

DOI: 10.15593/24111678/2017.03.10

УДК 69.059.22

М.О. Ящук

Ростовский государственный университет путей сообщения,
Ростов-на-Дону, Россия

ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Увеличивающаяся временная нагрузка, а также возникающие неисправности приводят к необходимости усиления железобетонных пролетных строений мостов. Представлены конструкция и схема установки устройства преднапряжения композиционных материалов для усиления железобетонных балок. Обозначены основные задачи лабораторного исследования моделей железобетонных балок пролетного строения: отладка технологии преднапряжения с использованием разработанного устройства на лабораторных образцах; изучение схем разрушения усиленных полимерными композиционными материалами опытных железобетонных образцов; изучение влияния величины преднапряжения полимерными композиционными материалами с различной степенью натяжения на их прочность, трещиностойкость и деформативность. Даны технические характеристики композиционного материала и клеевого состава, используемого в эксперименте. Для целей исследования спроектированы чертежи железобетонных образцов. Разработана пошаговая технология усиления преднапряженными полимерными композиционными материалами. Подготовлена схема установки измерительных приборов, и рассчитаны величины предельных усилий и соответствующая им несущая способность образцов. Для оценки значения преднапряжения полимерных композиционных материалов определена доля изгибающего момента от постоянной нагрузки, возникающей в середине пролетного строения, от суммарной величины момента постоянных и временных нагрузок в предельном состоянии типового пролетного строения выпуска 56Д. Установлено влияние усиления преднапряженными полимерными композиционными материалами для усиления моделей железобетонных балок. Под воздействием на пролетные строения дополнительной постоянной нагрузки эффективность усиления снижается. Компенсировать снижение эффективности усиления можно, выполнив его разгрузку от собственного веса или применив преднапряжение полимерных композиционных материалов. Данное исследование позволяет опытным путем оценить эффективность применения преднапряжения для усиления железобетонных изгибаемых конструкций.

Ключевые слова: преднапряженные полимерные композиционные материалы, мосты, усиление, железобетонные балки, гидравлический домкрат, повышение и восстановление несущей способности, пролетные строения.

M.O. Yashchuk

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

PROGRAM OF LABORATORY PRESTRESSED CONCRETE BEAMS REINFORCED POLYMER COMPOSITES

The design and the scheme of installation of the prestressing device of composite materials for reinforcement of reinforced concrete beams are presented. The main tasks of laboratory investigation of models of reinforced concrete beams of a span structure are outlined, including schemes for amplification of samples. The technical characteristics of the composite material and the adhesive

composition used in the experiment are given. For the purposes of the study, drawings of reinforced concrete samples have been designed. A step-by-step technology of reinforcing pre-stressed composite materials has been developed. A scheme for the installation of measuring instruments was prepared and the values of the limiting forces and the corresponding load-bearing capacity of the samples were calculated. To estimate the pre-stress value of composite materials, the fraction of the bending moment from the constant load appearing in the middle of the span from the total value of the moment of constant and temporary loads in the limiting state, the typical span structure, release 56D, is determined. The pre-stress force of composite materials is determined to strengthen the models of reinforced concrete beams.

Keywords: prestressed polymer composite materials, bridges, strengthening, reinforced concrete beam, hydraulic jack, improving and restoring the bearing capacity, span structures.

Возрастающая временная нагрузка, деградация бетона, коррозия арматуры и повреждения элементов конструкции зачастую приводят к необходимости усиления железобетонных пролетных строений мостов. На протяжении последних лет в России полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все большее применение для усиления мостовых конструкций, проведены глубокие научные разработки [1–7], внедряются в практику технологии усиления ПКМ, в том числе за рубежом [8–11]. Для повышения эффективности усиления ПКМ может быть применена технология восстановления несущей способности пролетных строений с предварительным напряжением композиционных материалов. Автором для преднапряжения ПКМ разработано специальное устройство, показанное на рис. 1 [12, 13].

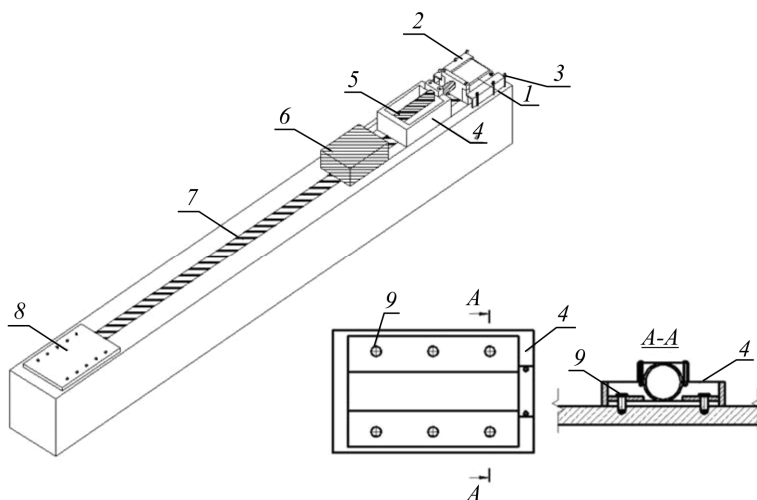


Рис. 1. Устройство предварительного напряжения ПКМ:

- 1 – зажим для фиксации ПКМ-пластины; 2 – крепление зажима к балке двумя уголками; 3 – роликовые направляющие; 4 – каркас для гидравлического домкрата; 5 – гидравлический домкрат; 6 – нагревательный элемент; 7 – пластина (ламель); 8 – крепление неподвижного конца пластины; 9 – анкерное крепление каркаса домкрата

Для подтверждения работоспособности устройства преднапряжения и обоснования эффективности усиления ПКМ с преднапряжением изгибаемых железобетонных балок пролетных строений мостов запланировано экспериментальное лабораторное исследование. Его основными задачами являются отладка технологии преднапряжения с использованием разработанного устройства на лабораторных образцах; изучение схем разрушения усиленных ПКМ опытных железобетонных образцов; изучение влияния величины преднапряжения ПКМ с различной степенью натяжения на их прочность, трещиностойкость и деформативность [14].

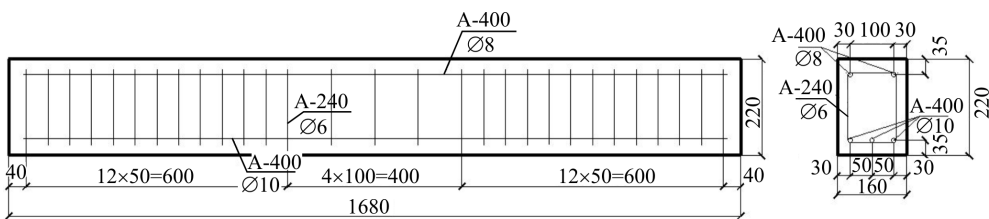


Рис. 2. Арматурный чертеж железобетонных образцов:
 1 – рабочая арматура класса А400 Ø 10 мм; 2 – рабочая арматура класса А400 Ø 8 мм; 3 – поперечная арматура (хомуты) класса А240 Ø 6 мм

Для решения поставленных задач экспериментального лабораторного исследования в качестве образцов, подвергающихся испытанию, были выбраны железобетонные балки прямоугольного сечения. На рис. 2 приведен арматурный чертеж железобетонных образцов из бетона класса В30, марки по морозостойкости – F200, марки по водонепроницаемости – W6.

Для усиления железобетонных образцов были выбраны материалы фирмы «КОМПОЗИТ»: FibArm Lamel HS 12/50, эпоксидный клеевой состав FibArm Resin Laminate+. Технические характеристики композиционных материалов и клеевого состава FibArm представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Технические характеристики композиционных материалов FibArm

Характеристика Материал	Ширина, мм	Толщина, мм	Прочность при разрыве, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
FibArm Lamel HS 12/50	50	1,2	3500	170

Т а б л и ц а 2

Технические характеристики клеевого состава FibArm

Характеристика Материал	Прочность сцепления, МПа, не менее	Прочность при сдвиге образцов клея, МПа, не менее	Цвет материала	Время полного отверждения, сут
FibArm Resin Laminate +	2,5	15	Компонент А – белый; компонент Б – черный; смесь «А + Б» – серый	5

Технологией усиления с предварительным напряжением ПКМ предусмотрены следующие виды работ:

а) выравнивание поверхности железобетонной балки, на которую наклеивают ПКМ; допускаемые отклонения от ровности поверхности не должны превышать 1 мм на базе 0,3 м;

б) бурение отверстий под анкерное крепление каркаса гидравлического домкрата и крепления неподвижного конца пластины ПКМ;

в) очистка, обеспыливание и обезжиривание поверхности балки;

г) установка в анкерные крепления каркаса гидравлического домкрата;

д) нанесение эпоксидного клея на поверхность балки слоем толщиной 1–2 мм;

е) наклейку пластины начинают с подготовительных работ, ее раскладывают на рабочем столе (верстаке) и тщательно протираются смоченной ацетоном ветошью; после этого на абсолютно сухой поверхности пластины формируют треугольный профиль из адгезива с помощью специального изготовленного раздаточного устройства (кондуктора) или мастерка, при этом толщина слоя адгезива в середине должна составлять 2 мм, сужаясь к краям до 1 мм; после нанесения адгезива ламель укладывают на основание и прокатывают жестким валиком для удаления воздуха из слоя адгезива; избыток адгезива убирают шпателем;

ж) закрепление неподвижного конца пластины ПКМ;

з) натяжение полосы ПКМ домкратом до расчетного уровня;

и) прогрев клеевого состава для ускорения его полимеризации (не дольше 3 ч);

к) демонтаж системы преднапряжения (через 24 ч после окончания прогрева).

Испытания образцов железобетонных балок запланировано проводить по схеме однопролетной балки (расчетный пролет – 1600 мм)

на прессе ДРБМ-300, предназначенном для испытаний образцов на сжатие и изгиб.

Для контроля деформаций устанавливаются датчики электронного измерительного комплекса «Тензор-МС». Нагрузку предполагается фиксировать с помощью месдозы. Индикаторы часового типа (ИЧЦ-10) устанавливаются над опорами и в середине пролета для контроля прогиба балки и обмятия опорных частей. Тензодатчики (ТД) комплекса «Тензор-МС» (или деформометры на базе индикаторов часового типа ИЧЦ-10) размещаются в середине пролета в верхней части балки для контроля относительных деформаций в верхних волокнах бетона, на композиционном материале – для контроля напряжений в нем, а также на боковых гранях балок.

Для обнаружения трещин используется метод «мокрых пятен», для измерения величины раскрытия и высоты развития трещин – штангенциркуль, микроскоп Бринелля и линейка. Схема расстановки измерительных приборов показана на рис. 3.

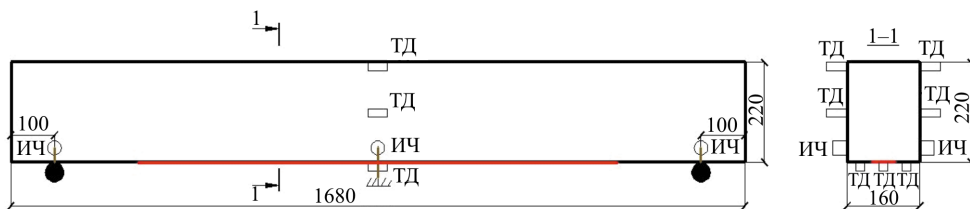


Рис. 3. Схема установки измерительных приборов

Схема нагружения образца и эпюра изгибающих моментов изображены на рис. 4. В балках основной рабочей зоной является зона чистого изгиба – участок балки между точками приложения вертикальных сил $P/2$, расположенными на расстоянии 0,64 м от торцов образца. Для передачи нагрузки от силового цилиндра на балку используют траверсу. Нагрузку от траверсы на балку передают через металлические пластины. Опираение балок происходит на цилиндрические опорные части.

Нагрузку к образцу прикладывают с шагом $\Delta P = 500$ кгс. Скорость приложения нагрузки – 500 кгс/мин. Снятие показаний датчиков осуществляется только после стабилизации деформаций.

В процессе испытания на каждом шаге нагружения фиксируют величину деформаций на нижней грани образца, величину прогиба, а также величину и характер раскрытия трещин. Испытания проводят до разрушения образцов или до наступления момента, при котором

происходит прогрессирующее увеличение деформаций без увеличения нагрузки.

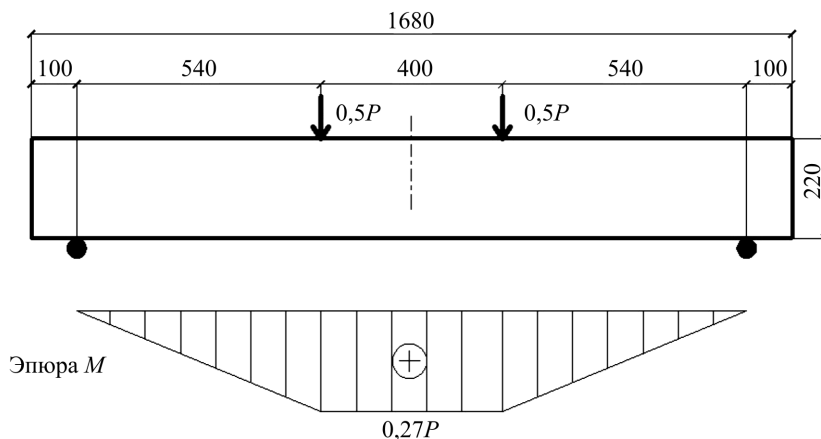


Рис. 4. Схема нагружения и эпюра изгибающего момента опытных образцов

Для предварительной оценки несущей способности испытываемых железобетонных образцов выполнены расчеты нормального сечения на прочность в зоне чистого изгиба и на прочность по наклонному сечению. Предельные значения усилий, определенные по СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы», и соответствующие им значения нагрузки P приведены в табл. 3. Из представленных данных (см. табл. 3) видно, что разрушение будет происходить по нормальному сечению, а наклонное сечение имеет трехкратный запас по несущей способности и не станет лимитирующим и после усиления.

Таблица 3

Значения предельных усилий и соответствующая им несущая способность образцов P

Предельное усилие	Значение усилия	P , тс
Изгибающий момент для нормального сечения	17,26 кН·м	6,51
Изгибающий момент для наклонного сечения с трещиной	57,53 кН·м	21,72
Поперечная сила для наклонного сечения с трещиной	166,2 кН	33,88
Поперечная сила по сжатому бетону между наклонными трещинами	248,8 кН	50,7

При усилении конструкций без принятия мероприятий по повышению эффективности усиления (например, разгрузка от собственного

веса) материал усиления работает только на восприятие временной нагрузки. Часто в процессе эксплуатации происходит рост постоянных нагрузок, как правило, из-за увеличения толщины слоя дорожных одежд. Соответственно, при значительном росте постоянных нагрузок эффективность усиления существенно снижается. В этом случае вместо разгрузки от собственного веса можно применить преднапряжение ПКМ.

Для оценки величины преднапряжения ПКМ будем исходить из предположения о том, что уровень преднапряжения должен соответствовать разгрузке пролетного строения от собственного веса, что обеспечит работу усиления на восприятие как нагрузки от собственного веса конструкции, так и от временной нагрузки. Для этого необходимо определить долю изгибающего момента от постоянной нагрузки, возникающего в середине пролетного строения, к суммарной величине момента от постоянных и временных нагрузок в предельном состоянии:

$$K_p = M_p / (M_p + M_k),$$

где M_p – изгибающий момент от постоянной нагрузки; M_k – изгибающий момент от временной нагрузки в предельном состоянии.

Для балок пролетного строения выпуска 56Д величина K_p получена равной 0,37. С учетом того, что толщина дорожных одежд может значительно отличаться от проектных значений в большую сторону [15], полученное значение может достигать величины 0,5.

Зная долю постоянных нагрузок для реального пролетного строения, можно оценить и уровень напряжений, возникающих в рабочей арматуре испытываемых образцов, соответствующий нагрузке от собственного веса в реальном пролетном строении:

$$\sigma_s = K_p R_s,$$

где R_s – сопротивление арматуры растяжению.

Тогда ориентировочно величину преднапряжения ПКМ для компенсации постоянной нагрузки можно определить по формуле

$$N_k = \sigma_s A_s \frac{h_s}{h_k},$$

где h_s – расстояние от центра тяжести сжатой арматуры до центра тяжести растянутой; h_k – расстояние от центра тяжести сжатой арматуры до нижней грани балки; A_s – площадь поперечного сечения рабочей арматуры.

По результатам проведенных расчетов усилие преднапряжения N_k композиционного материала составило 3,0 тс.

На основе проведенных расчетов и анализа работы конструкции образцы были разделены на пять групп (обозначенные буквами А, Б, В, Г, Д) по три балки-близнеца в каждой группе. Первая группа образцов А представлена неусиленными железобетонными балками (рис. 5, а). Вторая группа Б – железобетонными балками, усиленными ненапряженными пластинами, закрепленными вертикальными хомутами (рис. 5, б). В третьей группе образцы В усилены с первым уровнем преднапряжения ПКМ до 3,0 т (рис. 5, в). В четвертой группе Г – вторым уровнем преднапряжения до 4,0 тс. Испытания образцов пятой

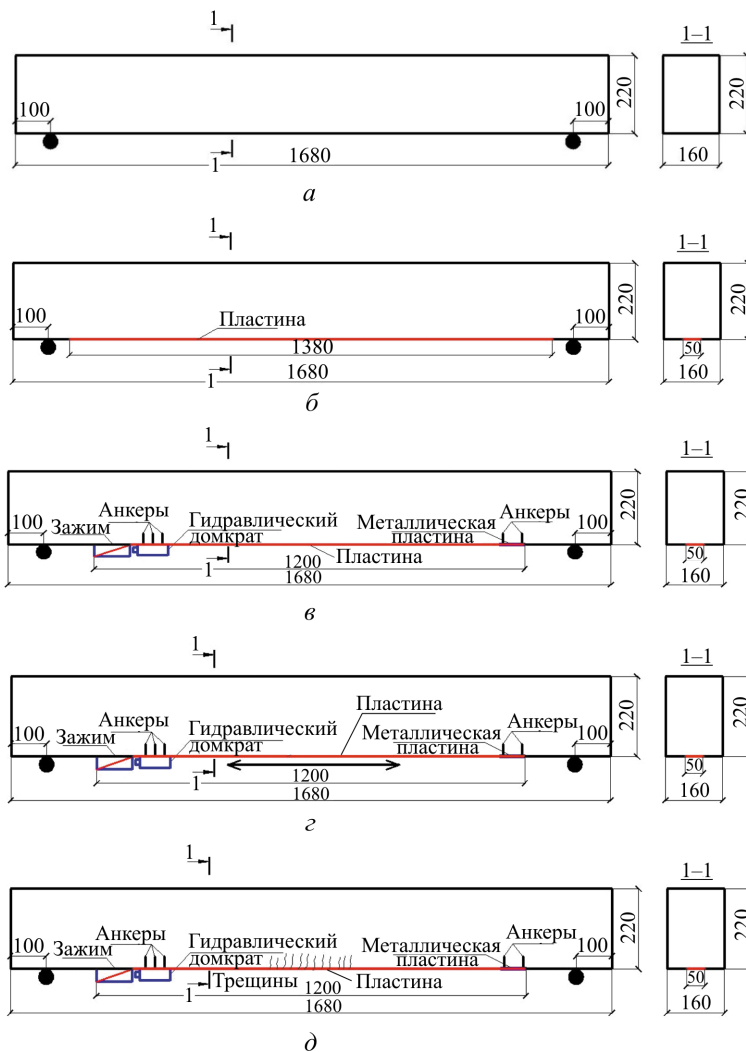


Рис. 5. Конструкции усиления балок ПКМ

группы Д направлены на изучение трещиностойкости и деформативности железобетонных пролетных строений, в которых до усиления образовались трещины раскрытием 0,5 мм (рис. 5, д).

Под воздействием на пролетные строения дополнительной постоянной нагрузки эффективность усиления снижается. Компенсировать снижение эффективности усиления можно, выполнив его разгрузку от собственного веса или применив преднапряжение полимерных композиционных материалов. В процессе работы разработаны расчетные формулы для определения необходимой степени преднапряжения композиционных материалов, а также схемы усиления и расстановки измерительных приборов. Данное исследование позволяет опытным путем оценить эффективность применения преднапряжения для усиления железобетонных изгибаемых конструкций.

Список литературы

1. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М.: Стройиздат, 2007. – 184 с.

2. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций / С.А. Бокарев [и др.] // Вестник Том. гос. арх.-строит. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 222–229.

3. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 2. – С. 63–74.

4. Неволин Д.Г., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Усиление железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения полимерными композиционными материалами. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2017. – 152 с.

5. О программе исследования наклонных сечений балок с трещинами, усиленных углепластиком / П.П. Польский [и др.] // Новые технологии. – 2015. – № 4. – С. 35–39.

6. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Полимерные композиционные материалы в транспортном строительстве // Транспорт Урала. – 2016. – № 1. – С. 24–30.

7. Смердов Д.Н., Селиванова Е.О. Программа экспериментальных исследований по определению влияния температурно-силовых факто-

ров на физико-механические свойства элементов системы внешнего армирования при длительном воздействии нагрузки // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию основания Урал. гос. ун-та путей сообщения. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2017. – С. 381–386.

8. Бокарев С.А., Слепец В.А. Трещинообразование в железобетонных элементах мостов, усиленных полимерными композиционными материалами // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2015. – Вып. 3 (33). – С. 18–26.

9. Бокарев С.А., Кобелев К.В., Слепец В.А. Усиление железобетонных элементов мостов полимерными композиционными материалами без остановки движения [Электронный ресурс] // Наукоедение. – 2014. – № 5 (24). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/20KO514.pdf> (дата обращения: 19.06.2017).

10. Смердов Д.Н. Натурные исследования железобетонного пролетного строения автодорожного моста, усиленного композитными материалами // Актуальные вопросы проектирования автомобильных трудов. – 2012. – № 3. – С. 27–33.

11. Siwowski T. Strengthening bridges with prestressed CFRP strips SSP // Journal of Civil Engineering. – 2012. – Vol. 7, iss. 1. – URL: <http://www.springer.com/engineering/civil+engineering/journal/40999> (дата обращения: 19.06.2016).

12. Устройство предварительного напряжения композиционных материалов для усиления конструкций мостов: пат. Рос. Федерация / Ящук М.О., Бокарев С.А. – № 2015148118; заявл. 09.11.2015; опубл. 10.04.16. Бюл. № 10.

13. Ящук М.О., Кобелев К.В. Особенности работы устройств для усиления конструкций железобетонных мостов с применением полимерных композиционных материалов // Транспорт: наука, образование, производство: тр. междунар. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д, 2016. – С. 142–145.

14. Бокарев С.А., Ящук М.О. Усиление железобетонных пролетных строений мостов преднапряженными полимерными композиционными материалами // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 98–107.

15. Неровных А.А. Совершенствование оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2013. – 196 с.

References

1. Shilin A.A., Pshenichnyi V.A., Kartuzov D.V. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnykh konstruksii kompozitsionnymi materialami [External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials]. Moscow, Stroizdat, 2007. 184 p.
2. Bokarev S.A. et al. Koeffitsienty nadezhnosti dlia kompozitsionnykh materialov, primeniaemykh dlia usileniia zhelezobetonnykh elementov mostovykh konstruksii [Calculation performance of composite materials for strengthening of bridge structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2012, no. 2. pp. 222-229.
3. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Metodika rascheta po prochnosti sechenii ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh proletnykh stroenii, usilennykh kompozitnymi materialami [Method for calculating the strength of cross-sections of exploited reinforced concrete span structures reinforced with composite materials]. *News of higher educational institutions. Construction*, 2010, no. 2. pp. 63-74.
4. Nevolin D.G., Smerdov D.N., Smerdov M.N. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii zdaniia i sooruzhenii razlichnogo naznacheniiia polimernymi kompozitsionnymi materialami [Strengthening of reinforced concrete structures of buildings and constructions of various purpose using polymer composite materials]. Ekaterinburg, USURT, 2017, 152 p.
5. Polskoy P.P. et al. O programme issledovaniia naklonnykh sechenii balok s treshchinami, usilennykh ugleplastikom [On the program of the research of inclined sections of the beams with cracks strengthened by the coal plastic]. *New technologies*, 2015, no. 4, pp. 35-39.
6. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Polimernye kompozitsionnye materialy v transportnom stroitel'stve [Polymer composite materials in transport construction industry]. *Transport of the Urals*, 2016, no. 1. pp. 24-30.
7. Smerdov D.N., Selivanova E.O. Programma eksperimental'nykh issledovaniia po opredeleniiu vliianiia temperaturno-silovykh faktorov na fiziko-mekhanicheskie svoistva elementov sistemy vneshnego armirovaniia pri dlitel'nom vozdeistvii nagruzki [Program of experimental research on the determination of the influence of temperature-power factors on physico-mechanical properties of elements of the external reinforcement system in the long-term action of load]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Posviashchennoi 60-letiiu osnovaniia Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, Ekaterinburg, USURT, 2017, pp. 381-386.

8. Bokarev S.A., Slepets V.A. Treshchinoobrazovanie v zhelezobetonnykh elementakh mostov, usilennykh polimernymi kompozitsionnymi materialami [Cracking in reinforced concrete bridge beams strengthened with polymer composite materials]. *The Siberian Transport University Bulletin*, 2015, iss. 3 (33), pp. 18-26.

9. Bokarev S.A., Kobelev K.V., Slepets V.A. Usilenie zhelezobetonnykh elementov mostov polimernymi kompozitsionnymi materialami bez ostanovki dvizheniia [Reinforced concrete bridge parts strengthening using the polymer composites without the traffic stop]. *Naukovedenie*, 2014, no. 5 (24), available at: <http://naukovedenie.ru/> (accessed 19 June 2017).

10. Smerdov D.N. Naturnye issledovaniia zhelezobetonного proletnogo stroeniia avtodorozhnogo mosta, usilennogo kompozitnymi materialami [Field investigations of concrete spans of highway bridges reinforced by composite materials]. *OJSC GIPRODORNII*, 2012, no. 3. pp. 27-33.

11. Siwowski T. Strengthening bridges with prestressed CFRP STRIPS SSP. *Journal of Civil Engineering*, 2012, vol. 7, iss. 1, available at: <http://www.springer.com/engineering/civil+engineering/journal/40999> (accessed 19 June 2016).

12. Yashchuk M.O., Bokarev S.A. Ustroistvo predvaritel'nogo napriazheniia kompozitsionnykh materialov dlia usileniia konstruktsii mostov [Pre-stress device for composite materials for reinforcing bridge structures]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2015148118, 2016.

13. Yashchuk M.O., Kobelev K.V. Osobennosti raboty ustroistv dlia usileniia konstruktsii zhelezobetonnykh mostov s primeneniem polimernykh kompozitsionnykh materialov [Device features for strengthening concrete structures bridge of polymer composite materials]. *Transport: science, education, production. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Rostov-on-Don, RSTU, 2016, pp. 142-145.

14. Bokarev S.A., Yashchuk M.O. Usilenie zhelezobetonnykh proletnykh stroenij mostov prednaprjazhennymi polimernymi kompozicionnymi materialami [Strengthening of reinforced concrete bridge spans, prestressed polymeric composite materials]. *Vestnik RGUPS*, 2016, no. 1, pp. 98-107.

15. Nerovnykh A.A. Sovershenstvovanie ocenki gruzopod'emnosti zhelezobetonnykh proletnykh stroenij zheleznodorozhnykh mostov, usilennykh kompozicionnymi materialami [Improvement of methods of assessment of load capacity of reinforced concrete structural structures of railway bridges, enhanced by composite materials]. Ph.D. thesis. Novosibirsk, 2013, 196 p.

Получено 22.08.2017

Об авторе

Ящук Максим Олегович (Ростов-на-Дону, Россия) – ассистент кафедры «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог», Ростовский государственный университет путей сообщения (344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, e-mail: maxum1986@gmail.com).

About the author

Maksim O. Yashchuk (Rostov-on-Don, Russian Federation) – Assistant, Department of Survey, Design and Construction of Railways, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation, e-mail: maxum1986@gmail.com).