

*Клюев С. В., канд. техн. наук, доц.,
Лесовик Р. В., д-р техн. наук, проф.,
Калашиников Н.В., аспирант,
Казлитина О.В., м. н. с.,
Нетребенко А. В., аспирант,
Митрохин А.А., аспирант*

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

КОМБИНИРОВАННОЕ ДИСПЕРСНОЕ АРМИРОВАНИЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА НА ТЕХНОГЕННОМ СЫРЬЕ И НАНОДИСПЕРСНОМ МОДИФИКАТОРЕ*

Klyuyev@yandex.ru

В статье рассмотрены вопросы комбинированного дисперсного армирования стальной волновой и полипропиленовой фибрами мелкозернистого бетона на техногенном сырье. Разработаны составы высокопрочного фибробетона с пределом прочности при сжатии до 169,6 МПа, пределом прочности при изгибе до 21,6 МПа и морозостойкостью F700.

Ключевые слова: бетон, техногенный песок, композиционное вяжущее

В связи с активным развитием программы развития жилищного строительства в Российской Федерации, в том числе Белгородчины на рынке индивидуального жилищного строительства появилось большое разнообразие применяемых материалов для монолитного строительства. Известно, что для монолитного строительства бетоны должны обладать высокой степенью трещиностойкости, прочностью при сжатии, растяжении и изгибе, низкой усадкой, достаточной водонепроницаемостью и морозостойкостью. Для обеспечения таких свойств необходимо создание эффективных высокопрочных бетонов.

Армированный бетон является классическим сочетанием мелкозернистых бетонов с до-

бавками различных армирующих средств – стальных, стеклянных или синтетических. Этот вид бетона называется фибробетоном и предназначается для создания особо прочных конструкций. Фибробетон, который применяется при монолитном строительстве, позволяет создавать конструкции любой сложности и конфигурации, а фибробетонные смеси значительно улучшают качество и долговечность зданий и сооружений [3 – 7].

Свойства высококачественного мелкозернистого бетона во многом зависят от свойств вяжущего. Для получения мелкозернистых фибробетонов необходимо применение высокоактивных композиционных вяжущих (табл. 1).

Таблица 1

Результаты определения оптимального содержания добавки для композиционного вяжущего

Содержание добавки, % от массы	Расход материалов на миниконус		Диаметр расплыва миниконуса, D, мм		
	ТМЦ, г	Вода, г	«Полипласт ПРЕМИУМ»	«Полипласт СП-1»	СБ-3
0,1	100	35	119	60	61
0,2	100	35	137	82	68
0,3	100	35	164	94	77
0,4	100	35	169	120	100
0,5	100	35	170	158	113
0,6	100	35	170	167	134
0,7	100	35	171	170	153
0,8	100	35	-	171	166
0,9	100	35	-	-	171

В качестве основы для получения таких вяжущих был выбран ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент» (г. Белгород). Композиционное вяжущее получали путем домола портландцемента с пластифицирующей добавкой «Полипласт ПРЕМИУМ» в вибрационной мельнице до удельной поверхности 600 м²/кг. С целью определения наиболее подходящей добавки пластификаторов с оптимальной

дозировкой было изучено их влияние на тонкомолотый цемент (табл. 1).

Из полученных результатов видно, что содержание «Полипласт ПРЕМИУМ» в количестве 0,3 % от массы вяжущего дает оптимальный расплыв миниконуса – D=164 мм, в то время, как другие добавки требуют введения большей дозировки добавок, для получения идентичного пластифицирующего эффекта (рис. 1).

Это свидетельствует, что из испытанных добавок, наиболее эффективной является добавка

«Полипласт ПРЕМИУМ», которая и была принята для дальнейших исследований [1, 8 – 14].

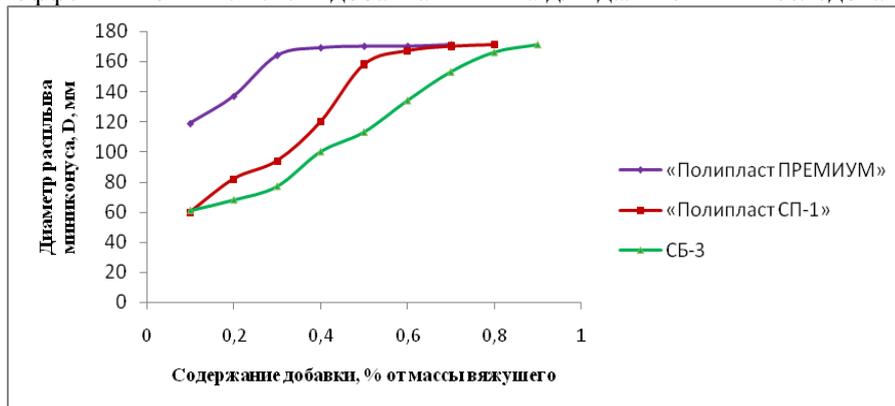


Рис. 1. Зависимость расплыва миниконуса от количества добавки

Структура цементного камня на композиционном вяжущем плотнее по сравнению с обычным портландцементом, она

представляет собой очень плотную упаковку зерен в общей массе новообразований (рис. 2).

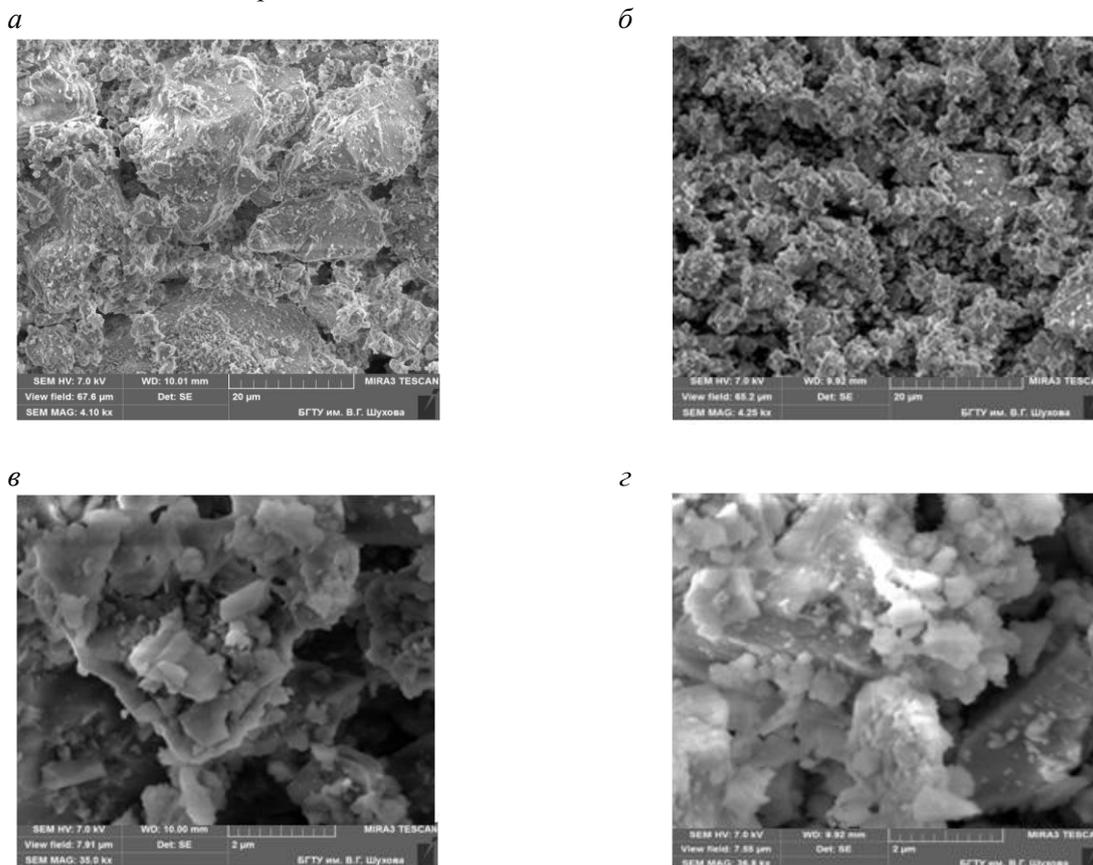


Рис. 2. Микроструктура в зависимости от свойств вяжущих:

а, в – морфология новообразований цементного камня Цем I 42,5Н;

б, г – морфология новообразований цементного камня композиционного вяжущего

Исследования влияния различных фракций отсева на водо- и цемента- потребность позволили установить, что наиболее отрицательное влияние на эти характеристики оказывает фракция менее 0,315 мм, это связано с тем, что слюды содержащиеся в кварцитопесчанике в процессе дробления разрушаются и переходят в пы-

левидную фракцию. В дальнейшем использовался обогащенный отсев без этой фракции [14 – 17].

Особенностью отсевов дробления является угловатая форма зерен с высокоразвитой поверхностью, что способствует повышенной адгезии к ним цементного камня (рис. 3).

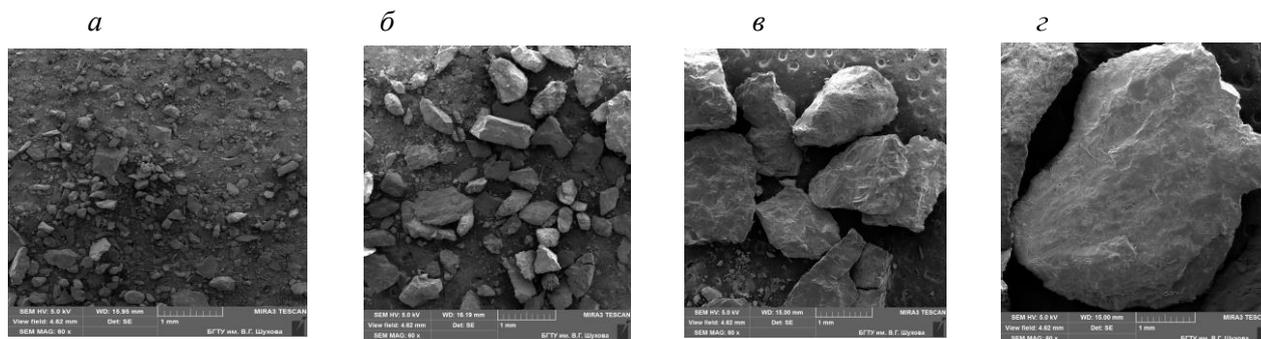


Рис. 3. Микрофотоснимки отсева дробления КВП: а фр.0,16; б фр.0,315; в фр.1,25; г фр.2,5

Исследования физико-механических характеристик обогащенного отсева дробления кварцитопесчаника Лебединского месторождения позволили установить физико-механические характеристики (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические характеристики заполнителя

Наименование показателя	Единица измерения	Отсев дробления КВП
Модуль крупности	$M_{кр}$	4.72
Насыпная плотность в неуплотненном состоянии, кг/м ³	$\rho_{нас}$	1520
Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/м ³	$\rho_{нас\ упл}$	1590
Истинная плотность, кг/м ³	$\rho_{ист}$	2680
Пустотность, %	$V_{м.п.}$	47.8
Водопотребность, %	$V_{отс}$	6.5
Цементопотребность	$C_{потр}$	0.520

В результате проведенных исследований и анализа полученных данных установлено, что образцы на основе композиционного вяжущего имеют наилучшие физико-механические показатели с активностью до 98 МПа. Это объясняется низким значением водопотребности смеси, а также лучшей пространственной упаковкой частиц в полученном композите.

Можно сделать вывод, что применение тонкомолотых вяжущих с добавкой суперпластификатора позволяет существенно увеличить прочностные характеристики бетона.

Дальнейшая оптимизация структуры цементной матрицы осуществлялась путем введения в композиционное вяжущее нанодispersного порошка, полученного из гидротермальных источников вулканогенных областей (табл. 3).

Таблица 3

Результаты определения прочности на сжатие (МПа) образцов на композиционном вяжущем

Возраст образца, сут.	Содержание НДМ в разработанном композиционном вяжущем, %		
	0,1	0,01	0,001
3	91,5	89,1	77,1
7	103,6	101,2	95,4
28	124	120,8	118,3

Эксперименты показали, что введение нанодispersного порошка в количестве 0,01 % оптимизирует структуру цементного камня композиционного вяжущего, что приводит к значительному повышению активности вяжущего до 120,8 МПа (рис. 4).

Нанодispersный порошок вступает в реакцию с гидроксидом кальция, освобождаемого при гидратации портландцемента, при этом синтезируется гидросиликат кальция второй генерации. Очень высокая удельная поверхность НДП способствует более эффективной и быстрой реакции. При надлежащем рассеивании ты-

сячи реактивных сферических микрочастиц окружают каждое зерно цемента, уплотняя цементный камень, заполняя пустоты прочными продуктами гидратации и улучшая сцепление с заполнителями [2, 3].

Эффект заполнения пор гидросиликата кальция второй генерации способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона. Фактически непроницаемый бетон можно получить при умеренном содержании порошка и сравнительно низком содержании обычного портландцемента.

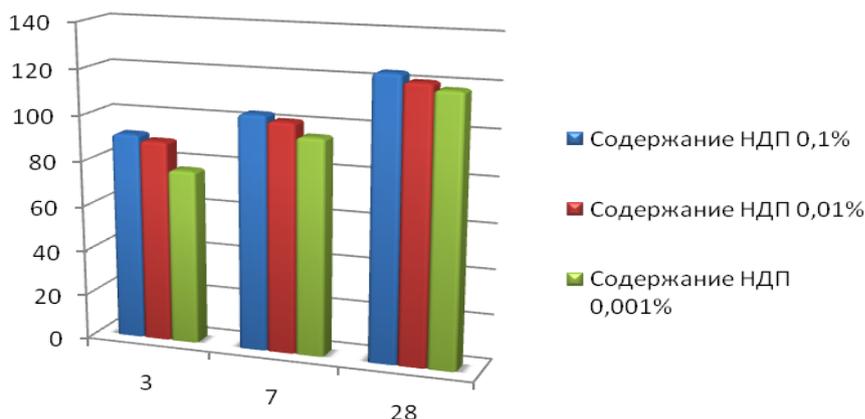


Рис. 4. Зависимость прочности при сжатии образцов от количества добавки

Следует отметить универсальность добавки как дисперсии, влияющей на тиксотропные свойства системы, через изменение протяженности структурных элементов-цепочек и их перехода при контактных взаимодействиях в пространственные каркасные ячейки. Это условие соответствует минимальным значениям межфазного натяжения при максимальном развитии граничных поверхностей, что предполагает существование большого числа точечных коагуляционных контактов вплоть до создания предельно наполненной системы, в которой коллективный переход к сцеплению в ближнем порядке вызывает резкое упрочнение [2]. Для получения более плотной упаковки заполнителя использовался песок Шебекинского месторождения с модулем крупности 1,2. В качестве вяжущего применялся портландцемент Цем I 42,5Н и

разработанное композиционное вяжущее с использованием НДП.

Расчет высокоплотного полифракционного состава заполнителя для высококачественных бетонов является важным фактором повышения их физико-механических характеристик. Определение гранулометрического состава смеси с высокоплотной упаковкой частиц является практической задачей исследования зернистых материалов. Поэтому необходимо установление влияния заполнителя на прочность бетона, а также разработка эффективных бетонов на основе высокоплотных составов заполнителя.

На основе высокоплотной упаковки отсева дробления кварцитопесчанника были получены следующие результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона с высокоплотной упаковкой заполнителя

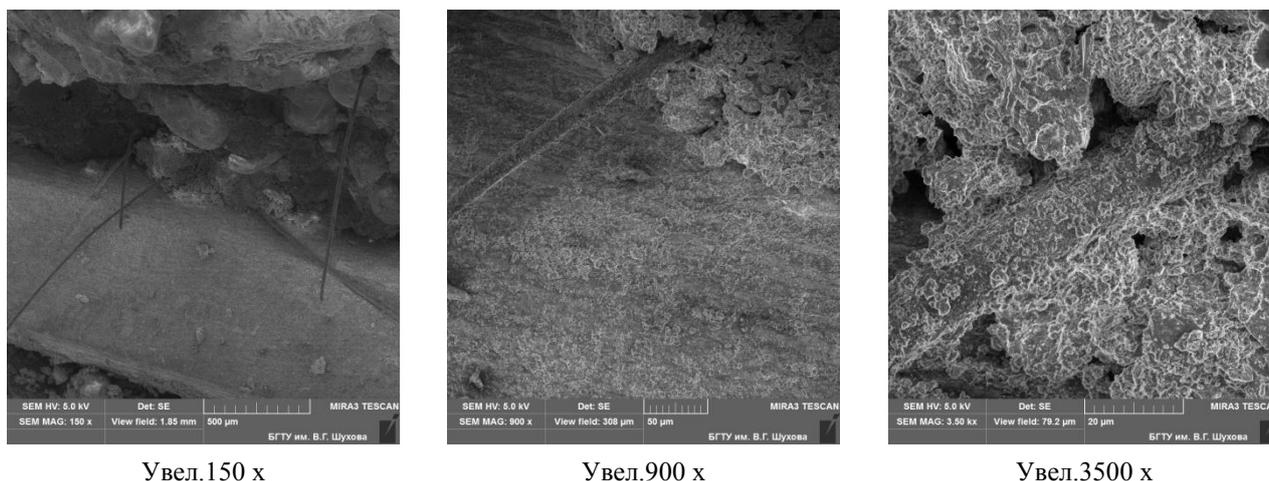
№ серии	Расход материалов кг/м ³						Вода	В/В	Прочность при сжатии, R _{сж} , МПа
	Вяжущее		Отсев + песок						
			Фракция						
	Ц	СП	2,5	1,25	0,63	0,315			
1-1	710	-	1540				262	0,37	47,1
1-2	710	-	589	465	291	195	273	0,38	51,3
2-2	710	2,13	589	465	291	195	257	0,36	93,7

При сравнении свойств бетонных образцов с высокоплотным составом заполнителя была установлена более высокая прочность бетона, по сравнению с аналогичными составами на обычном заполнителе, бетон с высокоплотным составом заполнителя имеет почти 1,5 раза большую прочность, чем обычный мелкозернистый бетон, что объясняется лучшей пространственной упаковкой частиц в полученном композите и особенностями структурообразования [3].

На основании комплексных исследований разработаны составы мелкозернистых фибробетонов на композиционном вяжущем с использованием нанодисперсного порошка, полученного

из гидротермальных источников вулканогенных областей с применением армирующих волокон (табл. 5 и рис. 5).

Исследования физико-механических характеристик показало, что свойства бетонов изготовленных на композиционных вяжущих во всех случаях превышают характеристики образцов аналогичного состава, изготовленных на других вяжущих. Отсюда можно сделать вывод, что применение композиционных вяжущих с добавкой суперпластификатора позволяет существенно увеличить прочностные характеристики бетона.



Увел.150 x

Увел.900 x

Увел.3500 x

Рис. 5. Микроструктура контактной зоны комбинированного армирования фибрами с цементным камнем

Таблица 5

Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона в зависимости от состава вяжущего

№ серии	Расход материалов на 1 м ³						Добавка Muraplast FK68, кг	Фибра, кг		В/В	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Призмная прочность, МПа	Модуль упругости E _p · 10 ⁻³ , МПа
	Вяжущее, кг			Отсев дробления КВП, кг	Песок, кг	Вода, л		Стальная	Полипропиленовая					
	Ц	СП	НДП											
1-1	710	-	-	1540	-	262	-	-	0,37	47,1	5,3	36,2	31,4	
1-2	710	-	-	1150	390	273	-	-	0,38	51,3	6,1	39,4	34,2	
1-3	710	-	-	1150	390	240	5,76	-	0,34	59	7,9	45,4	39,3	
1-4	710	-	-	1150	390	238	5,76	41,4	4,77	0,34	68,4	11,4	52,6	45,6
2-1	710	2,13	-	1540	-	224	-	-	0,32	85,2	8,6	65,5	56,8	
2-2	710	2,13	-	1150	390	257	-	-	0,36	93,7	10,4	72	62,5	
2-3	710	2,13	-	1150	390	210	5,76	-	0,30	110,6	13	85	67	
2-4	710	2,13	-	1150	390	205	5,76	41,4	4,77	0,29	126	15,6	96,9	84
3-1	710	2,13	0,071	1540	-	180	-	-	0,25	120,8	11	92,3	80,5	
3-2	710	2,13	0,071	1150	390	210	-	-	0,30	130,5	13,4	100,4	87	
3-3	710	2,13	0,071	1150	390	166	5,76	-	0,23	150,1	16,9	115,5	100	
3-4	710	2,13	0,071	1150	390	164	5,76	41,4	4,77	0,23	169,6	21,6	130	113,1

Важными характеристиками бетона используемого при монолитном строительстве являются водопоглощение и морозостойкость. Эти свойства оказывают существенное влияние на его долговечность, в связи, с чем было проведено исследование данных показателей. Результаты исследований подтверждают возможность применения полученного фибробетона, установлено, что бетоны характеризуются низкими показателями водопоглощения, а также высокой морозостойкостью (табл. 6).

Разработаны составы высокоэффективных мелкозернистых бетонов на основе композиционного вяжущего с использованием нанодисперсного порошка, полученного из гидротермальных источников и отсева дробления квар-

цитопесчаника, обогащенного Шибеккинским песком для производства высококачественного бетона. Установлено, что количество песка Шибеккинского карьера для повышения плотности упаковки зерен отсева дробления кварцитопесчаника составляет 25 % от массы техногенного песка.

С целью управления процессами структурообразования бетона, технологией его производства и регулированием свойств использовали: композиционное вяжущее с применением НДП; комплексные модификаторы структуры и свойств, включающие в себя различные химические добавки; минеральное сырье заполнителей, обеспечивающее получение экономичных и долговечных бетонов.

Таблица 6

Водопоглощение и морозостойкость в зависимости от состава вяжущего

№ серии	Расход материалов на 1м ³						Добавка Muraplast FK68, кг	Фибра, кг		Водопоглощение	Морозостойкость
	Вяжущее, кг			Отсев дробления КВП, кг	Песок, кг	Вода, л		Стальная	Полипропиленовая		
	Ц	СП	НДП								
1-4	710	-	-	1150	390	238	5,76	41,4	4,77	3,8	F300
2-4	710	2,13	-	1150	390	205	5,76	41,4	4,77	2,9	F500
3-4	710	2,13	0,071	1150	390	164	5,76	41,4	4,77	2,0	F700

Предложен состав композиционного вяжущего с использованием нанодисперсного порошка с обеспечением предела прочности при сжатии до 120,8 МПа. Разработаны мелкозернистые фибробетоны на композиционном вяжущем с использованием НДП и песка для монолитного строительства с пределом прочности при сжатии до 169,6 МПа, пределом прочности при изгибе до 21,6 МПа и морозостойкостью F700.

**Работа выполнена в рамках реализации гранта президента Российской Федерации МК-5667.2013.8 и Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 г. грант №Б-21/12.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние гидротермальной обработки и давления на структурообразование композиционных вяжущих / В.С. Лесовик, Я.Ю. Вишневская, Н.И. Алфимова, А.В. Савин // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов сборник докладов (XIX научные чтения). 2010. С. 186 – 189.

2. Казлитина О.В. Фибробетон для монолитного строительства: автореф. дис. ... к.т.н. Белгород 2013. 23 с.

3. К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно-армированных бетонов / С.В. Ключев, В.С. Лесовик, А.В. Ключев, Д.О. Бондоренко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 81 – 83.

4. Ключев А.В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон на техногенном песке КМА для изгибаемых изделий: автореф. дис. ... к.т.н. Белгород 2012. 24 с.

5. Ключев А.В. Стальные фибры и их применение для дисперсного армирования мелкозернистых бетонов // Инновационные материалы технологии; сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф.: Белгород, 11-12 окт. 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: Из-во БГТУ, 2011. Ч. 1. С. 233 – 238.

технол. ун-т, Белгород: Из-во БГТУ, 2011. Ч. 1. С. 229 – 232.

6. Ключев А.В., Лесовик Р.В. Техногенные пески как сырье для производства фибробетона // Инновационные материалы технологии; сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф.: Белгород, 11-12 окт. 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: Из-во БГТУ, 2011. Ч. 3. С. 283 – 285.

7. Ключев А.В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 60 – 63.

8. Ключев А.В., Лесовик Р.В. Сталефибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках КМА для изгибаемых конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 2. С. 14 – 16.

9. Ключев А.В. Экспериментальные исследования сталефибробетонных конструкций // Белгородская область: прошлое, настоящее и будущее: материалы науч.-практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. Ч.3. С. 21 – 26.

10. К проблеме повышения эффективности композиционных вяжущих / В.С. Лесовик, Н.И. Алфимова, Е.А. Яковлев, М.С. Шейченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. №1. С. 30 – 33.

11. К проблеме коррозионной стойкости железобетона / А.В. Савин, В.С. Лесовик, Н.И. Алфимова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 7 – 12.

12. Лесовик Р.В., Ключев А.В. Расчет высокоплотной упаковки зерен мелкозернистого бетона // Инновационные материалы технологии; сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф.: Белгород, 11-12 окт. 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: Из-во БГТУ, 2011. Ч. 1. С. 233 – 238.

13. Лесовик В.С. Геоника. Предмет и задачи: монография. 2-е изд., доп. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 219 с.

14. Лесовик В.С., Савин А.В., Алфимова Н.И. Степень гидратации композиционных вя-

жущих как фактор коррозии арматуры в бетоне // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. №1(649). С. 28 – 33.

15. Отходы горнодобывающих предприятий как сырье для производства мелкозернистого бетона армированного фибрами / А.В. Ключев, С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, О.Н. Михайлова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 4. С. 81 – 84.

16. Пат. 2467972 Российская Федерация, МПК В 28С 5/40. Смесь для производства мел-

козернистого сталефибробетона на основе отсева кварцитопесчаника / А.В. Ключев, С.В. Ключев, Р.В. Лесовик: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. № 2011111493/03; заявл. 25.03.2011; опубл. 27.11.2012.

17. High strength fiber concrete for industrial and civil engineering / S.V. Klyuyev, A.V. Klyuyev, R.V. Lesovik, A.V. Netrobenko // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 24. №10. С. 1280 – 1285.