УДК 691.32

В.И. КАЛАШНИКОВ, д-р техн. наук, О.В. СУЗДАЛЬЦЕВ, инженер,
М.Н. МОРОЗ, канд. техн. наук (mn.moroz80@gmail.com), В.В. ПАУСК, инженер
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)

Морозостойкость окрашенных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов*

Представлены результаты оценки морозостойкости самоуплотняющегося сверхвысокопрочного цветного порошково-активированного карбонатного мелкозернистого бетона прочностью 140–150 МПа, изготовленного без микрокремнезема. Показательно, что в высокопрочном карбонатном бетоне дисперсный наполнитель, тонкозернистый наполнитель и песок-заполнитель получены из отсева камнедробления известняка и при испытании на морозостойкость он выдержал 1000 циклов попеременного замораживания-оттаивания практически без потери массы и с уменьшением прочности на 2%.

Ключевые слова: сверхвысокопрочные бетоны, самоуплотняющийся бетон, архитектурно-декоративный бетон, отделочные материалы, долговечность.

V.I. KALASHNIKOV, Doctor of Sciences (Engineering), O.V. SUZDALTSEV, Engineer,
M.N. MOROZ, Candidate of Sciences (Engineering) (mn.moroz80@gmail.com), V.V. PAUSK, Engineer
Penza State University of Architecture and Civil Engineering (28, G. Titova Street, Penza, 440028, Russian Federation)

Frost Resistance of Coloured Architectural-Decorative Powder-Activated Sand Concretes*

Results of the assessment of frost resistance of self-compacting, colour, ultra-high-strength, powder-activated, carbonate fine concrete of 140–150 MPa strength produced without microsilica are presented. It is significant that the lime disperse filler, fine lime sand, and lime sand-filler, which are contained in the high-strength carbonate concrete, are produced from the waste of limestone crushing and in the course of testing for frost resistance the concrete withstands one thousand cycles of alternating freezing-thawing practically without weight loss and with the decrease in strength by 2%.

Keywords: ultra-high-strength concretes, self-compacting concretes, architectural-decorative concrete, finishing materials, durability.

Самоуплотняющийся архитектурно-декоративный бетон является новейшим отделочным материалом. Он вытесняет отделочную керамику в связи с возможностью изготовления большеразмерных декоративных изделий не только плоской, но и разнообразной, изогнутой формы (3d) с плавным сопряжением поверхностей. Такой бетон наилучшим образом интегрируется в органичную архитектуру, великолепно вписывается в любой дизайн, включая экстравагантный футуристический, если бетон армируется металлической [1] или неметаллической фиброй. Необходимые реологические свойства бетонной смеси изменяются широким ассортиментом продукции строительной химии.

Из декоративных бетонов, в том числе высокопрочных конструкционных, создаются новые архитектурные контексты в зданиях и сооружениях и в их ансамблях с высокохудожественным оформлением и неповторимым своеобразием. Выпуклости и углубления, распускающиеся цветы на гладкой бесшовной поверхности с игрой света и тени на отделочных элементах сложных форм, отделанных с учетом символики разных стран, национальных мотивов с соответствующим идейным смыслом с филигранными прозрачными рисунками, придающими ощущение легкости огромным зданиям, определяют строительство из декоративного бетона как искусство [2].

Для большинства регионов России необходимы высокоморозостойкие архитектурно-отделочные бетоны. Именно это свойство в архитектурно-декоративных бетонах, как правило, определяет срок их эксплуатации без потери прочностных и эстетических качеств. Под влиянием воздействий окружающей среды архитектурно-декоративные бетоны подвергаются увлажнению и высушиванию, замораживанию-оттаиванию в зависимости от условий эксплуатации. По теории разрушения пористых материалов от мороза [3], вода в порах бетона при отрицательной температуре кристаллизуется с увеличением объема. Лед создает высокие растягивающие напряжения на стенках пор, что приводит к разрушению материала. Помимо кристаллизационного давления льда, существует теория гидравлического давления воды на стенки пор от увеличения объема льда вследствие выдавливания влаги льдом от поверхности с более низкой температурой внутрь материала с более высокой. Таким образом, величина создаваемых напряжений и, как следствие, морозостойкость бетона зависят от пористой структуры материала. Принято считать, что с увеличением относительного объема резервных пор в объеме бетона, т. е. с увеличением его условно-замкнутой пористости, морозостойкость повышается. Поэтому для достижения высокой морозостойкости в бетонные смеси необходимо вводить воздухововлекающие добавки с целью получения резервных сферических пор. Так, для повышения морозостойкости дорожных бетонов стандарты ряда стран регламентируют содержание вовлеченного воздуха не менее 5% от объема бетона.

Как правило, для бетонов старого поколения марка по морозостойкости не превышает F300–400, что является вполне достаточным для высокой долговечности бетонов. Для архитектурно-декоративных окрашенных бетонов период эксплуатации до исчезновения декоративной выразительности поверхностей значительно сокращается.

В работе ставилась задача существенного повышения морозостойкости без использования воздухововлекающих добавок цветных песчаных бетонов нового поколения на основе отходов камнедробления горных

* Работа выполнена при поддержке Стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2013–2015 годы (СП-4621.2013.1).

* The work is executed under support of the RF President's Grants for young scientists and post-graduates carrying out prospective scientific research and developments in priority directions of modernization of the Russian economy for 2013-2015 (SP-4621.2013.1).

пород. Обзор отечественных и зарубежных источников литературы не позволил выявить результаты исследований прочности и морозостойкости самоуплотняющихся архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных сверхвысокопрочных бетонов, в том числе окрашенных. ***Исходя из теоретических представлений, разработанных на кафедре «ТСМиД» ПГУАС, саморастекаемость, самонивелируемость и самоуплотняемость бетонных смесей определяются содержанием в бетонной смеси высококонцентрированной агрегативно-устойчивой водно-дисперсной суспензии.*** Суспензионными бетонами, состоящими из водно-дисперсной суспензии с дискретными включениями тонкого песка, являются достаточно известные порошковые и реакционно-порошковые бетоны. ***Все другие песчаные и щебеночные бетоны должны содержать высокое объемное количество водно-дисперсной суспензионной составляющей.*** В самоуплотняющихся песчаных бетонах содержание водно-дисперсной суспензии доходит до 40–60%. Объем водно-дисперсной суспензии $V_{вд}$ состоит из абсолютного объема дисперсии цемента, каменной муки, высокодисперсного пигмента и воды. Объем водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии $V_{вдт}$ слагается из объема водно-дисперсной суспензии и абсолютного объема тонкозернистой породы ($П_т$). Объем воды на эти суспензии условно равен объему воды затворения бетонной смеси. Объемные концентрации этих суспензий $С_{вд}$ и $С_{вдт}$ в бетонной смеси равны отношению объемов этих суспензий к объему бетонной смеси. Кроме этих определяющих реологию бетонных смесей характеристик вычислялись условные реологические матрицы первого рода – превышение объема водно-дисперсной суспензии над абсолютным объемом тонкозернистой породы $И^{вд}_{Пт}$ и условная реологическая матрица второго рода $И^{вдт}_{Пз}$ – превышение объема водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии над объемом песка-заполнителя (дробленого горного песка):

$$И^{вд}_{Пт} = (V_{вд}/П_т) = (V_ц+V_{пм}+V_п+V_в)/V_т;$$

$$И^{вдт}_{Пз} = (V_{вдт}/П_з) = (V_ц+V_{пм}+V_п+V_в+V_т)/V_з.$$

Для проведения эксперимента была изготовлена серия образцов-кубов с размером ребра 100 мм. Состав карбонатного бетона представлен белым цементом (Ц), известняковым дисперсным наполнителем ($П_м$), тонким известняковым песком фракции 0,16–0,63 мм ($П_т$), известняковым песком-заполнителем фракции 0,63–2,5 мм ($П_з$) и пигментом (П). Все компоненты получены из отходов камнедробления плотного известняка фракции 0–5 мм. Дробимость известняка составляла Д1000. Для окрашивания бетона использовался железноокисный пигмент. Бетонная смесь была самоуплотняющейся с осадкой конуса 28 см; объемное содержание водно-дисперсной суспензии ($С_{вд}$) составляло 56%; содержание водно-дисперсно-тонкозернистой ($С_{вдт}$) – 82% (при условном распределении всей воды затворения на каждую суспензию); содержание дробленого известнякового песка-заполнителя всего 18%. Объемная концентрация твердой фазы в объеме бетонной смеси $С^{тв}_v$ равна 80,2%. Все значения объемных содержаний компонентов и условных реологических матриц бетонов принимали в соответствии с ранее разработанными рецептурами и новыми представлениями о порошково-активированных бетонах с повышенным содержанием суспензионных составляющих [4].

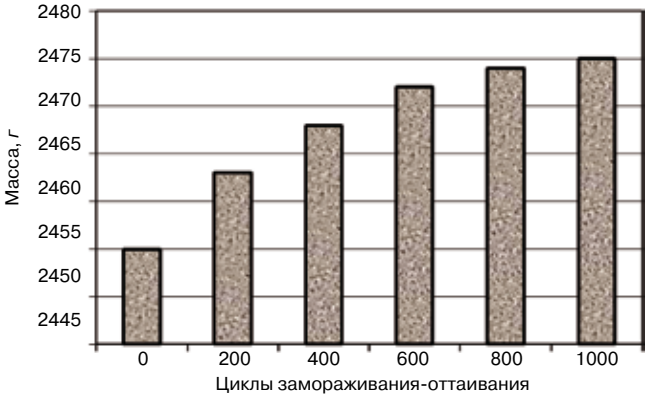

Рис. 1. Изменение массы образца в зависимости от увеличения количества циклов замораживания-оттаивания

Состав, свойства бетонной смеси и прочностные показатели бетонов представлены в таблице. Из представленных значений следует, что основной всеобъемлющий технический, экономический и экологический критерий – удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии ($Ц^{уд}_{Rc}$) является низким для цементоемких песчаных высокопрочных бетонов. Обратный

Наименование компонентов	На 1 м³, кг	Объем на 1 м³, л	В/Ц, В/Т	ρ, кг/м³	$\frac{П_м}{Ц}$	$\frac{П_т}{Ц}$	$\frac{П_з}{Ц}$	Прочность МПа $R_{сж}/R_{изг}$ через, сут		
								1	7	28
ПАПБ-23										
Цемент белый Египетский СЕМ 52,5	730	235,4	0,267	$ρ_{вл}$ 1 сут	0,41	0,96	0,64	$R_{сж}$=88 $R_{из}$=12	$R_{сж}$=124 $R_{из}$=14,6	$R_{сж}$=144 $R_{из}$= 19,7
Пигмент красный (П), 5% от Ц	36	6,9		2454	$\frac{\Sigma П}{Ц}$ = 2,01					
ГП Melflux 5581F 1% от Ц	7	5,4								
Известняк молотый ($П_м$) $S_{уд}$=3700 см²/г	300	111,1	0,087	$ρ_{теор}$ 2470	$V_{вд}$ = 553,8 л; $С_{вд}$ = 56,1%; $V_{вдт}$ = 813 л; $С_{вдт}$ = 82,3%; $С^{тв}_v$ = 80,2%; $И^{вд}_{Пт}$ = 2,12; $И^{вдт}_{Пз}$ = 4,65			$Ц^{уд}_{Rc}$ = 5 кг/МПа; $R^{уд}_{ц}$ = 0,2 МПа/кг; $Ц^{уд}_{Rи}$ = 36,5 кг/МПа; $R_{сж}/R_и$ = 7,3		
Песок тонкий известняк ($П_т$), фр. 0,16–0,63 мм	700	259,2		$K_{уп}$ 0,993						
Песок крупный известняк ($П_з$), фр. 0,63–2,5 мм	470	174								
$ΣМ_{сух}$ $ΣV_{сух}$ Вода	2243 – 195	– 792 195	Осадка конуса 28 см							
$М_{б.с}$	2438	–								
$V_{б.с}$	–	987								

ему показатель $R_{ц}^{уд}$ достаточно высокий. Удельный расход цемента на единицу прочности при изгибе $Ц_{R_и}^{уд}$ в два раза меньше, чем у щебеночного бетона класса В40.

Определение морозостойкости проводили согласно ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по третьей ускоренной методике при насыщении образцов 5% водным раствором хлорида натрия. Испытания осуществляли в независимой лаборатории производственного предприятия ООО «Пензенское управление строительства» в морозильной камере отечественного производства типа КТХ-14 при температуре -50°С по режиму: 8 ч замораживания, 16 ч оттаивания.

На рис. 1 представлена кинетика изменения массы образца через 200 циклов замораживания-оттаивания, до 1000 циклов включительно.

Анализируя диаграмму, можно говорить о том, что в отличие от потери массы бетонов старого и переходного поколений при испытании на морозостойкость у бетонов нового поколения наблюдается прирост массы после 1000 циклов, равный 0,81% от массы образцов, насыщенных солевым раствором перед началом испытания. Такой прирост массы свидетельствует об отсутствии деструктивных процессов, выраженных отшелушиванием бетона в поверхности и в угловых сопряжениях образцов бетона. Это подтверждается визуальной оценкой образцов-кубов до испытания и после 1000 циклов замораживания-оттаивания (рис. 2), что связано с чрезвычайно низким водопоглощениием (0,8% через 3 сут).

Деструктивные процессы, связанные с разрушением образца от мороза, не проявляются, а оттаивание в течение последующих 16 ч после циклов замораживания создает резерв прочности за счет протекающей гидратации цемента. Судя по кинетике изменения массы образцов, можно предположить, что прирост массы после 1000 циклов испытания обусловлен длительным массопоглощением и стабилизируется. Возможно, после 1100–1200 циклов замораживания-оттаивания начнут преобладать деструктивные процессы с потерей массы и прочностных показателей до регламентируемых ГОСТом значений.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что после 1000 циклов замораживания-оттаивания вопреки ожиданиям наблюдается прирост массы образцов без видимых деструктивных изменений. А это гарантирует малую потерю прочности или сохранение ее. В этой связи было необходимым доказать отсутствие существенных деструктивных процессов и изменения прочности. Нормативный предел прочности при сжатии исследуемого бетона после 28 сут твердения в нормально-влажностных условиях составлял 144 МПа, а к моменту окончания испытания на морозостойкость контрольные образцы, хранившиеся в солевом растворе, имели прочность 165 МПа. После 1000 циклов замораживания-оттаивания прочность образцов бетона уменьшилась до 162 МПа, т. е. потеря прочности составила всего 2%, что находится в пределах ошибки опыта. Это подтверждает высказанную гипотезу (по результатам прироста массы образцов) о том, что конструктивные процессы структурообразования в высокоплотных, сверхвысокопрочных бетонах, бесспорно, продолжаются и в жестких условиях эксплуатации. Деструкция не проявляется по результатам изменения масс не только под воздействием расширения поглощенной воды при переходе ее в лед, но и в результате расшатывания структуры материала при знакопеременном температурном расширении-сжатии компонентов бетона с различными коэффициентами температурного расширения (третья гипотеза разрушения материала от мороза). Закономерно и то, что в таком бетоне имеется достаточное количество резервных пор без использования воздухововлекающих добавок, обязательно рекомендуемых к применению стандартами всех стран для дорожных бетонов старого поколения. В бетонах это количество пор может быть небольшим, но вполне достаточным для размещения выдавливаемой в них воды в количестве 10% от всей поглощенной воды. А водопоглощение разработанных бетонов чрезвычайно малое – 0,8–1,5% от массы, т. е. в 4–6 раз меньше, чем в бетонах старого поколения. Температурных напряжений и расшатывания структуры практически быть не должно, так как использована одна и та же горная порода для получения муки, тонкого песка и песка-заполнителя. Почти все компоненты различного размерного уровня имеют одинаковый коэффициент температурного расширения, за исключением цементного камня. А это дает основания утверждать, что морозостойкие бетоны являются также термостойкими, изготовленными преимущественно из одинаковых по природе компонентов. Высокая термостойкость бетонов в диапазоне температуры до 800°С доказана авторами на примере самоуплотняющегося порошково-активированного жаростойкого бетона, все компоненты которого изготовлены из шлака [5].

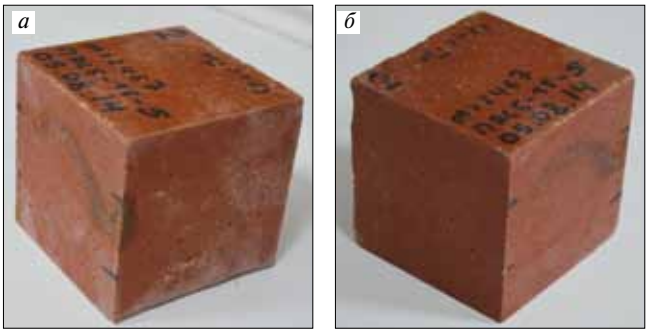

Рис. 2. Внешний вид образцов окрашенного порошково-активированного песчаного бетона после испытания на морозостойкость: *а* – образец, насыщенный в солевом растворе (перед началом испытания); *б* – образец после 1000 циклов замораживания-оттаивания

Кроме изучения морозостойкости архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов была изучена возможность сохранения декоративного вида поверхности путем поверхностной гидрофобизации. Результаты исследования представлялись особенно интересными исходя из того, что ранее (в работе [6]) было показано, что ни поверхностная, ни объемная гидрофобизация существенно не влияет на морозостойкость. Но эти исследования производились на минерально-шлаковых, достаточно пористых прессованных бетонах с маркой по морозостойкости не более F400–500. Поэтому было исследовано влияние поверхностной гидрофобизации на морозостойкость высокопрочных порошково-активированных песчаных бетонов. Для этого при испытании образцов на морозостойкость часть из них была пропитана в два слоя гидрофобизирующим раствором «Пента-824» с уайт-спиритом в соотношении 1:1. Результаты эксперимента на протяжении испытания на морозостойкость, до 1000 циклов замораживания-оттаивания включительно, не позволили выявить разницы в показателях гидрофобизированных и контрольных составов, у которых наблюдался адекватный прирост прочности и массы образцов. Несмотря на снижение водопоглощения, особенно в первые сутки экспонирования бетона в воде, поверхностная гидрофобизация не оказывает заметного влияния на повышение морозостойкости сверхвысокопрочных порошково-активированных песчаных бетонов. Но важным преимуществом поверхностно-пропиточной гидрофобизации является лучшее сохранение внешнего вида поверхности бетона. Учитывая, что гидрофобизированные архитектурно-декоративные бетоны, поверхность которых не будет подвергнута воздействию солевого раствора NaCl, постоянному действию отрицатель-

Рис. 3. Испытание образца-куба с ребром 100 мм окрашенного порошково-активированного песчаного бетона после 1000 циклов замораживания-оттаивания при предельной нагрузке 162 т: *а* – начало испытания образца; *б* – момент пылеобразования при «взрывном» разрушении; *в* – образец после разрушения

ной температуры, равной -50°С, а лишь периодическому действию одностороннего косого дождя, можно с уверенностью гарантировать на долгие годы эффективность защитного покрытия гидрофобизированного слоя.

Для разработанных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов характерны не только рекордные показатели прочности и морозостойкости, но и необычная картина разрушения образцов (рис. 3).

Отмечается, что при нагрузке 162 т на кубический образец с ребром 100 мм происходит его «взрывное» разрушение с образованием большого количества пыли и разлетающихся осколков бетона.

Это свидетельствует о высокой хрупкости бетона. Для архитектурно-декоративных бетонов сверхвысокая прочность определяет и высокую функциональность бетона: низкие усадочные деформации, высокую коррозионную стойкость и водонепроницаемость, низкую ползучесть. Усадка исследуемого бетона чрезвычайно низкая – 0,3 мм/м, водонепроницаемость более W20. Что касается высокой хрупкости бетона, которую часто оценивают по отношению прочности на сжатие $R_{сж}$ к прочности на осевое растяжение или к прочности на растяжение при изгибе $R_и$, то $R_{сж}/R_и$ = 7,3. У бетона с $R_{сж}$ = 50 МПа это отношение равно 7.

Хрупкий характер разрушения легко устраняется стальной, минеральной и углеродной фиброй. Важно то, что при исключении из состава АДБ пигмента такой бетон может быть конструкционным (для изготовления железобетонных конструкций) без использования дефицитного и дорогостоящего микрокремнезема, т. е. без использования нанотехнологической платформы.

Аналогичные высокопрочные самоуплотняющиеся неокрашенные бетоны получены авторами при использовании в качестве всех дисперсных и зернистых компонентов из гранита, мрамора, базальта, диабаза и т. п.

В настоящее время появились карбонатные цементы низкой водопотребности, полученные совместным домолом цемента с известняком, с использованием которых получены высокопрочные бетоны [7]. Как следует из полученных результатов, при расширении возможности использования прочных известняков на всю номенклатуру дисперсно-зернистых компонентов мелкозернистого бетона могут быть достигнуты очень высокие технические показатели.

Технология порошковой активации является наиболее перспективной и будет развиваться, как бы долго ни выпускались в России бетоны старого поколения с СП. Главное то, что все компоненты, кроме цемента, получены из огромных отходов камнедробления.

Список литературы

1. Даниель Пфеффер Серафим. Использование бетона, армированного стекловолокном в конструкциях с высокими архитектурными требованиями. *СРІ. Международное бетонное производство.* 2012. № 2. С. 130–134.
2. Цветы из бетона. Новое здание музея Форарльберга в Брегенце. *СРІ. Международное бетонное производство.* 2013. № 5. С. 24–26.
3. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1983. 131 с.
4. Калашников В.И., Суздальцев О.В., Дрянин Р.Н., Сехпосян Г.П. Роль дисперсных и тонкозернистых наполнителей в бетонах нового поколения // *Известия вузов. Строительство.* 2014. № 7. С. 11–21.
5. Kalashnikov V., Kornienko P., Gorshkova L., Gakshteter G., Sarsenbayeva A. Development of compositions of self-compacting fine-grained refractoty concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology.* 2014. Vol. 12, pp. 299–309.
6. Мороз М.Н., Калашников В.И., Петухов А.В. Морозостойкость гидрофобизированных бетонов. *Молодой ученый.* 2014. № 19. С. 222–225.
7. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р., Гиззатуллин А.Р., Харченко И.Я. Карбонатные цементы низкой водопотребности — зеленая альтернатива цементной индустрии России // *Строительные материалы.* 2014. № 5. С. 76–83.

References

1. Daniel Pfeffer Seraphim. The use of glass fiber reinforced concrete in structures with high architectural requirements. *SPI. Mezhdunarodnoe betonnoe proizvodstvo.* 2012. No. 2, pp. 130–134. (In Russian).
2. Flowers made of concrete. The new museum building in Vorarlberg Bregenz. *SPI. Mezhdunarodnoe betonnoe proizvodstvo.* 2013. No. 5, pp. 24–26. (In Russian).
3. Kuntcevich O.V. Betony vysokoj morozostojkosti dlja sooruzhenij Krajnego Severa [Concrete structures for high frost resistance of the Far North]. Leningrad: Stroiizdat. 1983. 131 p.
4. Kalashnikov V.I., Suzdaltsev O.V., Dryanin R.A., Sehposyan G.P. The role of dispersed and fine-grained fillers in concrete new generation. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo.* 2014. No. 7, pp. 11–21. (In Russian).
5. Kalashnikov V., Kornienko P., Gorshkova L., Gakshteter G., Sarsenbayeva A. Development of compositions of self-compacting fine-grained refractoty concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology.* 2014. Vol. 12, pp. 299–309.
6. Moroz M.N., Kalashnikov V.I., Petukhov A.V. Frost resistance hydrophobized concrete. *Molodoj uchenyj.* 2014. No. 19, pp. 222–225.
7. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Sibgatullin I.R., Gizzatullin A.R., Kharchenko I.J. Carbonate Cements of Low Water-Need is a Green Alternative for Cement Industry of Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 5, pp. 76–83. (In Russian).