

UDC 691.32

**Author: URKHANOVA Larisa Alekseevna**, Doctor of Engineering, Professor, Head of Department «Construction materials, roads and woodworking», East Siberia State University of Technology and Management; Kluchevskaya st., 40v, Ulan-Ude, Russian Federation, 670013, urkhanova@mail.ru;

**Author: LKHASARANOV Solbon Aleksandrovich**, Ph.D. in Engineering, Senior Lecturer of Department «Construction materials, roads and woodworking», East Siberia State University of Technology and Management; Kluchevskaya st., 40v, Ulan-Ude, Russian Federation, 670013, solbon230187@mail.ru;

**Author: BUYANTUEV Sergey Lubсанovich**, Doctor of Engineering, Professor of Department «Electric Power Supply Industrial Plants and Agriculture», East Siberia State University of Technology and Management; Kluchevskaya st., 40v, Ulan-Ude, Russian Federation, 670013, buyantuevsl@mail.ru;

**Author: KHARDAEV Petr Kazakovich**, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, East Siberia State University of Technology and Management; Kluchevskaya st., 40v, Ulan-Ude, Russian Federation, 670013, office@esstu.ru

---

## THE USE OF COMPOSITE BINDERS AND NANOMODIFIERS FOR FIBER-REINFORCED CONCRETE

---

### EXTENDED ABSTRACT:

The article presents the results of studies on the production of fiber-reinforced concrete with mineral fibers produced in a plasma reactor, composite binders and nanomodifying additives. For dispersed reinforcement of concrete, basalt mineral fibers obtained by the electrothermal method in a plasma-arc reactor were used.

To reduce the negative impact of Portland cement, composite binders based on Portland cement and fly ash were used. Fly ash meets the requirements of standards and is suitable for using it as a part of building materials. The nanosilica produced at an electron accelerator was used for comparison. The introduction of nanosilica improves the mechanical properties of cement by accelerating the hydration processes of Portland cement, improving the microstructure and changing the phase composition of the cement stone.

The optimal content of fly ash in the composite binder, which allows obtaining high mechanical properties, has been determined. To reduce water content in the binder super plasticizer polycarboxylate type was used.



The mechanical properties of fiber-reinforced concrete with ordinary Portland cement, composite binder with fly ash and Portland cement modified with nanosilica were studied. The use of composite binder and the introduction of nanosilica lead to an increase in compressive and flexural strength of fiber-reinforced concrete.

The analysis of the microstructure of cement stone by scanning electron microscopy was carried out. The change in the structure of cement stone with the introduction of fly ash and nanosilica and their influence on the surface of mineral basalt fiber is shown.

Differential thermal analysis of cement systems showed a change in the phase composition and basicity of the formed calcium hydrosilicates when fly ash and nanosilica are introduced into the binder.

**Key words:** fiber-reinforced concrete, mineral fiber, composite binders, Portland cement, nanosilica.

DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107](https://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107)

#### MACHINE-READABLE INFORMATION ON CC-LICENSES (HTML-CODE) IN METADATA OF THE PAPER

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">The use of composite binders and nanomodifiers for fiber-reinforced concrete</span> by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, no. 6, pp. 91– 107. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107" property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Buyantuev S.L., Khardaev P.K.</a> is licensed under a <a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>.<br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2018/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2018/</a>.<br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="mailto:solbon230187@mail.ru" rel="cc:morePermissions">solbon230187@mail.ru</a>.
```

#### References:

1. *Rabinovich F.N.* Dispersno-armirovannyj beton [Dispersed-reinforced concrete]. Moscow: Stroiizdat, 1989. 175 p. (In Russian).
2. *Borovskikh I.V., Khozin V.G.* Izmenenie dliny bazal'tovyh volokon pri ih raspredelenii v kompozicionnom vyazhushchem dlya vysokoprochnykh fibrobetonov [Changing the length of basalt fiber with its distribution in the composite binder of high strength fiber concretes]. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Construction. 2009. no. 2 (12). pp. 233–237. (In Russian).



3. *Rabinovich F.N.* Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii [Composites based on dispersed-reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, design]. Moscow. Publishing House ASV. 2004. 560 p. (In Russian).
4. *Pukhareno Yu.V.* Restavratsiya i stroitel'stvo: potencial fibroarmirovannykh materialov i izdelij [Restoration and construction: the potential of fibro-reinforced materials and products]. Modern problems of science and education. 2012. No. 4. (In Russian).
5. *Stepanova V.F., Buchkin A.V.* Cementnye kompozitsii, armirovannye bazal'tovym voloknom [Cement compositions reinforced with basalt fiber]. Technologies of concrete. 2007. no. 5. pp. 28–29. (In Russian).
6. *Babaev V.B., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Savgir N.L.* Bazal'tovoe volokno kak component dlya mikroarmirovaniya cementnykh kompozitov [Basalt fiber as component for micro-reinforcement of cement composites]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov. 2012, no. 4, pp. 58–61. (In Russian).
7. *Kalashnikov V.I., Demyanova V.S., Volodin V.M., Gusev A.D.* Resursosberegayushchie poroshkovye fibrobetony s ispol'zovaniem tekhnogennykh othodov [Resource-saving powder fiber-reinforced concrete with the use of man-made wastes]. Stroitel'nye materialy = Construction Materials. 2012. no. 8. pp. 52–54. (In Russian).
8. *Saraykina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I., Senkov S.A., Politayeva A.I.* Nanostrukturirovanie cementnogo kamnya pri dispersnom armirovanii bazal'tovym voloknom [Nanostructuring of cement stone in the process of disperse reinforcing with basalt fiber]. Stroitel'nye materialy = Construction Materials. 2015. no. 2. pp. 34–38. (In Russian).
9. *Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I.* Optimization of compositions of multicomponent fine-grained fiber-reinforced concrete modified at different scale levels. Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2017. Vol. 9. no. 2. pp. 43–65. URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU](http://nanobuild.ru/ru_RU) (date of access 25.10.2018) (In Russian).
10. *Bangi M.R., Horiguchi T.* Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fiber-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. Cement and Concrete Research. 2012. No. 2. pp. 459–466.
11. *Fediuk R., Smoliakov A., Muraviov A.* Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Composite Binders. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2017, Article ID 2316347, 13 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2316347>.
12. *Kharkhardin A.N., Sivalneva M.N., Strokova V.V.* Topological calculation of the basic parameters of the fiber for foam concrete production based on cementless,



- structured binder. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2016. Vol. 8. no. 4. pp. 73–88. URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU](http://nanobuild.ru/ru_RU) (date of access 26.10.2018) (In Russian).
13. *Stepanova V.F., Buchkin A.V., Yurin E.Yu.* Issledovanie svojstv tyazhelogo betona na krupnom zapolnitele, armirovannogo nemetallicheskoj bazal'tovoj fibroj [Study of the properties of heavy concrete on a coarse aggregate reinforced with non-metallic basalt fiber]. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*. 2018. no. 9. pp. 46–53. (In Russian).
  14. *Banthia N., Bindiganavile V., Jones J., Novak J.* Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products. *PCI Journal*, 2012, Vol. 3, pp. 33–46.
  15. *Rybin V.A., Utkin A.V., Baklanova N.I.* Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers. *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 53. pp. 1–8.
  16. *Urkhanova L., Lkhasaranov S., Rozina V.* Increased corrosion resistance of basalt reinforced cement compositions with nanosilica. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2014. Vol. 6, No. 4, pp. 13–27. [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/](http://nanobuild.ru/ru_RU/) (date of access 25.10.2018). (In Russian).
  17. *Balykov A.S., Nizina T.A., Volodin V.V., Korovkin D.A., Smakaev R.M., Orlova Ya.A.* Vliyanie modificiruyushchih dobavok i dispersnyh volokon na vodopotrebnost' fibrobetonnoj smesi [Influence of modifying additives and dispersed fibers on the water demand of a fiber-concrete mixture]. *Proceedings of the scientific conference «XLVI Ogarevskie readings»*: In 3 parts. 2018. pp. 9–13. (In Russian).
  18. *Morozov V.I., Opbul E.K.O., Pukharenko Yu.V., Khegay O.S.* Problemy sozdaniya novyh konstrukcij iz dispersno-armirovannyh betonov [Problems of creating new designs of dispersion-reinforced concrete]. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of NSC Construction*. 2018. no. 1 (16). pp. 101–105. (In Russian).
  19. *Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G.* Struktura i svojstva cementa, armirovannogo tonkim bazal'tovym voloknom [Structure and properties of cement, reinforced with thin basalt fiber]. *Materialovedenie = Materials Science*. 2015. no. 1. pp. 34–39. (In Russian).
  20. *Stepanova V.F., Buchkin A.V., Ilin D.A.* Issledovanie osobennosti raboty betonnyh konstrukcij s kombinirovannym armirovaniem (armaturoj kompozitnoj polimernoj i nemetallicheskoj fibroj) [Study of the features of the work of concrete structures with a combined reinforcement (reinforcement composite composite and non-metallic fibers)]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo = Academia. Architecture and construction*. 2017. no. 1. pp. 124–128. (In Russian).
  21. *Buyantuev S.L., Mognonov D.M., Badmaev B.B., Pashinski S.G., Malykh A.V.* Mini-zavod po proizvodstvu teploizolyacionnyh materialov iz bazal'ta na osnove ehlektromagnitnogo plavil'nogo agregata s nizkimi udel'nymi ehnergozatrataami [Mini-plant manufacture of heat-insulating materials from basalt based on the elec-



- tromagnetic melting unit with low rate energy consumption]. Vestnik VSGUTU = Bulletin of ESSUTM. 2012. no. 1 (36). pp. 139–144. (In Russian).
22. *Buyantuev S.L., Kondratenko A.S., Tsyrenov S.A.* Raschet processa vysokotemperaturnoj plavki bazal'ta Selendumskogo mestorozhdeniya [Calculation of the process of high-temperature smelting of basalt from the Selendum field]. Vestnik Buryatskogo gosuniversiteta = Bulletin of the Buryat State University. 2014. no. 3. pp. 162–165. (In Russian).
23. *Buyantuev S.L., Kondratenko A.S.* Issledovanie fiziko-himicheskikh svojstv mineral'nyh volokon, poluchennyh s pomoshch'yu ehlektromagnitnogo tekhnologicheskogo reaktora [The study of physical and chemical properties of mineral fibers obtained by an electromagnetic technological reactor]. Vestnik VSGUTU = Bulletin of ESSUTM. 2013. no. 5 (44). pp. 123–129. (In Russian).
24. *Lukashov V.P., Bardakhanov S.P., Salimov R.A., Korchagin A.I., Fadeev S.N., Lavrukhin A.V.* Sposob polucheniya ul'tradispersnoj dvuokisi kremniya, ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya i ul'tradispersnaya dvuokis' kremniya [The method of obtaining ultrafine silica, a device for its implementation and ultradispersed silicon dioxide]. RF patent № 2067077. 1996. (In Russian).
25. *Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavrukhin A.V., Salimov R.A., Fadeev S.N., Cherepkov V.V.* Poluchenie nanoporoshkov isparenem iskhodnyh veshchestv na uskoritele ehlektronov pri atmosfernom davlenii [Obtaining nanopowders by evaporation of initial substances at an electron accelerator at atmospheric pressure]. Reports of the Academy of Sciences. 2006. Vol. 409. no. 3. pp. 320–323. (In Russian).

**DEAR COLLEAGUES!****THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:**

*Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Buyantuev S.L., Khardaev P.K.* The use of composite binders and nanomodifiers for fiber-reinforced concrete. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, no. 6, pp. 91–107. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107). (In Russian).



УДК 691.32

**Автор: УРХАНОВА Лариса Алексеевна**, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. «Строительные материалы, автомобильные дороги и деревообработка», Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления; ул. Ключевская, 40в, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, 670013, urkhanova@mail.ru;

**Автор: ЛХАСАРАНОВ Солбон Александрович**, канд. техн. наук, доцент каф. «Строительные материалы, автомобильные дороги и деревообработка», Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления; ул. Ключевская, 40в, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, 670013, solbon230187@mail.ru;

**Автор: БУЯНТУЕВ Сергей Лубсанович**, д-р техн. наук, проф. каф. «Электроснабжение промышленных предприятий и сельского хозяйства», Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления; ул. Ключевская, 40в, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, 670013, buyantuevsl@mail.ru;

**Автор: ХАРДАЕВ Петр Казакович**, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления; ул. Ключевская, 40в, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, 670013, office@esstu.ru

---

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И НАНОМОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФИБРОБЕТОНА

---

### АННОТАЦИЯ К СТАТЬЕ (АВТОРСКОЕ РЕЗЮМЕ, РЕФЕРАТ):

В статье представлены результаты исследований по получению фибробетона с использованием минеральных волокон, полученных в плазменном реакторе, композиционных вяжущих и наномодифицирующих добавок. Для дисперсного армирования бетона были использованы базальтовые минеральные волокна, полученные электротермическим способом в плазменнодуговом реакторе.

Для снижения негативного воздействия среды портландцемента в исследовании были использованы композиционные вяжущие вещества на основе портландцемента и золы уноса. Зола уноса соответствует требованиям стандартов и является пригодной для использования ее в составе строительных материалов. В исследовании для сравнения был использован нанокремнезем, полученный на ускорителе электронов. Введение нанокремнезема повышает



физико-механические свойства цемента за счет ускорения процессов гидратации портландцемента, улучшения микроструктуры и изменения фазового состава цементного камня.

Установлено оптимальное содержание золы уноса в составе композиционного вяжущего, позволяющего получить высокие физико-механические показатели. Для снижения нормальной плотности в составе вяжущего в работе использован суперпластификатор поликарбоксилатного типа.

Исследованы физико-механические свойства фибробетонов с портландцементом, композиционным вяжущим с золой уноса и портландцементом, модифицированным нанокремнеземом. Использование композиционного вяжущего и введение нанокремнезема приводит к повышению прочности при сжатии и изгибе фибробетона.

Проведен анализ микроструктуры цементного камня методом растровой электронной микроскопии. Показано изменение структуры цементного камня при введении золы уноса и нанокремнезема и влияние их на поверхность минерального базальтового волокна.

Дифференциальный термический анализ цементных систем показал изменение фазового состава и основности образующихся гидросиликатов кальция при введении в состав вяжущего золы уноса и нанокремнезема.

**Ключевые слова:** фибробетон, минеральное волокно, композиционные вяжущие, портландцемент, нанокремнезем.

DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107](https://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107)

#### МАШИНОЧИТАЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СС-ЛИЦЕНЗИИ В МЕТАДАННЫХ СТАТЬИ (HTML-код):

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">The use of composite binders and nanomodifiers for fiber-reinforced concrete</span> by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, no. 6, pp. 91– 107. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107" property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Buyantuev S.L., Khardaev P.K.</a> is licensed under a <a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>.<br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2018/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2018/</a>.<br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="solbon230187@mail.ru" rel="cc:morePermissions">solbon230187@mail.ru</a>.
```



Опыт использования фибробетона в мировой практике показывает, что рациональные области для использования таких бетонов представляют собой широкий спектр монолитных и сборных железобетонных конструкций. Использование фибробетона наиболее эффективно в тонкостенных плоских и изогнутых конструкциях, трубопроводах с пониженным давлением и низким давлением, а также при изготовлении ударопрочных и гибких конструкций – это исключает дополнительную арматуру [1–8].

Использование минеральных, в частности базальтовых волокон, для дисперсного армирования бетона является актуальным из-за высоких физико-механических свойств базальтовых волокон и меньшей плотности этих волокон по сравнению со сталью. В целом, можно отметить, что базальтовые волокна по причине их химического сродства с цементом необходимо защитить от негативного воздействия щелочной среды для сохранения эффекта дисперсного армирования фибробетонов.

Высокие физико-механические характеристики материала в основном определяются совместной работой волокна с цементной матрицей, а также зависят от состава бетона и технологии изготовления, типа и активности цемента, типа и содержания волокна в бетоне, способа распределения волокна в объеме бетонной смеси, типа и количества пластифицирующих и кремнеземсодержащих добавок [2, 5, 6, 7, 8].

Анализируя различные подходы к решению проблемы сохранения минерального волокна от действия щелочной среды, можно выделить основные направления: использование бесщелочных вяжущих, применение малощелочных вяжущих, введение добавок, снижающих щелочность вяжущего, модификация поверхности волокна, модификация структуры волокна [9–20]. Согласно этой классификации объектами воздействия могут быть как отдельные волокна, так и фибробетон, а целесообразность применения конкретного метода защиты от щелочной среды определяется технико-экономическим обоснованием производства. Для защиты минерального волокна от негативного воздействия среды порт-



ландцемента в исследовании было решено использовать нанокремнезем для модифицирования цемента и золу уноса для получения композиционного вяжущего. Композиционные вяжущие получали совместным измельчением золы уноса (0–50 мас. %) с портландцементом.

В проводимых исследованиях были использованы: портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 32,5 Н ГОСТ 31108-2016, базальтовое волокно на основе базальтов Селендумского месторождения Республики Бурятия, зола уноса, нанодисперсный кремнезем Таркосил-05<sup>®</sup>. Минеральные волокна имеют следующие характеристики: средний диаметр волокна – 10 мкм, прочность на растяжение – 1350 МПа, термостойкость – 600°C [21–23].

Зола уноса получена при сжигании угля на Гусиноозерской ГРЭС (Республика Бурятия). Результаты определения основных характеристик золы уноса показывают, что ее можно использовать без ограничений для производства строительных материалов и изделий (табл. 1).

Таблица 1

### Основные характеристики золы уноса

Показатель	Требование стандарта	Значение
Содержание свободного оксида кальция, мас. %	$\leq 10$	0.05
Содержание оксида магния, мас. %	$\leq 5$	1.9
Содержание сернистых и сернокислых соединений, мас. %	$\leq 3$	0.34
Содержание щелочных оксидов, мас. %	$\leq 3$	2.7
Площадь удельной поверхности, м <sup>2</sup> /кг	$\geq 300$	430

Нанодисперсный кремнезем Таркосил-05<sup>®</sup> получен на ускорителе электронов по методу [24, 25] в Институтах ядерной физики СО РАН и теоретической и прикладной механики СО РАН. Таркосил-05<sup>®</sup> имеет следующие характеристики: средний размер частиц – 53 нм, удельная поверхность – 50,6 м<sup>2</sup>/г (по данным прибора Сорби-М). Физико-механические свойства вяжущих были определены в соответствии с российски-



ми национальными стандартами. Микроструктуру композиционных вяжущих определяли на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 6510 LV (Центр «Прогресс» Восточно-Сибирского государственного университета технологии и управления) с увеличением  $\times 1000$ .

Исследования показали, что использование золы уноса в составе композиционных вяжущих приводит к изменению нормальной плотности, сроков схватывания и физико-механических показателей (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

### Характеристики композиционных вяжущих с применением золы уноса

Показатель	Вяжущие с Sika Viscocrete при содержании золы, масс. %			ПЦ
	10	30	50	
Нормальная плотность, %	24	23	20	28
Сроки схватывания, мин:				
Начало	140	150	160	90
Конец	300	320	330	245

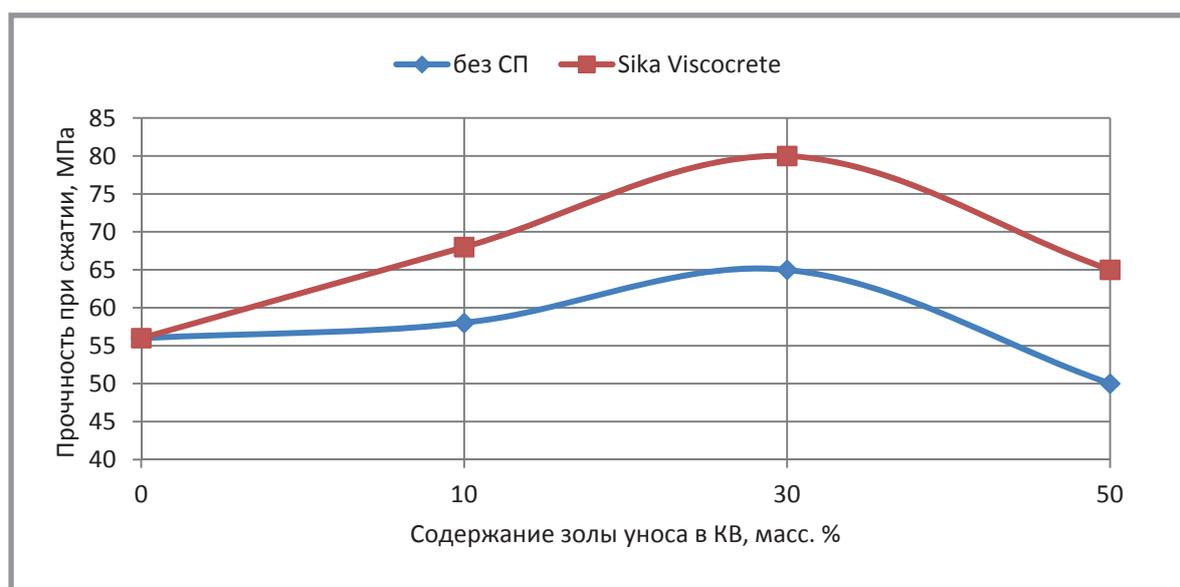


Рис. 1. Прочность при сжатии портландцемента с золой уноса в возрасте 28 сут



Введение добавки SikaViscocrete приводит к повышению прочности при сжатии композиционных вяжущих на 10–15%. Помимо водоредуцирующего эффекта, который способствует повышению физико-механических характеристик, суперпластификатор существенно влияет на процессы, происходящие в цементной системе путем различных эффектов.

Получение фибробетона с использованием композиционного вяжущего с содержанием золы уноса 30% по массе и нанокремнезема Таркосил-05® (0,1 мас. %) привело к увеличению прочности при сжатии и изгибе на 10–15% для состава с золой уноса и на 15–20% для состава с нанокремнеземом (рис. 2, 3).

Изменение физико-механических свойств фибробетона происходит за счет направленного формирования структуры и повышения коррозионной стойкости волокна за счет снижения щелочности вяжущего. Зола уноса при смешивании с портландцементом выступает в роли активной минеральной добавки, участвует в структурообразовании цементного камня. В то же время нанокремнезем активно влияет на гидратацию портландцемента. Образование продуктов гидратации в ранний период происходит при участии поверхности нанодисперсных частиц,

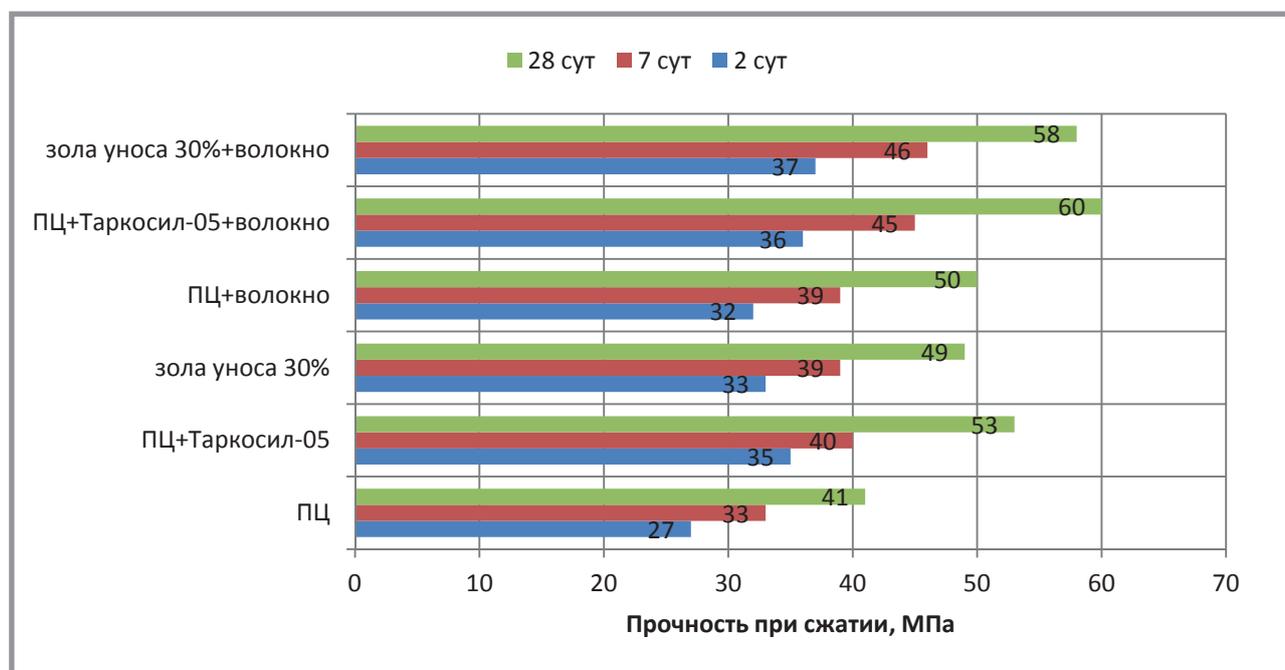


Рис. 2. Влияние минерального волокна на прочность при сжатии фибробетона



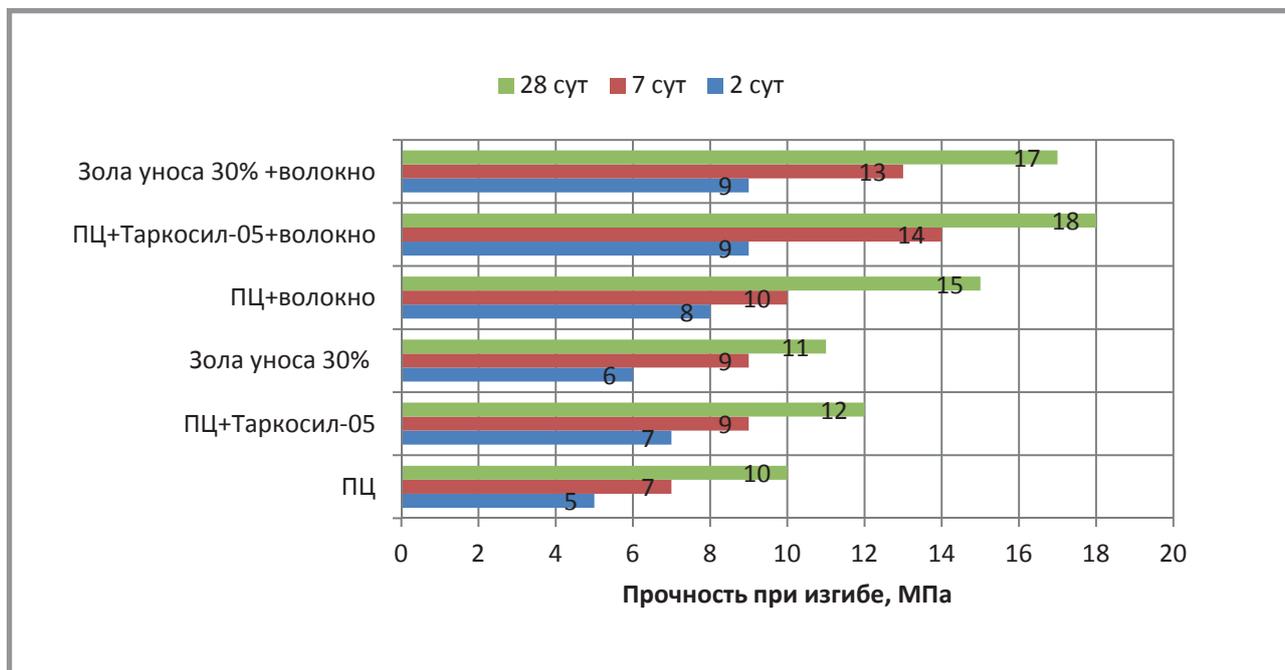


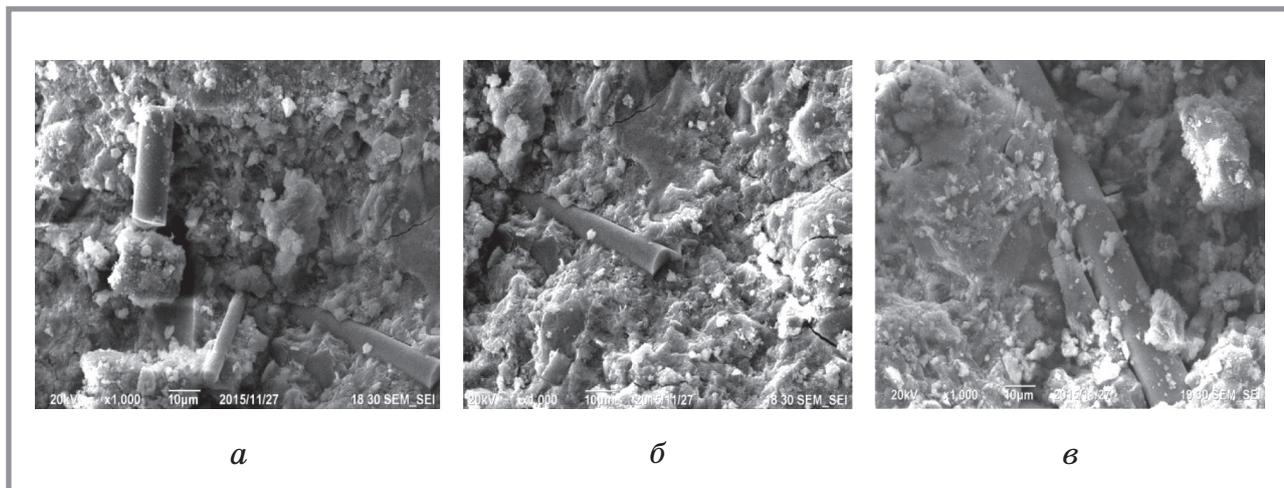
Рис. 3. Влияние минерального волокна на прочность при изгибе фибробетона

и поверхность цементных зерен оказывается в меньшей степени блокирована новообразованиями, что интенсифицирует процесс гидролиза цементных фаз.

Результаты исследований электронной микроскопии показали изменение микроструктуры цементного камня в возрасте 28 суток твердения (рис. 4).

Анализ микроструктуры позволяет сделать вывод, что поверхность волокна в образце с обычным портландцементом содержит вкрапления, свидетельствующие о взаимодействии волокна и портландцемента. Это приводит к снижению армирующего эффекта, по сравнению с составами с золой уноса и нанокремнеземом. Введение золы уноса способствует направленному формированию высокопрочной структуры камня из низкоосновных гидросиликатов кальция и снижению содержания гидроксида кальция. Снижение содержания гидроксида кальция способствует сохранению поверхности минерального волокна и высоких физико-механических показателей. При введении нанокремнезема (0,1%) в возрасте 28 суток структура камня композиционного вяжущего более плотная с мелкодисперсными равномерно распределенными кристаллами низкоосновных гидросиликатов кальция.





**Рис. 4.** Электронная микроскопия (x1000) поверхности портландцемента (а), композиционного вяжущего (б) и портландцемента с нанокремнеземом (в) в возрасте 28 суток твердения

Результаты дифференциально-термического анализа (рис. 5) цементной матрицы свидетельствуют об изменении эндоэффекта в области температуры 515–520°C у обычного портландцемента на экзоэффект у композиционного вяжущего с золой уноса. Это говорит о связывании гидроксида кальция активными компонентами, содержащимися в золе уноса. При сравнении кривых портландцемента и композиционного вяжущего наблюдается изменение основности образующихся гидросиликатов кальция: эндотермический эффект в области температур 815–820°C смещается вправо, в сторону повышения температуры до 853°C. Широкий интервал температур связан с тем, что введение золы уноса приводит к образованию дополнительного количества гидросиликатов кальция, отличающихся от традиционных.

Введение нанокремнезема приводит к изменению основности образующихся гидросиликатов кальция: эндотермический эффект в области температур 800–840°C смещается вправо, в сторону снижения температуры от 838°C до 806°C. Таким образом, в цементном камне, модифицированном нанокремнеземом, образуется большее количество гидросиликатов кальция, структурированных по поверхности твердой фазы с образованием более плотного композита с улучшенными физико-механическими свойствами.



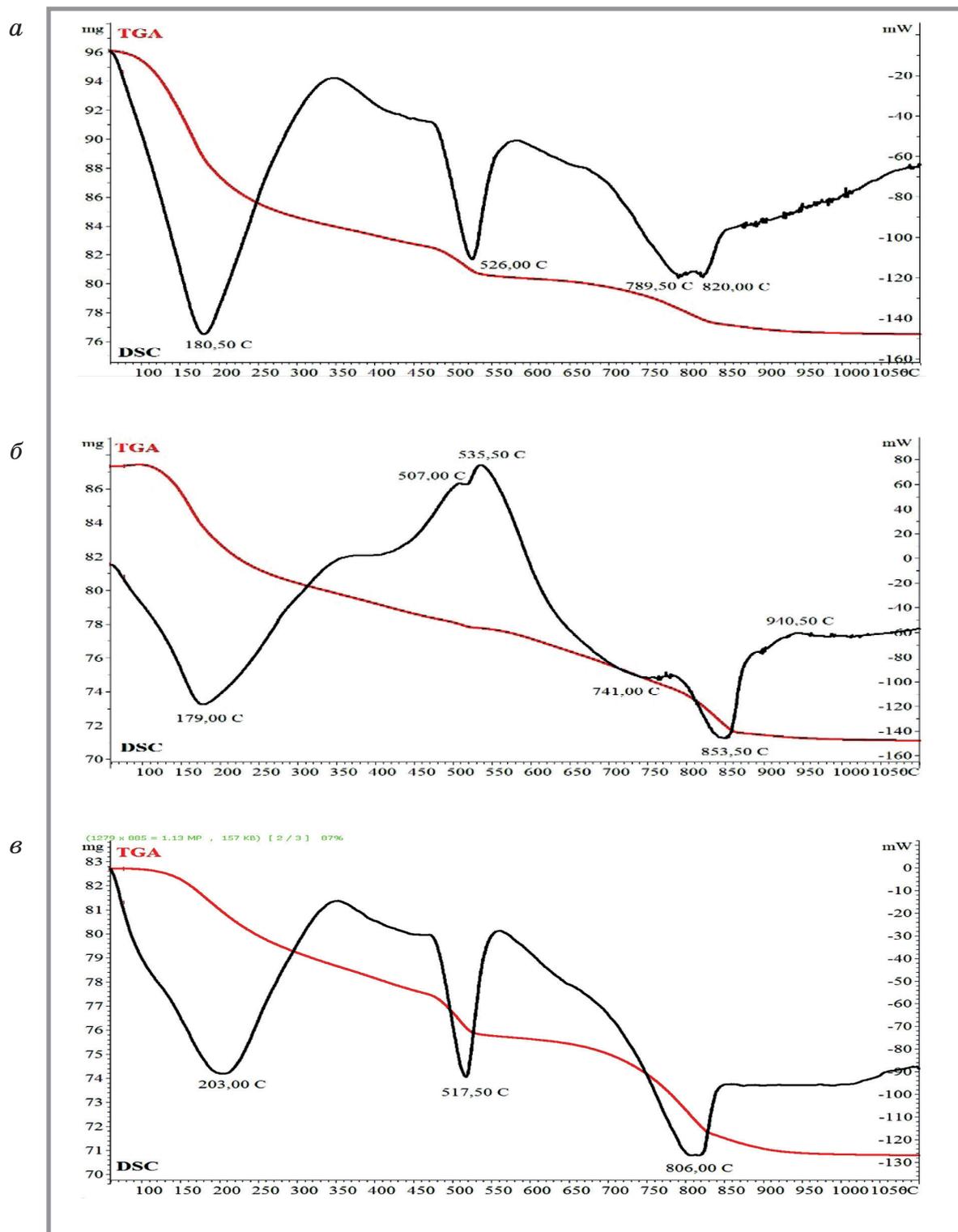


Рис. 5. Кривые дифференциально-сканирующей калориметрии портландцемента (а) и композиционного вяжущего (б, зола уноса – 30%), портландцемента с нанокремнеземом (в)

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- составы фибробетона с использованием золы уноса и нанокремнезема показали более высокую прочность на сжатие и изгиб благодаря связыванию дополнительного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и снижению отрицательного воздействия щелочной среды на минеральное волокно;
- исследование микроструктуры цементного камня и дифференциально-термический анализ позволяют сделать вывод, что введение золы уноса и нанокремнезема способствует направленному формированию высокопрочной структуры камня из низкоосновных гидросиликатов кальция и понижению содержания гидроксида кальция;
- введение нанокремнезема и использование золы уноса в составе вяжущего способствует повышению коррозионной стойкости минерального волокна и сохранению армирующего эффекта от их введения.

---

*Статья подготовлена в рамках выполнения проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 13.6716.2017 по теме «Инновационные ресурсо- и энергосберегающие технологии с применением плазменно-энергетических процессов и технологий» ВСГУТУ.*

**Библиографический список:**

1. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированный бетон. Москва: Стройиздат, 1989. – 175 с.
2. Боровских И.В., Хозин В.Г. Изменение длины базальтовых волокон при их распределении в композиционном вяжущем для высокопрочных фибробетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 2 (12). – С. 233–237.
3. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. – М.: АСВ, 2004. – 560 с.
4. Пухаренко Ю.В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4.
5. Степанова В.Ф., Бучкин А.В. Цементные композиции, армированные базальтовым волокном // Технологии бетонов. – 2007. – №5. – С. 28-29.
6. Бабаев В.Б., Строчкова В.В., Нелюбова В.В. Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 58–61.



7. *Калашников В.И., Демьянова В.С., Володин В.М., Гусев А.Д.* Ресурсосберегающие порошковые фибробетоны с использованием техногенных отходов // Строительные материалы. – 2012. – № 8. – С. 52–54.
8. *Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И., Сеньков С.А., Политаева А.И.* Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном // Строительные материалы. – 2015. – № 2. – С. 34–38.
9. *Низина Т.А., Селяев В.П., Балыков А.С., Володин В.В., Коровкин Д.И.* Оптимизация составов многокомпонентных мелкозернистых фибробетонов, модифицированных на различных масштабных уровнях // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 43–65. – URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU](http://nanobuild.ru/ru_RU) (дата обращения 26.10.2018 г.).
10. *Bangi M.R., Horiguchi T.* Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fiber-reinforced high strength concrete at elevated temperatures // Cement and Concrete Research. – 2012. – № 42. – Pp. 459–466.
11. *Fediuk R., Smoliakov A., Muravirov A.* Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Composite Binders // Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2017, Article ID 2316347, 13 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2316347>. (дата обращения 26.10.2018 г.).
12. *Хархардин А.Н., Сивальнева М.Н., Строкова В.В.* Топологический расчет основных параметров фибры для получения пенобетона на основе бесцементного наноструктурированного вяжущего // Нанотехнологии в строительстве. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 73–88. – URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU](http://nanobuild.ru/ru_RU) (дата обращения 26.10.2018 г.).
13. *Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю.* Исследование свойств тяжелого бетона на крупном заполнителе, армированного неметаллической базальтовой фиброй // Строительные материалы. – 2018. – № 9. – С. 46–53.
14. *Banthia N., Bindiganavile V., Jones J., Novak J.* Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products // PCI Journal. – 2012. – Vol. 3. – Pp. 33–46.
15. *Rybin V.A., Utkin A.V., Baklanova N.I.* Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers // Cement and Concrete Research. – 2013. – Vol. 53. – pp. 1–8.
16. *Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Розина В.Е. и др.* Повышение коррозионной стойкости базальтофибробетонных композиций с нанокремнеземом // Нанотехнологии в строительстве. – 2014. – Том 6, № 4. – С. 13–27. – URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/](http://nanobuild.ru/ru_RU/) (дата обращения: 25.10.2018).
17. *Балыков А.С., Низина Т.А., Володин В.В., Коровкин Д.А., Смакаев Р.М., Орлова Я.А.* Влияние модифицирующих добавок и дисперсных волокон на водопотребность фибробетонной смеси // Труды научной конференции «XLVI Огаревские чтения»: в 3-х частях. – 2018. – С. 9–13.
18. *Морозов В.И., Опбул Э.К.О., Пухаренко Ю.В., Хегай О.С.* Проблемы создания новых конструкций из дисперсно-армированных бетонов // Вестник НИЦ Строительство. – 2018. – № 1 (16). – С. 101–105.
19. *Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г.* Структура и свойства цемента, армированного тонким базальтовым волокном // Материаловедение. – 2015. – № 1. – С. 34–39.
20. *Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Ильин Д.А.* Исследование особенности работы бетонных конструкций с комбинированным армированием (арматурой композитной полимер-



- ной и неметаллической фиброй) // Academia. Архитектура и строительство. – 2017. – № 1. – С. 124–128.
21. Буянтуев С.Л., Могнонов Д.М., Бадмаев Б.Б., Пашинский С.Г., Малых А.В. Мини-завод по производству теплоизоляционных материалов из базальта на основе электромагнитного плавильного агрегата с низкими удельными энергозатратами // Вестник ВСГУТУ. – 2012. – № 1 (36). – С. 16–18.
  22. Буянтуев С.Л., Кондратенко А.С., Цыренов С.А. Расчет процесса высокотемпературной плавки базальта Селендумского месторождения // Вестник Бурятского государственного университета. – 2014. – № 3. – С. 162–165.
  23. Буянтуев С.Л., Кондратенко А.С. Исследование физико-химических свойств минеральных волокон, полученных с помощью электромагнитного технологического реактора // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 5 (44). – С. 123–129.
  24. Лукашов В.П., Бардаханов С.П., Салимов Р.А., Корчагин А.И., Фадеев С.Н., Лаврухин А.В. Способ получения ультрадисперсной двуокиси кремния, устройство для его осуществления и ультрадисперсная двуокись кремния // Патент РФ № 2067077. – 1996.
  25. Бардаханов, С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.В. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // Доклады Академии Наук. – 2006. – Т. 409, № 3. – С. 320–323.

**УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!**

**ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕРИАЛА ДАННОЙ СТАТЬИ  
ПРОСИМ ДЕЛАТЬ БИБЛИОГРАФИЧЕСКУЮ ССЫЛКУ НА НЕЁ:**

Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Буянтуев С.Л., Хардаев П. К. Применение композиционных вяжущих и наномодификаторов для получения фибробетона // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 6. – С. 91–107. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107](http://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107).

**DEAR COLLEAGUES!**

**THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:**

Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Buyantuev S.L., Khardaev P.K. The use of composite binders and nanomodifiers for fiber-reinforced concrete. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, no. 6, pp. 91–107. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107](http://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-6-91-107). (In Russian).

