УДК 666.974, 693.542.4, 693.554-486

А.И. КУДЯКОВ, д-р техн. наук, В.С. ПЛЕВКОВ, д-р техн. наук, К.Л. КУДЯКОВ, инженер,
А.В. НЕВСКИЙ, инженер, А.С. УШАКОВА, инженер (tsuab_rc@mail.ru)
Томский государственный архитектурно-строительный университет (634003, г. Томск, Соляная пл., 2)

Совершенствование технологии изготовления базальтофибробетона с повышенной однородностью

Исследованы технологические приемы изготовления базальтофибробетонной смеси с повышенной однородностью. Установлено оптимальное содержание базальтовых волокон 0,5% от массы цемента, обеспечивающее их равномерное распределение в объеме бетона, прирост прочности бетона при сжатии 51,2% и при растяжении 28,8%. При исследовании микроструктуры базальтофибробетона выявлены новообразования на поверхности базальтовых волокон, которые свидетельствуют о повышении адгезии цементного камня к волокнам. При введении базальтовых волокон в бетонную смесь существенно повышается однородность показателей качества бетона.

Ключевые слова: фибробетон, базальтовое волокно, распределение волокон, прочность на сжатие и растяжение, однородность, базальтофибробетон.

A.I. KUDYAKOV, Doctor of Sciences (Engineering), V.S. PLEVKOV, Doctor of Sciences (Engineering),
K.L. KUDYAKOV, Engineer, A.V. NEVSKY, Engineer, A.S. USHAKOVA, Engineer (tsuab_rc@mail.ru)
Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya Street, 634003, Tomsk, Russian Federation)

Improvement in Manufacturing Technology of Basalt Fiber Concrete with Increased Uniformity

Technological methods for preparing the basalt fiber concrete mix with increased uniformity are studied. It is established that 5% of basalt fibers of cement mass is an optimal content ensuring the uniform distribution of fibers in the concrete volume, the growth of compression strength of concrete by 51.2% and tensile strength by 28.8%. In the course of microscopic study of basalt fiber, new formations on the surface of basalt fibers are revealed; it shows the increase in adhesion of cement stone to fibers. The introduction of basalt fibers in the concrete mix significantly improves the uniformity of concrete quality indicators.

Keywords: fiber concrete, basalt fiber, fiber distribution, compression strength, tensile strength, uniformity, basalt fiber concrete.

На строительном рынке получили развитие эффективные архитектурно-строительные объекты со сложными условиями эксплуатации и ресурсосберегающие технологии возведения зданий с использованием малоэнергоемких конструкционных материалов с повышенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками [1]. При изготовлении несущих конструкций зданий с малой материалоемкостью используют модифицированные бетоны с повышенной прочностью и однородностью параметров качества, характеристики которых используются при расчетах конструкций на основе классов бетонов по прочности.

В рамках выполнения работ по комплексному проекту № 02.G25.310022 с Минобрнауки России и № 109-12/НИОКТР с ОАО «Томский ДСК» научно обоснованы технологические приемы повышения уровня и стабильности прочностных показателей бетонов путем введения в бетонную смесь микроармирующих и водоредуцирующих (суперпластифицирующих добавок) [1, 2]. Дисперсное армирование структуры бетона осуществляется волокнами (фибрами) минерального и органического происхождения. При введении в смесь волокон в бетоне формируется пространственная микроармированная цементная матрица, которая противодействует сжимающим и растягивающим напряжениям, возникающим в бетоне при усадочных деформациях в процессе твердения и при внешнем силовом воздействии [3, 4].

Перспективным материалом для дисперсного армирования бетона являются базальтовые волокна, однако их применение затруднено в связи с технологическими сложностями обеспечения равномерности распределения в цементной матрице бетона, а также с наличием проблем в инженерных методах расчета конструкций из базальтофибробетона, особенно применительно к использованию в мелкозернистых бетонах [3, 5–8].

Цель работы – разработка рациональных технологических приемов введения базальтовых волокон в бетонную смесь при достижении максимальной прочности бетона и составление математической модели управления прочностью в зависимости от содержания волокон.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с программой (рис. 1), предусматривающей изучение влияния: содержания базальтовых волокон в смеси (μ_{bf}), способов их предварительной подготовки различными водными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ), селективного введения компонентов, скорости перемешивания фибробетонной смеси на прочность при сжатии и раскалывании фибробетонных образцов. Содержание волокон в бетонной смеси назначалось по отношению к массе цемента в процентах. Минимальное количество образцов для каждого испытания принималось равным шести.

В качестве сырьевых материалов при проведении исследований применялись: портландцемент бездобавочный Цем I 42,5Н (ГОСТ 30515–2012) производства ООО «Топкинский цемент» (г. Топки, Кемеровская обл.); песок Кандинского месторождения (Томская обл.) с модулем крупности 2,8 мм (ГОСТ 8736–93); отсевы камнедробления фракции 5–10 мм (ГОСТ 31424–2010); водопроводная вода (ГОСТ 23732–2011); базальтовое волокно диаметром 13–17 мкм, средней длиной 14 мм (ТУ 5769-004-80104765–2008), изготовленное НПО «Вулкан» (г. Пермь).

Для определения влияния ПАВ на качество распределения волокон в объеме бетонной смеси выбраны:

– гиперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов Muraplast FK 48 (ТУ 5745-006-51552155–2003);

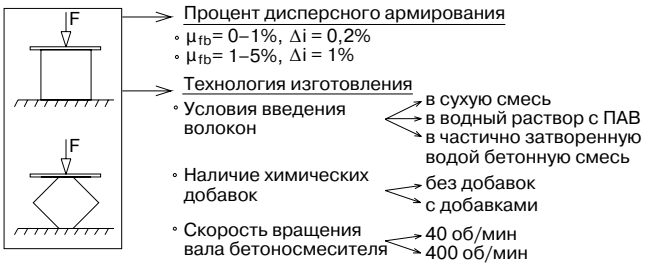

Рис. 1. Программа экспериментальных исследований

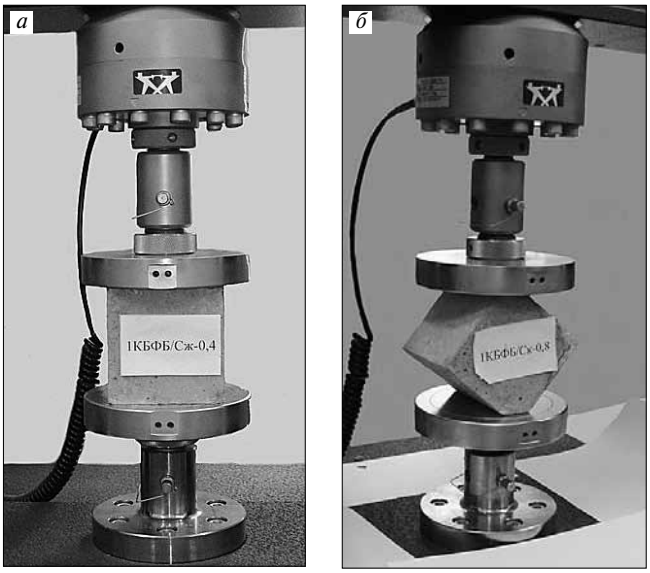

Рис. 2. Общий вид испытания экспериментальных образцов: *а* – при сжатии; *б* – при раскалывании

– суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов Power Flow 1190 (ТУ 5745-096-51552155–2011);

– комплексный модификатор «Полипласт-1МБ», представляющий собой смесь поверхностно-активных натриевых солей метиленбиссульфокислоты и кремнеземистого компонента (ТУ 5745-013-58042865–2006).

Разработка составов фибробетонной смеси с маркой по подвижности П2 проводилась по методике кафедры «Строительные материалы и технологии» ТГАСУ. Базовый состав бетонной смеси принят 1:1,5:4 (Ц:П:Щ) при В/Ц = 0,65 и средней плотности бетона ρ = 2300 кг/м^3. Исследовалось семь вариантов введения базальтовых волокон и перемешивания бетонной смеси (табл. 1).

В бетонную смесь с подвижностью П2 вводились базальтовые волокна в количестве μ_{bf} = 0–1% от массы цемента с шагом 0,2% и μ_{bf} = 1–5% от массы цемента с шагом 1%.

Бетонные образцы испытывались в возрасте 28 сут статической нагрузкой на электромеханическом прессе Instron-3382 на сжатие по ГОСТ 10180–2012 и на раскалывание по известным рекомендациям (М.Ю. Лещинский, Б.Г. Скрамтаев. Испытание прочности бетона. М.: Стройиздат, 1973. 272 с.). Общий вид испытания опытных образцов представлен на рис. 2.

Полученные экспериментальные данные были обработаны с использованием математических методов статистики. На рис. 3 представлены установленные закономерности влияния содержания базальтовых волокон и способов приготовления фибробетонной смеси на прочность бетона при сжатии и растяжении.

Максимальные значения прироста прочности при сжатии и растяжении (51,2% и 28,8%, соответственно) получены при содержании базальтовых волокон μ_{bf} = 0,5% и высокоскоростном способе приготовления бетонной смеси (вариант Т1) по сравнению с аналогичными образцами бетона без волокон. При введении базальтовых волокон в сухую смесь и перемешивании в

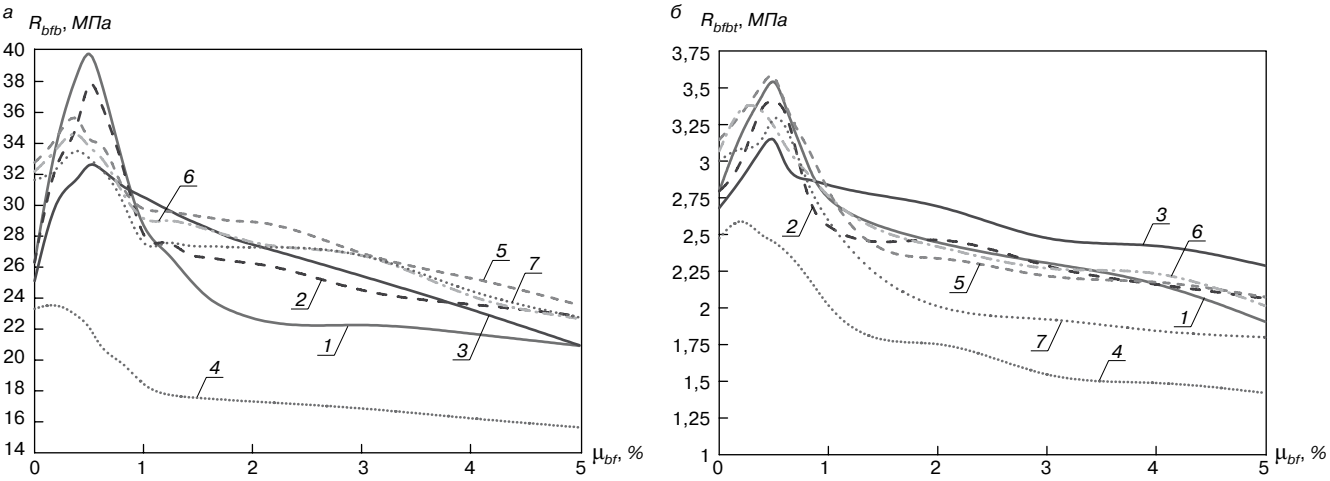

Рис. 3. Влияние содержания базальтовых волокон и способа приготовления бетонной смеси на прочность фибробетона при сжатии (*а*) и при растяжении (*б*): *1* – Т1; *2* – Т2; *3* – Т3; *4* – Т4; *5* – Т5; *6* – Т6; *7* – Т7

Таблица 1

Технологические приемы приготовления фибробетонных смесей

Варианты изготовления фибробетонных смесей	Способ введения волокон		Скорость перемешивания, об/мин		Предварительное разделение волокон в воде с ПАВ		
	В сухую смесь	В частично затворенную водой смесь*	40	400	Power Flow 1190	Muraplast FK 48	Полипласт 1МБ
Т1		+		+			
Т2	+			+			
Т3	+		+				
Т4**	+						
Т5		+		+	+		
Т6		+		+		+	
Т7		+		+			+

* Бетонная смесь предварительно перемешивалась с 40% воды затворения.
** Смесь перемешивалась вручную.

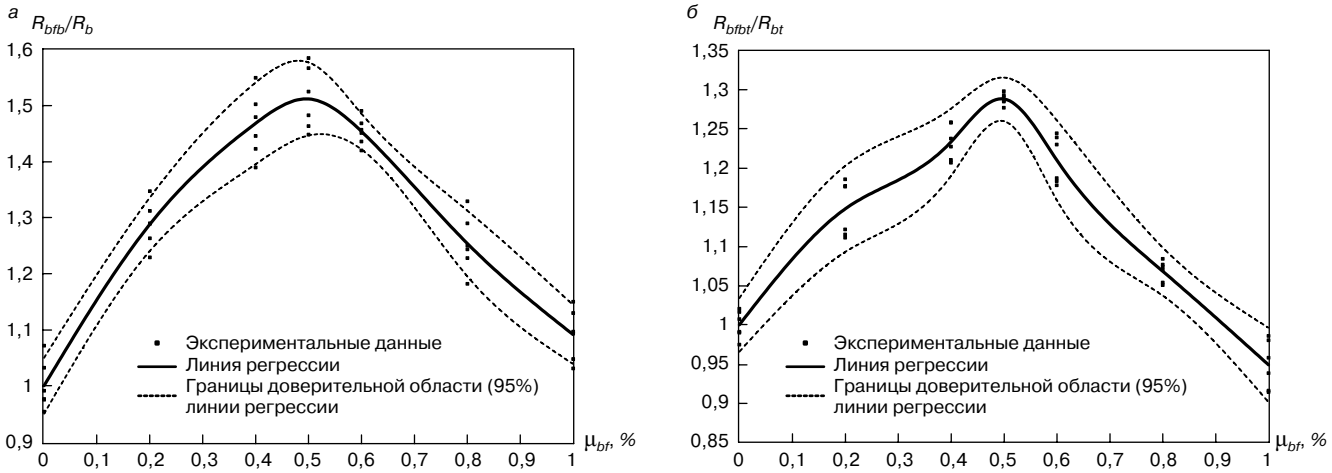

Рис. 4. Зависимость прочности базальтофибробетона, изготовленного по технологии Т1, от процента дисперсного армирования: *а* – при сжатии; *б* – при растяжении

Таблица 2

Полиноминальные аппроксимирующие функции для определения прочности базальтофибробетона при сжатии и растяжении, изготовленного по варианту Т1

Степень полинома	Аппроксимирующая функция	Коэффициент детерминации R^2
При сжатии:		
3	$R_{bfb} = R_b \cdot (1 + 2{,}202\mu_{bf} - 2{,}917\mu_{bf}^2 + 0{,}79\mu_{bf}^3)$	0,9744
4	$R_{bfb} = R_b \cdot (1 + 1{,}205\mu_{bf} + 2{,}552\mu_{bf}^2 - 8{,}213\mu_{bf}^3 + 4{,}547\mu_{bf}^4)$	0,9983
5	$R_{bfb} = R_b \cdot (1 + 1{,}481\mu_{bf} + 0{,}157\mu_{bf}^2 - 1{,}387\mu_{bf}^3 + 3{,}3\mu_{bf}^4 + 3{,}141\mu_{bf}^5)$	0,9986
При растяжении:		
3	$R_{bfbt} = R_{bt} \cdot (1 + 1{,}206\mu - 1{,}656\mu_{bf}^2 + 0{,}387\mu_{bf}^3)$	0,9585
4	$R_{bfbt} = R_{bt} \cdot (1 + 0{,}426\mu_{bf} + 2{,}623\mu_{bf}^2 - 6{,}658\mu_{bf}^3 + 3{,}558\mu_{bf}^4)$	0,9841
5	$R_{bfbt} = R_{bt} \cdot (1 + 0{,}699\mu_{bf} + 0{,}249\mu_{bf}^2 + 0{,}108\mu_{bf}^3 - 4{,}22\mu_{bf}^4 + 3{,}114\mu_{bf}^5)$	0,9847

обычных смесителях принудительного действия (вариант Т3) с дозировкой волокон 0,5% получен прирост прочности при сжатии 29,8%, а при растяжении – 17,4%. Повышение прочности при сжатии 0,9% и при растяжении 4,7% получено при перемешивании бетонной смеси вручную с содержанием базальтовых волокон 0,2% (вариант Т4), при значительном ухудшении показателя однородности.

При предварительном разделении базальтовых волокон в водном растворе с добавками Power Flow 1190, Muraplast FK 48, Полипласт 1МБ и введении их в бетонную смесь, частично затворенную водой, при скорости перемешивания 400 об/мин (варианты Т5, Т6, Т7) приводит к увеличению прочности при сжатии до 34,9% и растяжению до 27,8% при улучшении показателя однородности в сравнении с бетоном базового состава.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены зависимости прироста прочности базальтофибробетона, изготовленного по технологии Т1 от процента дисперсного армирования при μ_{bf} = 0–1% (рис. 4). Средний коэффициент вариаций прочности при сжатии и растяжении для составов Т1 не превышал 4,1%, а для составов Т5–Т7 – не более 2,8%. Установленные зависимости выражены полиноминальными аппроксимирующими функциями 3-й, 4-й и 5-й степени с соответствующими им коэффициентами детерминации (табл. 2).

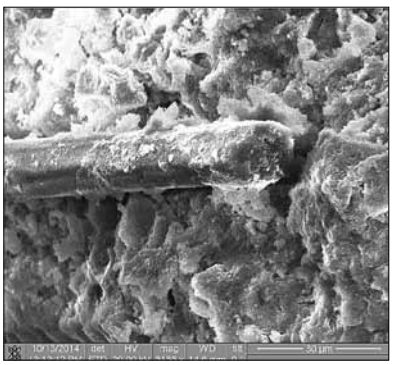

Рис. 5. Микрофотография базальтового волокна в бетоне

Для установления причин изменения прочностных характеристик бетона проведены исследования поверхностей разрушенных образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 200 3D с термоэмиссионным катодом и сфокусированным ионным пучком.

На поверхности базальтовых волокон идентифицируются новообразования низкоосновных гидросиликатов кальция вследствие химического взаимодействия базальтового волокна и продуктов гидратации цемента, что способствует повышению прочности сцепления волокна с цементным камнем (рис. 5).

На рис. 6 представлены микрофотографии поверхности базальтофибробетона, изготовленного по технологиям Т1 и Т5 с содержанием волокон 0,5% и 5%; сплошной линией выделены закрепленные в бетоне волокна, пунктирной линией выделены выдернутые волокна.

При μ_{bf} = 0,5% (рис. 6, *а*), высокоскоростном и обычном принудительном перемешивании смеси наблюдается равномерное распределение волокон в базальтофибробетоне (плотность содержания волокон до 7,4 волокон на 1 мм^2 при количестве выдернутых волокон 8,5%). При μ_{bf} = 0,8 – 1 % в базальтофибробетоне наблюдаются скопления базальтовых волокон (13,3 волокна на 1 мм^2, до 9,8% выдернутых волокон). При μ_{bf} = 1–5% обнаружены локальные скопления базальтовых волокон как с параллельно, так

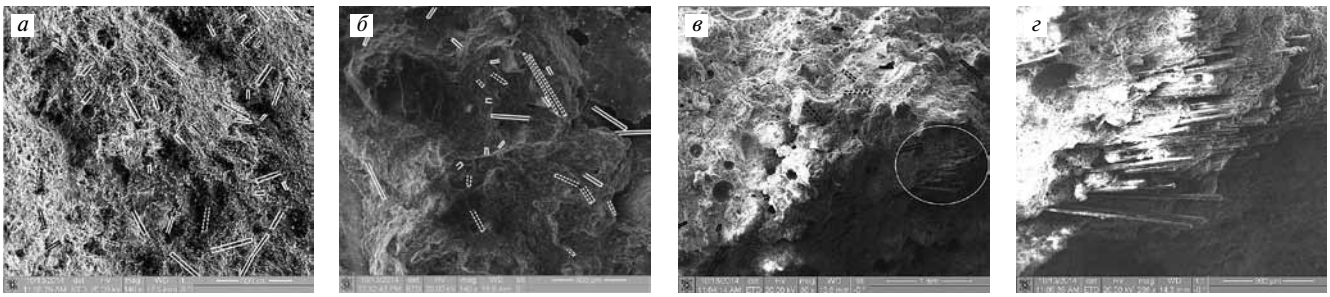

Рис. 6. Распределение волокон в базальтофибробетоне, изготовленном по технологиям: *а* – Т1, μ_{bf} = 0,5%; *б* – Т5, μ_{bf} = 0,5%; *в* – Т1, μ_{bf} = 5%; *г* – Т1, μ_{bf} = 5% (с увеличением выделенного фрагмента)

и с хаотически направленными волокнами, при этом волокна не распределяются равномерно по объему, что нарушает однородность структуры фибробетона и способствует образованию зон концентрации напряжений и образованию трещин (рис. 6, *в, г*). В фибробетонах, изготовленных по технологиям Т5–Т7 (рис. 6, *б*), отмечено наличие большого количества выдернутых из тела бетона волокон (до 6,9 волокна на 1 мм^2, до 42,3% выдернутого волокна), в связи с чем можно сделать вывод, что поверхностно-активные вещества покрывают поверхность базальтовых волокон и выступают в роли «смазки», снижая прочность сцепления волокна с бетоном. Во всех случаях повреждения или разрывы базальтовых волокон в бетоне не были обнаружены.

По результатам анализа установленных закономерностей и микроструктуры базальтофибробетона определено оптимальное содержание базальтовых волокон 0,5% от массы цемента по критерию прироста прочности. Максимальный прирост прочности фибробетона получен при введении волокон в частично увлажненную смесь с последующим высокоскоростным перемешиванием и составил 51,2% при сжатии и 28,8% при растяжении, при этом коэффициент вариаций прочности не превышал 4,1%. Предварительное разделение волокон в водном растворе с Power Flow 1190 с дальнейшим введением полученной суспензии в увлажненную бетонную смесь (вариант Т5) позволяет увеличить прочность при сжатии до 34,9%, при растяжении 27,8% относительно базового состава бетона и уменьшить коэффициент вариаций прочности до 2,8%. Полученные результаты исследований использованы при разработке технологического регламента приготовления базальтофибробетонной смеси.

Список литературы

1. Кудяков А.И., Ушакова А.С., Кудяков К.Л., Дубасаров Д.И., Ефремова В.А. Тенденции в развитии технологии высокопрочных тяжелых цементных бетонов // *Строительство энергоэффективного полносборного жилья экономического класса: Сборник научных трудов*. Томск: ТГАСУ, 2014. С. 125–131.
2. Кудяков А.И., Ушакова А.С., Кудяков К.Л., Невский А.В. Влияние пластифицирующих и микроармирующих добавок на прочностные и реологические характеристики бетона // *Ресурсосберегающие технологии и эффективное использование местных материалов в строительстве: Международный сборник научных трудов*. Новосибирск: НГАУ. 2013. С. 10–14.
3. Василовская Н.Г., Енджиевская И.Г., Калугин И.Г. Цементные композиции, дисперсно-армированные базальтовой фиброй // *Вестник ТГАСУ*. 2011. № 3. С. 153–158.
4. Войлоков И. А., Канаев С.Ф. Базальтофибробетон. Исторический экскурс // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 4. С. 26–31.
5. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: АСВ, 2004. 560 с.
6. Weimin L., Jinyu X. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading // *Material Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 505, pp. 178–186.
7. Abdulhadi M. A comparative study of basalt and polypropylene fibers reinforced concrete on compressive and tensile behavior // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2014. Vol. 9. № 6, pp. 295–300.
8. Elshekh A.E.A., Shafiq N., Nuruddin M.F., Fathi A. Evaluation the effectiveness of chopped basalt fiber on the properties of high strength concrete // *Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 14. № 10, pp. 1073–1077. doi: 10.3923/jas.2014.1073.1077.

References

1. Kudyakov A.I., Ushakova A.S., Kudyakov K.L., Dubasarov D.I., Efremova V.A. Trends in technology development of high strength heavy cement concrete. *Building of energy-efficient full assembly economy-class housing: Collection of scientific papers*. Tomsk: TSUAB. 2014, pp. 125–131. (In Russian).
2. Kudyakov A.I., Ushakova A.S., Kudyakov K.L., Nevskii A.V. Influence of plasticizers and microarming additives on strength and rheological characteristics of the concrete. *Resource-saving technologies and efficient using of local materials in building. International collection of scientific papers*. Novosibirsk: NGAU. 2013, pp. 10–14. (In Russian).
3. Vasilovskaya N.G., Endzhievskaya I.G., Kalugin I.G. Cement compositions disperse-reinforced by the basalt fiber. *Vestnik TGASU*. 2011. № 3, pp. 153–158. (In Russian).
4. Voilokov I.A., Kanaev S.F. Bazaltofibrobeton. Historical excursus. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2009. № 4. pp. 26–31. (In Russian).
5. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktsii [Composites based on concrete with dispersed reinforcement. Issues of theory and design, technology, design]. Moscow: ASV. 2004. 560 p. (In Russian).
6. Weimin L., Jinyu X. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading. *Material Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 505. pp. 178–186. (In English).
7. Abdulhadi M. A comparative study of basalt and polypropylene fibers reinforced concrete on compressive and tensile behavior. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2014. Vol. 9. № 6. pp. 295–300. (In English).
8. Elshekh A.E.A., Shafiq N., Nuruddin M.F., Fathi A. Evaluation the effectiveness of chopped basalt fiber on the properties of high strength concrete. *Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 14. № 10. pp. 1073–1077. doi: 10.3923/jas.2014.1073.1077. (In English).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО, ОСНАЩЕНИЕ И ЗАПУСК ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Компания ООО «ВКБ-Инжиниринг» основана в августе 2012 года, но уже на сегодняшний день занимает лидирующие позиции в списке инжиниринговых компаний, работающих на территории юга России.

Наша основная задача – воплощение идей Заказчика в оптимальные практические решения успешной реализации проектов. ООО «ВКБ-Инжиниринг» осуществляет полный комплекс инжиниринговых услуг по проектированию, поставке и строительству производственных объектов и объектов сельскохозяйственного назначения (инжиниринг «под ключ»).

Услуги ООО «ВКБ-Инжиниринг» включают в себя:

- технико-экономические обоснования / оценка текущего состояния объекта;
- проектировка объектов строительства с учетом всех требований заказчика;
- выбор места строительства и освоение земель;
- разработка проектной продукции;
- разработка и сопровождение договоров поставки оборудования (в том числе нестандартного);
- выполнение функций технического заказчика (Генподрядчика).

Выбирая ООО «ВКБ-Инжиниринг» Вы приобретаете надежного партнера, заинтересованного в долгосрочном сотрудничестве.

ООО «ВКБ-Инжиниринг» имеет успешный опыт участия в строительстве крупных промышленных объектов не только в Краснодарском крае, но и за его пределами. Кроме непосредственно участия в организации и контроле процесса строительства/модернизации объектов, ООО «ВКБ-Инжиниринг» оказывает широкий спектр услуг по техническому сопровождению и ведению проектов, поставке оборудования и комплектующих российских и зарубежных поставщиков.

Реклама