

БЕТОНЫ ПЕРЕХОДНОГО И НОВОГО ПОКОЛЕНИЙ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Калашников В.И.¹, Тараканов О.В.¹, Володин В.М.¹, Ерофеева И.В.¹, Абрамов Д.А.²

¹ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия (440028, Пенза, улица Г. Титова, дом 28), e-mail: kalashnikov_vi@mail.ru

²Сверхпрочные экономичные бетоны, г. Ульяновск, e-mail: dmitrij.abramov@gMail.com

В статье рассматриваются компонентные составы бетонов старого, переходного и нового поколений. Бетоны старого поколения с 4-компонентным составом (цемент—песок—щебень—вода) или 3-компонентным (цемент—песок—вода) с изобретением суперпластификаторов (СП) и с использованием микрокремнезема эволюционно превратились в менее цементоемкие бетоны переходного поколения, производство которых составляет 97–98% от объемов бетонов. Бетоны нового поколения, используемые в развитых странах, с кардинальным изменением рецептуры сухих компонентов, обладают несравненно высокой прочностью и становятся высокофункциональными при низком удельном расходе цемента на единицу прочности, не превышающем 5–6 кг/МПа. Показано, что бетоны нового поколения должны включать большой объем микрометрических молотых горных пород, превращающих смеси в самоуплотняющиеся и саморастекающиеся. Развиваемые в России нанотехнологии бетонов с добавлением в них микродоз нанодобавок в количестве 0,05–0,0005% от массы цемента бесперспективны. Революционные преобразования в технике и в технологии бетонов будут осуществляться в первую очередь за счет количественного расширения компонентного состава и использования эффективных СП, обеспечивающих малоструктурное реологическое состояние бетонных смесей благодаря большому объему суспензионной составляющей, превращающей смеси в саморастекающиеся и самоуплотняющиеся при малом содержании воды, с формированием высокой прочности бетонов.

Ключевые слова: бетон переходного поколения, бетоны нового поколения, высокопрочный бетон, многокомпонентный бетон, дисперсные компоненты, самоуплотняющийся бетон, фибробетон, прочность, нанотехнологии

CONCRETE TRANSITIONAL AND NEW GENERATIONS. CONDITION AND PROSPECTS

Kalashnikov V.I.¹, Tarakanov O.V.¹, Volodin V.M.¹, Erofeeva I.V.¹, Abramov D.A.²

¹ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia (440028, Penza, street G. Titova, 28), e-mail: Kalashnikov_vi@mail.ru

²High strength economical concrete, Ulyanovsk, e-mail: dmitrij.abramov@gMail.com

The article discusses the composition of the old concrete, transitional, and new generations. The concrete of the old generation with 4-component composition (cement-sand-gravel-water) or 3-component (cement-sand-water) with the invention of superplasticizers and microsilica evolutionary became less cement containing concrete transitional generation, the production of which is 97–98% of the volume of concrete. Concretes of a new generation that is used in developed countries, with radical change in the formulation of dry ingredients, have incomparably high strength and is highly functional with low specific consumption of cement per unit strength not exceeding 5-6 kg/MPa. It is shown that concretes of a new generation should include a large amount of micro-metric crushed rocks, turning the mixture in self-compacting and self-flowing. Developed in Russia nanotechnology of concrete with the addition of very small amounts of nano-additives in amounts of from 0.05 to 0.0005% by weight of cement, is futile. Revolutionary changes in technology and concrete technology will be implemented primarily through quantitative expansion component composition and use of effective superplasticizers, providing little structural rheological condition of concrete mixtures due to the large volume of the suspension component and the transformation mixture in self-flowing and self-compacting concrete at low water content, with the formation of high strength concrete and many other functions.

Keywords: concrete transitional generation, concretes of a new generation, high-strength concrete, multicomponent concrete, dispersive components, self-compacting concrete, fiber concrete, strength, nanotechnology

Разработка новых видов высококачественных бетонов, значительно отличающихся от традиционных как по рецептуре, так и по технологии изготовления, базируется на использовании

реакционно-порошковых смесей с использованием каменной муки, тонкого песка и дополнительно двух основных компонентов — супер- (СП) или гиперпластификаторов (ГП) и высокопудцоланических добавок микрокремнеземов (МК) и микрометакаолинитов. Такие бетоны мы называем порошково-активированными, а бетонные смеси — суспензионными. Одним из таких бетонов нового поколения, в котором в большей степени реализуются диспергирующие, а также разжижающие свойства СП и ГП, чем в мелкозернистых и щебеночных бетонах старого поколения, являются порошковые бетоны (РПБ), которые впервые начали разрабатываться за рубежом во Франции и в Канаде (Reaktions pulver beton или Reactive Powder Concrete). Основным достоинством и мотивацией появления таких бетонов является возможность использования каменных реологически-активных молотых порошков, изготавливаемых из тонких отсеков камнедробления некоторых нерудных ископаемых или обогащения рудных (с добавлением МК), ежегодный выход которых в мире превзошел 100 млрд т. РПБ наиболее хорошо сочетаются с дисперсными волокнами и мелкосеточными ткаными каркасами из полипропиленовых, полиамидных, полиакрилатных и стеклянных волокон, с формированием высокой прочности при осевом сжатии и растяжении. В России высокопрочные бетоны на реологически-активных порошках из горных пород с содержанием их более 30–40% от массы цемента практически не изучались и реально не изготавливались, если не считать некоторые реализации их в практике по разработкам кафедры «Технология строительных материалов и деревообработка» (ТСМиД) Пензенского ГУАС. В то же время за рубежом они начинают интенсивно использоваться при изготовлении различных конструкций, тонкостенных и высокоархитектурных, ажурных криволинейных покрытий, тавровых и двутавровых балок с комбинированным армированием, мостовых конструкций с прочностью бетона 130–150 МПа, изготавливаемого из литых бетонных самоуплотняющихся смесей с влажностью смеси 9–11%. Учитывая высокую экономическую эффективность таких бетонов, разработка и исследование их являются чрезвычайно актуальными. В США, Японии, Германии и в некоторых европейских странах на протяжении 20 лет ведутся поиски материалов, которые среди всего прочего привели к разработке бетона с высокими эксплуатационными свойствами. Разработаны высокофункциональные бетоны «High Performance Concrete», самоуплотняющиеся порошковые литые бетоны «Reactive Powder Concrete», в которых максимальный размер частиц не превышает 0,6 мм, или мелкозернистые бетоны с зернами размером не выше 8 мм. Это высокопрочные бетоны (ВПБ) с прочностью на сжатие 100–150 МПа. Отдельные виды таких бетонов с МК с прочностью 300–800 МПа не вышли пока из стен лабораторий, их получают в малых образцах при высоких давлениях прессования, при выдерживании прессовок при $t=150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ в течение 1,5–2 ч. Эти бетоны в обозримом будущем не будут использоваться в массовом строительстве, но они показывают колоссальные возможности синтеза новообразований из цементосодержащих веществ при правильной

рецептуре, оптимизированных параметрах прессования и тепловой обработки для получения высокой прочности.

Высокие показатели прочности достигнуты в щебеночных фибробетонах специалистами из Германии. При содержании цемента 630 кг на кубометр бетона, фибры 2,5% по объему прочность бетона составила 150–174 МПа, а удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии

$\rho_{\text{R}}^{\text{уд}} = 3,6\text{--}4,5$ кг/МПа. В Германии фирмой Dickerhoff разработан и реализован сверхвысокопрочный фибробетон с прочностью 195 МПа с использованием цемента Nanodur при расходе его 624 кг/м³. При этом удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии равен 3,2 кг/МПа [1]. В целом, строительство из высокопрочных бетонов в развитых зарубежных

странах осуществляется с $\rho_{\text{R}}^{\text{уд}} = 3,5\text{--}5$ кг/МПа, а из бетонов средних классов В40—В60 удельный расход цемента на единицу прочности составляет $\rho_{\text{R}}^{\text{уд}} = 5\text{--}6$ кг/МПа. В Австрии состоялась «премьера» в мостостроении, где реализован фибробетон классов прочности С165—С185.

Российские результаты в достижении высокой прочности являются более скромными вследствие устаревшей рецептуры сухих компонентов 1840 г. (цемент—песок—щебень) с неоптимальной топологической структурой бетонных смесей, уплотняемых интенсивной вибрацией, иногда с пригрузом. В лабораториях НИИ и в вузах России были получены виброуплотненные бетоны старого поколения с СП из жестких смесей, с прочностью 100–120 МПа через 28 суток твердения. Достижимая прочность через 6–12 месяцев была 130–145 МПа. Бетонные смеси были жесткими и особо жесткими. Уплотняли их интенсивной вибрацией с пригрузом. Говорить о достижениях таких высоких прочностных показателей у бетонов старого поколения, изготовленных из пластичных, особенно высокопластичных с ОК = 15–20 см, не приходится.

Новым этапом в развитии техники бетона в России явилось изготовление высокопрочных бетонов переходного поколения на вяжущих низкой водопотребности (ВНВ), полученных помолом цементного клинкера с сухим СП. В НИИЖБ, ВНИИжелезобетон, МИСИ и МАДИ были достигнуты прочности 100–120 МПа с $\rho_{\text{R}}^{\text{уд}} = 3,8\text{--}4,5$ кг/МПа. Однако цементные заводы, ориентируясь на широкого потребителя, отказались выпускать ВНВ. Кроме того, строго застабилизированное соотношение цемента и дисперсного наполнителя и невозможность варьировать содержанием цемента и минеральной муки в ВНВ-75 или ВНВ-50 не позволяют изготавливать высококачественные бетоны с широким диапазоном марок М200–300 до М1000–1500 и более. На протяжении последних 50 лет с момента появления «слабых» пластифицирующих добавок, а начиная с 1970 г. — с внедрением эффективных СП на нафталиновой и меламиновой основе, выпускаются бетоны переходного поколения. В целом

такие бетоны являются цементоемкими, а производство их — энергоемким. Стратегия снижения объемов бетона в конструкциях за счет высокой прочности не реализуется в России. Бетоны марок М150–М500 выпускаются в количестве 96–97% от всего производства бетонов. Удельный расход цемента в щебеночных бетонах М300–М500 составляет 8–10 кг/МПа, а в песчаных (мелкозернистых) — 9–14 кг/МПа в зависимости от марки бетона.

Причины большого отставания от передовых стран состоят в использовании устаревших составов плотноупакованных бетонных смесей. Прошло более 150 лет, а рецептура из трех сухих компонентов осталась прежней, но с добавлением СП, а на ответственных московских стойках — дополнительно и с МК. Совершенно не используются основные положения физикохимии поверхностных явлений в дисперсных системах и возможности предельного разжижения высококонцентрированных дисперсных систем. Не учитывается положение о том, что с малым количеством воды саморастекающиеся и самоуплотняющиеся бетонные смеси в присутствии СП и ГП получают только при использовании значительного количества микродисперсных добавок, т.е. несравненно большего количества, чем при использовании 10–20% МК от массы цемента. Необходимо понимать, что зернистый песок и кусковой щебень реологически индифферентны к действию СП, и при очень высоком содержании их в бетонных смесях не удастся значительно снизить вязкость и предел текучести смесей при обычном содержании цемента. Для реализации реологии необходимо увеличение тонкодисперсной реологической матрицы за счет порошкообразного наполнителя в песчаные и щебеночные бетоны при высоком объемном содержании его в бетонных смесях. Такие песчаные и щебеночные бетоны мы называем порошково-активированными с высоким содержанием суспензионной составляющей.

Примером достижения достаточно высоких для России физико-технических свойств бетонов из бетонных смесей марок П5 являются показатели высокопрочного щебеночного бетона переходного поколения с добавками МК и СП, использованного при строительстве комплекса «Москва-Сити». Максимальная прочность бетона в конструкциях составляла 95–105 МПа при удельном расходе цемента $\rho_{\text{Р}}^{\text{уд}} = 4,5\text{--}4,7$ кг/МПа. Бетон был изготовлен с 10–20% высокодисперсного МК (стекловидно-аморфного SiO_2), основной размер частиц которого 200–400 нм.

В российской практике производства бетона встречаются отдельные примеры модификаций бетона малыми добавками молотого кварцевого песка или известняковой муки. Бетон из бетонной смеси с осадкой конуса 2–5 см с расходом цемента 300–350 кг/м³, с добавкой кварцевой муки 10–20% от массы цемента имел прочность на сжатие 60–77 МПа с удельным расходом цемента 4,2–5,0 кг/МПа.

Порошковые и реакционно-порошковые бетоны будущего в России не производятся ни на одном бетонном и железобетонном заводе. Если говорить о фибробетонах будущего с прочностью

при сжатии 150–220 МПа и с прочностью на растяжение при изгибе 30–40 МПа, то такие малодефектные и бездефектные бетоны могут быть получены только из порошковых, реакционно-порошковых и порошково-активированных песчаных смесей.

За рубежом и в России начинают внедряться реальные нанотехнологии бетонов. К ним относятся бетоны с микрокремнеземом, хотя он по размерам частиц относится к верхнему нанометрическому размерному уровню от 200 до 1000 нм. С развитием нанотехнологий в различных отраслях промышленности они занимают свое место и в технологиях строительных материалов. Известно, что нанометровый диапазон измерений размеров 1–100 нм открывает новые физические и химические свойства веществ. Как отмечает И.П. Суздальцев: «...в этом диапазоне нигде так близко не сходятся физика, химия и биология» [8]. В последнем десятилетии XX в. произошло выделение таких понятий, как «нанокластер», «наноструктура», «наносистема», и связанных с ними явлений в отдельную область физикохимии. Но нельзя забывать о том, что за рубежом и в России 20 и более лет назад начинался синтез наноструктур и нанокластеров, существовали нанотехнологии. Нанотехнологии в то время назывались микротехнологиями. Это было связано с тем, что как за рубежом, так и в России отстали во времени с введением в обиход международной масштабной единицы «нанометр». Во многих академических и технических журналах, в монографиях, изданных в 1975–1990 гг., нанометрический масштабный уровень обозначался долями микрометра и именовался миллимикронным (ммк). В неорганической и органической химии и физикохимии поверхностей наиболее часто используется ангстрем, особенно при изложении размерных величин ионов, атомов, молекул, длин химических связей, расстояний ближнего и дальнего взаимодействий. Пикомасштабный уровень, к которому относится ангстрем, также не нашел в то время применения в химии.

В настоящее время появились нанотехнологии в цементных, гипсовых и известковых технологиях с использованием углеродных частиц одномерных нанотрубок, фуллеренов, фуллероидов, астраленов. При этом в некоторых публикациях о нанобетонах при введении 10–50 г (до 100 г) наноуглеродных модификаторов, вводимых в 1 куб. м бетона, достигаются, якобы, значительные эффекты при получении более высокой прочности, морозостойкости, водостойкости и других позитивных свойств бетонов по сравнению с контрольными бетонами. Но при сверхмалом количестве наночастиц в смеси с СП или с МК положительный эффект приписывают наночастицам, а не СП и МК. Но такие заявления и публикации являются фальсификацией. Почему все исследователи нанотехнологий бетонов с наноуглеродными добавками дозируют их в чрезвычайно малых количествах? Это связано с тем, что при увеличении дозировок существенно возрастает водопотребность бетонных смесей и суперпластификаторы становятся бесполезными. Теоретические расчеты, выполненные по нашим формулам, выведенным из строгих геометрических соображений, свидетельствуют о том, что наночастицы располагаются дискретно в цементной

матрице на больших расстояниях друг от друга. Эти расстояния превышают размеры цементных частиц в десятки и в сотни раз. При этом все исследования по изучению действия наноуглеродных добавок часто проводятся в бетонах старого поколения. Полученные результаты не выдерживают никакой конкуренции с высокопрочными бетонами нового поколения (БНП), в которых используются микрометрические компоненты (цемент и каменная мука) и миллиметрические компоненты (тонкий песок и песок-заполнитель). У таких песчаных бетонов с суперпластификаторами достигается прочность 120–140 МПа. У нанотехнологий бетонов с введением микродоз наночастиц в количестве 0,05–0,0005% от массы цемента [4, 5, 9, 10] нет будущего. Некоторые исследователи «додумываются» до крайности: предлагают вводить в бетон 10^{-4} – 10^{-5} % нанодобавок от массы цемента, т.е. 2,5–0,25 г на 1 куб. м бетона [7]! У других исследователей [6] нанодобавка TiO_2 в количестве 0,1% от массы цемента «сотворила настоящее чудо»: коэффициент коррозионной стойкости повысился до 0,91–0,95 по сравнению с контрольным коэффициентом, равным 0,5–0,56! Куда исчезли гидролизная известь и гидросиликаты кальция, разрушающиеся кислотами (кислотно-щелочная реакция)? Неужели они в бетоне превратились в кварц или корунд? Это полное незнание химии. И на этих исследовательских материалах будут защищаться (если уже не защитились) аспиранты.

За 15 лет нет ни одного предприятия ни за рубежом, ни в России, где бы использовались микродозировки нанодобавок. Наноразмерными добавками, определяющими более эффективные реальные нанотехнологии в бетоне, могут быть только нанокремнеземы конденсированные, пирогенные и химически осажденные, вводимые не в микродозах, а в достаточных количествах, не менее 1–3% от массы цемента. Механизм их действия связан не только с нанометрическим зародышеобразованием на их поверхности предшественников кристаллов новообразований, но и с химической реакцией с ними гидролизной извести. Только эта реакция позволит получить дополнительное количество цементирующего вещества в «пустом» пространстве капиллярных и гелевых пор в виде прочного тоберморита, а при прогреве — и более прочных ксонотлита, трукотита с малым количеством гидратной воды. Реальными нанотехнологиями являются те, при которых в бетонные смеси добавляется 1–1,5 % от массы цемента нанометрических гидросиликатов кальция [3].

Бетоны нового поколения – это бетоны высокой плотности с новой рецептурой и с новым структурно-топологическим строением, которые обеспечивают низкий удельный расход цемента на единицу прочности $\Pi_R^{\text{уд}} = 2,5\text{--}5,0 \text{ кг/МПа}$) или, соответственно, высокую удельную прочность на единицу расхода цемента – 0,2–0,4 МПа/кг). Бетоны переходного поколения, содержащие в своем составе не только высокоэффективные ГП, но и высокодисперсные реакционно-химические пуццоланические добавки МК и дегидратированного каолина и иного, имеют повышенную прочность. Более дорогие, чем цемент, дефицитные наноразмерные (верхний нанометрический

уровень от 100 до 1000 нм) пуццоланические добавки, вводимые в бетон в относительно малых количествах — 10—20% от массы цемента, обеспечивают пониженный $\Pi_R^{уд} = 5-6$ кг/МПа, но лишь в бетонах с высоким расходом цемента (500 кг/м³ и более). В «тощих» бетонах с расходом цемента 150–250 кг/м³, когда содержание мелкого и крупного заполнителя превышает 2000–2100 кг/м³, нельзя обеспечить $\Pi_R^{уд}$ менее 8–9 кг/МПа. Для таких бетонов переходного этапа нужна новая рецептура наполнителей и заполнителей, включающая дешевые и доступные микрометрические добавки, которые «лежат» на земле. Новая рецептура для БНП — это обязательное присутствие в составе дополнительного и значительного количества дисперсных микроразмерных (нижний и средний микрометрический уровень от 1 до 100 мкм) наполнителей, увеличивающих совместно с цементом (той же или более высокой дисперсности) объем водно-дисперсной реологической матрицы. Таким образом, порошкообразные микрометрические наполнители являются реологически-активными добавками в смеси с цементно-водной пластифицированной дисперсией. На кафедре ТСМиД Пензенского ГУАС в 2010 г. были получены различные бетоны с $\Pi_R^{уд}$ от 2,9 до 3,9 кг/МПа и наиболее эффективный порошково-активированный щебеночный бетон с расходом цемента 319 кг/м³, с расходом МК 7% от массы цемента, с прочностью 134 МПа и $\Pi_R^{уд} = 2,4$ кг/МПа! В последние годы на кафедре ТСМиД получены карбонатные самоуплотняющиеся песчаные бетоны без МК (ОК=27 см) с использованием известняковой каменной муки, дробленых тонкого известнякового песка и песка-заполнителя фракции до 2,5(5) мм с прочностью 120–150 МПа с морозостойкостью более 1000 циклов без потери прочности. Такие технологии мы называем микро-миллиметрические. Они перспективны потому, что не используются реакционно-активные нанометрические пуццоланические добавки. Суточная прочность таких бетонов при твердении при $t = 20^\circ\text{C}$ составляет от 50 до 80 МПа, что особенно важно для монолитного строительства.

В бетонах старого поколения, состоящих из цемента, песка, щебня и воды, ни СП, ни ГП не в состоянии кардинально изменить топологическую структуру бетона, кроме некоторого уменьшения капиллярной пористости и получения более компактной упаковки частиц цемента, песка и мелко- и крупнозернистого щебня. Поэтому бесполезны попытки бетоноведов-исследователей существенно снизить расход цемента в бетонах старого поколения, особенно с малыми расходами цемента, за счет СП и ГП и достичь высокой удельной прочности на единицу расхода цемента.

Кроме оптимального количества микрометрических и частично нанометрических частиц наполнителей, в бетонах нового поколения должен быть тонкий песок фракции 0,1–0,6 мм (особенно при отсутствии МК), поддерживающий малоструктурное реологическое состояние и

усиливающий водоредуцирующее действие СП. Такой песок может специально и не добавляться, если его доля в песке-заполнителе достаточна для данной марки бетона.

Естественно, что макрометрические песок-заполнитель, крупный заполнитель должны иметь оптимальную гранулометрию. Поэтому все классические принципы подбора оптимальной гранулометрии песка и щебня с высокой насыпной плотностью, разработанные Ю.М. Баженовым и другими учеными, остаются и являются незыблемыми. Если в бетонах старого поколения и в бетонах переходного этапа заполнители должны были обеспечивать плотноупакованную контактную структуру зерен с небольшой раздвижкой и с наименьшим количеством пустот, то в структуре бетонов нового поколения зерна значительно раздвигаются в трехмерном пространстве за счет уменьшения содержания песка-заполнителя и щебня.

Переход от одного вида бетонов нового поколения к последующим реализуется за счет добавления дополнительных компонентов и изменения реологических матриц. При использовании новой топологической структуры нами получены реакционно-порошковые фибробетоны с прочностью на сжатие 175–200 МПа и более, с прочностью на растяжение при изгибе 30–40 МПа, которые не имеют аналогов в России. Малоцементные порошково-активированные песчаные и щебеночные бетоны общестроительного назначения с прочностью 30–50 МПа с низким водопоглощением, с высокой водонепроницаемостью и морозостойкостью более F300 получены при расходах цемента 170–220 кг/м³.

Приведенные показатели являются самым убедительным доказательством правильности выбранного направления на пути к прогрессу в технике и технологии бетонов за рубежом и в России. За последние 10 лет такое направление оправдывается и технически, и экономически, и экологически. Снижение расходов цемента — это значительное уменьшение эмиссии углекислого газа и использование отходов камнедробления фракции 0,5 мм. Будет ли через 10 лет оправдан «нанополлерено-фуллероидный бум» в технологии бетонов? Ждать осталось немного. Жизнь покажет. Но она показывает уже сейчас, что центр тяжести надо переносить не на наращивание темпов производства цемента, а на менее энергоемкую и экологичную отрасль — подготовку качественных фракционированных заполнителей с кубовидной формой частиц для щебеночных бетонов, классифицированных песков без глинистых примесей, молотых кварцевых песков или тонкодисперсных известняков, доломитов, гранитов, сиенитов, базальтов, диабазов, трассов, вулканических стекол и других плотных пород.

Революционные преобразования в технике и в технологии бетонов будут осуществляться в первую очередь за счет количественного расширения компонентного состава и использования эффективных СП, обеспечивающих малоструктурное реологическое состояние бетонных смесей благодаря большому объему суспензионной составляющей и превращение смеси в

саморастекающиеся и самоуплотняющиеся при малом содержании воды, с формированием высокой прочности бетонов и расширением многих важных функций [2].

Список литературы

1. Дейзе Т. Переход с технологии Микродур к технологии Нанодур. Применение стандартных цементов в практике бетонов со сверхвысокими эксплуатационными свойствами / Т. Дейзе, О. Хорнунг, М. Нельман // Бетонный завод. – 2009. – № 3. – С. 4–11.
2. Калашников В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения // Бетон и железобетон. – 2012. – № 1. – С. 82.
3. Калашников В.И. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев В.Т., М.Н. Мороз, И.Ю. Троянов, В.М. Володин, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 88–91.
4. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Карпиков Е.Г. Особенности структурообразования цементного камня с углерод-кремнеземистой нанодисперсной добавкой / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, Е.Г. Карпиков // Строительные материалы. – 2011. – № 9. – С. 66–67.
5. Пономарев А.Н. Нанобетон – концепция и проблемы. Синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и армирующей фибры // Строительные материалы. – 2007. – № 6. – С. 2–4.
6. Постникова О.А., Лукутцова Н.П., Мацаенко А.А., Пинчукова И.Н. Оценка коррозионной стойкости декоративного бетона с добавкой нанодисперсного диоксида титана / О.А. Постникова, Н.П. Лукутцова, А.А. Мацаенко, И.Н. Пинчукова // Бетон и железобетон – взгляд в будущее. III Всероссийская (II Международная) конференция по бетону и железобетону. Т. 6. – М., 2014. – С. 199–204.
7. Пухаренко Ю.В., Летенко Д.Г., Никитин В.А., Чарыков Н.А. Модификаторы бетона на основе нанодисперсных углеродных фуллероидных материалов и водорастворимых форм производных фуллеренов / Ю.В. Пухаренко, Д.Г. Летенко, В.А. Никитин, Н.А. Чарыков // Бетон и железобетон – взгляд в будущее. III Всероссийская (II Международная) конференция по бетону и железобетону. Т. 6. – М., 2014. – С. 212–218.
8. Суздаев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
9. Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Лхасаранов С.А. Бетоны на композиционных вяжущих с нанодисперсной фуллеренсодержащей добавкой / Л.А. Урханова, С.Л. Буянтуев, С.А. Лхасаранов // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – № 1. – С. 39–45.
10. Яковлев Г.И. Структуризация цементных вяжущих матриц многослойными углеродными нанотрубками / Г.И. Яковлев, Г.Н. Первушин, И.А. Пудов, И.Г. Дулесова, А.Ф. Бурьянов, М.

Сабер // Строительные материалы. – 2011. – № 11. – С. 22–24.

Рецензенты:

Логанина В.И., д.т.н., проф. кафедры «Управление качеством и технологии строительного производства» ФГБОУ ВПО «ПГУАС», г. Пенза;

Макридин Н.И., д.т.н., проф. кафедры «ТСМиД» ФГБОУ ВПО «ПГУАС», г. Пенза.