

С.И. МЕРКУЛОВ¹, С.О. КАШУБА², С.М. ЕСИПОВ²¹ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия²ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Россия

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

Аннотация. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами успешно применяется при усилении поврежденных элементов. При этом кручение с изгибом таких железобетонных конструкций мало изучено и требует проведения экспериментально-теоретического исследования. В научной литературе представлены результаты исследования прочности и деформативности при изгибе с кручением железобетонных элементов различной формы сечения при статическом и при динамическом действиях нагрузок, элементов составного сечения. Для железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием композитными материалами, такие исследования выполнялись лишь для изгибаемых элементов. Авторами разработана программа и методика экспериментальных исследований таких конструкций. Результаты экспериментальных исследований по предлагаемой методике позволят проверить предполагаемую расчетную модель, положенные в ее основу рабочие предпосылки и выявить закономерности деформирования железобетонных конструкций с внешним композитным армированием при сопротивлении изгибу с кручением.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, внешнее армирование, композитный материал, кручение с изгибом, экспериментальная установка.

S.I. MERKULOV¹, S.O. KASHUBA², S.M. ESIPOV²¹Kursk State University, Kursk, Russia²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

PROGRAM AND METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH EXTERNAL REINFORCEMENT WITH COMPOSITE MATERIALS IN BENDING WITH TORSION

Abstract. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials is successfully used for strengthening of damaged elements. At the same time, torsion with bending of such reinforced concrete structures is poorly studied and requires experimental and theoretical investigation. The scientific literature presents the results of the study of strength and deformability in bending with torsion of reinforced concrete elements of different cross-sectional shapes under static and dynamic loads, elements of composite cross-section. For reinforced concrete structures strengthened with external reinforcement by composite materials, such studies were carried out only for bending elements. The authors have developed a program and methodology of experimental studies of such structures. The results of experimental investigations according to the proposed methodology will allow us to verify the assumed design model, the working assumptions put in its basis and reveal the regularities of deformation of reinforced concrete structures with external composite reinforcement under bending with torsion.

Keywords: reinforced concrete structures, external reinforcement, composite material, torsion with bending, experimental installation.

Введение

В современной практике строительства все чаще встречаются сложные очертания строительных конструкций, требующие особого подхода к проектированию и конструированию. Для достижения всех требований безопасной эксплуатации зданий и сооружений, при экономической обоснованности и эффективности, необходимо применение самых современных методик проектирования.

Частью жизненного цикла любого здания или сооружения является реконструкция. В процессе восстановления или перевооружения объекта капитального строительства может быть изменена расчетная схема здания в целом, что повлечет за собой изменение принципов работы его отдельных конструкций, например появление эксцентриситета в центрально нагруженных колоннах или возникновение кручения в изгибаемых элементах. Даже без изменения расчетной схемы, при реконструкции отдельные элементы здания требуют увеличения несущей способности с обоснованным подходом к технико-экономическим показателям.

Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами успешно применяется при усилении поврежденных элементов, такие технические решения имеют малые геометрические размеры, и просты в технологии производства работ [1-2]. Наряду с усилением сжатых и изгибаемых элементов возникает необходимость усиления и при более сложных напряженных состояниях, в частности, при изгибе с кручением. В действующих нормативных документах отсутствуют разработанные указания по проектированию усиления железобетонных конструкций при совместном действии изгибающего и крутящего моментов. К настоящему времени выполнены работы по изучению прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при усилении внешним армированием композитными материалами [3-7].

Поэтому представляется актуальным проведение экспериментальных и теоретических исследований сопротивления железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами, при изгибе с кручением.

Конструкции экспериментальных балок

Кручение с изгибом железобетонных конструкций является мало изученной областью, что требует проведения экспериментально-теоретического изучения данного класса конструкций. Выполнены исследования прочности и деформативности при изгибе с кручением железобетонных элементов различной формы сечения при статическом и при динамическом действиях нагрузок, элементов составного сечения, а также предложены расчетные модели силового сопротивления [8-13].

Для решения вопросов проектирования усиления железобетонных конструкций внешним армированием композитным материалом выполнены исследования изгибаемых элементов [7, 14-15]. Установлено, что на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами, большое влияние оказывает сцепление между бетоном усиливаемой конструкции и композитом усиления [16-17]. Однако на сегодняшний день отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования усиленных железобетонных конструкций при изгибе с кручением [18].

Авторами разработана программа и методика экспериментальных исследований. Объем и основные параметры экспериментальных конструкций приведены в таблице 1. Задачами экспериментальных исследований является: разработка методики эксперимента испытаний железобетонного элемента, усиленного внешним композитным армированием, проведение эксперимента, анализ полученных результатов. Полученные результаты позволят проверить предполагаемую расчетную модель, положенные в ее основу рабочих предположений и выявления закономерностей деформирования железобетонных конструкций с внешним композитным армированием при сопротивлении изгибу с кручением.

Программа экспериментального исследования включает в себя испытание железобетонных конструкций с внешним композитным армированием балочного типа. Конструкции предполагают изготовление в заводских условиях по чертежам (рисунок 1) из тяжелого бетона класса В20, с основным армированием стержневой арматурой $\varnothing 10$ А500 по ГОСТ 34028-2016 и хомутами из стержневой арматуры $\varnothing 6$ А240 по ГОСТ 34028-2016, внешнее композитное армирование из холстов FibArm Tape 430/150, приклеенных к телу бетона двухкомпонентным составом на основе эпоксидных смол WallWrap Resin 535. Количество испытываемых конструкций принято с учетом варьирования способов и моментов нанесения внешнего композитного армирования. Конструкция опытных образцов приведена на рисунке 1.

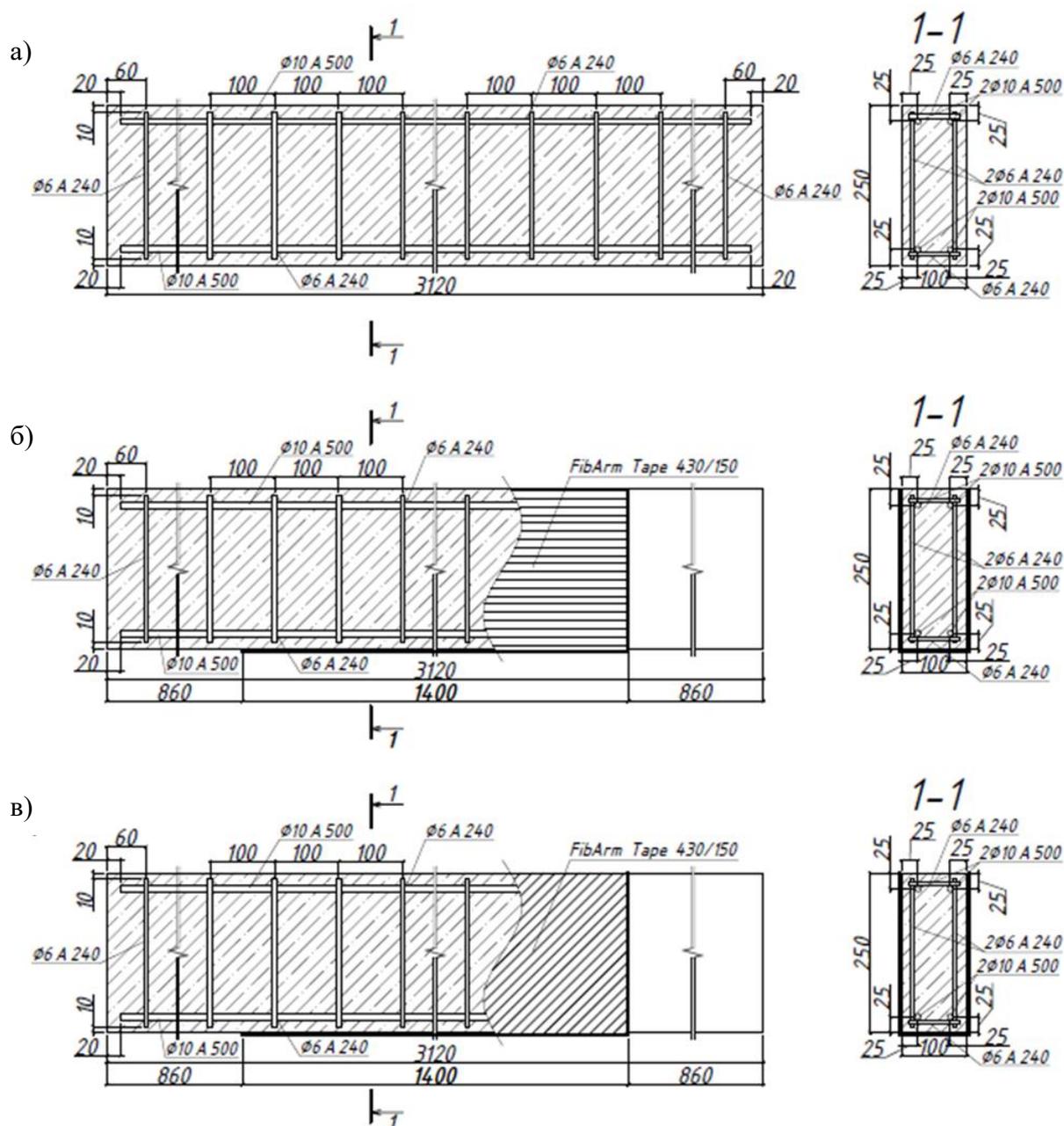


Рисунок 1 – Конструкции балок серии Б0-0 (а); Б1-1, Б1-2, Б1-3 (б); Б2-1, Б2-2, Б2-3 (в)

Таблица 1 – Объем и основные параметры экспериментальных конструкций

Серия образца	h, мм	b, мм	L, мм	Вариант исполнения внешнего композитного армирования	Момент нанесения внешнего композитного армирования
Б0-0	250	100	3120	- (рисунок 1 а)	-
Б1-1				U-образная обойма с волокнами, расположенными вдоль продольной оси балки (рисунок 1 б)	25% $R_{кр}$
Б1-2					50% $R_{кр}$
Б1-3					70% $R_{кр}$
Б2-1				U-образная обойма с волокнами, расположенными под углом 45° к продольной оси балки, перпендикулярно пространственной трещине (рисунок 1 в)	25% $R_{кр}$
Б2-2					50% $R_{кр}$
Б2-3					70% $R_{кр}$

Методика испытания

Схема испытаний опытных образцов приведена на рисунке 2. Для достоверности результатов необходимо ступенчатое нагружение образцов с шагом 5% от $R_{кр}$ и выдерживанием не менее 5 минут паузы после каждого этапа нагружения. $R_{кр}$ определяется экспериментально, путем доведения эталонных балок (Б0-0) до разрушения, предварительно рассчитанная разрушающая нагрузка балок без усиления составляет 16 кН.

Балки Б1-1 и Б2-1 нагружаются до 25% $R_{кр}$, после чего усиливаются внешним композитным армированием и доводятся до разрушения. Балки Б1-2 и Б2-2 нагружаются до 50% $R_{кр}$, после чего усиливаются внешним композитным армированием и доводятся до разрушения. Балки Б1-3 и Б2-3 нагружаются до 70% $R_{кр}$, после чего усиливаются внешним композитным армированием и доводятся до разрушения.

В пролете между приложенными силами возникает изгибающий момент, который в 2,5 раза больше крутящего момента, данное соотношение обусловлено расчетом, для разрушения балки по пространственному сечению.

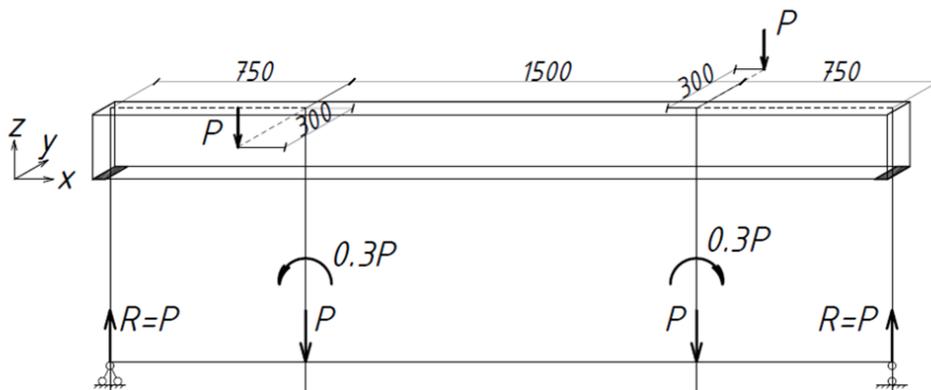


Рисунок 2 – Схема испытаний опытных образцов на изгиб с кручением

Для определения прогиба балки в середине пролета будет установлен индикатор часового типа (рисунок 3 а). При определении угла закручивания балки в местах приложения силы, над опорами и в середине пролета, будут установлены инклинометры (рисунок 4).

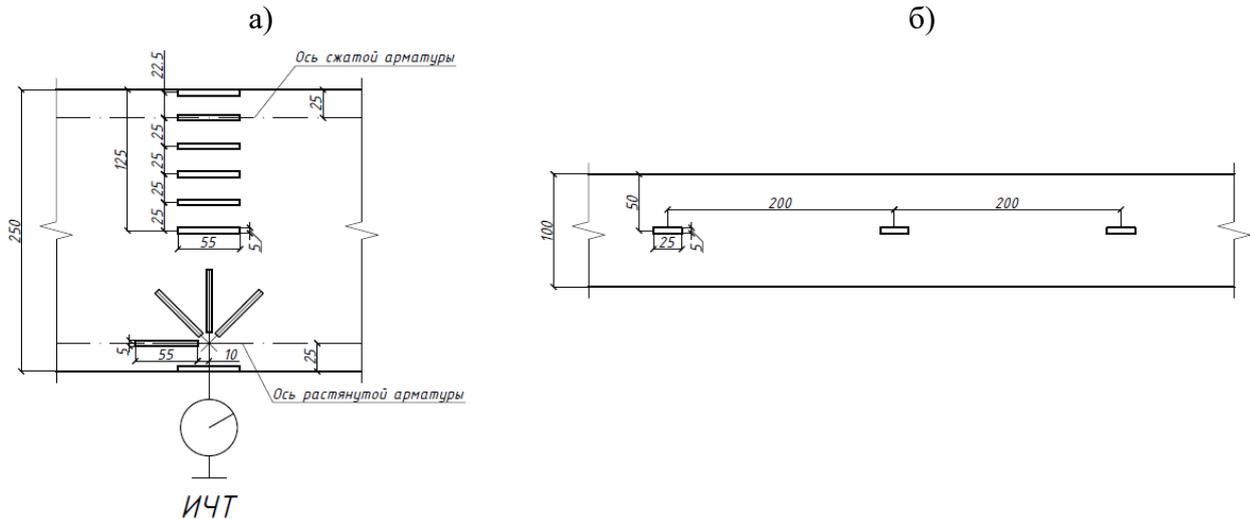


Рисунок 3 – Схема расстановки электротензорезисторов на боковой грани (а), на нижней грани (б)

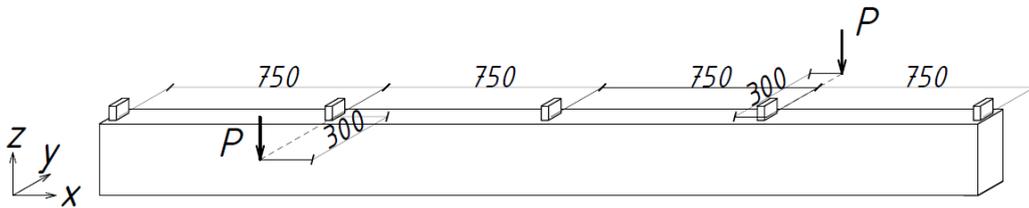


Рисунок 4 – Схема расстановки инклинометров

Для определения напряжения в теле бетона в середине пролета образца будут установлены электротензорезисторы, расположенные с двух сторон балки, в сжатой зоне, для определения ее высоты, параллельно друг другу с шагом 25 мм, в растянутой зоне под углом 45° друг к другу (рисунок 3 а). Установка датчиков будет произведена на бетон. Для определения качества сцепление между бетоном усиливаемой конструкции и композитом усиления на растянутой грани будут установлены на бетон и композит парные электротензорезисторы с шагом 200 мм (рисунок 3 б).

Заключение

1. Предложены конструктивные решения железобетонных балок, усиленных U-образной облойкой из холстов композитного материала FibArm Tape 430/150 с волокнами, расположенными вдоль продольной оси (1) и под углом 45° (2) к продольной оси балки.
2. Разработана методика экспериментальных исследований работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением, которая позволяет выявить характер напряженно-деформированного состояния таких элементов и проверить принятые теоретические основы работы исследуемых конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Композитные системы внешнего армирования железобетонных конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 39-48. doi:10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48. EDN NHWONY.
2. Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 2(35). С. 93-100. doi:10.5281/zenodo.1286034. EDN USTLHE.
3. Меркулов С.И., Есипов С.М. Использование тканых композитов для восстановления строительных // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3(381). С. 256-259. EDN KWLBP.

4. Есипов С.М., Меркулов С.И. Усиление железобетонных элементов внешним армированием. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. 179 с. ISBN 978-5-361-00890-2. EDN AZCHQU.
5. Бадалова Е.Н. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций углепластиковой арматурой // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Прикладные науки. Строительство. 2007. № 6. С. 54-59. EDN XDDHSP.
6. Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2(12). С. 19-22. EDN MZJCWT.
7. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 2(614). С. 112-124. EDN OZHZPD.
8. Колчунов В.И., Сальников А.С. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. № 3(65). С. 24-32. EDN WFGVSH.
9. Меркулов Д.С. К выбору расчетной модели силового сопротивления железобетонных элементов при изгибе с кручением // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 10. С. 46-48. EDN KWNHQV.
10. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // Строительство и реконструкция. 2017. № 4(72). С. 17-26. EDN ZHNNHB.
11. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом / В.И. Травуш, Н.И. Карпенко, В.И. Колчунов [и др.] // Строительство и реконструкция. 2018. № 6(80). С. 32-43. EDN VQNSNS.
12. Меркулов С.И., Стародубцев С.В. Экспериментальные исследования стержневых железобетонных элементов составного сечения, подвергнутых изгибу с кручением // Строительство и реконструкция. 2012. № 2(40). С. 20-24. EDN OZMBZH.
13. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 15-18. EDN STWXON.
14. Дронов А.В., Дрокин С.В., Фролов Н.В. Экспериментальное исследование сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 80-83. EDN XACMZR.
15. Юшин А.В., Морозов В.И. Экспериментальные исследования двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 5(46). С. 50-57. EDN TBPWWF.
16. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Computer Simulation of Bent Reinforced Concrete Elements with External Composite Reinforcement // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 151 LNCE. Pp. 153-159. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_22. EDN KYOWIG.
17. Modeling of the Stress-Strain State of a Composite External Strengthening of Reinforced Concrete Bending Elements / S.I. Merkulov, V.I. Rimshin, I.L. Shubin, S.M. Esipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". Vladivostok, Russky Island, 01–04 октября 2019 года. Vol. 753, 5, Chapter 4. – Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. Pp. 052044. doi:10.1088/1757-899X/753/5/052044. EDN ZPVTEJ.
18. Меркулов С.И., Есипов С.М., Кашуба С.О. Предварительное описание работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 40-48. doi:10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48. – EDN EFOFCS.

REFERENCES

1. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Kompozitnye sistemy vneshnego armirovaniia zhelezobetonnykh konstruksii [Composite systems for external reinforcement of reinforced concrete structures]. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 4. Pp. 39-48. doi:10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48. EDN HMWONY. (rus)

2. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Betonnye konstruksii, usilennye kompozitnym materialom [Concrete structures strengthened with composite material]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018. No. 2(35). Pp. 93-100. doi:10.5281/zenodo.1286034. EDN USTLHE (rus)
3. Merkulov S.I., Esipov S.M. Ispol'zovanie tkanykh kompozitov dlia vosstanovleniia stroitel'nykh konstruksii [The use of woven composites for the recovery of building structures]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2019. No. 3(381). Pp. 256-259. EDN KWLBP. (rus)
4. Esipov S.M., Merkulov S.I. Usilenie zhelezobetonnykh elementov vneshnim armirovaniem [Strengthening of reinforced concrete elements by external reinforcement]. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. 179 p. ISBN 978-5-361-00890-2. EDN AZCHQU. (rus)
5. Badalova E.N. Usilenie izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruksii ugleplastikovoii armaturoi [Strengthening of bending reinforced concrete structures with carbon fiber reinforcement]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*. 2007. No. 6. Pp. 54-59. EDN XDDHSP. (rus)
9. Merkulov D.S. K vyboru raschetnoi modeli silovogo soprotivleniia zhelezobetonnykh elementov pri izgibe s krucheniiem [To the choice of the design model of the force resistance of reinforced concrete elements during bending with torsion]. *Industrial and civil engineering*. 2009. No. 10. Pp. 46-48. EDN KWNHQV. (rus)
10. Dem'ianov A.I., Sal'nikov A.S., Kolchunov V.I. Eksperimental'nye issledovaniia zhelezobetonnykh konstruksii pri kruchenii s izgibom i analiz ikh rezul'tatov [Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending and analysis of their results]. *Building and reconstruction*. 2017. No. 4(72). Pp. 17-26. EDN ZHHHHB. (rus)
11. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovanii konstruksii kvadratnogo i korobchatogo sechenii iz vysokoprochnogo betona pri kruchenii s izgibom [Results of experimental studies of square and box-shaped cross-section structures made of high-strength concrete during torsion with bending]. V.I. Travush, N.I. Karpenko, V.I. Kolchunov [and others]. *Building and reconstruction*. 2018. No. 6(80). Pp. 32-43. EDN VQNSNS. (rus)
12. Merkulov S.I., Starodubtsev S.V. Eksperimental'nye issledovaniia sterzhnykh zhelezobetonnykh elementov sostavnogo secheniia, podvergnutykh izgibu s krucheniiem [Experimental studies of rod reinforced concrete elements of composite section subjected to bending with torsion]. *Building and reconstruction*. 2012. No. 2(40). Pp. 20-24. EDN OZMBZH. (rus)
13. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. Eksperimental'nye issledovaniia zhelezobetonnykh elementov, rabotaiushchikh na izgib s krucheniiem, pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom vozdeistviiakh [Experimental studies of reinforced concrete elements working on bending with torsion under static and short-term dynamic influences]. *ZHilishchnoe stroitel'stvo*. 2014. No. 10. Pp. 15-18. EDN STWXON. (rus)
14. Dronov A.V., Drokin S.V., Frolov N.V. Eksperimental'noe issledovanie stsepleniia stekloplastikovoii armatury s betonom [Experimental study of the adhesion of fiberglass reinforcement with concrete]. *Industrial and civil engineering*. 2016. No. 11. Pp. 80-83. EDN XACMZR. (rus)
15. Iushin A.V., Morozov V.I. Eksperimental'nye issledovaniia dvukhproletnykh zhelezobetonnykh balok, usilennykh kompozitnymi materialami po naklonnomu secheniiu [Experimental studies of two-span reinforced concrete beams strengthened with composite materials along an inclined section]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2014. No. 5(46). Pp. 50-57. EDN TBPWWF. (rus)
16. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Computer Simulation of Bent Reinforced Concrete Elements with External Composite Reinforcement. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 151 LNCE. P. 153-159. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_22. EDN KYOWIG.
17. Modeling of the Stress-Strain State of a Composite External Strengthening of Reinforced Concrete Bending Elements / S.I. Merkulov, V.I. Rimshin, I.L. Shubin, S.M. Esipov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019"*, Vladivostok, Russky Island, 01–04 октября 2019 года. Vol. 753, 5, Chapter 4. – Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. Pp. 052044. doi:10.1088/1757-899X/753/5/052044. EDN ZPVTEJ.
18. Merkulov S.I., Esipov S.M., Kashuba S.O. Predvaritel'noe opisanie raboty zhelezobetonnykh elementov s vneshnim armirovaniem kompozitnymi materialami pri izgibe s krucheniiem [Preliminary description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion]. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 11. Pp.40-48. doi:10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48. EDN EFOFCS. (rus)

Информация об авторах:

Меркулов Сергей Иванович

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия,
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства.
E-mail: mrsi.dom@yandex.ru

Кашуба Сергей Олегович

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Россия,
аспирант кафедры строительства и городского хозяйства.
E-mail: kashuba_sergey@mail.ru

Есипов Станислав Максимович

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства.
E-mail: sk31.sm@gmail.com

Information about authors:

Merkulov Sergei Iv.

Kursk State University, Kursk, Russia,
corresponding Member of the RAACS, doctor of technical sciences, professor, head of the department of Industrial and Civil Engineering.
E-mail: mrsi.dom@yandex.ru

Kashuba Sergei Ol.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia,
graduate student of the department of Construction and Urban Economy.
E-mail: kashuba_sergey@mail.ru

Esipov Stanislav M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Construction and Urban Economy.
E-mail: sk31.sm@gmail.com