях, способствует снижению усадочных деформаций цементного камня (рисунок 1), что объясняется способностью нановолокон формировать пространственный каркас, ограничивать развитие микродефектов и перераспределять внутренние напряжения в цементной матрице.

Полученные результаты позволяют предположить, что при увеличении количества наноцеллюлозы в смеси можно ожидать дальнейшего снижения усадки цементных композитов. Вместе с тем установлено, что повышение содержания наноцеллюлозы может сопровождаться снижением ранней прочности цементного камня [9, 10], что определяет необходимость поиска решений, позволяющих при увеличении дозировки наноцеллюлозы сохранить прочностные характеристики материала. Представляется, что для этого может быть использована разработанная авторами комплексная добавка на основе суперпластификатора и наноцеллюлозы, обеспечивающая улучшение структуры и повышение прочности цементного камня [11].

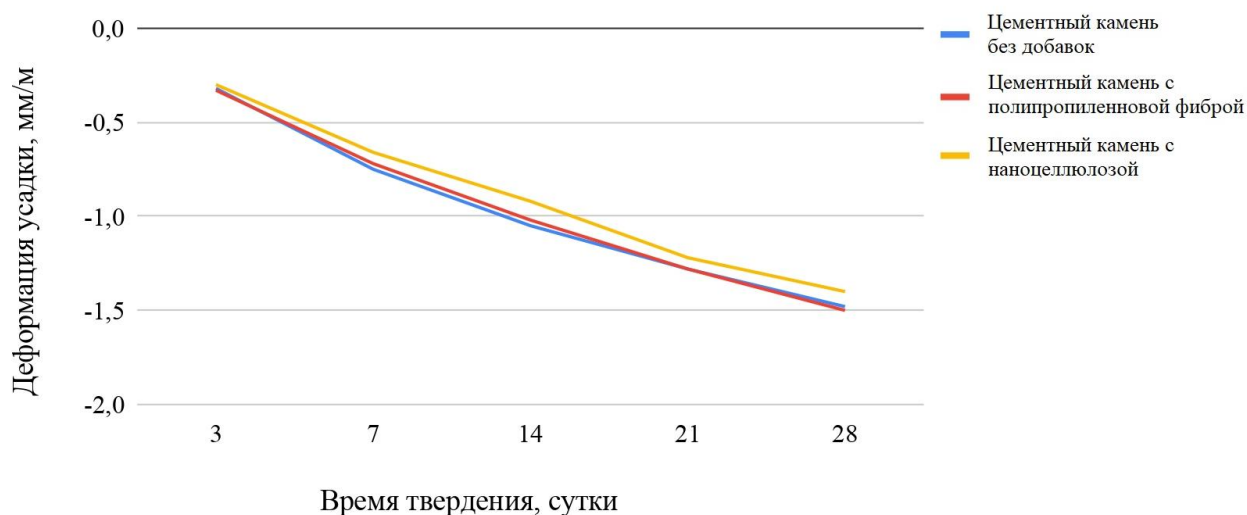


Рисунок 1 – Линейная деформация усадки цементного камня

Дальнейшее развитие и повышение эффективности данного способа связано с введением в состав добавки наномодификатора, содержащего комплекс наночастиц, дополняющих действие друг друга и оказывающего направленное воздействие на процессы гидратации и структурообразование цементных композитов. Предполагается, что применение комплексного наномодификатора позволит компенсировать снижение ранней прочности, возникающее при использовании повышенных концентраций наноцеллюлозы, при сохранении ее антиусадочного эффекта. Таким образом, целью работы являлось исследование возможности снижения усадочных деформаций мелкозернистого бетона путем повышения концентрации наноцеллюлозы при сохранении прочности материала за счет введения разработанного комплексного наномодификатора.

Модели и методы

Поскольку усадка бетонов во многом связана с процессами, происходящими в цементной матрице, ее снижение целесообразно обеспечивать за счет направленного воздействия на структурообразование нижних нанометровых уровней. В настоящей работе в качестве такого воздействия рассматривается введение комплексной добавки на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и нанофибриллярной целлюлозы с соотношением указанных компонентов 1:(50-60) в пересчете на сухое вещество [11]. Для повышения эффективности базовой добавки в ее состав дополнительно введен наномодификатор, представляющий собой сочетание нанокремнезема и углеродных фуллероидных наночастиц, объединенных с помощью специальной технологии в нанодисперсный порошок с заранее установленным и апробированным сочетанием компонентов. Предполагается, что такое дополнение позволит сохранить положительное влияние наноцеллюлозы в процессе усадки цементного бетона и, одновременно, нивелировать отрицательное влияние ее повышенных концентраций на ранний набор прочности за счет активизирующего действия на процессы гидратации цемента.

Таким образом, задачей исследования являлось определение рационального сочетания повышенных концентраций наноцеллюлозы в составе комплексной добавки с органоминеральным наномодификатором, обеспечивающего снижение усадочных деформаций мелкозернистого бетона без ухудшения его прочностных характеристик.

Результаты исследования и их анализ

При проведении экспериментальных исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н и кварцевый песок, удовлетворяющие требованиям нормативной документации для изготовления цементных бетонов. Исследования проводились на мелкозернистом бетоне с соотношением цемент: песок = 1:2 без добавок и модифицированном бетоне того же состава с варьированием количества наномодификаторов. Водоцементное отношение для всех составов принималось постоянным.

Приготовление смесей осуществлялось в лабораторном смесителе принудительного действия СЛ-5, в который загружали сухие компоненты (цемент и песок), после чего вводили воду затворения с предварительно растворенными в ней суперпластификатором (СП), наноцеллюлозой (НЦ) и наномодификатором (НМ) и осуществляли 2-хкратное (по 3 минуты каждое) перемешивание с интервалом в 5 минут. Применение двухстадийного режима перемешивания обусловлено необходимостью равномерного распределения нанокомпонентов и формирования однородной структуры цементной системы. Из полученной смеси литьевым способом формовали образцы размером 40х40х160 мм, которые выдерживались в воздушно-сухих условиях лаборатории в течение 28 суток с периодическим проведением испытаний. При определении физико-механических характеристик цементных образцов использовались стандартные методы испытаний, закреплённые в нормативно-технической документации.

Результаты определения усадочных деформаций мелкозернистых бетонов различного состава представлены на рисунке 2.

Из рисунка следует, что бетон без добавок (контрольный состав) характеризуется наибольшими значениями усадочных деформаций на протяжении всего периода твердения. При этом, наиболее интенсивный рост усадки наблюдается в ранние сроки твердения, после чего ее скорость постепенно снижается, что объясняется активным протеканием процессов гидратации цемента и испарением части свободной воды в начальный период твердения. Введение комплексной добавки, содержащей суперпластификатор, наноцеллюлозу и наномодификатор, приводит к существенному снижению усадочных деформаций твердеющего бетона по сравнению с контрольным составом. При этом увеличение содержания наномодификатора от 0,005 до 0,01 % сопровождается дополнительным уменьшением усадки.

Результаты определения прочности цементных бетонов при различном количестве комплексного наномодификатора представлены на рисунке 3.

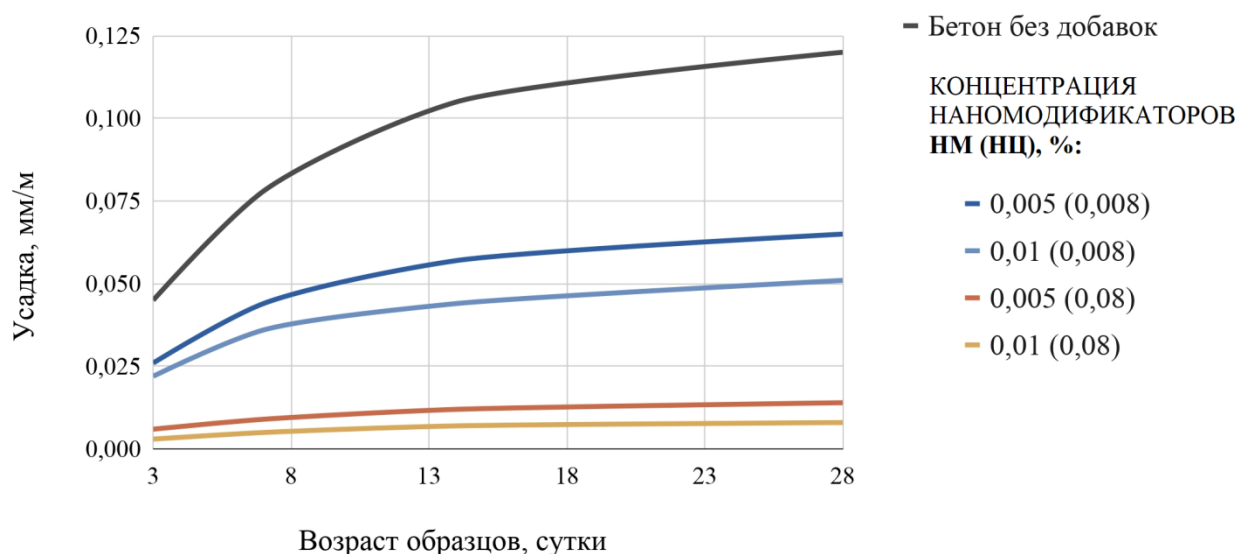


Рисунок 2 – Влияние комплексного наномодификатора на усадку мелкозернистого бетона

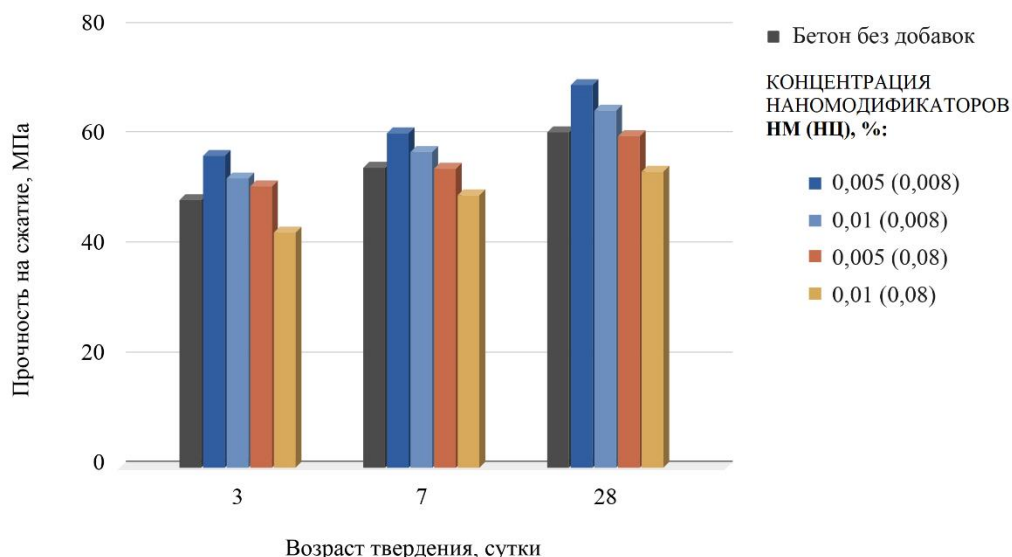


Рисунок 3 – Влияние комплексного модификатора на прочность мелкозернистого бетона

Полученный эффект может быть связан с более интенсивным формированием продуктов гидратации и уплотнением структуры цементного композита вследствие совместного действия наноцеллюлозы, нанокремнезема и углеродных фуллероидных наночастиц. Одновременно повышение количества наноцеллюлозы способствует ограничению деформаций за счет формирования пространственной волокнистой структуры. Таким образом, наибольшее снижение усадки на всех сроках твердения получено для составов с повышенным содержанием наноцеллюлозы.

Полученные данные свидетельствуют о том, что введение комплексного наномодификатора позволяет компенсировать отрицательное влияние повышенных концентраций наноцеллюлозы (НЦ) на ранний набор прочности бетона. При этом наибольший положительный эффект получен для состава комплексной добавки, содержащего наноцеллюлозу (НЦ) и наномодификатор (НМ) в количестве 0,08% и 0,005 % соответственно. Данный состав характеризуется прочностью, близкой к прочности контрольного состава во все сроки твердения, что указывает на возможность применения повышенных концентраций наноцеллюлозы без существенного ухудшения механических характеристик композита.

Полученный эффект может быть объяснен совместным действием компонентов наномодификатора: углеродные фуллероидные наночастицы, благодаря развитой поверхности и высокой поверхностной энергии, способны выступать дополнительными центрами кристаллизации продуктов гидратации цемента и активизировать процессы структурообразования на ранних стадиях твердения [12-15], а нанокремнезем одновременно и параллельно участвует во вторичных реакциях с гидроксидом кальция, обеспечивая образование дополнительного количества гидросиликатов и способствуя уплотнению структуры цементного камня [6]. В результате действие наномодификатора частично компенсирует снижение прочности, связанное с повышением степени насыщения цементной матрицы целлюлозными нановолокнами.

Заключение

1. В результате проведенных исследований установлено, что применение комплексной добавки, содержащей суперпластификатор, наноцеллюлозу, нанокремнезем и углеродные фуллероидные наночастицы, оказывает существенное влияние на процессы структурообразования мелкозернистого бетона, его усадочные деформации и прочностные характеристики.

2. Показано, что повышение концентрации наноцеллюлозы способствует снижению усадочных деформаций вследствие насыщения цементной матрицы нановолокнами и ограничения деформаций в процессе твердения. Установлено, что введение наномодификатора позволяет компенсировать отрицательное влияние повышенных концентраций наноцеллюлозы на прочность цементного композита в раннем возрасте. Полученные результаты свидетельствуют о совместном действии компонентов комплексного наномодификатора, обеспечивающем формирование более плотной и устойчивой структуры цементного камня.

В целом результаты исследования подтверждают перспективность применения повышенных концентраций наноцеллюлозы совместно с комплексным наномодификатором для направленного регулирования структуры и свойств цементных композитов.

Благодарности

Исследования выполнены в соответствии с Планом фундаментальных научных исследований РААСН и Минстроя РФ на 2021-2030 г.г. (тема 3.1.2.4. Разработка научных и практических основ структурного модифицирования цементных композитов нанобибриллирной целлюлозой).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pham T.M., Hao H., Hao Y. Fibre-reinforced concrete: State-of-the-art review on durability and cracking behaviour // *Case Studies in Construction Materials*. 2025. DOI: DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04574. EDN: PDDDBQS.
2. Da Silva Neto J.T., et al. Fiber-reinforced cementitious composites: recent advances and future perspectives // *Discover Civil Engineering*. 2025. DOI: 10.1007/s44290-025-00209-9. EDN: YSSFAV.
3. Folorunsho A.B., et al. A Review on the Performance of Fibers on Restrained Shrinkage Cracking in Concrete // *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 8. Article 2477. DOI: 10.3390/buildings14082477. EDN: ZKEQZC.
4. Bandagar S.S., et al. A Study on the Shrinkage, Cracking and Durability of Fiber Reinforced Concrete // *IJIREICE*. 2024. DOI: 10.17148/IJIREICE.2024.12604.
5. Пухаренко, Ю. В. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2022. – Т. 19, № 5 (87). – С. 752–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761. EDN: SPRCLI.
6. Zeng Y., Peng L., Ma B., Sun W., Shi X., Zou Z., Chen W. Influence of multi-walled carbon nanotubes on the performance of nano-silica enhanced lightweight cement-based composites under cyclic action of freeze-thaw and erosion. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.143132. EDN: PSDCYH.
7. Moon R.J., Martini A., Nairn J. et al. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites // *Chemical Society Reviews*. 2011. Vol. 40. No. 7. P. 3941–3994. DOI: 10.1039/c0cs00108b
8. Abdul Khalil H.P.S., Bhat A.H., Ireana Yusra A.F. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review // *Carbohydrate Polymers*. 2012. Vol. 87. No. 2. P. 963–979. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.08.078
9. Klemm D., Kramer F., Moritz S. et al. Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials // *Angewandte Chemie International Edition*. 2011. Vol. 50. No. 24. P. 5438–5466. DOI: 10.1002/anie.201001273
10. Хирхасова (Ткаченко), В. И. Влияние наноцеллюлозы на процесс гидратации портландцемента и свойства бетона / В. И. Хирхасова // *Вестник гражданского инженерного*. – 2020. – № 58 (82). – С. 155-160. DOI: [10.23968/1999-5571-2020-17-5-155-160](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-5-155-160) EDN: [LKNNJO](https://www.edn.ru/LKNNJO)
11. Пухаренко, Ю. В. Целлюлоза в бетоне – новое направление в строительной нанотехнологии / Ю. В. Пухаренко, И. У. Аубакирова, В. И. Хирхасова (Ткаченко) // *Строительные материалы*. – 2020. – № 7. – С. 39-45. DOI: [10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44) EDN: [WORYOY](https://www.edn.ru/WORYOY)
12. Пухаренко, Ю. В. Модификатор цементных композитов на основе наноцеллюлозы / Ю. В. Пухаренко, И. У. Аубакирова, В. И. Ткаченко // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2025. – № 3. – С. 65-71. DOI: [10.33622/0869-7019.2025.03.05-11](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2025.03.05-11) EDN: [YGVSWJ](https://www.edn.ru/YGVSWJ)
13. Пухаренко, Ю. В. Влияние углеродных наноматериалов на структуры и свойства цементных бетонов / Ю. В. Пухаренко, И. У. Аубакирова, В. Д. Староверов // *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12–16 мая 2014 г.)*: в 7 т. – Т. 6. – Москва: МГСУ, 2014. – С. 205-211. EDN: [UCDLHL](https://www.edn.ru/UCDLHL)
14. Пухаренко, Ю. В. Особенности структурообразования цементных композитов в присутствии углеродных наночастиц фуллероидного типа / Ю. В. Пухаренко, Д. И. Рыжов, В. Д. Староверов // *Вестник МГСУ*. – 2017. – № 7 (106). – С. 718-723. DOI: [10.22227/1997-0935.2017.7.718-723](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.7.718-723) EDN: [ZATDHP](https://www.edn.ru/ZATDHP)

15. Пухаренко, Ю. В. Эффективность активации воды затворения углеродными наночастицами / Ю. В. Пухаренко, И. У. Аубакирова, В. Д. Староверов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 1. – С. 40-45. EDN: [NBMYNL](#)

REFERENCES

1. Pham T.M., Hao H., Hao Y. Fibre-reinforced concrete: State-of-the-art review on durability and cracking behaviour. *Case Studies in Construction Materials*. 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04574. EDN: [PDDBOS](#)
2. Da Silva Neto J.T., et al. Fiber-reinforced cementitious composites: recent advances and future perspectives. *Discover Civil Engineering*. 2025. DOI: 10.1007/s44290-025-00209-9. EDN: [YSSFAV](#)
3. Folorunsho A.B., et al. A Review on the Performance of Fibers on Restrained Shrinkage Cracking in Concrete. *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 8. Article no. 2477. DOI: 10.3390/buildings14082477. EDN: [ZKEQZC](#)
4. Bandagar S.S., et al. A Study on the Shrinkage, Cracking and Durability of Fiber Reinforced Concrete. *IJIREICE*. 2024. DOI: 10.17148/IJIREICE.2024.12604.
5. Pukhareno Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Evaluation of the effectiveness of dispersed reinforcement of concretes in terms of strength and crack resistance. *Bulletin of Siberian State Automobile and Highway University*. 2022. Vol. 19. No. 5 (87). Pp. 752–761. (In Russ.) DOI: [10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761](#) EDN: [SPRCLI](#)
6. Zeng Y., Peng L., Ma B., Sun W., Shi X., Zou Z., Chen W. Influence of multi-walled carbon nanotubes on the performance of nano-silica enhanced lightweight cement-based composites under cyclic action of freeze-thaw and erosion. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.143132 EDN: [PSDCYH](#)
7. Moon R.J., Martini A., Nairn J., et al. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*. 2011. Vol. 40. No. 7. Pp. 3941–3994. DOI: 10.1039/c0cs00108b.
8. Abdul Khalil H.P.S., Bhat A.H., Ireana Yusra A.F. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2012. Vol. 87. No. 2. Pp. 963–979. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.08.078.
9. Klemm D., Kramer F., Moritz S., et al. Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011. Vol. 50. No. 24. Pp. 5438–5466. DOI: 10.1002/anie.201001273.
10. Khirkhasova (Tkachenko) V.I. Effect of nanocellulose on the hydration process of Portland cement and concrete properties. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020. No. 58 (82). Pp. 155–160. (In Russ.) DOI: [10.23968/1999-5571-2020-17-5-155-160](#) EDN: [LKNJJO](#)
11. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Khirkhasova (Tkachenko) V.I. Cellulose in concrete – a new direction in construction nanotechnology. *Construction Materials*. 2020. No. 7. Pp. 39–45. (In Russ.) DOI: [10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44](#) EDN: [WORYOY](#)
12. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Tkachenko V.I. Modifier of cement composites based on nanocellulose. *Industrial and Civil Engineering*. 2025. No. 3. Pp. 65–71. (In Russ.) DOI: [10.33622/0869-7019.2025.03.05-11](#) EDN: [YGVSWJ](#)
13. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Staroverov V.D. Effect of carbon nanomaterials on the structure and properties of cement concretes. Concrete and Reinforced Concrete – A View into the Future: Scientific proceedings of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete (Moscow, May 12–16, 2014). In 7 vols. Vol. 6. Moscow: MGSU, 2014. Pp. 205–211. (In Russ.) EDN: [UCDLHL](#)
14. Pukhareno Yu.V., Ryzhov D.I., Staroverov V.D. Features of structure formation of cement composites in the presence of fulleroid-type carbon nanoparticles. *Bulletin of MGSU*. 2017. No. 7 (106). Pp. 718–723. (In Russ.) DOI: [10.22227/1997-0935.2017.7.718-723](#) EDN: [ZATDHP](#)
15. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Staroverov V.D. Efficiency of activation of mixing water by carbon nanoparticles. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 1. Pp. 40–45. (In Russ.) EDN: [NBMYNL](#)

Сведения об авторах:

Пухаренко Юрий Владимирович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия; главный научный сотрудник, НИИСФ РААСН, г. Москва, Россия. Scopus AuthorID: нет, SPIN-код: нет, AuthorID: нет, ResearcherID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>. Email: tsik@spbgasu.ru.

Ткаченко Виктор Иванович, кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия; ведущий инженер, НИИСФ РААСН, г. Москва, Россия. Scopus AuthorID: нет, SPIN-код: нет, AuthorID: нет, ResearcherID: <https://orcid.org/0000-0001-6052-9633>. Email: vikatren@gmail.com.

Кудобаев Мурат Казбекович, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия; генеральный директор, ООО «ПГС», г. Санкт-Петербург, Россия. Email: mkudobaev@spb-pgs.ru.

About the authors:

Yury V. Pukhareenko, Corresponding Member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia; Chief Researcher, NIISF RAACS, Moscow, Russia. Scopus AuthorID: none, SPIN-code: none, AuthorID: none, ResearcherID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>. Email: tsik@spbgasu.ru.

Viktor I. Tkachenko, Candidate of Technical Sciences, Lecturer-researcher, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia; Leading Engineer, NIISF RAACS, Moscow, Russia. Scopus AuthorID: none, SPIN-code: none, AuthorID: none, ResearcherID: <https://orcid.org/0000-0001-6052-9633>. Email: vikatren@gmail.com.

Murat K. Kudobaev, Postgraduate Student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia; General Director, LLC "PGS", St. Petersburg, Russia.

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в концепцию исследования, проведение экспериментов, анализ и интерпретацию результатов, подготовку и редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы утвердили окончательный вариант статьи.

The authors declare no conflict of interest.

The authors have approved the final version.

Статья поступила в редакцию 21.07.2026

Одобрена после рецензирования 01.08.2026

Принята к публикации 14.08.2026

The article was submitted 21.07.2026

Approved after reviewing 01.08.2026

Accepted for publication 14.08.2026