

УДК 691.33

*ФЕДЮК РОМАН СЕРГЕЕВИЧ, ст. преподаватель,
roman44@yandex.ru*

*Дальневосточный федеральный университет,
690000, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 20*

ПОВЫШЕНИЕ НЕПРОНИЦАЕМОСТИ ФИБРОБЕТОНОВ НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ

Разработано композиционное вяжущее, полученное путем совместного помола цемента (55 %), золы кислого состава (40 %) и известняка (5 %) до удельной поверхности 550 kg/m^2 , активностью 77,3 МПа. Установлено, что совместное влияние механохимической активации способствует увеличению пуццолановой активности кислых зол, оказывает каталитическое действие на реакционную активность поверхности золы и песка. Выявлено, что добавки золы-уноса и отходов дробления известняка в композиционное вяжущее при всех дозировках снижают водо- и газопроницаемость бетонов. Разработан состав фибробетона на композиционном вяжущем. При 1,6%-м армировании стальной анкерной фиброй по объему удается получить максимальные физико-механические показатели ($R_{сж} = 100,9 \text{ МПа}$). Выявлено, что разработанный бетон обеспечивает эффективный коэффициент диффузии D , это позволяет применять его в сооружениях, контактирующих с сильно агрессивными средами, например в подземных инженерных сооружениях. Достаточно низкое водопоглощение материала и низкие значения паропроницаемости $0,021 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$ объясняются особенностями строения порового пространства цементного камня.

Ключевые слова: цементный камень; композиционное вяжущее; нанодисперсная добавка; непроницаемость; пористость.

*ROMAN S. FEDIUK, Senior Lecturer,
roman44@yandex.ru*

*Far Eastern Federal University
8, Sukhanova Str., 690000, Vladivostok, Russia*

PERMEABILITY IMPROVEMENT OF FIBER-REINFORCED CONCRETE BASED ON COMPOSITE BINDER

The paper presents a composite binder obtained by co-grinding of cement (55 %), ash acid composition (40 %) and limestone (5 %) having the specific surface area of 550 kg/m^2 and 77,3 MPa activity. It is shown that the combined influence of mechanical activation increases the pozzolanic activity of acidic ash and has a catalytic effect on the surface activity of ash and sand. The addition of fly ash and crushing limestone waste into the composite binder decreases water and gas permeability of concrete. The composition of fiber-reinforced concrete based on a composite binder is suggested herein. 1,6 % steel reinforcement with hooked end fiber, the maximum mechanical-and-physical properties can be obtained (100,9 MPa). The obtained concrete provides an effective diffusion coefficient allowing its use in buildings contacting with highly aggressive environments, such as underground engineering structures. Rather a low water absorption of material and low water vapor permeability can be explained by the porous structure of the cement brick.

Keywords: cement brick; composite binder; nanodispersed additive; impenetrability; porosity.

Введение

Использование промышленных отходов для оптимизации процессов структурообразования бетонных смесей позволит повысить прочностные характеристики и значительно снизить проницаемость композитов при возведении зданий, где предъявляются повышенные требования к прочности (например, в высотных и большепролетных зданиях), и сооружений, контактирующих с сильно агрессивными средами (например, в инженерных подземных сооружениях, где необходима пониженная газо- и водонепроницаемость).

Проблеме повышения плотности и прочности бетонов посвящено большое количество работ как российских [1–5], так и зарубежных [6] ученых. Известно, что одним из способов повышения эксплуатационных характеристик бетонов, снижения параметров проницаемости является использование высокоактивных добавок различного состава и генезиса как микро-, так и нанодисперсного уровня, которые способствуют оптимизации процессов структурообразования за счет инициирования формирования гидратных соединений.

Таким образом, целью работы является повышение непроницаемости и прочностных характеристик фибробетона за счет использования композиционных вяжущих на сырьевых ресурсах Дальнего Востока, полученных путем совместного помола цемента, гиперпластификатора, золы-уноса ТЭЦ и отсева дробления известняка.

Основная часть

В качестве компонента композиционного вяжущего применялись золы-уноса крупнейших ТЭС Приморского края: Владивостокской ТЭЦ-2, Артемовской ТЭЦ.

Использование техногенного сырья в производстве строительных материалов способствует решению следующих основных задач: энерго- и ресурсосбережению; утилизации отходов; улучшению экологической обстановки в регионах. Зола-унос ТЭС является эффективным сырьем для производства активных минеральных и тонкодисперсных добавок.

Оптимизация процессов структурообразования при гидратации компонентов композиционного вяжущего создает плотную структуру матрицы, что необходимо для решения задачи – создания композита для защиты от выделений пенополистирола. Это может быть реализовано при совместном помоле поргланцемента, полифункциональных минеральных добавок и снижении водоцементного отношения бетонной смеси за счет применения гиперпластификаторов.

Для снижения водопотребности бетонной смеси производили выбор порошковых гиперпластификаторов из шести наиболее распространенных на дальневосточном рынке строительных материалов.

Достижение высоких значений расплыва конуса отмечается на сырьевой смеси вяжущего с применением гиперпластификатора PANTARHIT PC160 Plv (FM). Для дальнейших исследований было разработано 7 составов композиционного вяжущего. В каждый из них был добавлен гиперпластификатор PANTARHIT PC160 Plv (FM) в количестве 0,3 %, соотношение вяжущее – песок – 1:3. Для определения оптимального количества компонентов

в системе «цемент – зола – известняк» осуществляли их помол до удельной поверхности $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ при различном соотношении (табл. 1).

Таблица 1

Составы и свойства композиционных вяжущих

№ п/п	Содержание цемента, масс. %	Зола-унос, масс. %		Известняк, масс. %	Предел прочности при сжатии, МПа		
		Владивостокская ТЭЦ-2	Артемовская ТЭЦ		3 сут	7 сут	28 сут
1*	100	–	–	–	17	32,5	43,5
2	30	–	50	20	30,2	40,1	50,4
3	35	45	–	20	34,2	43,1	53,2
4	40	–	45	15	36,6	48,2	56,6
5	45	45	–	10	39,2	50,1	59,2
6	50	–	40	10	45,1	54,9	65,8
7	55	40	–	5	47,2	54,1	70,2
8	100 (ВНВ)	–	–	–	60,3	81	103,2

Установлена положительная динамика роста прочности композиционного вяжущего при совместном влиянии мелкодисперсных составляющих золы, отсева дробления известняка и гиперпластификатора с максимальным повышением активности вяжущего на 62 % (состав № 7).

С целью определения оптимального размера частиц был произведен совместный помол цемента с гиперпластификатором, золой и отсевом дробления известняка (оптимальный состав № 7, табл. 1) до различной удельной поверхности: 500, 550, 600, 700, 800, 900 $\text{м}^2/\text{кг}$ (табл. 2).

Таблица 2

Активность композиционного вяжущего в зависимости от удельной поверхности

Твердение, сут	Удельная поверхность композиционного вяжущего $S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{кг}$					
	500	550	600	700	800	900
3	46,1	47,4	47,2	46,0	45,6	45,5
7	50,3	54,2	54,1	49,1	48,6	48,4
28	68,1	77,3	70,2	65,8	55,0	65,0

Установлено, что удельная поверхность вяжущего $550\text{--}600 \text{ м}^2/\text{кг}$ является оптимальной. Повышение $S_{уд}$ сверх этих значений не приводит к дальнейшему существенному повышению прочности. Следует отметить сокращение сроков схватывания вяжущего до 35–40 мин за счет интенсификации процесса гидратации при влиянии высокоактивных составляющих композита [7–9].

Наиболее высокий эффект достигается за счет синергетического действия техногенных пуццолановых добавок (зола-унос) и природных материалов осадочного происхождения (известняк) при содержании: цемент – 55 масс. %, отход дробления известняка – 5 масс. % и зола – 40 масс. %. При

таком вещественном составе композиционное вяжущее достигает предела прочности при сжатии до 77,3 МПа при замене 45 % цемента на промышленные отходы.

Исследование физико-механических свойств мелкозернистого бетона показало, что применение композиционного вяжущего, полученного путем совместного помола цемента, золы-уноса, отсевов дробления известняка и гиперпластификатора, позволило повысить предел прочности при сжатии мелкозернистого бетона на 21 % при сокращении практически в 2 раза доли цемента. Предел прочности на сжатие при статическом действии нагрузки определялся по ГОСТ 310.4–81. Призменная прочность и модуль упругости определялись по ГОСТ 24452. Испытывались кубы с ребром 70 мм. В разработанном бетоне призменная прочность и модуль упругости существенно выше, чем у контрольных образцов (табл. 3).

Таблица 3

**Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона
в зависимости от состава вяжущего**

№ состава	Расход материалов на 1 м ³						Подвижность (ОК), см	Предел прочности при сжатии, МПа	Призменная прочность, МПа	Модуль упругости	
	Вяжущее, кг				Отсев дробления гранитного щебня, кг	Песок, кг					Вода, л
	Цемент	Зола	Известняк	ГП							
1*	550	–	–	1,2	1000	623	220	10–12	107,5	86,3	61,2
2	278	235	37				330		83,7	59,5	43,8
3	265	246	39				334		84,2	60,3	44,5
4	247	257	46				337		76,3	55,2	40,9
5	234	268	48				343		75,2	55,0	40,8
6	220	278	52				348		75,0	54,9	40,8
7**	550	–	–				340		63,1	42,3	36,2

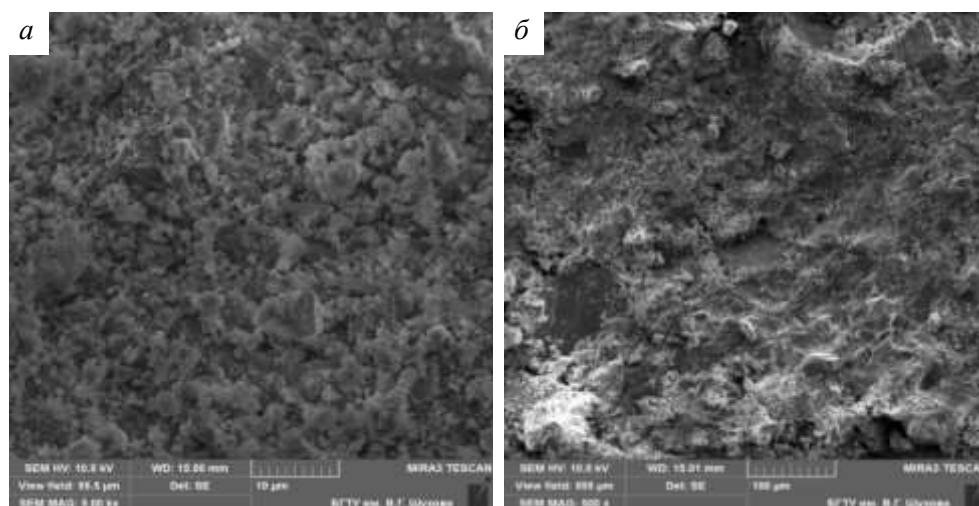
* Вяжущее низкой водопотребности с удельной поверхностью 550 м²/кг.

** Вяжущее на основе портландцемента производства ОАО «Спасскцемент».

Более плотное строение вяжущей композиции с меньшей пористостью подтверждается микроструктурными исследованиями. При фазообразовании модифицированного вяжущего увеличивается количество гелеобразных гидратных новообразований на поверхности частиц наполнителя (рисунок, б), отсутствуют видимые кристаллы портландита, что свидетельствует о снижении его доли в общей массе гидросиликатной связки.

В структуре модифицированного вяжущего наблюдается рост кристаллов игольчатой и «стеблевидной» морфологии предположительно низкоосновных гидросиликатов, присутствуют также пластинчатые кристаллы предположительно гидрокарбоалюминатов кальция (рисунок, б). Синтез этих со-

единений является результатом взаимодействия выделяющегося при гидратации клинкерных минералов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с активными минеральными составляющими золы и известняка. Рост игольчатых кристаллов способствует армированию структуры композита на нано- и микроуровне, снижению пористости и в комплексе повышению прочности композита.



Микрофотографии новообразований:

a – цементный камень без добавок; *b* – цементный камень на основе композиционного вяжущего

Для оптимизации структурообразования мелкозернистого бетона на макроуровне была использована стальная анкерная фибра производства ООО «Фибра для бетона» ТУ 0991-123-538-32025–2001. С учетом ранее выполненных исследований за контрольный был принят состав № 2 (табл. 3), в который вводили фибру в количестве от 24 до 45 кг/м³, т. е. до 2 % от общей массы смеси с шагом 0,2 %. Установлено, что оптимизация структуры на макроуровне позволяет повысить предел прочности при сжатии на 24 % (табл. 4).

Таблица 4

Зависимость прочности мелкозернистого фибробетона от процента армирования

№ состава	Расход материалов на 1 м ³ , кг				Армирование, %	$R_{сж}$, МПа
	Вяжущее	Вода	Заполнитель	Фибра		
1*	550	330	1623	–	0	81,3
2	550	330	1623	23,97	1	96,1
3	550	330	1623	28,76	1,2	97,3
4	550	330	1623	33,56	1,4	99,8
5	550	330	1623	38,35	1,6	100,9
6	550	330	1623	43,15	1,8	99,5
7	550	330	1623	47,94	2	99,6

* Контрольный состав соответствует составу № 2 (табл. 3).

Введение вместо стальной анкерной фибры базальтового волокна местного производства не привело к существенному улучшению физико-механических свойств бетона, поэтому для дальнейших исследований принимаем состав № 5 фибробетона (1,6%-го армирования).

На основании проведенных исследований установлено, что введение в состав композиционного вяжущего золы-уноса и отсева дробления известняка способствует структурным и фазовым изменениям композита при формировании высокоплотных непроницаемых структур. Наилучшими физико-механическими показателями обладают мелкозернистые фибробетоны на разработанном композиционном вяжущем составов № 2 и № 3 (табл. 5), у которых достигается предел прочности при сжатии 100,2–100,9 МПа с коэффициентом диффузии $1,34 \cdot 10^{-4}$ – $1,39 \cdot 10^{-4}$ см²/с. При этом максимальное снижение параметров непроницаемости наблюдается в составе № 2 с заменой доли цемента в смеси вяжущего на 45 % отходами производств (зола-унос и отсев дробления известняка) (табл. 5).

Водо- и воздухопроницаемость определяли на образцах-цилиндрах диаметром 150 мм, $h = 50$ мм, твердевших 28 сут в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 12730.5. Воздухопроницаемость бетона сократилась в 2 раза (до $0,0253$ см³/с), что соответствует марке по водопроницаемости W14. Плотная структура фибробетона обеспечивает влагостойкость и снижение водопоглощения по объему в 2,5 раза. Эти закономерности отражаются и на показателе паропроницаемости, который в условиях влажного климата достигает предела $0,021$ мг/(м·ч·Па). Паропроницаемость определялась согласно UNI EN ISO 12572. Для определения паропроницаемости для сухого климата использовались образцы размером 200×100 мм с толщиной 70 мм.

Диффузионная проницаемость бетона определялась по ГОСТ Р 52804–2007 на основании данных о скорости нейтрализации (карбонизации) бетона углекислым газом в отсутствие градиента общего давления газовой среды при наличии разности концентрации углекислого газа в бетоне и окружающей среде в период, когда процесс нейтрализации ограничен скоростью диффузии углекислого газа в пористой структуре бетона. Выявлено среднее значение толщины нейтрализованного слоя бетона для всех разработанных составов. Установлено, что разработанный бетон имеет эффективный коэффициент диффузии $D' = 1,34 \cdot 10^{-4}$ см²/с и покрытие из такого бетона позволяет обеспечить защитные функции помещения (бетон особо низкой проницаемости).

Таким образом, выявляется четкая связь между свойствами бетона и особенностями структуры цементного камня – увеличение количества гидросиликатных новообразований при комплексном снижении гелевой и капиллярной пористости, особенно на молекулярном и субмикроскопическом уровнях, предопределяет рост прочности и повышение непроницаемости бетона [10, 11].

Апробация теоретических и экспериментальных исследований осуществлена на примере монолитной фибробетонной стены [11] с использованием разработанной несъемной опалубки. Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_o = 4,223$ (м²·°С)/Вт, коэффициент паропроницаемости $\mu = 0,021$ мг/(м·ч·Па).

Таблица 5
Эксплуатационные характеристики фибробетона в зависимости от состава вяжущего

№ состава	Расход материалов на 1 м ³					Подвижность (ОК), см	Применная прочность, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Воздухопроницаемость бетона a_v , см ³ /с	Марка по водопроницаемости W	Эффективный коэффициент диффузии, см ² /с	Водопоглощение по объему, %	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)		
	Цемент	Зола	Известняк	ПП	Отсев + песок, кг								Вода, л	для сухо-	для влаж-
														го климата	ного климата
1	550	-	-		1623	220	66,3	115,5	0,0565	W10	$1,56 \cdot 10^{-4}$	14,8	0,032	0,030	
2	278	235	37		1623	330	69,5	100,9	0,0253	W14	$1,34 \cdot 10^{-4}$	6,1	0,022	0,021	
3	265	246	39		1623	334	70,3	100,2	0,0289	W14	$1,39 \cdot 10^{-4}$	6,3	0,026	0,025	
4	247	257	46	1,2	1623	337	65,2	96,3	0,0402	W12	$1,64 \cdot 10^{-4}$	7,8	0,027	0,026	
5	234	268	48		1623	343	65,0	95,2	0,0465	W12	$1,79 \cdot 10^{-4}$	10,9	0,030	0,029	
6	220	278	52		1623	348	64,9	95,0	0,0423	W12	$1,82 \cdot 10^{-4}$	14,4	0,032	0,030	

Заключение

Разработанные на основе композиционного вяжущего составы фибробетона могут быть внедрены при строительстве зданий повышенной этажности [12–19].

Таким образом, установлена возможность повышения непроницаемости фибробетона за счёт варьирования количества и вида добавок, тонкости помола и с учетом условий твердения, что позволяет создавать материалы для многослойных ограждающих конструкций с пределом прочности при сжатии свыше 100 МПа, с низкой проницаемостью в реальных условиях эксплуатации. Реализация результатов будет способствовать улучшению экологической обстановки Дальневосточного региона, т. к. в состав фибробетона входит 50–60 % промышленных отходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алексашин, С.В.* Повышение морозостойкости и водонепроницаемости мелкозернистых бетонов для речных гидросооружений : дис. ... канд. техн. наук. – М. : МГСУ, 2014. – 114 с.
2. *Кучеренко, А.А.* Порошковая технология бетона. Ч. 2 / А.А. Кучеренко // Технологии бетонов. – 2009. – № 1. – С. 58–60.
3. *Чернышов, Е.М.* Структурная неоднородность строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории. Ч. 2 / Е.М. Чернышов // Российская академия архитектуры и строительных наук. Вестник отделения строительных наук. Вып. 15. – Москва; Орел; Курск, 2011. – С. 223–239.
4. *Образцов, И.В.* Оптимизация зерновых составов цементно-минеральных смесей для производства строительных композитов методами компьютерного моделирования : дис. ... канд. техн. наук. – Тверь : ТГТУ, 2014. – 131 с.
5. *Миляев, И.В.* Оптимизация свойств модифицированного цементного камня / И.В. Миляев // Научный вестник ВГАСУ. – 2009. – № 5. – С. 102–104.
6. *Effect of Composition on Basic Creep of Concrete and Cement Paste / Laurent P. Granger, Zdenek P. Bazant, Fellow, ASCE. // Journal Of Engineering Mechanics. – 1995. – November. – P. 1261–1270.*
7. *Шумков, А.И.* Формирование и оптимизация макроструктуры тяжелого бетона / А.И. Шумков // Технологии бетонов. – 2008. – № 7. – С. 52–53.
8. *Хархардин, А.Н.* Модели потенциалов и сил / А.Н. Хархардин // Известия вузов. – 2011. – № 2. – С. 117–126.
9. *Хархардин, А.Н.* Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц / А.Н. Хархардин // Известия вузов. – 2011. – № 5. – С. 119–125.
10. *Хархардин, А.Н.* Тяжелый бетон с плотным структурным каркасом заполнителя / А.Н. Хархардин, А.И. Топчиев // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 4. – С. 54.
11. *Shurcliff, W.A.* Super solar houses – Saunders's 100% solar, low-cost designs / W.A. Shurcliff. – Brick House Publishing Company, 1983. – 118 p.
12. *Фаликман, В.Р.* Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах / В.Р. Фаликман // ALITInform. – СПб. – 2011. – № 5–6 (22). – С. 34–48.
13. *Богусевич, В.А.* Мелкозернистый бетон на основе техногенных песков КМА для зимнего бетонирования : дис. ... канд. техн. наук. – Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – 172 с.
14. *Зависимость механизма структурообразования от химического состава как ключевого фактора вяжущей системы / Н.И. Кожухова, А.И. Бондаренко, М.И. Кожухова, В.В. Строкова // Строительный комплекс России. Наука. Образование. Практика : материалы Международной научно-практической конференции. – Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ, 2012. – С. 162–164.*
15. *Королев, С.А.* О новом подходе в математическом прогнозировании водонепроницаемости цементных композитов / С.А. Королев // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – № 25. – С. 31–36.

16. *Ветехтин, В.И.* Концентрация микропор в цементном камне и их распределение по размерам / В.И. Ветехтин, А.Н. Бахтибаев, Е.А. Егоров // Цемент. – 1989. – № 1. – С. 8–10.
17. *Теоретические аспекты*, экспериментальные исследования и эффективность использования высокопрочных бетонов для мостовых конструкций / Г.Д. Ляхевич, С.А. Звонник, Г.А. Ляхевич, А.Б.А. Альаззави // Наука и техника. – 2014. – № 5. – С. 48–54.
18. *Власов, В.К.* Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / В.К. Власов // Бетон и железобетон. – 1988. – № 10. – С. 9–11.
19. *Красный, И.М.* О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей / И.М. Красный // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 10–11.

REFERENCES

1. *Aleksashin S.V.* Povyshenie morozostoikosti i vodonepronitsaemosti melkozernistykh betonov dlya rechnykh gidrosooruzhenii : dis. ... kand. tekhn. Nauk [Improvement of frost resistance and water permeability of fine-grain concretes for hydraulic structures. PhD Thesis]. Moscow : MGSU Publ., 2014. 114 p. (rus)
2. *Kucherenko A.A.* Poroshkovaya tehnologija betona. Chast' 2 [Powder concrete technology. Pt. 2]. *Tehnologii betonov*. 2009. No. 1. Pp. 58–60. (rus)
3. *Chernyshov E.M.* Strukturnaja neodnorodnost' stroitel'nykh kompozitov: voprosy materialovedcheskogo obobshhenija i razvitija teorii (chast' 2) [Structural inhomogeneity of construction composites: problems of material science theory generalization]. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN*. Moskva-Orel-Kursk, 2011. V. 15. Pp. 223–239. (rus)
4. *Obraztsov I.V.* Optimizatsiya zernovykh sostavov tsementno-mineral'nykh smesei dlya proizvodstva stroitel'nykh kompozitov metodami komp'yuternogo modelirovaniya : dis. ... kand. tekhn. nauk [Optimization of grain composition of cement-mineral mixes for construction composite production using computer simulation. PhD Thesis]. Tver' : TSTU Publ., 2014. 131 p. (rus)
5. *Milyaev I.V.* Optimizatsiya svoystv modifitsirovannogo tsementnogo kamnya [Optimization of modified cement brick properties]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2009. No. 5. Pp. 102–104. (rus)
6. *Granger L.P., Bazant Z.P.* Effect of composition on basic creep of concrete and cement paste. *Journal of Engineering Mechanics*. November 1995. Pp. 1261–1270.
7. *Shumkov A.I.* Formirovanie i optimizatsiya makrostruktury tjazhelogo betona [Formation and optimization of macrostructure of heavy concrete]. *Tehnologii betonov*. 2008. No. 7. Pp. 52–53. (rus)
8. *Harhardin A.N.* Modeli potencialov i sil [Potential and force models]. *News of Higher Educational Institutions*. 2011. No. 2. Pp. 117–126. (rus)
9. *Harhardin A.N.* Strukturnaya topologiya dispersnykh sistem vzaimodeystvuyushchikh mikro- i nanochastits [Structural topology of dispersion systems of micro- and nanoparticle interaction]. *News of Higher Educational Institutions*. 2011. No. 5. Pp. 119–125. (rus)
10. *Harhardin A.N.* Topchiev A.I. Tyazhelyi beton s plotnym strukturnym karkasom zapolnitelya [Heavy concrete with dense structural frame]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2001. No. 4. P. 54. (rus)
11. *Shurcliff William A.* Super solar houses – Saunders's 100 % solar, low-cost designs. *Brick House Publishing Company*. 1983. 118 p.
12. *Falikman V.R.* Nanomaterialy i nanotehnologii v sovremennykh betonah [nanomaterials and nanotechnologies in modern concretes]. St-Petersburg : ALITInform, 2011. No. 5–6. Pp. 34–48. (rus)
13. *Bogusevich V.A.* Melkozernisty beton na osnove tekhnogennykh peskov KMA dlya zimnego betonirovaniya : dis. ... kand. tekhn. nauk [Fine concrete based on man-made sands for cold-weather concreting. PhD Thesis]. Belgorod : BSTU Publ., 2014. 172 p. (rus)
14. *Kozhuhova N.I., Bondarenko A.I., Kozhuhova M.I., Strokova V.V.* Zavisimost' mehanizma strukturoobrazovaniya ot himicheskogo sostava kak kljuchevogo faktora vjazhushhej sistemy [Structure formation depending on chemical composition]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'The building*

- complex of Russia. Science. Education. Practice*'. Ulan-Ude : ESSUTM Publ., 2012. Pp. 162–164. (rus)
15. Korolev S.A. O novom podhode v matematicheskom prognozirovanii vodoneproniцаемости cementnyh kompozitov [New approach to mathematical forecast of water permeability of cement composites]. *Bulletin of the South Ural State University*. 2008. No. 25. Pp. 31–36. (rus)
 16. Vetehtin V.I. Bahtibaev A.N., Egorov E.A. Koncentracija mikropor v cementnom kamne i ih raspredelenie po razmeram [Micropore concentration in concrete and its size distribution]. *Tsement*. 1989. No. 1. Pp. 8–10. (rus)
 17. Ljahevich G.D. S Zvonnik.A., Ljahevich G.A., Al'azzavi A.B.A. Teoreticheskie aspekty, eksperimental'nye issle-dovaniya i effektivnost' ispol'zovaniya vysokoprochnykh betonov dlya mostovykh konstruksii [Theoretical aspects and experimental research of efficient use of high-strength concretes for brisge structures]. *Science & Technology*. 2014. No. 5. Pp. 48–54. (rus)
 18. Vlasov V.K. Mehanizm povysheniya prochnosti betona pri vvedenii mikronapolnitelja [Strength improvement of concrete at addition of micro-filler]. *Beton i zhelezobeton*. 1988. No. 10. Pp. 9–11. (rus)
 19. Krasnyi I.M. O mekhanizme povysheniya prochnosti betona pri vvedenii mikronapolnitelei [Strength improvement of concrete at addition of micro-filler]. *Beton i zhelezobeton*. 1987. No. 5. Pp. 10–11. (rus)