

Численное моделирование деревянных балок, усиленных композитным материалом на основе углеродного волокна

*С.В. Ключев¹, Д.М. Лобов^{1,2}, Д.А. Кожанов², Н.И. Черкашина¹,
В.Л. Курбатов¹*

¹*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

²*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация: Рассматриваются результаты численного моделирования деревянных балок, усиленных композитным материалом на основе углеродного волокна. Моделирование балок, усиленных композитным материалом, выполнено в ПК “ANSYS” с использованием диаграмм деформирования. Произведена оценка достоверности методики моделирования путем сравнения результатов численного исследования с результатами физического эксперимента, полученными в процессе проведения испытаний моделей деревянных балок, усиленных композитным материалом на основе углеродного волокна.

Ключевые слова: углеродное волокно, углеродные композиционные материалы, усиление деревянных конструкций, внешнее армирование деревянных балок.

Композитный материал на основе углеродного волокна в качестве элемента внешнего армирования применяется при усилении конструкций из железобетона [1], каменных материалов [2], металла [3], а также находит все большее распространение при усилении деревянных балочных конструкций [4, 5].

Работы в области применения армирования при усилении деревянных балочных конструкций ведутся по следующим направлениям:

1. Исследования, направленные на применение армирования в качестве элемента усиления на действие изгибающего момента. В работе [6] приводятся результаты исследования армированных деревянных балочных конструкций с применением стальной арматуры. В работе [7] приводятся результаты исследования с применением армирования композитным материалом. При усилении деревянных балочных конструкций на действие изгибающего момента крепление армирующего элемента осуществляется путем приклеивания к нижней растянутой грани поперечного сечения.

2. Исследования, направленные на применение армирования композитными материалами на усиление приопорных зон деревянных балок на действие касательных и главных напряжений. В работе [8] выполнено исследование составных деревянных балок с размещением композитного материала в шве сплачивания. В работе [9] проведено исследование усиления приопорной зоны деревянных балок с размещением композитного материала в виде обоймы по боковой поверхности усиливаемого элемента.

Данное исследование посвящено вопросам применения композитных материалов на основе углеродного волокна при усилении деревянных балочных конструкций на действие изгибающего момента.

В рамках данной работы решались следующие задачи:

1. Провести анализ научно-технической и нормативной литературы по усилению изгибаемых деревянных элементов, в том числе, с использованием композитного материала. Результаты анализа представлены в трудах [10, 11].

2. Разработать программу и методику эксперимента, провести натурные испытания деревянных балок, усиленных углепластиком. Результаты физического эксперимента представлены в трудах [11, 12]. В работе [11] приведены результаты исследования прочности деревянных балок, усиленных композитным материалом, в работе [12] представлены результаты исследования деформативности.

3. Разработать методику численного моделирования композитной конструкции. Провести конечно - элементное исследование в ПК «ANSYS». Выполнить оценку достоверности методики моделирования путем сравнения результатов численного исследования с результатами физического эксперимента. Решению данной задачи посвящена наша работа.

Моделирование деревянных балок, усиленных композитным материалом на основе углеволокна, выполняется в ПК «ANSYS». Применение ПК «ANSYS» при моделировании деревянных балочных

конструкций рассмотрен в работе [13]. При этом, призматический объём моделирующий деревянный изгибаемый элемент, разбивается на объёмные конечные элементы типа Solid-186, 20-ти узловой второго порядка. При моделировании свойств материалов для древесины принималась билинейная ортотропная модель с модулем условной текучести 31,2 МПа и модулем упрочнения 1,7 ГПа, для моделирования углепластика принималась линейная ортотропная модель. В качестве статической схемы принималась однопролетная шарнирно опертая балка с двухточечной схемой приложения нагрузки в третях пролета. Решение проводилось итерационным образом, равномерными приращениями по 1/50 нагрузки. Общий вид расчетной модели в ПК “ANSYS” представлен на рисунке 1.

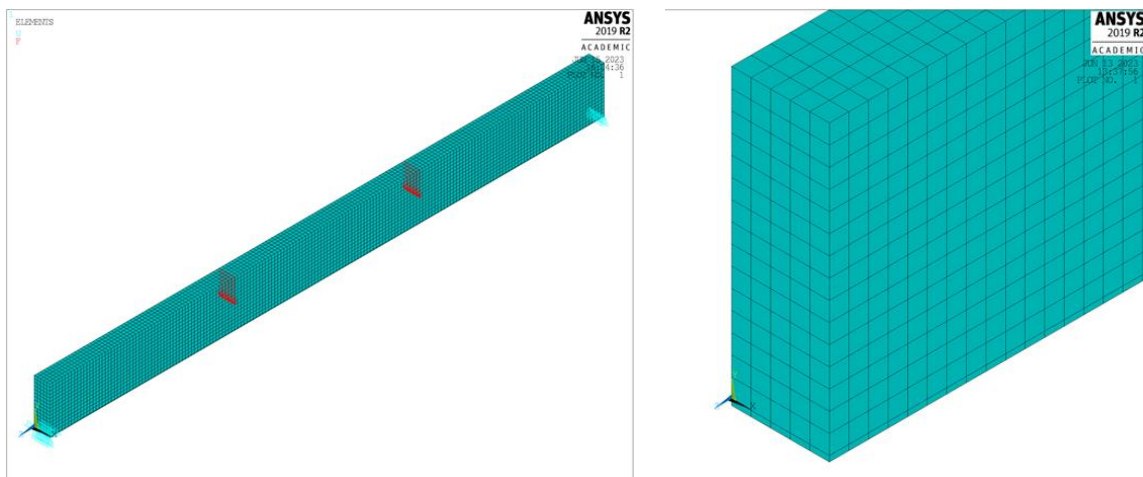


Рис. 1. – Общий вид расчетной модели в ПК “ANSYS”

Для моделирования свойств древесины использовалась билинейная диаграмма деформирования по типу модели Vazan [14] с начальным модулем упругости и вторичным модулем разупрочнения. Общий вид диаграммы деформирования древесины представлен на рисунке 2.

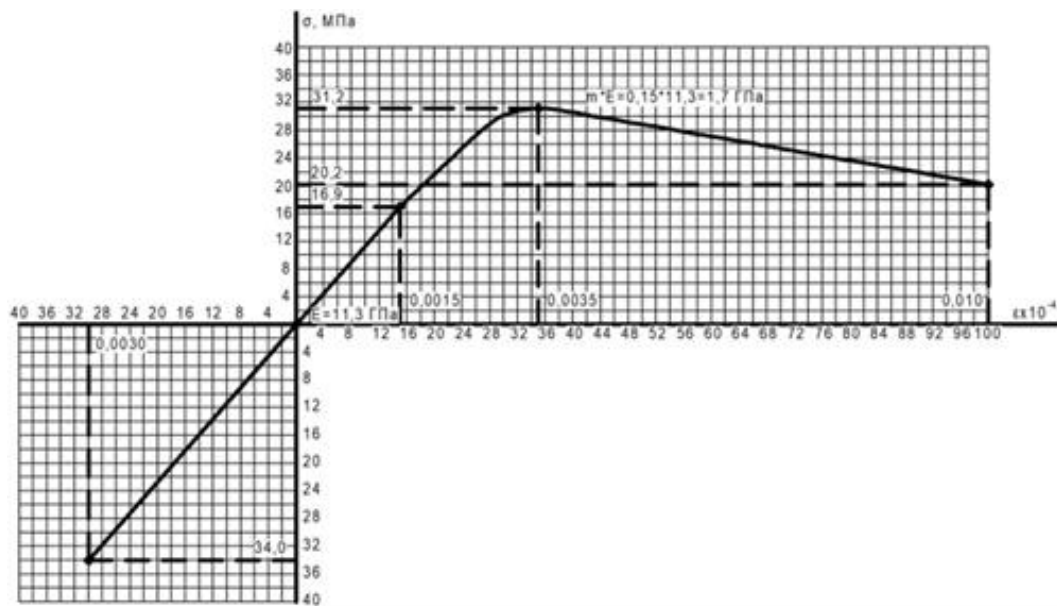


Рис. 2. – Диаграмма моделирования древесины. Модель Vazan.

По результатам численного моделирования были получены изополя осевых деформаций и изополя прогибов деревянной балки, усиленной композитным материалом на основе углеволокна. Изополя осевых деформаций представлены на рисунке 3. Изополя прогибов представлены на рисунке 4.

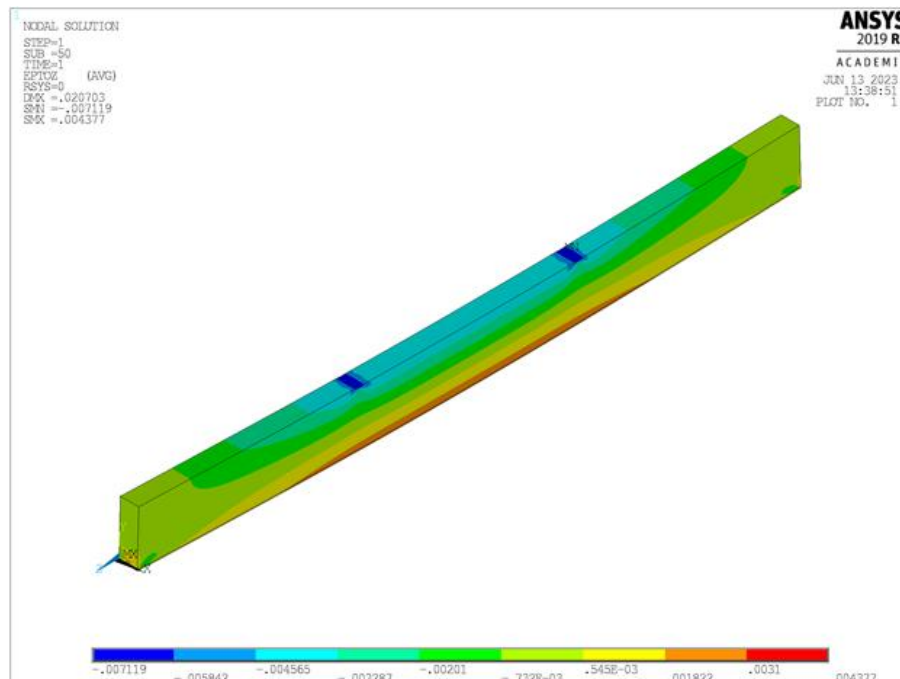


Рис. 3. – Изополя осевых деформаций

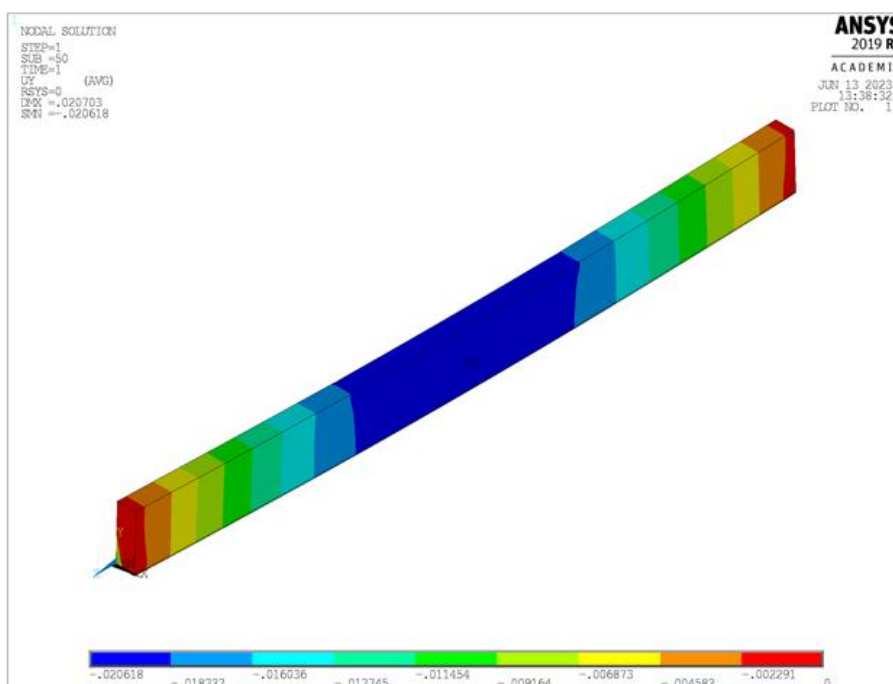


Рис. 4. – Изополя прогибов балки

С целью выполнения оценки достоверности принятой методики моделирования, выполнялось сравнение результатов численного исследования с результатами экспериментальных данных. Результаты сравнения осевых деформаций древесины в крайних волокнах древесины поперечного сечения приведены в таблице 1. Результаты сравнения прогибов в середине пролета балки приведены в таблице 2.

Таблица № 1

Осевые деформации крайних волокон древесины поперечного сечения в середине пролета балки

Нагрузка, P, кН	Осевые деформации сжатия древесины, $\epsilon_c \times 10^{-4}$			Осевые деформации растяжения древесины, $\epsilon_p \times 10^{-4}$		
	Эксперимент	ANSYS	Разница, %	Эксперимент	ANSYS	Разница, %
1	2	3	4	5	6	7
0	0	0,00	0	0	0,00	0
3.0	-4.80	-6.00	20.0	3.00	3.47	13.5
4.5	-7.50	-9.00	16.7	4.73	5.20	9.0
6.0	-10.35	-12.00	13.8	6.18	6.93	10.8

1	2	3	4	5	6	7
7.5	-13.20	-15.00	12.0	7.73	8.66	10.7
9.0	-15.90	-18.00	11.7	9.39	10.40	9.7
10.5	-18.50	-20.99	11.9	11.39	12.13	6.1
12.0	-21.00	-23.99	12.5	13.01	13.86	6.1
13.5	-23.60	-26.99	12.6	15.04	15.59	3.5
15.0	-26.20	-29.37	10.8	16.74	17.33	3.4
16.5	-28.70	-32.40	11.4	18.55	19.08	2.8
18.0	-31.20	-35.49	12.1	20.29	20.85	2.7
19.5	-33.80	-38.62	12.5	22.70	22.62	0.4
21.0	-36.40	-41.78	12.9	24.34	24.39	0.2

Таблица № 2

Прогиб балки в середине пролета

№ ступени загрузки	Нагрузка, Р, кН	Прогиб балки в середине пролета, f, мм		
		Эксперимент	ANSYS	Разница, %
0	0	0.00	0.00	0.00
1	3.0	1.36	2.72	50.00
2	4.5	2.73	4.07	32.92
3	6.0	3.66	5.44	32.72
4	7.5	4.67	6.80	31.32
5	9.0	6.11	8.16	25.12
6	10.5	7.44	9.52	21.85
7	12.0	8.78	10.88	19.30
8	13.5	10.22	12.24	16.50
9	15.0	11.80	13.61	13.30
10	16.5	13.38	14.99	10.74
11	18.0	14.96	16.38	8.67
12	19.5	17.49	17.79	1.69
13	21.0	19.72	19.20	2.71

По данным таблицы построены графики зависимости прогибов, а также значений осевых деформаций в крайних волокнах древесины от величины действующей нагрузки для значений экспериментальных данных и результатов численного моделирования. Графики зависимости осевых деформаций представлены на рисунке 5. Графики зависимости осевых деформаций представлены на рисунке 6.

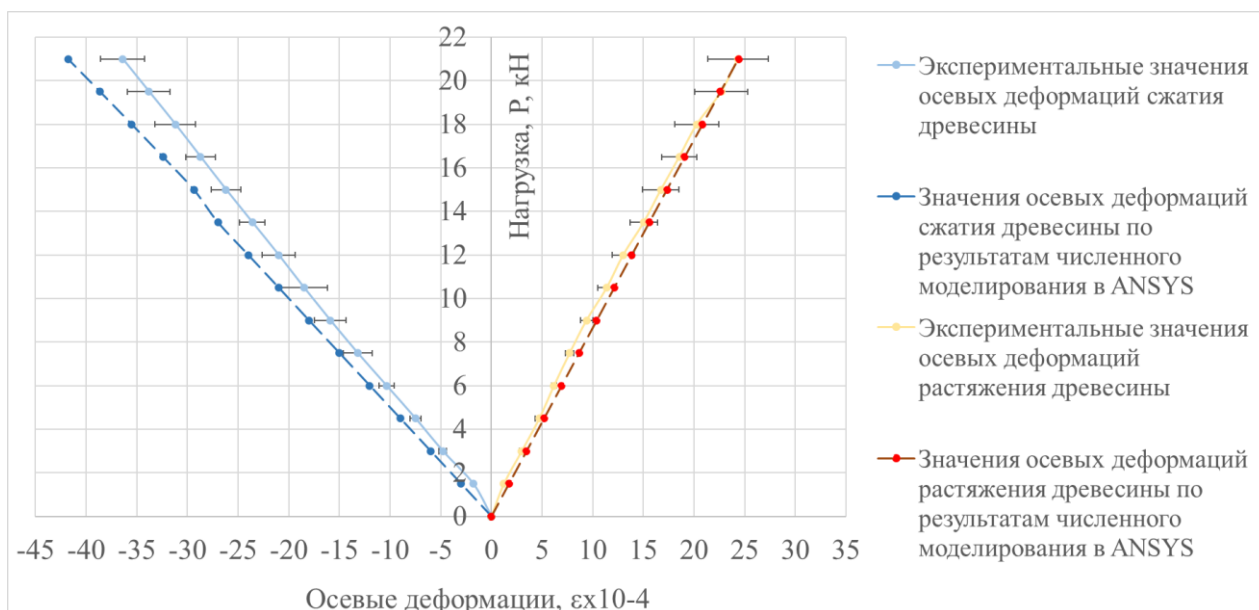


Рис. 5. –График зависимости осевых деформаций крайних волокон древесины от действующей нагрузки

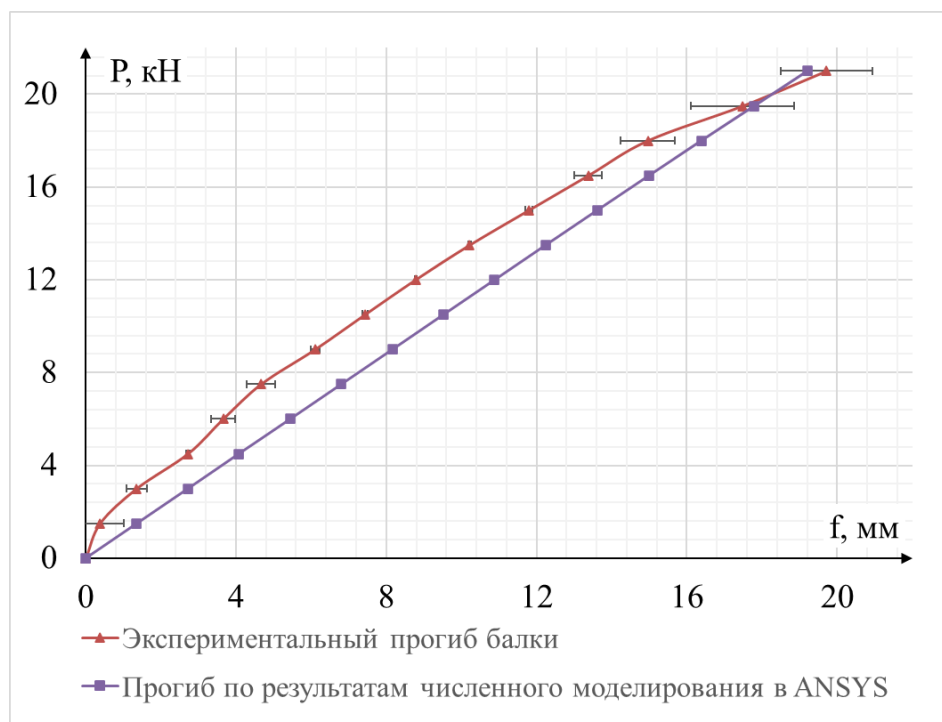


Рис. 6. –График зависимости прогибов в середине пролета балки от действующей нагрузки

По результатам численных исследования деревянных балок, усиленных композитным материалом на основе углеволокна, были сделаны следующие выводы:

1. При моделировании НДС деревянных балок, усиленных композитным материалом на основе углеволокна, целесообразно применять билинейные диаграммы деформирования материалов с разупрочнением;

2. Экспериментальные значения осевых деформаций древесины дают высокую сходимость с результатами численного моделирования в ПК “ANSYS”. Разница в результатах наблюдается только на начальных этапах нагружения, при незначительной величине нагрузки, прикладываемой на балку;

3. Значения прогибов в середине пролета балки, полученных экспериментальным путем, дают высокую сходимость с результатами численного моделирования в ПК “ANSYS”. Разница в результатах наблюдается только на начальных этапах нагружения, при незначительной величине нагрузки, прикладываемой на балку.

Литература

1. Kuzina, E., Rimshin, V. Experimental and Calculated Evaluation of Carbon Fiber Reinforcing for Increasing Concrete Columns Carrying Capacity. E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, EDP Sciences. 2019. №97. P. 04007. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/20199704007.

2. Granovsky, A., Simakov O., Dzhamuev, B. The FRP and TRC Strengthening of the Masonry Structures. E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, EDP Sciences. 2019. № 97. P. 02041. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/20199702041.



3. Михаськин В.В. Влияние динамических нагрузок на усталостную прочность стальных балок, усиленных углепластиком // Строительные материалы и изделия. 2023. №2. С. 35-46. URL: doi: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-35-46.

4. Бормотина А.М., Щелокова Т.Н. Усиление деревянных конструкций углеволокном при реконструкции объектов на примере историко-архитектурного музея-заповедника "Кижы" // Инженерный вестник Дона, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7547.

5. Потапова Т.В. К вопросу об усилении эксплуатируемых деревянных конструкций композитными материалами // Инженерный вестник Дона, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7533.

6. Lukin M., Prusov E., Roshchina S. Multi-Span composite timber beams with rational steel reinforcements // Buildings. 2021. №11 (2). pp. 1–12. URL: doi.org/10.3390/buildings11020046.

7. Thongchom C., Van C.N., Lai V.Q., Keawsawasvong S., Mathuros A. Flexural performance of timber beams reinforced with glass fiber reinforced polymer rods // Springer, Cham. 2022. Vol. 567. pp. 201–209. URL: doi.org/10.1007/978-3-031-19694-2_18.

8. Линьков Н.В. Статистический анализ деформативности соединения "КМ-обклейка" на основе стеклоткани полотняного переплетения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 2(380). С. 169-174. URL: ttp.ivgpi.com/?page_id=13344.

9. Инжутов И.С., Жаданов В.И., Бахарева Н.А., Мельников П.П. Исследование напряженно-деформированного состояния в узле деревянной клееной большепролетной конструкции с использованием углеволокна // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 12-17. URL: pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2017&v=11.

10. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Лобов Д.М., Тихонов А.В. Анализ методов расчета деревянных изгибаемых элементов, усиленных углеродным волокном // Региональная архитектура и строительство. 2014. №4. С. 97-104. URL: library.pguas.ru/xmlui/handle/123456789/2325.

11. Klyuev S.; Lobov D. External reinforcement of wooden beam structures with carbon fiber composite materials // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. № 4(109). Article No 10911. doi: 10.4123/CUBS.109.11.

12. Klyuev S.V., Lobov D.M. Deformativity of wooden beam structures strengthened of external reinforcement of composite materials based on carbon fiber // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol 436. pp. 192-200. URL: doi.org/10.1007/978-3-031-44432-6_25.

13. Шорстов Р.А., Языев С.Б., Чепурненко А.С., Ключев А.В. Устойчивость плоской формы изгиба деревянных балок прямоугольного сечения при раскреплении растянутой от изгибающего момента кромки // Строительные материалы и изделия. 2022. №4. С. 5-18. doi: 10.58224/2618-7183-2022-5-4-5-18.

14. BAZAN I.M. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirement for the degree. Nova Scotia Techniical College, 1980. 298 p.

References

1. Kuzina, E., Rimshin, V. (2019) Experimental and Calculated Evaluation of Carbon Fiber Reinforcing for Increasing Concrete Columns Carrying Capacity. E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, EDP Sciences, 97, 04007. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/20199704007.

2. Granovsky, A., Simakov O., Dzhamuev, B. (2019) The FRP and TRC Strengthening of the Masonry Structures. E3S Web of Conferences: 22nd



International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, EDP Sciences, 97, 02041. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/20199702041.

3. Mixas`kin V.V. Stroitel`ny`e materialy` i izdeliya, 2023, №2, pp. 35-46. URL: [doi: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-35-46](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-35-46).

4. Bormotina A.M., Shhelokova T.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7547.

5. Potapova T.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7533.

6. Lukin M., Prusov E., Roshchina S. Multi-Span composite timber beams with rational steel reinforcements // Buildings. 2021. №11 (2). pp. 1–12. URL: doi.org/10.3390/buildings11020046.

7. Thongchom C., Van C.N., Lai V.Q., Keawsawasvong S., Mathuros A. Flexural performance of timber beams reinforced with glass fiber reinforced polymer rods // Springer, Cham. 2022. Vol. 567. pp. 201–209. URL: doi.org/10.1007/978-3-031-19694-2_18.

8. Lin`kov N.V. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Tekhnologiya tekstil`noj promy`shlennosti, 2019, №2 (380), pp. 169-174. URL: [ttp.ivgpu.com/?page_id=13344](http://ivgpu.com/?page_id=13344).

9. Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Baxareva N.A., Mel`nikov P.P. Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo, 2017, №11, pp. 12-17. URL: pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2017&v=11.

10. Kricin A.V., Lixacheva S.Yu., Lobov D.M., Tixonov A.V. Regional`naya arxitektura i stroitel`stvo, 2014, №4, pp. 97-104. URL: library.pguas.ru/xmlui/handle/123456789/2325.

11. Klyuev S.; Lobov D. External reinforcement of wooden beam structures with carbon fiber composite materials // Construction of Unique



Buildings and Structures. 2023. № 4(109). Article No 10911. doi: 10.4123/CUBS.109.11.

12. Klyuev S.V., Lobov D.M. Deformativity of wooden beam structures strengthened of external reinforcement of composite materials based on carbon fiber // Lecture Notes in Civil Engineering, Springer. Vol 436. pp. 192-200. URL: doi.org/10.1007/978-3-031-44432-6_25.

13. Shorstov R.A., Yazy`ev S.B., Chepurnenko A.S., Klyuev A.V. Stroitel`ny`e materialy` i izdeliya, 2022, №4, pp. 5-18. doi: 10.58224/2618-7183-2022-5-4-5-18

14. Bazan I.M. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirement for the degree. Nova Scotia Techniical College, 1980. 298 p.