

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕРЕВОКЛЕЕНОЙ БАЛКИ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ СЫРЬЕВОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПОСЛЕ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

NUMERICAL STUDY OF GLUED LAMINATED TIMBER BEAM MADE FROM RAW WOOD AFTER FOREST FIRE

Лесные пожары наносят огромный ущерб экономике страны. Горельники подлежат санитарной вырубке. Однако многие деревья, подвергнувшиеся пожару, сохраняют жизнеспособность в течение нескольких лет. С применением научного обоснования предложено использовать такие деревья в деревоклееных балочных конструкциях. Для конструкций из такой древесины разработана математическая модель. Проведено численное исследование деревоклееной балочной конструкции, выполненной из пиломатериалов сырьевой древесины после лесного пожара. Результаты исследования показывают, что ограничением несущей способности служат максимальные нормальные напряжения в растянутой зоне балки.

Ключевые слова: балка, прочность, напряжения, численные исследования.

Forest fires cause enormous damage to the country's economy. Burnt trees are subject to sanitary felling. However, many trees exposed to fire remain viable for several years. The article considers and scientifically substantiates the proposal for the use of such trees in wood-composite beam structures. A mathematical model has been developed for such wood constructions. There was conducted a numerical study of a wood-composite beam structure made of sawn timber from raw wood exposed to forest fire. As the study results show, the maximum normal stresses in the tensile zone of the beam are the limitation of the bearing capacity.

Keywords: beam, strength, stresses, numerical studies.

Введение

Древесина является традиционным и экологически чистым материалом. Растущую популярность этого строительного материала объясняет широкая сфера его применения: малоэтажное домостроение, малые архитектурные формы, развитие глэмпинга и т. п. [1, 2].

Интенсивные лесные пожары, происходящие в последние годы, приводят к массовым повреждениям миллионов деревьев. Обожженные деревья, лишённые иммунитета, привлекают жука-короеда, который может распространяться и на здоровые деревья (сосны). Насекомые-вредители наиболее активно размножаются на 4–5-й год после пожара, поэтому горельники подлежат санитарной

вырубке [3, 4]. В работах [5, 6], посвящённых изучению остаточных прочностных свойств сырьевой древесины, определено, что часть дерева, нетронутая пожаром, обладает высокими физико-механическими свойствами. Установлено, что такую древесину можно применять для конструктивных целей, особенно комлевую часть дерева [7, 8], которую можно использовать в виде заготовок для ламелей для производства деревоклееных балочных конструкций. Отдельные ламели стыкуют по длине с помощью зубчатого шипа, и, следовательно, балки не будут иметь стыка, ослабляющего сечение.

Оставшуюся часть сырьевой древесины после лесного пожара (срединная и верхняя части дерева) можно использовать

в областях, где не требуется высокая прочность, например, для деревоклееных ограждающих конструкций, щитов опалубки и строительных лесов, палет и тары, производства ДСП.

Актуальность исследования заключается в рациональном и бережном использовании сырьевой древесины после лесного пожара. Применение такой древесины в качестве пиломатериала для несущих и ограждающих деревоклееных конструкций позволит снизить их стоимость и строительства в целом, поскольку такие материалы дешевле традиционных. Предложенная деревоклееная балочная конструкция отличается малой материалоемкостью и низкой себестоимостью.

Ранее были выполнены исследования [9, 10], в ходе которых изучены деревоклееные балки, выполненные с частичным замещением пиломатериалов на пиломатериал из древесины, подвергнувшейся лесному пожару. Технология изготовления таких конструкций описана в работе [11].

В работе [12] экспериментально установлено, что несущая способность балки из стандартного пиломатериала, выполненной с частичным (до 36 %) замещением по всей длине балки в середине сечения на материал, взятый из поврежденного дерева, сопоставима с несущей способностью балки, выполненной из традиционных пиломатериалов. Поэтому в данном исследовании будет рассмотрен численный расчет деревоклеенной балки, полностью выполненной из сырьевой древесины после лесного пожара.

Цель исследования — определить напряженно-деформированное состояние деревоклеенной балочной конструкции, изготовленной из пиломатериалов сырьевой древесины после лесного пожара, и проанализировать ее работу по первой и второй группам предельных состояний. Достижение поставленной цели позволит внедрить в практику проектирования материалы, ранее считавшиеся непригодными для конструкционного применения. Эти решения позволят снизить затраты на строительство и улучшить экологическую ситуацию за счет более рационального использования ресурсов леса.

Методы

Объектом исследования является конечно-элементная модель в виде шарнирно опертой однопролетной балки из трансформированного материала с характеристиками, соответствующими экспериментально определенным прочностным и упругим характеристикам древесины после лесного пожара. На рис. 1 представлена деревоклеенная балка длиной 4,5 м и сечением 450×75 мм. Для проведения натурных испытаний разработана и изготовлена модель балки длиной 3,0 м, сечением 50×300 мм, то есть в масштабе 1 : 1,5.

Наиболее распространенным численным методом, позволяющим изучать сложное напряженно-деформированное состояние анизотропных тел, является метод конечных элементов. В данном исследовании использовался программный комплекс «ЛИРА 10.12».

При выполнении расчета в нелинейной постановке задачи необходимо задать диаграм-

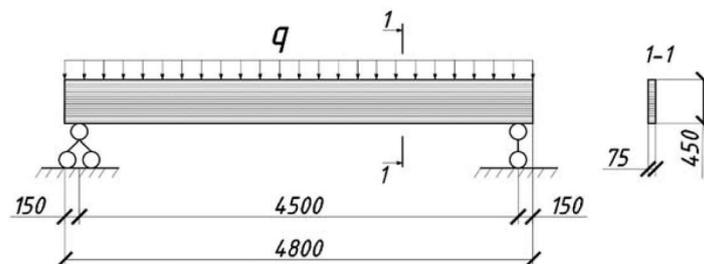


Рис. 1. Расчетная схема деревоклеенной балки

мы деформирования (работы) материалов. В ходе испытаний на образцах [13, 14] были определены механические характеристики: прочность при растяжении и сжатии вдоль волокон, скалывание вдоль волокон и прочность при статическом изгибе сырьевой древесины, подверженной лесному пожару (рис. 2).

Исходные данные для линейного расчета балки: плотность $g = 500 \text{ кг/м}^3$; модуль упругости $E_1 = E_3 = 407,9 \text{ МПа}$; $E_2 = 10,197 \cdot 10^3 \text{ МПа}$; модуль сдвига $G_{12} = 1223 \text{ МПа}$; $G_{13} = G_{23} = 509,9 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu_{12} = \mu_{13} = \mu_{31} = \mu_{32} = 0,5$; $\mu_{21} = \mu_{23} = 0,02$.

Исходные данные для нелинейного расчета балки, выполненной из сырьевой древесины после лесного пожара: плотность $g = 400 \text{ кг/м}^3$; модуль упругости $E_1 = E_3 = 326,3 \text{ МПа}$; $E_2 = 6,526 \cdot 10^3 \text{ МПа}$; модуль сдвига $G_{12} = 1223 \text{ МПа}$; $G_{13} = G_{23} = 509,9 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu_{12} = \mu_{13} = \mu_{31} = \mu_{32} = 0,5$; $\mu_{21} = \mu_{23} = 0,025$.

Модули сдвига и коэффициенты Пуассона экспериментально не были определены, поэтому в первом приближении они приняты стандартными для древесины.

Для расчета неповрежденной древесины как в линейной, так и нелинейной постановке задачи были приняты нормативные характеристики согласно табл. 3 и табл. В1

СП 64.13330.2017. Расчетные сопротивления сосны приняты с учетом коэффициента длительной прочности $m_{дл} = 0,66$. Предельный прогиб ($f_{пред}$) определялся как $l / 150$ согласно СП 20.13330.2016.

Для анализа напряженно-деформированного состояния предложенной деревоклеевой балочной конструкции и деревоклеевой балки из традиционных пиломатериалов был выполнен расчет конечно-элементной модели балок. Расчет производился в статической постановке с учетом физической нелинейности материала древесины.

По результатам расчета построены эпюры распределения напряжений балок (рис. 3) и диаграммы их работы (рис. 4, 5).

Принята следующая маркировка балок:

Б-0 — балка в линейном расчете согласно СП 64.13330.2017;

Б-1 — балка в нелинейном расчете (диаграмма Белянкина–Прагера);

Б-2 — балка в линейном расчете (по испытаниям образцов, взятых из комлевой части сырьевой древесины, подвергшейся лесному пожару);

Б-3 — балка в нелинейном расчете (по испытаниям образцов, взятых из комлевой части сырьевой древесины, подвергшейся лесному пожару).

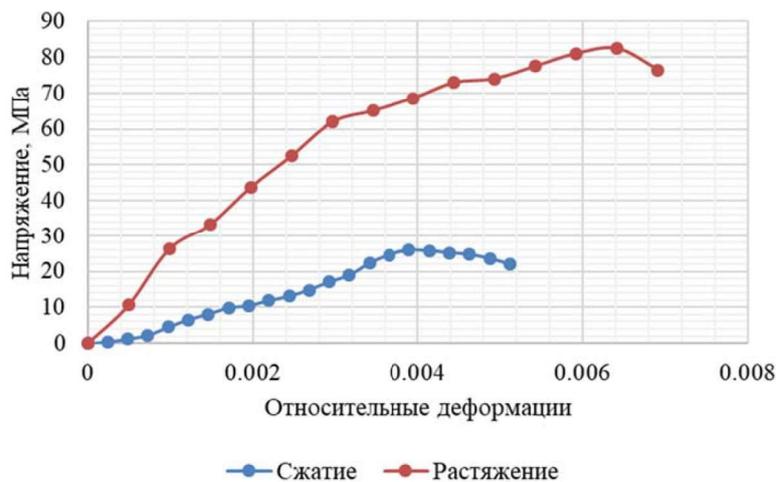


Рис. 2. Диаграммы растяжения и сжатия вдоль волокон сырьевой древесины (комлевая часть), подвергнувшейся лесному пожару [13]

Для численного расчета древесины используются объемные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы: с физически линейными универсальными пространственными свойствами в линейном расчете — КЭ-36 и физически нелинейными в нелинейном расчете — КЭ-236.

Результаты

Прочностные характеристики поврежденной древесины, полученные экспериментальным путем [15, 16], и расчетные математические модели, учитывающие ани-

зотропные свойства материала, позволяют выполнить расчет несущей способности деревянной балки [17, 18].

Диаграммы нормальных и касательных напряжений для моделей балок Б-0...Б-3 представлены на рис. 4.

Диаграммы перемещений для моделей балок Б-0...Б-3 представлены на рис. 5.

Обсуждение

На диаграммах введены ограничения в виде расчетного сопротивления (R^p) и предела прочности при изгибе (R^{pp}). Огра-

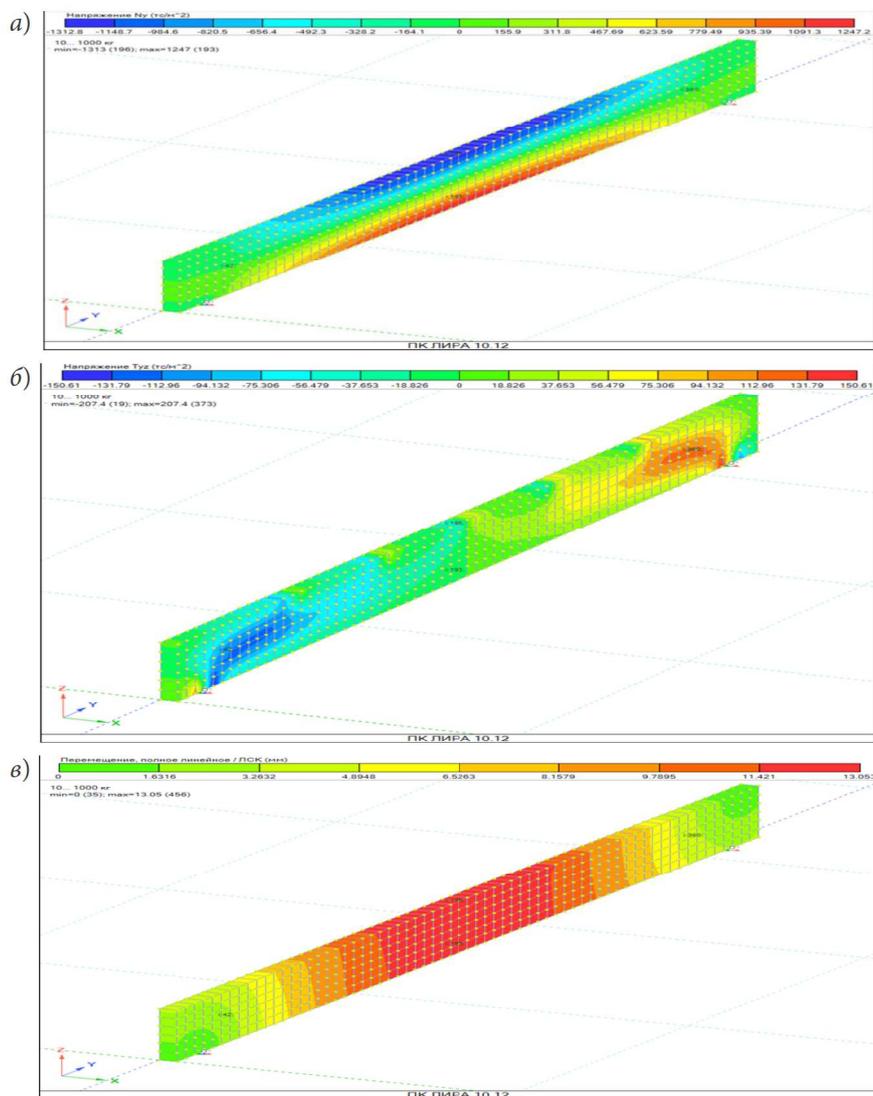


Рис. 3. Изополя напряжений деревокомпозитной балки: а — эпюра распределения нормальных напряжений N_x , тс/м²; б — эпюра распределения касательных напряжений T_{xz} , тс/м²; в — эпюра перемещений z , мм

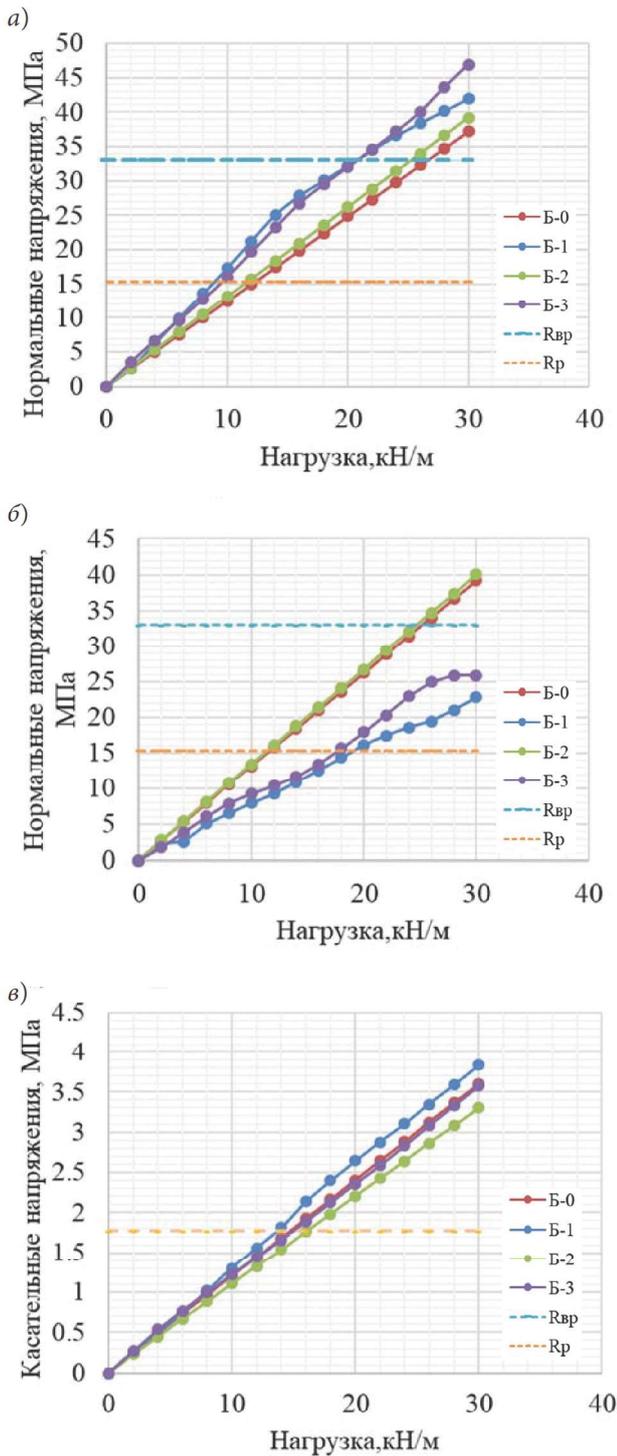


Рис. 4. Диаграммы напряжений (R^{sp} — временная прочность при изгибе; R^p — расчетное сопротивление при изгибе): а — нормальных в пролете балки, растянутая зона; б — нормальных в пролете балки, сжатая зона; в — касательных в оппорной части балки

нителем несущей способности служат максимальные нормальные напряжения в растянутой зоне балки. По полученным диаграммам определено, что в линейном расчете (см. рис. 4, а) расчетные сопротивления деревоклееных балок Б-0 и Б-2 будут достигнуты при нагрузке 11,0 и 10,8 кН/м, а предел прочности — при 23,2 и 23,0 кН/м соответственно. В нелинейной постановке задачи балки Б-1 и Б-3 достигают расчетного сопротивления при нагрузке 9,5 и 10 кН/м (см. рис. 4, а), а предел прочности — при 20,5 кН/м. Разница результатов составляет 2,1 раза.

Различие между результатами линейного и нелинейного расчетов связано с тем, как учитываются свойства материалов и конструкции в процессе нагружения. Линейный расчет предполагает, что материал ведет себя упруго. В таком случае напряжения распределяются равномерно по сечению элемента, и конструкция разрушается, когда максимальное напряжение достигает предела прочности материала. Нелинейный расчет учитывает более сложные процессы, такие как пластические деформации, происходящие в материале конструкции.

Максимальные касательные напряжения в опорной части балки и максимальные нормальные напряжения в середине пролета

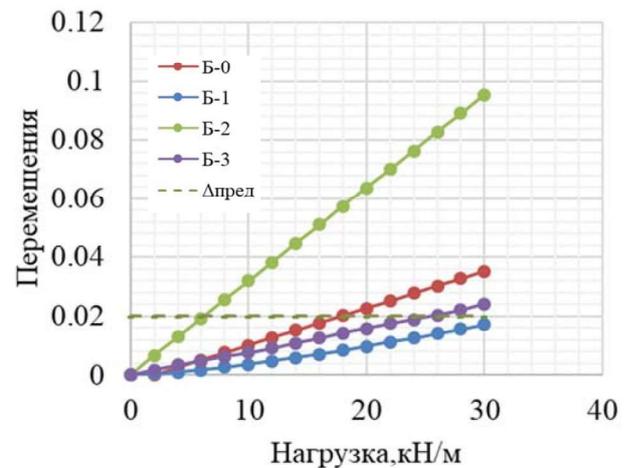


Рис. 5. Диаграмма прогибов

в сжатой зоне балки не достигают нормируемых значений (см. рис. 3, в).

Выводы

В ходе численного исследования определено, что характер напряженно-деформированного состояния предложенной клееной балки сопоставим с таковым у балки, выполненной из традиционных пиломатериалов. Это подтверждает перспективность разработки новых конструктивных решений на основе клееных материалов, выполненных с применением сырьевой древесины после лесного пожара.

Установлено, что разрушение предложенной конструкции будет происходить по первой группе предельных состояний в растянутой зоне. Определены значения разрушающей нагрузки для клееной балки типа Б-3. В линейной постановке задачи эта величина составила 23,1 кН/м, тогда как в нелинейном расчете — 20,5 кН/м. Разница между этими значениями (12,7 %) свидетельствует о необходимости учета нелинейных эффектов при проектировании реальных конструкций.

Комплекс численных и экспериментальных исследований позволит обобщить реологические параметры деформативности клееной конструкции, выполненной с использованием пиломатериалов из древесины после лесного пожара.

Результаты работы открывают возможности для дальнейшей оптимизации клееных конструкций с применением древесных материалов после природных катастроф, что имеет значительный потенциал для развития строительных технологий и сокращения отходов лесопромышленности.

Библиографический список

1. *Muhammad Huzaifa Raza, Svetlana Besklubova, Ray Y. Zhong.* Economic analysis of offsite and onsite 3D construction printing techniques for low-rise buildings: A comparative value stream assessment // *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 89. 104292.

2. *Сахаров Г. П., Стрельбицкий В. П.* Материалы и технологии в малоэтажном строительстве // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2012. № 5 (160). С. 22–27. EDN RDMLXN.

3. *Giddey B. L., Baard J. A., Kraaij T.* Fire severity and tree size affect post-fire survival of Afrotropical forest trees // *Fire Ecology*. 2022. Vol. 18 (5). DOI 10.1186/s42408-022-00128-5/.

4. *Castillo M. E., Garfias R., Plaza Á.* Effects of fire on forest communities and sclerophyllous scrubs in Central Chile as a basis for the formulation of restoration guidelines // *Forestist*. 2021. Vol. 71 (1.) Pp. 9–17. DOI 10.5152/forestist.2020.20042.

5. *Arefyev S. P.* West Siberian Latitudinal Xylomycological Scale and Its Use for Indicating Forest Conditions // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11 (5). Pp. 527–541. DOI 10.1134/S1995425518050037.

6. *Платонов А. Д., Снегирева С. Н., Кантиева Е. В., Киселева А. В.* Влагодолжность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т. 13, № 4.1 (52). С. 191–208.

7. *Губенко Л. А., Хандов М. Г.* Возможность применения низкосортной древесины в клееных деревянных конструкциях // *Строительная наука — XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону: сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., посв. 100-летию со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В. А. Лебедева, В. А. Трулля, Е. И. Светозаровой, Архангельск, 28–30 июня 2016 г.* Архангельск: ООО «Агентство рекламы РАД», 2016. С. 64–68. EDN XDQTWV.

8. *Снегирева С. Н., Платонов А. Д., Киселева А. В., Кантиева Е. В.* Изменчивость твердости древесины сосны, поврежденной сильным низовым и повальным верховым пожаром // *Лесотехнический журнал*. 2021. Т. 11, № 4 (44). С. 79–87.

9. *Kaku C., Hasemi Y., Yasui N., Yasukawa M., Kamikawa D., Kameyama N., Ono T., Koshihara M., Nagao H.* Influence of fire exposure on the mechanical properties of wood — Exposure temperature dependence of Young's modulus and bending strength of *Cryptomeria japonica*, *Larix leptolepis*, *Pseudotsuga menziesii* and *Zelkova serrata* under and after heating // *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2014. Vol. 79 (701). Pp. 1065–1072.

10. *Lukina A., Lisyatnikov M., Lukin M., Vatin N., Roshchina S.* Strength properties of raw wood after a wildfire // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. Vol. 3 (119). 11907.

11. *Мартынов В. А., Лисятников М. С., Лукина А. В., Рощина С. И.* Технология изготовления кле-

еных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огнем воздействием лесного пожара // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 4.1 (52). С. 158–177.

12. Мартынов В. А., Лисятников М. С., Лукина А. В., Рощина С. И. Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 1 (397). С. 168–181.

13. Lukina A., Lisyatnikov M., Martinov V., Kunitskya O., Chernykh A., Roshchina S. *Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood* // Architecture and engineering. 2022. Vol. 7 (3). Pp. 44–52.

14. Лукина А. В., Лисятников М. С., Мартынов В. А., Рощина С. И. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 40–49.

15. Коршаков А. В., Лисятников М. С., Лукин М. В., Рощина С. И. Прочность и деформативность деревянных конструкций, армированных отработанными полотнами ленточных пил // Строительство и реконструкция. 2024. № 1 (111). С. 38–48.

16. Чибрикин Д. А., Лукин М. В., Лукина А. В., Тюрикова Т. В., Рощина С. И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 3 (387). С. 167–178.

17. Коновалов М. А., Козинец Г. Л. Алгоритм разработки расчетной модели деревянного многоэтажного здания // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, № 4. С. 463–475.

18. Черных А. Г., Миронова С. И., Данилов Е. В., Серова Т. А. Влияние деструкторов на динамику накопления повреждений деревянных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 35–43.

References

1. Muhammad Huzaiifa Raza, Svetlana Besklubova, Ray Y. Zhong. Economic analysis of offsite and onsite 3D construction printing techniques for low-rise buildings: A comparative value stream assessment. *Additive Manufacturing*, 2024, vol. 89, 104292.

2. Sakharov G. P., Strel'bitskiy V. P. *Materialy i tekhnologii v maloetazhnom stroitel'stve* [Materials and technologies in low-rise construction]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka – Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*, 2012, no. 5 (160), pp. 22–27.

3. Giddey B. L., Baard J. A., Kraaij T. Fire severity and tree size affect post-fire survival of Afrotropical forest

trees. *Fire Ecology*, 2022, vol. 18 (5). DOI 10.1186/s42408-022-00128-5.

4. Castillo M. E., Garfias R., Plaza Á. Effects of fire on forest communities and sclerophyllous scrubs in Central Chile as a basis for the formulation of restoration guidelines. *Forestist*, 2021, vol. 71 (1), pp. 9–17. DOI 10.5152/forestist.2020.20042.

5. Arefyev S. P. West Siberian Latitudinal Xylomycological Scale and Its Use for Indicating Forest Conditions. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11 (5), pp. 527–541. DOI 10.1134/S1995425518050037.

6. Platonov A. D., Snegireva S. N., Kantieva E. V., Kiseleva A. V. *Vlagoprovodnost' yadrovoy drevesiny sosny, povrezhdennoy sil'nym nizovym i beglym verkhovym pozharom* [Moisture conductivity of pine kernel wood damaged by a strong lower and runaway upper fire]. *Lesotekhnicheskij zhurnal – Forestry Technical Journal*, 2023, vol. 13, no. 4.1 (52), pp. 191–208.

7. Gubenko L. A., Khandov M. G. *Vozможность primeneniya nizkosortnoy drevesiny v kleenykh derevyannykh konstruktivnykh* [The possibility of using low-grade wood in glued wooden structures]. *Stroitel'naya nauka – XXI vek: teoriya, obrazovanie, praktika, innovatsii Severo-Arkticheskomu regionu. Trudy VII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf., posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya uchenykh SPbGASU (LISI) V. A. Lebedeva, V. A. Trullya, E. I. Svetozarovoy, Arkhangel'sk, 28–30 iyunya 2016 goda* [Construction science of the XXI century: theory, education, practice, innovation in the North Arctic region. Proceedings of the VII International scientific and technical conf., dedicated to the 100-th anniversary of the birth of scientists of SPbGASU (LISI) V. A. Lebedev, V. A. Trull, E. I. Svetozarov, Arkhangel'sk, June 28–30, 2016]. *Arkhangel'sk, Agentstvo reklamy RAD Publ.*, 2016, pp. 64–68.

8. Snegireva S. N., Platonov A. D., Kiseleva A. V., Kantieva E. V. *Izmenchivost' tverdosti drevesiny sosny, povrezhdennoy sil'nym nizovym i poval'nym verkhovym pozharom* [The variability of hardness of pine wood damaged by a strong lower and general upper fire]. *Lesotekhnicheskij zhurnal – Forestry Technical Journal*, 2021, vol. 11, no. 4 (44), pp. 79–87.

9. Kaku C., Hasemi Y., Yasui N., Yasukawa M., Kamikawa D., Kameyama N., Ono T., Koshihara M., Nagao H. Influence of fire exposure on the mechanical properties of wood — Exposure temperature dependence of Young's modulus and bending strength of *Cryptomeria japonica*, *Larix leptolepis*, *Pseudotsugamenziesii* and *Zelkova serrata* under and after heating. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2014, vol. 79 (701), pp. 1065–1072.

10. Lukina A., Lisyatnikov M., Lukin M., Vatin N., Roshchina S. Strength properties of raw wood after

a wildfire. *Magazine of Civil Engineering*, 2023, vol. 3 (119), 11907.

11. Martynov V. A., Lisyatnikov M. S., Lukina A. V., Roshchina S. I. *Tekhnologiya izgotovleniya kleenykh derevyannykh konstruksiy s primeneniem drevesiny, povrezhdennoy ognevym vozdeystviem lesnogo pozhara* [Technology for the manufacture of glued wooden structures using wood damaged by the fire effect of a forest fire]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal – Forestry Technical Journal*, 2023, vol. 13, no. 4.1 (52), pp. 158–177.

12. Martynov V. A., Lisyatnikov M. S., Lukina A. V., Roshchina S. I. *Primenenie termicheski povrezhdennoy drevesiny v derevokleenykh balochnykh konstruksiyakh* [The use of thermally damaged wood in wood-glued beam structures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Proceedings of the higher educational institutions. Forestry Journal*, 2024, no. 1 (397), pp. 168–181.

13. Lukina A., Lisyatnikov M., Martynov V., Kunitskaya O., Chernykh A., Roshchina S. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood. *Architecture and Engineering*, 2022, vol. 7 (3), pp. 44–52.

14. Lukina A. V., Lisyatnikov M. S., Martynov V. A., Roshchina S. I. *Prochnost' i deformativnost' syr'evoy drevesiny posle ogneвого vozdeystviya* [Strength and deformability of raw wood after fire exposure]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2022, no. 6 (104), pp. 40–49.

15. Korshakov A. V., Lisyatnikov M. S., Lukin M. V., Roshchina S. I. *Prochnost' i deformativnost' derevyannykh konstruksiy, armirovannykh otrabotannymi polotnami lentochnykh pil* [Strength and deformability of wooden structures reinforced with spent strips of band saws]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2024, no. 1 (111), pp. 38–48.

16. Chibrikin D. A., Lukin M. V., Lukina A. V., Tyurikova T. V., Roshchina S. I. *Chislennoe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya modifitsirovannoy derevyannoy balki* [Numerical study of the stress-strain state of a modified wooden beam]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Proceedings of higher educational institutions. Forest Journal*, 2022, no. 3 (387), pp. 167–178.

17. Konovalov M. A., Kozinets G. L. *Algoritm razrabotki raschetnoy modeli derevyannogo mnogoetazhnogo zdaniya* [Algorithm for developing a design model of a wooden multi-storey building]. *Vestnik MGSU – MGSU Bulletin*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 463–475.

18. Chernykh A. G., Mironova S. I., Danilov E. V., Serova T. A. *Vliyanie destruktory na dinamiku nakopleniya povrezhdeniy derevyannykh konstruksiy* [Influence of destructors on the dynamics of accumulation of damage to wooden structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 3 (92), pp. 35–43.