

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.11:674.028

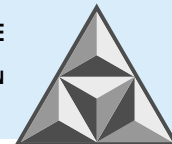
Определение коэффициента теплопроводности деревянных клееных конструкций с учетом макроструктуры и плотности древесины

А.А. Титунин

Андрей Александрович Титунин

Костромской государственный университет, Кострома, Российская Федерация

a_titunin@ksu.edu.ru



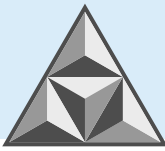
Рассмотрены расчетный и экспериментальный методы определения коэффициента теплопроводности деревянных клееных конструкций. Показано, что при проектировании теплозащиты ограждающих конструкций в виде CLT-панелей или деревянного клееного бруса используют справочные данные о коэффициенте теплопроводности для сосны или ели. На практике значение коэффициента теплопроводности может оказаться меньше справочного; как следствие, получают завышенные параметры ограждающих конструкций по толщине, что не оправдано с точки зрения материалоемкости строительства. Рассматривая древесину как анизотропный материал, при обосновании параметров конструкций следует учитывать особенности макростроения и различия в плотности отдельных слоев, а также породу древесины. На основе физической картины процесса теплопроводности и фундаментальных законов тепломассопереноса выдвинута гипотеза о необходимости проведения корректировки результатов расчетов с учетом фактических значений коэффициента теплопроводности многослойных деревянных клееных конструкций. Представлены результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности древесины сосны и осины с использованием методов стационарного и нестационарного теплового потока. В зависимости от плотности и породы древесины, могут быть получены экспериментальные значения коэффициента теплопроводности от 0.102 до 0.115 Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Ключевые слова: деревянные клееные конструкции, деревянное домостроение, теплопроводность, методы определения теплопроводности

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 22-29-20267.

Для цитирования:

Титунин А.А. Определение коэффициента теплопроводности деревянных клееных конструкций с учетом макроструктуры и плотности древесины // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 1. С. 8-18. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1_2024



SCIENTIFIC ARTICLE

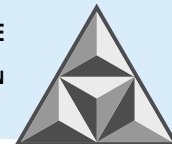
Thermal conductivity coefficient determination of wooden glued structures taking into account macrostructure and wood density

A.A. Titunin

Andrey A. Titunin

Kostroma State University, Kostroma, Russia

a_titunin@ksu.edu.ru



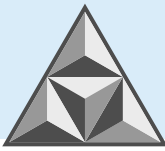
The paper considers calculated and experimental methods of determining the thermal conductivity coefficient of wooden glued structures. The author shows that when designing the thermal protection of building enclosure structures in the form of CLT-panels or wooden glued laminated timber, one uses reference data on the thermal conductivity coefficient for pine or spruce. In practice, the value of the thermal conductivity coefficient may be less than the reference value; as a consequence, the thickness of the building enclosing structures is overestimated. This is not reasonable in terms of material intensity of construction. When considering wood as an anisotropic material, the peculiarities of the macrostructure and differences in the density of individual layers, as well as the wood species, should be taken into account when determining the parameters of structures. Based on the physical description of the thermal conductivity process and the fundamental laws of heat and mass transfer, the author proposes that it is necessary to adjust the results of calculations to the actual values of the thermal conductivity coefficient of multilayer wooden glued structures. The paper presents the results of experimental determination of the thermal conductivity coefficient of pine and aspen wood using steady-state and unsteady heat flow methods. It is shown that, depending on the density and wood species, experimental values of the thermal conductivity coefficient from 0.102 to 0.115 W·m⁻¹·K⁻¹ can be obtained.

Keywords: wooden glued structures, wooden house building, thermal conductivity, methods of thermal conductivity determination

Acknowledgments: The study was financially supported by the Russian Science Foundation and the administration of the Kostroma region within the framework of scientific project No. 22-29-20267.

For citation:

Titunin, A.A. (2024) Thermal conductivity coefficient determination of wooden glued structures taking into account macrostructure and wood density, *Smart Composite in Construction*, 5(1), pp. 8-18 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1_2024

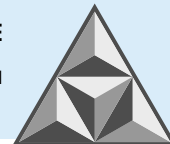


ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением в России темпов и объемов строительства (в том числе – малоэтажного) растет спрос на новые конструкционные материалы – альтернативы традиционному кирпичу, дереву, бетону и полимерам. Фиксация объемов ввода жилья в 2024 году на уровне 120 млн м² является одной из приоритетных задач для страны. Из них 40 млн м², по данным Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, должно обеспечить деревянное домостроение – как мало-, так и многоэтажное (до семи этажей) [1]. Проектирование и строительство многоэтажных зданий в России, по сравнению с мировой практикой, является инновационным процессом. В основном, встречаются только единичные примеры многоэтажного деревянного домостроения. В качестве примера можно отметить строительство в Новосибирской области многоэтажного 16-квартирного здания с каркасом из LVL-бруса (*Laminated Veneer Lumber* (англ.) – «пиломатериал из слоеного шпона»). Другой пример – строительство и сдача в декабре 2022 года в эксплуатацию в г. Соколе Вологодской области двух четырехэтажных 32-квартирных домов из CLT-панелей (от англ. *Cross-Laminated Timber* – «перекрестно-клееная древесина»). Такие панели уже несколько лет являются предметом исследований российских ученых. Уже доказано, что деревянные клееные конструкции на самом деле не являются столь же пожароопасными, как обычная древесина. Предел огнестойкости у CLT-панелей составляет до 120 мин, что значительно выше, чем у железобетонных или стальных конструкций [2-5]. Многие специалисты отмечают, что клееные конструкции в виде бруса и CLT-панелей могут успешно использоваться не только в малоэтажном строительстве, но и при возведении многоэтажных производственных и гражданских зданий [3, 6-8]. Однако, с точки зрения теплотехнических характеристик деревянных клееных конструкций, до сих пор отсутствует понимание, какое значение коэффициента теплопроводности следует использовать при проектировании теплозащиты зданий и определении толщины ограждающих конструкций.

На сегодняшний день при проектировании теплозащиты пользуются нормами [9], в которых коэффициент теплопроводности λ поперек волокон принимается для конструкций из древесины – сосны и ели, в зависимости от условий эксплуатации зданий, равными 0.14 и 0.18 Вт·м⁻¹·К⁻¹ соответственно. В то же время в ряде источников встречаются значения коэффициента λ от 0.10 [10] до 0.13 Вт·м⁻¹·К⁻¹ [2]. Очевидно, проектировщики должны руководствоваться официально утвержденными нормативными документами. При этом следует учитывать, что, по сравнению с нормативными, пониженные значения коэффициента теплопроводности для различных деревянных клееных конструкций указываются исследователями неслучайно. По сравнению с натуральной, клееная древесина лишена значительной части пороков в виде ложного ядра, крупных сучков, смоляных кармашков и др., которые повышают теплопроводность. Поэтому в ограждающих конструкциях из клееного деревянного бруса, LVL-бруса, CLT-панелей и других аналогичных материалов следует рассматривать следующие виды теплообмена: теплопроводность – молекулярный перенос теплоты, возникающий из-за неоднородности распределения температуры по толщине материала и осуществляемый посредством теплового движения микрочастиц древесины; теплопередача – процесс теплообмена между внутренним и внешним пространством через разделяющую стенку. Явление переноса влаги, возникающее в процессе парообразования и конденсации водяных паров, при влажности древесины $\leq 10\%$ можно не рассматривать.

При теоретическом описании процесса теплопроводности необходим учет макроструктуры древесины. В частности, с увеличением плотности сухой древесины,



обусловленным возрастанием в единице объема доли древесинного вещества, теплопроводность также увеличивается. Это объясняется тем, что древесинное вещество имеет примерно в 20 раз больший коэффициент теплопроводности $\lambda_{д.в.}$, чем воздух. Поскольку микрофибриллы ориентированы преимущественно вдоль оси клеток, теплопроводность в этом направлении в 1.5-2.0 раз выше, чем в поперечном направлении. Увлажнение древесины, то есть замещение содержащегося в ней воздуха водой, имеющей в 23 раза большую теплопроводность, приводит к возрастанию теплопроводности древесины. По мере заполнения полостей клеток водой скорость изменения функции $\lambda = f(W)$ постепенно уменьшается [11-13].

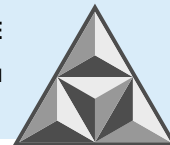
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целью экспериментальных исследований являлось определение фактического коэффициента теплопроводности деревянных клееных конструкций. Для этого использовали стандартный измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 100 (рис. 1), работающий при стационарном тепловом режиме, и образцы, полученные из семислойного деревянного клееного бруса с внутренними ламелями из сосны, наружными – из осины. Принцип работы прибора основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым граням образца.



Рис. 1. Внешний вид измерителя теплопроводности
Fig. 1. Appearance of the thermal conductivity meter

Образцы композиционного материала для проведения опытов изготавливали в виде прямоугольного параллелепипеда, наибольшие лицевые грани которого имели форму квадрата со стороной 100 мм. Длину и ширину образца измеряли линейкой с погрешностью ≤ 0.5 мм. Толщина измеряемого образца составляла от 3 до 28 мм и контролировалась с помощью штангенциркуля с погрешностью $\leq \pm 0.1$ мм в четырех углах на расстоянии (50 ± 5) мм от вершины угла к центру каждой стороны. За толщину образца принимали среднее арифметическое значение из четырех результатов измерений. Также по стандартной методике определялась плотность образца и его влажность.



На первом этапе эксперимента определяли коэффициент теплопроводности отдельно для каждой породы и образца, выпиленного таким образом, чтобы он имел в средней части клеевой шов. Определение для образцов осуществляли трижды; средние арифметические значения заносили в табл. 1.

Таблица 1. Результаты лабораторных испытаний по определению коэффициента теплопроводности при стационарном тепловом потоке

Table 1. Results of laboratory tests to determine the thermal conductivity coefficient at steady-state heat flux

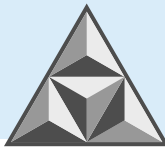
Порода	Толщина образца, мм	Плотность, г·см ⁻³	Среднее арифметическое значение коэффициента теплопроводности, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Среднее квадратическое отклонение результатов опытов	Относительное отклонение от справочных данных, % (для условий эксплуатации Б)
Сосна	20.3	0.379	0.105	0.003	41.67
Осина	20.2	0.450	0.115	0.001	36.11
Сосна + осина	20.0	0.423	0.109	0.002	39.44

На втором этапе методом теплового зонда (нестационарного теплового потока) определяли коэффициент теплопроводности семислойного клееного бруса с толщиной ламелей 20 мм (с наружными ламелями из осины, внутренними – из сосны). При этом зонд в боковой поверхности бруса устанавливали перпендикулярно направлению волокон, с торца бруса – в направлении вдоль волокон (рис. 2).



Рис. 2. Измерение коэффициента теплопроводности цилиндрическим зондом
Fig. 2. Measurement of the thermal conductivity coefficient with a cylindrical probe

Средние арифметические значения коэффициента теплопроводности заносили в табл. 2. Согласно инструкции [14], перед началом каждого опыта учитывали значение удельной теплоемкости древесины и плотность материала. В нашем случае удельная теплоемкость принималась из справочной литературы [15] и составляла 2.1 кДж·кг⁻¹·К⁻¹.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе результатов определения коэффициента теплопроводности, приведенных в табл. 1, видно, что наименьшее значение коэффициента $\lambda = 0.105 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ соответствует образцам из сосновой древесины плотностью $\rho = 0.379 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, а наибольшее $\lambda = 0.115 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ – образцам из осиновой древесины плотностью $\rho = 0.450 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$. По полученным значениям коэффициента теплопроводности выполнен расчет эквивалентного коэффициента $\lambda_{\text{ЭКВ}}$ для образца, склеенного из сосны и осины, с использованием известной формулы [9]:

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum \delta_i}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

где δ_i – толщина i -слоя материала, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -слоя материала, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$;

i – число слоев.

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{0.02 + 0.02}{\frac{0.01}{0.105} + \frac{0.01}{0.115}} = 0.109 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}.$$

Затем экспериментально определяли коэффициент теплопроводности для образца, склеенного из сосны и осины с общей плотностью $\rho = 0.423 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$. По результатам дублированных опытов получено значение коэффициента теплопроводности $\lambda = 0.109 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, которое не отличается от расчетного. Близкие по значениям результаты коэффициента теплопроводности многослойных клееных конструкций (в частности, для CLT-панелей) приводятся в публикациях Е.А. Трейбакс [2] и В. Падерина [10].

Полученный результат свидетельствует о целесообразности применения расчетного метода определения коэффициента теплопроводности многослойных клееных конструкций с использованием результатов экспериментальной проверки фактического коэффициента теплопроводности древесины отдельных слоев. В условиях производства такие опыты можно проводить для партии заготовок, отбирая образцы с учетом различной макроструктуры и плотности. Для осиновой древесины, более однородной по макроструктуре, среднее квадратическое отклонение оказалось минимальным (0.001). Наличие в составе годовичных слоев сосны ярко выраженных зон ранней и поздней древесины, отличающихся как по строению, так и по плотности, привело к большому разбросу значений коэффициента теплопроводности (среднее квадратическое отклонение составило 0.003). Поэтому в ходе экспериментальной проверки тепловых свойств хвойной древесины число дублированных опытов следует увеличить.

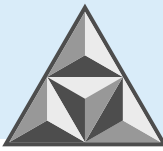
При сравнении значений коэффициента теплопроводности, приведенных в справочной литературе и определенных экспериментально, выявлено их относительное отклонение в пределах 36.11...41.67%. Этот факт указывает на необходимость проведения контрольных измерений коэффициента теплопроводности во избежание перерасхода материалов при устройстве теплоизоляции ограждающих конструкций.

На втором этапе исследований при определении коэффициента теплопроводности методом цилиндрического зонда получены результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Результаты лабораторных испытаний по определению коэффициента теплопроводности методом цилиндрического зонда

Table 2. Results of laboratory tests on determination of thermal conductivity coefficient by cylindrical probe method

Положение зонда относительно направления волокон древесины	Среднее арифметическое значение коэффициента теплопроводности, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	Среднее квадратическое отклонение результатов опытов	Отклонение значений λ , полученных экспериментально, от нормативных, %
Вдоль	0.118	0.004	34.44
Поперек	0.212	0.006	7.82



Из табл. 2 видно, что при установке цилиндрического зонда в боковой поверхности клееного бруса перпендикулярно направлению волокон древесины значение коэффициента теплопроводности получается выше, чем при расположении зонда вдоль волокон, что полностью согласуется с фундаментальными положениями в области переноса тепла в материалах неоднородной структуры [11-13]. В древесине как анизотропном материале содержится большое количество макроэлементов, ориентированных в продольном направлении. При влажности $(10\pm 2)\%$ в древесине присутствует только связанная влага, находящаяся внутри клеточных стенок, что способствует лучшему переносу тепла в продольном направлении. Полости ранних и поздних трахеид у хвойных, волокон либриформа и сосудов у лиственных пород древесины в воздушно-сухом состоянии заполнены воздухом, который имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0.0259 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. В результате общий коэффициент теплопроводности древесины поперек волокон оказывается ниже, чем вдоль волокон.

В ходе опытов установлено, что при расположении цилиндрического зонда вдоль волокон (создаваемый поверхностью тепловой поток направлен преимущественно в поперечном направлении) относительное отклонение составило 34.44%. При расположении зонда в боковой поверхности бруса, когда тепловой поток проходит преимущественно вдоль направления древесных волокон, относительное отклонение составило 7.82%. Оба значения коэффициента теплопроводности многослойного клееного бруса, полученные экспериментальным путем, оказались ниже значений, рекомендуемых для выполнения теплотехнических расчетов при проектировании теплозащиты зданий.

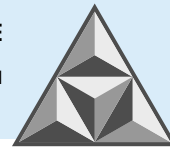
С научной и практической точки зрения, результаты настоящей работы служат основой для проведения дальнейших исследований теплопроводности многослойных клееных конструкций и уточнения справочных значений коэффициента теплопроводности.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности многослойных деревянных клееных конструкций (от 0.102 до 0.115 $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) оказались ниже справочных, что подтверждает хорошие теплоизоляционные свойства материалов для их изготовления. Данные для чистых образцов древесины могут быть использованы для получения расчетного коэффициента теплопроводности клееных конструкций, а также подтверждают возможность корректировки результатов теплотехнических расчетов при проектировании теплозащиты зданий (в части снижения толщины ограждающих конструкций). Это положительно скажется на материалоемкости современного деревянного домостроения без ухудшения показателей энергоэффективности зданий.

2. При определении коэффициента теплопроводности многослойных деревянных клееных конструкций методом стационарного теплового потока в процессе отбора образцов рекомендуется учитывать их породный состав и плотность, а также разброс показателей макроструктуры древесины.

3. Для оценки фактического коэффициента теплопроводности ограждающих конструкций в виде CLT-панелей или деревянного клееного бруса зонд целесообразно располагать вдоль волокон древесины, что обеспечивает более полное соответствие реальным условиям теплопереноса в конструкциях в процессе их эксплуатации.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. В России будет обеспечено широкое внедрение многоэтажного деревянного домостроения // *Минстрой России*: [сайт]. 2022. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya/> (дата обращения 10.10.2023).
2. **Трейбак Е.А.** Использование уникальных свойств клееных деревянных панелей CLT в строительстве общественных зданий // *Инновации в науке*. 2017. № 10 (71). С. 68-69.
3. **Леонович О.К., Короб А.Ю.** Перспективные направления в строительстве деревянных малоэтажных зданий // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2022. № 1 (252). С. 188-198.
4. Каркасные дома. Виды. Плюсы и минусы каркасных домов. URL: <https://www.svojidoma.ru/karkasnye-doma-vidy-plyusy-i-minusy-karkasnykh-domov/> (дата обращения: 15.11.2023).
5. **Волков Р.** Каркасная технология строительства домов: виды домостроения, преимущества и недостатки, фото. URL: <https://m-strana.ru/articles/karkasnoe-domostroeniepreimushchestva-i-needostatki/> дата обращения: 15.11.2023).
6. **Ковальчук Л.М.** Технология изготовления и долговечность деревянных конструкций // *Известия вузов. Архитектура и строительство*. 1988. № 8. С. 22-30.
7. **Варфоломеев Ю., Роальдсет Е.** Разработка экспериментальной модели деревянного модульного дома для севера России // *Устойчивые энергетические решения для Крайнего Севера*. Архангельск, 2011. С. 87-89.
8. **Штембах А.** Современные технологии домостроения с применением конструкций из древесины // *ЛПК Сибири*. 2017. № 3. URL: <https://lpk-sibiri.ru/wooden-construction/sovremennye-tehnologii-domostroeniya-s-primeneniem-konstruktsij-iz-drevesiny> (дата обращения: 10.10.2021).
9. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: Минрегион России, 2012. 95 с.
10. **Падерин В.** Режущие инструменты и оборудование для обработки CLT // *ЛесПромИнформ*. 2021. № 6 (160). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6047> (дата обращения 12.10.2023).
11. **Богословский В.Н.** Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
12. **Чудинов Б.С.** Теория тепловой обработки. М.: Наука, 1968. 255 с.
13. **Федосов С.В., Котлов В.Г., Алоян Р.М., Бочков М.В., Иванова М.А.** Методика экспериментального исследования теплопроводных характеристик волокнистых и древесно-волокнистых материалов // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 5 (365). С. 90-93.
14. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4. Руководство по эксплуатации. Технические характеристики. Екатеринбург, 1998. 24 с.
15. **Боровиков А.М., Уголев Б.Н.** Справочник по древесине: справочник. М.: Лесная промышленность, 1989. 296 с.

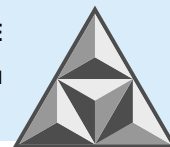
Поступила в редакцию 11.12.2023

Одобрена после рецензирования 01.02.2024

Принята к опубликованию 06.03.2024

REFERENCES

1. Ministry of Construction of Russia. (2022) *Russia will ensure widespread introduction of multi-storey wooden house building* [online]. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya/> (accessed 10.10.2023) (in Russian).
2. **Treybaks, E.A.** (2017) Utilization of unique properties of glued wood CLT panels in the construction of public buildings, *Innovatcii v nauke*, 10(71), pp. 68-69 (in Russian).
3. **Leonovich, O.K. & Korob, A.Yu.** (2022) Promising directions in the construction of wooden low-rise buildings, *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khozyajstvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*, 1(252), pp. 188-198 (in Russian).



4. *Frame houses. Kinds. Pros and cons of frame houses* [online]. Available at: <https://www.svojidoma.ru/karkasnye-doma-vidy-plyusy-i-minusy-karkasnykh-domov> (accessed 15.11.2023) (in Russian).
5. **Volkov, R.** (2023) *Frame technology of house construction: types of housing construction, advantages and disadvantages, photo* [online]. Available at: <https://m-strana.ru/articles/karkasnoe-domostroenie-preimushchestva-inedostatki> (accessed 15.11.2023) (in Russian).
6. **Kovalchuk, L.M.** (1988) Manufacturing technology and durability of wooden structures, *Izvestiya vuzov. Arkhitektura i stroitel'stvo*, 8, pp. 22–30 (in Russian).
7. **Varfolomeev, Yu. & Roaldset, E.** (2011) Development of an experimental model of a wooden modular house for the north of Russia, *Ustoychivyye energeticheskiye resheniya dlya Kraynego Severa*. Arkhangelsk, pp. 87–89 (in Russian).
8. **Shtembakh, A.** (2017) Modern technologies of housing construction with the use of wood structures, *LPK Sibiri*, 3 [online]. Available at: <https://lpk-sibiri.ru/wooden-construction/sovremennyye-tehnologii-domostroeniya-s-primeneniem-konstruktsij-iz-drevesiny/> (accessed 10.10.2021) (in Russian).
9. SP 50.13330.2012 Thermal protection of buildings. Updated edition of SNiP 23-02-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia (in Russian).
10. **Paderin, V.** (2021) Cutting tools and equipment for CLT processing, *LesPromInform*, 6 [online]. Available at: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6047> (accessed 10.10.2021) (in Russian).
11. **Bogoslovskiy, V.N.** (1979) *Thermal regime of the building*. Moscow: Stroyizdat (in Russian).
12. **Chudinov, B.S.** (1968) *Theory of thermal processing*. Moscow: Nauka (in Russian).
13. **Fedosov, S.V., Kotlov, V.G., Aloyan, R.M., Bochkov, M.V. & Ivanova, M.A.** (2016) Methodology of the experimental study of the mass-conducting characteristics of fibre and wood-fibre materials, *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 5(365), pp. 90–93 (in Russian)
14. Thermal conductivity meter ITP-MG4. Operation manual. Technical specifications (1998). Ekaterinburg (in Russian).
15. **Borovikov, A.M. & Ugolev, B.N.** (1989) Reference book on wood: reference book. Moscow: Lesnaya Promyshlennost' (in Russian).

Received 11.12.2023

Approved after reviewing 01.02.2024

Accepted 06.03.2024