

Д.С. Рыжков^{1, 2}, Д.А. Татьянников¹

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²ООО «ТАНТРА», Пермь, Россия

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УСИЛЕНИИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящий момент как в гражданском, так и транспортном строительстве при усилении несущих конструкций наиболее часто применяются методы с устройством обойм, использованием инъектирования, усилением стальными тяжами. С целью замены данных вариантов восстановления проводятся исследования по применению композитных материалов, позволяющих выполнять усиление железобетонных и каменных конструкций. За рубежом этот метод регламентирован, однако в нашей стране нормативные документы по данному вопросу носят лишь рекомендательный характер.

В статье на основе работ А.Н. Костенко и Б.К. Джамуева произведен расчет усиления каменных колонн жилого дома композитными материалами. Рассматриваемый объект расположен в г. Перми, срок его эксплуатации составляет 65 лет, для таких объектов характерно снижение несущей способности конструкций, в связи с чем было произведено инструментальное обследование дома, на основании результатов которого был выполнен дальнейший расчет. Представлены формулы расчета усиления композитными материалами и характеристики применяемой углеволоконистой ткани. В связи с возможностью вариантов расположения бандажей усиливаемого волокна рассмотрены различные способы их расположения и выбран оптимальный. Описана технология выполнения работ усиления и меры повышения огнестойкости конструкций. Также разработаны мероприятия, необходимые для предотвращения аварийных ситуаций при выполнении сплошного обертывания волокном усиливаемых конструкций.

В качестве альтернативного метода восстановления несущей способности на основании расчетных формул определено усиление при помощи устройства металлической обоймы. В заключительной части статьи представлен вывод, основанный на выполненном локальном сметном расчете обоих вариантов, произведено сравнение выбранных методов и сделаны выводы об эффективности применения каждого из них.

Ключевые слова: усиление, расчет, каменные конструкции, металлическая обойма, композитные материалы, углеродная ткань, экономическое сравнение.

D.S. Ryzhkov^{1, 2}, D.A. Tatyannikov¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²LLC "TANTRA", Perm, Russian Federation

THE RELEVANCE OF THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN THE REINFORCEMENT OF LOAD-BEARING STRUCTURES

At the moment, to strengthen load-bearing structures in civil and transport construction, the most commonly used methods are those with the use of clips, injection, steel bands. In place of these restoration options, studies are underway on the use of composite materials, which allow reinforcing concrete and masonry structures. Abroad, this method is officially regulated, but in our country regulatory documents on this issue are only advisory.

In the article, based on the works of Kostenko A.N. and Dzhamueva B.K., the calculation was made of the amplification of stone columns of a residential building with composite materials. The studied object is located in Perm; its lifetime is about 65 years. Such objects are characterized by a decrease in the bearing capacity of structures, in connection with which, an instrumental examination of the house was carried out, based on the results of which further calculation was performed. Formulas are presented for calculating the reinforcement with composite materials and the characteristics of the used carbon fiber fabric. Due to the possibility of different arrangement of reinforced fiber bandages, various options for their location were considered and the optimal one was selected. The technology of strengthening and the measures to increase the fire resistance of structures are described. The measures necessary to prevent emergency situations when performing continuous wrapping of reinforced structures with fiber are also outlined in the article.

As an alternative method of restoring the bearing capacity based on the calculation formulas, the reinforcement with a metal casing was calculated. In the final part of the article, a conclusion is presented, based on the performed local estimate calculation of both options. The selected methods are compared and the conclusions on the effectiveness of each of them are drawn.

Keywords: reinforcement, calculation, stone structures, metal casing, composite materials, carbon fiber fabric, economic comparison.

На сегодняшний день проблема физического износа несущих конструкций транспортных сооружений и жилого фонда является актуальным вопросом не только в Пермском крае, но и во всем мире. Строительные конструкции с каждым годом теряют свою прочность и устойчивость, поэтому необходимо изучение инновационных методов реконструкции зданий и сооружений для поддержания их в работоспособном состоянии.

Одним из относительно новых и малоизученных методов является применение композитных материалов на основе углеродных волокон для усиления каменных конструкций [1].

За рубежом способ восстановления несущих конструкций при помощи композитных материалов носит аббревиатуру FRP (Fiber Reinforced Polymer) – усиление полимерным волокном. Композитный материал представляет собой систему из армирующего и связующего компонента. В настоящий момент данные материалы представлены композитными тканями, лентами, холстами [2].

Применение данного метода является эффективным для усиления конструкций в сравнении с аналогичными типовыми материалами, такими как бетон, металлические конструкции, растворные компоненты, часто применяемые для восстановления конструкций, поскольку композитные материалы имеют отличные от описанных прочностные и деформативные характеристики (прочность при разрыве, модуль упругости и относительное удлинение при разрыве).

К преимуществам композиционных материалов можно отнести: их малый удельный вес в связи с незначительной толщиной (0,1–2 мм); возможность усиливать конструкции, имеющие различные формы; хорошая выносливость, высокая ремонтпригодность и долговечность материала; в сравнении с другими методами производство работ таким способом – менее трудоемкий и энергозатратный процесс [3, 4].

Незначительный объем исследований в области использования углеволокон для усиления несущих конструкций, а также отсутствие нормативной базы осложняет оценку уровня надежности принятых проектных решений усиления [5].

За рубежом использование композитных материалов регламентируется нормативной литературой ACI 440.7R-10, ICC-ES AC 125. В России нормативная база по данному вопросу представлена СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами», который применительно к каменным конструкциям носит рекомендательный характер в части технологии, материалов усиления и конструктивных требований. Также существует стандарт СТО НОСТРОЙ «Восстановление и повышение несущей способности кирпичных стен», содержащий раздел по технологии усиления композитными материалами [6, 7].

Результаты экспериментальных исследований А.Н. Костенко, представленных в ее научных работах, позволили произвести расчет усиления по аналогии с косвенным армированием, исходя из принципа увеличения расчетного сопротивления кладки прибавлением расчетного сопротивления композиционного материала [8, 9]:

$$R_{\text{арм}} = R + R_{\text{ус}}, \quad (1)$$

$$R_{\text{ус}} = \frac{2\mu \cdot R_{\text{угл}}}{100}, \quad (2)$$

$$\mu = \frac{S_{\text{арм}}}{S_{\text{ст}}} \cdot 100 = \frac{2 \cdot \delta_{\text{пол}} \cdot h_{\text{пол}}}{2 \cdot h_{\text{ст}} \cdot (h_{\text{пол}} + b)} \cdot 100, \quad (3)$$

где $S_{\text{арм}}$ – площадь поперечного сечения полосы (бандажа) из углеволокна; $S_{\text{ст}}$ – площадь участка длиной стороны колонны, приходящаяся на одну полосу из углеволокна; $h_{\text{ст}}$ – длина большей стороны кирпичной колонны; $h_{\text{пол}}$, $\delta_{\text{пол}}$ – высота и толщина полосы (бандажа из углеволокна); b – расстояние между полосами из углеволокна (рис. 1).

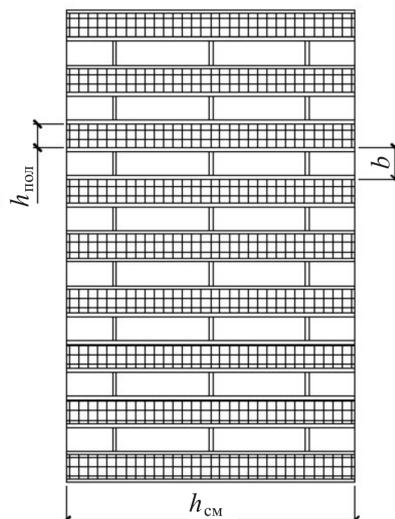


Рис. 1. Схема усиления кирпичной колонны

При усилении прочности кирпичной кладки бандаж из углеволокна располагают на наружной поверхности, а не в объеме кладки, как в варианте усиления армирующей сеткой, для учета влияния этого условия в формуле (2) применяется коэффициент поверхностного армирования (μ).

Сравнение результатов расчета прочности каменных колонн по представленным формулам (1)–(3) и по формулам усиления арматурной сетки в случае одинакового расположения усиливающих элементов показало, что описанный расчет позволяет достаточно точно оценить эффект увеличения несущей способности [5].

В качестве возможных вариантов усиления кирпичных колонн, относящихся к объекту исследования, было рассмотрено 4 случая: усиление полосами из углеволокнистой ткани шириной 60 мм через 1, 2, 4 ряда кладки по высоте колонны и сплошное оборачивание колонны (рис. 2).

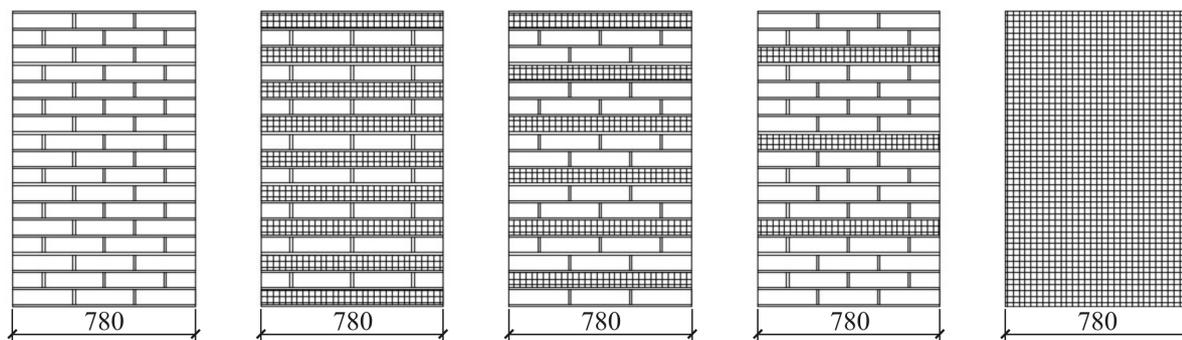


Рис. 2. Варианты усиления кирпичной колонны

В расчете использовалась углеволокнистая ткань марки Sika Wrap Hex 230C со следующими свойствами исходного волокна: модуль упругости – 230 000 МПа, прочность при растяжении 3450 МПа, относительное удлинение при разрыве – 1,5 %, поверхностная плотность – 230 г/м², толщина ткани – 0,12 мм [5].

В качестве объекта усиления приняты кирпичные колонны, расположенные в подвальном помещении жилого дома в г. Перми. Срок эксплуатации здания составляет 65 лет, для таких объектов характерно снижение несущей способности конструкций в связи с отсутствием работ по мониторингу и несвоевременным выполнением капитального ремонта.

При инструментальном обследовании объекта был произведен отбор керамического кирпича и раствора, в результате механических методов разрушающего контроля было уставлено,

что марка керамического кирпича по прочности М35, раствора М10. Таким образом, расчетное сопротивление сжатию кладки составляет 0,6 МПа. Рассматриваемая колонна имеет квадратное сечение с габаритными размерами 780×780 мм, вертикальное расчетное усилие на нее, приложенное с эксцентриситетом $e_0 = 0,0115$ м, составляет $N = 803,884$ кН.

С использованием формул (1)–(3) рассмотрены различные варианты усиления, результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ результатов усиления кирпичной колонны

Вариант усиления	Абсолютная прочность кладки, МПа	Относительная прочность кладки, %
Без усиления	0,6	100
Через 1 ряд кладки	1,042	174
Через 2 ряда кладки	0,9	150
Через 4 ряда кладки	0,745	124
Сплошное оборачивание	1,663	277

Усиление композиционными материалами вариантами через 1 и 2 ряда, а также сплошное оборачивание позволяют достичь необходимой несущей способности. Однако следует отметить, что в случае сплошного оборачивания колонн необходимо заранее предусмотреть установку систем тензометрических датчиков, позволяющих производить мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкции, так как выполнить визуальный контроль композитной системы будет невозможно. При развитии недопустимых напряжений разрушение данного элемента может нести внезапный характер, также применение данного варианта негативно влияет на паропроницаемость кирпичной кладки, что также снижает ее несущую способность [10, 11].

На сегодняшний день композитные материалы имеют множество видов и структур. Исходя из данных расчета установлена зависимость эффективности усиления от вида армирующего композита, а также величины параметра предела прочности на разрыв. Проанализировав работы А.Н. Костенко, мы заметили, что наиболее эффективным методом является использование углеволокна, в сравнении с ленточным усилением стекло- и арамидволокон. Проводя испытания на сетках самое эффективное усиление обеспечивают материалы на основе базальтовых компонентов [8, 9].

Технология усиления каменных конструкций при помощи углеволокна производится в следующей последовательности:

- очистка поверхности кирпичной кладки от облицовки, следов грязи и пыли в местах наклеивания полос из углеволокнистой ткани;
- скругление ребер колонн радиусом 10–30 мм;
- покрытие очищенной поверхности грунтовкой из водной дисперсии эпоксидной смолы;
- выравнивание поверхности с помощью фиброшпатлевки;
- наклеивание на подготовленную поверхность кирпичной кладки углеволокнистой ткани, нарезанной на полосы, с помощью клея на основе эпоксидной смолы.

Помимо достоинств данный метод усиления имеет несколько недостатков, таких как повышенная себестоимость и невысокий параметр огнестойкости клеевых составов на основе эпоксидных компонентов (от 50 °С). Выбор клеевого состава является основным параметром для обеспечения сцепления каменной конструкции с армирующим материалом, необходимо грамотно подходить к их выбору, чтобы срок службы клеевого состава и волокна подходил к концу одновременно. Также в целях безопасности производства следует учитывать необходимость применения спецодежды и регулярного проветривания помещений [12–14].

Для повышения уровня огнестойкости и повышения безопасности проведения работ в качестве клеевого состава используют состав из микроцемента с добавлением полимерных смол.

При устройстве сеток для усиления строительных конструкций и их закреплении на поверхности рекомендуется также применять цементосодержащие клеящие растворы. Помимо этого, популярными в использовании являются покрытия типа «Барьер», «Монолит» и панели Promat, которые также обеспечивают повышенную огнестойкость конструкции [15].

Для сравнения результатов был рассмотрен метод с применением металлической обоймы, состоящей из вертикальных уголков 4L 100×8 мм и хомутов из полосовой стали ВСтЗсп. Принятые материалы обоймы аналогичны стали класса А240: $R_{sc} = 43$ МПа и $R_{sw} = 150$ МПа.

Для повышения несущей способности конструкции с использованием данного метода необходимо произвести следующий расчет:

$$\psi = 1 - \frac{2e_0}{h}, \quad (4)$$

$$\eta = 1 - \frac{4e_0}{h}, \quad (5)$$

$$\eta \cdot \frac{2,5\mu}{1 + 2,5\mu} \cdot \frac{R_{sw}}{100} \cdot A = \frac{N}{\psi \cdot \varphi} - m_R \cdot m_k \cdot R \cdot A - R_{sc} \cdot A'_S, \quad (6)$$

$$s = \frac{2A_S \cdot (h + b) \cdot 100}{h \cdot b \cdot \mu}. \quad (7)$$

По расчету принимаются хомуты из полосовой стали сечением 60×5 мм с шагом, равным 500 мм (исходя из максимально допустимого шага планок).

С целью определения экономической целесообразности и эффективности был произведен локально-сметный расчет с использованием федеральных единичных расценок с переводом в текущие цены на 3-й квартал 2019 г. по Пермскому краю, результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экономического расчета методов усиления каменной колонны

Наименование	Трудовые затраты, чел.-ч	Стоимость, руб.
Усиление с применением композитных материалов	25,79	25 066
Усиление с применением металлической обоймы	72,5	24 877

Исходя из данных локально-сметного расчета можно сделать вывод о том, что с точки зрения стоимости выполнения работ усиление обоями методами является практически одинаковым по затрачиваемым средствам. Однако анализ трудовых затрат каждого из методов показывает, что усиление композитными материалами может рассматриваться как рациональная альтернатива часто применяемому методу с использованием металлической обоймы. Таким образом, данные результаты демонстрируют, что метод усиления композитными материалами конструкций жилых и транспортных сооружений может рентабельно отличаться при технико-экономическом обосновании проекта организации реконструкции.

Список литературы

1. Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление, ремонт: учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 312 с.
2. Nardone F., Prota A., Manfredi G. Design criteria for FRP seismic strengthening of masonry walls // The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12–17, 2008, Beijing, China.
3. Лазовский Д.Н. Проектирование реконструкции зданий и сооружений: учеб.-метод. комплекс. Ч. 2. Оценка состояния и усиление строительных конструкций. – М.: Новополюцк: ПГУ, 2010. – 340 с.

4. Ряднова Е.Н. Расчет усиления каменных конструкций и зданий // Международный студенческий строительный форум – 2017 / Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – С. 217–222.

5. Старцев С.А., Сундукова А.А. Усиление кирпичной кладки композитными материалами и винтовыми стержнями // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 6. – С. 17–31.

6. Hollaway L.C., Teng J.G. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites // Woodhead publishing and maney publishing on behalf of the Institute of materials, minerals & mining CRC. – Washington, DC Cambridge England, 2002. – P. 235–264.

7. Michelis P., Papadimitriou C., Karaiskos G. Full-scale shake table experiments and vibration tests for assessing the effectiveness of textile materials for retrofitting masonry buildings // III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering May 25–28, 2011, Corfu, Greece.

8. Грановский А.В., Костенко А.Н., Мочалов А.Л. Усиление кирпичных конструкций с использованием элементов внешнего армирования из углеродного волокна // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 7. – С. 47–48.

9. Грановский А.В., Костенко А.Н., Мочалов А.Л. Повышение прочности кирпичных конструкций реконструируемых зданий // Жилищное строительство. – 2006. – № 2. – С. 22–23.

10. Грановский А.В., Джамуев Б.К. Применение внешнего армирования из углеволокна для усиления стен из ячеистобетонных блоков // Строительные материалы. – 2011. – № 7. – С. 68–69.

11. Грановский А.В., Джамуев Б.К. Повышение прочности стен из ячеистобетонных блоков // Жилищное строительство. – 2011. – № 9. – С. 39–41.

12. Грановский А.В., Галишникова В.В., Берестенко Е.И. Перспективы применения арматурных сеток на основе базальтового волокна в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 3. – С. 59–63.

13. Экспериментально-теоретические исследования фрагмента здания из каменной кладки, усиленного системой внешнего армирования на основе углеволокна / Г.П. Тонких, О.В. Кабанцев, А.В. Грановский, П.В. Осипов, Р.А. Бузин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 5. – С. 36–46.

14. Гасиев А.А., Грановский А.В. К вопросу об оценке несущей способности кирпичных простенков, усиленных холстами из углеволокнистой ткани, при действии сдвигающих усилий // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 6. – С. 36–42.

15. Садыкова Р.Р., Нужина Д.А., Быков А.А. Усиление каменных конструкций композитными материалами // Мир науки и инноваций. – 2015. – № 10. – С. 78–82.

References

1. Ivanov Yu.V. Rekonstruktsiia zdaniï i sooruzhenii: usilenie, vosstanovlenie, remont: Uchebnoe posobie [Reconstruction of buildings and structures: strengthening, restoration, repair]. Moscow, ACB, 2013. – 312 p.

2. Nardone F., Prota A., Manfredi G. Design criteria for FRP seismic strengthening of masonry walls // The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12–17, 2008, Beijing, China.

3. Lazovsky D.N. Proektirovanie rekonstruktsii zdaniï i sooruzhenii: uchebno-metodicheskii kompleks. Ch. 2. Otsenka sostoiianiï i usilenie stroitel'nykh konstruktssii [Designing the reconstruction of buildings and structures: educational complex. Part 2. Assessment and strengthening of building structures]. Moscow, Novopolotsk: PSU, 2010. – 340 p.

4. Ryadnova E.N. Raschet usileniia kamennykh konstruktssii i zdaniï. Mezhdunarodnyi studencheskii stroitel'nyi forum [The calculation of the reinforcement of stone structures and buildings], *Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova. – Belgorod, 2017, pp. 217-222.*

5. S.A. Startsev, A.A. Sundukova. Usilenie kirpichnoi kladki kompozitnymi materialami i vintovymi stержniami [Reinforcement of brickwork with composite materials and screw rods] *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniï i sooruzhenii*, 2014, no. 6, pp. 17-31.

6. Hollaway L.C., Teng J.G. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites // Woodhead publishing and maney publishing on behalf of the Institute of materials, minerals & mining CRC. Washington, DC Cambridge England, 2002. pp. 235-264

7. Michelis P., Papadimitriou C., Karaiskos G. Full-scale shake table experiments and vibration tests for assessing the effectiveness of textile materials for retrofitting masonry buildings // III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering May 25-28, 2011, Corfu, Greece.

8. Granovsky A.V., Kostenko A.N., Mochalov A.L. Usilenie kirpichnykh konstrukttsii s ispol'zovaniem elementov vneshnego armirovaniia iz uglevodnogo volokna [Reinforcement of brick structures using elements of external reinforcement made of carbon fiber]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2006, no. 7, pp. 47- 48.

9. Granovsky A.V., Kostenko A.N., Mochalov A.L. Povyshenie prochnosti kirpichnykh konstrukttsii rekonstruiuemyykh zdaniy [Improving the strength of brick structures of reconstructed buildings]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2006, no. 2, pp. 22- 23.

10. A.V. Granovsky, B.K. Dzhamuev. Primenenie vneshnego armirovaniia iz uglevolokna dlia usileniia sten iz iacheistobetonnykh blokov [The use of external carbon fiber reinforcement to strengthen walls of aerated concrete blocks]. *Stroitel'nye materialy*, 2011, no. 7, pp. 68-69.

11. А.В. Грановский, Б.К. Джамуев. Povyshenie prochnosti sten iz iacheistobetonnykh blokov [Повышение прочности стен из ячеистобетонных блоков] // *Zhilishchnoe stroitel'stvo* - 2011. - № 9. - С. 39-41.

12. Granovsky A.V., Galishnikova V.V., Berestenko E.I. Perspektivy primeneniia armaturnykh setok na osnove bazal'tovogo volokna v stroitel'stve [Prospects for the application of reinforcing mesh based on basalt fiber in construction]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 3, pp. 59- 63.

13. Tonky G.P., Kabantsev O.V., Granovsky A.V., Osipov P.V., Buzin R.A. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniia fragmenta zdaniia iz kamennoi kladki, usilennogo sistemoi vneshnego armirovaniia na osnove uglevolokna [Experimental and theoretical studies of a fragment of a masonry building reinforced with an external carbon fiber-based reinforcement system]. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2017, no. 5, pp. 36- 46.

14. Gasiev A.A., Granovsky A.V. K voprosu ob otsenke nesushchei sposobnosti kirpichnykh prostenkov, usilennykh kholstami iz uglevoloknistoi tkani, pri deistvii sdvigaishchikh usilii [To the question of assessing the bearing capacity of brick walls reinforced with carbon fiber cloths under the action of shear forces]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 6, pp. 36- 42.

15. Sadykova R.R., Nuzhina D.A., Bykov A.A. Usilenie kamennykh konstrukttsii kompozitnymi materialami [Reinforcement of stone structures with composite materials]. *Mir nauki i innovatsii*, 2015, no. 10, pp. 78- 82.

Получено 16.01.20

Об авторах

Рыжков Даниил Сергеевич – магистр кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29), инженер-проектировщик ООО «ТАНТРА» (614000, г. Пермь, ул. Ленина, 9, офис 513, e-mail: ryzhkovdan@rambler.ru).

Татьянников Даниил Андреевич – старший преподаватель кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: danco777@mail.ru).

About the authors

Daniil S. Ryzhkov (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Construction Industry and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation), Design-Engineer, LLC “TANTRA” (office 513, 9, Lenin st., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: ryzhkovdan@rambler.ru).

Daniil A. Tatyannikov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Construction Industry and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: danco777@mail.ru).