К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона

Е.Г. Величко, Ю.С. Шумилина

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Существенными недостатками высокопрочных бетонов, применяемых в настоящее время, являются высокий абсолютный расход вяжущего вещества, а также низкий удельный расход его на единицу прочности. Многокомпонентность с целью многоуровневой оптимизации дисперсного состава относится к основным методам производства высокопрочных бетонов с минимальным содержанием портландцемента и высокими физико-механическими показателями. Получение таких бетонов может быть связано с созданием плотной высоконаполненной твердой фазы упаковки составляющих компонентов на различных структурных уровнях и низкого водоцементного отношения.

Материалы и методы. Для изучения свойств и структуры бетона использовались две фракции мелкого заполнителя, гранитно-габбровый щебень фракции 5–10 мм, портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н, тонкодисперсный доменный гранулированный шлак, метакраин, микрокремнезем, высокодисперсная фракция цемента, суперпластификатор Glenium 430 и высоковалентный ускоритель твердения. Форма и размер дисперсных частиц компонентов определялись лазерным анализатором, подвижность бетонной смеси по ГОСТ 10181-2014, прочность бетона на сжатие по ГОСТ 10180-2012. Структура цементного камня устанавливалась с помощью термографического и рентгенофазового методов анализа.

Результаты. Прочность бетона с оптимизированным дисперсным составом, суперпластификатором и высоковалентным ускорителем твердения, приготовленного с использованием самоуплотняющихся бетонных смесей, в возрасте 1 сут после твердения в нормальных условиях составила 58, 67, 77, а в 28 сут — 150, 186, 219 МПа при расходе цемента соответственно 650, 710, 770 кг/м³.

Выводы. Многоуровневая дисперсно-гранулометрическая в комплексе с химической модификация состава самоуплотняющихся бетонных смесей представляет собой одно из эффективных направлений исследования и синтеза высокопрочных бетонов с минимальным расходом портландцемента и высокими физико-механическими показателями. Целесообразным является использование нескольких структурных уровней частиц клинкерного компонента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокопрочный бетон, самоуплотняющийся бетон, дисперсный состав, пуццолановая реакция, модификаторы, тонкодисперсный шлак, микрокремнезем, суперпластификатор

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235–243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243

To the problem of forming the high-strength concrete dispersed composition and properties

Evgeniy G. Velichko, Yuliya S. Shumilina

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Significant disadvantages of currently used high-strength concrete are the high absolute consumption of binder as well as its low specific consumption per unit of strength. Including many components with the goal of multi-level optimization of the dispersed composition is one of the main methods for producing high-strength concretes with a minimum content of cement and high physical and mechanical properties. Obtaining such concretes can be connected with creating a dense high-aggregated solid phase of the constituents at various structural levels and low water-to-cement ratio.

Materials and methods. The following components were used to study the properties and structure of the concrete: two fine aggregate fractions, granite-gabbro crushed stone of 5 to 10 mm fraction, portland cement of the CEM I 42.5N class, finely dispersed blast furnace granulated slag, metakaolin, silica fume, high-dispersed cement fraction, Glenium 430 superplasticizer, and high-valent hardening accelerator. The shape and size of the dispersed particles of the components were determined using a laser analyzer, the flowability of the concrete mixture was evaluated as per GOST 10181-2014 standard, while the concrete compressive strength following GOST 10180-2012 standard. The cement stone structure was studied using derivatographic analysis and x-ray phase analysis methods.

Results. For concrete with an optimized dispersed composition, superplasticizer and high-valent hardening accelerator prepared using self-compacting concrete mixtures, the concrete strength at the age of 1 day after hardening was of 58, 67 and

77 MPa and at the age of 28 days after hardening was of 150, 186 and 219 MPa under normal conditions and with cement consumption of 650, 710 and 770 kg/m³, respectively.

Conclusions. Multi-level dispersion and granulometric modification in combination with chemical modification of the composition of self-compacting concrete mixtures is one of the most productive directions of research and synthesis of high-strength concrete with minimum consumption of Portland cement and high physical and mechanical properties. It is advisable to use several structural levels of the clinker component particles.

KEYWORDS: high-strength concrete, self-compacting concrete, dispersed composition, pozzolanic reaction, modifiers, fine slag, silica fume, superplasticizer

FOR CITATION: Velichko E.G., Shumilina Yu.S. To the problem of forming the high-strength concrete dispersed composition and properties. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2):235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Существенными недостатками высокопрочных бетонов, применяемых в настоящее время, являются высокий абсолютный расход вяжущего вещества, а также низкий удельный расход его на единицу прочности.

Многокомпонентность с целью многоуровневой оптимизации дисперсного состава — основное направление производства высокопрочных бетонов с минимальным содержанием портландцемента и высокими физико-механическими показателями. Получение таких бетонов может быть связано с созданием плотной высоконаполненной твердой фазы упаковки составляющих компонентов на различных структурных уровнях и низкого водоцементного отношения. Перспективным направлением для производства высокопрочных бетонов представляется использование самоуплотняющихся бетонных смесей SCC (self-compacting concrete) [1–8]. Однако при производстве самоуплотняющихся бетонов может наблюдаться ряд требований, имеющих противоречивый характер. В частности, обеспечение высокого значения показателя вязкости и низкого — текучести бетонной смеси, исключение ее водоотделения и расслоения, а также достижение высокой прочности. Очевидно, что нерасслаиваемость бетонной смеси и ее качественное самоуплотнение значимы и в основном связаны с вязкостью и предельным напряжением сдвига (текучестью) цементного теста.

Оптимальное сочетание указанных реологических свойств цементного теста облегчает выход из бетонной смеси вовлеченного в процессе приготовления воздуха, и способствует ее качественному уплотнению. Повышение этих характеристик, а также снижение или предотвращение седиментационных и сегрегационных процессов обеспечивается использованием в составе бетона, кроме высокодисперсных и суперводоредуцирующих добавок [8–10], различных видов химических модификаторов,

регулирующих вязкость и текучесть бетонной смеси, а также ускорителей и замедлителей схватывания и твердения [5].

Кроме того, для обеспечения качественного самоуплотнения бетонной смеси применяются также такие технологические приемы, как снижение расхода крупного заполнителя и максимальной крупности его зерен (наиболее предпочтительный размер 5 (3)–10 мм), низкое водовязующее отношение [10]. Эффект максимальной текучести бетонной смеси и ее самоуплотнения достигается в этом случае практически исключением контактных взаимодействий между зернами заполнителей за счет повышенных расхода цемента и доли песка в смеси заполнителей. Однако бетоны с повышенным содержанием цемента характеризуются высоким тепловыделением, значимо увеличивающим кинетическую энергию в начальный период их твердения. По этой причине фиксация частиц гидратных фаз при структурообразовании может происходить в основном в положении дальней коагуляции, обеспечивая при этом ее нежелательные значимо высокую микропористость, дефектность и снижение физико-механических свойств бетона [11–12]. Очевидно, что снижение содержания портландцемента в цементном тесте может быть получено только при частичном замещении его в составе бетона высокодисперсными минеральными добавками (тонкомолотым доменным гранулированным шлаком, золой уноса, микрокремнеземом и др.) [6, 12–18]. Замещение части цемента минеральными добавками различной дисперсности позволит получать цементное тесто с низким предельным напряжением сдвига без седиментации, водоотделения и расслоения, а бетонную смесь с более высокой вязкостью. Важным фактором в этом случае является выбор вида, дисперсности, пуццоланической активности и энергетического состояния минеральных модификаторов, обеспечивающих высокую концентрацию твердой фазы в единице объема [2, 18, 20].

Очевидно, что максимально плотная упаковка частиц и зерен цементной системы достигается путем использования их с оптимальными дисперсностью и содержанием для каждого иерархического структурного уровня, при которых каждая последующая более тонкодисперсная фракция распределяется в основном с максимальным наполнением межчастичных или межзерновых пустот менее дисперсной [2]. Особое значение в самоуплотняющихся бетонных смесях для получения бетона высокой прочности приобретает применение высокодисперсных компонентов нанометрового уровня (углеродные волокна, фуллерены, условно микрокремнезем и др.). Содержание означенных компонентов вследствие высоких дисперсности и энергетического состояния, а также молекулярного отбора при структурообразовании должно быть незначительным, обеспечивающим высокие показатели реологических свойств цементного теста, плотности и прочности бетона. Такое теоретическое положение подтверждается результатами большинства исследователей настоящей проблемы (рис. 1) [20–25]. Например, исследование микроструктуры цементной матрицы мелкозернистого бетона, содержащего углеродные нановолокна в количестве 25 г/м, показало ее очень высокую плотность.

При использовании микрокремнезема в количестве 2,5–3 %, как показали исследования настоящей работы, обычно наблюдается дендрито-подобная структура, также более плотная, чем у контрольного состава. При этом адсорбция поликарбоксилатных суперпластифицирующих добавок в цементных системах, содержащих дисперсный диоксид кремния в составе микрокремнезема, происходит преимущественно на его частицах, значимо увеличивая за счет высокой удельной поверхности суммарные силы отталкивания и пластифицирующую способность при минимальном их расходе.

Кроме того, необходимо отметить, что по условиям возможного протекания щелочной коррозии между щелочами цемента и диоксидом кремния заполнителей использование в SCC кремнийсодержащих минеральных модификаторов (микрокремнезема, доменного гранулированного шлака и др.) или других приемов, подавляющих щелочную коррозию заполнителя и улучшающих их реологические и технологические свойства, являются наиболее предпочтительными, чем известняковой и доломитовой муки, не обладающих свойством ингибирования указанного вида коррозии бетона [24–28].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение свойств и структуры бетона осуществлялось с использованием двух фракций мелкого заполнителя размером 0,315 и 0,16 мм соответственно в количестве 80 и 20 %, с использованием гранитно-габбрового щебня Куликовского месторождения Республики Карелия» фракции 5 (3-10) мм, портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Н с удельной поверхностью 296 м²/кг, тонкодисперсного доменного гранулированного шлака — 453 м²/кг, метакрилатов, микрокремнезема, высокодисперсной фракции цемента. Расход цемента, в том числе многокомпонентного в зависимости от задачи исследований варьировался в интервале 450–800 кг/м³ бетона. В качестве суперпластификатора применялся Glenium 430 (ООО «БАСФ Строительные системы») в количестве 0,45–0,56 % массы цемента и высоко валентный ускоритель твердения АС в количестве 0,007 % в соответствии с правилом Шульце – Гарди [19, 20]. Применялись следующие методы исследований: форма и размер дисперсных частиц компонентов определялись лазерным анализатором, подвижность бетонной смеси по ГОСТ 10181-2014, прочность бетона на сжатие по ГОСТ 10180-2012. Структура

Рис. 1. Микроструктура цементной матрицы мелкозернистого бетона (снимки проф. Г.И. Яковлева): *a* — контрольный состав; *b* — с углеродными нанотрубками (25 г/м³)

Fig. 1. The microstructure of fine concrete cement matrix (pictures by Prof. G.I. Yakovlev): *a* — reference composition; *b* — composition with carbon nanotubes (25 g/m³)

цементного камня изучалась применением термографические и рентгенофазового методов анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование структуры цементного камня с использованием растровой микроскопии с микроанализом показали, что тонкомолотый доменный гранулированный шлак с оптимальными дисперсностью и количеством характеризуется однородным распределением (коэффициент вариации 0,5 %) его частиц в матрице многокомпонентного цементного камня. Такие параметры компонентов первого иерархического уровня микроструктуры обеспечивают высокий уровень наполнения ее твердой фазой, однородное протекание пуццолановой реакции во всех микрообъемах, а также наличие реликтов грубодисперсной фракции частиц клинкера.

Тонкодисперсная фракция клинкерного компонента для многокомпонентного цемента использовалась с дисперсностью 890–900 м²/кг. Функциональная необходимость ее применения заключается в следующем. Во-первых — наполнение второго иерархического уровня с целью повышения концентрации твердой фазы в единице объема. Во-вторых — обеспечение однородного протекания реакции между портландитом и диоксидом кремния во всех микрообъемах цементного теста и камня. Такой механизм действия обеспечивает более однородную структуру распределения гидросиликатных фаз в каждом микрообъеме цементного камня, меньшую его дефектность и высокую прочность бетона. В-третьих — уменьшение степени гидратации частиц грубодисперсной фракции клинкерного компонента, крупные прочные реликты которых внесут значимый вклад в повышение прочности цементного камня и бетона. Тонкодисперсная фракция клинкерного компонента характеризовалась содержанием частиц размером 5–8 мкм и менее в количестве до 11,3–12,5 %, а частиц — 5–30 мкм — до 60 %, практически более чем в 2 раза превышая их содержание в портландцементе промышленного производства.

В начальный период тонкодисперсные частицы клинкера в основном второго иерархического уровня структуры многокомпонентного цемента практически полностью гидратируются и в результате молекулярного отбора распределяются в виде продуктов гидратации вокруг соответствующих им по составу и строению гидратных фаз соседних более крупных частиц. В этот же период наблюдается активизация процесса гидратации минералов шлака. Слой гидросиликатного геля утолщается в наружном направлении от негидратированной поверхности частицы клинкера, поглощая кристаллы этtringита и син-

тезируя таким образом конгломератный тип микроструктуры цементного камня. Гидросульфаталюминаты кальция, являясь примесными включениями, в микроструктуре кальцево-силикатной гидратной фазы способствуют, вследствие их иглового строения и нанометрового размера, повышению ее плотности и прочности. Очевидно, что одновременно их включение в качестве примесной фазы снижает прочность гидросиликатных новообразований цементного камня. Таким образом, вклад гидросульфаталюминатов кальция в прочность структуры цементного камня носит двойственный характер.

Гидроксид кальция, выделяющийся в результате гидратации кальцево-силикатных минералов клинкера, взаимодействует с диоксидом кремния микрокремнезема и других кремнийсодержащих добавок, в основном находящимся в аморфном состоянии, образуя прочные низкоосновные, так называемые, вторичные гидросиликаты кальция. Очевидно, что при этом наблюдается ускорение процесса гидратации минералов клинкера C_3S и C_2S , образующийся в результате пуццолановой реакции продукт при более низкой кинетической энергии частиц гидратных фаз, и названный В. Михаэлисом гидравлит характеризуется более высокой плотностью и прочностью, за счет фиксации обозначенных частиц в основном в положении ближней коагуляции, и меньшего в 1,5–2 раза содержания в них химически связанной воды. При достаточном объеме продуктов гидратации кальцево-силикатных фаз клинкера, шлака и пуццолановой реакции происходит их сращивание в прочную плотную, менее дефектную, относительно однородную мелкодисперсную структуру конгломератного типа с высокой концентрацией твердой фазы и с содержанием в основном поргелиевого размера. Существенный вклад в прочность такой структуры будут вносить реликты частиц клинкера и шлака, а также частицы прочных минеральных добавок при их наличии.

Таким образом, для значимого повышения прочности бетона требуются многоуровневая плотная иерархическая упаковка многокомпонентной системы с высокой степенью упорядоченности дисперсно-гранулометрического состава, обеспечивающая однородное протекание процесса гидратации минералов клинкера или пуццолановой реакции во всех микрообъемах, а также низкое водоцементное отношение. Очевидно, что для обеспечения высокой прочности такой структуры полная гидратация минералов частиц клинкера в этом случае не требуется. Самоуплотняющаяся бетонная смесь с распылом конуса (РК) 87 см, приготовленная с учетом указанных выше положений, характеризуется высокими реологическими свойствами, отсутствием растворо- и водоотделения и расслоения. На

Рис. 2. Самоуплотняющаяся бетонная смесь с РК = 87 см

Fig. 2. Self-compacting concrete mixture with CS = 87 cm

поверхности бетонной смеси наблюдаются равномерно распределенные зерна крупного заполнителя (рис. 2).

Проведенные экспериментальные исследования показали, что оптимальное количество высоко-

дисперсного цемента составляет 6 %, метаксаолина — 3 %, микрокремнезема — 3 %, используемых для замещения эквивалентного количества цемента, а также комплексного химического модификатора, состоящего из Glenium ACE 430 — 3,6–4,3 кг/м³

Табл. 1. Начальные основные составы бетонов (ГОСТ 27006-2019) для определения эффективных параметров использования компонентов

Table 1. The initial basic concrete composition (GOST 27006-2019) to determine the effective component usage parameters

№ п/п / Item No.	Содержание компонентов, кг/м³ / Component content, kg/m³										Прочность бетона на сжатие, МПа, в возрасте, сут / Concrete compressive strength, MPa, at the age of, days		
	Многоуровнево- оптимизированная цементная система / A multi-level optimized cement system					Щебень / Crushed stone	Песок / Sand	Вода / Water	Добавки- модификаторы / Modifying additives				ПК, см / CS, cm
	Цемент / Cement	Шлак / Slag	Тонкокомлоотый многокомпонентный цемент / Fine ground multicomponent cement	Микрокремнезем / Silica fume	Метаксаолин / Metakaolin				ACE 430	AC			
1	800	–	–	–		760	750	162	3,7	0,56	76	54	75
2.1	640	160	–	–	–	760	751	158	3,7	0,56	77	49	79
2.2	624	176	–	–	–	760	755	156	3,7	0,56	78	54	97
2.3	600	200	–	–	–	760	751	158	3,7	0,56	77	46	78
3.1	576	176	48	–	–	760	755	150	3,7	0,56	79	112	155
3.2	552	176	72	–	–	760	750	152	3,7	0,56	78	106	148
3.3	528	176	96	–	–	760	745	154	3,7	0,56	78	102	139
4.1	552	176	48	24	–	760	735	156	3,7	0,56	78	154	209
4.2	528	176	48	48	–	760	724	158	3,7	0,56	78	140	192

и ускорителя твердения АС — 0,07 % (табл. 1). Использование ускорителя твердения обеспечило синергетический эффект применения Glenium 430 и позволило дополнительно редуцировать водосодержание до 20 %.

Установлено также, что оптимизированный и упорядоченный на четырех уровнях самоорганизованный за счет оптимальных геометрических и количественных параметров, а также практически мозаичного энергетического состояния поверхности исходных порошковых компонентов дисперсный многокомпонентный состав обеспечивает снижение межчастичной пустотности на 12–14 % и повышение прочности бетона более чем в 2 раза (до 200 МПа и выше). В частности, прочность бетона на сжатие в возрасте 1 сут после твердения в нормальных условиях составила 58, 67, 77, а в 28 сут — 150, 185, 219 МПа, при расходе цемента соответственно 650, 710 и 770 кг/м³.

Для оценки качества структуры бетона были проведены термографические и рентгенофазовые исследования его образцов в возрасте 28 сут после твердения в нормальных условиях и тепловлажностной обработки.

Структура бетона с минерально-химическими модификаторами, имеющими оптимальные параметры, отличается меньшим содержанием портландита, а степень гидратации портландцемента состав-

ляет 80–85 %, превышая аналогичный показатель для контрольного состава на 23–60 %, подтверждая его более высокую прочность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многоуровневая дисперсно-гранулометрическая в комплексе с химической модификация состава самоуплотняющихся бетонных смесей представляет собой одно из самых эффективных направлений получения высокопрочных бетонов с минимальным абсолютным и удельным на единицу прочности расходом портландцемента и высокими физико-механическими показателями.

ССС в этом случае характеризуются высокой вязкостью при низком уровне предельного напряжения сдвига, а комплексное применение суперпластификаторов и ускорителей твердения — синергетическим эффектом в аспекте пластификации бетонной смеси. Целесообразным является использование разнодисперсной клинкерной составляющей, обеспечивающей повышение концентрации твердой фазы в единице объема, однородное протекание реакций гидратации минералов клинкера и пуццолановой реакции во всех микрообъемах цементной системы, а также наличие прочных крупных размеров реликтов частиц клинкера с целью значимого повышения прочности цементного камня и бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Величко Е.Г., Дыкин И.В., Еремин А.В. Многоуровнево-модифицированные цементные системы // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 111–114.
2. Величко Е.Г., Белякова Ж.С. Физико-химические и методологические основы получения многокомпонентных систем оптимизированного состава // Строительные материалы. 1996. № 3. С. 27–30.
3. Habibi A., Ghomashi J. Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 168. Pp. 113–123. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.113
4. Sonebi M. Medium strength self-compacting concrete with fly ash: Modeling using factorial experimental plans // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34. Issue 7. Pp. 1199–1208. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.022
5. Bazhenova S., Pilipenko A. The concrete-based high performance decorative material for severe climatic conditions // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 03004. DOI: 10.1051/mateconf/201710603004
6. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4–6.
7. Tkach E.V., Semenov V.S., Tkach S.A., Rozovskaya T.A. Highly effective water-repellent concrete with improved physical and technical properties // Procedia Engineering. 2015. Vol. 111. Pp. 763–769. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.143
8. Manohar K.N., Prakash P., Srishaila J.M., Kumar P.W.P. Strength characteristics of glass fiber reinforced self-compacting concrete with fly ash and silica fume // International Journal of Engineering Research & Technology. 2015. Vol. 4. Issue 08. Pp. 142–146. DOI: 10.17577/ijertv4is080036
9. Aslani F. Nanoparticles in self-compacting concrete — a review // Magazine of Concrete Research. 2015. Vol. 67. Issue 20. Pp. 1084–1100. DOI: 10.1680/mac.14.00381

10. Шестернин А.И., Коровкин М.О., Ерошкин Н.А. Основы технологии самоуплотняющихся бетонов // Молодой ученый. 2015. № 6 (86). С. 226–228.
11. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. Сер. Нанотехнология. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 309 с.
12. Тарасеева Н.И., Воскресенский А.В., Тарасеева А.С. Роль безотходных технологий в расширении сырьевой базы для получения эффективных модифицирующих добавок и активных наполнителей в цементные растворы и бетоны // Новый университет. Сер.: Технические науки. 2014. № 10 (32). С. 90–93. DOI: 10.15350/2221-9552.2014.10.0018
13. Калашиников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 20–23.
14. Суздальцев О.В., Калашиников В.И., Мороз М.Н., Сехносян Г.П. Новые высокоэффективные бетоны // Новый университет. Сер.: Технические науки. 2014. № 7–8 (29–30). С. 44–47. DOI: 10.15350/2221-9552.2014.7-8.0008
15. Чиорино М.А., Фаликман В.Р. Долговечность и устойчивое развитие конструкционного бетона в поле зрения научного сообщества // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 24–26.
16. Шестернин А.И. Свойства тонкого наполнителя для бетона из лома железобетонных конструкций // Актуальные вопросы строительства : мат. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. 2008. Саранск : Изд-во Мордовского университета, С. 238–242.
17. Anderson G., Iqbal M.M., Astira I.F. The effect of substitution and admixture materials on Self-Compacting Concrete (SCC) characteristics // International Journal of Scientific & Technology Research. 2018. Vol. 7. Issue 5. Pp. 28–33.
18. Исаева Ю.В., Величко Е.Г., Касумов А.Ш. Оптимизация структуры сверхлегкого цементного раствора с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 84–87.
19. Яковлев Г.И., Федорова Г.Д., Полянских И.С. Высокопрочный бетон с дисперсными добавками // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 35–42.
20. Mujkanović A., Jovanović M., Bečirhodžić D., Karić A. Self-compacting concrete — a sustainable construction material // The 5th International Conference on Environmental and Material Flow Management «EMFM 2015». 2015. 6 p.
21. Королев Е.В. Технико-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 85–89.
22. Geiker M. Self-compacting concrete (SCC) // Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. 2008. Pp. 187–207. DOI: 10.1533/9781845694685.187
23. Ponikiewski T., Golaszewski J. Influence of fibres on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete // Brittle Matrix Composites 10. 2012. Pp. 187–197. DOI: 10.1533/9780857099891.187
24. Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Любарская Г.В., Розенталь А.Н. Защита бетона на реакционноспособном заполнителе от внутренней коррозии соединениями лития // Строительные материалы. 2009. № 3. С. 68–71.
25. Сафаров К.Б., Степанова В.Ф. Регулирование реакционной способности заполнителей и повышение сульфатостойкости бетонов путем совместного применения низкокальциевой золы-уноса и высокоактивного метакеолина // Строительные материалы. 2016. № 5. С. 70–73.
26. Bazhenov Y., Alimov L., Voronin V. Concrete composites of double structure formation // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00015. DOI: 10.1051/mateconf/201711700015
27. Ахметов Д.А., Рюм Е.Н. Опыт применения самоуплотняющихся бетонов в строительной индустрии Республики Казахстан // Молодой ученый. 2017. № 48 (182). С. 11–14.
28. Alimov L., Engovatov I. Nano-modified concretes initial structuring // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04043. DOI: 10.1051/mateconf/20168604043

Поступила в редакцию 3 декабря 2019 г.

Принята в доработанном виде 25 декабря 2019 г.

Одобрена для публикации 29 января 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Евгений Георгиевич Величко** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287053; VelichkoEG@gic.mgsu.ru;

Юлия Сергеевна Шумилина — преподаватель кафедры строительных материалов и материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ShumilinaYS@gic.mgsu.ru.

REFERENCES

1. Velichko E.G., Dykin I.V., Eremin A.V. Multi-level-modified cement systems. *Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 4(57):111-114. (rus.).
2. Velichko E.G., Belyakova Zh.S. Physical-chemical and methodological bases for production multicomponent cement systems of optimized composition. *Construction Materials*. 1996; 3:27-30. (rus.).
3. Habibi A., Ghomashi J. Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results. *Construction and Building Materials*. 2018; 168:113-123. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.113
4. Sonebi M. Medium strength self-compacting concrete with fly ash: Modeling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34(7):1199-1208. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.022
5. Bazhenova S., Pilipenko A. The concrete-based high performance decorative material for severe climatic conditions. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:03004. DOI: 10.1051/mateconf/201710603004
6. Kalashnikov V.I. The calculation of the compositions of high-strength self-compacting concrete. *Construction Materials*. 2008; 10:4-6. (rus.).
7. Tkach E.V., Semenov V.S., Tkach S.A., Rozovskaya T.A. Highly effective water-repellent concrete with improved physical and technical properties. *Procedia Engineering*. 2015; 111:763-769. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.143
8. Manohar K.N., Prakash P., Srishaila J.M., Kumar P.W.P. Strength characteristics of glass fiber reinforced self-compacting concrete with fly ash and silica fume. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2015; 4(08):142-146. DOI: 10.17577/ijertv4is080036
9. Aslani F. Nanoparticles in self-compacting concrete — a review. *Magazine of Concrete Research*. 2015; 67(20):1084-1100. DOI: 10.1680/macr.14.00381
10. Shesternin A.I., Korovkin M.O., Eroshkina N.A. Basics of self-compacting concrete technology. *Young Scientist*. 2015; 6(86):226-228. (rus.).
11. Melikhov I.V. *Physico-chemical evolution of solids*. Moscow, Binom. Knowledge laboratory, 2006; 309. (rus.).
12. Taraseyeva N.I., Voskresenskiy A.V., Taraseyeva A.S. Role of non-waste technology in the source of raw materials for obtaining effective modifiers and active filler in cement mortars and concretes. *New University. Series: Technical sciences*. 2014; 10(32):90-93. DOI: 10.15350/2221-9552.2014.10.0018 (rus.).
13. Kalashnikov V.I. Non-metallic building materials industry and the future of concrete. *Construction Materials*. 2008; 3:20-23. (rus.).
14. Suzdaltsev O.V., Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Sehposyn G.P. New high-performance concretes. *New University. Series: Technical sciences*. 2014; 7-8(29-30):44-47. DOI: 10.15350/2221-9552.2014.7-8.0008 (rus.).
15. Chiorino M.A., Falikman V.R. The durability and sustainable development of structural concrete: within global scientific community's line of sight. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 1:24-26. (rus.).
16. Shesternin A.I. Properties of a thin filler for concrete of broken reinforced concrete structures. *Actual problems of construction : materials of Intern. scientific conf., Part I*. Saransk, Publishing House of Mordovia University, 2008; 238-242. (rus.).
17. Anderson G., Iqbal M.M., Astira I.F. The effect of substitution and admixture materials on Self-Compacting Concrete (SCC) characteristics. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2018; 7(5):28-33.
18. Isaeva Yu.V., Velichko E.G., Kasumov A. Sh. Optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components. *Construction Materials*. 2015; 8:84-87. (rus.).
19. Yakovlev G.I., Fedorova G.D., Polyanskikh I.S. High-strength concrete with disperse additive. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 2:35-42. (rus.).
20. Mujkanović A., Jovanovic M., Bećirhodžić D., Karić A. Self-compacting concrete — a sustainable construction material. *The 5th International Conference on Environmental and Material Flow Management "EMFM 2015"*. 2015; 6.
21. Korolev E.V. Technical-economical efficiency of new technological solutions. Analyses and improvement. *Construction Materials*. 2017; 3:85-89. (rus.).
22. Geiker M. Self-compacting concrete (SCC). *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. 2008; 187-207. DOI: 10.1533/9781845694685.187
23. Ponikiewski T., Gołaszewski J. Influence of fibres on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete. *Brittle Matrix Composites 10*. 2012; 187-197. DOI: 10.1533/9780857099891.187
24. Rozental N.K., Chekhniy G.V., Lyubarskaya G.V., Rozental A.N. Protection of concrete on a reactive aggregate from internal corrosion by lithium salts. *Construction Materials*. 2009; 3:68-71. (rus.).
25. Safarov K.B., Stepanova V.F. Regulation of reaction capacity of fillers and increasing sulfate resistance of concretes by combined use of low-calcium fly ash and high-active metakaolin. *Construction Materials*. 2016; 5:70-73. (rus.).
26. Bazhenov Y., Alimov L., Voronin V. Concrete composites of double structure formation. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00015. DOI: 10.1051/mateconf/201711700015

27. Akhmetov D.A., Root E.N. The experience of using self-compacting concrete in the construction industry of the Republic of Kazakhstan. *Young Scientist*. 2017; 48(182):11-14. (rus.).

28. Alimov L., Engovatov I. Nano-modified concretes initial structuring. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04043. DOI: 10.1051/mateconf/20168604043.

Received December 3, 2019.

Adopted in a revised form on December 25, 2019.

Approved for publication on January 29, 2020.

B I O N O T E S: **Evgeniy G. Velichko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 287053; VelichkoEG@gic.mgsu.ru;

Yuliya S. Shumilina — Lecturer of the Department of Building Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ShumilinaYS@gic.mgsu.ru.