

Е.Г. ВЕЛИЧКО¹, Ю.С. ШУМИЛИНА¹, Л.Н. ТАЛИПОВ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

МНОГОКОМПОНЕНТНОСТЬ – ОСНОВНОЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

Аннотация. Рассмотрены перспективы и проблемы многокомпонентной многоуровневой оптимизации дисперсного состава самоуплотняющегося бетона с целью значимого повышения его строительно-технических свойств, при минимальном содержании вяжущего вещества. Разработаны теоретические и практические основы проектирования дисперсно-гранулометрического составов самоуплотняющихся бетонных смесей для высокопрочных бетонов, в которых используются различные виды разнодисперсных минеральных модификаторов (ММ), в т. ч. зола-уноса ТЭС.

Эффективными ММ для самоуплотняющихся бетонных смесей являются разнодисперсные доменный гранулированный шлак, зола-уноса ТЭС и микрокремнезем, создающие плотную структуру упаковки частиц многокомпонентного вяжущего с низкой степенью неупорядоченности и обеспечивающие снижение расхода портландцемента в бетоне до 50% и выше.

Самоуплотняющиеся бетонные смеси при таком выборе вида и параметров ММ характеризуются более низким водосодержанием, высокой вязкостью и низким уровнем значения предельного напряжения сдвига, обеспечивающими ее качественное уплотнение. Для изучения свойств и структуры бетона использовались в качестве мелкого заполнителя кварцевый песок с $M_k - 2,58$, гранитный щебень фр. 5-10 мм, портландцемент класса ЦЕМ I 52,5Н, тонкодисперсный доменный гранулированный шлак, зола-уноса ТЭС, микрокремнезем и суперпластификатор Glenium 430. Для однородного протекания пуццолановой реакции в каждом микрообъеме применялась высокодисперсная фракция цемента. 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 цементного камня изучалась термографического и рентгенофазового методов анализа.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, высокопрочный, дисперсный состав, зола-уноса ТЭС, пуццолановая реакция, тонкодисперсный шлак, микрокремнезем, суперпластификатор.

E.G. VELICHKO¹, Yu.S. SHUMILINA¹, L.N. TALIPOV¹¹Russia Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia

MULTI-COMPONENT - THE MAIN FACTOR FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES HIGH STRENGTH CONCRETE

Abstract. The prospects and problems of multicomponent multilevel optimization of the dispersed composition of self-compacting concrete are considered with the aim of significantly increasing its construction and technical properties, with a minimum content of binder. Theoretical and practical principles have been developed for the design of disperse-particle size distribution of self-compacting concrete mixtures for high-strength concrete, in which various types of dispersed mineral modifiers (MM) are used, including fly ash of thermal power plants.

Effective MMs for self-compacting concrete mixtures are differently dispersed granular blast furnace slag, fly ash of thermal power plants and silica fume, which create a dense packing structure

of particles of a multicomponent binder with a low degree of disorder and ensure a decrease in the consumption of Portland cement in concrete up to 50% and higher.

With such a choice of the type and parameters of MM, self-compacting concrete mixtures are characterized by lower water content, high viscosity and a low level of ultimate shear stress, ensuring its high-quality compaction. To study the properties and structure of concrete, quartz sand with $M_k - 2.58$, granite crushed stone fr. 5-10 mm, Portland cement of class CEM I 52.5 N, finely dispersed granulated blast furnace slag, fly ash of thermal power plants, micro-silica and superplasticizer Glenium 430. For a uniform course of the pozzolanic reaction, a finely dispersed cement fraction was used in each micro-volume. Research methods: the shape and size of the dispersed particles of the components were determined by a laser analyzer, the mobility of the concrete mix in accordance with GOST 10181-2014, the compressive strength of concrete in accordance with GOST 10180-2012. The structure of the cement stone was studied by thermographic and X-ray phase analysis methods.

Keywords: *self-compacting concrete, high-strength, disperse composition, fly ash of thermal power plants, pozzolanic reaction, finely divided slag, superplasticizer.*

1 Введение

Развитие строительного комплекса РФ требует постоянного повышения качества бетона и железобетона и совершенствования технологии их производства путем исследования, разработки и внедрения исходных материалов высокого качества, а также автоматизации и роботизации технологических процессов и операций. В частности, расширяется производство и применение высокопрочных и долговечных бетонов, недостатком которых является высокий абсолютный и удельный расход цемента на единицу прочности. Очевидно, что значимыми факторами в производстве бетонов высоких классов являются создание плотной структуры с высокой концентрацией твердой фазы в единице объема и качественное уплотнение бетонной смеси. Повышение плотности бетона может быть достигнуто только путем оптимизации его дисперсно-гранулометрического состава на различных структурных уровнях с целью высокого наполнения ее твердой фазой и низкого водоцементного отношения [1-3], обеспечивающих минимальный расход портландцемента и его высокие строительно-технические свойства.

Перспективным направлением в технологии высокопрочных бетонов является использование самоуплотняющихся бетонных смесей. (self-compacting concrete – SCC), снижающих трудоемкость производства, обеспечивающих высокое качество поверхности готовой продукции и не требующих высококвалифицированной рабочей силы [4-7]. Такие смеси должны характеризоваться низким предельным напряжением сдвига (текучестью) и высоким значением вязкости, предотвращающим расслоение, водоотделение, седиментационные процессы, т.е. повышающей ее однородность и прочность бетона. Оптимальное сочетание означенных противоречивых реологических свойств бетонной смеси облегчает выход вовлеченного в процессе приготовления воздуха, и способствует ее качественному уплотнению. Повышение качества указанных реологических свойств бетонной смеси может обеспечиваться использованием в составе бетона высокодисперсных минеральных модификаторов различного происхождения (микрокремнезем, тонкодисперсный шлак, зола-уноса ТЭЦ и др.), суперводоредуцирующих добавок поликарбонатного типа [8, 9], других видов химических модификаторов, регулирующих вязкость и текучесть бетонной смеси, а также ускорителей и замедлителей схватывания и твердения [5].

Кроме того, для качественного самоуплотнения бетонной смеси необходимо использовать такие технологические приемы, как снижение расхода крупного заполнителя и максимальной крупности его зерен (наиболее предпочтительный размер 5(3)-10 мм), низкое водовязущее отношение [10]. Максимальная текучесть бетонной смеси, и ее качественное самоуплотнение обеспечивается в этом случае практически исключением контактных взаимодействий между зернами заполнителей за счет повышенных расхода цемента и доли (более 0,5) песка в смеси заполнителей. Однако необходимо отметить, что бетоны с

повышенным содержанием цемента характеризуются высоким тепловыделением, значимо увеличивающим кинетическую энергию в начальный период их твердения, что является негативным фактором. По этой причине фиксация частиц гидратных фаз при структурообразовании может происходить в основном в положении дальней (10-7 – 10-8 м) коагуляции, с низкой энергией связи между ними, обеспечивая при этом ее нежелательные значимо высокую рыхлость, микропористость, дефектность и снижение физико-механических свойств [11, 12]. Очевидно, что требуемые реологические свойства бетонной смеси обеспечиваются только при сохранении высокого содержания дисперсной фазы. Повышение содержания дисперсной фазы может быть обеспечено при частичном замещении портландцемента или мелкого заполнителя высокодисперсными минеральными добавками (тонкомолотый доменный гранулированный шлак, зола-уноса ТЭС, микрокремнеземом и др.) [6, 13-15]. Замещение части цемента или мелкого заполнителя ММ различной дисперсности может позволить получать цементную пасту с низким предельным напряжением сдвига без седиментационных процессов, а бетонную смесь с высокой вязкостью, без водоотделения и расслоения. Важным фактором в этом случае является выбор вида, дисперсности, пуццоланической активности и энергетического состояния ММ, обеспечивающих высокую концентрацию твердой фазы в единице объема [1, 2].

При этом 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].

Предполагая, физическую модель в виде частиц шарообразной формы, а элементарную ячейку частиц клинкерного компонента в виде простой кубической упаковки частиц одного диаметра (рисунок 1, поз. 2) [2] определим наиболее рациональные параметры (дисперсность, содержание) применения различных видов ММ в многокомпонентной цементной системе, обеспечивающие повышение ее плотности, или хотя бы сохраняющие ее на исходном уровне (рисунок 1, поз. 4). Очевидно, что таких уровней по дисперсности три. Первая – оптимальная (рисунок 2, поз. 2). Наблюдается уплотнение исходной многокомпонентной системы. Вторая - равнодисперсные частицы клинкерного компонента и минеральной добавки (рисунок 1, поз. 5 – поз. 9). Плотность исходной системы не изменяется. Третья – частицы с дисперсностью на уровне, значимо превышающим дисперсность клинкерного компонента, например, удельной поверхности микрокремнезема (18000-21000 м²/кг). В этом случае будет наблюдаться уплотнение исходной системы, путем заполнения микропустот многокомпонентной системы и обволакивания частиц клинкера и относительно грубодисперсных добавок, а образующие цепочки-кластеры высокодисперсных частиц значимо улучшают реологические свойства цементной пасты и бетонной смеси. Таким образом, имеется только три уровня дисперсности ММ, функционально связанные с дисперсностью клинкерного компонента и собственной пуццоланической и/или химической активностью, которые могут обеспечивать прочность многокомпонентной цементной системы и ее другие строительные-технические свойства на максимальном уровне.

Для наполнения первого уровня межчастичных пустот применяется тонкодисперсный ММ (например, доменный гранулированный шлак и др.), в количестве 18-25% массы цемента с оптимальной дисперсностью, в среднем на 150 м²/кг, превышающий удельную поверхность портландцемента [2]. Его частицы вследствие оптимальной дисперсности и наличия мозаично распределенных разноименно заряженных минералов на поверхности и электростатического взаимодействия с частицами клинкера самопроизвольно объемно ориентируются и однородно с высокой энергией связи с ними будут фиксироваться в его межчастичных пустотах. Для второго уровня - при равной дисперсности клинкерного компонента и ММ рациональное содержание его может быть равным 25-75%, а для третьего

определяется экспериментально и должно быть незначительным [2]. Для высокопрочных бетонов наиболее предпочтительные поз. 5 и поз.7 (рисунок 2), т. е. теоретическое содержание ММ в многокомпонентном вяжущем может приниматься в количестве 25 или 50%.

В реальных системах конгломератного или композитного типа строения и особенно при наличии разномодальных ММ имеется вероятность того, что две или большее количество дисперсных частиц ММ могут объединиться, и будут представлять собой отдельный агрегат [2, 13]. В таких микрообъемах цементных систем пуццолановая реакция практически не протекает, и они представляют собой псевдопоры размером 5 -7 мкм (случай трех частиц) и 0,5-1,5 мкм (двух частиц). Означенные дефекты структуры вносят значимый вклад в снижение прочности, морозостойкости, деформативных характеристик цементного камня, например, пуццолановый и шлакопортландцемент.

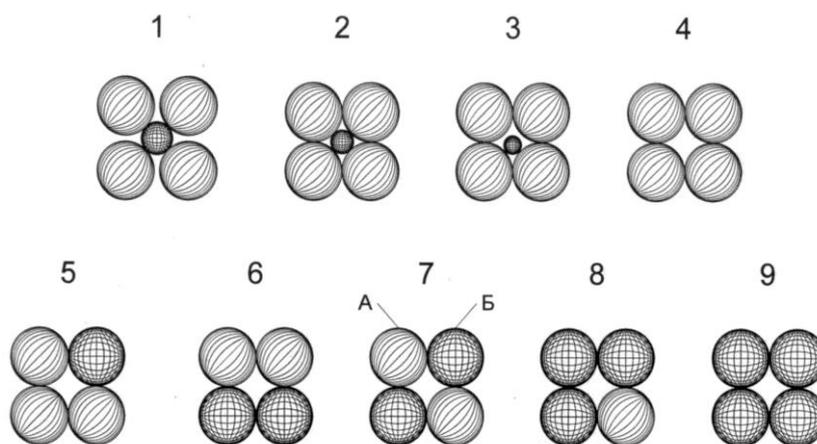


Рисунок 1 – Геометрия теоретически возможных схем частиц клинкерного компонента (КК) и минеральных модификаторов (ММ): А – КК; Б – ММ:

1 – дисперсность ММ меньше оптимальной; 2 – то же оптимальная; 3 - больше оптимальной; 4 - 9 – частицы КК и ММ равной дисперсности

Выбор материалов для однородного распределения частиц на различных уровнях структуры по дисперсности и содержанию с целью значимого снижения расхода клинкерного компонента и формирования более упорядоченного строения должен обеспечивать или однородное протекание процесса гидратации их, или пуццолановой реакции в каждом микрообъеме многокомпонентной цементной системы. Кроме того, для получения высокой прочности таких систем дисперсные частицы всех уровней должны иметь высокие модули упругости и наиболее целесообразно совпадающие по значению, обеспечивая их более однородное напряженное состояние, в т.ч. при подводе к системе энергии или вещества [2]. Уровень допускаемой подводимой энергии к материалу в этом случае увеличивается.

Таким образом, синтез многокомпонентной цементной системы с многоуровневой разномодальной модификацией структуры наиболее целесообразно осуществлять с использованием следующих принципиальных положений.

Объем компонентов многокомпонентного вяжущего определяется по методу абсолютных объемов, а дисперсные структурные уровни могут быть синтезированы следующим образом. Например, первый уровень в виде портландцемента с дисперсностью 300 - 350 м²/кг и менее с целью обеспечения длительного сохранения прочных с высоким модулем упругости реликтов частиц клинкера в цементном камне. Для наполнения первого уровня межчастичных пустот портландцемента применяется тонкодисперсный доменный гранулированный шлак в количестве 20-25% массы цемента с оптимальной дисперсностью 450-500м²/кг [2]. Для второго уровня, например, может быть использована зола-уноса ТЭС с удельной поверхностью 320-380см²/кг в количестве 25%. т. е. для реализации поз 5,

рисунок 2. Зола-уноса вследствие сферической оплавленной формы частиц обладает низкой водопотребностью и значительно улучшает текучесть бетонной смеси и повышает ее вязкость за счет высокой энергии связи с частицами клинкера и тонкодисперсного шлака.

Для третьего - микрокремнезем - 2-6% - 18000-21000 м²/кг, способствующий вследствие наличия небольшого количества частиц нанометрового уровня стабилизации структуры цементного камня и фиксации вследствие молекулярного отбора частиц гидратных фаз с высокой энергией связи в положении ближней коагуляции, значительно повышающих ее плотность [7, 8, 13, 16], а также образованию за счет пуццолановой реакции прочных вторичных низкоосновных гидросиликатных фаз. Это связано также с тем, что высокодисперсный аморфный диоксид кремнезема, взаимодействуя с гидроксидом кальция, образует практически в процессе приготовления бетонной смеси, волокнистые гидросиликаты кальция нанометрового уровня, которые создают структурные цепочки-агломерации, способствующие кластерообразованию частиц гидратных фаз в высокоплотной упаковке. Оптимальное содержание микрокремнезема в этом случае будет незначительным и определяются экспериментально.

С учетом возможного образования агрегатов ММ необходимо использование высокодисперсного портландцемента в количестве 4 - 12% с удельной поверхностью 900 - 1100 м²/кг [1,2], обеспечивающий однородное протекание реакций гидратации или пуццолановой реакции во всех микрообъемах, содержащих минеральные модификаторы.

2 Материалы и методы

Исследования проводились с целью оценки влияния использования золы-уноса ТЭС Черепетской ГРЭС на реологические и технологические свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и прочность высокопрочного бетона, содержащего разнодисперсные различного вида ММ (тонкодисперсный доменный шлак, микрокремнезем и тонкодисперсную фракцию цемента с удельной поверхностью 980 м²/кг). Дисперсность портландцемента и золы ТЭС находятся на одном уровне и составляют 330 -350 м²/кг, т.е. реализуется поз.5, рисунок 1, а тонкодисперсного шлака – 480 м²/кг (рисунок 1, поз. 2) [2]. Содержание микрокремнезема принималось равным 3%. При таких параметрах разнодисперсных ММ представляется возможным использовать их в количестве до 50 %, в том числе различных видов, для замещения эквивалентной части портландцемента и мелкого заполнителя без образования их агрегатов.

Приготовление бетона осуществлялось с использованием в качестве мелкого заполнителя песка I класса с Мк = 2,58 Вяземского щебеночного завода, гранитного щебня фр. 5-10 мм с маркой по дробимости М1400 месторождения Липпесюрья Карелии, портландцемента класса ЦЕМ I 52,5Н с удельной поверхностью 330 м²/кг филиала ООО «ХайльдербергЦемент Рус» пос. Новогуровский Тульской области. Расход портландцемента принимался равным 420 кг/м³ бетона, а его тонкодисперсной фракции с удельной поверхностью 980 м²/кг - 6% массы многокомпонентного цемента [17]. В качестве суперпластификатора применялся Glenium 430 (ООО «БАСФ-Строительные системы») в количестве 0,67% массы многокомпонентного цемента (портландцемент+тонкодисперсный шлак+ зола-уноса). 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 цементного камня изучалась применением термографического и рентгенофазового методов анализа.

3 Результаты исследования и их анализ

Исследование структуры цементного камня с использованием растровой микроскопии с микроанализом показали, что частицы тонкомолотого доменного гранулированного шлака с оптимальными параметрами однородно (коэффициент вариации 0,5%) распределяются в матрице многокомпонентного цементного камня. Такие параметры компонентов первого

иерархического уровня микроструктуры обеспечивают значимое снижение ее исходной межчастичной пустотности (до 9%), высокий уровень наполнения ее твердой фазой, раннюю активацию реакций гидратации минералов шлака, а также наличие высокопрочных реликтов частиц клинкера. Установлено также, что комплексное применение тонкодисперсных доменного гранулированного шлака, микрокремнезема и клинкерного компонента снижают объем межчастичной пустотности многокомпонентного вяжущего до 13,6 %.

Использование золы – уноса в количестве 20-24% снижает НГЦТ относительно контрольного состава на 1-2,5 абс. %, а минимальное значение наблюдается при ее оптимальном содержании - 22% (таблица 1). Очевидно, что уменьшение водопотребности цемента с золой ТЭЦ связано с однородным более упорядоченным распределением ее частиц в упаковке частиц цемента, а также с их сферической оплавленной формой.

Таблица 1 - Свойства цементной пасты и бетона с золой-уноса ТЭС

№ п/п	Содержание золы, %	НГЦТ*, %	Состав бетона, кг/м ³	Распływ конуса, см	Прочность бетона на сжатие, МПа/%, в возрасте, сут.		
					1	2	28
1	20	28	Ц-420; Шлак-130; Зола-121; П-721; Щ –(фр.5-10мм)-430; микрокремнезем – 20; Ц (980 м ² /кг) -40; В-182; СП-4,9	88			
	22	27			<u>71,3</u> 48,0	<u>87,3</u> 58,8	<u>148,5</u> 100
	24	28,5					
2	-	-	Ц-420; Шлак=130кг; микрокремнезем – 20; Ц (980 м ² /кг) -40; П-830; Щ –(фр.5-10мм)-830; В-188; СП-4,9	76	<u>62,8</u> 42,3	<u>78,0</u> 55,2	<u>134,7</u> 90,7

*.- НГЦТ –нормальная густота цементного теста. Для состава без золы -29,5%.

В составе самоуплотняющейся бетонной смеси зола ТЭС применялась в количестве 22% для замещения эквивалентного количества песка по объему, что позволило редуцировать ее водосодержание на 6 л/м³, увеличить распływ конуса на 12 см, при отсутствии раствора– и водоотделения и расслоения, т.е. использование золы значительно улучшило ее реологические и технологические свойства. Очевидно, что в повышение качества бетонной смеси существенный вклад вносит улучшение дисперсно-гранулометрического состава растворной составляющей бетона. На поверхности бетонной смеси с распльвом конуса (РК) 88 см наблюдаются равномерно распределенные зерна крупного заполнителя, подтверждающие ее высокие вязкость и текучесть (рисунок 2).



Рисунок 2 - SCC с РК = 88см

Высокое качество самоуплотняющейся бетонной смеси с золой ТЭС, увеличение глубины протекания пуццолановой реакции с образованием дополнительного количества прочных низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH(I), а также незначительное редуцирование водосодержания обеспечили повышение прочности бетона на 3,6-9,7 %.

Для оценки качества структуры были выполнены термографические и рентгенофазовые исследования образцов бетона в возрасте 28 суток без золы и с ее

содержанием в количестве 22%. Структура бетона с комплексом ММ, включающим золу-уноса отличается значимо меньшим (на 13,6%) содержанием портландита, а степень гидратации портландцемента составляет 80 -82 %, превышая аналогичный показатель для контрольного состава (без золы) на 8-12%, подтверждая его более высокую прочность.

4 Выводы

Разработаны теоретические и практические основы проектирования дисперсно-гранулометрического составов самоуплотняющихся бетонных смесей для высокопрочных бетонов, в которых используются различные виды разнодисперсных ММ, оптимизирующих его структуру на строго определенных иерархических уровнях.

Многоуровневая дисперсно-гранулометрическая в комплексе с химической модификация состава самоуплотняющихся бетонных смесей обеспечивает получение высокопрочных бетонов с минимальным абсолютным и удельным на единицу прочности расходом портландцемента и высокими физико-механическими показателями. Эффективными ММ для этих целей являются разнодисперсные доменный гранулированный шлак и микрокремнезем, а также зола-уноса ТЭС с дисперсностью, равной удельной поверхности портландцемента, и создающие плотную структуру упаковки частиц многокомпонентного вяжущего с меньшей степенью неупорядоченности и обеспечивающие снижение расхода портландцемента в бетоне до 50% и более. Прочность бетона только от применения золы-уноса ТЭС взамен эквивалентной части мелкого заполнителя увеличивается на 3,6-9,7 %.

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 многокомпонентной цементной системы, а также наличие прочных крупных размеров реликтов частиц клинкера, вносящих значимый вклад в интегральную прочность высокопрочного бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Leng F.F. Destruction of composites with dispersed particles in a brittle matrix // Composite material. Destruction and fatigue. 1978. №5.
4. Collepardi M. Self-Compacting Concrete: What is New // Proceedings of Seventh CANMET, ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. 2003. Pp. 1-16.
5. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4–6.
6. Шестернин А.И., Коровкин М.О., Ерошкина Н.А. Основы технологии самоуплотняющихся бетонов // Молодой ученый. 2015. № 6 (86). С. 226–228.
7. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. Сер. Нанотехнология. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 309 с.
8. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980.
9. 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).
10. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 20–23.
11. Суздальцев О.В., Калашников В.И., Мороз М.Н., Сехпосян Г.П. Новые высокоэффективные бетоны // Новый университет. Сер.: Технические науки. 2014. № 7–8 (29–30).
12. Horst G., Joerg R. Self compacting concrete – another stage in the development of the 5 – component system of concrete // Beton technische Berichte (Concrete Technology Reports), Verein Deutscher Zementwerke. 2001. Pp. 39-48.

13. 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.
14. Яковлев Г.И., Федорова Г.Д., Полянских И.С. Высокопрочный бетон с дисперсными добавками // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 2. С. 35–42.
15. Яковлев Г.И., Гинчицкая Ю.Н., Кизиниевич О., Кизиниевич В., Гордина А.Ф. Влияние дисперсий многослойных углеродных нанотрубок на физико-механические характеристики и структуру строительной керамики // *Строительные материалы*. 2016. № 1. 8. С. 20-29. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-740-8-25-29.
16. Talipov L., Velichko E. Polymer additives for cement systems based on polycarboxylate ethers // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Pp. 939-946. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_93.
17. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. С. 235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.

REFERENCES

1. Velichko Ye.G., Dykin I.V., Yeremin A.V. Mnogourovnevo-modifitsirovannyye tsementnyye sistemy [Multilevel-modified cement systems]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016. No 4 (57). Pp. 111–114.
2. Velichko Ye.G., Belyakova ZH.S. Fiziko-khimicheskiye i metodologicheskiye osnovy polucheniya mnogokomponentnykh sistem optimizirovannogo sostava [Physicalchemical and methodological bases for production multicomponent cement systems of optimized composition]. *Stroitel'nyye materialy*. 1996. No 3. Pp. 27–30.
3. Leng F.F. Destruction of composites with dispersed particles in a brittle matrix. *Composite material. Destruction and fatigue*. 1978. No 5.
4. Collepardi M. Self-Compacting Concrete: What is New. Proceedings of Seventh CANMET, ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. 2003. Pp. 1-16.
5. Kalashnikov V.I. Raschet sostavov vysokoprochnykh samouplotnyayushchikhsya betonov [The calculation of the compositions of high-strength self-compacting concrete]. *Stroitel'nyye materialy*. 2008. No 10. Pp. 4–6.
6. Shesternin A.I., Korovkin M.O., Yeroshkina N.A. Osnovy tekhnologii samouplotnyayushchikhsya betonov [Properties of a thin filler for concrete of broken reinforced concrete structures.]. *Molodoy uchenyy*. 2015. No 6 (86). Pp. 226–228.
7. Melikhov I.V. Fiziko-khimicheskaya evolyutsiya tverdogo veshchestva. Ser. Nanotekhnologiya [Physicochemical evolution of solids]. Moscow: BINOM, Laboratoriya znaniy, 2006. 309 p.
8. Ur'yev N.B. Vysokokontsentrirrovannyye dispersnyye sistemy [Highly concentrated dispersed systems]. Moskva: Khimiya, 1980.
9. Taraseyeva N.I., Voskresenskiy A.V., Taraseyeva A.S. Rol' bezotkhodnykh tekhnologiy v rasshirenii syr'yevoy bazy dlya polucheniya effektivnykh modifitsiruyushchikh dobavok i aktivnykh napolniteley v tsementnyye rastvory i betony [Role of non-waste technology in the source of raw materials for obtaining effective modifiers and active filler in cement mortars and concretes]. *Novyy universitet. Ser.: Tekhnicheskiye nauki*. 2014. No 10 (32).
10. Kalashnikov V.I. Promyshlennost' nerudnykh stroitel'nykh materialov i budushcheye betonov [Non-metallic building materials industry and the future of concrete]. *Stroitel'nyye materialy*. 2008. No 3. Pp. 20–23.
11. Suzdal'tsev O.V., Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Sekhposyan G.P. Novyye vysokoeffektivnyye betony [New high-performance concretes]. *Novyy universitet. Ser.: Tekhnicheskiye nauki*. 2014. No 7–8 (29–30).
12. Horst G., Joerg R. Self compacting concrete – another stage in the development of the 5 – component system of concrete. *Beton technische Berichte (Concrete Technology Reports), Verein Deutscher Zementwerke*. 2001. Pp. 39-48.
13. Isayeva YU.V., Velichko Ye.G., Kasumov A.SH. Optimizatsiya struktury sverkhlegkogo tsementnogo rastvora s uchetom geometricheskikh i fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik komponentov [Optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components]. *Stroitel'nyye materialy*. 2015. No 8. Pp. 84-87.
14. Yakovlev G.I., Fedorova G.D., Polyanskikh I.S. Vysokoprochnyy beton s dispersnymi dobavkami [High-strength concrete with disperse additive]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2017. No 2. Pp. 35–42.
15. Yakovlev G.I., Ginchitskaya YU.N., Kiziniyevich O., Kiziniyevich V., Gordina A.F. Vliyaniye dispersiy mnogoslonykh uglerodnykh nanotrubok na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki i strukturu stroitel'noy keramiki [Influence of dispersions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ceramic]. *Stroitel'nyye materialy*. 2016. № 1. 8. S. 20-29. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-740-8-25-29.
16. Talipov L., Velichko E. Polymer additives for cement systems based on polycarboxylate ethers. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Pp. 939-946. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_93.
17. Velichko Ye.G., Shumilina YU.S. K probleme formirovaniya dispersnogo sostava i svoystv vysokoprochnogo betona [On the problem of the formation of dispersed composition and properties of high-strength concrete]. *Vestnik MGSU*. 2020. Т. 15. Pp. 235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.

Информация об авторах

Величко Евгений Георгиевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения.
E-mail: VelichkoEG@gic.mgsu.ru

Шумилина Юлия Сергеевна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
преподаватель кафедры строительных материалов и материаловедения.
E-mail: ShumilinaYS@gic.mgsu.ru

Талипов Линар Накифович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения.
E-mail: nakifulu@mail.ru

Information about authors

Velichko Evgeniy G.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. of building materials.
E-mail: VelichkoEG@gic.mgsu.ru

Shumilina Yuliya S.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,
lecturer of the dep. of building materials.
E-mail: ShumilinaYS@gic.mgsu.ru

Talipov Linar N.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,
post-graduate student of the dep. of building materials.
E-mail: nakifulu@mail.ru