

УДК 691.3

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.31

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия

EDN zkivmm

DOI 10.62980/2076-0655-2024-377-383

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОБЕТОНА В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Мярикянов И.М.¹, Козлова И.В.¹, Алпацкий Д.Г.¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

Для возведения объектов в условиях Крайнего Севера актуально использовать высокопрочные строительные материалы с высокими характеристиками по морозостойчивости, прочности и низким удельным весом. К таким материалам можно отнести нанобетон, в состав которого входят стабилизированные дисперсии углеродных нанотрубок. Прочность и относительно легкий вес железобетонного изделия на основе нанобетона обуславливает высокие эксплуатационные характеристики строительного объекта, что приводит к снижению затрат по транспортировке, трудоемкости, монтажу конструктивных элементов и уменьшает себестоимость самого объекта строительства на 20%. В качестве экспериментального объекта, возводимого в условиях Крайнего Севера, предложен гараж 6х6 метров. Для его строительства использовались трехслойные стеновые панели из нанобетона, выпускаемые по технологии мобильного завода. Применение нанобетона позволило в конструкционном элементе с каждой стороны сократить толщину бетонного слоя до 25 мм и уменьшить вес изделия, а также снизить расход цемента в бетонной смеси для его производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углеродные нанотрубки, дисперсия, нанобетон, трехслойная стеновая панель, конструкционный элемент, объект, прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мярикянов И.М., Козлова И.В., Алпацкий Д.Г. Опыт применения нанобетона в производстве трехслойных стеновых панелей в условиях Крайнего Севера // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 4. – С. 377-383, DOI 10.62980/2076-0655-2024-377-383, EDN zkivmm

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN zkivmm

DOI 10.62980/2076-0655-2024-377-383

EXPERIENCE OF NANO CONCRETE APPLICATION IN PRODUCTION OF THREE-LAYER WALL PANELS IN THE FAR NORTH CONDITIONS

Myarikyanov I.M.¹, Kozlova I.V.¹, Alpackiy D.G.¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

For the construction in the Far North, it is important to use high-strength building materials with high frost resistance, strength and low density. Such materials include nano concrete, which includes stabilized dispersions of carbon nanotubes. The strength and relatively light weight of the reinforced concrete product based on nano concrete determines its high characteristics of the object, which leads to a reduction in transportation costs, labor intensity, installation of structural elements and reduces the cost of the construction object by 20%. A 6x6-meter garage has been proposed as an experimental building in the conditions of the Far North. For the construction, three-layer nano concrete wall panels were manufactured using mobile plant technology. The use of nano concrete made it possible to reduce the thickness of the concrete layer in the structural element on each side to 25 mm and reduce the weight of the product, as well as reduce the consumption of cement in the concrete mixture.

KEY WORDS: carbon nanotubes, dispersion, nano concrete, three-layer wall panel, structural element, object, strength

FOR CITATION: Mjarikjanov I.M., Kozlova I.V., Alpackiy D.G. Experience of nano concrete application in production of three-layer wall panels in the Far North conditions // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No4. – Pp. 377 – 383, DOI 10.62980/2076-0655-2024-377-383, EDN zkivmm

ВВЕДЕНИЕ

Освоение Арктики, Дальнего Востока и Сибири в настоящее время представляются чрезвычайно перспективными и своевременными с точки зрения экономического развития Российской Федерации. В связи с чем возникает потребность в строительстве промышленных и гражданских объектов в северных регионах нашей страны. Для развития инфраструктуры в отдаленных населенных пунктах требуется создание высокофункциональных строительных материалов, в первую очередь, обладающих ускоренным набором прочности и повышенной морозостойкостью. Разработка различных по составу композиционных материалов, а также приемы интенсификации технологических процессов зимнего бетонирования способствуют расширению области освоения территорий в суровых климатических условиях [1-5].

В состав композиционных материалов часто вводятся нано- и ультрадисперсные добавки, которые при стабилизации в вяжущей матрице, способны равномерно распределиться в ее объеме и обеспечить быстрый набор прочности во все сроки твердения [6-8], что актуально для строительства в регионах Крайнего Севера.

Одними из наиболее известных нанодобавок, придающих композиционному материалу высокую прочность, являются углеродные нанотрубки (УНТ) [9-11]. Улучшение механических свойств определяется взаимодействиями между УНТ и цементом, то есть от межфазных характеристик формируемых материалов [12]. Вследствие протекания гидратационных процессов на поверхности частиц УНТ образуются зародыши продуктов гидратации, концентрирующие гидратные образования, что приводит к улучшению механических характеристик цементной матрицы [13-16].

В работах [17,18] рассмотрен цементный композит, армированный углеродными нанотрубками, который обладает превосходными электрическими свойствами, что позволяет ему служить встроенным датчиком для мониторинга состояния конструкций.

Композиционный материал, в состав которого входят УНТ, можно отнести к нанобетону. Этот материал обладает не только высокими эксплуатационными характеристиками, такими как повышенные прочности на сжатие и изгиб, морозостойкость, водонепроницаемость, электрические характеристики, но еще обладает небольшим удельным весом и может быть использован в преднапряженных монолитных перекрытиях [19, 20], а, следовательно, в производстве конструктивных элементов при возведении зданий и сооружений в суровых климатических условиях. В связи с чем, была определена цель исследования, которая заключается в установлении возможности возведения в условиях Крайнего Севера экспериментального объекта в виде гаража 6х6 м из трехслойных стеновых панелей, изготовленных из нанобетона на мобильном заводе.

Задачами исследования являются:

- получение нанобетона согласно предложенной рецептуре и изучение его основных характеристик;
- производство из нанобетона трехслойных стеновых панелей на мобильном заводе;
- возведение экспериментального объекта в виде гаража 6х6 м вдали от производственной инфраструктуры в условиях Крайнего Севера;
- оценка эффективности проделанной работы.

INTRODUCTION

The development of the Arctic, the Far East and Siberia currently seems extremely promising for the Russian Federation economic promotion. Consequently there is a great demand for the construction of industrial and civil objects in the Russian northern regions. The development of infrastructure in remote areas requires the creation of highly functional building materials, primarily those with accelerated strength and increased frost resistance. The development of various composite materials, as well as techniques for intensifying technological processes of winter concreting, contribute to the development of territories with harsh climatic conditions [1-5].

Nano- and ultrafine additives are often introduced into the composite structure provided that their particles are stabilized in the binder matrix. Uniform distribution of the additive in the material's structure provide a rapid strength growth during all hardening periods [6-8], which is important for construction in the Far North regions.

One of the most well-known nano additives that provide a building material with high strength are carbon nanotubes (CNTs) [9-11]. The improvement of mechanical properties is determined by the interactions between CNTs and cement, i.e. by the interfacial characteristics [12]. In the process of cement hydration, nuclei of the reaction products are formed on the surface of CNT particles, accelerating the strength gain and leading to an improvement in the mechanical characteristics of the cement matrix [13-16].

In [17,18] the authors study a cement composite modified with carbon nanotubes with excellent electrical properties, which allows it to serve as an integrated sensor for monitoring the condition of building structure.

The composite material, which includes CNTs, can be attributed to nano concrete. This material exhibit not only high performance characteristics, such as increased compressive and bending strengths, frost resistance, water resistance, electrical characteristics, but also has a low density and can be used in prestressed monolithic floors [19, 20], and, consequently, in the production of structural elements for the construction of buildings and structures in harsh environmental conditions.

Therefore, the purpose of the study was determined, which is to establish the possibility of constructing an experimental 6x6 m garage facility manufactured from nano concrete three-layer wall panels in the conditions of the Far North.

The objectives of the study are:

- preparation of nano concrete according to the proposed formulation and study of its main characteristics;
- production of nano concrete three-layer wall panels at a mobile plant;
- construction of an experimental 6x6 m garage facility away from the production infrastructure in the Far North;
- evaluation of the effectiveness of the work.

Материалы и методы исследования

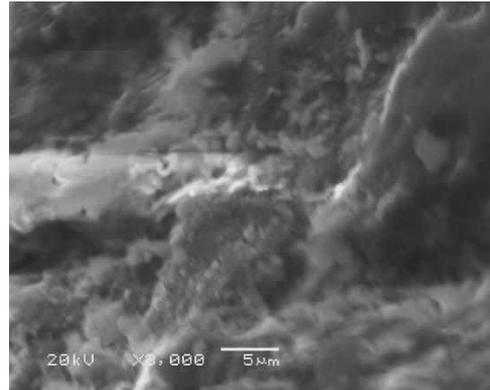
Объектом исследований являются трехслойные стеновые панели из нанобетона. Для изготовления нанобетона использовались дисперсии одностенных углеродных нанотрубок фирмы TUBALL. Процесс введения пластификатора с диспергированными УНТ в структуру бетона осуществляется путем смешивания компонентов в бетоносмесительной установке. Благодаря предварительному диспергированию УНТ удалось добиться равномерного распределения их в структуре бетона, что способствовало формированию матрицы с плотной структурой и отсутствием внутренних полостей (рис.1).

РИСУНОК 1

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА НАНОБЕТОНА (×3000 увеличение)

Figure 1

Nano concrete structure (×3000 magnification)



Materials and methods

The object of the study are three-layer nano concrete wall panels. Dispersions of TUBAL single-walled carbon nanotubes were used for the manufacturing of nano concrete. The process of introducing a plasticizer with dispersed CNTs into the concrete structure is carried out by mixing the components in a concrete mixing device. Due to the preliminary dispersion of CNTs, it was possible to achieve their uniform distribution in the concrete structure, which contributed to the formation of a dense matrix with no internal cavities (Fig.1).

Эксперимент и обсуждение результатов

Прежде чем приступить к проектированию объекта строительства из нанобетона, проводились физико-механические испытания на гидравлическом прессе его образцов (рисунки 2). Прочность на сжатие наномодифицированного образца составила 33,6 МПа, на изгиб – 8,2 МПа, при этом плотность материала составила 1908 кг/м³. Полученные результаты позволяют сократить количество цемента в 2 раза, а именно, с 500 кг/м³ до 250 кг/м³, увеличив количество песка, путем внесения углеродных нанотрубок. Морозостойкость нанобетона соответствует марке F 300, водонепроницаемость - W20.

Experimental procedure and discussion

Before starting the design of the nano concrete construction facility, physical and mechanical tests of the samples were carried out on a hydraulic press (Figure 2). The compressive strength of the nanomodified sample was 33.6 MPa, bending strength was 8.2 MPa, while the density of the material was 1908 kg/m³. The results obtained make it possible to reduce the amount of cement by 2 times, from 500 kg/m³ to 250 kg/m³ and to increase the amount of sand by adding carbon nanotubes. The frost resistance of nano concrete corresponds to the F300, the water resistance is W20.

РИСУНОК 2

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ

- а) испытания прочности на сжатие
- б) испытания прочности на изгиб

Figure 2

Mechanical testing of the samples



а



б

В качестве опытного объекта для строительства был выбран проект гаража 6х6 м с высотой 3 м. Строительство предполагается вдали от производственной инфраструктуры в условиях Крайнего Севера, требующих быстрого возведения конструкции. Оптимальна в этом случае технология строительства с применением трехслойных стеновых панелей, произведенных на мобильном заводе.

A 6x6 m garage 3 m height was chosen as an experimental facility. The construction process is performed far from the industrial production in the conditions of the Far North, requiring short time construction. In this case, the optimal construction technology is using three-layer wall panels produced at a mobile factory.

Мобильный завод способен обеспечивать высокую скорость производства, автономность на объекте строительства, низкую себестоимость и сокращение затрат на транспортировку изделий.

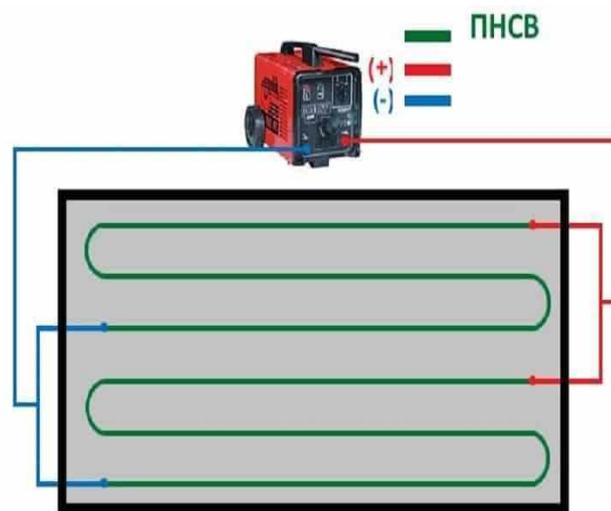
Для возведения объекта была подготовлена строительная площадка 7x7 м. Произведена выемка грунта для плитного фундамента гаража, привезены мобильные бетоносмесительные установки, строительные материалы и сопутствующее оборудование: цемент, песок, щебень, вода, дисперсия УНТ, пластификатор, арматура, опалубка, газовая пушка, и ПНСВ - кабели. Схема раскладки ПНСВ - кабелей представлена на рисунке 3.

РИСУНОК 3

СХЕМА РАСКЛАДКИ ПНСВ КАБЕЛЕЙ

Figure 3

Layout of heating cables



После завершения процесса создания фундамента для гаража была собрана опалубка для трехслойных стеновых панелей размером 6x3 м, а также установлены анкерные болты. Процесс заливки бетоном осуществлялся в три этапа. На первом этапе производилась заливка нижнего слоя панели толщиной 40 мм. На втором этапе проводилась укладка теплоизоляционного материала - пенополистирола ПСБ-С 25, с толщиной 200 мм. Наконец, на третьем этапе осуществлялась заливка верхнего слоя панели бетоном толщиной 25 мм. В процессе приготовления бетонной смеси на каждом этапе добавлялась стабилизированная дисперсия УНТ с концентрацией 0,1%.

Распалубка производилась через 9-10 часов. С помощью автокрана изделие поднималось и устанавливалось на стойку до созревания. Затем повторялся процесс сборки опалубки. На рисунке 4. представлены готовая панель, изготовленная с применением нанобетона на площадке мобильного завода; коробка гаража 6x6 м с установленными панелями и закрепленными между собой стальными закладными (процесс поднятия и установки составил 3 часа) и гараж 6x6 м.

После возведения гаража было измерено термическое сопротивление, которое составило 5,07 Вт/(м²·°C), при толщине бетона с одной стороны 2,5 см и с другой 4 см и толщине утеплителя 20 см (полистирол ПСБ-С 25).

Подводя итоги проделанной работы, установили, что при возведении экспериментального гаража из нанобетона была сокращена толщина бетонного слоя до 25 мм в трехслойной бетонной панели с каждой стороны. Это способствует уменьшению веса конструкционного элемента в объекте строительства, что позволяет сократить расходы на материалы, трудовые ресурсы, транспортировку и монтаж изделий.

The mobile plant provides high production rate, autonomy at the construction site, low cost and reduction of transportation costs.

A 7x7 m site was prepared for the construction of the facility. Excavation of the soil for the slab foundation of the garage was carried out, mobile concrete mixing devices, building materials and equipment were delivered: cement, sand, crushed stone, water, CNT dispersion, plasticizer, steel reinforcement, formwork, gas gun, and heating cables. The layout of the cables is shown in Figure 3.

After finishing the garage basement construction, the formwork for 6x3 m three-layer wall panels was assembled, and anchor bolts were installed. The process of pouring concrete was carried out in three stages. At the first stage, the 40 mm bottom layer of the panel was filled. At the second stage, the installation of thermal insulation material was carried out which was 200 mm polystyrene foam PSB-S 25. Finally, at the third stage, the 25 mm top layer of the panel was filled with concrete. During the preparation of the concrete mix, 0.1% stabilized CNT dispersion was added at each stage.

The formwork removing was carried out after 9-10 hours. With the help of a crane, the product was lifted and placed on a rack for further hardening. Then the formwork assembly process was repeated. Figure 4 shows a ready-made panel made using nano concrete at the mobile plant; a 6x6 m garage box with installed panels and steel inserts fixed to each other (the lifting and installation process took 3 hours) and a 6x6 m garage.

After the construction of the garage, the thermal resistance was measured, which was 5.07 W/(m²·°C), with 2.5 cm of concrete layer on one side and 4 cm on the other and 20 cm of insulation material (polystyrene PSB-C 25).

As a result of the work, it was found that the construction of an experimental nano concrete garage leads to the reduction of the concrete layer up to 25 mm in a three-layer concrete panel on each side. This reduces the structural elements weight and reduces the cost of materials, labor, transportation and installation of products.

РИСУНОК 4

ЭТАПЫ ВОЗВЕДЕНИЯ ГАРАЖА ИЗ НАНОБЕТОНА

- а) панель;
- б) коробка гаража;
- в) готовый гараж 6х6 м

Figure 4

Stages of nano concrete garage construction

- а) nano concrete panel;
- б) garage;
- в) final result.

а



б



в



Заключение

Для создания экспериментального объекта в виде гаража использовался нанобетон, в состав которого входили стабилизированные дисперсии УНТ. За счет их введения в бетонную смесь расход дорогостоящего цемента снизился без потери физико-механических свойств, что позволило в трехслойной стеновой панели с каждой стороны сократить толщину бетонного слоя до 25 мм и уменьшить вес самого конструкционного элемента. При этом были сокращены расходы на сырьевые материалы, трудовые ресурсы, транспортировку и монтаж изделия. Таким образом, при возведении объекта строительства в условиях Крайнего севера была снижена и его себестоимость на 20%.

Литература:

1. Харченко И.Я., Панченко А.И. Монолитное строительство по системе "ИНТРА-БАУ" в условиях Крайнего Севера // Строительные материалы. – 2005. – № 6. – С. 29-32.
2. Погодин Д.А., Уханова М.А. Интенсификация технологических процессов зимнего бетонирования монолитных зданий // Перспективы науки. – 2019. - № 1(112). – С. 63-68.
3. Самченко С.В., Ларсен О. А., Былинкин Д.С. Комплексные противоморозные добавки для монолитного строительства в условиях Крайнего Севера // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т.29. – №2. – С.145-157.
4. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Гарафиев А.М. Электродный прогрев бетона с применением

Conclusions

To create an experimental garage nano concrete with stabilized CNT dispersion was applied. Due to CNTs introduction into the concrete mixture, the amount of expensive cement was reduced without loss of physical and mechanical properties, which made it possible to reduce the thickness of the concrete layer up to 25 mm in a three-layer wall panel on each side and reduce the weight of the structural element itself. At the same time, the costs of raw materials, labor, transportation and installation of the product were reduced. Thus, during the garage construction process in the Far North, its cost was also reduced by 20%.

References:

1. Harchenko I.Ja., Panchenko A.I. Monolitnoe stroitel'stvo po sisteme "INTRA-BAU" v uslovijah Krajnego Severa // Stroitel'nye materialy. - 2005. - № 6. - P. 29-32 (in Russian).
2. Pogodin D.A., Uhanova M.A. Intensifikacija tehnologicheskix processov zimnego betonirovanija monolitnyh zdanij // Perspektivy nauki. – 2019. - № 1(112). – P. 63-68 (in Russian).
3. Samchenko S.V., Larsen O. A., Bylinkin D.S. Kompleksnye protivomoroznye dobavki dlja monolitnogo stroitel'stva v uslovijah Krajnego Severa // Tehnika i tehnologija silikatov. – 2022. – T.29. – №2. – P.145-157 (in Russian).

- тонкопроводящего минерала // Известия КГАСУ – 2019. – №4(50). – С. 419-426.
5. Мананков А.В., Гасанова Э.Р.К. Ситаллы из местного сырья для производственных инновационных инфраструктур с высокой технико-экономической эффективностью в экстремальных условиях Крайнего Севера // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 87-96.
 6. Самченко С.В., Земскова О.В., Козлова И.В. Модель и механизм стабилизации углеродных нанотрубок пластификатором на поликарбоксилатной основе // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – № 7 (106). – С. 724-732.
 7. Самченко С.В., Земскова О.В., Козлова И.В. Стабилизация дисперсий углеродных нанотрубок при ультразвуковой обработке // Техника и технология силикатов. – 2014. – Т. 21. – № 3. – С. 14-18.
 8. Самченко С.В., Егоров Е.С. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты // Техника и технология силикатов. – 2019. – Т. 26. – № 2. – С. 52-57.
 9. Козлова И.В. Опыт применения наноразмерных частиц в производстве строительных материалов // Техника и технология силикатов. – 2021. – Т. 28. – № 3. – С. 81-87.
 10. Козлова И.В., Самченко С.В. Нанотехнологии в производстве строительных материалов: теоретическое исследование // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31. – № 3. – С. 284-297.
 11. Яковлев Г.И., Первущин Г.Н., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Пудов И.А., Лушникова А.А. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 47-51.
 12. Talayero A., Lado-Touriño I., Ait-Salem O., Ramos I.S., Páez-Pavón A., Merodio-Perea R.G. Interfacial Shear Strength of Single-Walled Carbon Nanotubes-Cement Composites from Molecular Dynamics and Finite Element Studies // Materials. – 2023. – Vol. 16(5). – P. 1992. DOI: 10.3390/ma16051992.
 13. Ahmed R., Hussein Al-Ja., Saleh D., Rashid R.S.M., Ba Rahma A.A. Influence of Carbon Nanotubes (CNTs) in the Cement Composites // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 357(1). № 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012024.
 14. Mendes T.M., de Medeiros M.H.F. Effect of carbon nanotubes on Portland cement matrices // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. – 2023. - Vol.16(5). DOI: 10.1590/s1983-41952023000500008.
 15. VijayaBhaskar A., Shanmugasundaram M. An Investigation on Behavior of Multi-Wall Carbon Nanotubes as an Additive to Cement // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2018. - Vol. 24(8). – Pp. 5832-5835. DOI: 10.1166/asl.2018.12205.
 16. Muradyan N.G., Gyulasaryan H., Arzumanyan A.A., Badalyan M.M., Kalantaryan M.A., Vardanyan Ye.V., Laroze D., Manukyan A., Barseghyan M.G. The Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Compressive Strength of Cement Mortars // Coatings. – 2022. - Vol. 12(12). Pp. 1933. DOI: 10.3390/coatings12121933.
 17. Yuan Ji., Lu D., Wu H., Meng Ji., Song H., Zhong Ji., Xie N. Carbon nanotubes-coated cement particles for cement-based sensors with excellent piezoresistivity // Smart Materials and Structures. – 2023. - Vol. 32(6). - № 065019. DOI: 10.1088/1361-665X/acd03d.
 18. Xuejun T., Jianlin L., Jigang Zh., Min Zh., Liqing Zh., Yibo G. Progress in FEM modeling on mechanical and electromechanical properties of carbon nanotube cement-based composites // Nanotechnology Reviews. – 2023. – Vol. 12(1). DOI: 10.1515/ntrev-2022-0522.
 19. Орлов Д.В. Монолитные конструкции из легкого модифицированного нанобетона на примере пятиэтажной разноуровневой автостоянки // Инженерно-строительный журнал. 2010. – № 5 (15). – С. 12-15.
 4. Muhametrahimov R.H., Galautdinov A.R., Garafiev A.M. Jelektroodnyj progrev betona s primeneniem tonkoprovodjashhego minerala // Izvestija KGASU – 2019. – №4(50). – P. 419-426 (in Russian).
 5. Manankov A.V., Gasanova Je.R.K. Sitally iz mestnogo syr'ja dlja proizvodstvennyh innovacionnyh infrastruktur s vysokoj tehniko-jekonomicheskoj jeffektivnost'ju v jekstremal'nyh uslovijah Krajnego Severa // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2018. – Т. 329. – № 11. – P. 87-96 (in Russian).
 6. Samchenko S.V., Zemskova O.V., Kozlova I.V. Model' i mehanizm stabilizacii uglerodnyh nanotrubok plastifikatorom na polikarboksilatnoj osnove // Vestnik MGSU. – 2017. – Т. 12. – № 7 (106). – P. 724-732. (in Russian).
 7. Samchenko S.V., Zemskova O.V., Kozlova I.V. Stabilizacija dispersij uglerodnyh nanotrubok pri ul'trazvukovoj obrabotke // Tehnika i tehnologija silikatov. – 2014. – Т. 21. – № 3. – P. 14-18 (in Russian).
 8. Samchenko S.V., Egorov E.S. Vlijanie ul'tradispersnoj dobavki iz predvaritel'no gidratirovannogo cementa na svojstva cementnoj pasty // Tehnika i tehnologija silikatov. – 2019. – Т. 26. – № 2. – P. 52-57 (in Russian).
 9. Kozlova I.V. Opyt primenenija nanorazmernyh chastic v proizvodstve stroitel'nyh materialov // Tehnika i tehnologija silikatov. – 2021. – Т. 28. – № 3. – P. 81-87. (in Russian).
 10. Kozlova I.V., Samchenko S.V. Nanotehnologii v proizvodstve stroitel'nyh materialov: teoreticheskoe issledovanie // Tehnika i tehnologija silikatov. – 2024. – Т. 31. – № 3. – P. 284-297. (in Russian).
 11. Jakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Bur'janov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modifikacija cementnyh betonov mnogoslojnymi uglerodnymi nanotrubkami // Stroitel'nye materialy. – 2011. – № 2. – P. 47-51. (in Russian).
 12. Talayero A., Lado-Touriño I., Ait-Salem O., Ramos I.S., Páez-Pavón A., Merodio-Perea R.G. Interfacial Shear Strength of Single-Walled Carbon Nanotubes-Cement Composites from Molecular Dynamics and Finite Element Studies // Materials. – 2023. – Vol. 16(5). – P. 1992. DOI: 10.3390/ma16051992.
 13. Ahmed R., Hussein Al-Ja., Saleh D., Rashid R.S.M., Ba Rahma A.A. Influence of Carbon Nanotubes (CNTs) in the Cement Composites // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 357(1). № 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012024.
 14. Mendes T.M., de Medeiros M.H.F. Effect of carbon nanotubes on Portland cement matrices // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. – 2023. - Vol.16(5). DOI: 10.1590/s1983-41952023000500008.
 15. VijayaBhaskar A., Shanmugasundaram M. An Investigation on Behavior of Multi-Wall Carbon Nanotubes as an Additive to Cement // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2018. - Vol. 24(8). – Pp. 5832-5835. DOI: 10.1166/asl.2018.12205.
 16. Muradyan N.G., Gyulasaryan H., Arzumanyan A.A., Badalyan M.M., Kalantaryan M.A., Vardanyan Ye.V., Laroze D., Manukyan A., Barseghyan M.G. The Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Compressive Strength of Cement Mortars // Coatings. – 2022. - Vol. 12(12). Pp. 1933. DOI: 10.3390/coatings12121933.
 17. Yuan Ji., Lu D., Wu H., Meng Ji., Song H., Zhong Ji., Xie N. Carbon nanotubes-coated cement particles for cement-based sensors with excellent piezoresistivity // Smart Materials and Structures. – 2023. - Vol. 32(6). - № 065019. DOI: 10.1088/1361-665X/acd03d.
 18. Xuejun T., Jianlin L., Jigang Zh., Min Zh., Liqing Zh., Yibo G. Progress in FEM modeling on mechanical and electromechanical properties of carbon nanotube cement-based composites // Nanotechnology Reviews. – 2023. – Vol. 12(1). DOI: 10.1515/ntrev-2022-0522.

20. Кишиневская Е.В., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Перспективы применения нанобетона в монолитных большепролетных ребристых перекрытиях с постнапряжением // Инженерно-строительный журнал. - 2009. - № 2 (4). - С. 54-58.

19. Orlov D.V. Monolitnye konstrukcii iz legkogo modifitsirovannogo nanobetona na primere pjatijetazhnoj raznourovnevoj avtostojanki // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2010. – № 5 (15). – P. 12-15. (in Russian).

20. Kishinevskaja E.V., Vatin N.I., Kuznecov V.D. Perspektivy primeneniya nanobetona v monolitnyh bol'sheproletnyh rebristyh perekrytijah s postnaprjazheniem // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2009. – № 2 (4). – P. 54-58. (in Russian).

Работа представлена на II Международном научно-практическом симпозиуме «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития».

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Мярикянов Игорь Михайлович – студент магистратуры ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), E-mail: igor.miarikianov@gmail.com

Козлова Ирина Васильевна – доцент кафедры строительного материаловедения, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), E-mail: KozlovaIV@mgsu.ru.

Алпацкий Дмитрий Геннадьевич - доцент кафедры строительного материаловедения, кандидат политических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), E-mail: alpacky@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Myarikyaynov Igor Mihailovich – Master's degree student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), E-mail: igor.miarikianov@gmail.com

Kozlova Irina Vasilyevna - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), E-mail: KozlovaIV@mgsu.ru

Alpackiy Dmitri Gennad'evich - Cand. Sci. (Politics), Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), E-mail: alpacky@mail.ru

The authors declare that there is no conflict of interest.