

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.011:539

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198

Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига

Дмитрий Николаевич Лазовский¹, Артур Иванович Гиль¹,
Дмитрий Олегович Глухов²

¹ Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ им. Евфросинии Полоцкой); г. Новополоцк, Республика Беларусь;
² СофтКлуб; г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальными задачами проектирования строительных конструкций из древесины являются расчет и конструирование изгибаемых элементов с учетом сдвига (скалывания). Рассмотрен вариант применения деформационного подхода для расчета прочности деревянных элементов при поперечном изгибе с учетом сдвига, основанный на использовании диаграмм деформирования древесины при сжатии и растяжении с учетом нелинейной работы.

Материалы и методы. Верификация предложенного подхода расчета прочности проводилась на данных собственных экспериментальных исследований деревянных элементов при поперечном изгибе. Критерием разрушения элемента принято максимальное значение внутреннего усилия, при котором выполняются условия равновесия системы разрешающих уравнений, либо несоблюдение условий прочности при сдвиге в поперечных сечениях по длине площадки сдвига конструкции, в том числе с учетом нелинейной работы древесины при сжатии.

Результаты. Предложенный деформационный подход позволяет получить распределение сдвигающих усилий на участке возможного сдвига вдоль волокон балки на любой стадии нагружения. Анализ результатов экспериментально-теоретических исследований свидетельствует о возможности применения предложенного подхода для проверки прочности деревянных конструкций при изгибе с учетом сдвига. Экспериментально установлены схемы разрушения древесины при сдвиге, которые заключаются в сдвиге волокон не по плоскости в нейтральной зоне, а по годичным кольцам древесины. Предложенный критерий разрушения позволяет учитывать возможный сдвиг древесины при поперечном изгибе.

Выводы. На основе исследований сделан вывод, что особое внимание при расчете изгибаемых деревянных элементов с учетом сдвига следует уделять реальной прочности древесины на сдвиг, которая в реальных конструкциях зависит от площадки сдвига с учетом расположения годичных колец в поперечном сечении конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянные конструкции, нелинейная деформационная модель, изгиб, сдвиг, прочность, растяжение, сжатие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198

Автор, ответственный за переписку: Артур Иванович Гиль, a.hil@psu.by.

Deformation approach to the calculation of shear strength in transverse bending of wooden elements

Dzmitry N. Lazouski¹, Artur I. Hil¹, Dzmitry O. Hlukhau²

¹ Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (PSU); Novopolotsk, Republic of Belarus;
² SoftClub; Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The calculation and design of bending elements taking into account shear (spalling) are urgent tasks in the design of building structures made of wood. The variant of application of the deformation approach to calculate the strength of wooden elements in transverse bending taking into account shear, based on the use of wood deformation diagrams in compression and tension taking into account nonlinear work, is considered.

Materials and methods. The verification of the proposed strength calculation approach was carried out on the basis of our own experimental studies of wooden elements during transverse bending. The criterion for the destruction of an element is the maximum value of the internal force at which the equilibrium conditions of the system of resolving equations are fulfilled, or non-compliance with shear strength conditions in cross-sections along the length of the shear site of the structure, including taking into account the nonlinear work of wood during compression.

Results. The proposed deformation approach makes it possible to obtain the distribution of shear forces in the area of possible shear of the beam fibres at any stage of loading. An analysis of the results of experimental and theoretical studies indicates the possibility of using the proposed approach to test the strength of wooden structures when bending, taking into account shear. Schemes of wood destruction during shear were experimentally established, which consist in shifting the fibres not along the plane in the neutral zone, but along the annual rings of wood. The proposed destruction criterion makes it possible to take into account the possible displacement of wood during transverse bending.

Conclusions. Based on the research, it was concluded that special attention should be paid to the actual shear strength of wood when calculating bent wooden elements, taking into account shear, which in real structures depends on the shear site, taking into account the location of the growth rings in the cross-section of the structure.

KEYWORDS: wooden structures, nonlinear deformation model, bending, shear, strength, stretching, compression

FOR CITATION: Lazouski D.N., Hil A.I., Hlukhau D.O. Deformation approach to the calculation of shear strength in transverse bending of wooden elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1187-1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198 (rus.).

Corresponding author: Artur I. Hil, a.hil@psu.by.

ВВЕДЕНИЕ

Древесина — природное строительное сырье, которое за счет своих высоких показателей прочности при изгибе, сжатии и растяжении вдоль волокон применяется в качестве конструкционного материала при строительстве жилых и общественных зданий. Древесина экологически чистое вещество, стойкое ко многим видам агрессивных сред, легко обрабатываемое. С разработкой синтетических клеев, обеспечивающих равнопрочное соединение при сдвиге, появилась возможность увеличения поперечного сечения деревянных конструкций с оптимальным распределением прочности древесины по сечению и создания нового вида деревянных конструкций — клеодеревянные. Современные технологии позволяют производить высокоэффективные клееные конструкции (панели) из перекрестных досок (CLT). Однако наряду с преимуществами древесины обладает рядом недостатков, в первую очередь, из-за своей ярко выраженной анизотропной структуры — относительно низкая прочность при сжатии и растяжении поперек волокон, при сдвиге (скалывании), особенно по поверхности годовичных колец. Кроме того, древесина имеет природные дефекты (в первую очередь, различного рода сучки), которые могут существенно влиять на прочность конструкции при различных силовых воздействиях.

При расчете деревянных изгибаемых конструкций, как правило, их сопротивление определяется максимальным изгибающим моментом и зависит от геометрии сечения и прочности древесины при изгибе. Как показывает строительная практика, зачастую деревянные изгибаемые конструкции могут разрушаться не только при исчерпании несущей способности в сжатой или растянутой зоне, но и от сдвига продольных волокон относительно друг друга [1]. Такой вид разрушения встречается не только в конструкциях из цельной, но и из клееной древесины.

Скалывание, как и растяжение поперек волокон, является наиболее слабым видом сопротивления древесины. Характер разрушения хрупкий. Пороки резко снижают сопротивление древесины

скалыванию. Различают: скалывание вдоль волокон; скалывание поперек волокон; скалывание под углом к волокнам. В деревянных конструкциях древесина чаще всего работает на скалывание вдоль волокон.

Таким образом, расчет и конструирование изгибаемых элементов с учетом сдвига (скалывания) — актуальные задачи проектирования строительных конструкций из древесины.

В общем случае работы изгибаемых конструкций при воздействии поперечной нагрузки, кроме нормальных напряжений растяжения — сжатия вдоль волокон древесины в пролете конструкции, появляются касательные напряжения, проявляющиеся в деревянных конструкциях в виде сдвига (скалывания) вдоль волокон у опор [2]. Ввиду волокнистого строения древесины ее прочность при сдвиге вдоль волокон значительно меньше, чем при растяжении — сжатии. Скалывающие касательные напряжения распределяются неравномерно по высоте поперечного сечения. Наибольшие их значения в поперечном сечении изгибаемого элемента — на уровне нейтральной оси. Из-за нелинейной работы древесины при сжатии положение нейтральной оси по длине зоны действия скалывающих касательных напряжений изменяется, в отличие от упругого подхода к расчету деревянных конструкций.

Прочность цельной древесины на сдвиг устанавливается на небольших образцах из древесины без дефектов [3, 4]. В настоящее время действуют нормативные документы для определения прочности при сдвиге для цельной¹ и клееной² древесины. Испытания проводят как в заранее заданной конструкцией образца тангенциальной плоскости сдвига, так и в радиальной^{1, 2}. Напряжения сдвига возникают в конструкции также при внецентренном сжатии и внецентренном растяжении [4]. Значения характеристической прочности древесины при сдвиге регламентируются нормативными доку-

¹ ГОСТ 16483.5–73. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон.

² ГОСТ 20182–74. Конструкции асбестоцементные клееные. Метод определения прочности клеевых соединений при сдвиге.

ментами^{3, 4, 5, 6, 7}. Лиственные породы лучше сопротивляются сдвигу, чем хвойные [5]. Известны методики оценки минимальной прочности древесины при сдвиге (скалывании) по поверхности годичных колец⁸ при исследовании соединений, работающих на скалывание [6]. Имеются исследования прямого определения прочности древесины при сдвиге в результате испытания изгибаемых деревянных элементов^{9, 10}. При этом следует заметить, что прочность древесины на скалывание зависит от расположения волокон, при сдвиге в радиальном направлении волокон прочность выше, чем при тангенциальном. Также отмечено, что с увеличением площади сдвига происходит снижение прочности на сдвиг [7].

Важность учета возможности сдвига подчеркивает тот факт, что при эксплуатации основным из самых распространенных дефектов деревянных элементов является растрескивание вдоль волокон — около 75 % [8]. При действии равномерно распределенной нагрузки деформации сдвига распространялись из пролета к опорам. Кроме того, технологические (отверстия, изменения размеров поперечного сечения на участке действия сдвигающих усилий) и природные (сучки) дефекты приводят к концентрациям напряжений сдвига [8].

Особенности разрушения при сдвиге: разрушение характеризуется скольжением волокон относительно себя, растрескиванием параллельно волокнам и считается хрупким. Продольные трещины не всегда проявляются на поверхности конструкции, в большинстве случаев являются закрытыми, их трудно идентифицировать внешне, если только они не проявляются на торце элемента [8]. Прочность древесины при сдвиге (скалывании) зависит

также от температуры окружающего воздуха, при ее повышении прочность на сдвиг уменьшается [9].

Действие сдвигающих касательных напряжений сказывается на деформативности изгибаемых деревянных конструкций при больших соотношениях вертикального размера поперечного сечения и пролета [10]. Изучение на цельнодеревянных балках ограниченного природой поперечного сечения показывает, что при оценке их прогибов влиянием деформаций сдвига можно пренебречь [2].

В исследованиях [11–13] при поперечном изгибе клееной однонаправленной древесины балки разрушались от скалывания вдоль волокон по древесине или по клеевому шву. Развитие скалывания начиналось в пролете и распространялось к опорам.

При поперечном изгибе в общем случае нагружения в поперечном сечении деревянного элемента, кроме изгибающего момента, действует и поперечная сила и, как следствие, связанные с ней касательные напряжения в направлении ее действия. По закону парности касательных напряжений аналогичные по величине касательные напряжения возникают и в направлении вдоль оси элемента (вдоль волокон древесины). Именно на эти касательные напряжения вдоль оси деревянного элемента и выполняется проверка прочности на сдвиг вдоль волокон древесины, которая плохо сопротивляется в этом направлении.

Проверка на сдвиг вдоль волокон деревянных изгибаемых элементов по действующим нормативным документам^{5, 6, 7} проводится из условия:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}^p \quad (1)$$

где V_{Ed} — расчетное значение поперечного усилия от внешних воздействий; V_{Rd} — расчетное усилие сопротивления деревянного элемента,

$$V_{Rd} = \frac{J_{br} b_{ef} f_{v,d}}{S_{br}}, \quad (2)$$

где J_{br} — момент инерции брутто относительно нейтральной оси; b_{ef} — расчетное значение ширины элемента; $f_{v,d}$ — расчетное значение прочности древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон; S_{br} — статический момент брутто сдвигаемой части относительно нейтральной оси.

Проверка на сдвиг для поперечного изгиба деревянных элементов из условия (1) производится по формуле Д.И. Журавского в предположении упругой работы древесины [7].

Цель данной работы — адаптация нелинейного деформационного подхода для расчета прочности изгибаемых деревянных элементов с учетом возможного сдвига древесины вдоль волокон и его влияния на прочность конструкции в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нелинейная деформационная модель для расчета параметров напряженно-деформированного состо-

³ BS EN 16351:2015. Timber structures — Cross laminated timber — Requirements. BSI Standards Publication, London.

⁴ AFPA 1991b. ANSI/NFPA NDS Supplement – 1991. National design specification for wood construction. Washington, DS : American Forest and Paper Association.

⁵ Eurocode 5. Design of timber structures — Part 1–1: General — Common rules and rules for buildings. Brussels : CEN, 2004. 121 p.

⁶ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80. М. : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2017. 97 с.

⁷ СП 5.05.01–2021. Деревянные конструкции. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. 111 с.

⁸ Патент RU № 2675489. Способ скалывания древесины вдоль волокон / В.Г. Уласовец. Оpubл. 19.12.2018. Бюл. № 35.

⁹ ASTM D5379/D5379M. Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. USA : ASTM International, 2005.

¹⁰ ASTM D2718–00. Standard test methods for structural panels in planar shear (RS). USA : ASTM International, 2006.

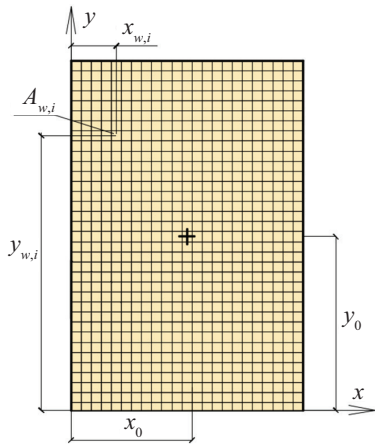


Рис. 1. Расчетное поперечное сечение деревянного элемента

Fig. 1. Calculated cross-section of a wooden element

яния (НДС) строительных конструкций с развитием информационных технологий применяется для железобетонных, каменных, сталежелезобетонных, и в том числе деревянных конструкций [1, 14–20]. Расчет производится на основе диаграмм деформирования материалов строительных конструкций при сжатии – растяжении. Диаграммный подход позволяет вычислять параметры НДС деревянных конструкции при любых видах НДС, на любой стадии работы под нагрузкой. При этом конструкция может быть любой формы поперечного сечения, включая многослойную с различными физико-механическими характеристиками материалов слоев.

Поперечное сечение деревянного элемента представляется совокупностью элементарных площадок с равномерно распределенными нормальными напряжениями сжатия – растяжения, величина которых зависит от относительных деформаций в центре тяжести элементарной площадки согласно принятым диаграммам деформирования древесины (рис. 1). Распределение относительных деформаций по поперечному сечению деревянного элемента подчиняется гипотезе Бернулли о плоском сечении.

Система разрешающих уравнений для деревянного элемента в общем случае косоугольного изгиба при воздействии изгибающих моментов M_x и M_y в плоскости центральных осей x и y имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} (x_0 - x_{w,i}) - M_x = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} (y_0 - y_{w,i}) - M_y = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} - N = 0; \\ \varepsilon_{w,i} = (1/r)_x (x_0 - x_{w,i}); \quad \varepsilon_{w,i} = (1/r)_y (y_0 - y_{w,i}); \\ \sigma_{w,i} = f(\varepsilon_{w,i}), \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{w,i}$ и $\varepsilon_{w,i}$ — соответственно нормальные напряжения и относительные деформации в i -й элементарной площадке деревянного элемента; $A_{w,i}$ и $y_{w,i}$ — соответственно площадь поперечного сечения и расстояние от выбранной оси до центра тяжести i -й элементарной площадки; x_0 и y_0 — расстояние от выбранной оси до центра тяжести поперечного сечения; $(1/r)_x$ и $(1/r)_y$ — кривизна изгибаемого элемента в рассматриваемом поперечном сечении в плоскости осей соответственно x и y .

Диаграмма деформирования древесины с модулем упругости при сжатии вдоль волокон E_w аппроксимируется параболической зависимостью [1]:

$$\frac{\sigma_w}{f_{c,0,m}} = - \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \right) \text{ для } \varepsilon_w \leq 0, \quad (4)$$

где $f_{c,0,m}$ — среднее значение сопротивления древесины вдоль волокон при сжатии; $k = E_w/E_{c,0,1}$; $E_{c,0,1} = \sigma_{c,0,1}/\varepsilon_{c,0,1}$ — модуль деформаций в верхней точке диаграммы деформирования; $\eta = \varepsilon_w/\varepsilon_{c,0,1}$; $\varepsilon_{c,0,1}$ — относительные деформации древесины вдоль волокон в точке максимального сжимающего напряжения.

Диаграмма деформирования древесины при сжатии не ограничивается предельными значениями относительных деформаций.

Диаграмма деформирования древесины при растяжении аппроксимируется линейной зависимостью [1]:

$$\sigma_w = \varepsilon_w \cdot E_{t,0} \text{ для } 0 < \varepsilon_w \leq \varepsilon_{t,0,u}, \quad (5)$$

где $E_{t,0}$ — модуль упругости древесины при растяжении вдоль волокон; $\varepsilon_{t,0,u}$ — относительные деформации предельной растяжимости древесины.

Общий вид диаграмм деформирования древесины при растяжении и сжатии представлен на рис. 2.

Для учета возможного сдвига волокон древесины в зоне нейтральной оси необходимо рассмотреть опасные поперечные сечения балки по длине пролета

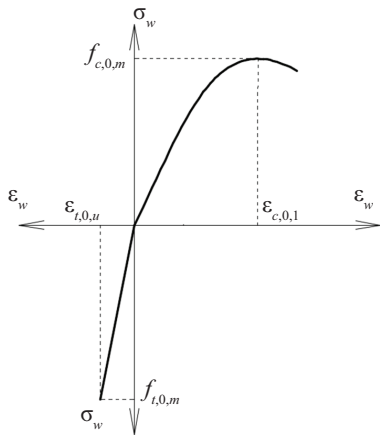


Рис. 2. Диаграмма деформирования древесины при растяжении и сжатии вдоль волокон

Fig. 2. Diagram of wood deformation during stretching and compression along the fibres

в зоне действия поперечных сил. В данных поперечных сечениях по деформационной модели на любой стадии работы под нагрузкой получают эпюры распределения нормальных напряжений при сжатии и растяжении в любых точках конструкции по длине.

Затем по полученным эпюрам нормальных напряжений вычисляются сдвигающие усилия в рассматриваемом поперечном сечении T_E , Н:

$$T_E = \Sigma \sigma_{w,i} \cdot h_{w,i} \cdot b, \quad (6)$$

где $\sigma_{w,i}$ — нормальные напряжения сжатия в середине i -й элементарной площадки рассматриваемого поперечного сечения элемента; $h_{w,i}$ — линейный размер i -й элементарной площадки по высоте поперечного сечения; b — ширина элемента в рассматриваемом поперечном сечении.

Проверка прочности на сдвиг в рассматриваемом поперечном сечении изгибаемого деревянного элемента производится из условия:

$$T_E \leq T_R, \quad (7)$$

где T_R — сдвигающее усилие сопротивления, воспринимаемое древесиной в рассматриваемом поперечном сечении:

$$T_R = l_{sh} \cdot b \cdot f_{v,d}, \quad (8)$$

где l_{sh} — длина участка сдвига.

Критерием исчерпания прочности деревянного элемента при изгибе в растянутой или сжатой зонах принимается максимальное значение внутреннего усилия, при котором соблюдаются условия равновесия внутренних усилий системы уравнений (3). Невыполнение условия (7) свидетельствует о разрушении элемента при сдвиге древесины вдоль волокон. При этом, учитывая изменение размеров площадки возможного сдвига и сдвигающего усилия от внешней нагрузки, следует рассматривать

ряд поперечных сечений по длине изгибаемого деревянного элемента.

Верификация предложенной методики расчета проводилась на данных собственных экспериментальных исследований деревянных элементов при поперечном изгибе.

Экспериментальные образцы представляли собой шарнирно опертые деревянные балки поперечного сечения 100×150 мм длиной 3000 мм (расстояние между опорами 2700 мм). Для определения фактических физико-механических характеристик при сжатии, растяжении, сдвиге вдоль волокон в тангенциальном направлении древесины были отобраны образцы из той же партии древесины, что и опытные балки (порода древесины — сосна). В результате испытания призм размером $100 \times 100 \times 600$ мм при сжатии вдоль волокон (рис. 3, а), образцов-восьмерок при растяжении вдоль волокон (рис. 3, б) и Т-образных при сдвиге вдоль волокон (рис. 3, в) получены характеристики древесины для каждой балки. Испытание всех опытных образцов проходило при температуре окружающего воздуха 20°C , относительной влажности 66 %. Влажность древесины на момент проведения испытаний составляла в среднем 9,4 %. Прочностные характеристики балок приведены в табл. 1.

В процессе испытания опытные балки нагружались двумя сосредоточенными силами в 1/3 (серия 1) и в 1/4 (серия 2) пролета (рис. 4, а). Было испытано по 2 балки каждой серии. Нагружение балок осуществлялось гидравлическим домкратом через распределительную траверсу этапами не более 1/20 предполагаемого предельного усилия с выдержкой на каждом этапе 3 минуты. На последних этапах нагружения, когда начали проявляться деформации

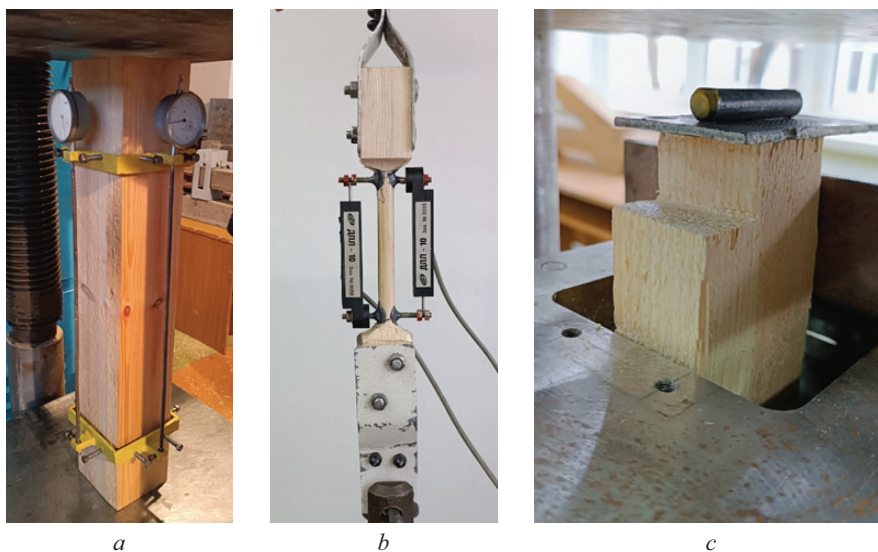


Рис. 3. Испытание деревянных призм при сжатии вдоль волокон (а); образцов-восьмерок при растяжении вдоль волокон (б) и образцов при сдвиге вдоль волокон (в) для определения характеристик древесины

Fig. 3. Testing of wooden prisms under compression along the fibres (a); figure-of-eight specimens under tension along the fibres (b) and specimens under shear along the fibres (c) to determine the characteristics of wood

Табл. 1. Прочностные характеристики опытных балок
Table 1. Strength characteristics of experimental beams

Балки / Beams	$f_{c,0,m}$, МПа / МПа	$E_{c,0,m}$, МПа / МПа	$\epsilon_{c,0,1}$	$f_{t,0,m}$, МПа / МПа	$E_{t,0,m}$, МПа / МПа	$\epsilon_{t,0,u}$	$f_{v,m}$, МПа / МПа
Б1–1 В1–1	61,8	14 250	0,0043	108,7	17 960	0,0061	2,15
Б2–1 В2–1	54,9	14 490	0,0038	109,5	18 510	0,006	2,14
Б3–2 В3–2	47,2	15 660	0,003	55,2	17 490	0,0031	2,2
Б4–2 В4–2	33,5	12 200	0,0031	60,7	18 100	0,0034	1,98

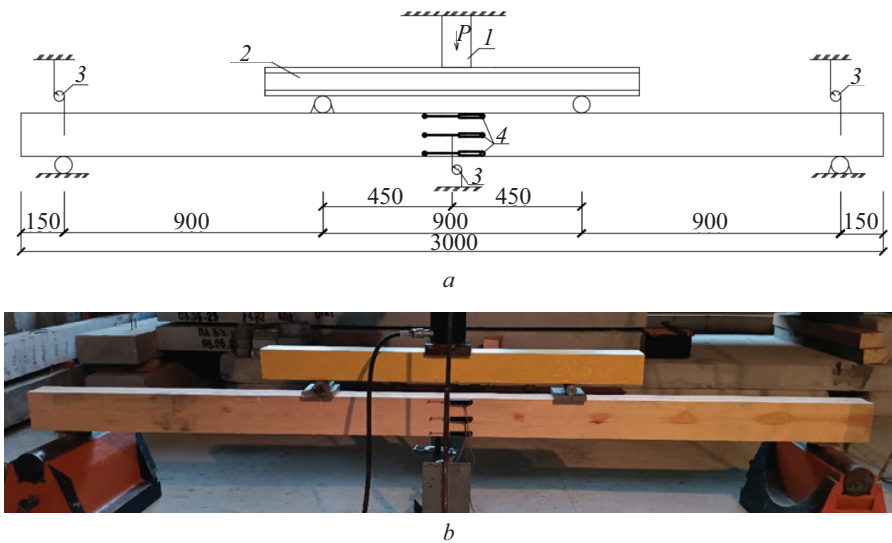


Рис. 4. Схема расстановки приборов (а) и общий вид испытания опытной балки (b); 1 — гидравлический домкрат; 2 — распределительная траверса; 3 — прогибомер; 4 — измерители деформаций
Fig. 4. Arrangement diagram (a) and general test view of the pilot beam (b); 1 — hydraulic jack; 2 — distribution beam; 3 — deflection gauge; 4 — strain gauges

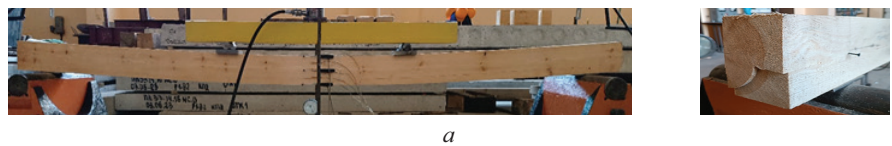
ползучести, величина нагрузки, соответствующая этапу нагружения, уменьшалась вдвое. При испытании на каждом этапе в середине пролета контролировались относительные деформации в пяти местах по высоте поперечного сечения с помощью измерителей деформаций с базой измерения 145 мм. Прогиб балки в середине пролета и осадка опор измерялись прогибомерами с точностью 0,01 мм. Общий вид испытания опытной балки показан на рис. 4, b.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разрушение опытных балок первой серии произошло от сдвига древесины вдоль волокон по поверхности годовичных колец при максимальном изгибающем моменте в зоне чистого изгиба для балок:

Б1–1 $M_{u,exp} = 24,75$ кНм, Б2–1 $M_{u,exp} = 25,31$ кНм. Балки второй серии разрушились от разрыва крайних растянутых волокон древесины и смятия сжатых волокон при нагрузке, соответствующей изгибающему моменту для балок: Б3–2 $M_{u,exp} = 16,45$ кНм, Б4–2 $M_{u,exp} = 17,3$ кНм. Общие виды опытных балок после испытания представлены на рис. 5.

Наглядность последовательности расчета на сдвиг по предложенной методике рассмотрим на примере опытной балки Б1–1. При моделировании НДС балки на каждом этапе нагружения проанализирован ряд поперечных сечений по длине сдвига от опоры до точки приложения нагрузки, получены значения нормальных напряжений по высоте сечений (рис. 6, 7),



а

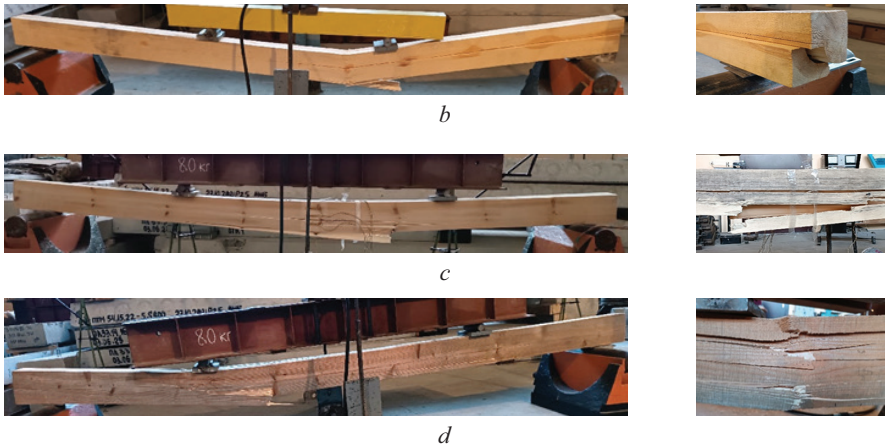


Рис. 5. Общий вид опытных балок после испытания и мест их разрушения: *a* — B1–1; *b* — B2–1; *c* — B3–2; *d* — B4–2
Fig. 5. General view of the experimental beams after testing and the places of their destruction: *a* — B1–1; *b* — B2–1; *c* — B3–2; *d* — B4–2

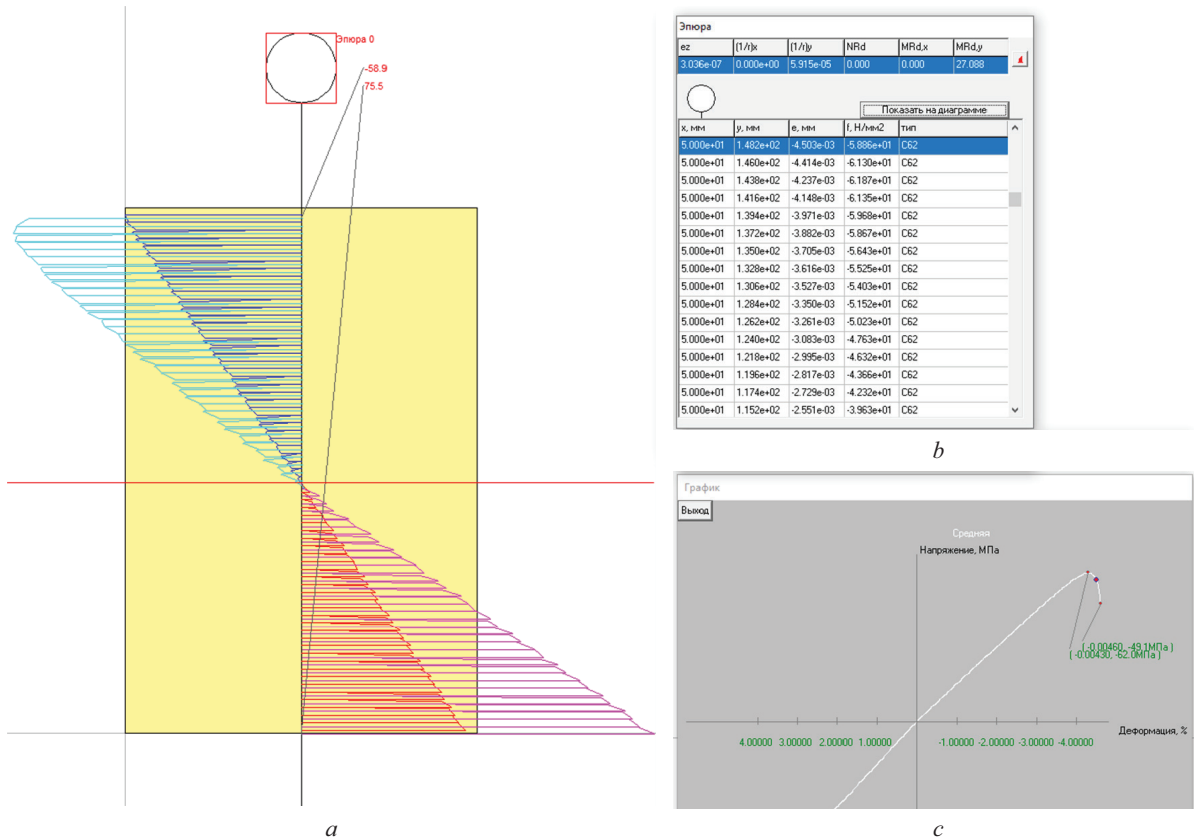


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние в критическом поперечном сечении изгибаемого деревянного элемента по результатам расчета: *a* — распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения при изгибающем моменте $M_{u,calc} = 27,09$ кНм (цифры на выносных линиях — нормальные напряжения в МПа; синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым — аналогично, нормальных напряжений); *b* — результаты расчета; *c* — диаграмма деформирования древесины при предельном изгибающем моменте (красная точка на кривой — деформации при заданном нагружении)

Fig. 6. Stress-strain state in the critical cross-section of the bending wooden element according to the calculation results: *a* — is the distribution of relative deformations and normal stresses over the height of the cross-section at a bending moment of $M_{u,calc} = 27.09$ kNm (the numbers on the outrigger lines are normal stresses in MPa; blue and red show the distribution over the height of the cross-section of relative deformations in compressed and stretched zones, respectively; blue and pink — similarly, normal stresses); *b* — calculation results; *c* — diagram of wood deformation at the maximum bending moment (the red dot on the curve shows deformations under a given load)

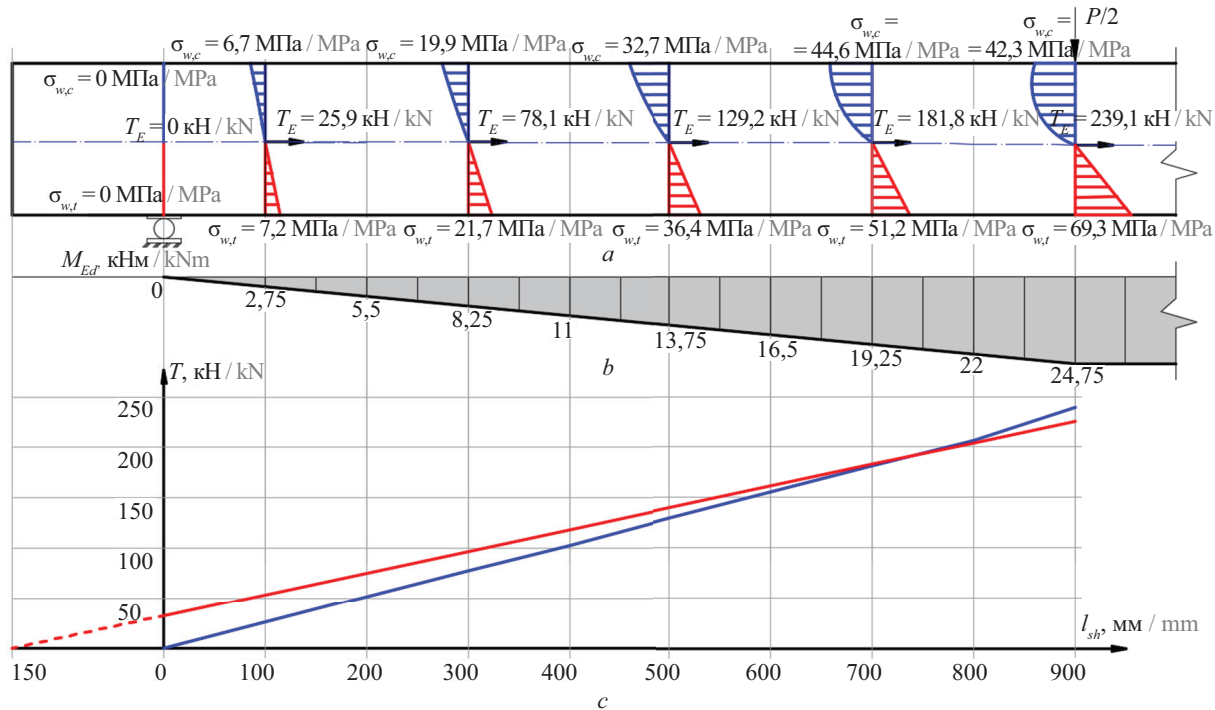
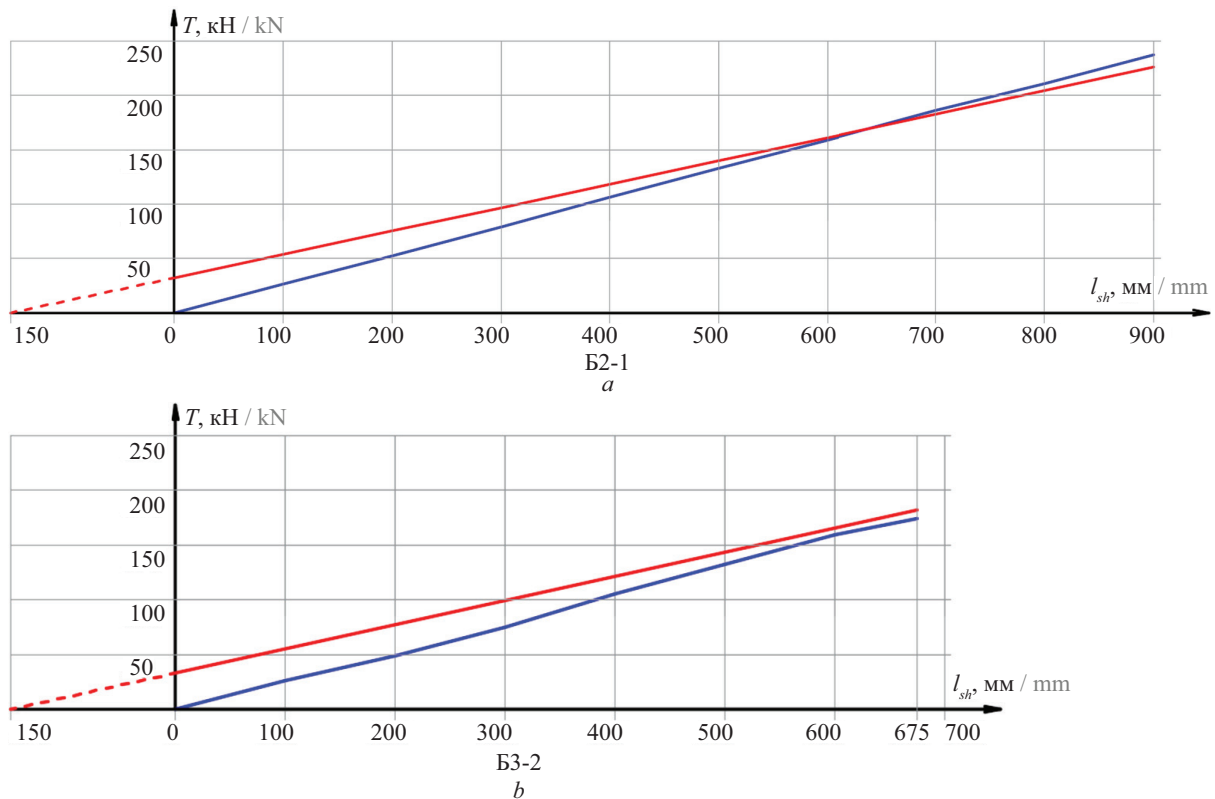


Рис. 7. Результаты расчета прочности балки Б1 при изгибе с учетом сдвига: а — распределение нормальных напряжений и сдвигающих усилий, полученных по предложенной методике; б — эпюра изгибающих моментов; в — зависимость сдвигающего усилия от длины площадки сдвига (на графике красная линия — зависимость $T_R(l_{sh})$, построенная с учетом испытания древесины на сдвиг; синяя — $T_E(l_{sh})$ — по предложенной методике)

Fig. 7. The results of calculating the strength of the beam B1 during bending, taking into account the shear: a — is the distribution of normal stresses and shear forces obtained by the proposed method; b — is a diagram of bending moments; c — is the dependence of the shear force on the length of the shear site (on the graph, the red line is the dependence $T_R(l_{sh})$, based on the shear test of wood; blue is $T_E(l_{sh})$ — according to the proposed method)



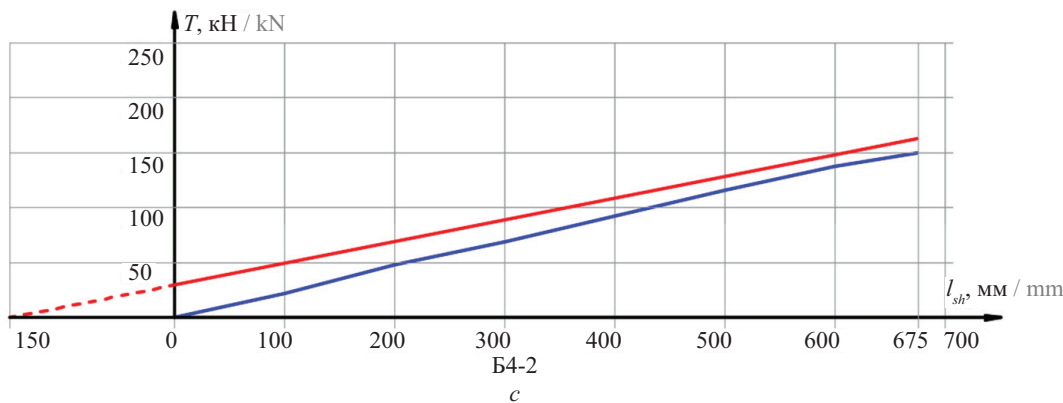


Рис. 8. Зависимость сдвигающего усилия от длины площадки сдвига: *a* — Б2–1; *b* — Б3–2; *c* — Б4–2 (на графиках красная линия — $T_R(l_{sh})$; синяя — $T_E(l_{sh})$)

Fig. 8. Dependence of the shear force on the length of the shear area: *a* — B2–1; *b* — B3–2; *c* — B4–2 (in the graphs, the red line is $T_R(l_{sh})$; the blue line is $T_E(l_{sh})$)

Табл. 2. Результаты экспериментально-теоретических исследований

Table 2. Results of experimental and theoretical studies

Балки Beams	Тип разрушения Type of destruction	$M_{u,exp}$, кНм / kNm	$M_{u,calc}$, кНм / kNm	$M_{u,exp} / M_{u,calc}$
Б1–1 B1–1	Сдвиг вдоль волокон Shifting along the fibres	24,75	23,6	1,05
Б2–1 B2–1	Сдвиг вдоль волокон Shifting along the fibres	25,31	24,73	1,02
Б3–2 B3–2	Разрыв и смятие волокон Tearing and crumpling of fibres	17,3	16,98	1,02
Б4–2 B4–2	Разрыв и смятие волокон Tearing and crumpling of fibres	16,45	16,2	1,02

вычислены результирующие продольные усилия в сжатой зоне, которые и являются сдвигающими T_E в рассматриваемом поперечном сечении.

По результатам расчета максимальное значение изгибающего момента составило $M_{u,calc,max} = 27,16$ кНм, при этом максимальное значение результирующего сдвигающего усилия при данном изгибающем моменте — $T_{E,max} = 264,6$ кН, что превысило $T_{R,max} = 225,75$ кН. Таким образом, за предельный принимается изгибающий момент $M_{u,calc} = 23,6$ кНм, при котором $T_E = T_{R,max}$, а критерием разрушения принимается сдвиг древесины вдоль волокон (рис. 7).

Как видно из зависимостей на (рис. 7, *c*), сдвигающее усилие T_E от действия поперечной нагрузки, вычисленное по предложенной методике, превышает сдвигающее усилие сопротивления балки сдвигу T_R по длине площадки сдвига от места пересечения графиков $T_R(l_{sh})$ и $T_E(l_{sh})$ до линии действия поперечного усилия. Предложенная методика позволяет получить реальное распределение сдвигающего усилия от внешней нагрузки на любом участке балки с учетом нелинейной работы древесины при сжатии на любой стадии нагружения. Аналогично были построены зависимости сдвигающего усилия от длины площадки сдвига для балок Б2-1, Б3-2 и Б4-2 (рис. 8).

Результаты расчетов прочности экспериментальных балок представлены в табл. 2.

Анализ результатов свидетельствует о возможности применения предложенного подхода для проверки прочности деревянных конструкций при их поперечном изгибе с учетом сдвига на основе нелинейной деформационной модели сечений. В расчете прочности на сдвиг изгибаемых деревянных элементов следует принимать сопротивление древесины при сдвиге в тангенциальном направлении (по годичным кольцам) как самое неблагоприятное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе нелинейной деформационной модели предложен подход для определения прочности на сдвиг при поперечном изгибе деревянных элементов. Данный подход позволяет получить распределение сдвигающих усилий по длине площадки сдвига изгибаемого элемента на любой стадии нагружения с учетом нелинейной работы древесины при сжатии.

Предложен критерий разрушения изгибаемого элемента при изгибе с учетом сдвига в виде максимального воспринимаемого изгибающего момента в поперечном сечении, либо достижением предельного усилия при сдвиге.

Экспериментально установлены схемы разрушения древесины при сдвиге, которые заключаются в сдвиге волокон не по плоскости в нейтральной зоне, а по годичным кольцам древесины. В расчете

прочности на сдвиг изгибаемых деревянных элементов следует принимать сопротивление древесины при сдвиге в тангенциальном направлении их поперечного сечения (по годичным кольцам) как самое неблагоприятное.

Результаты проведенного экспериментально-теоретического исследования подтверждают применимость нелинейного деформационного подхода к расчету сопротивления изгибу деревянных эле-

ментов с учетом сдвига. Результаты расчета прочности показывают удовлетворительную сходимость с опытными данными (расхождения с опытными данными не превышают 5 %).

В дальнейшем следует рассмотреть вопросы учета сдвига при изгибе клееных деревянных элементов, состоящих из древесины с различными физико-механическими свойствами, с различной ориентацией слоев клееной древесины (CLT-элементы).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Диаграммный подход при расчете деревянных конструкций по СП 5.05.01-2021 // Вестник БрГТУ. 2024. № 2 (134). С. 66–72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72. EDN DKHHQX.

2. Koczan G., Kozakiewicz P. The role of shear stress in the bending strength test of short and medium length specimens of clear wood // *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*. 2017. Vol. 60. Issue 199. Pp. 161–175. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.102.12

3. Arroyo F.N., Borges J.F., Pereira Junior W.M., Santos H.F., Oliveira I.A., Panzera T.H. et al. Estimation of flexural tensile strength as a function of shear of timber structures // *Forests*. 2023. Vol. 14. Issue 8. P. 1552. DOI: 10.3390/f14081552

4. Жилкин В.А. Численное исследование напряженного состояния образцов из древесины на скалывание вдоль волокон // АПК России. 2015. Т. 74. С. 55–65. EDN VKBAHP.

5. Yang S.M., Lee H.H., Kang S.G. Research trends in hybrid cross-laminated timber (CLT) to enhance the rolling shear strength of CLT // *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2021. Vol. 49. Issue 4. Pp. 336–359. DOI: 10.5658/WOOD.2021.49.4.336

6. Малыхина В.С., Денисов А.Н. Исследование смятия и скалывания соединения деревянных элементов конструкции без механических связей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 72–74. EDN WHTDIF.

7. Артемов П.Я. Некоторые вопросы скалывания древесины // Сборник научных трудов. Минск : Издательство Белгосуниверситета имени В.И. Ленина, 1956. № VIII. С. 204–213.

8. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams — State of the art // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 97. Pp. 2–13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021

9. Zhang L., Xu B., Fang Z., Li C., Kong X., Li Q., Guo K. Experimental Study on the Bending and Shear Behaviors of Chinese Paulownia Wood at Elevated Tem-

peratures // *Polymers*. 2022. Vol. 14. Issue 24. P. 5545. DOI: 10.3390/polym14245545

10. Rammer D.R., McLean D.I. Shear strength of wood beams // *National conference on wood transportation structures*. 1996. Pp. 168–177.

11. Коротков Л.И. Брус клееный из деревянного шпона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 6 (185). С. 38–41. EDN TAPWFX.

12. Деордиев С.В., Копаница Д.Г., Копаница Г.Д., Тутатчиков П.С. Экспериментальные исследования клеодощатых балок на поперечный изгиб при действии статической и кратковременной динамической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 96–111. EDN SEZISL.

13. Li Q., Wang Z., Liang Z., Li L., Gong M., Zhou J. Shear properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 261. P. 120504. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120504

14. Хаткевич А.М., Лазовский Д.Н., Глухов Д.О. Деформационный подход к моделированию напряженно-деформированного состояния сжатых элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 3. С. 21–27. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27. EDN PJQNXA.

15. Лазовский Д.Н., Гиль А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния двухслойных железобетонных изгибаемых элементов с различными видами армирования в растянутой зоне // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 5 (785). С. 36–48. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-36-48. EDN CNSHUR.

16. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1469–1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483. EDN AOVNPO.

17. Gomon S., Gomon P., Korniychuck O., Honmon S., Dovbenko T., Kulakovskiy L. et al. Fundamentals

of calculation of elements from solid and glued timber with repeated oblique transverse bending, taking into account the criterion of deformation // *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2022. Vol. 64. Issue 2. Pp. 37–47. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.04

18. Pavluk A., Gomon S., Khoruzhyi M., Homon S., Dejneka O., Smal M. et al. Peculiarities of calculation of wooden beams for oblique bending using the deformation model // *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 566–574. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.080

19. Gomon P., Gomon S., Pavluk A., Homon S., Chapiuk O., Melnyk Y. Innovative method for calculating deflections of wooden beams based on the moment-curvature graph // *Procedia Structural Integrity*. 2023. Vol. 48. Pp. 195–200. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.148

20. Lazouski D., Glukhov D., Lazouski Y., Hil A. Modeling of Behavior of the Bending Reinforced Concrete Structures Under Load // *Sustainable and Digital Building*. 2023. Pp. 279–289. DOI: 10.1007/978-3-031-25795-7_22

Поступила в редакцию 20 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 22 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Николаевич Лазовский** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ им. Евфросинии Полоцкой)**; 211440, Республика Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29; РИНЦ ID: 907311, Scopus: 5720341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938X; d.lazovski@psu.by;

Артур Иванович Гиль — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ им. Евфросинии Полоцкой)**; 211440, Республика Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29; РИНЦ ID: 907375; ORCID: 0000-0002-5627-1438; a.hil@psu.by;

Дмитрий Олегович Глухов — кандидат технических наук, доцент, главный инженер-программист; **СофтКлуб**; 220141, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 168/1; Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919; dzmitry.hlukhau@softclub.by.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Lazouski D.N., Hil A.I., Gluhov D.O. Diagram approach in calculating wooden design for SP 5.05.01-2021. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2024; 2(134):66-72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72. EDN DKHHQX. (rus.).

2. Koczan G., Kozakiewicz P. The role of shear stress in the bending strength test of short and medium length specimens of clear wood. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*. 2017; 60(199):161-175. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.102.12

3. Arroyo F.N., Borges J.F., Pereira Junior W.M., Santos H.F., Oliveira I.A., Panzera T.H. et al. Estimation of flexural tensile strength as a function of shear of timber structures. *Forests*. 2023; 14(8):1552. DOI: 10.3390/f14081552

4. Zhilkin V.A. The stress state numerical investigation of wood samples for shearing parallel to fibers. *Agro-industrial complex of Russia*. 2015; 74:55-65. EDN VKBAHP. (rus.).

5. Yang S.M., Lee H.H., Kang S.G. Research trends in hybrid cross-laminated timber (CLT) to enhance the rolling shear strength of CLT. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2021; 49(4):336-359. DOI: 10.5658/WOOD.2021.49.4.336

6. Malykhina V.S., Denisov A.N. Study of crushing and shearing of the connection of wooden structural elements without mechanical connections. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 8:72-74. EDN WHTDIF. (rus.).

7. Artemov P.Ya. Some issues of wood chipping. *Collection of scientific papers*. Minsk, Publishing House of the Belarusian State University named after V.I. Lenin, 1956; VIII:204-213. (rus.).

8. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams — State of the art. *Construction and Building Materials*. 2015; 97:2-13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021

9. Zhang L., Xu B., Fang Z., Li C., Kong X., Li Q., Guo K. Experimental Study on the Bending and Shear Behaviors of Chinese Paulownia Wood at Elevated Temperatures. *Polymers*. 2022; 14(24):5545. DOI: 10.3390/polym14245545

10. Rammer D.R., McLean D.I. Shear strength of wood beams. *National conference on wood transportation structures*. 1996; 168-177.

11. Korotkov L.I. The laminated wooden veneer. *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. 2014; 6(185):38-41. EDN TAPWFX. (rus.).

12. Deordiev S.V., Kopanitsa D.G., Kopanitsa G.D., Tutatchikov R.S. Transverse bending tests of laminated beams under static and short-term dynamic loads. *Journal of Construction and Architecture*. 2014; 3(44):96-111. EDN SEZISL. (rus.).

13. Li Q., Wang Z., Liang Z., Li L., Gong M., Zhou J. Shear properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Construction and Building Materials*. 2020; 261:120504. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120504

14. Khatkevich A., Lazouski D., Glukhov D. A deformation approach to modeling the stress-strain state of compressed brickwork elements reinforced under load with a reinforced concrete cage. Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. *Applied Sciences*. 2023; 3:21-27. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27. EDN PJQNXA. (rus.).

15. Lazovsky D.N., Gil A.I. Modeling of the stress-strain state of two-layer reinforced concrete bendable elements with different types reinforcement in a stretched area. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2024; 5(785):36-48. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-36-48. EDN CNSHUR. (rus.).

16. Lazouski D.N., Hil A.I., Hlukhau D.O. Deformation approach to the calculation of compressive

strength of steel-reinforced concrete elements. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(9):1469-1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483. EDN AOVNPO. (rus.).

17. Gomon S., Gomon P., Korniychuck O., Homon S., Dovbenko T., Kulakovskiy L. et al. Fundamentals of calculation of elements from solid and glued timber with repeated oblique transverse bending, taking into account the criterion of deformation. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*. 2022; 64(2):37-47. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.04

18. Pavluk A., Gomon S., Khoruzhyi M., Homon S., Dejneka O., Smal M. et al. Peculiarities of calculation of wooden beams for oblique bending using the deformation model. *Procedia Structural Integrity*. 2024; 59:566-574. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.080

19. Gomon P., Gomon S., Pavluk A., Homon S., Chapiuk O., Melnyk Y. Innovative method for calculating deflections of wooden beams based on the moment-curvature graph. *Procedia Structural Integrity*. 2023; 48:195-200. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.148

20. Lazouski D., Glukhov D., Lazouski Y., Hil A. Modeling of Behavior of the Bending Reinforced Concrete Structures Under Load. *Sustainable and Digital Building*. 2023; 279-289. DOI: 10.1007/978-3-031-25795-7_22

Received May 20, 2025.

Adopted in revised form on May 22, 2025.

Approved for publication on June 7, 2025.

B I O N O T E S: **Dzmitry N. Lazouski** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures; **Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (PSU)**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RSCI: 907311, Scopus: 5720341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938X; d.lazovski@psu.by;

Artur I. Hil — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (PSU)**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RSCI: 907375; ORCID: 0000-0002-5627-1438; a.hil@psu.by;

Dzmitry O. Hlukhau — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Software Engineer; **SoftClub**; 168/1 Nezavisimosti st., Minsk, 220141, Republic of Belarus; Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919; dzmitry.hlukhau@softclub.by.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.