УДК 691.328.1, 691.328.44

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-111-121

*А.В. НЕВСКИЙ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет,*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОННЫХ КОЛОНН С УГЛЕКОМПОЗИТНЫМ СТЕРЖНЕВЫМ, ДИСПЕРСНЫМ И ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ УГЛЕВОЛОКНА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

Значимая часть новых разработок в области создания перспективных строительных материалов относится к полимерным композитам на основе волокон для стержневого армирования строительных бетонных конструкций. Наибольшая эффективность применения таких композитов достигается с использованием углеволокна в качестве их армирующего наполнителя. Вопросы, связанные с проектированием, расчетом и внедрением в строительное производство армированных углекомпозитной арматурой бетонных конструкций при кратковременном динамическом характере сжимающей нагрузки, изучены недостаточно.

Целью исследования являлось определение прочности армированных углекомпозитной арматурой динамически нагруженных бетонных конструкций при различных методах модификации деформационных свойств бетона углеродным дисперсным и внешним углекомпозитным армированием.

Экспериментальные исследования заключались в испытании 2 железобетонных, а также 6 бетонных колонн с углекомпозитным стержневым, дисперсным и внешним армированием на основе углеволокна осевой статической и кратковременной динамической сжимающей нагрузкой.

Анализ результатов испытаний позволил выявить значения возникающих продольных деформаций бетона и углекомпозитной арматуры, установить величины предельного сжимающего усилия.

Получены новые опытные данные, характеризующие прочность бетонных колонн, армированных углекомпозитными стержнями, которые свидетельствуют об эффективном включении в работу сжатой арматуры при углеродном дисперсном и внешнем углекомпозитном армировании бетона сжатых конструкций при кратковременном динамическом характере внешнего воздействия.

Установлено, что сопротивление углекомпозитной арматуры сжатию в динамически нагруженных сжатых бетонных конструкциях оказывает влияние на их прочность, особенно при модификации деформационных свойств бетона фибровым и внешним армированием на основе углеволокна. Выявленные особенности могут быть учтены при расчетах прочности таких конструкций при кратковременном динамическом нагружении.

Ключевые слова: колонна; углеродофибробетон; углекомпозитная арматура; система внешнего армирования; углекомпозитные материалы; прочность; кратковременное динамическое нагружение.

Для цитирования: Невский А.В. Экспериментальные исследования прочности бетонных колонн с углекомпозитным стержневым, дисперсным и внешним армированием на основе углеволокна при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 111–121.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-41-703003\18 и № 18 48 700035\18.

A.V. NEVSKII,

Tomsk State University of Architecture and Building

CARBON FIBER REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

Many new developments in the field of creating promising building materials relate to polymer fiber composites for reinforcing concrete constructions. The most effective use of such composites is provided by carbon fiber reinforcement. To date, the issues related to design, calculation and use of concrete constructions with carbon composite reinforcement under dynamic compressive loading have not been well studied. **Purpose:** The purpose of this study is to determine strength of dynamically loaded concrete constructions reinforced with carbon fiber using different methods of modification of deformation properties of concrete. **Methodology:** Experimental studies include testing two concrete columns with steel rod reinforcement and six concrete columns modified by carbon fiber and carbon composite reinforcement. The columns are tested under axial static and dynamic compressive loads. **Research findings:** The resulting longitudinal deformations of concrete and carbon-composite reinforcement and the limiting compressive force are determined. **Value:** New experimental data are obtained for the concrete column strength reinforced with carbon composite rods. The experimental results indicate the effective resistance to compression of carbon composite reinforcement. This phenomenon is observed in the case of carbon fiber and carbon composite reinforcement of compressed concrete constructions under the dynamic load. **Practical implications:** Resistance of carbon composite reinforcement to the dynamic compression affects the concrete strength, especially when its deformation properties are modified by carbon fiber and carbon composite reinforcement. The obtained results can be used in strength calculations of concrete constructions under the dynamic load.

Keywords: column; carbon fiber reinforced concrete; carbon fiber reinforced polymer; externally bonded system; carbon composite material; strength; dynamic load.

For citation: Nevskii A.V. Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti betonnykh kolonn s uglekompozitnym sterzhnevym, dispersnym i vneshnim armirovaniem na osnove uglevolokna pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Carbon fiber reinforced concrete columns under static and dynamic loads]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 111–121. (rus)

В последнее десятилетие разработке новых видов строительных материалов уделяется большое внимание. Одним из наиболее активно развивающихся направлений является создание полимерных композитов, основу которых составляют высокопрочные неметаллические волокна. Значимую часть среди новых разработок в сфере таких композитов занимают материалы для стержневого армирования бетонных конструкций. Применение арматуры композитной полимерной (АКП) для стержневого армирования бетонных конструкций позволяет придать им особые эксплуатационные свойства [1].

Множество вопросов, связанных с проектированием и расчетом бетонных конструкций, армированных АКП, до сих пор мало изучены и требуют накопления опытных данных и развития теории расчета их по прочности при различном характере внешней нагрузки.

Анализ действующих отечественных и зарубежных нормативных документов по проектированию и расчету бетонных конструкций с АКП показал, что наименее изученным вопросом является напряженно-деформированное

состояние таких конструкций при действии продольных сжимающих усилий. Так, при расчете таких конструкций по прочности в большинстве строительных норм (СП 295.1325800.2017, ACI 440.1R-15, CAN/CSA-S806-12, CNR-DT 203/2006, fib Bulletin 40 и др.) расчетное сопротивление статическому сжатию АКП при отсутствии специальных обоснований рекомендуется принимать равным нулю, а при кратковременном динамическом характере сжимающей силы рекомендации по расчету отсутствуют.

Наиболее перспективным видом АКП с точки зрения физико-механических свойств является арматура углекомпозитная (АУК) [1, 2]. Диаграмма её осевого деформирования имеет линейный вид как при сжатии, так и при растяжении. Из рассмотрения диаграммы деформирования, а также изополей продольных относительных деформаций АУК при осевом сжатии, представленных в работе [3], можно видеть, что при воздействии внешних сжимающих усилий происходит её равномерное деформирование вплоть до значений относительных продольных деформаций более 8 %. При этом на поверхности стержней не наблюдается каких-либо повреждений вплоть до наступления разрушения. В таком случае из условия совместности деформирования стержневой АУК с бетоном величина возникающих в ней сжимающих нормальных напряжений может быть определена в зависимости от модуля упругости АУК при сжатии $E_{fc} = 105$ ГПа и предельных сжимающих деформаций бетона $\varepsilon_{b,u}$ [4–7]. С учётом повышения деформативности сжатого бетона при его кратковременном динамическом нагружении [8] величина расчетного сопротивления сжатию АУК $R_{fc,d}$ может быть определена по формуле

$$R_{fc,d} = E_{fc} \varepsilon_{b,u} k_{fc,d}, \quad (1)$$

где $k_{fc,d} = 1,1$ – коэффициент динамического упрочнения АУК при сжатии, учитывающий увеличение до 10 % предельных сжимающих деформаций бетона при кратковременном динамическом нагружении [8].

Повышения эффективности применения сжатой АУК в динамически нагруженных сжатых бетонных конструкциях можно достичь при увеличении предельных деформаций бетона путём дисперсного [9, 10] или внешнего композитного [11–14] армирования материалами на основе углеродных волокон.

Для определения прочности армированных АУК сжатых бетонных конструкций с применением углеродного дисперсного и внешнего углекомпозитного армирования при осевом кратковременном динамическом нагружении были проведены экспериментальные исследования. Из литературных источников известно, что прочность железобетонных конструкций при кратковременном динамическом нагружении отличается от её значения при статическом нагружении в большую сторону, что обусловлено изменением механических характеристик бетона и арматуры при увеличении скорости деформирования [15–17]. Для изучения данного явления применительно к сжатым бетонным конструкциям с АУК также было рассмотрено статическое загрузеие таких элементов.

Опытные образцы представляли собой бетонные колонны, в которых варьировался тип продольного стержневого (А500СП, АУК марки FibARM Rebar), наличие углеродного дисперсного и внешнего углекомпозитного армирования. Всего было рассмотрено 4 серии конструкций: колонны бетонные

со стальным стержневым армированием (серия КБС), колонны бетонные с углекомпозитным стержневым армированием (серия КБУ), то же с углеродным дисперсным армированием бетона при наличии углекомпозитной обоймы (серия КФУО), а также без неё (серия КФУ). Конструкция серий экспериментальных колонн представлена на рис. 1. Каждая серия включала в себя по две колонны, одна из которых была предназначена для испытания при статическом, а другая – при кратковременном динамическом нагружении. Опытным колоннам, в соответствии с их сериями и видом нагружения, были присвоены шифры, состоящие из аббревиатуры серии (КБС, КБУ, КФУ, КФУО) и индекса «С0» или «Д0», который указывает соответственно на статический или динамический характер приложения осевой (с нулевым эксцентриситетом) внешней сжимающей нагрузки.

Рис. 1. Конструкции опытных колонн для испытания осевым статическим и кратковременным динамическим сжатием

Для изготовления колонн серий КФУ и КФУО применялся фибробетон на основе углеродных волокон с коэффициентом дисперсного армирования $\mu_{cf} = 0,2$ % от массы цемента, состав, технология изготовления и свойства которого подробно отражены в работе [18]. Устройство обоймы для колонн серии КФУО осуществлялось с применением материалов марки Sika по рекомендованной производителем технологии. Материал обоймы представлял собой углекомпозит, образованный пропитанной эпоксидным связующим углеродной тканью толщиной 0,131 мм. Для предотвращения заломов углеродных волокон продольные ребра усиливаемых колонн были выполнены со скруглениями радиусом 20 мм. Установка обоймы производилась её наклеиванием на выровненное и очищенное основание конструкций сплошным по высоте слоем с обеспечением нахлеста в направлении волокон длиной 100 мм. Общая толщина углекомпозитной обоймы после отвердевания составляла 1 мм. Прочностные свойства углекомпозита, установленные по результатам испытаний стандартных образцов, приведены в работе [19].

Для измерения величины продольных деформаций на рабочие стержни посередине их длины, а также на бетон (фибробетон) опытных конструкций были установлены датчики-тензорезисторы. Развитие поверхностных деформаций фибробетона при проведении испытаний колонн серий КФУ и КФУО фиксировалось бесконтактной оптической системой измерения деформаций Vic-3D (при статическом нагружении) и высокоскоростной камерой FASTCAM SA2 (при кратковременном динамическом нагружении). Данными приборами производилась съёмка одной из граней испытуемых конструкций с предварительно нанесенной на её поверхность контрастной реперной сеткой. Полученные видеоданные обрабатывались программным обеспечением системы Vic-3D путём численной корреляции отснятых кадровых изображений.

Испытание колонн осевой сжимающей статической нагрузкой осуществлялось на специально оборудованном гидравлическом прессе при обеспечении шарнирного опирания обоих концов конструкции на опоры прессы. Испытания при кратковременном динамическом нагружении производились с применением специально разработанного стенда, представляющего собой копровую установку. Кратковременное динамическое сжимающее нагружение создавалось с помощью массы падающего груза при его соударении с конструкцией через демпферную накладку, содержащую несколько слоев армированной резины. Уникальность технического решения стенда подтверждена Евразийским патентом на изобретение [20]. Общий вид проведения испытаний представлен на рис. 2.

В результате проведения испытаний были получены данные о деформированном состоянии бетона, фибробетона, стальной и углекомпозитной арматуры при различных величинах действующего сжимающего усилия. На рис. 3 приведены изополя продольных относительных деформаций боковой грани колонн перед наступлением разрушения, полученные при помощи системы Vic-3D. Данные о максимальных зафиксированных продольных относительных деформациях бетона, фибробетона и рабочей арматуры, а также о несущей способности экспериментальных колонн при статическом и кратковременном динамическом нагружениях сведены в таблицу.

Рис. 2. Общий вид испытаний колонн статической (а) и кратковременной динамической (б) сжимающими нагрузками

Рис. 3. Изополя относительных продольных деформаций боковой грани перед разрушением колонн КФУ-С0 (а), КФУО-С0 (б), КФУ-Д0 (в), КФУО-Д0 (г)

**Результаты экспериментальных исследований колонн
при осевом статическом и кратковременном динамическом сжатии**

Шифр колонны	Максимальные продольные относительные деформации (%), зафиксированные			Величина разрушающей нагрузки, кН
	тензорезисторами		Vic-3D	
	для арматуры	для бетона		
КБС-С0	2,2	2,4	–	340
КБУ-С0	2,4	2,6	–	321
КФУ-С0	2,7*	3,1*	3,3	493
КФУО-С0	2,8*	2,9*	6,4	715
КБС-Д0	3,2*	2,5	–	425
КБУ-Д0	2,7	2,7	–	392
КФУ-Д0	4,6	3,8	4,0	572
КФУО-Д0	6,2	5,8	7,1	796

* Последнее показание тензорезистора, зафиксированное перед его отказом.

Из анализа представленных экспериментальных данных можно видеть, что несущая способность бетонных колонн, армированных стальными или углекомпозитными стержнями, отличается незначительно, в пределах 6 % при статическом и 8 % при кратковременном динамическом нагружении. Установлено увеличение прочности бетонных колонн с АУК при кратковременном динамическом нагружении по сравнению со статическим в пределах 22 %, а для железобетонных колонн – до 25 %.

При применении дисперсного армирования продольные сжимающие деформации бетона колонн увеличиваются на 26,9 % при статическом и на 48,1 % при кратковременном динамическом нагружении. При этом продольные относительные деформации в АУК достигают значений более 2,7 и 4,6 % соответственно. При совместном применении дисперсного и внешнего композитного армирования деформации бетона увеличиваются в 2,4 раза при статическом и в 2,6 раза при кратковременном динамическом нагружении. В данном случае продольные относительные деформации в АУК достигают значений более 2,8 и 6,2 % соответственно.

Зафиксированное увеличение продольных деформаций АУК позволяет судить о повышении эффективности её применения в сжатых бетонных конструкциях с дисперсным и внешним армированием. Так, нормальные напряжения в АУК экспериментальных колонн, вычисленные по формуле (1), принимают значения от 252 до 651 МПа.

Для оценки прочности динамически нагруженных сжатых бетонных конструкций с углекомпозитным стержневым, дисперсным и внешним армированием с учетом сопротивления АУК сжатию был составлен алгоритм и разработана программа расчета прочности нормальных сечений таких конструкций JVK-NM-CF [21]. В основу используемого в программе метода расчета заложена деформационная модель нормального сечения сжатого элемен-

та [22], реализующая нелинейные диаграммы деформирования бетона и фибробетона [23] с учетом внешнего армирования [11]. Проведенные с применением данной программы расчеты прочности экспериментальных колонн хорошо согласуются с полученными опытными данными: расхождения составляют не более 14,3 % в сторону запаса прочности.

Полученные опытные данные показали, что сопротивление сжатию АУК в динамически нагруженных сжатых бетонных конструкциях оказывает влияние на их прочность, особенно при модификации деформационных свойств бетона фибровым и внешним армированием на основе углеволокна.

Автор выражает благодарность ООО «Зика» за предоставленные для исследования материалы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанова В.Ф., Степанов А.Ю., Жирков Е.П. Арматура композитная полимерная. М.: АСВ, 2013. 200 с.
2. Кузеванов Д.В. Конструкции с композитной неметаллической арматурой. Обзор и анализ зарубежных и отечественных нормативных документов: научно-технический отчет. М.: НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 2012. 66 с.
3. Плевков В.С., Балдин И.В., Кудяков К.Л., Невский А.В. Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5 (58). С. 91–101.
4. Лапишинов А.Е. Перспективы применения неметаллической композитной арматуры в качестве рабочей ненапрягаемой в сжатых элементах // Вестник Московского государственного строительного университета. 2015. № 10. С. 96–105.
5. Уманский А.М. Совершенствование методов расчета конструкций морских гидротехнических сооружений из композитбетона с использованием базальтопластиковой арматуры: дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2017. 173 с.
6. Fillmore B., Sadeghian P. Compressive Behaviour of Concrete Cylinders Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Bars // Canadian Society for Civil Engineering, 2017. P. 1-8.
7. Tobbi H., Farghaly A.S., Benmokrane B. Concrete columns reinforced longitudinally and transversally with glass fiber-reinforced polymer bars // ACI Structural Journal. 2012. V. 109. № 4. P. 551–558.
8. Плевков В.С. Прочность и трещиностойкость эксплуатируемых железобетонных конструкций зданий и сооружений при статическом и кратковременном динамическом нагружении: дис. ... докт. техн. наук. Томск, 2003. 536 с.
9. Балдин И.В., Невский А.В., Гребеничиков А.В. Деформационные свойства бетона, армированного углеродными волокнами // Функциональные материалы: разработка, исследование, применение: сборник тезисов докладов IV Всероссийского конкурса научных докладов студентов. 2017. С. 68.
10. Морозов В.И., Пухаренко Ю.В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестник Московского государственного строительного университета. 2014. № 3. С. 189–196.
11. Невский А.В. Исследование прочностных и деформационных свойств сжатых бетонных элементов с внешним армированием углекомпозитными материалами // Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук: сб. научных статей по итогам работы второго Международного круглого стола, 2018. С. 43–46.
12. Balaguru P., Nanni A., Giancaspro J. FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: a guide to fundamentals and design for repair and retrofit. CRC Press, 2008. 322 p.
13. Hollingshead K. The effects of fire on insulated reinforced concrete members strengthened with fibre reinforced polymers: PhD dissertation. Kingston, 2012. 250 p.

14. Wang L.M., Wu Y.F. Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test // *Engineering structures*. 2008. V. 30. № 2. P. 493–505.
15. Плевков В.С. Динамическая прочность бетона и арматуры железобетонных конструкций. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 1996. 65 с.
16. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. 272 с.
17. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 3. С. 85–95. Условия доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/37589> (дата обращения: 30.06.2018).
18. Кудяков А.И., Плевков В.С., Белов В.В., Невский А.В., Кудяков К.Л. Технология и состав углеородофибробетона с повышенной однородностью прочностных показателей // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 1 (85). С. 66–72.
19. Невский А.В., Гребеничиков А.В. Прочность полимерного углекомпозиата для усиления строительных конструкций // *Молодёжь, наука, технологии: новые идеи и перспективы: избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых*. 2017. С. 285–287.
20. Пат. 027933. ЕАПВ. Стенд для испытания строительных конструкций на действие кратковременной динамической сжимающей нагрузки / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, И.В. Балдин, А.В. Невский, К.Л. Кудяков, М.Е. Гончаров. № 201500807; заявл. 25.08.2015; опубл. 29.09.2017, Бюл. № 9.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616438 (RU). Расчет прочности нормальных сечений элементов армобетонных конструкций с углеродным стержневым, фибровым и внешним армированием на основе деформационной модели (JBK-NM-CF) / В.С. Плевков, И.В. Балдин, А.В. Невский. № 2017613497; заявл. 19.04.2017; опубл. 07.06.2017.
22. Колмогоров А.Г., Плевков В.С. Расчет железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам. М.: Изд-во АСВ, 2014. 512 с.
23. Плевков В.С., Белов В.В., Балдин И.В., Невский А.В. Модели нелинейного деформирования углеородофибробетона при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 3 (56). С. 72–82.

REFERENCES

1. Stepanova V.F., Stepanov A.Yu., Zhirkov E.P. Armatura kompozitnaya polimernaya [Polymer composite reinforcement]. Moscow: ASV, 2013. 200 p. (rus)
2. Kuzevanov D.V. Konstruktsii s kompozitnoi nemetallicheskoj armaturoi. Obzor i analiz zarubezhnykh i otechestvennykh normativnykh dokumentov: nauchno-tekhnicheskii otchet [Composite nonmetallic reinforced structures. Review and analysis of foreign and domestic regulatory documents. Scientific and technical report]. Moscow, 2012. 66 p. (rus)
3. Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudyakov K.L., Nevskii A.V. Prochnost' i deformativnost' armatury kompozitnoi polimernoi pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom rastyazhenii i szhatii [Strength and deformability of polymer composites under tensile and compressive loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 5 (58). Pp. 91–101. (rus)
4. Lapshinov A.E. Perspektivy primeneniya nemetallicheskoj kompozitnoi armatury v kachestve rabochei nenapryagaemoi v szhatykh elementakh [Future applications of non-metallic composite reinforcement as nonprestressed reinforcement in compressed elements]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2015. No. 10. Pp. 96–105. (rus)
5. Umanskii A.M. Sovershenstvovanie metodov rascheta konstruktsii morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii iz kompozitbetona s ispol'zovaniem bazal'toplastikovo armatury: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of strength analysis of maritime works with basalt FRP rebars. PhD Thesis]. Vladivostok, 2017. 173 p. (rus)

6. Fillmore B., Sadeghian P. Compressive behaviour of concrete cylinders reinforced with glass fiber reinforced polymer bars. Canadian Society for Civil Engineering. 2017. Pp. 1–8.
7. Tobbi H., Farghaly A.S., Benmokrane B. Concrete columns reinforced longitudinally and transversally with glass fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*. 2012. V. 109. No. 4. Pp. 551–558.
8. Plevkov V.S. Prochnost' i treshchinostoikost' ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh konstruksii zdanii i sooruzhenii pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii: dis. ... dokt. tekhn. nauk [Strength and crack resistance of reinforced concrete construction of buildings under static and dynamic loads. DSc Thesis]. Tomsk, 2003. 536 p. (rus)
9. Baldin I.V., Nevskii A.V., Grebenshchikov A.V. Deformatsionnye svoystva betona, armirovanogo uglerodnymi voloknami [Deformation properties of carbon-fiber reinforced concrete]. Funktsional'nye materialy: razrabotka, issledovanie, primeneniye : sbornik tezisev dokladov IV Vserossiiskogo konkursa nauchnykh dokladov studentov (Coll. Papers 4th All-Russ. Competition 'Functional Materials: Development, Research, Application'). 2017. P. 68. (rus)
10. Morozov V.I., Pukhareno Yu.V. Effektivnost' primeneniya fibrobetona v konstruksiyakh pri dinamicheskikh vozdeistviyakh [Efficiency of fiber reinforced concrete application in structures subjected to dynamic effects]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2014. No. 3. Pp. 189–196. (rus)
11. Nevskii A.V. Issledovanie prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv szhatykh betonnykh elementov s vneshnim armirovaniem uglekompozitnymi materialami [Investigation of strength and deformation properties of compressed concrete elements with external reinforcement using carbon composite materials]. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii 'Fundamental'nye i prikladnye razrabotki v oblasti tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk' (Proc. Int. Sci. Conf. 'Basic and Applied Developments in Engineering and Physico-Mathematical Sciences'). 2018. Pp. 43–46. (rus)
12. Balaguru P., Nanni A., Giancaspro J. FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: a guide to fundamentals and design for repair and retrofit. CRC Press, 2008. 322 p.
13. Hollingshead K. The effects of fire on insulated reinforced concrete members strengthened with fibre reinforced polymers: PhD dissertation. Kingston, 2012. 250 p.
14. Wang L.M., Wu Y.F. Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures*. 2008. V. 30. No. 2. Pp. 493–505.
15. Plevkov V.S. Dinamicheskaya prochnost' betona i armatury zhelezobetonnykh konstruksii [Dynamic strength of concrete and rebar of reinforced concrete structures]. Tomsk: TsNTI, 1996. 65 p. (rus)
16. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruksii na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports under dynamic load]. Tomsk: TSUAB, 2016. Pp. 149–246. (rus)
17. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Otsenka parametrov razrushayushchei nagruzki pri udarnovolnovom nagruzhenii dlya otvetstvennykh stroitel'nykh konstruksii sooruzhenii neftegazovogo kompleksa [Estimation of damaging load parameters under shock wave loading for critical building structures of oil and gas facilities]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2017. V. 328. No. 3. Pp. 85–95. Available: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/37589> (accessed: June 30, 2018).
18. Kudyakov A.I., Plevkov V.S., Belov V.V., Nevskii A.V., Kudyakov K.L. Tekhnologiya i sostav uglerodofibrobetona s povyshennoi odnorodnost'yu prochnostnykh pokazatelei [Technology and composition of carbon-fiber reinforced concrete with increased uniformity of strength indicators]. *Voprosy materialovedeniya*. 2016. No. 1 (85). Pp. 66–72. (rus)
19. Nevskii A.V., Grebenshchikov A.V. Prochnost' polimernogo uglekompozita dlya usileniya stroitel'nykh konstruksii [Strength of carbon FRP using for strengthening building structures]. Izbrannye doklady IV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchennykh 'Molodezh', nauka, tekhnologii: novye idei i perspektivy' (Proc. 1st Int. Sci. Conf. 'Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects'). 2017. Pp. 285–287. (rus)
20. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Baldin I.V., Nevskii A.V., Kudyakov K.L., Goncharov M.E. Stend dlya ispytaniya stroitel'nykh konstruksii na deistvie kratkovremennoi dinamicheskoi

- szhimayushchei nagruzki [Test bench for building structures under dynamic compression]. Pat. EАPO N 027933, 2017. (rus)
21. *Plevkov V.S., Baldin I.V., Nevskii A.V.* Raschet prochnosti normal'nykh sechenii elementov armobetonnnykh konstruksii s uglerodnym sterzhnevym, fibrovym i vneshnim armirovaniem na osnove deformatsionnoi modeli (JBK-NM-CF) [Strength analysis of concrete elements with rod, carbon fiber and external reinforcement (JBK-NM-CF)]. RF Certificate of State Registration of Software N 2017613497, 2017. (rus)
 22. *Kolmogorov A.G., Plevkov V.S.* Raschet zhelezobetonnykh konstruksii po rossiiskim i zarubezhnym normam [Structural analysis using national and international building codes]. Moscow: ASV, 2014. 512 p. (rus)
 23. *Plevkov V.S., Belov V.V., Baldin I.V., Nevskii A.V.* Modeli nelineinogo deformirovaniya uglerodofibrobetona pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom vozdйствиakh [Models of nonlinear deformation of carbon fiber-reinforced concrete under static and dynamic loads]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016. No. 3 (56). Pp. 72–82. (rus)

Сведения об авторе

Невский Андрей Валерьевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lokop888@gmail.com

Author Details

Andrei V. Nevskii, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lokop888@gmail.com