© Г. А. Зимакова, В. А. Солонина, М. П. Зелиг

УДК 691.32

05.23.05 Строительные материалы
и изделия (технические науки)

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ БЕТОНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК И МЕСТНЫХ СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ

Г. А. Зимакова, В. А. Солонина, М. П. Зелиг
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

HIGH-PERFORMANCE CONCRETE WITH COMPLEX ADDITIVES AND LOCAL RAW MATERIALS

Galina A. Zimakova, Valentina A. Solonina, Marina P. Zelig
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. В настоящей статье отражены особенности современных бетонов, показаны перспективы развития. Приведены экспериментальные данные по получению бетонов прочностью до 70 МПа, отличающиеся тем, что наряду с добавками химической природы в них применены местные алевропелитовые породы ишимской свиты юга Тюменской области. В статье анализируются физико-механические свойства цемента и бетона и делается вывод, что комплекс модифицирующих компонентов позволяет, не увеличивая расход цемента, обеспечить повышение механических характеристик бетона на 30-40 %.

Ключевые слова: высокоэффективные бетоны, тонкодисперсный минеральный компонент, алевропелитовая порода, дисперсность, цементные композиты

Abstract. This article presents the features of modern concrete, shows the development prospects. Experimental data of concrete production with a strength of up to 70 MPa are presented, characterized in that along with chemical additives local aleuropelite rocks of the Ishim suite in the south of the Tyumen region are used. The physical and mechanical properties of cement and concrete are analyzed in the article and conclude that the complex of modifying components allows without increasing the cement consumption to increase the mechanical characteristics of concrete by 30-40 %.

Key words: high-performance concrete, finely dispersed mineral component, aleuropelite rock, dispersion, cement composites

Введение

В 21 веке строительное материаловедение как прикладная наука при решении химико-технологических задач регулирования структуры, процессов и свойств вяжущих материалов и бетонов на их основе, керамических и силикатных материалов, композитов на основе полимеров и других искусственных конгломератов использует целый арсенал исследовательских средств и методов фундаментальных наук. В результате на основе системно-структурного анализа созданы материалы, обладающие рядом уникальных

свойств, общим достижением, объединяющим все разработки, является получение и внедрение в практику материалов, изделий и конструкций повышенной долговечности и высокой несущей способности для строительных систем зданий и сооружений. Успехи в развитии нанотехнологий, называемых «молекулярной нанотехнологией», представлены новыми и беспрецедентными данными о цементах, бетонах и защитно-декоративных покрытиях, причем некоторые из них ставят в тупик традиционное мышление [1, 2]. Приемы манипулирования структурой на наномасштабном уровне позволили создать многофункциональные вяжущие и бетоны с высокими механическими характеристиками и такими свойствами, как низкое удельное электросопротивление, сенсорная способность, самозалечивание, высокая пластичность и самоконтроль трещин, способность к самоочищению [3–6].

Словарь терминов и понятий по бетонам достаточно ограничен, так, согласно ГОСТ 25192-2012, высокофункциональными называют бетоны, соответствующие специальным требованиям к функциональности, которые не могут быть достигнуты путем использования традиционных компонентов, методов смешивания, укладки, ухода и твердения. Американский институт бетона определяет высокоэффективный бетон так – отвечает особым требованиям к эксплуатационным характеристикам и однородности, которые не всегда могут быть достигнуты обычным способом с использованием только традиционных материалов и методов смешивания, укладки и твердения. Классификация высокоэффективных бетонов, связанная с прочностью, такова:

Compressive strength (MPa)	50	75	100	125	150
High-performance class	I	II	III	IV	V

Для определения вида цементов, бетонов и других строительных материалов, наделенных функциональностью, используют дополнительные термины: «умные» или «smart materials», «сверхэффективные», «нанобетон» и другие. В ряде случаев идет заимствование терминов, иногда исследователи употребляют понятия, наполняя их собственным содержанием. Отличительными чертами «умных» материалов являются их дополнительные функциональные возможности, которые выходят за пределы свойств, определяющихся структурой материала [7].

Бетоны нового поколения со значительным набором функций в российской и международной практике обозначают: high-performance concrete (высокофункциональные бетоны); smart materials concrete («умные» бетоны); self-regulated concrete (саморегулируемые бетоны); self compacting concrete (самоуплотняющиеся бетоны), self healing concrete (самозалечивающиеся бетоны); self cleaning concrete (самоочищающиеся бетоны); self sensing concrete (самодиагностирующиеся бетоны).

Из ряда высокофункциональных следует выделить самоочищающиеся бетоны и покрытия, их применение крайне актуально при производстве работ по сохранению объектов исторического наследия [8], а также зданий и сооружений, определяющих архитектурный облик города. В качестве примера рассмотрим бетон, содержащий нано-TiO_2, действие которого заключается в инициации фотокаталитической деструкции целого ряда загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах транспортных средств и предприятий, т.е. за счет ряда фотокатолитических процессов происходит окисление целого ряда вредных соединений, и материалы, содержащие фотокатализатор, сохраняют свой первоначальный цвет. Опыт применения TX Arca цементов фирмы Italcementi Group, при производстве которых вводится нано-TiO_2, в европейской практике показал, что кроме очистки поверхности наблюдается эффект некоторого повышения прочности цемента, следовательно, такие поверхности менее подвержены разрушению под влиянием окружающей среды.

В настоящее время успехи в области строительных наноматериалов и нанобетонов не являются системными [6, 9], применение нанотехнологий в промышленных масштабах ограничено и в основном связано с производством продукции особого назначения. Прогресс, достигнутый в области минеральных вяжущих веществ [10, 11], более значим, это касается знаний по физико-хи-

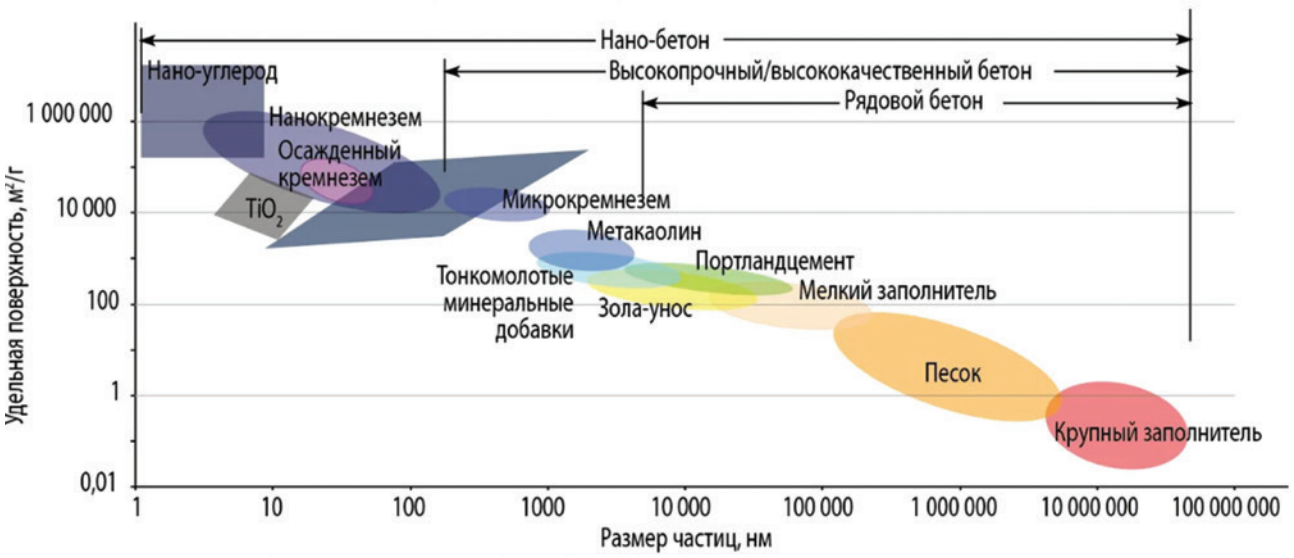


Рис. 1. Размер частиц и удельная поверхность компонентов бетона [11]

мическим процессам и механизмам разрушения. Доказано, что относительно низкие дозировки нанодобавок (менее 1 мас. %) достаточны для двух-трехкратного улучшения свойств нанокомпозитов, однако коммерциализация нанотехнологий зависит от возможности производства нанодобавок в достаточных объемах и с приемлемой себестоимостью.

Использование высокофункциональных бетонов в традиционном строительстве также ограничено за счет высоких технологических требований, предъявляемых к материалам, конструированию состава, приготовлению, укладке, уплотнению смеси и уходу за твердеющим бетоном. Однако они незаменимы, если требуется обеспечить повышенные эксплуатационно-технические характеристики, например, при возведении высотных зданий, перекрытий большепролетных зданий, туннелей, мостов, для устройства дорожных покрытий и т.д. [12]. Уровень развития строительной науки и техники как в российской, так и международной практике демонстрируется именно на объектах и сооружениях, возведенных с применением высокофункциональных бетонов.

В стратегии производства современных бетонов и конструкций на их основе следует применить достижения в области бетоноведения для получения бетонов, востребованных в массовом строительстве (классов В30-50). При выборе минерального сырья и добавок необходимо обратить внимание на технико-экономические показатели, т.е. совершенствование технических характеристик бетонов должно отражать решение полного комплекса технико-экономических показателей при строительстве и эксплуатации объектов. В настоящее время составы бетонных и растворных смесей разрабатываются с применением 6-8 компонентов. Дополнительно вводятся добавки химической и минеральной природы [13–16], при этом размерность минеральных компонентов лежит в области менее 100 мкм для высокопрочных бетонов (рис. 1).

Однако повышение количества компонентов требует решения целого ряда организационно-технических вопросов и, безусловно, приводит к удорожанию бетона. Для получения микроразмерных порошков необходимо производить помол минеральных (кварцевый песок, цеолитсодержащие породы, известняк) или техногенных (шлаки, золы) материалов. Общеизвестно, что помол является высокозатратной технологической операцией.

В данной статье рассматриваются вопросы получения бетонов с применением низких дозировок модифицирующих добавок и нетра-

диционного природного минерального сырья размерностью от 5 до 35 мкм, месторождения которого расположены на юге Тюменской области.

Материалы и методы исследования

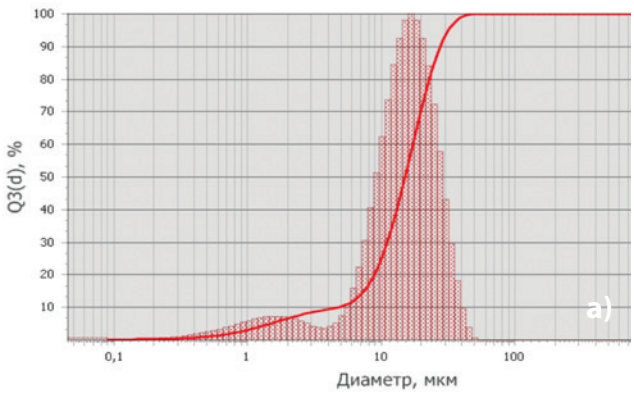
Исследования выполнены с применением портландцемента ЦЕМ I 42,5 ОАО «Сухоложскцемент», суперпластификатора на базе нового поколения поликарбоксилатных эфиров – HeroCrete C, гидрофобизатора – триэтаноламина (ТЭА), компонента пуццоланового действия – аморфного кремнезема (АК), алевропелитовой породы (АПП) ишимской свиты юга Тюменской области. Залежи данной породы диагностируются в больших объемах, месторождения представляют единую свиту мощностью до 20 м.

Исследования проведены с применением комплекса физико-химических методов с последовательным изучением образцов на различных масштабных уровнях. Химический состав основных гидратных образований установлен методом рентгеновского анализа. При исследовании цементных паст реологические свойства поддерживались на постоянном уровне. Влияние компонентов оценивалось по изменению водопотребности. Для характеристик плотности и прочности в различные сроки твердения использовались стандартные методики.

Результаты

По данным химического анализа установлено, что основными компонентами алевропелитовой породы являются SiO_2 (71,4-81,0 %) и Al_2O_3 (11,3-14,8 %). Содержание Na_2O, K_2O, Fe_2O_3, MgO – от 1 до 3 %, Cl^- находится ниже предела определения. По результатам рентгенофазового анализа установлено, что преобладающими минералами породы являются кварц, натриево-калиевые полевые шпаты. Основную массу породы составляют частицы до 50 мкм, содержание зерен размером до 15 мкм – 40,0 %, до 30 мкм – 88,0 % (рис. 2 а). Зерна в основном имеют окатанную форму (рис. 2 б). В естественном залегании влажность породы не превышает 3-5 %.

Аморфный кремнезем – продукт химического синтеза, апробирован в дозировках 0,5-1,5 % в соответствии с установленным индексом пуццолановой активности (табл. 1).



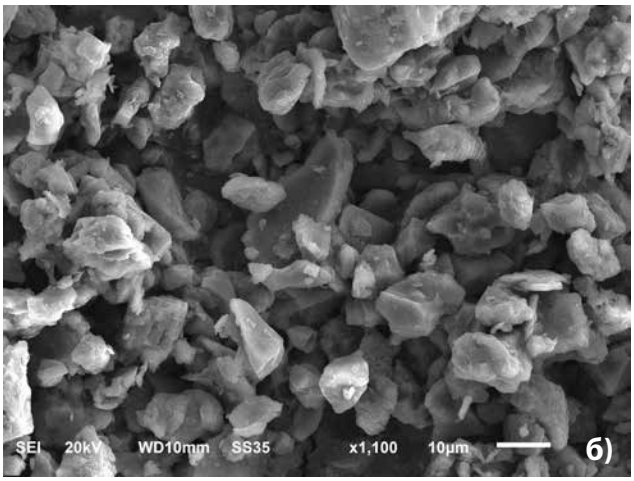


Рис. 2. Гранулометрический состав (а) и форма зерен (б) алевропелитовой породы

Таблица 1

Рецептура составов цементных паст

№ состава	Минеральный компонент, %		В/Ц, %
	АПП	АК	
1	–	–	25
2	15	–	30
3	20	–	31
4	25	–	31
5	–	0,5	23
6	–	1,0	23
7	–	1,5	24
8	20	0,5	26

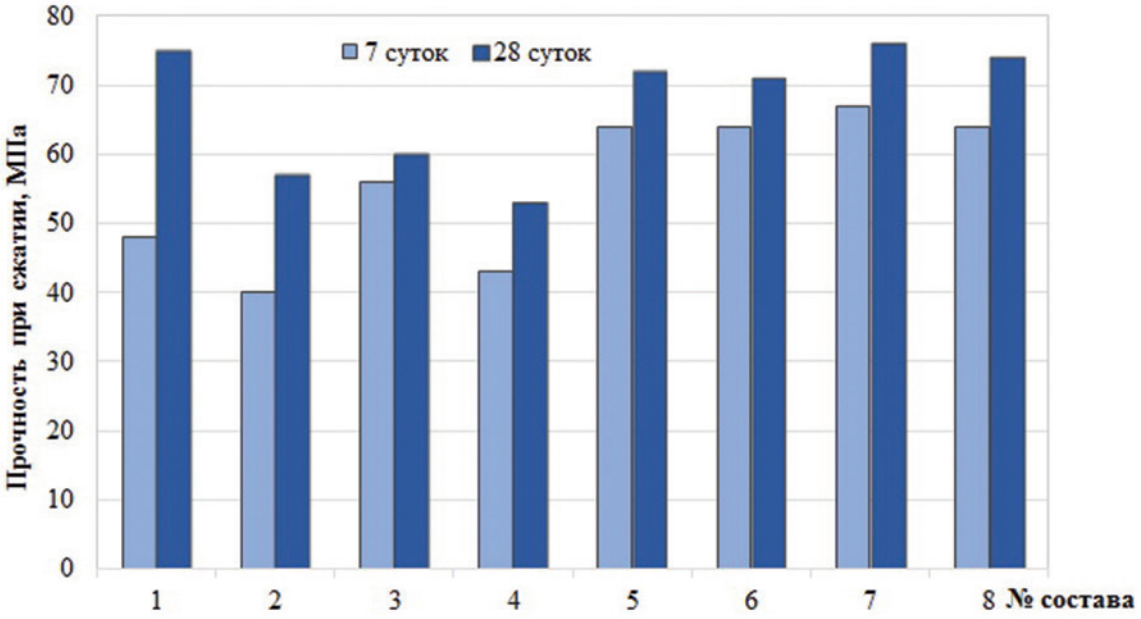


Рис. 3. Прочность цементного камня

Таблица 2

Составы бетонной смеси

№ состава	Ц, %	В/Ц, %	АПП, %	АК, %
1	100	0,5	–	–
2	80	0,53	20	–
3	100	0,51	–	0,5
4	80	0,55	20	0,5
5*	80	0,36	20	0,5

*Примечание: * в состав бетонной смеси введена пластифицирующая добавка и ТЭА*

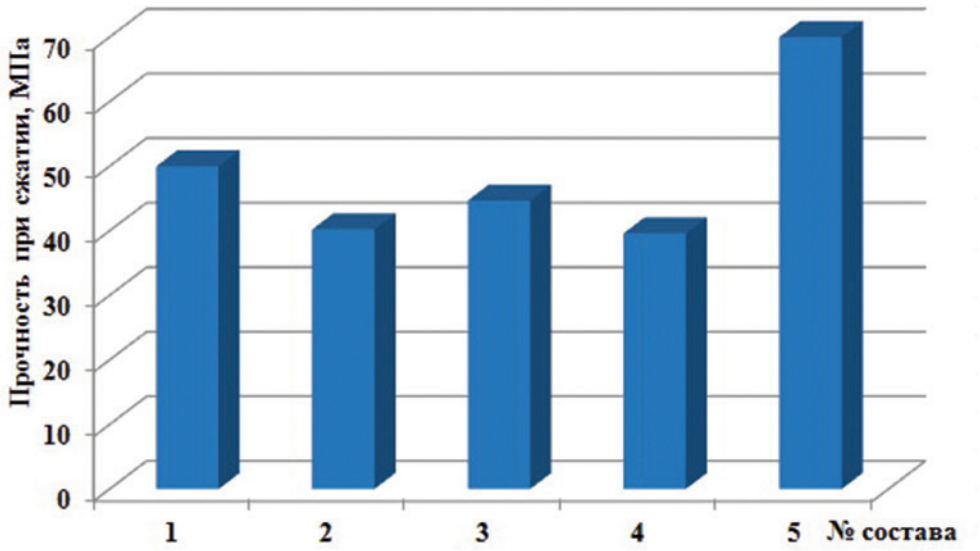


Рис. 4. Прочностные показатели бетона

При совместном введении алевропелитовой породы (20 %) и аморфного кремнезема (0,5 %) возможно обеспечить замену части портландцемента без снижения прочностных показателей цементного камня (рис. 3).

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что основными структурообразующими гидратами являются гидросиликаты ксонотлито-тоберморитового ряда.

Установленное соотношение тонкодисперсных минеральных компонентов было апробировано в составах бетонной смеси (табл. 2).

Для оптимизации структуры бетона и реотехнологических свойств бетонной смеси в исследовании использован крупный заполнитель – гранитный щебень с размером зерен 5-7,5-10 мм. Доля песка (заполнитель бетона) в общем объеме заполнителей в исследуемых составах составляла 0,33-0,35. Прочность при сжатии бетонных образцов определялась в возрасте 28 суток (рис. 4).

Для определения водонепроницаемости и прочности были изготовлены образцы-цилиндры и испытаны в возрасте 180 суток. Марка по водонепроницаемости была установлена методом воздухопроницаемости на приборе Агама. Прочность при растяжении образцов была определена методом раскалывания, и был получен класс бетона на растяжение Bt14 (рис. 5).

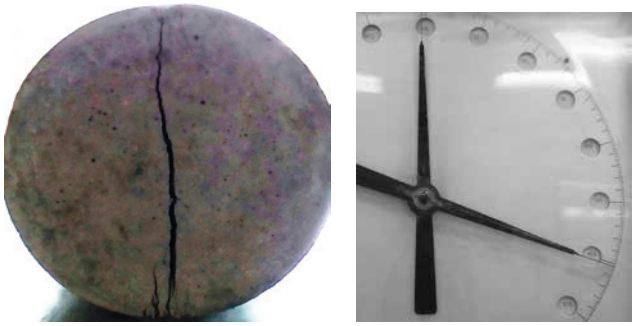


Рис. 5. Испытание цилиндра методом раскалывания

При рассмотрении механизмов повышения прочности наполненных цементных систем особое внимание было уделено изучению процессов структурообразования, обеспечивающих в конечном итоге прочность твердеющих композитов. Выявлено, что основная масса гидросиликатных фаз представлена пластинчатыми, игольчатыми и волокнистыми новообразованиями, которые образуют радиально-лучистые, параллельно-волокнистые срастания. Внутрифазовая перекристаллизация этих фаз протекает медленно вследствие сравнительно низкой дисперсности первично образующихся кристаллов в низкоосновных гидросиликатах. Структура бетона и морфологические особенности гидратных фаз способствовали повышению прочности бетонного композита на растяжение, достигнутые значения прочности на растяжение при разрыве составили 14-16 МПа.

Изменение поровой структуры с переходом в условно замкнутую связано с рядом физико-химических процессов, протекающих с участием аморфного кремнезема с высоким индексом пуццолановой активности, пониженным до В/Ц=0,34 водосодержанием системы, за счет применения эффективной пластифицирующей добавки, полнотой гидратационных процессов и оптимальной плотности бетона. Управление структурой бетона позволило повысить водонепроницаемость до значений, отвечающих марке W18. Апробация введения ТЭА в состав бетонной смеси в дозировках 0.01-0.02 мас. % показала, что можно снизить капиллярные процессы при контакте бетона с водой и другими жидкими средами, толщина смачиваемого бетона составила 2-3 мм.

Выводы

При применении тонкодисперсных минеральных добавок кварц-полевошпатовой природы, залегающих в форме алевропелитов и в сочетании с суперпластификатором, пуццолановой добавкой и гидрофобизатором можно достичь синергетического эффекта за счет физико-химических процессов взаимодействия и получения фрактальных структур композитов повышенной прочности как при сжатии, так и при растяжении.

Сочетание пластифицирующего, гидрофобного и уплотняющего эффектов позволило повысить водонепроницаемость до высоких пороговых значений W18. Рациональность использования природных сырьевых материалов заключается в том, что в данном случае не требуется специальная технология подготовки и получения материалов ультрадисперсного диапазона.

Библиографический список

1. Influence of nano-SiO_2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume / Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, C. Rongshen. – DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.09.001. – Direct text // Construct Build Mater. – 2007. – № 21(3). – P. 539–545.
2. Баженов, Ю. М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю. М. Баженов, Е. М. Чернышов, Д. Н. Коротких. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2014. – № 3. – С. 6–14.
3. A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO2 and silica fume / Y. Qing, Z. Zenan, S. Li, C. Rongshen. – Direct text // Wuhan Univ Technol – Mater Sci Ed. – 2006. – № 21(3). – P. 153–157. – Available at : https://doi.org/10.1007/BF02840907.
4. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite / Z. Li, H. Wang, S. He [et al.]. – DOI 10.1016/j.matlet.2005.08.061. – Direct text // Mater Lett – 2006. – № 60(3). – P. 356–359.
5. Scrivener, K. L. Innovation in use and research on cementitious material / K. L. Scrivener, R. J. Kirkpatrick. – Direct text // Cement Concrete Research. – 2008. – № 38(2). P. 128–136. – Available at : https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025.
6. Калашников, В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов / В. И. Калашников. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2016. – № 1–2. – С. 96–103.
7. Кокцинская, Е. М. «Умные» материалы и их применение (обзор) / Е. М. Кокцинская. – Текст : непосредственный // Видеонаука. – 2016. – №1(1). – С. 3–19.
8. TiO_2 nanocoatings for architectural heritage: Self-cleaning treatments on historical stone surfaces / G. B. Goffredo, E. Quagliarini, F. Bondioli, P. Munafo. – Direct text // Journal of Nanoengineering and Nanosystems.–2014.–Vol.228.–№1.–P.2–10.–Available at : https://doi.org/10.1177/1740349913506421.
9. Санчез, Ф. Нанотехнологии в производстве бетонов / Ф. Санчез, К. Соболев. – Текст : непосредственный // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 3. – С. 262–281.
10. Яглов, В. Н. Наночастицы в бетоне / В. Н. Яглов, Г. А. Бурак, А. А. Меженцев – Текст : непосредственный // Строительная наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 21–30.
11. Соболев, К. Современные достижения нанотехнологии в области цемента и бетона / К. Соболев. – Текст : непосредственный // Цемент и его применение. – 2016. – № 4. – С. 96–100.
12. Кирсанова, А. А. Высокофункциональные тяжелые бетоны нормального твердения / А. А. Кирсанова, Л. Я. Крамар, А. А. Рузавин. – Текст : непосредственный // Архитектура, градостроительство и дизайн. – 2017. – № 15.– С. 32–38.
13. Роль дисперсных наполнителей в бетонах нового поколения / В. И. Калашников, О. В. Суздальцев, Г. П. Дрянин, Г. П. Сехпосян. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 7. – С. 11–21.
14. Каприелов, С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С. С. Каприелов. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1995. – № 4. – С. 16–20.
15. Zimakova, G. A. Strengthening of concrete composites using polycarboxylate and aluminosilicate materials / G. A. Zimakova, E. A. Kasper, O. S. Bochkareva. – Direct text // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Т. 1116. – P. 316–328. – Available at : https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_31.
16. Толстой, А. Д. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья / А. Д. Толстой, В. С. Лесовик, К. Ю. Новиков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2016. – № 2. – С. 174–180.

References

1. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., & Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO_2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. Construct Build Mater, 21(3), pp. 539-545. (In English). DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.09.001
2. Bazhenov, Yu. M., Chernishov, E. M., & Korotkikh, D. N. (2014). Structure design of modern concrete: key principles and technological basis. Stroitel'nye Materialy (Construction Materials), (3), pp. 6-14. (In Russian).
3. Qing, Y., Zenan, Z., Li, S., & Rongshen, C. (2006). A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO2 and silica fume. Wuhan Univ Technol – Mater Sci Ed, 21(3), pp. 153-157. (In English). Available at: https://doi.org/10.1007/BF02840907
4. Li, Z. Wang, H., He, S., Lu, Y., & Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. Mater Lett, 60(3), pp. 356-359. (In English). DOI: 10.1016/j.matlet.2005.08.061
5. Scrivener, K. L. & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. Cem Concr Res, 38(2), pp. 128-136. (In English). Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025
6. Kalashnikov, V .A. (2016). Evolution of development of concretes compositions and change in concrete strength. concretes of present and future. Part 1. Change in compositions and strength of concretes. Stroitel'nye Materialy (Construction Materials), (1-2), pp. 96-103. (In Russian).
7. Koktsinskaya, E. M. (2016). Smart materials and its application. Videonauka,1(1), pp. 3-19. (In Russian).
8. Goffredo, G. B, Quagliarini, E., Bondioli, F., & Munafo, P. (2014). TiO2 nanocoatings for architectural heritage: Self-cleaning treatments on historical stone surfaces. Journal of Nanoengineering and Nanosystems, 228 (1), pp. 2-10. (In English). Available at: https://doi.org/10.1177/1740349913506421
9. Sanchez, F., & Sobolev, K. (2013). Nanotekhnologii v proizvodstve betonov. Obzor. Vestnik of Tomsk state university of architecture and building, (3), pp. 262-281. (In Russian).
10. Yaglov, V. N., Burak, G. A., & Mezgentsev, A. A. (2012). Nanoparticles in a concrete. Stroitel"naya nauka i tekhnika, (1), pp. 21-30. (In Russian).
11. Sobolev, K. (2016). Modern developments in nanotechnology and nanoengineering of cement and concrete. Cement and its application, (4), pp. 96-100. (In Russian).
12. Kirsanova, A. A., Kramar, L. Ya., & Ruzavin, A. A. (2017). High-functional heavy concrete normal solids. Architecture, urbanism & design, (15), pp. 32-38. (In Russian).
13. Kalashnikov, V. I., Suzdaltsev, O. V., Dryanin, R. A., & Sekhposyan, G. P. (2014). The role of dispersed and fine-grained filler in concrete of new generation. News of higher educational institutions. Construction, (7), pp. 11-21. (In Russian).
14. Kaprielov, S. S. (1995). Obshchie zakonomernosti formirovaniya struktury tsementnogo kamnya i betona s dobavkoy ul'tradispersnykh materialov. Beton i zhelezobeton, (4), pp. 16-20. (In Russian).
15. Zimakova, G. A., Kasper, E. A., & Bochkareva, O. S. (2019). Strengthening of concrete composites using polycarboxylate and aluminosilicate materials. Advances in Intelligent Systems and Computing, (1116), pp. 316-328. (In English). Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_31
16. Tolstoi, A. D., Lesovik, V. S., & Novikov, K. Iu. (2016). High endurance concretes on composite bindings with the use of man-made raw materials. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost, (2), pp. 174-180. (In Russian).

Сведения об авторах

Зимакова Галина Александровна, к. т. н., доцент, заведующая кафедрой строительных материалов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: zimakovaga@tyuiu.ru

Солонина Валентина Анатольевна, к. т. н., доцент кафедры строительных материалов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: soloninava@tyuiu.ru

Зелиг Марина Петровна, старший преподаватель кафедры строительных материалов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: zeligmp@tyuiu.ru

Information about the authors

Galina A. Zimakova, Candidate of Engineering, Associate Professor, Head at the Department of Building Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: zimakovaga@tyuiu.ru

Valentina A. Solonina, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Building Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: soloninava@tyuiu.ru

Marina P. Zelig, Senior Lecturer at the Department of Building Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: zeligmp@tyuiu.ru

Для цитирования: Зимакова, Г. А. Высокоэффективные бетоны с применением комплексных добавок и местных сырьевых ресурсов / Г. А. Зимакова, В. А. Солонина, М. П. Зелиг. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 1. – С. 38–46.

For citation: Zimakova, G. A., Solonina, V. A., & Zelig, M. P. (2021). High-performance concrete with complex additives and local raw materials. Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, construction, transport], (1), pp. 38-46. (In Russian).