

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, канд. техн. наук (InozemcevAS@mgsu.ru), Е.В. КОРОЛЕВ, д-р. техн. наук, директор Научно-образовательного центра по направлению «Нанотехнологии»

Московский Государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26)

## Структурообразование и свойства конструкционных высокопрочных легких бетонов с применением наномодификатора «BisNanoActivus»<sup>1</sup>

Представлены результаты исследований влияния комплексного наноразмерного модификатора «BisNanoActivus» на процессы структурообразования в объеме высокопрочных легких бетонов и в зоне контакта цементного камня и наполнителя. Методами дифференциального термического анализа, инфракрасной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеивания установлено, что применение нанотехнологии, позволяет управлять процессами структурообразования на границе раздела фаз цементный камень – порлая микросфера за счет привитого к поверхности наполнителя предложенного наномодификатора и получать высокие показатели физико-механических свойств высокопрочных легких бетонов. Показаны характеристики основных свойств полученного конструкционного легкого бетона и его высокая технико-экономическая эффективность с учетом области применения.

**Ключевые слова:** высокопрочный легкий бетон, конструкционный легкий бетон, наноразмерный модификатор, нанотехнологии

A.S. INOZEMTCEV, Candidate of Technical Sciences (InozemcevAS@mgsu.ru), E.V. KOROLEV, Doctor of Technical Sciences, director, research and educational center «Nanotechnology», Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Structuring and properties of the structural high-strength lightweight concretes with nanomodifier BisNanoActivus\*

Paper presents the result of research of influence complex nanoscale modifier «BisNanoActivus» to structuring process in volume of high-strength lightweight concrete and at the cement stone and filler contact faces. Research have showed that application of nanotechnology allows to control the processes of structuring the interface «cement stone – hollow microsphere» due to nanomodification of surface of hollow filler with «BisNanoActivus». Complex nanoscale modifier has activity to cement and products of hydration and it has strengthens boundary that increase the physic and mechanical characteristics of developed high-strength lightweight concretes. Research of operational properties shows that developed preparation technology of high-strength lightweight concretes allows to get material with increased characteristics. Analysis of technical and economical efficiency by generalized criterion of quality shows that the using of nanomodification technology for lightweight concrete increases the criterion of technical and economical efficiency

**Keywords:** high-strength lightweight concrete, structural lightweight concrete, nanoscale modifier, nanotechnology

Часто область применения легких бетонов ограничивается малоэтажным строительством, что связано с их невысокими эксплуатационными свойствами. Однако строительные материалы, обладающие низкой средней плотностью и повышенной прочностью, имеют существенные преимущества в современном строительстве [1, 2]. Технологические ограничения достижения высоких значений удельной прочности  $R_{уд}^2$  материалов в технологии ячеистых бетонов связаны с высокой дефектностью стенок цементного камня, разделяющих воздушные ячейки, а в технологии легкого бетона на пористых заполнителях – низкой прочностью и высокой сорбционной способностью зерен легкого заполнителя, а также сложностями его распределения в объеме материала.

Отечественными и зарубежными учеными [3–5] преодоление указанных сложностей предложено осуществлять посредством использования стеклянных или алюмосиликатных микросфер, характеризующихся малыми размерами (до 500 мкм), что в соответствии с законом Стокса (рис. 1) существенно снижает скорость всплытия частиц, а также высокой удельной прочностью (до 70 МПа), обеспечивающей получение легкого высокопрочного материала [6]. Однако введение микросфер вследствие технологических особенностей их получения приводит к формированию дефектной границы раздела фаз «цементный камень – микросфера», что не позволяет полностью реализовать весь их потенциал.

Возможным решением проблемы низкой прочности контакта на границе цементный камень – микросфера

The application area of lightweight concretes is limited to low-rise building. That is mostly due to low operating properties of such concretes. Building materials with low bulk density and high strength have significant advantages in modern construction [1, 2]. High defectiveness of cement stone walls separating the air cells into the cellular concretes is technological restriction for progress to high value of specific strength (ratio of material compressive strength to rational density; units is MPa). The low strength, high sorption ability and difficulties of distribution of lightweight aggregate create problems for technology of the lightweight concrete with porous aggregates.

World scientist suggested to use the glass and alumina-silicate microspheres for overcome these difficulties [3–5]. Low sizes (less than 500 mkm) and high specific strength (up to 70 MPa) of the spheres reduce the ascent rate according to Stokes' law (Fig. 1) [6]. However, addition of microspheres makes interface cement stone – microsphere more defective.

Forming of the dense and strong cement stone by using to effective nanomodifiers solves the problems of low-strength contact zone.

Paper presents the research of the high-strength lightweight concretes with bulk density less than 1500 kg/m<sup>3</sup> and strength more than 40 MPa. Control the structuring processes in the interface and volume was carried out by modification the filler surface of multicomponent nanoscale modifier «BisNanoActivus» [7, 8].

**Structuring.** Process of structuring high-strength lightweight concretes depends on hydration of cement, crystal-

<sup>1</sup>Работа проведена при поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-565.2012.1.

<sup>1</sup>Work was supported by grant of the President of the Russian Federation for young scientists and graduate students of SP-565.2012.1.

<sup>2</sup> $R_{уд}$  – отношение предела прочности материала к его относительной плотности; единица измерения – МПа.

<sup>2</sup> $R_{уд}$  – ???.

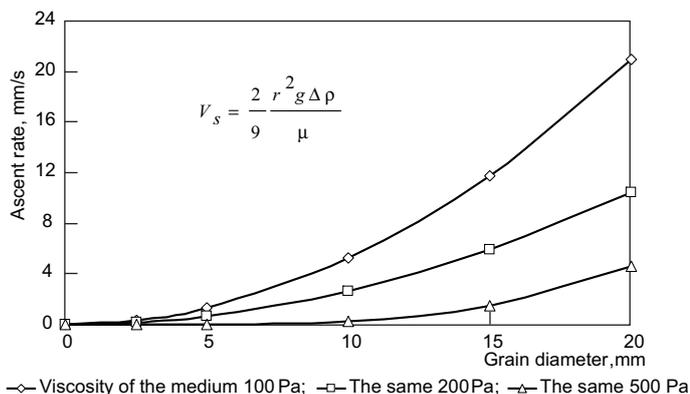


Рис. 1. Влияние размера частиц и вязкости среды на скорость всплытия  
 Fig. 1. Influence of particle size and viscosity of medium to ascent rate

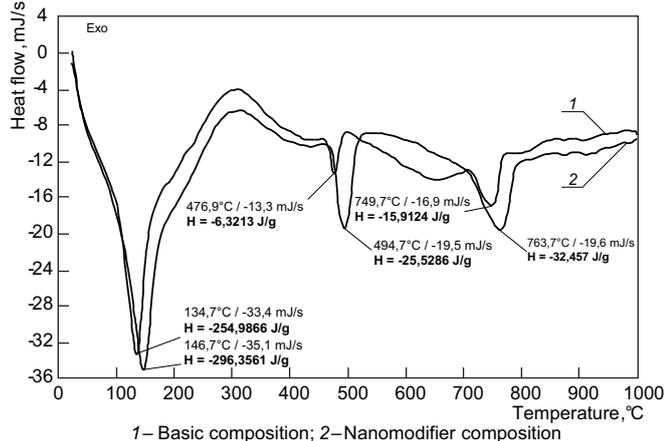


Рис. 2. Термограмма ДТА цементного камня  
 Fig. 2. DTA Thermogramm of cement stone

является формирование плотного и прочного цементного камня посредством применения эффективных наномодификаторов.

В работе приведены основные результаты исследования по разработке высокопрочных легких бетонов со средней плотностью менее 1500 кг/м<sup>3</sup> и прочностью более 40 МПа ( $R_{уд} > 30$  МПа). Для управления процессами структурообразования цементного камня как на границе раздела фаз, так и в объеме такого бетона, осуществляется посредством модифицирования поверхности микросфер многокомпонентным наноразмерным модификатором «BisNanoActivus» комплексного действия [7, 8].

**Структурообразование.** Процесс структурообразования высокопрочных легких бетонов, как и тяжелых бетонов на цементных вяжущих, определяется, в основном, гидратацией цемента, кристаллизацией и процессами формирования кристаллического сростка. Известно, что максимальная прочность материала достигается при формировании твердого тела с наибольшей плотностью связей и прочностью единичного контакта, которая зависит от вида соединения, образующегося в процессе гидратации.

За счет наличия активных центров на поверхности наномодифицированные полые алюмосиликатные микросферы оказывают существенное влияние на процесс формирования структуры цементного камня (рис. 2–4).

Анализ экспериментальных данных ДТА (рис. 2) свидетельствует, что термограммы цементного камня как базового, так и наномодифицированного состава имеют три характерных аномалии, соответствующие процессам разложения фаз: удаление связанной воды, дегидратация гипса, этtringита, C–S–H геля (130–150 °C)

лизация и formation of crystalline splices both for heavy concretes with cement binder. The maximal strength of the material can be achieved by forming the solid object with most density of bonds and strength of single contact. It depends on the kind of connection which formed during hydration. Nanomodified microspheres have active centers on the surface which influences to the structuring process of cement stone (рис. 2–4).

Analysis of experimental data (Fig. 2) shows that thermogram of basic cement stone and nanomodified composition has three characteristic anomalies which correspond to processes of phase decomposition. The first is deleting process of bound water, dehydration of gypsum, ettringite and C–S–H gel (130–150 °C) [9], the second is decomposition of portlandite (470–500 °C) [9, 10] and the third anomaly is decomposition of aragonite and calcite (745–770 °C) [10, 11].

The fig. 1 shows temperature and enthalpy shift value between basic and nanomodified composition. Value of specific enthalpy of first anomaly increases by 16,2%, of second anomaly by 304%, of third anomaly by 104% for nanomodified composition. It can be explained by increasing of bound water and forming of more number of calcium hydrates and hydrosilicates.

Active silica interacts with Ca(OH)<sub>2</sub> of portland cement and forms hydrosilicate structures CSH (II). This is confirmed by the results of IR spectroscopy (Fig. 3).

Infrared absorption spectrum analysis shows that application of complex nanomodifier «BisNanoActivus» rises quantity of cement hydration products. Rising of peaks in the range of 1100–750 cm<sup>-1</sup>, corresponding to symmetric and antisymmetric stretching of Si–O–Si and Si–O (and Si–O–Al also), specific for medium- and high-alkaline hydrated calcium silicates [12, 13] is observed. The results of DTA (Fig. 2) are confirmed by the presence of wide adsorption bands 3620 and 3450 sm<sup>-1</sup>. These bands correspond to vibrations of hydrated bonds in the compounds of the calcium hydroxide. Besides, modified cement stone evidences absorption bands specific for tobermorite-like low-alkaline hydrated calcium silicates, i.e. 1620 and 1150–1030 cm<sup>-1</sup> [14]. It was also observed that cement stone with «BisNanoActivus» shows decrease in relative absorption intensity for carbonaceous bond beaks 870 and 1400 cm<sup>-1</sup>.

Thus, addition of complex nanomodifier «BisNanoActivus» contributes to intensification of cement hydration process, formation of additional number of calcium hydrosilicates and reduces number of calcium carbonate with various morphology. Analysis of contact zone filler and cement stone was performed by Raman spectroscopy method. Cement stone, high-strength lightweight concrete and nanomodified high-strength lightweight concrete were objects of research.

Analysis of cement stone samples (Fig. 4) showed well-defined peaks, identified as Raman emission dispersion area connected with carbonaceous bonds (278 cm<sup>-1</sup>), SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> ettringite (989 cm<sup>-1</sup>) and Si–O bonds (1085 cm<sup>-1</sup>) [15], with relative intensities 547; 365 and 806 correspondently. Analysis of cement stone and microsphere contact faces in HSLCs there are only two decreased intensity peaks seen (137 and 501, for 4th and 5th peak correspondently), specific for Si–O stretching band. Internal strain of tetrahedral silicates ν<sub>4</sub> ([SiO<sub>4</sub>]) generates bonds in area of 400-600 cm<sup>-1</sup> [16, 17], that are available for description at spectra of HSLWC at cement stone – microsphere phase boundary. 462 and 517 cm<sup>-1</sup> peaks may be interpreted as deformation oscillations and antisymmetric bands of O–Si–O. At that peak's relative intensity is 649; 643; 141; 401 and 1239, i.e. peaks' height №1, 4 and 5 is growing on 15; 11 and 35 %, correspondently. The last is evidencing increase in number of crystallizing reaction products at the boundary.

[9], разложение портландита ( $470\text{--}500^\circ\text{C}$ ) [9, 10], разложение арагонита и кальцита ( $745\text{--}770^\circ\text{C}$ ) [10, 11]. Сопоставление абсолютных характеристик аномалий указывает на смещение значений температур и удельной энтальпии. Так, значение удельной энтальпии первой аномалии для наномодифицированного состава увеличилась на 16,2%, второй аномалии – 304%, а третьей аномалии – 104%. Это объясняется увеличением доли связанной воды и образованием большего количества гидратов и гидросиликатов кальция.

Золь кремниевой кислоты, входящий в состав комплексного наномодификатора «BisNanoActivus», взаимодействует с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  цемента с образованием гидросиликатных структуры CSH (II). Указанное подтверждается результатами ИК-спектроскопии (рис. 3). Анализ инфракрасных спектров поглощения свидетельствует, что применение «BisNanoActivus» приводит к увеличению количества продуктов гидратации цемента. Так, установлено, что увеличивается интенсивность максимумов в диапазоне  $1100\text{--}750\text{ см}^{-1}$ , соответствующих симметричным и антисимметричным колебаниям связей Si–O–Si и Si–O (а также связей Si–O–Al), соответствующих высоко- и среднеосновным гидросиликатам кальция [12, 13].

Кроме того, проявление широких полос поглощения  $3620$  и  $3450\text{ см}^{-1}$  подтверждает данные, полученные методом ДТА (рис. 2). Эти полосы соответствуют колебаниям гидратных связей в соединениях гидроксида кальция. В модифицированном цементном камне проявляются также полосы поглощения, характерные для низкоосновных гидросиликатов кальция тоберморитоподобной структуры –  $1620$  и  $1150\text{--}1030\text{ см}^{-1}$  [14], и наблюдается снижение относительной интенсивности поглощения для пиков карбонатных связей  $870$  и  $1400\text{ см}^{-1}$ .

Применение наноразмерного модификатора «BisNanoActivus», наносимого на поверхность микросфер, естественно должен изменять характеристики цементного камня на границе раздела фаз цементный камень – микросфера. Анализ зоны контакта наполнителя и цементного камня проводился с применением метода спектроскопии комбинационного рассеяния (рис. 4). Объектами исследования являлись составы цементного камня, высокопрочного легкого бетона и наномодифицированного высокопрочного легкого бетона (НМВПЛБ).

Анализ полученных данных показывает, что спектры комбинационного рассеяния (КР-спектры) для всех трех образцов отличаются по количеству идентифицируемых пиков и по их относительной интенсивности. Так, на образцах цементного камня наблюдаются пики, идентифицируемые как полосы комбинационного рассеяния карбонатных связей ( $278\text{ см}^{-1}$ ), радикала  $\text{SO}_4^{2-}$ , этрингита ( $989\text{ см}^{-1}$ ), связей Si–O ( $1085\text{ см}^{-1}$ ) [15] относительной интенсивностью 547; 365 и 806, соответственно. При исследовании зоны контакта цементного камня и микросфер в высокопрочном легком бетоне наблюдаются только два пика пониженной интенсивности (137 и 501, для четвертого и пятого пика соответственно), соответствующие валентным колебаниям связи Si–O. Внутренние деформации силикатов тетраэдрического типа  $\nu_4$  ( $[\text{SiO}_4]$ ) порождают полосы в области  $400\text{--}600\text{ см}^{-1}$  [16, 17], которые можно идентифицировать на спектрах, полученных для границы цементный камень – микросфера в составах наномодифицированного высокопрочного легкого бетона. Пики при  $462$  и  $517\text{ см}^{-1}$  могут быть интерпретированы как соответствующие деформационным колебаниям и антисимметричным изгибам связи O–Si–O. При этом относительная интенсивность пиков составляет 649; 643; 141; 401 и 1239; высота пиков «1», «4» и «5» увеличивается на 15; 11 и 35 %, соответственно. Это свидетельствует об увеличении количества кристаллических продуктов реакции на границе раздела фаз.

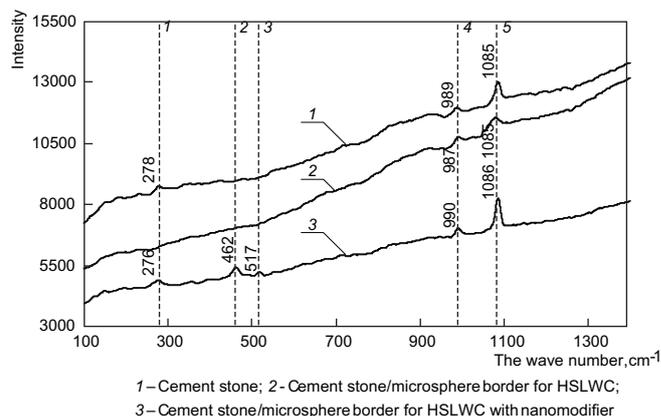


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния исследованных областей базового состава и наномодифицированного состава  
Fig. 4. Raman-spectra of cement stone, interface of CS/MS in HSLWC and interface of CS/MS in HSLWC with nanomodifier

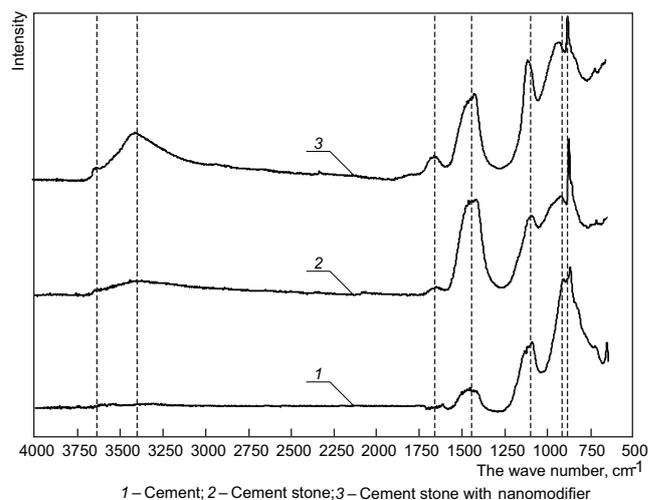


Рис. 3. ИК-спектры поглощения портландцемента, цементного камня базового состава и наномодифицированного состава  
Fig. 3. IR-spectra of absorption portland cement, cement stone and cement stone with nanomodifier

Thus, conducted studies have showed that application of complex nanomodifier «BisNanoActivus» rises quantity of active centers at the surface of dispersed phases. It allowing to expect increase in growth of hydration speed in portland cement and growth of hydrated calcium silicates at the interface cement stone – nanomodified microsphere.

Research have showed that application of nanotechnology allows to control the processes of structuring the interface cement stone – hollow microsphere due to nanomodification of surface of hollow filler with «BisNanoActivus». Complex nanoscale modifier has activity to cement and products of hydration and it has strengthens boundary that increase the physic and mechanical characteristics of developed high-strength lightweight concretes.

**Physical and technical properties.** The studies dedicated to wettability of dispersed phases and surface morphology adsorptive porometry shows absence of extended porous structure of ceramic and glass microspheres, and increase of water consumption of high-strength lightweight concretes mixtures is due to microspheres surface roughness [18]. Potential for enhancement of microsphere usage efficiency consists in control over surface phenomena. For this control, it is advisable to apply both traditional ways – application of surfactants – and new approaches – for instance, application of nanomodifiers.

Research of operational properties shows that developed preparation technology of high-strength lightweight concretes allows to get material with increased characteris-

Таким образом, исследования, проведенные методами ДТА, ИК- и КР-спектроскопии, показали, что нанесение модификатора «BisNanoActivus» приводит к интенсификации гидратации цемента, образованию дополнительного количества гидросиликатов кальция, уплотнению и упрочнению цементного камня как в объеме, так на границе раздела фаз цементный камень – наномодифицированная микросфера.

#### Физико-технические свойства.

Результаты исследований по определению смачиваемости дисперсных фаз и результатов исследования морфологии поверхности, полученных методом адсорбционной порометрии, показывают, что керамические и стеклянные микросферы не обладают развитой поровой структурой, а увеличение расхода воды в составах высокопрочных легких бетонов связано с шероховатостью поверхности микросфер [18]. Это закономерно приводит к снижению подвижности бетонных смесей. Очевидным решением указанной технологической проблемы является использование пластификаторов. В [18] показано, что эффективными пластификаторами для таких бетонов являются добавки на поликарбоксилатной основе.

Наномодифицированные высокопрочные легкие бетоны, оптимизация которых проведена с целью получения материала с максимальным качеством [19, 20], обладают показателями свойств, обеспечивающими им высокие конкурентные преимущества (см. таблицу).

**Заключение.** Оценка экономической эффективности с учетом области применения высокопрочных конструктивных легких бетонов [21] показывает, что высокие эксплуатационные характеристики обеспечивают возможность повышения эффективности строительства не менее чем на 30–35%, которая складывается из экономии ресурсов при строительстве (снижение расхода бетона и металлической арматуры), сокращении затрат на транспортные, монтажные и теплоизоляционные работы, повышении рациональности использования земель (увеличение этажности, увеличение величины пролетов, сокращение количества несущих элементов конструкции) и т.д.

Разработанные высокопрочные легкие бетоны существенно расширяют область применения легких бетонов. Их целесообразно использовать для изготовления конструкции при строительстве многоэтажных и высотных объектов, в жилищном и коммерческом строительстве, при возведении уникальных сооружений, а также при устройстве дорожных мостов и развязок.

#### Список литературы

1. Ming K.Y., Hilmi B.M., Bee C.A., Ming C.Y. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete // *Materials & Design*. 2014. Vol. 54. P. 702–707.
2. Bogas J.A., Gomes A. Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction // *Materials & Design*. 2013. Vol. 46. P. 832–84.

#### Основные свойства наномодифицированных высокопрочных легких бетонов

The main properties of the developed high-strength lightweight concrete

Показатель Property	Значение показателя Value
Подвижность по диаметру расплыва конуса, мм Slump cone spread, mm	не менее 155 Not lower than 155
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> Average density, kg/m <sup>3</sup> (lb/gal)	1300–1500 1300-1500 (10,8-12,5)
Общая пористость, % / Total porosity, % в том числе: закрытая / including : closed открытая / opened	33,4 31,9 1,5
Предел прочности при изгибе, МПа Bend strength, MPa (psi)	5–8 (725-1160)
Предел прочности при сжатии, МПа Compressive strength, MPa (psi)	40–70 (5,8-10,15)
Удельная прочность, МПа Specific strength, MPa (psi)	40–45 (5,8-6,53)
Коэффициент трещиностойкости	0,1–0,12
Коэффициент трещиностойкости по методу МИИТ	0,27–0,42
Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa (106 psi)	9,5–15,2 (1,38-2,2)
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,13–0,15
Водопоглощение по массе, % Water absorption, by weight %	1
Коэффициент водостойкости Water resistance	0,95
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) Heat-conduction coefficient, W/(m·°C)	0,48–0,7
Коэффициент температуропроводности, 10–7 м <sup>2</sup> /с Temperature conductivity coefficient, 10-7 m <sup>2</sup> /s	3,43–4,04
Удельная теплоемкость (при T=25°C), кДж/(кг·К) Specific heat capacity T=25°C, kJ/(kg·°C)	1,08–1,17
Морозостойкость Freeze-thaw resistance	F300

tics (compared with traditional heavy concrete) [19, 20]. The main properties of the developed nanomodified high-strength lightweight concretes are presented in table.

Analysis of technical and economical efficiency by generalized criterion of quality [21] shows that the using of nanomodification technology for lightweight concrete increases the physical and technical properties. Economical efficiency of building is increased up to 30–35%. This is due to the saving resources (consumption reduction of concrete and metal fittings), reducing cost to transport, mounting and insulating, improving the rational use of lands, etc.

Technology of high-strength lightweight concrete expands the scope of application of lightweight concretes. The developed material can be used for construction of high-rise and special building.

#### References

1. Ming K.Y., Hilmi B.M., Bee C.A., Ming C.Y. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete // *Materials & Design*. 2014. Vol. 54. Pp. 702–707.
2. Bogas J.A., Gomes A. Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction // *Materials & Design*. 2013. Vol. 46. Pp. 832–84.

3. Орешкин Д.В., Беляев К.В., Семенов В.С., Кретова У.Е. Полые микросферы – эффективный наполнитель в строительные и тампонажные растворы // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. №9. С. 50–51.
4. McBride S.P., Shukla A., Bose A. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres // *Journal of materials science*. 2002. Vol. 37. P. 4217–4225.
5. Баженов Ю.М., Королев Е.В. Нанотехнология и наномодифицирование в строительном материаловедении. Зарубежный и отечественный опыт // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2007. № 2. С. 17–22.
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. №10. С. 80–83.
7. Королев Е.В., Гришина А.Н. Синтез и исследование наноразмерной добавки для повышения устойчивости пен на синтетических пенообразователях для пенобетонов // *Строительные материалы*. 2013. №2. С. 30–33.
8. Korolev E.V., Inozemtcev A.S. Preparation and research of the high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 746. P. 285–288.
9. Тейлор Х. Химия цемента, М.: Мир. 1996. 560 с.
10. Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 527 с.
11. Lucia F.-C., Torrens-Martin D., Morales L.M., Sagrario M.-R. Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials, InTech. 2012. 510 p.
12. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры силикатов. М.: Изд-во Московского университета, 1967. 192 с.
13. Лазарева А.Н. Колебательные спектры и строение силикатов. Л.: Наука, 1968. 123 с.
14. Коровкин М.В. Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 80 с.
15. Sagrario M.-R., Lucia F.-C. Raman Spectroscopy: Application to Cementitious Systems // *Construction and Building: Design, Materials, and Techniques. Instituto de Estructura de la Materia (CSIC)*, 2011. P. 233–244.
16. Machovic V., Kolar F., Prochazka P.P., Peskova S., Kuklik P. Raman Spectroscopy Study of Interfacial Transition Zone in Cement Composite Reinforced by PP/PE and Basalt Fibres // *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2006. Vol. 3. Iss. 3. P. 63–67.
17. Peskova S., Machovic V., Prochazka P.P. Raman Spectroscopy Structural Study of Fired Concrete // *Ceramics – Silikaty*. 2011. No 55. P. 410–417.
18. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах // *Вестник Московского Государственного строительного университета*. 2013. № 6. С. 100–108.
19. Баженов Ю.М., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. *Системный анализ в строительном материаловедении: монография*. М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. 152 с.
20. Королев, Е.В. Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2013. №6. С. 60–64.
21. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Экономические предпосылки применения высокопрочных легких бетонов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. №5. С. 198–205.
3. Oreshkin D.V., Belyaev K.V., Semenov V.S., Kretova U.E. Hollow microspheres is effective filler in construction and plugging solutions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010. No 9. Pp. 50–51. (In Russian).
4. McBride S.P., Shukla A., Bose A. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres. *Journal of materials science*. 2002. Vol. 37. Pp. 4217–4225.
5. Bazhenov Yu.M., Korolev E.V. Nanotechnology and nano-modification in building materials. Foreign and domestic experience. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2007. No. 2. Pp. 17–22. (In Russian).
6. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Hollow microspheres is an efficient filler for high-strength lightweight concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. No. 10. Pp. 80–83. (In Russian).
7. Korolev E.V., Grishina A.N. Synthesis and study of nanoscale additive to enhance the foams stability with synthetic blowing agents for foam concrete // *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2013. No. 2. Pp. 30–33. (In Russian).
8. Korolev E.V., Inozemtcev A.S. Preparation and re-search of the high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 746. Pp. 285–288.
9. Teylor Kh. Khimiya tsementa [Chemistry of cement]. M.: Mir. 1996. 560 p. (In Russian).
10. Uendlandt U. Termicheskie metody analiza [Thermal methods of analysis]. M.: Mir. 1978. 527 p. (In Russian).
11. Lucia F.-C., Torrens-Martin B., Morales L.M., Sagrario M.-R. *Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials*, InTech. 2012. 510 p.
12. Plyusnina I.I. Infrared spectra of silicates. M.: *Izd-vo Moskovskogo un-ta*, 1967. 192 p. (In Russian).
13. Lazareva A.N. Vibrational spectra and structure of silicates. L.: *Nauka*, 1968. 123 p. (In Russian).
14. Korovkin M.V. Infrakrasnye spektry silikatov [Infrared spectroscopy of carbonate minerals]. Tomsk: *Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2012. 80 p. (In Russian).
15. Sagrario M.-R., Lucia F.-C. Raman Spectroscopy: Application to Cementitious Systems // *Construction and Building: Design, Materials, and Techniques. Instituto de Estructura de la Materia (CSIC)*. 2011. Pp. 233–244.
16. Machovic V., Kolar F., Prochazka P.P., Peskova S., Kuklik P. Raman Spectroscopy Study of Interfacial Transition Zone in Cement Composite Reinforced by PP/PE and Basalt Fibres // *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2006. Vol. 3. Iss. 3. Pp. 63–67.
17. Peskova S., Machovic V., Prochazka P.P. Raman Spectroscopy Structural Study of Fired Concrete // *Ceramics – Silikaty*. 2011. No. 55. Pp. 410–417.
18. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Peculiar rheological properties of high-strength lightweight concretes having hollow microspheres // *Vestnik MGSU*. 2013. No. 6. Pp. 100–108. (In Russian)
19. Bazhenov Yu.M., Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. *Sistemnyi analiz v stroitel'nom materialovedenii: monografiya [System analysis in building materials: monograph]*. M.: MGSU. 2012. 152 p. (In Russian).
20. Korolev E.V. Principle of implementation nanotechnology in building materials // *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2013. No. 6. Pp. 60–64. (In Russian).
21. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Economic prerequisites for applications of high-strength lightweight concrete // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2012. No. 5. Pp. 198–205. (In Russian).