УДК 691.5 + 624.1

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ ФИБРОНАБРЫЗГБЕТОНА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

И.Я. Харченко, А.И. Харченко, В.А. Алексеев*, Д.А. Баженов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

**ООО «Горгеострой», 115114, Москва, ул. Летниковская, д. 11/10, стр. 1, эт. 5, ком. 21*

Аннотация. Рассмотрены перспективы использования расширяющихся цементов для дисперсно-армированных набрызгбетонов, используемых при возведении подземных конструкций метрополитена. Описаны основные факторы, влияющие на расширение материала после затворения водой. Изучено влияние расширяющихся компонентов на значения прочностных показателей и объемных деформаций набрызгбетона. Обобщен опыт использования фибронабрызгбетона на основе вяжущих имеющих структурное расширение. Доказано повышение технологических, физико-механических и эксплуатационных характеристик полученного набрызгбетона.

Ключевые слова: расширяющийся цемент, структурообразование цементного камня, набрызгбетон, микронаполнитель, торкретирование

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.334-340

APPLICATION OF HIGH-EXPANSION CEMENT FOR FIBER-SHOTCRETING IN CONSTRUCTION OF SUBSURFACE FACILITIES

I.Ya. Kharchenko, A.I. Kharchenko, V.A. Alexeev*, D.A. Bazhenov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation;*

**ООО Gorgeostroy, 11/10-21 Letnikovskaya st., Moscow, 115114, Russian Federation*

Abstract. Prospects for the use of high-expansion cement for fiber fibrous concrete used in the construction of subsurface facilities of the subway are considered. The main factors affecting the expansion of the material after mixing with water are described. The effect of expansion agents on the values of strength indicators and cubic deformation of shotcreting was studied. The experience of using of fiber-shotcreting on the basis of cementitious additive with structural expansion is generalized. The increase of technological, physical-mechanical and operational characteristics of the obtained fiber-shotcreting is proved.

Key words: high-expansion cement, structure formation of cement stone, fiber-shotcreting, micro-filler material, concrete spraying

При строительстве подземных сооружений из сборного или монолитного железобетона важным критерием оценки их качества является трещиностойкость конструкций. Известным способом повышения трещиностойкости железобетонных конструкций является предварительное натяжение арматуры. Однако при строительстве подземных сооружений из монолитного железобетона обеспечить предварительное натяжение арматуры традиционными методами не представляется возможным. В этой связи эффективным решением проблемы повышения трещиностойкости железобетонных конструкций является использование расширяющихся цементов, твердение которых сопровождается выделением химической энергии, достаточной для обжатия бетона за счет предварительного натяжения арматуры, раз-

мещающей в теле конструкции [1]. В строительной практике такие конструкции получили название *самонапряженных железобетонных конструкций*, а применяемые для этих целей расширяющиеся цементы получили название *напрягающих цементов* [1, 2].

Существенные технологические преимущества по сравнению с промышленным производством расширяющихся цементов имеет производство цементов непосредственно на строительной площадке или на бетонном заводе посредством смешивания обычного портландцемента с расширяющимися компонентами (РК) при приготовлении бетона или раствора [1]. Этот способ производства расширяющегося бетона является наиболее простым и доступным способом и вызывает во многих странах значительный интерес. При этом все известные расширяющиеся добавки

можно классифицировать в соответствии с химическими реакциями, лежащими в основе развития процесса расширения, а именно на основе образования этtringита, на основе образования гидрооксидов или на основе реакций, развитие которых сопровождается выделением газа, а также возможных комбинаций вышеперечисленных реакций [2, 3].

Сравнительный анализ строительно-технических свойств бетонов на основе расширяющихся цементов с различными видами расширяющихся добавок показал, что путем введения в состав обычных товарных портландцементов РК можно в известных границах управлять кинетикой и величиной расширения, давлением расширения, прочностными и деформативными характеристиками бетонов [4–6].

С целью оценки степени практической пригодности различных расширяющихся добавок для получения самонапряженных железобетонных конструкций были выполнены исследования свойств расширяющихся цементов с расширяющимися добавками на базе оксида кальция СаО различных производителей, а расширяющиеся добавки были изготовлены на основе сульфоалюмината кальция.

При проведении экспериментальных исследований изготавливали образцы размером $70 \times 70 \times 280$ мм из бетонной смеси с соотношением Ц:П = 1:2 при соотношении В/Ц = 0,4.

В качестве вяжущего использовался портландцемент Новороссийского цементного завода активностью 50,9 МПа, с нормальной густотой 24,75 %, истинной плотностью 3100 кг/м^3 и удельной поверхностью $335 \text{ м}^2/\text{кг}$. Крупный заполнитель фракции 5...20 мм был представлен щебнем Коростенского щебзавода с истинной плотностью 2750 кг/м^3 и насыпной плотностью 1450 кг/м^3 . В качестве мелкого заполнителя применялся кварцевый песок Мансуровского карьера с модулем крупности $M_{кр} = 2,07$,

с истинной плотностью 2450 кг/м^3 и насыпной плотностью 1580 кг/м^3 .

На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что свойства расширяющегося бетона на основе однородных расширяющихся добавок с близким химическим и минеральным составом могут изменяться в широком диапазоне. Так, например, в возрасте 28 сут было установлено семикратное различие прочности на сжатие и более чем 20-кратное различие расширения при применении однородных расширяющихся добавок на основе оксида кальция СаО разных производителей, но при одинаковой доле РК в составе композиционного вяжущего (рис. 1). Такие значительные колебания свойств расширяющихся цементов на основе СаО объясняются нестабильными свойствами расширяющихся добавок, так как их качество наряду с другими факторами влияния зависит от их дисперсности, температуры и продолжительности обжига [7–9].

Кроме того, расширяющиеся добавки на основе СаО быстро теряют свою активность при хранении под влиянием естественной влажности воздуха и реакции с углекислым газом (процесс карбонизация), что ведет к потере их химической активности [10–12].

В московском метрополитене при строительстве подземных конструкций активно используются расширяющиеся цементы. Особенно эффективным является применение расширяющихся добавок для компенсации усадки в дисперсно-армированных бетонных конструкциях, в т.ч. создаваемых методом набрызга [13].

Использование расширяющегося вяжущего в бетоне способствует повышению его трещиностойкости, водонепроницаемости и долговечности, повышению прочности при растяжении фибробрызгбетона, получению более плотной структу-

Рис. 1. Расширяющиеся цементы на основе портландцемента 35F с различным содержанием оксида кальция СаО как РК
Fig. 1. High-expansion cement based on 35F portland cement with different content of СаО calcium oxide as an expansion agent

ры цементного камня. Волокна фибры, равномерно распределенные в теле бетона, при этом переходят в напряженное состояние, формируя структурно-обжатую конструкцию, обладающую повышенной несущей способностью и непроницаемостью [14].

При нанесении набрызгбетона на неустойчивые породы и водонасыщенную поверхность особые требования предъявляются к обеспечению заданных проектом сроков схватывания и затвердевания с учетом развития кинетики расширения.

Интенсивный процесс расширения показали все расширяющиеся цементы только в первые три дня гидратации. После этого расширение незначительно увеличивается при последующем твердении в течение 28 дней под водой. В некоторых случаях регистрируется падение прочности на сжатие, что теоретически объясняется разрушением внутренней структуры цементного камня [15].

При хранении в нормальных условиях эффект расширения проявляется только при содержании РК в количестве не менее 10 %, обеспечивая незначительное остаточное расширение после проявления всех усадочных деформаций.

Расширяющиеся цементы с содержанием РК до 5 % при хранении на воздухе в период до 28 дней имеют окончательную величину усадки существенно меньше, чем для обычного портландцемента. Свойства расширяющихся цементов на основе СаО существенно зависят от количества расширяющейся добавки. Поэтому на практике нужно особенно тщательно следить за точным дозированием заданного количества расширяющейся добавки на основе СаО.

При дозировании составных частей расширяющихся цементов следует учитывать возможные потери качества при хранении. Сравнение результатов рентгенофазовых анализов пяти различных РК на

основе сульфоалюмината кальция (продукты из Японии, Англии, Италии и России) показали, что все расширяющиеся добавки содержат в своем составе некоторое количество свободного оксида кальция.

Состав РК включал в себя алюминаты кальция (60...70 %) и сульфат кальция (30...40 %). Алюминат кальция для QK2, QK2, QK3, QK4 состоял из глинозема: CaO (оксид кальция) — 35...45 %; Al_2O_3 — 30...50 %; SiO_2 — 5...15 %; Fe_2O_3 — 0...15 %. РК QK1 и QK5 состояли из сульфоалюминатного шлака: CaO — 20...45 %; Al_2O_3 — 20...55 %; SiO_2 — 5...15 %; SO_3 — 5...15 %; Fe_2O_3 — 5...15 %.

Как показали исследования, свойства расширяющихся цементов с расширяющимися добавками на основе сульфоалюмината кальция зависят как от соотношения масс между портландцементной матрицей и содержанием РК, а также от их активности [16–18].

Анализ результатов исследования свойств расширяющихся цементов и бетонов на их основе, а также продуктов их гидратации, не позволил установить корреляционной зависимости между величиной расширения и количеством образованного этtringита и портландита [6, 8]. Было установлено, что расширяющиеся цементы при гидратации которых образуется большее количество этtringита и гидроксида кальция, показывают меньшую долю расширения, чем цементы с меньшим количеством образовавшегося этtringита (рис. 2).

При этом СаО в значительной мере играет роль «катализатора» процесса образования этtringита и развития процесса расширения, который проявляется при всех исследованных расширяющихся добавках преимущественно в течение первых семи дней гидратации. Анализ кинетики набора прочности показал, что прочность на сжатие интенсивно нарастает после

Рис. 2. Кинетика изменения объема расширяющихся цементов на основе этtringита

Fig. 2. Kinetics of dimensional change of high-expansion cement based on ettringite

затухания процесса расширения в период до 28 дней (рис. 2, 3). Причем конечное значение расширения является существенно более высоким при хранении под водой, чем в нормальных температурно-влажностных условиях, исключающих развитие влажностной усадки.

Несмотря на то, что все расширяющиеся цементы на основе этtringита при хранении в воздушных условиях имеют усадку, она является существенно более низкой, чем у расширяющихся цементов на основе СаО, а прочность на сжатие после 28 дней изменяется в одинаковом интервале.

Рассматривая полученные результаты, в целом можно сделать вывод, что применение расширяющих добавок в сталефибробетоне обеспечит снижение усадочных деформаций с соответствующим увеличением трещиностойкости и долговечности. Снижение усадочных деформаций происходит за счет восприятия фиброй растягивающих напряжений и формирования фиброкаркаса, выполняющего роль механического ограничения деформаций расширения и вызывающего сжимающие напряжения в бетонной матрице, обеспечивая повышение трещиностойкости конструкции в целом. Использование эффекта расширения и компенсации усадки особенно эффективно при строительстве в сложных инженерно-геологических и эксплуатационных условиях [19–21].

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сделать выводы о стабильности свойств расширяющихся цементов с различными добавками на основе сульфoалюмината кальция. При этом управление процессами структурообразования и свойствами расширяющихся цементов и бетонов на

основе сульфoалюминатов кальция обеспечивается не только посредством изменения РК компонентов, но и такими важными факторами, как кинетическое соотношение между процессами затвердевания портландцементной матрицы и образованием этtringита, температурно-влажностными условиями твердения, условиями ограничения деформаций расширения.

Широкие возможности для внедрения расширяющихся цементов и бетонов в практику строительства подземных сооружений открываются при их изготовлении в условиях строительной площадки или приобъектного раствора-бетонного узла. В этом случае расширяющиеся цементы и бетоны могут изготавливаться путем смешения обычных товарных продуктов, например портландцемента, глиноземистого цемента и гипса. Этот тип расширяющихся цементов является наиболее доступным и поэтому вызывает растущий интерес в строительстве [22].

На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что при одинаковых исходных компонентах увеличение объема расширяющихся цементов пропорционально повышению содержания РК в цементе с коэффициентом корреляции 0,83. На свойства расширяющихся цементов, приготавливаемых в условиях строительной площадки, существенное влияние оказывают такие факторы, как минералогический состав и дисперсность портландцемента [22].

Исследования расширяющихся цементов на основе 50 портландцементов из различных цементных заводов показали, что наиболее стабильные и прогнозируемые строительно-технические свойства расширяющихся цементов достигаются при применении

Рис. 3. Кинетика набора прочности расширяющихся цементов при твердении под водой с РК на основе этtringита: QK1 и QK5 — на основе сульфoалюминатного шлака; QK2, QK3 и QK4 — на основе глиноземистого цемента
Fig. 3. Kinetics of gain in strength of high-expansion cement when hardening under water with expansion agent based on ettringite: QK1 and QK5 — based on sulfoaluminate slag; QK2, QK3 and QK4 — based on aluminous cement

портландцементов с содержанием трехкальциевого алюмината C_3A до 5 %. При этом была установлена принципиальная закономерность, в соответствии с которой при повышении дисперсности РК расширение уменьшается, прочность при сжатии и давление расширения, напротив, возрастают.

Кроме того, в результате экспериментальных исследований установлена зависимость между соотношением РК Al_2O_3/SO_3 и величиной расширения. Так, например, при повышении соотношения от 0,5 до 1,5 расширение уменьшается с 2 до 0,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лутвер, С.Л. и др. Производство расширяющегося цемента на строительной площадке через применение расширяющихся добавок // Опыт и перспективы применения расширяющегося бетона в строительстве. М., 1992. С. 4–11.
2. Баженова С.И. Высококачественные бетоны на наномодификаторах техногенного происхождения // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 172–175.
3. Баженова С.И. Получение высококачественного бетона с использованием модификаторов структуры на основе отходов промышленности // Технические науки: проблемы и перспективы : материалы Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, 20–23 марта 2011 г.). СПб. : Реноме, 2011. С. 23–25.
4. Apih T., Lahajnar G., Sepe A. et al. Proton Spin-Lattice Relaxation Study of the Hydration of Self-Stressed Expansive Cement. // Cement and Concrete Research. February 2001. Vol. 31. Issue 2. Pp. 263–269.
5. Odler I., Jawed I. Expansive reactions in concrete // Materials science of concrete II. American Ceramic Society: Westerville, 1991. Pp. 221–248.
6. Chartschenko I.J., Volke K., Stark J. Use of fly ash from brown coal for the production of expensive composites // 10th Intern. Coal Ash Symposium. Orlando, (Florida/USA); January 1993, 6. Pp. 142–154
7. Баженова О.Ю., Баженова С.И., Баженов М.И. Исследования некоторых свойств цемента с тонкодисперсной добавкой // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 96–97.
8. Дятлов А.К., Харченко А.И., Баженов М.И. и др. Композиционное вяжущее для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов // Технологии бетонов. 2013. № 3 (80). С. 40–43.
9. Пат. РФ 2416582 РФ, МПК C04B 28/00, B28C 5/00, C04B 111/20. Способ приготовления бетонной смеси / В.Ф. Коровяков, Л.А. Алимов, С.И. Баженова, В.В. Воронин; патентообл.: ГУП «НИИМосстрой». № 2009145031/03 ; заявл. 07.12.2009 ; опубл. 20.04.2011. Бюл. № 11.
10. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р. Состав, свойства и применение специальных цемента // Технологии бетонов. 2014. № 2 (91). С. 8–11.
11. Титов М.Ю. Бетоны с повышенной прочностью на основе расширяющих добавок // Строительные материалы. 2012. № 2. С. 84–87.
12. Carballosa P., García Calvo J.L., Revuelta D. et al. Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements // Construction and Building Materials. 15 September 2015. Vol. 93. Pp. 223–229.
13. Алексеев В.А., Харченко И.Я., Харченко А.И. и др. Модифицированные бетонные смеси для пространственных конструкций, наносимые методом набрызга // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 48–58.
14. Алексеев В.А., Баженова С.И., Харченко И.Я. и др. Совершенствование качества набрызгбетона для строительства тоннельных и притоннельных сооружений // Жилищное строительство. 2016. № 9. С. 33–36.
15. Несветаев Г.В., Потапова Ю.И. Управление собственными деформациями цементного камня изменением состава и количества расширяющей добавки // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 46–49.
16. Елсуфьева М.С., Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф. Применение расширяющихся добавок в сталефибробетоне // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 60–63.
17. Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф., Елсуфьева М.С. Пути повышения эффективности производства сборных сталефибробетонных изделий // Технологии бетонов. 2016. № 1. С. 34–36.
18. Елсуфьева М.С., Соловьев В.Г. Получение сталефибробетонов с компенсированной усадкой // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. М. : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. С. 160–164.
19. Баженова С.И. Эффективные высококачественные бетоны для суровых климатических условий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 24 с.
20. Ларсен О.А., Баженова С.И. Применение инновационных материалов и технологий для получения высококачественных бетонов // Устойчивость, безопасность и энергосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решений и инженерных системах зданий и сооружений : I Всерос. конф. (г. Москва, 01 октября 2010 г.). М., 2010. С. 65–68.
21. Пшеничный Г.Н. Об особенностях формирования контактной зоны цементных бетонов // Технологии бетонов. 2015. № 9–10. С. 56–60.
22. Сизяков В.М., Сизякова Е.В., Бричкин В.Н. и др. Синтез наноструктурированных гидрокарбоалюминатов кальция и пути их использования в производстве строительных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. № 3. С. 35–39.

Поступила в редакцию в феврале 2017 г.

Об авторах: **Харченко Игорь Яковлевич** — доктор технических наук, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, iharcenko@mail.ru;

Харченко Алексей Игоревич — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Горгеострой», 115114, г. Москва, ул. Летниковская, д. 11/10, стр. 1, эт. 5, ком. 21, gorgestroj@mail.ru;

Алексеев Вячеслав Александрович — заведующий лабораторией кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 634586@mail.ru;

Баженов Дмитрий Александрович — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, bajenov.da@gmail.com.

Для цитирования: Харченко И.Я., Харченко А.И., Алексеев В.А., Баженов Д.А. Применение расширяющихся цементов для фибронабрызгбетона при строительстве подземных сооружений // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 3 (102). С. 334–340. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.334-340

REFERENCES

1. Litver S.L. et al. Proizvodstvo rasshiryayushchegosya tsementa na stroitel'noy ploshchadke cherez primeneniye rasshiryayushchikhsya dobavok [The Production of High-Expansion Cement at the Construction Site Through the Use of Expanding Additives]. *Opyt i perspektivy primeneniya rasshiryayushchegosya betona v stroitel'stve* [Experience and Prospects For the Use of High-Expansion Cement In Construction]. Moscow, 1992, pp. 4–11. (In Russian)
2. Bazhenova S.I. Vysokokachestvennyye betony na nanomodifikatorakh tekhnogenno go proiskhozhdeniya [High-Quality Concretes with Nanomodifiers of Technogenic Origin]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 3–2, pp. 172–175. (In Russian)
3. Bazhenova S.I. Polucheniye vysokokachestvennogo betona s ispol'zovaniyem modifikatorov struktury na osnove otkhodov promyshlennosti [Production of High-Quality Concrete Using Waste-Based Structure Modifiers]. *Tekhnicheskiye nauki: problemy i perspektivy: International Scientific Conference* [Technical Sciences: Problems and Prospects]. Saint-Petersburg, Renome, 2011, pp. 23–25. (In Russian)
4. Aphi T., Lahajnar G., Sepe A. et al. Proton Spin–Lattice Relaxation Study of the Hydration of Self-Stressed Expansive Cement. *Cement and Concrete Research*, 2001, vol. 31, issue 2, pp. 263–269.
5. Odler I., Jawed I. Expansive Reactions in Concrete. *Materials Science of Concrete II*. American Ceramic Society: Westerville, 1991, pp. 221–248.
6. Chartschenko I.J., Volke K., Stark J. Use of Fly Ash from Brown Coal for the Production of Expansive Composite Cements. 10th Intern. Coal Ash Symposium, Orlando, (Florida/USA), January 1993, 6, pp. 142–154.
7. Bazhenova O.Yu., Bazhenova S.I., Bazhenov M.I. Issledovaniya nekotorykh svoystv tsementov s tonkodispersnoy dobavkoy [Studies of Some Properties of Cements with a Finely Dispersed Additive]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2013, no. 10, pp. 96–97. (In Russian)
8. Dyatlov A.K., Kharchenko A.I., Bazhenov M.I. et al. Kompozitsionnoye vyazhushcheye dlya melkozernistykh samouplotnyayushchikhsya betonov [Composite Cementitious Additive for Fine-Grained Self-Compacting Concretes]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technology], 2013, no. 3 (80), pp. 40–43. (In Russian)
9. Russian patent 2416582 МПК C04B 28/00, B28C 5/00, C04B 111/20. Sposob prigotovleniya betonnoy smesi [Method of Preparation of Concrete Mixture] / Korovyakov V.F., Ali-
10. mov L.A., Bazhenova S.I., Voronin V.V. Patent holder: GUP NIIMosstroj. No. 2009145031/03; assertion 07.12.2009; published 20.04.2011, bul. No. 11.
11. Kuznetsova T.V., Krivoborodov Yu.R. Sostav, svoystva i primeneniye spetsial'nykh tsementov [Composition, Properties and Application of Special Cements]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technology], 2014, no. 2 (91), pp. 8–11. (In Russian)
12. Titov M.Yu. Betony s povyshennoy prochnost'yu na osnove rasshiryayushchikh dobavok [Concretes with Increased Strength on the Basis of Expanding Additives]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2012, no. 2, pp. 84–87. (In Russian)
13. Carballosa P., García Calvo J.L., Revuelta D. et al. Influence of Cement and Expansive Additive Types in the Performance of Self-Stressing and Self-Compacting Concretes for Structural Elements. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 93, pp. 223–229.
14. Alexeev V.A., Kharchenko I.Ya., Kharchenko A.I. et al. Modifitsirovannyye betonnyye smesi dlya prostranstvennykh konstruktsey, nanosimyye metodom nabryzga [Modified Concrete Mixtures for Spatial Structures Applied by Spraying]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2016, no. 11, pp. 48–58. (In Russian)
15. Alexeev V.A., Bazhenova S.I., Kharchenko I.Ya. et al. Sovershenstvovaniye kachestva nabryzgbetona dlya stroitel'stva tonnel'nykh i pritonnel'nykh sooruzheniy [Perfection of the Quality of Spattered Concrete for the Construction of Tunnel and Tunnel Structures]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [House Construction], 2016, no. 9, pp. 33–36. (In Russian)
16. Nesvetaev G.V., Potapova Yu.I. Upravleniye sobstvennymi deformatsiyami tsementnogo kamnya izmeneniyem sostava i kolichestva rasshiryayushchey dobavki [Management of Own Deformations of Cement Stone by Changing the Composition and Quantity of the Expanding Additive]. *Nauchnoye obozreniye* [Scientific Review], 2013, no. 11, pp. 46–49. (In Russian)
17. Elzufieva M.S., Soloviev V.G., Buriyanov A.F. Primeniye rasshiryayushchikhsya dobavok v stalefibrobetone [Application of Expanding Additives in Steel-Fiber Concrete]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 8, pp. 60–63. (In Russian)
18. Soloviev V.G., Buriyanov A.F., Elzufieva M.S. Puti povysheniya effektivnosti proizvodstva sbornyykh stalefibrobetonnykh izdeliy [Ways to Improve the Production Efficiency of

Prefabricated Steel Fiber-Reinforced Concrete Products]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technology], 2016, no. 1, pp. 34–36. (In Russian)

18. Elzufieva M.S., Soloviev V.G. Polucheniye stalefibrobetonov s kompensirovannoy usadkoy [Getting Stalefibrobetone with Compensated Shrinkage]. *Aktual'nyye napravleniya fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy : materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual Directions of Fundamental and Applied research : IV International Scientific Conference]. Moscow, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, pp. 160–164. (In Russian)

19. Bazhenova S.I. Effektivnyye vysokokachestvennyye betony dlya surovyykh klimaticheskikh usloviy : avtoreferat dissertatsii ... kandidata tekhnicheskikh nauk [Effective High-Quality Concrete for Severe Climatic Conditions : extended abstract of Cand. Sci. Dissertation], Moscow, 2010. 24 p. (In Russian)

20. Larsen O.A., Bazhenova S.I. Primeneniye innovatsionnykh materialov i tekhnologiy dlya polucheniya vysokokachestvennykh betonov [Application of Innovative Materials and Technologies for Obtaining High-Quality Concretes].

Ustoychivost', bezopasnost' i energosberezheniye v sovremennykh arkhitekturnykh, konstruktivnykh, tekhnologicheskikh resheniy i inzhenernykh sistemakh zdaniy i sooruzheniy [Stability, Safety and Energy Saving in Modern Architectural, Constructive, Technological Solutions and Engineering Systems of Buildings and Structures: I All-Russia Conference]. Moscow, 2010, pp. 65–68. (In Russian)

21. Pshenichniy G.N. Ob osobennostyakh formirovaniya kontaktnoy zony tsementnykh betonov [About the Peculiarities of the Formation of the Contact Zone of Cement Concretes]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technology], 2015, no. 9–10, pp. 56–60. (In Russian)

22. Sizyakov V.M., Sizyakova E.V., Brichkin V.N. et al. Sintez nanostrukturirovannykh gidrokarboaluminatov kal'tsiya i puti ikh ispol'zovaniya v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Synthesis of Nanostructured Calcium Hydrogen Carbonate and Their Use in the Production of Construction Materials]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Proceedings of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2009, no. 3, pp. 35–39. (In Russian)

Received in February, 2017

About the authors: **Kharchenko Igor Yakovlevich** — Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, iharcenko@mail.ru;

Kharchenko Alexey Igorevich — Doctor of Engineering Science, Director General, **ООО Gorgeostroy**, 11/10-21 Letnikovskaya st., Moscow, 115114, Russian Federation, gorgeostroy@mail.ru;

Alexeev Vyacheslav Alexandrovich — laboratory chief of the Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, 634586@mail.ru;

Bazhenov Dmitry Alexandrovich — postgraduate student, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, bajenov.da@gmail.com.

For citation: Kharchenko I.Ya., Kharchenko A.I., Alexeev V.A., Bazhenov D.A. Primeneniye rasshiryayushchikhsya tsementov dlya fibronabryzgbetona pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy [Application of expanding cements for fiber-reinforced concrete in the construction of subsurface facilities]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 3 (102), pp. 334–340. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.334-340