

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.011.1:004

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18

Моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics напряжений и деформаций в клееной деревянной балке, усиленной композитной арматурой

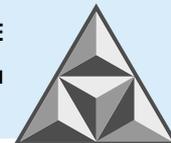
С.В. Цыбакин, А.А. Титунин, Д.Ю. Цветков

Сергей Валерьевич Цыбакин¹, Андрей Александрович Титунин^{1,2,*}, Данил Юрьевич Цветков¹

¹Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Кострома, Российская Федерация

²Костромской государственный университет, Кострома, Российская Федерация

sv44kostroma@yandex.ru, a_titunin@ksu.edu.ru, takensuch@mail.ru*



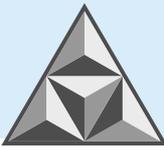
Представлены результаты исследования модели клееной деревянной балки, усиленной композитной арматурой. Для моделирования и изучения напряженно-деформированного состояния пространственных многослойных конструкций из древесины с армированием применяется программный комплекс, использующий метод конечных элементов COMSOL Multiphysics. Основное внимание уделяется анализу напряжений и деформационных характеристик балки под различными нагрузками. Рассмотрены преимущества работы композитной арматуры и ее влияние на повышение прочности и долговечности деревянных конструкций. Отдельно изучается вопрос интеграции экспериментально полученных характеристик древесины и композитных материалов в численную модель, что позволяет повысить точность результатов моделирования. Упрощенная модель древесины как трансверсально-изотропного тела позволяет учесть неопределенности в ориентации к тангенциальному и радиальному направлению в балке. Полученные результаты подтверждают повышение несущей способности и уменьшение деформаций в балке за счет использования композитной арматуры по сравнению с традиционными деревянными конструкциями. Применение 3D-модели клееной балки с композитной арматурой также обеспечивает снижение затрат на проведение исследований при сопоставлении с натурными экспериментами.

Ключевые слова: деревянные клееные балки, армирование деревянных конструкций, композитная арматура, моделирование

Для цитирования:

Цыбакин С.В., Титунин А.А., Цветков Д.Ю. Моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics напряжений и деформаций в клееной деревянной балке, усиленной композитной арматурой // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 8-18.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18

Modelling of stresses and deformations in glued wooden beam with composite reinforcement in COMSOL Multiphysics software package

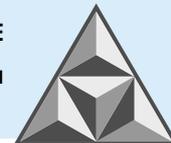
S.V. Tsybakin, A.A. Titunin, D.Yu. Tsvetkov

Sergey V. Tsybakin¹, Andrey A. Titunin^{1,2,*}, Danil Yu. Tsvetkov¹

¹Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russia

²Kostroma State University, Kostroma, Russia

sv44kostroma@yandex.ru, a_titunin@ksu.edu.ru, takensuch@mail.ru*



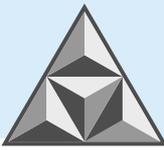
The paper presents the results of the study on a model of a glued wooden beam with composite reinforcement. The authors use a software package using the finite element method COMSOL Multiphysics to model and study the stress-strain state of spatial multilayer wooden structures with reinforcement. The main focus is on analyzing the stress and strain characteristics of the beam under various loads. The paper considers the advantages of composite reinforcement efficiency and its influence on increasing the strength and durability of wooden structures. The authors pay special attention to the integration of experimentally obtained characteristics of wood and composite materials into the numerical model. It increases the accuracy of the modelling results. When constructing the 3D model, we have used a simplified wooden model as a transversal-isotropic body. It allows taking into account uncertainties on orientation to the tangential and radial directions in the beam. The results obtained confirm the increased load carrying capacity and reduced deformations in the beam due to the use of composite reinforcement compared to traditional wooden structures. The use of a 3D model of a glued beam with composite reinforcement also provides reduced research costs compared to in-situ experiments.

Keywords: wooden glued beams, reinforcement of wooden structures, composite reinforcement, modelling

For citation:

Tsybakin S.V., Titunin A.A., Tsvetkov D.Yu. Modelling of stresses and deformations in glued wooden beam with composite reinforcement in COMSOL Multiphysics software package // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 8-18. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18



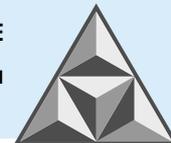
ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение клееных деревянных конструкций в строительстве заметно возросло благодаря их экологичности и эстетическим качествам. Однако для обеспечения долговечности и надежности таких конструкций требуется также повышение механических характеристик, что достигается за счет эффективного армирования. Исследования по вопросам армирования деревянных клееных конструкций ведутся в России и за рубежом с 50-х годов XX столетия. Значимые результаты в области расчета элементов конструкций достигнуты отечественными учеными – В.Ф. Бондиным, Б.В. Лабудиным, В.И. Линьковым, А.А. Погорельцевым, В.И. Римшиным, С.И. Рощиной, В.И. Травушем, С.Б. Турковским, Е.Н. Серовым, А.Г. Черных, О.В. Тюриной и др. [1-3]. При этом в последние годы все чаще используется композитная арматура. Однако многие исследователи отмечают, что перед использованием армированных деревянных конструкций в строительстве необходимо провести натурные испытания и подтвердить их высокую надежность. Такие испытания всегда сопряжены со значительными затратами, которые можно снизить путем моделирования конструкций в программных комплексах с применением метода конечных элементов [4].

Теоретический анализ принципов работы композитной арматуры в клееных деревянных балках создает базу для понимания ключевых моментов исследования и подходов к моделированию. Композитная арматура, изготовленная из стекло- и углепластика, а также на основе базальтового волокна, значительно улучшает прочностные характеристики деревянных конструкций. Эти материалы обладают высокой прочностью на растяжение, устойчивостью к коррозии и низкой теплопроводностью, что идеально подходит для использования в строительстве. Композитная арматура увеличивает несущую способность и жесткость балок, снижает их массу и материалоемкость. Как внешнее, так и внутреннее армирование, при котором композитные материалы клеятся в деревянные элементы, позволяет резко повысить прочностные характеристики и продлить срок службы конструкций [5].

Армирование композитными стержнями снижает концентрацию напряжений и предотвращает трещины, что особенно важно в условиях длительных и циклических нагрузок. Армированные композитами балки демонстрируют значительное увеличение несущей способности и снижение деформативности по сравнению с обычными балками из дерева. Эти результаты подтверждают целесообразность использования композитной арматуры для повышения долговечности и надежности деревянных конструкций. Применение численных методов моделирования, конкретная альтернатива многочисленным материалоемким экспериментам, позволяет выявить оптимальные схемы армирования и параметры конструкции, обеспечить равномерное распределение напряжений и минимальные деформации при сохранении прочностных характеристик [5-9].

В расчетах деревянных клееных конструкций чаще всего применяется упрощенная модель древесины как трансверсально-изотропного тела. Такая модель позволяет учесть случаи неопределенности в ориентации к тангенциальному и радиальному направлению, что связывается с местным искривлением годичных слоев в древесине. Вместе с тем, согласно



многочисленным экспериментальным исследованиям, приложение нагрузок к древесине вызывает не только упругие, но и пластические остаточные деформации. Таким образом, при построении моделей следует учитывать реологические свойства древесины [10-11]. Для моделирования и изучения напряженно-деформированного состояния пространственных многослойных конструкций из древесины с армированием положительно зарекомендовало себя применение программных комплексов, использующих метод конечных элементов. Одним из таких продуктов является COMSOL Multiphysics, имеющий ряд преимуществ [12].

Во-первых, COMSOL позволяет точно учитывать сложные физические взаимодействия между компонентами конструкции, такие как распределение напряжений и деформаций. Во-вторых, программное обеспечение обеспечивает высокую точность расчетов, что дает возможность детально анализировать поведение материалов при различных внешних условиях, в том числе – под различными нагрузками. Кроме того, возможность проведения параметрических исследований и оптимизации конструкции в COMSOL значительно ускоряет процесс разработки и позволяет находить эффективные решения, способствующие повышению прочности и долговечности деревянных балок. Также стоит отметить удобство интеграции результатов моделирования с экспериментальными данными, что способствует повышению достоверности результатов [12].

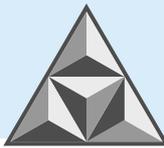
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для анализа внутренних напряжений и деформаций создана 3D-модель клееной балки (сечение 0.10×0.12 м, длина 3.0 м), армированной девятью стержнями из композитного материала.

Для интеграции стержней в численную модель использовали функцию «Line segment». Стержни равномерно распределялись в растянутой зоне балки, что обеспечивало оптимальное распределение нагрузок и улучшение механических характеристик конструкции. В процессе моделирования клееной деревянной балки в программном комплексе COMSOL Multiphysics использовались экспериментальные данные о характеристиках древесины и композитной арматуры, полученные в лаборатории Костромской государственной сельскохозяйственной академии (г. Кострома, Россия).

На рис. 1, 2 представлены отображения этих характеристик в диалоговом окне программного комплекса. Данные касаются различных физико-химических свойств материалов (плотность, модуль упругости, предел прочности при растяжении и сжатии, коэффициент Пуассона и др.) При разработке модели учитывали не только упругие деформации, когда балка возвращалась в исходное состояние после снятия нагрузки, но и пластические деформации, остающиеся после превышения прилагаемой нагрузки определенными значениями.

Таким образом, модель комплексно описывала поведение материалов, что обеспечивало наиболее полное приближение к реальной работе конструкции в различных эксплуатационных условиях.



Material Contents					
Property	Variable	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	650[kg/m...	kg/m ³	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	12.9e9[Pa]	Pa	Young's modulus ai	
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.2	1	Young's modulus ai	
<input checked="" type="checkbox"/> Initial yield stress	sigmags	240e6[Pa]	Pa	Elastoplastic mater	
<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic tangent modulus	Et	12e9[Pa]	Pa	Elastoplastic mater	
Relative permeability	mur_is...	1	1	Basic	
Murnaghan third-order elastic mo...	l	-3.0e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan	
Murnaghan third-order elastic mo...	m	-6.2e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan	
Murnaghan third-order elastic mo...	n	-7.2e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan	
Lamé parameter λ	lambLa...	1.15e11[P...	N/m ²	Lamé parameters	
Lamé parameter μ	muLame	7.69e10[P...	N/m ²	Lamé parameters	

Рис. 1. Характеристики древесины сосны в COMSOL Multiphysics

Fig. 1. Characteristics of pine wood on COMSOL Multiphysics

Material Contents					
Property	Variable	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	2000[kg/...	kg/m ³	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	50[GPa]	Pa	Young's modulus and Poiss...	
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.3	1	Young's modulus and Poiss...	
Relative permeability	mur_iso...	1	1	Basic	

Рис. 2. Характеристики композитной арматуры в COMSOL Multiphysics

Fig. 2. Characteristics of composite reinforcement on COMSOL Multiphysics

Балка, являющаяся ключевым конструктивным элементом, принимает нагрузки от вышележащих конструкций и полезные нагрузки в соответствии с нормами СП 20.13330.2016. «Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85» [13]. В ходе исследований рассматривали вариант использования клееной армированной балки в межэтажном перекрытии с шагом 6.0 м. При этом полезная нагрузка составляла 2.0 кН·м⁻², а нагрузка от вышележащих конструктивных элементов покрытия пола равнялась 1.5 кН·м⁻². Собственный вес балки учитывался в расчетах программного комплекса автоматически. Общая равномерно распределенная нагрузка на балку оценивалась величиной 3.5 кН·м⁻².

Применение COMSOL Multiphysics позволяет более детально анализировать механические свойства материалов при создании модели балки. При этом моделируется не только поведение отдельно взятых материалов (в данном случае – взаимодействие древесины и композитной арматуры), но и оцениваются их прочностные характеристики и деформации. Это дает возможность более точно прогнозировать надежность и долговечность клееной балки в реальных условиях. Разработанная модель позволяет варьировать распределение и величину нагрузок, что крайне важно для обеспечения безопасности конструкции. Такой подход способствует сокращению затрат на проведение исследований и разработку конструктивных параметров балки для заданных условий эксплуатации.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием разработанной модели клееной деревянной балки с композитной арматурой проведен анализ поведения конструкции при действии различных нагрузок. Получены данные по деформациям балки (рис. 3), напряжениям в стержнях (рис. 4) и балке (рис. 5). Результаты представляют собой ключевые показатели, определяющие прочность и устойчивость балки в условиях эксплуатации.

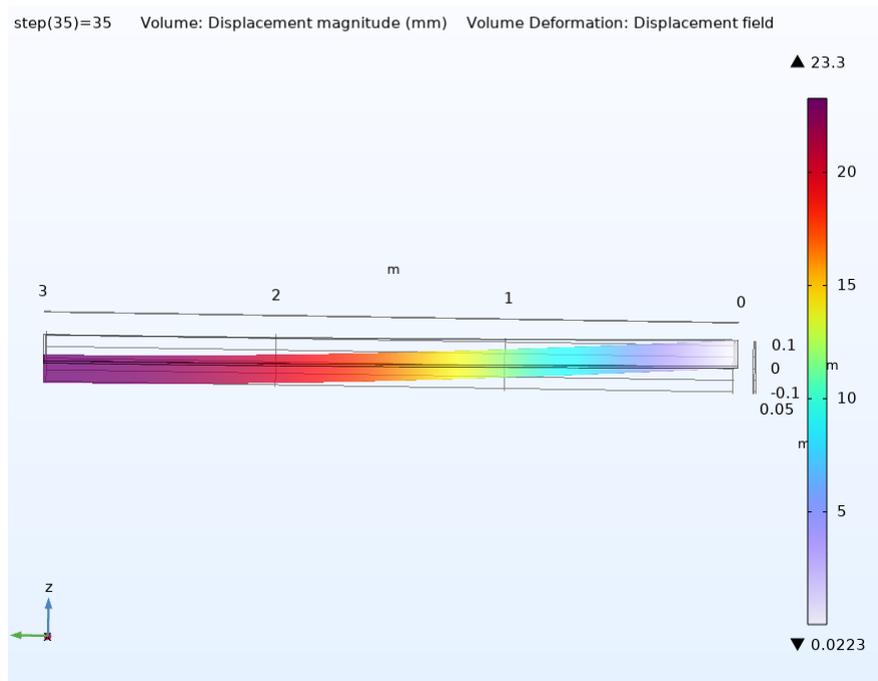


Рис. 3. Деформации клееной деревянной балки с армированием композитной арматурой в COMSOL Multiphysics; ед. изм. – мм

Fig. 3. Deformations of glued wooden beam with composite reinforcement on COMSOL Multiphysics; mm

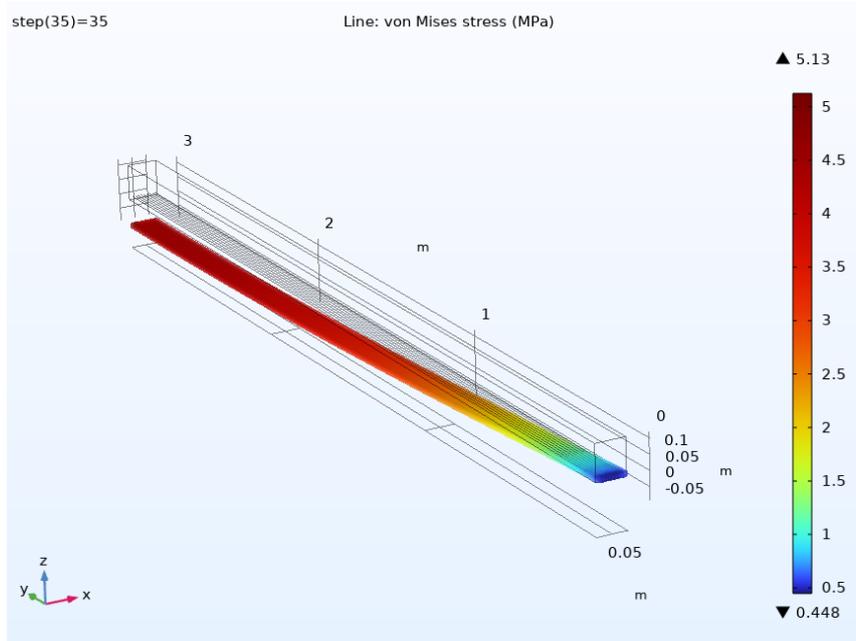


Рис. 4. Напряжения в стержнях композитной арматуры в COMSOL Multiphysics; ед. изм. – МПа

Fig. 4. Stresses in composite reinforcement bars in COMSOL Multiphysics; MPa

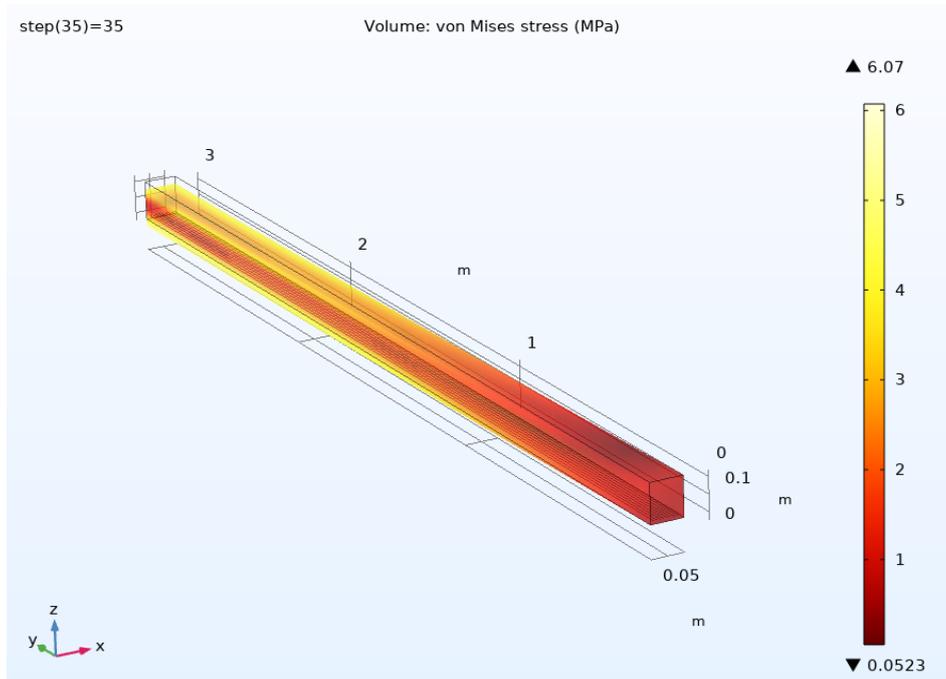
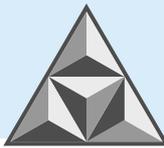


Рис. 5. Напряжения клееной деревянной балки с армированием композитной арматурой в COMSOL Multiphysics; ед. изм. – МПа

Fig. 5. Stresses of glued wooden beam with composite reinforcement on COMSOL Multiphysics; MPa

Согласно результатам моделирования, максимальный прогиб конструкции составляет 23.3 мм, что соответствует требованиям второй группы предельных состояний (не превышает значение в $1/200$ пролета). В стержнях из композитной арматуры обнаружены растягивающие напряжения на уровне 5.13 МПа, и это подчеркивает достаточную прочность для восприятия нагрузок без превышения критических значений. В деревянной балке нами зафиксированы пиковые растягивающие напряжения 6.07 МПа, указывающие на устойчивость материала к возможным деформациям в условиях эксплуатации. Данные подтверждают высокую надежность и долговечность балки и позволяют прогнозировать поведение конструкции при воздействии разнообразных эксплуатационных нагрузок в течение длительного времени.

ВЫВОДЫ

Использование композитной арматуры в клееных деревянных балках способствует значительному повышению механических свойств, увеличению несущей способности конструкции при одновременном снижении материалоемкости конструкций. Композитные стержни, снижая концентрацию напряжений, играют ключевую роль в предотвращении трещин и повышении устойчивости конструкций к длительным и циклическим нагрузкам.

Интеграция экспериментально полученных характеристик материалов в программный комплекс COMSOL Multiphysics позволяет повысить точность результатов моделирования и обеспечивает соответствие модели реальному поведению материалов под нагрузкой. Это значительно сокращает затраты при разработке конструктивных параметров клееной балки с композитной арматурой на этапе экспериментальных исследований. Параметрические исследования и оптимизация, проводимые с использованием COMSOL Multiphysics, ускоряют процесс проектирования и обеспечивают поиск наиболее эффективных решений по повышению прочности и долговечности деревянных балок.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Рощина С.И., Сергеев М.С., Лукина А.В.** Армированные деревянные конструкции // *Изв. высш. учеб. завед. Лесной журнал*. 2013. № 4 (334). С. 80-85.
2. **Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Стоянов В.О.** Исследования составных деревянных балок с наклонно-вкленными связями сдвига из стеклопластиковой арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 2 (76). С. 67-75.
3. **Лабудин Б.В., Тюрина О.Е., Куницкая О.А., Швецова В.В.** Усиление деревянных конструкций композитами // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2022. № 1. С. 18-24.
4. **Бай В.Ф., Еренчинов С.А., Гач Е.А.** Исследование работы деревянной балки, армированной стальными пластинами // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2023. № 2 (104). С. 46-53. DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-46-53.
5. **Рощина С.И., Лукин М.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И.** Расчет композитных деревоклееных балок на основе применения инженерного метода // *Изв. высш. учеб. завед. Лесной журнал*. 2012. № 3 (327). С. 90-94.
6. **Есипов А.В., Лыкова Я.В.** Инженерный метод расчета повышения несущей способности цельнодеревянных балок установкой стержневой арматуры в растянутой зоне // *Академ. вестник УралНИИпроект РААСН*. 2016. № 4 (31). С. 61-65.
7. **Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Калиева М.Х., Манапов Р.М.** Исследования клееных армированных деревянных конструкций // *Наука в цифрах*. 2016. С. 10-13. DOI 10.21661/r-114936.
8. **Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г.** Исследование металлодеревянной балки // *Вестник машиностроения*. 2019. № 12. С. 16-20.
9. **Кавелин А.С., Тютина А.Д., Нуриев В.Э., Колтакова В.А.** Армирование деревянных конструкций // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 8 (59). С. 44-50.
10. **Labudin B., Tyurina O., Mavrin D., Hasan W.** Method for determining the design resistance of a glued-in twisted elliptical bar for pulling out in elements of wooden structures // *Lect. Not. Civ. Eng.* 2022. Т. 182. С. 181-187.
11. **Арленинов Д.К., Беккер Д.А.** Влияние уровня напряжений на ползучесть древесины при изгибе // *Изв. высш. учеб. завед. Лесной журнал*. 2015. № 6 (348). С. 128-137. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.128.
12. Введение в COMSOL Multiphysics, 2018. URL: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf (дата обращения 14.06.2024).
13. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. М.: Стандартинформ, 2018. 95 с.

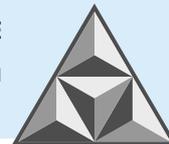
Поступила в редакцию 14.06.2024

Одобрена после рецензирования 11.07.2024

Принята к опубликованию 05.09.2024

REFERENCES

1. **Roshchina, S.I., Sergeev, M.S. and Lukina, A.V.** (2013), "Reinforced Wooden Structures", *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Lesnoj zhurnal [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forestry journal]*, no. 4 (334), pp. 80-85 (in Russian).
2. **Turkovsky, S.B., Pogoreltsev, A.A. and Stoyanov V.O.** (2018), "Study of composite wooden beams with tilt-included relationship bonds from fiberglass fittings", *Stroitel'stvo i rekonstrukciya [Construction and reconstruction]*, no. 2 (76), pp. 67-75 (in Russian).
3. **Labudin, B.V., Tyurina, O.E., Kunitskaya, O.A. and Shvetsova, V.V.** (2022), "Reinforcement of wood structures by composites", *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya [Repair. Restoration. Modernisation]*, no. 1, pp. 18-24 (in Russian).
4. **Baj, V.F., Erenchinov, S.A. and Gach, E.A.** (2023), "Study of the operation of a wooden beam reinforced with steel plates", *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, Construction, Transport]*, no. 2 (104), pp. 46-53 (in Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-46-53.



5. **Roshchina, S.I., Lukin, M.V., Labudin, B.V. and Melekhov, V.I.** (2012), "Design of Composite Laminated Wooden Joists on the Engineering Method Basis", *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Lesnoj zhurnal [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forestry journal]*, no. 3 (327), pp. 90-94 (in Russian).
6. **Esipov A.V., Lykova Ya.V.** (2016), "Engineering method of calculation of increase of bearing capacity of solid wood beams by mounting reinforcement bar in the tension zone", *Akadem. vestnik UralNIIProekt RAASN*, no. 4 (31), pp. 61-65 (in Russian).
7. **Muselemov, Kh.M., Ustarkhanov, O.M., Kalieva, M.Kh. and Manapov, R.M.** (2016), "The research of glued frame-mounted wooden constructions", *Nauka v cifrakh [Science in figures]*, pp. 10-13. 10.21661/r-114936 (in Russian).
8. **Yusupov, A.K., Muselemov, Kh.M., Ustarkhanov, T.O. and Dzhalalov Sh.G.** (2019), "Research of a metal-wooden beam", *Vestnik mashinostroeniya [Russian Engineering Research]*, no. 12, pp. 16-20 (in Russian).
9. **Kavelin, A.S., Tyutina, A.D., Nuriev, V.E. and Koltakova, V.A.** (2019), "Reinforcement of wooden structures", *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Journal of the Don]*, no. 8 (59), pp. 44-50 (in Russian).
10. **Labudin, B., Tyurina, O., Mavrin, D. and Hasan, W.** (2022), "Method for determining the design resistance of a glued-in twisted elliptical bar for pulling out in elements of wooden structures", *Lect. Not. Civ. Eng.*, no. 182, pp. 181-187.
11. **Arleninov, D.K. and Bekker, D.A.** (2015), "Effects of Stress Level on Wood Creep under Bending", *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Lesnoj zhurnal [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forestry journal]*, no. 6 (348), pp. 128-137 (in Russian).
12. Introduction to COMSOL Multiphysics (2018), available at: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf (accessed 14.06.2024). (In Russian).
13. SP 20.13330.2016 (2018), Code of rules. Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85. Moscow: Standartinform (in Russian).

Received 14.06.2024

Approved 11.07.2024

Accepted 05.09.2024