

Экспериментальное исследование прочности и выносливости клееной древесины на скалывание, сжатие и изгиб

Александр Николаевич Шувалов¹, Олег Александрович Корнев¹,
Владимир Анатольевич Какуша¹, Юрий Алексеевич Жидков¹,
Анна Владимировна Корнилова¹, Валентин Алексеевич Ермаков¹,
Дмитрий Егорович Капустин¹, Максим Владимирович Федоров¹,
Алексей Вячеславович Насоновский²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Сооружения инженерно-транспортной инфраструктуры (СИТИ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время дерево возвращает свои позиции как материал для мостов. За первые десятилетия XXI в. в России доля деревянного мостостроения выросла с 10 до 40 %. Стоимость пролетного строения мостов из клееной древесины на 30–50 % ниже стоимости пролетного строения моста из сборных предварительно напряженных железобетонных конструкций. Актуальной задачей современного мостостроения является расширение области применения клееной древесины для сложных и протяженных конструкций. Для этого необходима актуализация существующих и разработка новых нормативных документов, которая, в свою очередь, невозможна без экспериментальных исследований действительной работы элементов строительных конструкций из клееной древесины.

Материалы и методы. Исследовали предел выносливости образцов из клееной древесины при скалывании вдоль волокон и сжатии поперек волокон, предел выносливости клееных деревянных балок при изгибе, провели контроль остаточной прочности не разрушившихся после циклических испытаний образцов.

Результаты. Статистическая обработка экспериментальных результатов позволила выявить особенности деформирования и разрушения клееной древесины: предел выносливости при циклическом изгибе до 10 раз выше, чем предел выносливости при циклическом скалывании и сжатии, что лишний раз подчеркивает высокий уровень анизотропии материала. Это существенно больше, чем для других строительных материалов.

Выводы. Статические испытания показали практически равномерную линейную работу клееных образцов при испытаниях на сжатие поперек волокон. Анализ разрушений позволил сделать вывод о надежности клеевых соединений. Выявлено, что при увеличении влажности на 1 % прочность уменьшается на 0,4 %. Следовательно, для мостовых конструкций вопросы влагостойкости клееной древесины остаются актуальными. Результаты исследований использованы при разработке проектов национальных стандартов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: клееная древесина, скалывание вдоль волокон, сжатие поперек волокон, предел прочности, выносливость, остаточная прочность, коэффициент асимметрии цикла

Благодарности. НИОКР выполнялись по заказу ООО «Сооружения инженерно-транспортной инфраструктуры» (ООО «СИТИ») в соответствии с договором с Росавтодором во исполнение государственных контрактов № 32/1-2022 и № 33/1-2022. Программа исследований выполнена А.В. Насоновским, главным инженером проекта ООО «СИТИ». Результаты исследований использованы при разработке проектов национальных стандартов ГОСТ Р 71594–2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Проектирование элементов из клееной древесины» и ГОСТ Р 71595–2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Технические требования к несущим элементам из клееной древесины».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шувалов А.Н., Корнев О.А., Какуша В.А., Жидков Ю.А., Корнилова А.В., Ермаков В.А., Капустин Д.Е., Федоров М.В., Насоновский А.В. Экспериментальное исследование прочности и выносливости клееной древесины на скалывание, сжатие и изгиб // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 394–408. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.394-408

Автор, ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Ермаков, ermakov@mgsu.ru.

Experimental study of the strength and endurance of glued timber on shearing, compression and bending

Aleksandr N. Shuvalov¹, Oleg A. Kornev¹, Vladimir A. Kakusha¹, Yuri A. Zhidkov¹,
Anna V. Kornilova¹, Valentin A. Ermakov¹, Dmitrii E. Kapustin¹, Maxim V. Fedorov¹,
Aleksey V. Nasonovskiy²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Engineering and Transport Infrastructure Facilities; St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Nowadays wood is regaining its position as a material for bridges. During the first decades of the 21st century, the share of wooden bridge construction in Russia increased from 10 to 40 %. The cost of a bridge span made of glued laminated timber is 30–50 % lower than the cost of a bridge span made of precast prestressed reinforced concrete structures. Consequently, an urgent task of modern bridge construction is to expand the scope of application of glued laminated timber for complex and extended structures. This requires updating existing and developing new regulatory documents, which, in turn, is impossible without experimental studies of the actual operation of elements of building structures made of glued laminated timber.

Materials and methods. The endurance limit of glued timber specimens during shearing along the fibres and compression across the fibres, the endurance limit of glued timber beams during bending, and control of the residual strength of specimens that did not fail after cyclic testing were studied.

Results. Statistical processing of experimental results allowed us to identify the features of deformation and destruction of glued timber: the endurance limit for cyclic bending is up to 10 times higher than the endurance limit for cyclic shearing and compression, which once again emphasizes the high level of anisotropy of the material. This is significantly more than for other building materials.

Conclusions. Static tests showed practically uniform linear operation of glued specimens during compression tests across the fibres. Analysis of destruction allowed us to draw a conclusion about the reliability of adhesive joints. It was found that with an increase in humidity by 1 %, the strength decreases by 0.4 %. Consequently, for bridge structures, the issues of moisture resistance of glued timber remain relevant. The results of the studies were used in the development of national standards projects.

KEYWORDS: glued laminated timber, shear along the fibres, compression across the fibres, tensile strength, fatigue strength, residual strength, cycle asymmetry coefficient

Acknowledgments. The R & D work was performed by order of Engineering and Transport Infrastructure Facilities LLC in accordance with the agreement with Rosavtodor pursuant to state contracts No. 32/1-2022 and No. 33/1-2022. The research programme was completed by A.V. Nasonovsky, Chief Engineer of the Engineering and Transport Infrastructure Facilities LLC project. The research results were used in the development of national standards projects GOST R 71594–2024 “Public highways. Bridge structures. Design of glued laminated timber elements” and GOST R 71595–2024 “Public highways. Bridge structures. Technical requirements for load-bearing elements made of glued laminated timber”.

FOR CITATION: Shuvalov A.N., Kornev O.A., Kakusha V.A., Zhidkov Yu.A., Kornilova A.V., Ermakov V.A., Kapustin D.E., Fedorov M.V., Nasonovskiy A.V. Experimental study of the strength and endurance of glued timber on shearing, compression and bending. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):394–408. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.394-408 (rus.).

Corresponding author: Valentin A. Ermakov, ermakov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Специфика географического положения российского государства накладывает отпечаток на развитие отечественного мостостроения [1] и применяемые для него материалы. Древесина — один из первых строительных материалов, используемых для строительства мостов. Прочность, гибкость, сравнительная простота обработки с помощью несложных технологий — по совокупности этих свойств у древесины долго не было конкурентов.

В исторических материалах приводятся сведения о мостах, построенных при Ярославе Мудром, Владимире Мономахе, Дмитрии Донском. Задokumentировано, что на Руси деревянные мосты строили

начиная с XI–XII вв.¹ Применялись различные способы постройки мостов: с опорами в виде сруба, городской и бревенчатый настил полотна. Эти конструкции обрабатывались топором, так как пила вошла в употребление только в XVIII в. Изначально мосты возводились лишь в больших городах или в местах, где необходимо организовать переправу войскам. С появлением дорог и развитием торговли мосты разных размеров стали возводиться повсеместно.

Один из старейших сохранившихся деревянных мостов находится в пос. Берёзово — деревянный ряжевый мост через Култычный овраг построен приблизительно в конце XVIII в. (рис. 1, а). Его шири-

¹ Ряжевые мосты Русского Севера. URL: <https://dzen.ru/a/ZDaQHjKOTFKPRrg3>



a



b

Рис. 1. Деревянный мост в пос. Берёзово (Ханты-Мансийский автономный округ) (*a*); мост в д. Измайловская (Архангельская область) (*b*)

Fig. 1. Wooden bridge in the village of Berezovo (Khanty-Mansiysk Autonomous district) (*a*); bridge in the village of Izmailovskaya (Arkhangelsk Region) (*b*)

на — 6 м, длина — 50 м. В настоящее время мост используется только пешеходами. Второй сохранившийся деревянный мост XVIII в. через р. Кена в Архангельской области (рис. 1, *b*) — семипролетный мост «на городнях» — срубленных из дерева и заполненных камнями быках в форме лодок. Длина моста — 126 м. До 90-х годов XX в. ряжевые мосты использовались по назначению. При должном уходе и своевременном ремонте эти деревянные мосты могли стоять веками.

Со времен Петра I в России началось интенсивное мостостроение. Открытый в 1705 г. в Петербурге первый мост города был наплавным, но вместо плотов использовали барки-плашкоуты. Такие мосты строились в Петербурге в XVIII и XIX вв., наиболее примечательным из них был Исаакиевский. Выдающимся достижением мостостроения XVIII в. стал проект первого в мире арочного моста через Неву И.П. Кулибина (рис. 2). Предусматривалось, что деревянная арка с пролетом 300 м перекрывала бы реку. Было сделано три макета, на которых проводились испытания, но ни один из них так и не реализован [2].

Начиная с 50-х годов XX в. древесину начали замещать железобетоном, сталью и чугуном. Но, как показывает анализ статистических данных, за первые десятилетия XXI в. в России доля деревянного мостостроения выросла с 10 до 40 % [3]. По информации государственной службы дорожного хозяйства на территориальных автомобильных дорогах каждый четвертый мост — деревянный.

Больше всего таких сооружений в Читинской области — 947, Архангельской области — 843, в Хабаровском крае — 726, в Республике Саха (Якутия) — 486, Республике Бурятия — 415, в Иркутской области — 448, в Республике Карелия — 383. На федеральных автомобильных дорогах эксплуатируются 82 деревянных моста: в Республике Саха (Якутия) — 42, в Амурской области — 22, в Иркутской области — 4, в Магаданской области — 4, в Еврейской АО — 3, в Калужской области — 2, в Читинской области — 2, в Агинском Бурятском АО — 1, в Республике Бурятия — 1, в Республике Тыва — 1².

За последние годы более двух десятков современных деревянных мостов по всей России спроектировали и построили сотрудники лаборатории деревянных конструкций Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. Кучеренко) [4]. Наиболее значимым из них является мост через МКАД (рис. 3), так как он был первым вантовым деревянным мостом в нашей стране, хотя многие специалисты не верили, что подобную конструкцию можно соорудить из древесины. Но именно она была одобрена конкурсной комиссией по ряду показателей, в том числе и экономических. Сметная стоимость такого моста длиной 105 м оказалась на 20 % ниже,

² Шепотило М. Как деревянному мостостроению в России выйти из кризиса? // ЛЕСПРОМИНФОРМ. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3688>



a



b

Рис. 2. Проект моста И.П. Кулибина
Fig. 2. Project of the bridge by I.P. Kulibin

Рис. 3. Пешеходный мост на 102-м км МКАД
Fig. 3. Pedestrian bridge at 102 km of the Moscow Ring Road



Рис. 4. Мост до обрушения (а) и обрушение деревянного моста (b) у д. Треттен (Норвегия)

Fig. 4. Bridge before collapse (a) and collapse of the wooden bridge (b) near the village of Tretten (Norway)

чем моста длиной 60 м, предложенного австрийской фирмой.

Начиная с 70-х гг. прошлого века сделано несколько попыток использования клееной древесины в отечественном мостостроении. Первый мост из клееной древесины построен в Воронеже [4]. Тогда же «Союздорпроект» занимался строительством автомобильного моста из балок Хотьковского экспериментального завода. Но опыт оказался неудачным из-за нарушений технологии изготовления клееных конструкций². После 1975 г. были удачные попытки в деревянном мостостроении благодаря появлению отрасли промышленного производства клееных деревянных конструкций. ЦНИИСК продолжает работу над применением клееной древесины для строительства в сейсмоопасных районах [5] и для большепролетных сооружений [6]. Вопросам надежности работы клееной древесины посвящен ряд работ [7, 8], в том числе диссертационные исследования [9, 10].

Анализ зарубежных публикаций по исследуемой теме показал, что дерево возвращает свои позиции как материал для мостов, особенно в странах Северной Европы. Это касается не только пешеходных мостов, но и крупных автомобильных мостов для полной транспортной нагрузки. Сегодня эксплуатируется около 200 деревянных мостов [11]. В Швеции построено 817 деревянных мостов между 1994 и 2013 гг.: 501 были пешеходными, 316 — полноценными транспортными. Это составляет примерно 25 % всех мостов, построенных в этот период. Кроме того, с 1995 г. ежегодно строится около 40 деревянных мостов, в основном пешеходных и велосипедных [12].

Тем не менее эксплуатация деревянных мостов пока не обходится без аварий. Обрушение моста в д. Треттен в Норвегии (рис. 4) в августе 2022 г.³ показало значимость повышения качества проектирования и проведения мониторинга состояния конструкции деревянных мостов, методика которого практически отсутствует. Возрождение деревянных мостов также подпитывает исследования в области динамической оценки и требований к удобству обслуживания. Практически все зарубежные работы посвящены динамическому анализу [13–16] и демпфирующим свойствам древесины [17].

По мнению специалистов, обрушение произошло из-за превалирующего внимания к комфорту пользователей и эстетике сооружения в ущерб прочностным характеристикам и отсутствия должного мониторинга состояния конструкции [17]. Актуальных зарубежных исследований по усталостной долговечности (выносливости) в рассматриваемой области практически нет. За исключением исследования [18], в котором описаны полномасштабные испытания двух мостов из клееной древесины, которые не показали никаких признаков усталостного износа на протяжении 500 000 циклов нагрузки AASHTO Fatigue II (эквивалентно 91 году службы), а общая жесткость мостов оставалась постоянной на протяжении всего испытания на усталость. Анализ затрат [18] показал, что стоимость пролетного строения мостов из клееной древесины может быть на 30–50 %

³ Blokkutriving etter overbelasting felte tretten bru / Statens vegvesen. 02.12.2022. URL: <https://www.vegvesen.no/om-oss/presse/aktuelt/2022/12/blokkutriving-etter-overbelasting-felte-tretten-bru/>

ниже стоимости пролетного строения моста из сборных предварительно напряженных железобетонных конструкций.

В российской нормативной документации в соответствии с СП 35.13330.2011⁴ деревянные мосты допускается проектировать на автомобильных дорогах IV и V категорий по ГОСТ Р 52398⁵. Данные категории дорог, согласно ГОСТ Р 52398⁵, характеризуются как дороги обычного типа с одной или двумя полосами движения. При этом длина пролетных строений не оговаривается. Раздел по расчету на выносливость для деревянных мостов в СП 35.13330.2011⁴ отсутствует. Расчет элементов из клееной древесины на выносливость представлен в Пособии по проектированию деревянных конструкций к СНиП II-25-80⁶, который предшествовал СП 64.13330.2017⁷. В СП 64.13330.2017 расчеты на выносливость также отсутствуют. В зарубежных нормативных документах (Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2: Bridges⁸) расчет на выносливость присутствует, но в упрощенной форме. Проверку элементов на усталость проводят, если коэффициент k (ratio for fatigue verification) превышает табличное значение, характерное для видов напряженно-деформированного состояния элементов и соединений.

Таким образом, принимая во внимание мировой и отечественный опыт строительства деревянных мостов, развитие науки и техники, задача расширения области применения клееной древесины для более сложных и протяженных мостовых конструкций является актуальной.

Решение данной задачи невозможно без экспериментальных исследований действительной работы элементов строительных конструкций из клееной древесины.

Определяющей характеристикой материалов в работе мостовых конструкций служит выносливость. В связи с этим настоящее исследование направлено на изучение:

- 1) предела выносливости образцов клееной древесины при скалывании вдоль волокон;
- 2) предела выносливости образцов клееной древесины при сжатии поперек волокон;
- 3) предела выносливости клееных деревянных балок при изгибе;
- 4) контроль остаточной прочности не разрушившихся после циклических испытаний образцов.

⁴ СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*.

⁵ ГОСТ Р 52398–2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования.

⁶ СНиП II-25–80. Деревянные конструкции : утв. постановлением Госстроя СССР от 18.12.1980 № 198.

⁷ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80.

⁸ EN 1995-2:2004 (MAIN). Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2: Bridges.

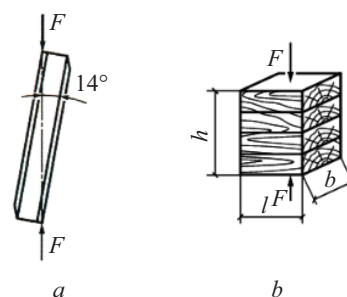


Рис. 5. Схема нагружения образцов: при испытаниях на скалывание вдоль волокон (а); при испытаниях на сжатие поперек волокон (b)

Fig. 5. Specimen loading scheme: during shear tests along the fibres (a); during compression tests across the fibres (b)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Статические испытания образцов клееной деревянной конструкции на скалывание вдоль волокон и сжатие поперек волокон проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 33081–2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Классы прочности элементов конструкций и методы их определения». Схемы нагружения представлены на рис. 5.

Сжимающее усилие F прикладывалось непрерывно с постоянной скоростью нагружения 2 мм/мин. Прочность при скалывании вдоль волокон определялась по формуле:

$$R_{\text{СК}} = F_{\text{СК}} \cdot \frac{\cos 14^\circ}{A_{\text{СК}}},$$

где $F_{\text{СК}}$ — наибольшее усилие, предшествующее разрушению образца; $A_{\text{СК}}$ — площадь скалывания.

Прочность на сжатие поперек волокон $R_{\text{с}(0,90)}$, МПа, вычислялась по формуле:

$$R_{\text{с}(0,90)} = \frac{F_{\text{п.п.}}}{A_{\text{поп}}},$$

где $F_{\text{п.п.}}$ — нагрузка, соответствующая пределу прочности; $A_{\text{поп}}$ — площадь поперечного сечения образца.

Дополнительно для занесения в протокол испытаний непосредственно перед испытаниями осуществлялся контроль влажности в соответствии с ГОСТ 16588–91⁹, а также продолжительность испытаний по их завершении.

По результатам испытаний всех образцов определялось среднее значение прочности в серии образцов, стандартное отклонение и коэффициент вариации.

Так как при сжатии поперек волокон на диаграмме деформирования отсутствует максимум, для установления предела прочности использовалась нагрузка

⁹ ГОСТ 16588–91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности.

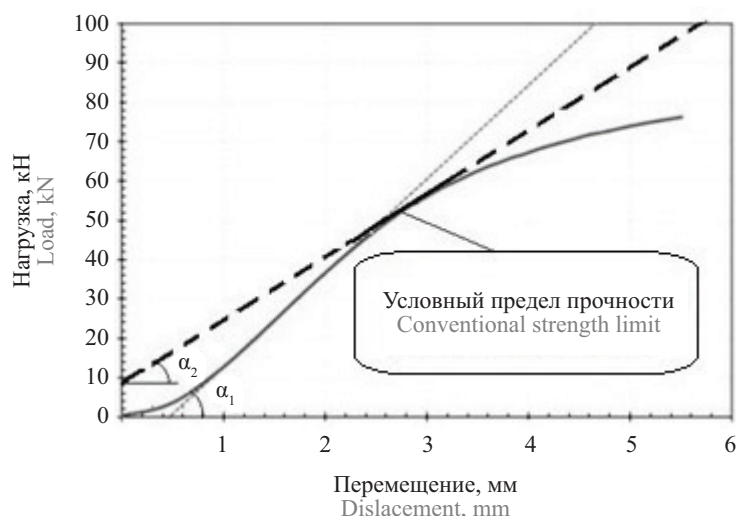


Рис. 6. Пример определения нагрузки, соответствующей условному пределу прочности при сжатии поперек волокон

Fig. 6. Example of determining the load corresponding to the conditional ultimate strength under compression across the fibres

ка, соответствующая условному пределу прочности, определяемая согласно п. 4.1 ГОСТ 16483.11–72¹⁰.

Таким образом, нагрузка, соответствующая условному пределу прочности, устанавливалась по диаграмме сжатия поперек волокон (рис. 6) как ордината точки, в которой отступление от линейной зависимости между нагрузкой и деформацией достигало такой величины, что тангенс угла, образованного осью перемещений и касательной к графику, уменьшался на 50 % своего значения, соответствующего прямолинейному участку графика, т.е. когда отношение $\tan \alpha_2 / \tan \alpha_1$ становилось равным 1,5.

¹⁰ ГОСТ 16483.11–72. Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон.

Усталостные испытания проводились в соответствии с ГОСТ 25.502–79¹¹ на базе $2 \cdot 10^6$ циклов при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0,2$. При этом использовались аналогичные статическим испытаниям образцы и схемы их нагружения (рис. 5). Дополнительно также контролировалась влажность образцов.

В пределах намеченной серии испытаний все образцы нагружались одним способом. Испытания образцов осуществлялись до полного разрушения или до достижения базового числа циклов. В процес-

¹¹ ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

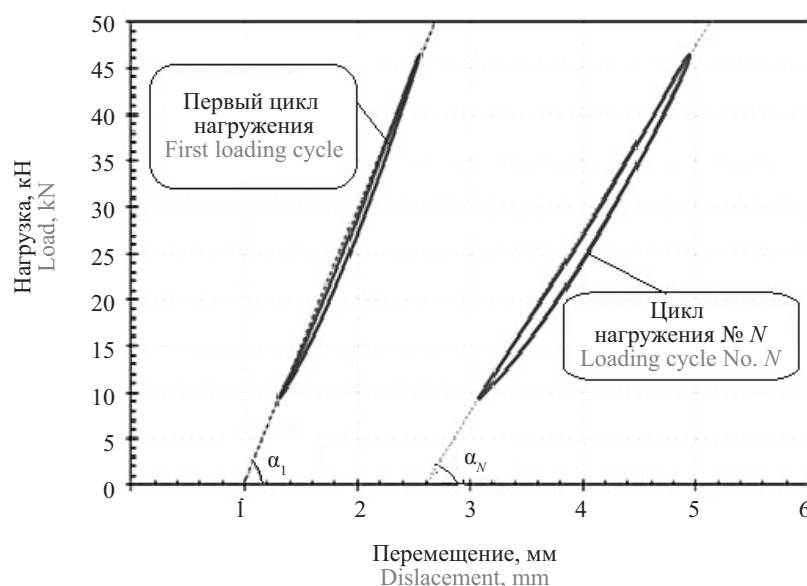


Рис. 7. Схема определения момента наступления критерия разрушения

Fig. 7. Scheme for determining the moment of occurrence of the destruction criterion

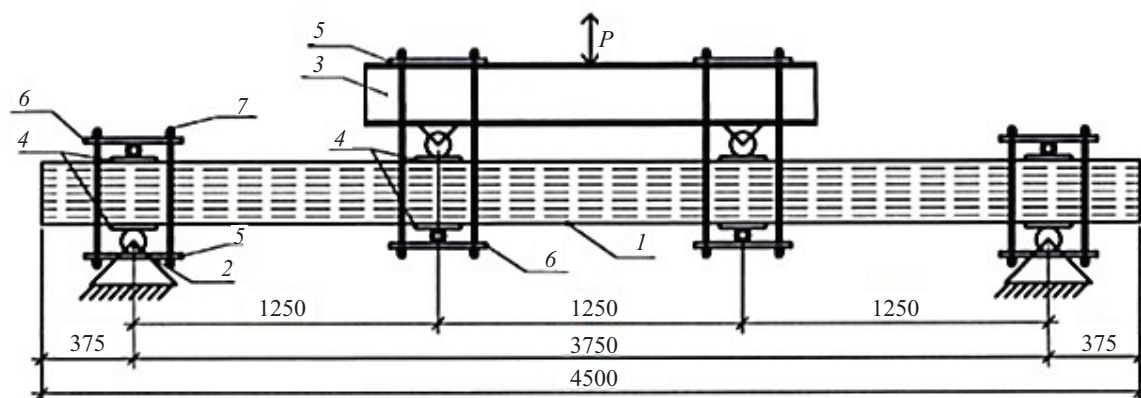


Рис. 8. Схема создания симметричного цикла нагружения: 1 — образец балка (клееная деревянная конструкция); 2 — опорная часть; 3 — траверса; 4, 5, 6 — распределительная пластина; 7 — стяжка

Fig. 8. Scheme of creation of symmetrical loading cycle: 1 — beam sample (glued timber structure); 2 — support part; 3 — crossbar; 4, 5, 6 — distribution plate; 7 — tie

се испытания образцов контролировалась стабильность задаваемых нагрузок.

По результатам испытаний на усталость выполнялись построение кривой усталости и определение предела выносливости.

Основным критерием разрушения при установлении пределов выносливости на скалывание вдоль волокон и построении кривых усталости являлось полное разрушение образцов.

Однако, так как при испытаниях на сжатие разрушение образцов не происходило, в данной работе за критерий условного разрушения при циклическом нагружении принимался момент, когда на диаграмме «нагрузка — перемещение» тангенс угла, образованного осью перемещений и прямой, проведенной между точками с максимальной и минимальной нагрузками цикла, увеличивался на 50 % (рис. 7), т.е. отношение $\tan \alpha_N / \tan \alpha_1$ становилось равным 1,5.

Образцы, выдержавшие 2 млн циклов нагружения без разрушения, подвергались статическим испытаниям для определения остаточной прочности в соответствии с ГОСТ 33081–2014¹².

При проведении научно-исследовательской работы применялось нагружающее и измерительное оборудование: реконфигурируемая система АВРОРА-50019 для испытаний крупноразмерных конструкций на статические и динамические нагрузки с усилием до 1000 кН; напорная серво-гидравлическая машина для статических и динамических испытаний Instron 8802 с максимальной нагрузкой до 250 кН; электронный измеритель влажности Testo 606-1; датчики линейного перемещения SDP-100E.

Усталостные испытания на изгиб при циклическом приложении нагрузки выполнены с двумя ко-

эффициентами асимметрии цикла 0,2 и –1. Схема испытаний при симметричном цикле ($R = -1$) показана на рис. 8. Регистрацию перемещения траверсы осуществляли при достижении следующих циклов нагружения: $1 \cdot 10^3$; $2,5 \cdot 10^3$; $5 \cdot 10^3$; $7,5 \cdot 10^3$; $10 \cdot 10^3$; $15 \cdot 10^3$; $20 \cdot 10^3$; $40 \cdot 10^3$; $60 \cdot 10^3$; $80 \cdot 10^3$; $100 \cdot 10^3$ и далее с шагом $5 \cdot 10^3$ до разрушения либо до базового числа циклов $2 \cdot 10^6$.

Испытания проводились при нормальных условиях окружающей среды, т.е. температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ и относительной влажности воздуха $65 \pm 5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам испытаний построены регрессионные модели и оценена их адекватность экспериментальным данным (табл. 1). В табл. 1 приняты следующие обозначения: Dl — длительность испытания, с; Vl — влажность древесины, %; Pr — экспериментально определенный предел прочности древесины, МПа.

Анализ экспериментальных данных и построенных на их основе регрессионных моделей (рис. 9) позволяет сделать вывод о практически равномерной линейной работе клееных образцов, без скачков и выбросов значений при испытаниях на сжатие поперек волокон (рис. 9, б), о менее равномерной — при испытаниях на скалывание вдоль волокон (рис. 9, а).

Локализация разрушений при статических испытаниях на скалывание вдоль волокон показана на рис. 10.

Анализ диаграммы показывает, что основная часть разрушений при испытаниях на скалывание вдоль волокон приходилась на древесину и клеевое соединение «древесина — сталь» — 67 %, из них 42 % — на разрушение, в котором превалировало разрушение по древесине, остальные разрушения приходились на клеевое соединение (17 и 8 %), что свидетельствует о надежности клеевых соединений.

¹² ГОСТ 33081–2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Классы прочности элементов конструкций и методы их определения.

Табл. 1. Регрессионные модели, связывающие длительность испытаний, влажность и предел прочности образцов
Table 1. Regression models linking test duration, humidity and tensile strength of samples

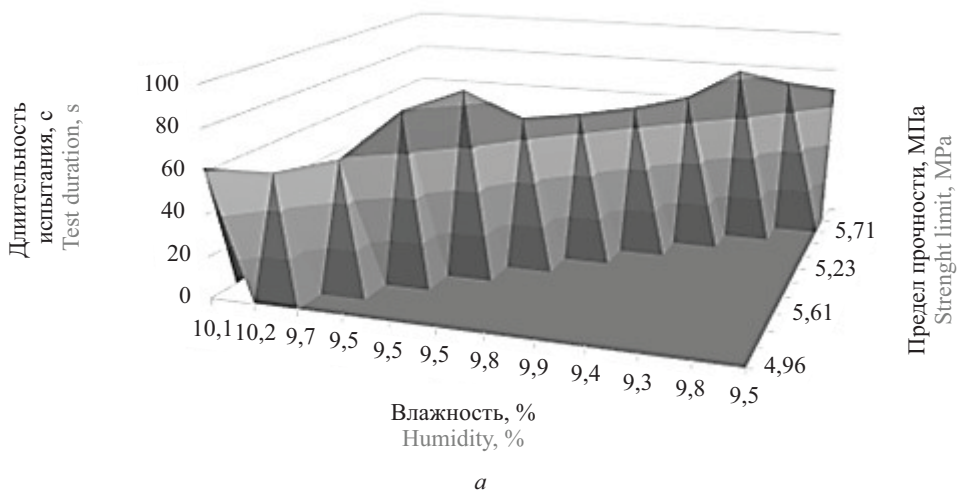
Испытания на скалывание вдоль волокон / Fibre spalling tests	
Испытания на сдвиг вдоль волокон / Shear tests along fibres	
$DI = 0,996 \cdot (14,96 \cdot Pr \cdot 6,53) \cdot (-0,198 \cdot VI + 2,92)$	
Точность аппроксимации Approximation accuracy	
Доверительная вероятность по критерию Фишера Confidence probability according to the Fisher criterion	88,8 %
Коэффициент Тейла / The Tail coefficient	0,089
Ограничения параметров модели Limitations of model parameters	
$49,90 \leq DI \leq 104,60; 9,30 \leq VI \leq 10,2; 4,43 \leq Pr \leq 6,08$	
Испытания на сжатие поперек волокон Compression tests across fibers	
$DI = (16,60 \cdot Pr + 46,27) \cdot (0,01 \cdot VI + 0,89)$	
Точность аппроксимации Approximation accuracy	
Доверительная вероятность по критерию Фишера Confidence probability according to the Fisher criterion	99,3 %
Коэффициент Тейла / The Tail coefficient	0,034
Ограничения параметров модели Limitations of model parameters	
$76,40 \leq DI \leq 99,8; 9,70 \leq VI \leq 11,60; 2,12 \leq Pr \leq 2,92$	

По результатам испытаний на циклическое скалывание вдоль волокон, сжатие поперек волокон, а также циклический изгиб (рис. 8) определялись пределы выносливости образцов (табл. 2) на базе $2 \cdot 10^6$ циклов:

- при скалывании и сжатии с частотой 10 Гц и коэффициенте асимметрии $R = 0,2$;
- при изгибе с коэффициентом асимметрии $R = 0,2$ с частотой от 1,2 до 3 Гц;
- при изгибе с коэффициентом асимметрии $R = -1$ с частотой от 0,4 до 4 Гц.

На рис. 11 приведена графическая зависимость предела выносливости при изгибе от коэффициента

асимметрии цикла. Испытания клееной древесины показали влияние коэффициента асимметрии цикла на усталостные характеристики. Это соответствует аналогичным зависимостям для других материалов. Но обнаружено существенное отличие от поведения металлов и сплавов при циклических испытаниях клееных конструкций. На предел выносливости пре-
валирующее значение оказывает схема нагружения. Предел выносливости при циклическом изгибе до 10 раз выше, чем предел выносливости при циклическом скалывании и сжатии (при одном значении коэффициента асимметрии цикла), что лишний раз подчеркивает высокий уровень анизотропии мате-



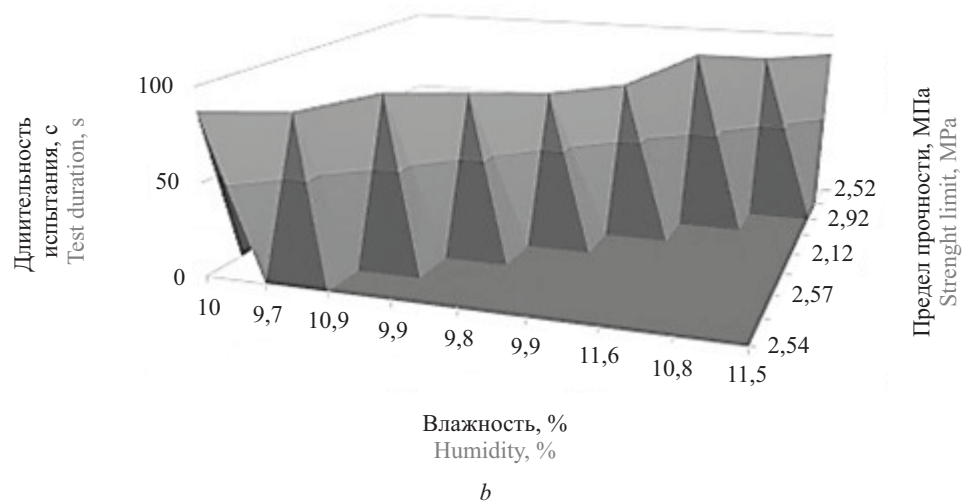
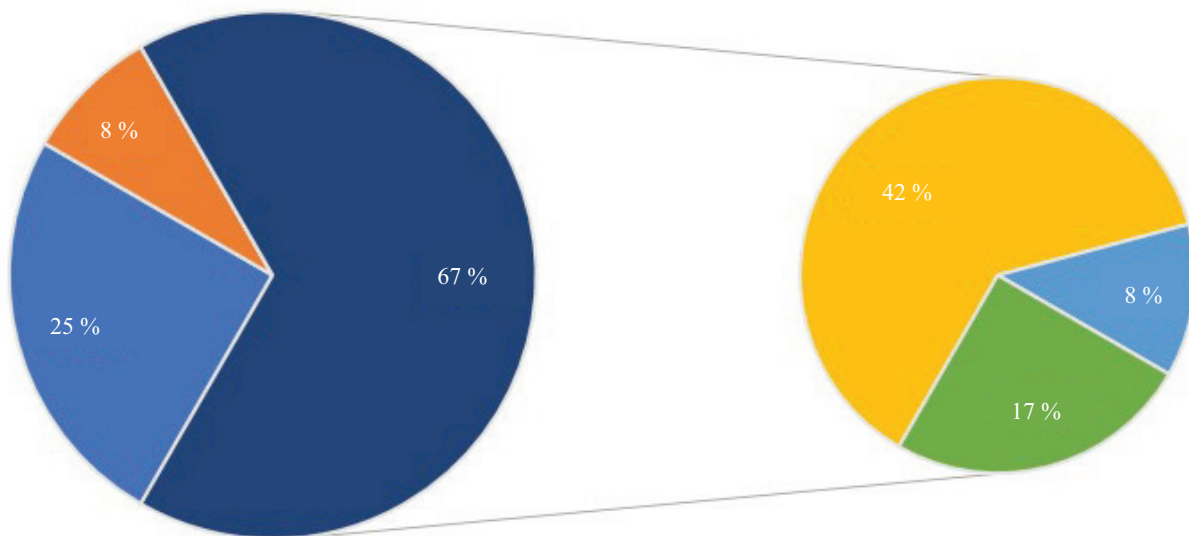


Рис. 9. Зависимость длительности испытаний от влажности и прочности древесины: испытания на скалывание вдоль волокон (a); испытания на сжатие поперек волокон (b)
Fig. 9. Dependence of test duration on moisture content and wood strength: shear tests along the fibres (a); compression tests across the fibres (b)



- Главная диаграмма / Main diagram:
- Разрушение по древесине / Failure in wood
 - Разрушение по древесине и клеевому соединению «древесина – древесина»
Failure in wood and in the adhesive joint “wood – wood”
 - Разрушение по древесине и клеевому соединению «древесина – сталь»
Failure in wood and in the adhesive joint “wood – steel”
- Вторичная диаграмма (относится к разрушению по древесине и клеевому соединению «древесина – сталь»):
Secondary diagram (refers to failure in wood and adhesive joint “wood – steel”):
- Превагирует разрушение по древесине / Failure in wood prevails
 - 50 % разрушение по древесине, 50 % — по клеевому соединению
50 % failure in wood, 50 % in the adhesive joint
 - Превагирует разрушение по клеевому соединению
Failure in the adhesive joint prevails

Рис. 10. Визуализация статистического распределения мест локализации разрушений при статических испытаниях вдоль волокон
Fig. 10. Visualization of the statistical distribution of failure locations during static tests along the fibres

Табл. 2. Пределы выносливости образцов. Испытания вдоль волокон

Table 2. Fatigue limits of samples. Tests along the fibres

Вероятность того, что указанный процент образцов не разрушится, % The probability that a given percentage of specimens will not fail, %	Предел выносливости (усталости) по максимальным напряжениям цикла, МПа Endurance (fatigue) limit for maximum cycle stresses, MPa			
	При скалывании вдоль волокон When chipping along the fibres	При сжатии поперек волокон When compressed across the fibres	При изгибе / When bending	
	$R = 0,2$		$R = 0,2$	$R = -1$
95	1,05	1,49	13,19	8,14
90	1,40	1,51	14,84	8,69
80	1,80	1,56	17,31	9,78

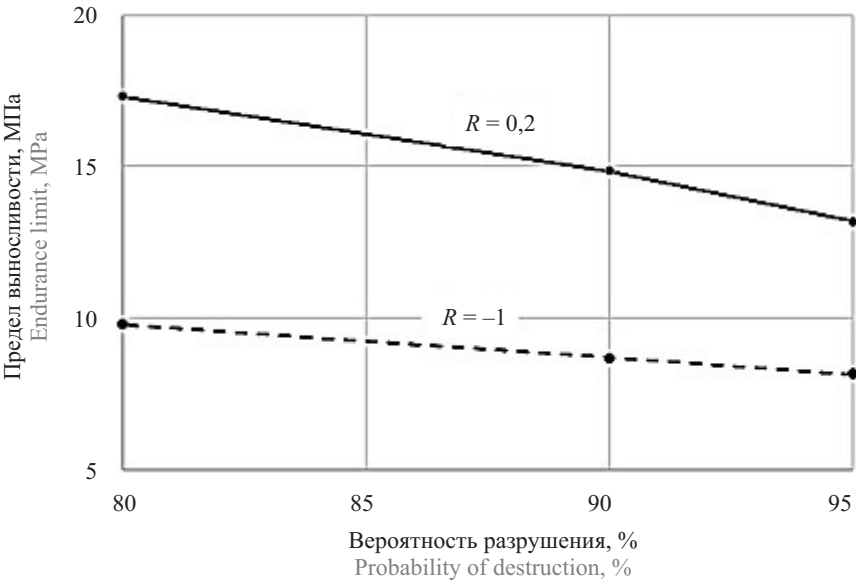


Рис. 11. Зависимость пределов выносливости при циклическом изгибе от коэффициента асимметрии цикла

Fig. 11. Dependence of the fatigue limits under cyclic bending on the cycle asymmetry coefficient



Рис. 12. Типичное разрушение образца при испытаниях на статический изгиб при коэффициенте асимметрии $R = 0,2$

Fig. 12. Typical failure of a specimen during static bending tests with an asymmetry coefficient $R = 0.2$

риала. Для сравнения — для металлов и сплавов эта величина в среднем составляет 1,42 [19].

На рис. 12 представлен образец, разрушившийся в испытаниях на статический изгиб при коэффициенте асимметрии $R = 0,2$.

В работе было проведено определение остаточной статической прочности во всех испытаниях (табл. 3). Сравнение статической прочности образцов, не разрушившихся в усталостных испытаниях,

и первичной выборки образцов, испытанных статически для установления предела прочности, показало, что образцы, не разрушившиеся в циклических испытаниях и после этого статически нагруженные до разрушения, имеют существенно больший разброс прочности (кроме образцов, прошедших циклические испытания с коэффициентом асимметрии $R = -1$). Для анализа применен критерий Стьюдента для несвязных непарных выборок с первичной про-

Табл. 3. Остаточная прочность образцов
Table 3. Residual strength of specimens

Вид испытания Test type	Предел прочности, МПа / Limit strength, MPa							
	Испытания на скалывание вдоль волокон When chipping along the fibres		Испытания на сжатие поперек волокон When compressed across the fibres		Испытания на изгиб / When bending			
					R = 0,2		R = -1	
Статистический параметр Statistical parameter	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens
Среднее значение, МПа Average value, MPa	5,23	5,72	2,46	2,58	33,00	32,14	32,44	24,6
Среднеквадратическое отклонение, МПа Standard deviation, MPa	0,48	0,75	0,25	0,45	3,50	5,41	7,85	5,08
Коэффициент вариации, % Variation coefficient, %	9,09	13,00	10,16	17,56	10,80	16,85	24,20	20,67
$t_{эм} / t_{ем}$	1,774		0,115		0,395		1,842	
$t_{кр} / t_{ср}$	2,110		2,145		1,740		1,740	

веркой выборок на нормальность распределения согласно ГОСТ Р ИСО 5479–2002¹³.

В табл. 3 указаны эмпирические $t_{эм}$ и критерийные значения $t_{кр}$ критерия Стьюдента на уровне значимости 0,05 для двустороннего теста.

Считается, что на принятом уровне значимости при соблюдении условия $t_{эм} \geq t_{кр}$ разница средних значений выборок доказана. В проведенном исследовании этому условию удовлетворяет только выборка образцов, испытанных на циклический изгиб с коэффициентом асимметрии $R = -1$. Следовательно, только при испытании для этого случая можно считать статистически доказанным влияние циклических испытаний на остаточную прочность.

Для оценки влияния влажности на прочность для всех статических экспериментов проводился однофакторный дисперсионный анализ, который показал, что для клееной древесины доверительная вероятность, доказывающая влияние влажности (фактор) на прочность (отклик), составляет не менее 73 %. Средний коэффициент эластичности (величина, пока-

¹³ ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.

зывающая в процентах, насколько уменьшится прочность при увеличении влажности на 1 %) составляет –0,4 %. Это хорошо коррелируется с данными работы [20] о характере влияния влажности на прочностные характеристики древесины при различных видах приложения статической нагрузки: при изгибе, сжатии перпендикулярно и параллельно волокнам с увеличением влажности уменьшаются характеристики прочности древесины. Эти же зависимости характерны и для клееной древесины. Следовательно, весьма актуальны вопросы влагостойкости клееной древесины для изготовления элементов мостовых конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическая обработка экспериментальных результатов позволила выявить несколько специфических моментов, касающихся прочностных характеристик клееной древесины:

1. Предел выносливости при циклическом изгибе до 10 раз выше, чем предел выносливости при циклическом скалывании и сжатии. Это существенно выше, чем для других строительных материалов.

2. При определении остаточной прочности образцов только испытания на циклический изгиб с коэффициентом асимметрии $R = -1$ повлияли на оста-

точную прочность с доверительной вероятностью 95 %. При этом именно эти образцы показали снижение разброса свойств при установлении остаточной прочности. Во всех остальных испытаниях образцы, не разрушившиеся в циклических испытаниях и после этого статически нагруженные до разрушения, имеют существенно больший разброс прочности, что требует дополнительных исследований.

3. Статические испытания показали практически равномерную линейную работу клееных образцов, без скачков и выбросов значений при испытаниях на сжатие поперек волокон и менее равномерную — при испытаниях на скалывание вдоль волокон. Исследование разрушений выявило, что основная их часть при испытаниях на скалывание вдоль воло-

кон приходится на древесину и клеевое соединение «древесина – сталь» с преобладающим разрушением по древесине. С учетом того, что разрушение клеевого соединения происходит по древесине, можно сделать вывод о надежности клеевых соединений.

4. Исследование позволило определить средний коэффициент эластичности (величину, показывающую в процентах, насколько уменьшится прочность при увеличении влажности на 1 %). Она составила –0,4 %. Следовательно, для мостовых конструкций вопросы влагостойкости клееной древесины остаются актуальными.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение выборки исследуемых образцов и условий испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стуков В.П. Развитие деревянных мостов и их применение в условиях Севера // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 316–321. EDN DNPGEN.

2. Соколов А.Ю. Обзор зарубежной и отечественной историографии изучения средневековых деревянных мостов // Актуальная археология 7 : мат. Междунар. науч. конф. молодых ученых. 2024. С. 399–401. EDN XVQPKE.

3. Подъяпольская М.А., Вербицкий И.О., Вербицкая Е.В. Деревянные мосты. Мостостроение с использованием древесины в прошлом и сейчас // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 168–170. EDN QVUMAT.

4. Мищенко Д.С. Обзор деревянного мостостроения в России // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений : сб. науч. тр. 4-й Всеросс. науч.-практ. конф. 2022. С. 363–366. EDN GGUIXY.

5. Погорельцев А.А., Турковский С.Б. Особенности применения клееных деревянных конструкций в сейсмических районах // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 2 (301). С. 31–38. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.2.31.38. EDN YHQJAE.

6. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Стоянов В.О. Опыт эксплуатации большепролетных клееных деревянных конструкций с узлами системы ЦНИИСК // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 6 (305). С. 61–68. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.61.68. EDN EEXUNC.

7. Погорельцев А.А., Турковский С.Б. Линзообразные фермы из клееной древесины: особенности конструкций, испытания, расчет и применение // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 2 (295). С. 62–72. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.2.62.72. EDN RMZBNQ.

8. Масалов А.В., Кабанов В.А., Масалов Н.А. Сопротивление разрушению изгибаемых элементов из клееной древесины // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2–3. С. 229–232. EDN RSFKNL.

9. Уткин В.А. Совершенствование конструкций пролетных строений автодорожных мостов из клееной древесины : дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2009. 233 с. EDN QFETPZ.

10. Кобзев П.Н. Совершенствование конструкции и методики расчета многоребристого пролетного строения моста из клееной древесины с учетом совместной работы перекрестной деревоплиты и балок : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2006. 165 с.

11. Mahnert K.C., Hundhausen U. A review on the protection of timber bridges // Wood Material Science & Engineering. 2018. Vol. 13. Issue 3. Pp. 152–158. DOI: 10.1080/17480272.2017.1403955

12. Fiore A., Liuzzi M.A., Greco R. Some shape, durability and structural strategies at the conceptual design stage to improve the service life of a timber bridge for pedestrians // Applied Sciences. 2023. Vol. 10. Issue 6. P. 2023. DOI: 10.3390/app10062023

13. Hawryszkow P., Biliszczyk J. Vibration serviceability of footbridges made of the sustainable and eco structural material: Glued-laminated wood // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 4. P. 1529. DOI: 10.3390/ma15041529

14. Bergenudd J., Battini J.M., Crocetti R. Dynamic analysis of a pedestrian timber truss bridge at three construction stages // Structures. 2024. Vol. 59. P. 105763. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105763

15. Toyoda A., Honda H., Kato S. Static and dynamic structural performance of modern timber bridges // Journal of JSCE. 2020. Vol. 8. Issue 1. Pp. 26–34. DOI: 10.2208/journalofjsce.8.1_26

16. Garcia-Dieguez M., Racic V., Zapico-Valle J.L. Complete statistical approach to modelling vari-

able pedestrian forces induced on rigid surfaces // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 159. P. 107800. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107800

17. Song Z. Discussion on Human-induced Vibration of Glulam Pedestrian Arch Bridge // *Academic Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 13. Issue 1. Pp. 181–184. DOI: 10.54097/f7kw8d13

18. Tazarv M., Carnahan Z., Wehbe N. Glulam timber bridges for local roads // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 188. Pp. 11–23. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.012

19. Cerda F.C., Goulas C., Sabirov I., Papaefthymiou S., Monsalve A., Petrov R.H. Microstructure, Texture and Mechanical Properties in a Low Carbon Steel after Ultra-fast Heating // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 672. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.056

20. Ermakov V., Stepanova E. Moisture content and its influence on glued timber structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052015. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052015

Поступила в редакцию 29 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 января 2025 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Николаевич Шувалов — кандидат технических наук, доцент кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 737861, Scopus: 7005121558, ResearcherID: MBW-0293-2025, ORCID: 0009-0007-0289-7412; ashuvalov@mgsu.ru;

Олег Александрович Корнев — заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Владимир Анатольевич Какуша — заведующий лабораторией испытаний строительных материалов, изделий и конструкций Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 877806, Scopus: 57204878011, ResearcherID: AER-2849-2022, ORCID: 0000-0001-6524-1313; kakushava@yandex.ru;

Юрий Алексеевич Жидков — инженер лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1169277, ResearcherID: HNC-1653-2022, ORCID: 0000-0001-9283-7702; zhidkovyua@gmail.com;

Анна Владимировна Корнилова — доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 6569-6240, Scopus: 7004499009, ResearcherID: U-3353-2017, ORCID: 0000-0001-5569-9320; kornilovaav@mgsu.ru;

Валентин Алексеевич Ермаков — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; ermakov@mgsu.ru;

Дмитрий Егорович Капустин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru;

Максим Владимирович Федоров — заведующий лабораторией натурных испытаний Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 3288-5373, Scopus: 58805651700, ResearcherID: KGL-6252-2024, ORCID: 0009-0009-9041-2634; FedorovMV@mgsu.ru;

Алексей Вячеславович Насоновский — главный инженер проекта, Проектный отдел искусственных сооружений; **Сооружения инженерно-транспортной инфраструктуры (СИТИ);** 190013, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Семеновский, пер. Подъездной, д. 1, литера А, помещ. 1Н/6Н; aleksey.nasonovskiy@siti.spb.ru.

Вклад авторов:

Шувалов А.Н. — научное редактирование текста.

Корнев О.А. — разработка программы исследований и испытаний.

Какуша В.А. — участие в разработке программы и методики эксперимента, контроль выполнения всех этапов эксперимента, анализ полученных результатов отдельных испытаний.

Жидков Ю.А. — проведение исследования, анализ результатов исследования.

Корнилова А.В. — обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Ермаков В.А. — обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Капустин Д.Е. — проведение экспериментальных исследований.

Федоров М.В. — проведение экспериментальных исследований.

Насоновский А.В. — разработка программы исследований и испытаний, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Stukov V.P. Development of timber bridges and their use in north situations. *Regional aspects of development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastres at the beginning of the III millennium : proceedings of the International scientific and practical conference*. 2019; 316-321. EDN DNPGEH. (rus.).
2. Sokolov A.Yu. Review of foreign and domestic historiography of the study of medieval wooden bridges. *Actual archeology 7 : materials of the international scientific conference of young scientists*. 2024; 399-401. EDN XVQPKE. (rus.).
3. Pod'yapol'skaya M. A., Verbitskiy I.O., Verbitskaya E.V. Bridge construction using wood in the past and now. *Polzunovsky almanac*. 2022; 1:168-170. EDN QVUMAT. (rus.).
4. Mishchenko D.S. Review of wooden bridge construction in Russia. *Innovative methods of designing building structures of buildings and structures : collection of scientific papers of the 4th All-Russian scientific and practical conference*. 2022; 363-366. EDN GGUIXY. (rus.).
5. Pogoreltsev A.A., Turkovsky S.B. Features of application of glulam structures in seismic areas. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2022; 2(301):31-38. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.2.31.38. EDN YHQJAE. (rus.).
6. Turkovskiy S.B., Pogoreltsev A.A., Stoyanov V.O. Experience in the operation of large-span laminated timber structures with TSNIISK system nodes. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2022; 6(305):61-68. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.61.68. EDN EEXUNC. (rus.).
7. Pogoreltsev A.A., Turkovskii S.B. Glued wood lenticular trusses design features, testing, structural analysis and application. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2021; 2(295):62-72. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.2.62.72. EDN RMZBNQ. (rus.).
8. Masalov A.V., Kabanov V.A., Masalov N.A. Fracture toughness of bended elements of glued laminated timber. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2012; 2-3:229-232. EDN RSFKNL. (rus.).
9. Utkin V.A. *Improvement of the structures of superstructures of road bridges made of glued timber : thesis of the degree of doctor of technical sciences*. Omsk, 2009; 233. EDN QFETPZ. (rus.).
10. Kobzev P.N. *Improving the design and calculation methodology of a multi-ribbed span structure of a bridge made of glued laminated timber, taking into account the joint work of a cross-timber slab and beams : thesis of candidate of technical sciences*. Omsk, 2006; 165. (rus.).
11. Mahnert K.C., Hundhausen U. A review on the protection of timber bridges. *Wood Material Science & Engineering*. 2018; 13(3):152-158. DOI: 10.1080/17480272.2017.1403955
12. Fiore A., Liuzzi M.A., Greco R. Some shape, durability and structural strategies at the conceptual design stage to improve the service life of a timber bridge for pedestrians. *Applied Sciences*. 2023; 10(6):2023. DOI: 10.3390/app10062023
13. Hawryszkow P., Biliszczyk J. Vibration serviceability of footbridges made of the sustainable and eco structural material: Glued-laminated wood. *Materials*. 2022; 15(4):1529. DOI: 10.3390/ma15041529
14. Bergenudd J., Battini J.M., Crocetti R. Dynamic analysis of a pedestrian timber truss bridge at three construction stages. *Structures*. 2024; 59:105763. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105763
15. Toyoda A., Honda H., Kato S. Static and dynamic structural performance of modern timber bridges. *Journal of JSCE*. 2020; 8(1):26-34. DOI: 10.2208/journal-ofjsce.8.1_26
16. Garcia-Dieguez M., Racic V., Zapico-Valle J.L. Complete statistical approach to modelling variable pedestrian forces induced on rigid surfaces. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021; 159:107800. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107800
17. Song Z. Discussion on Human-induced Vibration of Glulam Pedestrian Arch Bridge. *Academic Journal of Science and Technology*. 2024; 13(1):181-184. DOI: 10.54097/f7kw8d13

18. Tazarv M., Carnahan Z., Wehbe N. Glulam timber bridges for local roads. *Engineering Structures*. 2019; 188:11-23. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.012
19. Cerda F.C., Goulas C., Sabirov I., Papaefthymiou S., Monsalve A., Petrov R.H. Microstructure, Texture and Mechanical Properties in a Low Carbon Steel after Ultrafast Heating. *Materials Science and Engineering: A*. 2016; 672:108-120. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.056
20. Ermakov V., Stepanova E. Moisture content and its influence on glued timber structures. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052015. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052015

Received November 29, 2024.

Adopted in revised form on January 16, 2025.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S : **Aleksandr N. Shuvalov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 737861, Scopus: 7005121558, ResearcherID: MBW-0293-2025, ORCID: 0009-0007-0289-7412; ashuvalov@mgsu.ru;

Oleg A. Kornev — Deputy Director of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Vladimir A. Kakusha — Head of the Laboratory for Testing Construction Materials, Products and Structures of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 877806, Scopus: 57204878011, ResearcherID: AER-2849-2022, ORCID: 0000-0001-6524-1313; kakushava@yandex.ru;

Yuri A. Zhidkov — engineer of the laboratory for testing building materials, products and structures of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1169277, ResearcherID: HHC-1653-2022, ORCID: 0000-0001-9283-7702; zhidkovyua@gmail.com;

Anna V. Kornilova — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 6569-6240, Scopus: 7004499009, ResearcherID: U-3353-2017, ORCID: 0000-0001-5569-9320; kornilovaav@mgsu.ru;

Valentin A. Ermakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; ermakov@mgsu.ru;

Dmitrii E. Kapustin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru;

Maxim V. Fedorov — Head of the Laboratory of Field Testing at the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 3288-5373, Scopus: 58805651700, ResearcherID: KGL-6252-2024, ORCID: 0009-0009-9041-2634; FedorovMV@mgsu.ru;

Aleksey V. Nasonovskiy — Chief Project Engineer, Design Department of Artificial Structures; **Engineering and Transport Infrastructure Structures**; room H/6H, litera A, 1, Podjezdnoy per., St. Petersburg, 190013, Russian Federation; aleksey.nasonovskiy@siti.spb.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr N. Shuvalov — scientific text editing.

Oleg A. Kornev — development of a research and testing program.

Vladimir A. Kakusha — development of the program and methodology of the experiment, control of the experiment, analysis of the results.

Yuri A. Zhidkov — research and analysis of the results.

Anna V. Kornilova — material processing, article writing, scientific text editing.

Valentin A. Ermakov — material processing, article writing, scientific text editing.

Dmitrii E. Kapustin — research.

Maxim V. Fedorov — research.

Aleksey V. Nasonovskiy — development of a research and testing program, scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interests.