

УДК 624.01:539

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА ПРИ РАСЧЕТЕ ИЗГИБАЕМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.И. Гиль, Д.Н. Лазовский

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
г. Новополоцк, Республика Беларусь
e-mail: a.hil@psu.by, d.lazovski@psu.by

Представлены результаты экспериментальных исследований определения истинных диаграмм деформирования древесины при одноосном кратковременном сжатии и растяжении, которые верифицируют предложенные варианты аппроксимации данных диаграмм. Разработана программа экспериментальных исследований для верификации диаграммного подхода при его реализации при расчете деревянных элементов при изгибе.

Ключевые слова: диаграмма деформирования древесины, изгиб, гипотеза плоских сечений, деформационный метод расчета.

EXPERIMENTAL RESEARCH METHODOLOGY FOR VERIFICATION OF THE DEFORMATION APPROACH IN THE CALCULATION OF BENT WOODEN ELEMENTS

A. Hil, D. Lazowski

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Belarus
e-mail: a.hil@psu.by, d.lazovski@psu.by

The results of experimental studies of determining the true diagrams of wood deformation under uniaxial short-term compression and tension are presented, which verify the proposed options for approximating these diagrams. A program of experimental studies has been developed to verify the diagrammatic approach when it is implemented in the calculation of wooden elements during bending.

Keywords: wood deformation diagram, bending, flat section hypothesis, deformation calculation method.

Введение. Древесина применяется при строительстве различных зданий и сооружений (жилые дома, общественные здания, зрелищные и спортивные сооружения) не только в качестве отделочного материала, но и конструкционного в силу своих преимуществ в сравнении с другими строительными материалами. Относительно высокая прочность, обрабатываемость, экологичность, стойкость к воздействию агрессивной среды, а также возможность получения равнопрочных соединений с помощью синтетических клеев при увеличении размеров, даже несмотря на высокую стоимость способствует росту ее применения как строительного материала для несущих конструкций [1].

В последнее время проводится большое количество научных исследований физико-механических характеристик древесины и особенностей ее работы в несущих конструкциях при внешних воздействиях, как анизотропного нелинейно деформируемого материала при сжатии-растяжении [2-10]. При этом в действующих нормативных документах расчет изгибаемых деревянных элементов производится по методу допускаемых напряжений как упругого материала с обобщенным расчетным сопротивлением древесины при изгибе [11–13]. Не учитывается действительная работа древесины под нагрузкой, поскольку прочность древесины зависит от многих параметров, включающих влажность и плотность древесины, продолжи-

тельность приложенной нагрузки, размер конструктивных элементов и наличие различных дефектов, снижающих прочность, таких как наклон волокон, сучки, трещины, гнилостные вкрапления и др. [14].

С развитием информационных технологий при расчете строительных конструкций из различных материалов стали широко применяться более точные методы расчета с физической точки зрения, в первую очередь, основанные на методе конечных элементов, которые позволили численно смоделировать напряженно-деформированное состояние конструкций на любом этапе их нагружения при любых воздействиях.

Одним из таких направлений является деформационный подход метода сечений, основанный на уравнениях равновесия усилий в рассматриваемом поперечном сечении и использовании полных (с нисходящей ветвью) диаграмм деформирования материала при сжатии-растяжении элементарных площадок поперечного сечения элемента, в пределах которой напряжения принимаются постоянными, соответствующими средним относительным деформациям в ней. Не является принципиальным количество различающихся между собой диаграмм деформирования для разных элементарных площадок, что важно для клееных деревянных элементов из элементов различного класса древесины. Для распределения относительных деформаций по поперечному сечению изгибаемого элемента используется гипотеза плоских сечений. Деформационный подход для расчета деревянных элементов успешно реализован в теоретических исследованиях [15].

Основная часть. Для реализации деформационного метода расчета деревянных конструкций в первую очередь необходимо получить истинные диаграммы деформирования древесины, а также их качественную аппроксимацию [16–17]. Существует большое количество исследований, посвященным вопросу аппроксимирования диаграмм деформирования древесины [18–20], наиболее часто диаграмму древесины при сжатии описывают полиномом второй или третьей степени [17; 21].

В данной работе предлагается аппроксимация диаграммы деформирования древесины при кратковременном одноосном сжатии вдоль волокон в виде параболы, моделирующей аналогичную работу других конструкционных строительных материалов [15; 18–20]. Зависимость между напряжениями σ_{c0} и относительными деформациями ε_{c0} при кратковременном одноосном сжатии имеет вид (рисунок 1):

$$\frac{\sigma_{c0}}{f_{c0}} = \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta} \right) \text{ для } |\varepsilon_{c0}| < |\varepsilon_{c0u}|, \quad (1)$$

где $\eta = \varepsilon_{c0} / \varepsilon_{c01}$;

k – коэффициент пластичности, $k = E_{c0i} / E_{c01}$;

ε_{c01} – относительные деформации древесины в точке максимального сжимающего напряжения;

$E_{c01} = \sigma_{c01} / \varepsilon_{c01}$ – модуль деформаций, МПа.

Возможность использования зависимости (1) была верифицирована на фоне экспериментальных данных. Опытный образец представлял собой призму размером 100x100x600 (мм) в соответствии с СТБ EN 408-2012. Торцевые поверхности образца были тщательно подготовлены таким образом, чтобы они были плоскими, параллельными друг другу и строго перпендикулярны к геометрической оси образца. Влажность опытного образца на момент проведения испытаний составляла 9,2%. На каждой грани образца на базе 400мм устанавливался индикатор часового типа с ценой деления 0,01мм. Образец нагружался вдоль оси с использованием шарнирных опорных подушек пресса, обеспечивающих приложение нагрузки без возникновения изгиба. Общий вид образца перед проведением испытания приведен на рисунке 2.

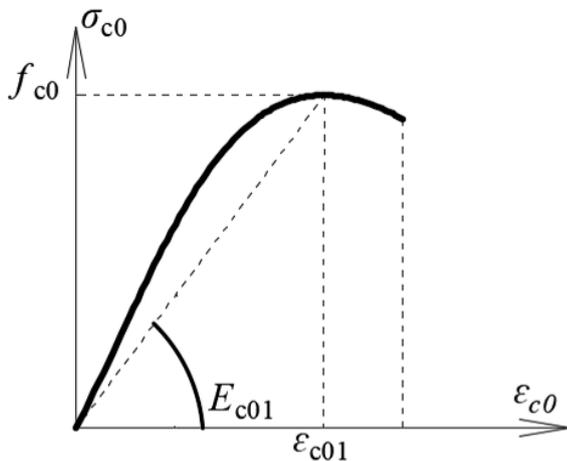


Рисунок 1. – Расчетная диаграмма деформирования для древесины при кратковременном одноосном сжатии



Рисунок 2. – Общий вид опытного образца деревянной призмы перед испытанием на сжатие

По результатам исследований была получена экспериментальная диаграмма деформирования древесины при кратковременном одноосном сжатии вплоть до разрушения, а также по формуле (1) была построена численная диаграмма (рисунок 3).

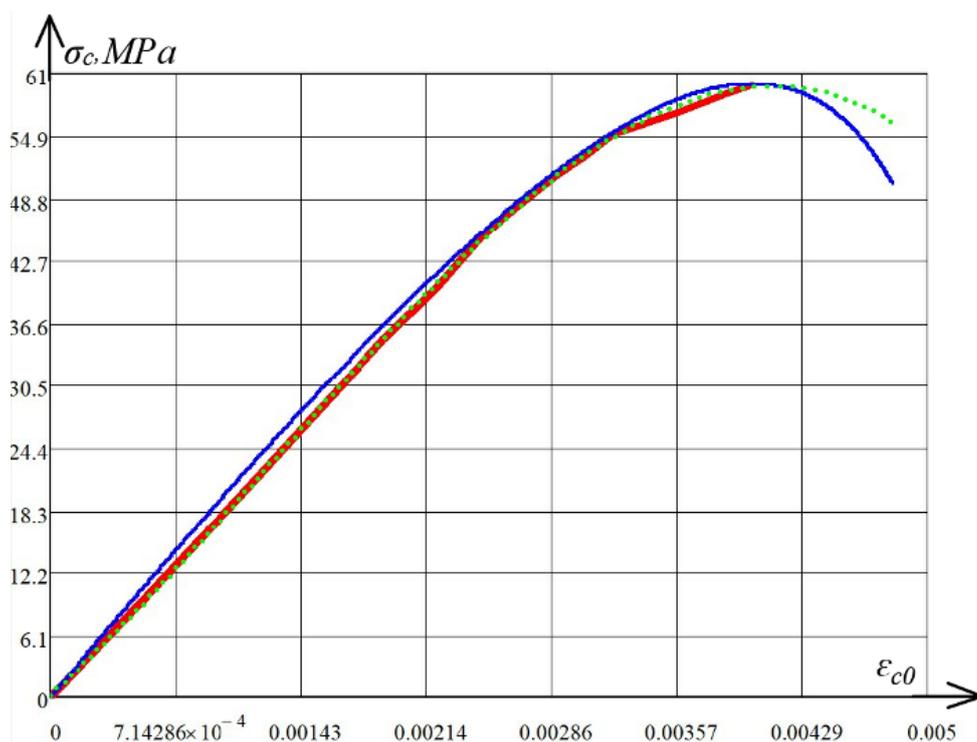


Рисунок 3. – Диаграммы деформирования древесины при кратковременном одноосном сжатии по результатам эксперимента (красная линия), аппроксимации по формуле (1) (синяя линия), по полиному третьей степени (салатовая линия)

Сравнение диаграмм деформирования на рисунке 3 показывают количественную и качественную сходимость результатов экспериментальных и численных исследований, что позволяет использовать уравнение (1) для описания диаграммы деформирования древесины при кратковременном сжатии при расчете деревянных элементов при деформационном подходе.

Для аппроксимации диаграммы деформирования древесины при растяжении вдоль волокон используется линейная функция, проходящая через точку предельной прочности древесины при растяжении f_{t0m} и соответствующие ей предельные относительные деформации ε_{t0m} и описывается следующим уравнением (рисунок 4):

$$\sigma_{t0} = \varepsilon_{t0} \cdot E_{t0} \quad (2)$$

где ε_{t0} – относительные деформации древесины при растяжении вдоль волокон;
 E_{t0} – модуль упругости древесины при растяжении вдоль волокон, Н/мм².

Возможность использования зависимости (2) была верифицирована на фоне экспериментальных данных. Опытный образец представлял собой деревянный элемент с уширенными концами для крепления специального устройства для закрепления образца в разрывной машине. Диаметр поперечного сечения рабочей части образца составлял 10 (мм) в соответствии с СТБ EN 408-2012. Влажность опытного образца на момент проведения испытаний составляла 9,2%. На двух параллельных гранях образца на базе 90 мм устанавливались измерители деформаций системы комплексного мониторинга «Терем-4» с ценой деления 0,001мм. Образец нагружался вдоль оси с обеспечением шарнирного закрепления концов образца в разрывной машине, исключающее возникновение изгиба. Общий вид образца перед проведением испытания приведен на рисунке 5.

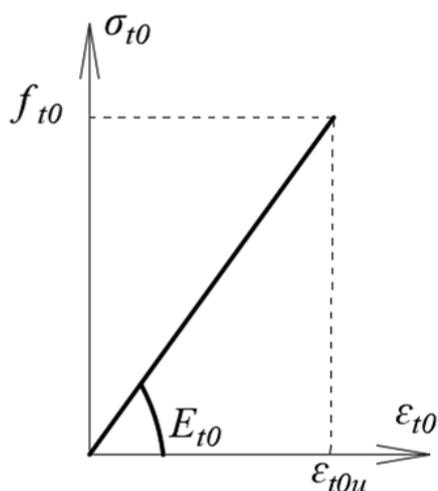


Рисунок 4. – Зависимость (2)



Рисунок 5. – Общий вид опытного образца перед испытанием на растяжение

По результатам исследований была получена экспериментальная диаграмма деформирования древесины при кратковременном одноосном растяжении вплоть до разрушения, а также по формуле (2) была построена численная диаграмма (рисунок 6).

Сравнение диаграмм деформирования на рисунке 6 показывают количественную и качественную сходимость результатов экспериментальных и численных исследований, что позволя-

ет использовать уравнение (2) для описания диаграммы деформирования древесины при кратковременном растяжении при расчете деревянных элементов при деформационном подходе.

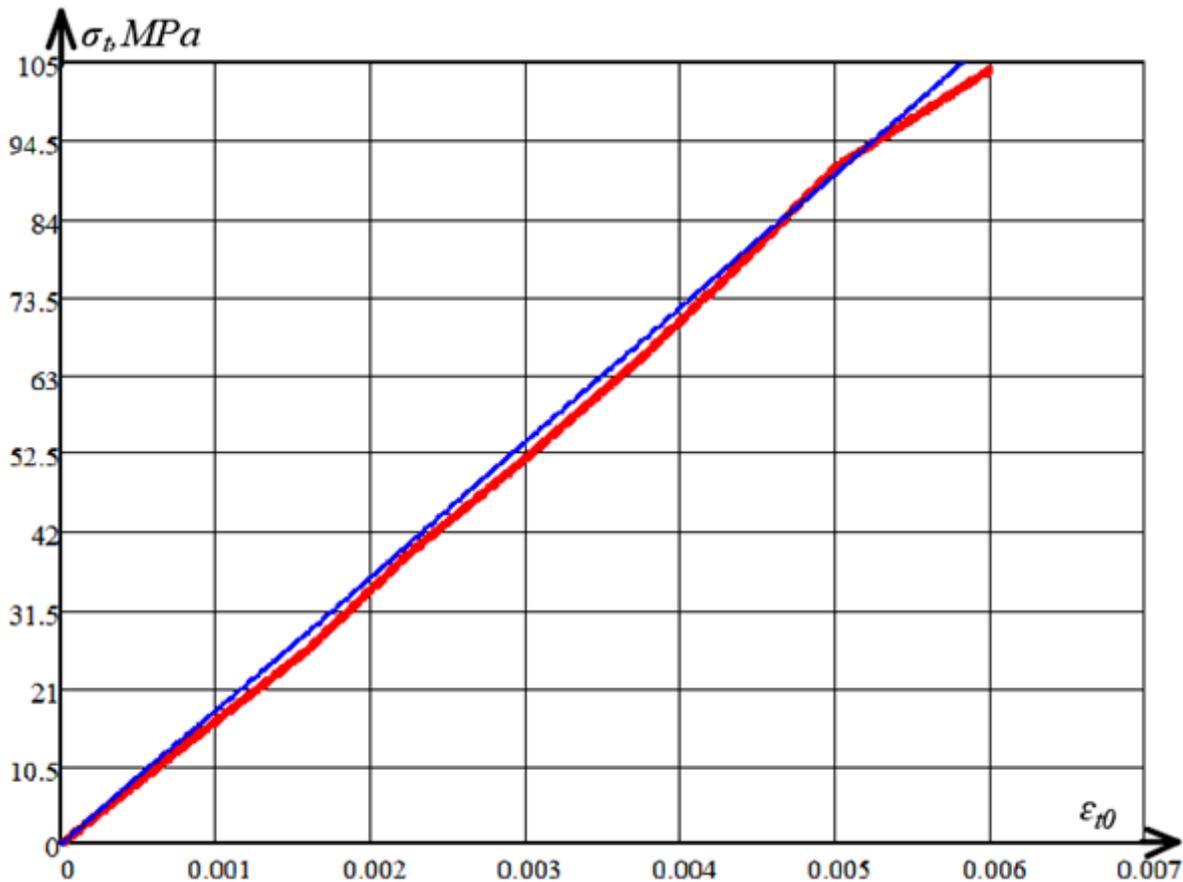
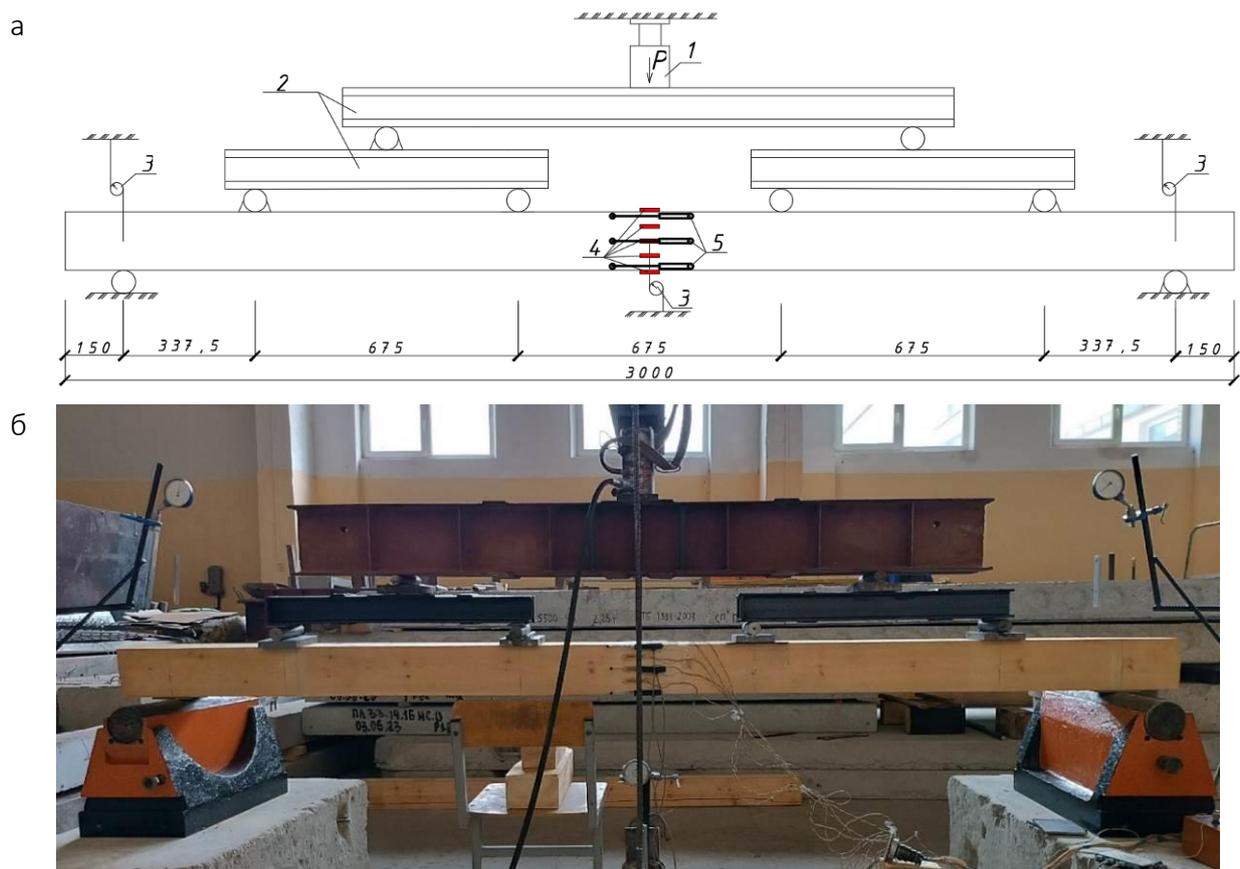


Рисунок 6. – Диаграммы деформирования древесины при кратковременном одноосном растяжении по результатам эксперимента (красная линия), аппроксимации по формуле (2) (синяя линия)

В основу предложенной методики расчета положена общая деформационная модель метода сечений. Рассматриваются поперечные сечения элемента, нормальные к продольной оси деревянного элемента. Напряженно-деформированное состояние элемента описывается системой уравнений равновесия внутренних усилий, распределения относительных деформаций по высоте поперечного сечения и дополняются диаграммами деформирования материалов. Диаграммы деформирования приняты согласно вышеизложенным положениям, теоретическая реализация деформационного подхода представлена в исследованиях [15].

Верификация предложенной методики расчета предполагается на собственных экспериментальных исследованиях.

Предполагаемый экспериментальный образец представляет собой однопролетную балку длиной 3000 мм, длина пролета 2700 мм, поперечное сечение 100x150 мм. Балка была изготовлена из древесины той же партии, которая использовалась для определения физико-механических характеристик при сжатии и растяжении. Балка будет загружена двумя сосредоточенными силами, приложенными в 1/3 пролета. При испытании будет контролироваться распределение относительных деформаций по высоте поперечного сечения в середине пролета, прогиб балки в середине пролета. Схема расстановки приборов и общий вид балки при испытании приведен на рисунке 7.



1– гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – прогибомер;
4 – тензометрические датчики; 5 – измерители деформаций

Рисунок 7. – Схема расстановки приборов (а) и общий вид испытания опытной балки (б)

Заключение. В ходе исследований аппроксимированы и верифицированы на фоне экспериментальных исследований диаграммы деформирования древесины при одноосном кратковременном сжатии и растяжении. Разработана методика экспериментальных исследований деревянных изгибаемых элементов для верификации деформационного подхода при расчете деревянных изгибаемых элементов, реализованного в исследованиях [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Oudjene M., Khelifa M. Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings //Construction and Building Materials. – 2009. – Vol. 23. – №. 11. – P. 3359-3366.
2. Reiterer A, Stanzl-Tschegg Stefanie E. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain. Mech Mater 2001; 33:705–15.
3. Sliker A. Orthotropic strains in compression parallel to grain tests. Forest Prod J 1985;35:19–26.
4. Sliker A. Measurement of the smaller Poisson ratios and related compliances for wood. Wood Fiber Sci 1989;21:252–62.
5. Conners TE, Medvecz PJ. Wood as a bimodular material. Wood Fiber Sci 1989;24:413–23.
6. Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.
7. Kucera LJ, Bariska M. On the fracture morphology in wood – Part 1: a SEM study of deformations in wood of spruce and aspen upon ultimate axial compression load. Wood Sci Technol 1982;16:2419.
8. Bariska M, Kucera LJ. On the fracture morphology in wood – Part 2: Macroscopical deformations upon ultimate axial compression in wood. Wood Sci Technol 1985;19:19–34.

9. Maiti SK, Gibson LJ, Ashby MF. Deformation and energy absorption diagrams for cellular materials. *Acta Metall* 1984;32:1963–75.
10. Poulsen JS, Moran PM, Shih CF, Byskov E. Kink band formation and band broadening in larch wood under compressive loading. *Mech Mater* 1997;26:67–77.
11. Деревянные конструкции. Строительные правила: СП 5.05.01-2021. – Введ. 01.06.2021. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. – 115 с.
12. CEN. Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussels: CEN; 2004. – 121 p.
13. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Москва, 2017. – 97 с.
14. Kharouf N, McClure G, Smith I. Elasto-plastic modelling of wood bolted connections. *Comput Struct* 2003;81:747–54.
15. Лазовский, Д. Н.; Гиль, А. И.; Глухов, Д. О. ДИАГРАММНЫЙ ПОДХОД ПРИ РАСЧЕТЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО СП 5.05.01-2021. *Вестник БрГТУ* 2024, 66-72. – DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72>
16. Dias AMPG, Van de Kuilen JW, Lopes S, Cruz H. A non-linear 3D FEM model to simulate timber–concrete joints. *Adv Eng Softw* 2007;38:522–35.
17. Вареник К.А. Аппроксимация диаграммы деформирования древесины // *Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого*. – 2013. – Т. 1. – №. 75. – С. 60-64.
18. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / International Federation for Structural Concrete (fib). – 2013. – 402 p. – DOI: <https://doi.org/10.1002/9783433604090>.
19. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск: М -во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2010. – 112 с.
20. Хаткевич, А. М. Деформационный подход к моделированию напряженно-деформированного состояния сжатых элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой / А. М. Хаткевич, Д. Н. Лазовский, Д. О. Глухов // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. – 2023. – № 3 (35). – С. 21–27. – DOI: <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27>.
21. Немировский Ю.В. Расчёт и рациональное проектирование деревянных стержневых элементов / *Современные проблемы совершенствования и развития конструкций в строительстве и транспорте: сборник научных трудов III Между-нар. научно-технич. конференции*. – Самара: Изд-во СамГАСУ, 2005. – С. 247–251.