

УДК 624.073.4

© Ш. М. Мамедов, канд. экон. наук, доцент

© Е. Г. Шабикова, магистр

© Д. В. Нижегородцев, ассистент

© Т. Н. Казакевич, канд. техн. наук, доцент

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: mamedov_am@bk.ru, shabikovaelena@yandex.ru,

mdvd0d@yandex.ru, kazakevich.t.n@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71

© Sh. M. Mamedov, PhD in Sci. Ec., Associate Professor

© E. G. Shabikova, MSc

© D. V. Nizhegorodtsev, assistant lecturer

© T. N. Kazakevich, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: mamedov_am@bk.ru, shabikovaelena@yandex.ru,

mdvd0d@yandex.ru, kazakevich.t.n@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАНЕЛЕЙ ИЗ ПЕРЕКРЕСТНО КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

METHOD FOR CALCULATING CROSS LAMINATED TIMBER PANELS

Панели из перекрестно клееной древесины (CLT) активно применяются при строительстве зданий и сооружений за рубежом. В нормативной документации Российской Федерации отсутствуют положения по расчету таких конструкций. В работе рассматривается методика расчета перекрытия из CLT панели по балочной теории. Приводятся основные рекомендации по проектированию конструкций из перекрестно клееной древесины, допущения разрабатываемой методики. Значительное внимание уделяется основным расчетным характеристикам изгибаемого элемента. Приводятся сравнительные значения этих характеристик, приведенных в различных источниках. Предлагается коэффициент, учитывающий особенности CLT панелей при расчетах.

Ключевые слова: CLT, расчет, методика, перекрытие, балочная теория, инженерная древесина, перекрестно клееная древесина.

Cross-laminated timber (CLT) panels are widely used in the construction of buildings and structures abroad. Regulatory documentation in the Russian Federation does not contain provisions for calculating such structures. The paper considers the method of calculating the floor slab made of CLT panel using the Euler Bernoulli beam theory. General recommendations for the design of cross-glued wood structures are offered, and assumptions of the developed methodology are given. Much attention is paid to the main design characteristics of the bent element. Comparative values of these characteristics from various sources are given. A coefficient is proposed to be used taking into account the features of CLT panels in calculations.

Keywords: CLT, calculation, methodology, floor slab, beam theory, engineering wood, cross-laminated timber.

Перекрестно клееная древесина (англ. cross-laminated timber, или CLT) — инновационный материал, набирающий популярность в строительстве жилых и общественных зданий различной этажности. Конструктивно данный материал представляет собой склеенные между собой ламели древесины преимущественно хвойных пород. Отличительной особенностью является направление волокон ламелей древесины, составляющих пакет: направление волокон ламелей одного слоя перпендикулярно направлению волокон ламелей соседних слоев (рис. 1).

Особенность структуры материала, заключающаяся в перпендикулярном направлении каж-

дого последующего слоя, обуславливает системный эффект. При любом виде загрузки напряжения возникают во всех однонаправленных ламелях, составляющих панель, что увеличивает общую прочность и жесткость материала.

CLT — один из самых быстрорастущих сегментов рынка строительных материалов в Европе [1, 2]. Известны случаи применения CLT-панелей при возведении зданий большой этажности, к примеру, 18-этажное здание высотой 85 м в г. Брумунддал (Норвегия) [3], 24-этажное здание НоНо Wien высотой 84 м в Вене (Австрия) [4]. В таких сооружениях CLT-панели

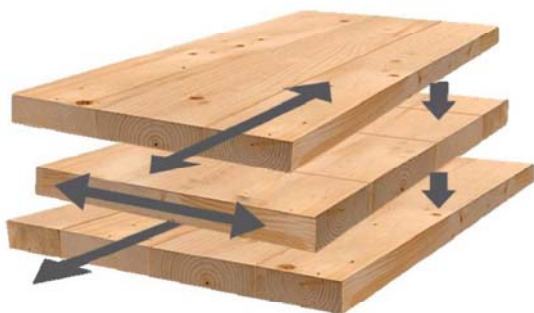


Рис. 1. CLT-панель

применяются в комбинации с LVL-брусом [5, 6] и железобетонными конструкциями.

Опыт строительства в Канаде, США, Австрии, Германии, скандинавских странах доказал надежность использования этого материала. Его высокая прочность при малом весе, экологичность, сопротивление теплопередаче, огнестойкость подтверждают конкурентоспособность CLT относительно основных материалов, используемых для несущих конструкций зданий. Сравнительно большие геометрические размеры панелей (16,5×3,65 м) обеспечивают высокую скорость возведения конструкций.

Несмотря на возрастающий спрос на CLT-технологию в Европе и регулярно проводимые исследования различных физико-механических свойств данного материала [7, 8], в Российской Федерации не наблюдается его массового включения в строительную индустрию. Одним из основных сдерживающих факторов, тормозящих внедрение технологии, можно считать неполноту нормативной базы. На территории РФ действует ГОСТ Р 56706–2015 «Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия».

На данный момент в странах, активно использующих технологию возведения зданий из CLT, действуют локальные нормы, существуют пособия и руководства по проектированию. Предлагаемая методика основывается на международном опыте проектирования и строительства зданий с использованием технологии CLT [9–13].

Так как чаще CLT применяется в конструкциях зданий в качестве перекрытий и стеновых панелей, актуально разработать методику расчета панели CLT по балочной схеме.

Основные предпосылки к расчету:

- CLT рассматривается как ортотропная панель с тремя взаимно перпендикулярными плоскостями симметрии с разными свойствами в каждом направлении;
- следует избегать растягивающих усилий в направлении, перпендикулярном главному направлению волокон;
- следует избегать эксцентриситета приложения нагрузки, комбинаций нагрузок, вызывающих кручение;
- для малых пролетов сдвиговые напряжения в поперечном слое могут стать критическими.

Плиты перекрытия, опертые по двум сторонам, при расчете на изгиб чаще всего рассматривают как изгибаемую балку Бернулли – Эйлера. При изгибе возникают сдвиговые напряжения в поперечных слоях, поэтому для учета сдвиговых деформаций (рис. 2) при оценке напряженно-деформированного состояния элемента рекомендуется использовать балочную теорию С. П. Тимошенко [14].

Основные допущения, принятые в рамках расчета:

- плита из CLT рассматривается как балка шириной 1 м;

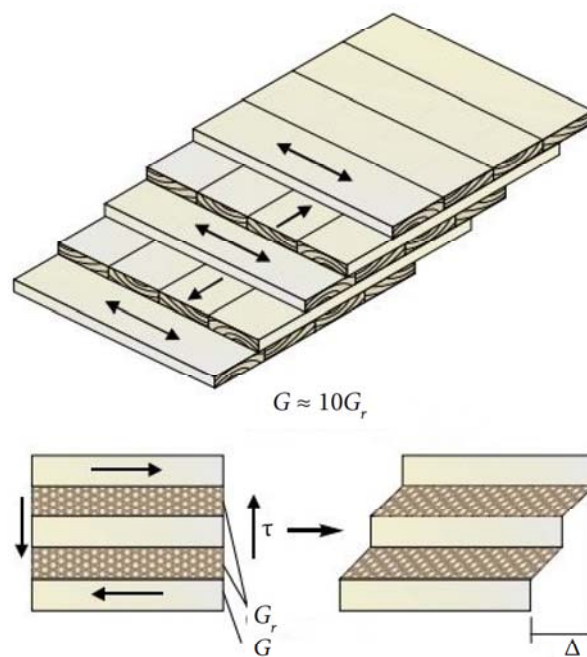


Рис. 2. Сдвиговые деформации поперечных слоев панели

- плоскости склеивания слоев CLT-панели рассматриваются как жесткие неподатливые соединаения;

- модуль упругости поперечных слоев E_{90} принимается равным 0, так как включение этих слоев в работу не дает существенного вклада в несущую способность;

- учитывается сдвиговая податливость поперечных слоев.

Напряжения σ и деформации w определяются по формулам (1) и (2):

$$\sigma = \frac{M}{W_{eff}} = \frac{0,5Mh}{I_{eff}}, \quad (1)$$

где M — изгибающий момент; W_{eff} — момент сопротивления эффективного сечения; h — высота сечения плиты; I_{eff} — момент инерции эффективного сечения;

$$w = \frac{1}{E_{ref} I_{eff}} \int MM_1 dx + \frac{1}{G_{ref} A_{n,eff} \kappa} \int QQ_1 dx, \quad (2)$$

где E_{ref} — модуль упругости расчетного сечения; G_{ref} — модуль сдвига расчетного сечения; $A_{n,eff}$ — площадь нетто расчетного приведенного сечения; κ — корректирующий коэффициент сдвига для соответствующего поперечного сечения; Q — поперечная сила.

Для различных толщин ламелей CLT корректирующий коэффициент сдвига может быть вычислен следующим образом:

$$\kappa = \frac{(\sum(EI + EAa^2))^2}{G_i b t_i \cdot \int_h \frac{S^2(z) E^2(z)}{G(z) b(z)} dz}. \quad (3)$$

Касательные напряжения для рабочих продольных слоев определяются как τ_{090} , для поперечных слоев — как τ_{9090} :

$$\tau_{090} = \frac{QS_{eff,090}}{I_{eff} b_x}; \quad (4)$$

$$\tau_{9090} = \frac{QS_{eff,9090}}{I_{eff} b_y}. \quad (5)$$

Значения расчетных параметров приведенного сечения, таких как площадь приведенного поперечного сечения $A_{n,eff}$, момент инерции I_{eff} , статический момент сечения относительно нейтральной оси S_{eff} определяются по формулам

$$A_{n,eff} = \sum \frac{E_i}{E_{ref}} t_i b_x; \quad (6)$$

$$I_{eff} = \sum \frac{E_i}{E_{ref}} \frac{b_x t_i^3}{12} + \sum \frac{E_i}{E_{ref}} b_x t_i a_i^2; \quad (7)$$

$$S_{eff} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_{ref}} b_x t_i a_i. \quad (8)$$

Геометрические характеристики пятислойной плиты CLT представлены на рис. 3.

Эпюры нормальных и касательных напряжений с учетом условия $E_{90} = 0$ и при $E_{90} \neq 0$ изображены на рис. 4.

Расчет изгибаемых элементов на прочность по СП 64.13330.2017 проводится по формуле

$$\sigma \leq R_{и}, \quad (9)$$

где σ — нормальные напряжения в элементе, рассчитываемые по формуле (1); $R_{и}$ — расчетное сопротивление изгибу.

Условие прочности по скалыванию

$$\tau \leq R_{ск}, \quad (10)$$

где τ — касательные напряжения в элементе, рассчитываемые по формулам (4), (5); $R_{ск}$ — расчетное сопротивление скалыванию при изгибе.

Для несущих конструкций многоэтажных зданий рекомендуется производить панели CLT из досок класса прочности не менее С24. Поэтому справедливым можно считать использование методики определения расчетного сопротивления по СП 64.13330.2017.

В соответствии с указанной выше методикой расчетное сопротивление древесины и древесных материалов, отсортированных по классам прочности, определяется по формуле

$$R^P = \frac{R^H m_{дл} \prod m_i}{\gamma_m}, \quad (11)$$

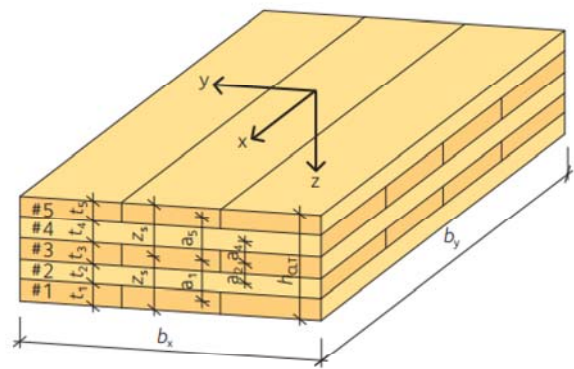


Рис. 3. Пятислойная CLT-панель симметричного сечения

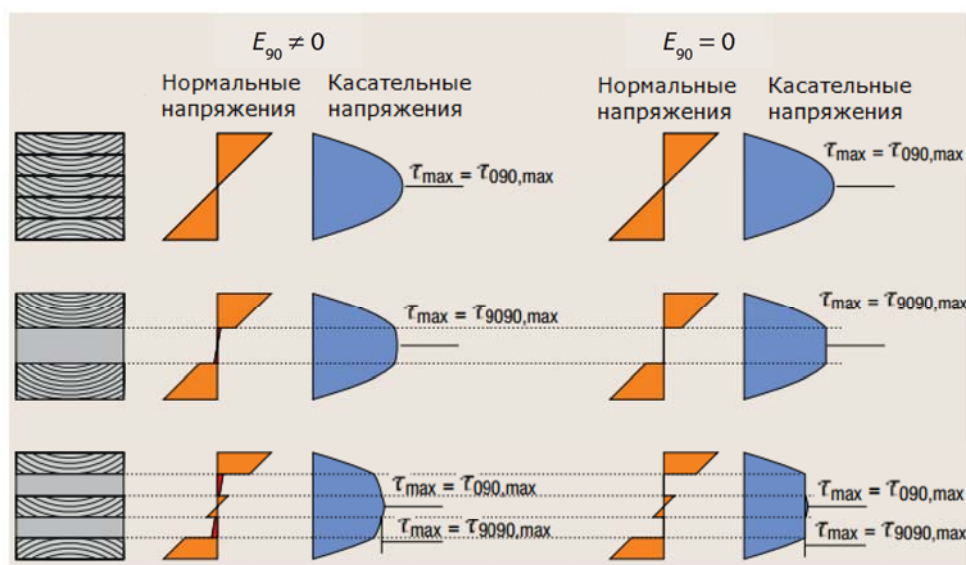


Рис. 4. Эпюры нормальных и касательных напряжений при различном значении E_{90}

где R^n — нормативная прочность материала, МПа; $m_{дл}$ — коэффициент длительной прочности, определяемый в зависимости от длительности загрузки; $\prod m_i$ — произведение коэффициентов условий работы; γ_m — коэффициент надежности по материалу.

В таблице приведены нормативные сопротивления древесины и CLT на изгиб, а также модули упругости и сдвига из различных источников для 1-го сорта и класса прочности используемого сырья С24.

При проектировании и расчете панелей из перекрестно клееной древесины применяются значения характеристической прочности и жесткости ламелей. Для учета системного эффекта, возникающего в панели при изгибе и растяже-

нии, предлагается ввести дополнительно коэффициент условия работы m_{CLT} , детерминированный особенностью структуры с чередованием направлений волокон слоев. Коэффициент зависит от нагруженной ширины элемента и изменяется в диапазоне от 1 до 1,15 при ширине от 0 до 1,5 м соответственно. Промежуточные значения принимаются по интерполяции. При ширине панелей более 1,5 м значение коэффициента принимается равным 1,15. Применять коэффициент следует аналогично прочим коэффициентам условий работы (см. п. 6.9 СП 64.13330.2017) для определения расчетного сопротивления древесины CLT-панели.

Допустимо комбинировать расчет по вышеуказанным формулам (1)–(11) с расчетом

Расчетные характеристики CLT

Параметр	СП 64.13330		Eurocode*	CLT** (C24)
	Цельная древесина, 1-й сорт	Цельная древесина, C24		
Изгиб вдоль волокон, МПа	21	24	24	24
Модуль упругости вдоль волокон E_0 , МПа	10 000	11 000	11 000	11 000
Модуль упругости поперек волокон E_{90} , МПа	400	370	370	400
Модуль сдвига G_0 , МПа	500	690	690	690
Модуль сдвига поперек волокон G_R , МПа	—	—	50	50

* EN 1995-1-1. Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1-1: General — Common rules and rules for buildings, 2014.

** The CLT Handbook // Föreningen Sveriges Skogsindustrier, 2019. 186 p. ISBN 978-91-983214-4-3.

методом конечных элементов, например в программном комплексе Dlubal RFEM. Расчетную модель здания в данном случае удобно готовить с использованием технологий информационного моделирования [15]. Возможные способы применения данного ПО для расчета панелей из CLT, в том числе с применением коэффициента m_{CLT} рассмотрены в статье [16].

Таким образом, вопрос разработки методики расчета конструкций из CLT является наиболее актуальным в условиях развивающейся в РФ технологии. Представленная в данной работе методика расчета перекрытия из CLT по балочной теории может быть использована в последующих редакциях нормативных документов по проектированию конструкций из перекрестно клееной древесины. Предложенный коэффициент m_{CLT} позволяет учесть особенности строения CLT-панелей при определении расчетных сопротивлений древесины ламелей. Существует необходимость продолжить исследования, подтвердив данные гипотезы экспериментальными способами.

Библиографический список

1. *Bernasconi A.* Four residential towers as CLT timber construction in the city of Milan // *World Conference on Timber Engineering, WCTE 2016*. Pp. 5771–5778.
2. *Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A.* Cross laminated timber (CLT): overview and development // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. Vol. 74. Pp. 331–351. DOI:10.1007/s00107-015-0999-5.
3. *Черных А. Г., Граб Л., Шадрин Е. С.* Использование в России норвежского опыта многоэтажного деревянного строительства // *Студент года 2020: сб. ст. Междунар. науч.-исслед. конкурса*. Петрозаводск, 11.05.2020. С. 107–116.
4. *Маевская М. Е.* Деревянные небоскребы. Традиционные материалы в инновационных технологиях современного высотного строительства // *Современная архитектура мира*. 2018. № 11. С. 125–151.
5. *Черных А. Г., Данилов Е. В., Коваль П. С., Мамедов Ш. М.* Обзор исследований, нормирования и применения LVL бруса в отечественной и зарубежной строительной практике // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 1 (78). С. 100–106.
6. *Черных А. Г., Данилов Е. В., Коваль П. С., Мамедов Ш. М.* Расчет элементов строительных конструк-

ций, клееных из однонаправленного шпона (LVL). СПб.: СПбГАСУ, 2019. 125 с.

7. *Lukacs I., Björnfort A., Tomasi R.* Strength and stiffness of cross-laminated timber (CLT) shear walls: State-of-the-art of analytical approaches // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 178. Pp. 136–147. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.126.

8. *Ringhofer A., Brandner R., Blaß H. J.* Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 849–861.

9. *Harris R.* Cross laminated timber // *Wood Composites*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2015. Pp. 141–167.

10. *Stürzenbecher R., Hofstetter K., Eberhardsteiner J.* Structural design of Cross Laminated Timber (CLT) by advanced plate theories // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70 (9). Pp. 1368–1379. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.04.016>.

11. *Mestek P., Kreuzinger H., Winter S.* Design of Cross Laminated Timber (CLT) // *10th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2008, Miyazaki, Japan*. Pp. 156–163.

12. *Blass H. J., Fellmoser P.* Design of solid wood panels with cross layers // *8th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2004, Lahti, Finland*. Pp. 543–548.

13. *Jöbstl R. A., Schickhofer G.* Comparative examination of creep of GTL and CLT-slabs in bending // *CIB-W18 Timber Structures. A Review of Proceedings*. 2004.

14. *Крысько В. А., Жигалов М. В., Салтыкова О. А.* Нелинейная динамика балок Эйлера–Бернулли и типа Тимошенко // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2008. № 6. С. 7–27.

15. *Черных А. Г., Нижегородцев Д. В., Кубасевич А. Е., Цыгановкин В. В.* Проектирование и расчет строительных конструкций с применением технологий информационного моделирования // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 3 (80). С. 72–78.

16. *Gotsadze A. G., Vasin E. E., Shabikova E. G.* Calculation algorithm of the building of CLT for the Russian Federation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 775.

References

1. *Bernasconi A.* Four residential towers as CLT timber construction in the city of Milan. *World Conference on Timber Engineering, WCTE, 2016*, pp. 5771–5778.
2. *Brandner R., et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, vol. 74, pp. 331–351. DOI: 10.1007/s00107-015-0999-5.

3. Chernykh A. G., Grab L., Shadrin E. S. *Ispol'zovanie v Rossii norvezhskogo opyta mnogoetazhnogo derevyannogo stroitel'stva* [Using the Norwegian experience of multi-storey wooden construction in Russia]. *Sb. st. Mezhdunar. nauch.-issled. konkursa «Student goda 2020»* [Coll. works of the Int. sci. research competition "Student of the Year 2020"]. Petrozavodsk, 2020, pp. 107–116.
4. Maevskaya M. E. *Derevyannye neboskreby. Traditsionnye materialy v innovatsionnykh tekhnologiyakh sovremennogo vyshotnogo stroitel'stva* [Wooden skyscrapers. Traditional materials in innovative technologies of modern high-rise construction]. *Sovremennaya arkhitektura mira – Modern architecture of the world*, 2018, no. 11, pp. 125–151.
5. Chernykh A. G., Danilov E. V., Koval' P. S., Mamedov Sh. M. *Obzor issledovaniy, normirovaniya i primeneniya LVL brusa v otechestvennoy i zarubezhnoy stroitel'noy praktike* [Review of research works, regulation and application of LVL beam in domestic and foreign construction practice]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 1 (78), pp. 100–106.
6. Chernykh A. G., Danilov E. V., Koval' P. S., Mamedov Sh. M. *Raschet elementov stroitel'nykh konstruktсий, kleennykh iz odnonapravlen'nogo shpona (LVL)* [Calculation of elements of building structures laminated with unidirectional veneer (LVL)]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2019, 125 p.
7. Lukacs I., Björnfort A., Tomasi R. Strength and stiffness of cross-laminated timber (CLT) shear walls: State-of-the-art of analytical approaches. *Engineering Structures*, 2019, vol. 178, pp. 136–147. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.05.126.
8. Ringhofer A., Brandner R., Bläß H. J. Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections. *Engineering Structures*, 2018, vol. 171, pp. 849–861.
9. Harris R. Cross laminated timber. *Wood Composites*. Cambridge, UK, Woodhead Publ., 2015, pp. 141–167.
10. Stürzenbecher R., Hofstetter K., Eberhardsteiner J. Structural design of cross laminated timber (CLT) by advanced plate theories. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70 (9), pp. 1368–1379. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.04.016>.
11. Mestek P., Kreuzinger H., Winter S. *Design of cross laminated timber (CLT)*. Proc. of the 10-th World Conference on Timber Engineering, WCTE Publ., 2008, Miyazaki, Japan, pp. 156–163.
12. Blass H. J., Fellmoser P. *Design of solid wood panels with cross layers*. Proc. of the 8-th World Conference on Timber Engineering, WCTE Publ., 2004, Lahti, Finland, pp. 543–548.
13. Jöbstl R. A., Schickhofer G. *Comparative examination of creep of GTL and CLT-slabs in bending*. CIB-W18 Timber Structures. A Review of Proceedings, 2004.
14. Krysko V. A., Zhigalov M. V., Saltykova O. A. *Nelineynaya dinamika balok Eylera-Bernulli i tipa Timoshenko* [Nonlinear dynamics of Euler-Bernoulli beams and Timoshenko type]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie – News of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 2008, no. 6, pp. 7–27.
15. Chernykh A. G., Nizhegorodtsev D. V., Kubasevich A. E., Tsyganovkin V. V. *Proektirovanie i raschet stroitel'nykh konstruktсий s primeneniem tekhnologiy informatsionnogo modelirovaniya* [Design and calculation of building structures using BIM technologies]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 3 (80), pp. 72–78.
16. Gotsadze A. G., Vasin E. E., Shabikova E. G. Calculation algorithm of the building of CLT for the Russian Federation. *Proc. of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 775.