

## Внешнее армирование изгибаемых фибробетонных изделий углеволокном

*К.т.н., доцент С.В. Ключев\*,  
ФГБОУ ВПО Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова;  
директор Ю.В. Гурьянов,  
ООО «НИИ ВСУ «ИНТЕР/ТЭК»*

**Ключевые слова:** усиление; изгибаемые конструкции; углеродное волокно

В настоящее время применение композиционных материалов в строительстве обосновано их высокими прочностными и деформативными характеристиками. Эти материалы по сравнению с традиционными более прочные, долговечные и легкие. В России производство таких композитов становится все более дешевым в связи с развитием технологии их изготовления. Увеличение срока эксплуатации материалов приводит к снижению стоимости обслуживания и ремонта зданий и сооружений [1–8].

Композиционные материалы на основе углеволокна могут быть использованы при ремонте и реконструкции мостов, путепроводов, тоннелей, резервуаров, подпорных стен, конструкций промышленных и общественных зданий, а также при проектировании новых строительных объектов [9]. Основными достоинствами материалов являются высокая удельная прочность (коэффициент конструктивного качества) и отношение прочности к плотности, благодаря этому на их основе получают очень эффективные конструкции [10–18].

Применение композиционных материалов для усиления конструкций имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами:

- высокая прочность при растяжении;
- коррозионная стойкость;
- простота применения;
- высокая усталостная прочность;
- отсутствие размерных ограничений.

Успех применения композиционных материалов для усиления строительных конструкций зависит не только от выбора эффективных композитов, но в значительной мере от решения проблем совместности их работы с восстанавливаемой или усиливаемой конструкцией. Для этого важен выбор материалов и технологий для ремонта деструктивной поверхности железобетона, обеспечивающих их высокую адгезию в подложке. Этот ремонтный слой, в свою очередь, должен быть надежным основанием для приклейки усиливающих композиционных материалов и работать с ними совместно. Подготовка железобетонной конструкции к ремонту и последующему усилению должна включать мероприятия по защите от коррозии арматуры, которая, как правило, развивается при первых признаках деструкции. Без проведения специальных мероприятий образующиеся продукты коррозии будут отрывать защитный слой от ремонтных материалов, что сведет на нет работы по наклейке композитов.

Система ремонта предусматривает использование материалов и технологий, обеспечивающих остановку и предотвращение дальнейшего развития коррозии арматуры и бетона, надежное сцепление ремонтных составов со старым бетоном, повышенную водонепроницаемость, морозостойкость и химическую стойкость. К числу таких материалов относятся: пенетрирующие ингибиторы коррозии арматуры; полимерцементные сухие смеси с быстрым набором прочности; специальные латексные эмульсии, повышающие сцепление со старым бетоном; защитные покрытия для предотвращения проникновения ионов хлора; низковязкие эпоксидные составы для ремонта трещин и специальные эпоксидные составы для ремонта конструкций в условиях повышенной влажности и под водой [2].

В систему ремонта входит также усиление конструкций, которое осуществляется путем внешнего армирования особо высокопрочными тканями из углеродных и специальных стеклянных волокон на эпоксидном связующем. Армирующие элементы создаются наклейкой соответствующих тканей на отремонтированную поверхность специальными эпоксидными составами, обеспечивающими надежное сцепление с бетоном и ремонтными материалами.

Усиление бетонных и железобетонных конструкций углеродными лентами сейчас активно применяется в Европе [8,10,11]. В России в последнее время также получили широкое применение Ключев С.В., Гурьянов Ю.В. Внешнее армирование изгибаемых фибробетонных изделий углеволокном

распространение композиты на основе углеволокна. Эти композиты можно разделить на две основные группы: формируемые на строительном объекте и заводского изготовления [12-17].

Для изгибаемых изделий целесообразно использовать внешнее армирование. Поскольку эти изделия работают преимущественно на изгиб, то для проведения экспериментальных исследований по их усилению целесообразно применять углеродную ткань с расположением волокон в одном направлении (однаправленную) (рис. 1).



Рисунок 1. Углеродная однаправленная ткань

Углеродные ткани изготавливают из жгутов углеродных волокон путем прядения. По данным производителя [4], они имеют следующие характеристики:

- толщина (0,1–0,4 мм) зависит от количества волокон в жгутах, диаметра волокон и расположения жгутов;
- масса – 0,15–0,5 кг/м<sup>2</sup>;
- ширина, как правило, от 100 мм до 1500 мм;
- прочность при растяжении – 1200–3000 МПа;
- модуль упругости – 100–300 ГПа;
- относится к группе трудногораемых строительных материалов.

Композиционные материалы, полученные путем проклейки ткани полимерной смолой (например, эпоксидной), используют, в частности, для усиления бетонных и железобетонных конструкций. Они наклеиваются на поверхность восстанавливаемой или усиливаемой конструкции послойно в растянутой зоне с помощью пропитки специальными эпоксидными смолами каждого слоя.

В технологии усиления строительных конструкций углеволокном путем внешнего армирования можно выделить следующие этапы:

- подготовка основания под наклейку;
- раскрой углеродной ткани;
- приготовление адгезива;
- наклейка лент.

### Экспериментальное исследование фибробетонных конструкций

В ходе эксперимента исследовались фибробетонные образцы, как усиленные, так и восстановленные с помощью ткани из углеволокна.

Для изготовления бетонных образцов применялся товарный цемент ЗАО «Белгородский цемент» Цем I 42,5Н (табл. 1 и рис. 2), отходы мокрой магнитной сепарации (отходы ММС) и суперпластификатор [9].

Армирующей фиброй была стальная волновая от производителя «Росфибра». В качестве заполнителя применялся отсев дробления кварцитопесчаника. Для получения более плотной упаковки заполнителя использовался песок Таволжанского месторождения. Для оценки качества применяемых заполнителей были изучены их основные физико-механические свойства (табл. 2).

Таблица 1. Химический состав цемента

Марка цемента	Химический состав, % по массе								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	CaO <sub>св</sub>	прочее
ЦЕМ I 42,5Н	22,49 ±0,5	4,77 ±0,3	4,40 ±0,1	67,22 ±1,0	0,43 ±0,03	2,04 ±0,01	0,20 ±0,05	0,20 ±0,05	1,5 ±0,5

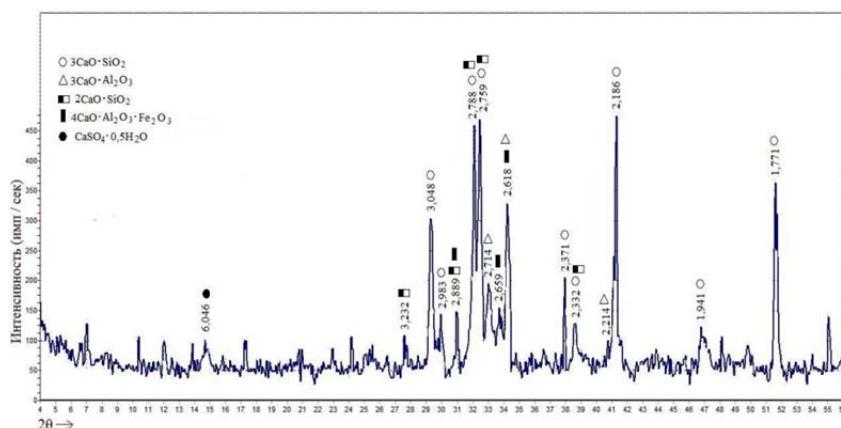


Рисунок 2. Дифрактограмма цемента

Таблица 2. Физико-механические характеристики заполнителя

Показатель	Отсев дробления КВП	Таволжанский песок
Модуль крупности	3,50	1,38
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1490	1448
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	2710	2630
Пустотность, %	47,8	44,9
Водопотребность, %	5,5	7

Проведенные исследования по определению минералогического состава заполнителя позволили установить, что:

- 1) мелкий заполнитель в виде кварцевого песка Таволжанского месторождения в качестве главного минерала содержит кварц ( $\beta$ - $\text{SiO}_2$ ), идентифицируемый по отражениям 3,34; 4,25; 1,82 Å. Аксессуаром в исследуемом материале является кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ), содержание которого не превышает 5% (рис. 3 и табл. 3);
- 2) основным минералом мелкого заполнителя в виде отсева дробления кварцитопесчаника является кварц, содержание которого составляет около 87% (рис. 4, табл. 4). Аксессуарными минералами выступают мусковит (6%), альбит (3%) и кальцит (1,6%).

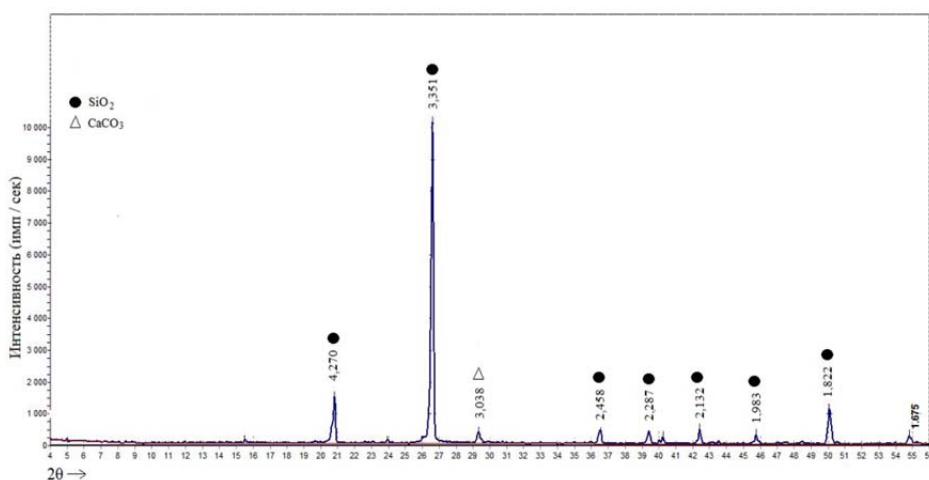


Рисунок 3. Дифрактограмма кварцевого песка Таволжанского месторождения

Таблица 3. Минералогический состав кварцевого песка Таволжанского месторождения

№пробы	Формула	Название	Основные отражения	Условная концентрация, %	Эталоны №ICDD
06746	$\text{SiO}_2$	Quartz	3,34 <sub>x</sub> 4,25 <sub>2</sub> 1,82 <sub>2</sub>	95,2	46-1045
	$\text{CaCO}_3$	Calcite	3,03 <sub>x</sub> 2,28 <sub>2</sub> 2,09 <sub>2</sub>	4,8	5-586

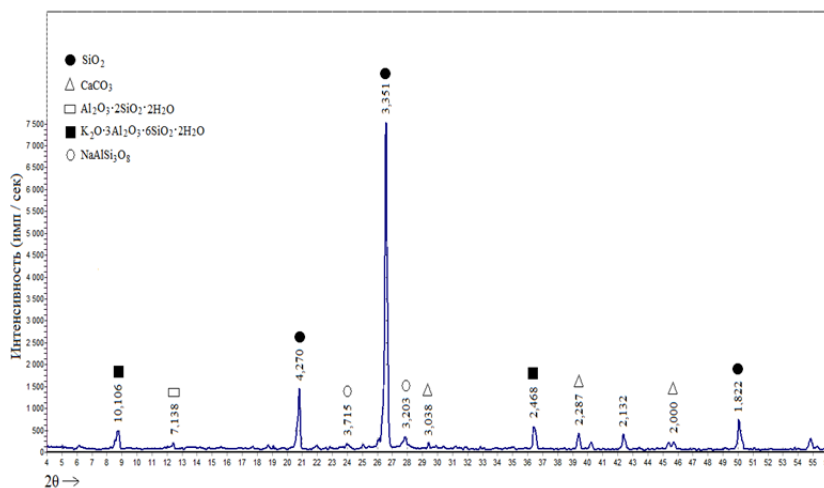


Рисунок 3. Дифрактограмма отсева дробления кварцитопесчаника

Таблица 4. Минералогический состав отсева дробления кварцитопесчаника

№пробы	Формула	Название	Основные отражения	Условная концентрация, %	Эталон №ICDD
06747	SiO <sub>2</sub>	Quartz	3,34 <sub>x</sub> 4,25 <sub>1</sub> 1,82 <sub>2</sub>	87,3	46-1045
	CaCO <sub>3</sub>	Calcite	3,03 <sub>x</sub> 2,28 <sub>2</sub> 2,09 <sub>2</sub>	1,6	5-586
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Kaolinite	7,14 <sub>x</sub> 3,57 <sub>6</sub> 4,36 <sub>5</sub>	1,6	80-886
	K <sub>2</sub> O·3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Muscovite	10,03 <sub>x</sub> 2,57 <sub>3</sub> 3,34 <sub>9</sub>	6,3	15-780
	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Albite	3,19 <sub>x</sub> 3,78 <sub>3</sub> 3,68 <sub>2</sub>	3,2	9-466

Были проведены экспериментальные исследования призм размерами 100×100×400 мм (рис. 5). В качестве адгезива использовался клей эпоксидный марки «ЭДП» (ТУ 2385-012-54804491–2002), изготовленный из эпоксидной смолы ЭД-20. Клей предназначен для приклеивания углеродной ткани на бетонный образец. Соотношение между углеродной тканью и эпоксидным клеем 60:40.

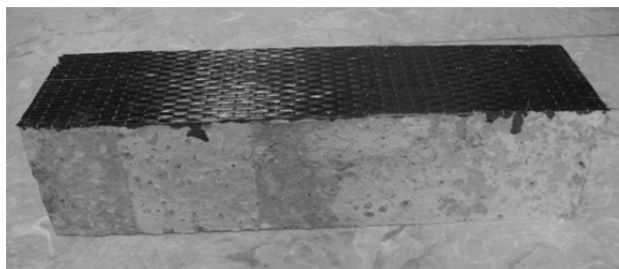


Рисунок 5. Углеродная однонаправленная ткань, наклеенная на образец

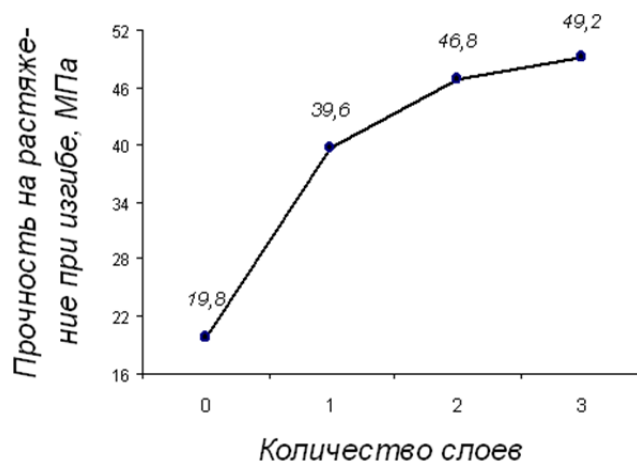


Рисунок 6. Характер разрушения бетонных призм, усиленных углеволокном

На рис. 6 представлен характер разрушения сталефибробетонных призм. Он изменяется, поскольку бетон работает совместно с косвенной внешней арматурой. Внешнее армирование позволяет усиленному образцу воспринимать более высокую нагрузку по сравнению с контрольными образцами. На рис. 7 представлены результаты испытания бетонных призм.

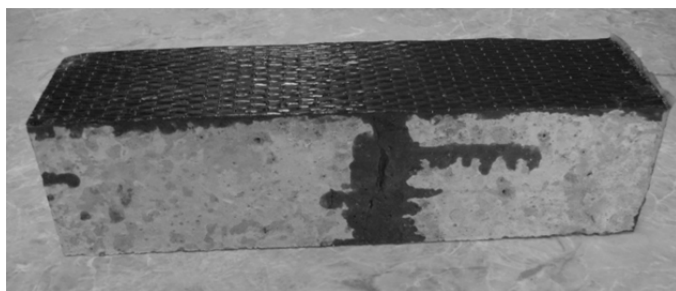
Результаты проведенных экспериментальных исследований оказались близкими к теоретическим расчетам. Методика расчета по усилению изгибаемых конструкций углеволокном приведена в работе [2].

Анализ рис. 7 показывает нелинейное увеличение прочности усиленных образцов в зависимости от количества наклеенных слоев углеродных лент.



**Рисунок 7. Зависимость прочности на растяжение при изгибе от количества слоев углеродной ткани**

На следующем этапе осуществлялось изучение восстановления и усиления изгибаемых изделий углеродной лентой. Для этого проводились исследования по восстановлению и усилению сталефибробетонных призм. Сталефибробетонную призму вначале разрушили, затем склеили две части призмы эпоксидным клеем и произвели усиление конструкции углеволокном в растянутой зоне (рис. 8).



**Рисунок 8. Восстановленная и усиленная углеволокном призма**



**Рисунок 9. Характер разрушения бетонных призм, восстановленных и усиленных углеволокном**

Экспериментальные исследования этих призм показали увеличение предела прочности на растяжение при изгибе: не усиленные – 19,8 МПа, восстановленные и усиленные углеволокном – 23,4 МПа. Таким образом, наблюдается увеличение прочности на 18%, что свидетельствует об эффективности применения углеволокна при восстановлении и усилении строительных конструкций (рис. 9).

### **Выводы**

1. Установлен механизм влияния внешнего армирования бетонных изгибаемых изделий на композиционных вяжущих и техногенных песках на прочностные характеристики. Разрушение образца происходит не по восстановленному сечению. Представляется, что композит на основе углеволокна в растянутой зоне образца практически полностью воспринимает растягивающее усилие за счет концентрации волокон в этой зоне. Экспериментально доказано, что усиление изгибаемых элементов за счет композита позволяет повысить предел прочности на растяжение при изгибе в 2–3 раза.

2. Разработаны принципы усиления изгибаемых фибробетонных строительных конструкций с использованием мелкозернистого бетона на основе техногенных песков.

3. Предложена область использования полос композита из углеволокна для усиления изгибаемых элементов из сталефибробетона на основе техногенного песка.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке в виде гранта для аспирантов и молодых научно-педагогических работников БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках реализации мероприятий Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 годы по теме «Разработка теоретических и практических основ усиления и восстановления строительных конструкций композитом на основе углеволокна путем внешнего армирования» и в виде грантов президента Российской Федерации МК-5667.2013.8 по теме «Повышение эксплуатационных характеристик бетонных и железобетонных изделий и конструкций на композиционных вяжущих и техногенного песках за счет дисперсного и внешнего армирования»

## Литература

1. Ключев А.В. Усиление изгибаемых конструкций композитами на основе углеволокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №3. С. 38–41.
2. Ключев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна // Бетон и железобетон. 2012. №3. С. 23–26.
3. Ключев С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 61–66.
4. Ключев С.В., Лесовик Р.В., Рубанов В.Г. Расчет изгибаемых конструкций усиленных композитами на основе углеродного волокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №4. С. 55-58.
5. Чернявский В.Л., Хаютин Ю.Г., Аксельрод Е.З., Клевцов В.А., Фаткуллин Н.В. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. М.: ИнтерАква, 2006. 113 с.
6. Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство. 2003. №3. С. 15-16.
7. Композит, холдинговая компания [Электронный ресурс]. URL: <http://www.compozit.su> (дата обращения: 02.04.2011).
8. ИнтерАква, инженерно-производственный центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.interaqua.biz> (дата обращения: 02.04.2011).
9. Ключев С.В., Ключев А.В., Лесовик Р.В. Усиление строительных конструкций композитами на основе углеволокна: монография. Lambert, 2011. 123 с.
10. Nabil F. Grace, Singh S.B. Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design // ACI Structural Journal. 2005. Vol. 102. №1. Pp. 40-53.
11. Бондаренко С.В., Санжарновский Р.С. Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий. М.: Стройиздат, 1990. 352 с.
12. Bakis C.E., Bank L.C., Brown V.L., Cosenza E., Davalos J.F., Lesko J.J., Machida A., Rizkalla S.H., Triantifillou T.C. Fibre-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review // Journal of Composites in Construction. 2002. Vol. 6. №2. Pp. 73–87.
13. Чернявский В. Л. Аксельрод Е. З. Применение углепластиков для усиления железобетонных конструкций промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2004. №3. С. 37–38.
14. Nanni A. FRP Reinforcement for Bridge Structures // Proceedings of Structural Engineering Conference, The University of Kansas, Lawrence, KS, March 16, 2000. P. 5.
15. Crawford J.E., Malvar L.J., Morrill K.B., Ferritto J.M. Composite Retrofits to Increase the Blast Resistance of Reinforced Concrete Buildings. P-01-13 // Tenth International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, May 2001. Pp. 22.
16. Bisby L.A., Kodur V.K.R., Green M.F. Fire endurance of fiber-reinforced polymer-confined concrete columns // ACI Structural Journal. 2005. Vol. 102. №6. Pp. 883-891.
17. Kodur V., Bisby L.A., Green M.F. FRP Retrofitted Concrete under Fire Conditions: Performance verification of insulated reinforced concrete members // Concrete International. 2006. Vol. 28. №12. Pp. 37-44.

\*Сергей Васильевич Ключев, Белгород, Россия

Тел. раб.: +7(4722)58-63-38; эл. почта: [klyuyev@yandex.ru](mailto:klyuyev@yandex.ru)

© Ключев С.В., Гурьянов Ю.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.36.3

## External reinforcing of fiber concrete constructions by carbon fiber tapes

**S.V. Klyuyev,**  
*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia*  
**Yu.V. Guryanov,**  
*NII VSU "INTER/TEK"*  
+7(4722)58-63-38; e-mail: klyuyev@yandex.ru

### Key words

strengthening; bendable constructions; carbon fiber

### Abstract

Strengthening the concrete and reinforced concrete structures with carbon fiber tapes is very actively applied in Europe nowadays. In Russia composites based on carbon fiber have also widely spread recently. The main advantages of these materials for strengthening structures are its high specific strength (strength-weight ratio) and strength-to-density ratio.

Experimental studies on strengthening and restoration of the constructions were held. Flexible fiber concrete constructions based on man-made sand filler were used in the experiment. Corrugated steel fiber was used as the internal reinforcement. Composite based on carbon fiber was used as the external reinforcement.

The technology of the external reinforcement is given. Recommendations for strengthening the flexible fiber concrete constructions are made in the article.

### References

1. Klyuyev A.V. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2011. No. 3. Pp. 38–41. (rus)
2. Klyuyev S.V. *Beton i zhelezobeton*. 2012. No. 3. Pp. 23–26. (rus)
3. Klyuyev S.V. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8(34). Pp. 61–66. (rus)
4. Klyuyev S.V. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2011. No. 4. Pp. 55–58. (rus)
5. Chernyavskiy V.L., Khayutin Yu.G., Akselrod Ye.Z., Klevtsov V.A., Fatkullin N.V. *Rukovodstvo po usileniyu zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitnymi materialami* [Guide to strengthening the reinforced concrete structures with composite materials]. Moscow: InterAkva, 2006. 113 p. (rus)
6. Chernyavskiy V.L., Akselrod Ye.Z. *Zhilishchnoye stroitelstvo*. 2003. No. 3. Pp. 15-16. (rus)
7. "Kompozit", *kholdingovaya kompaniya* ["Komposit", holding company] [Online]. URL: <http://www.compozit.su> ( Accessed 02.04.2011). (rus)
8. "InterAkva", *inzhenerno-proizvodstvennyy tsentr* ["InterAkva", Engineering and Production Centre] [Online]. URL: <http://www.interaqua.biz> (Accessed 02.04.2011). (rus)
9. Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Lesovik R.V. *Usileniye stroitelnykh konstruksiy kompozitami na osnove uglevolokna: monografiya* [Strengthening of building structures with composites based on carbon fiber: monograph]. Lambert, 2011. 123 p. (rus)
10. Nabil F. Grace, Singh S.B. Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design. *ACI Structural Journal*. 2005. Vol. 102. No. 1. Pp. 40-53.
11. Bondarenko S.V., Sanzharnovskiy R.S. *Usileniye zhelezobetonnykh konstruksiy pri rekonstruksii zdaniy* [Strengthening reinforced concrete structures in building reconstruction]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 352 p. (rus)
12. Bakis C.E., Bank L.C., Brown V.L., Cosenza E., Davalos J.F., Lesko J.J., Machida A., Rizkalla S.H., Triantifillou T.C. Fibre-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review. *Journal of Composites in Construction*. 2002. Vol.6. No 2. Pp. 73–87.
13. Chernyavskiy V. L. Akselrod Ye. Z. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2004. No. 3. Pp. 37–38. (rus)

14. Nanni A. FRP Reinforcement for Bridge Structures. *Proceedings of Structural Engineering Conference*. The University of Kansas, Lawrence, KS, March 16, 2000. Pp. 5.
15. Crawford J.E., Malvar L.J. Morrill K.B., Ferritto J.M. Composite Retrofits to Increase the Blast Resistance of Reinforced Concrete Buildings. P-01-13. *Tenth International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, May 2001*. Pp. 22.
16. Bisby L.A., Kodur V.K.R., Green M.F. Fire endurance of Fiber reinforced polymer-confined concrete columns. *ACI Structural Journal*. 2005. Pp. 883-891.
17. Kodur V., Bisby L.A., Green M.F. FRP Retrofitted Concrete under Fire Conditions: Performance verification of insulated reinforced concrete members. *Concrete International*. 2006. Vol. 28. No. 12. Pp. 37-43.

**Full text of this article in Russian: pp. 21-26**