

УДК 674.02

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-146-153

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯЧЕИСТОЙ КОНСТРУКЦИИ (перевод статьи)

А.А. Лукаш, канд. техн. наук, доц.

Н.П. Лукутцова, д-р техн. наук, проф.

Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Ст. Димитрова, д. 3 а, Брянск, Россия; 241037; e-mail: mr.luckasch@yandex.ru, natluk58@mail.ru

Разработана физическая модель нагрева пакета слоистого материала ячеистой конструкции из лущеного шпона, предложены зависимости для определения его теплопроводности в условиях нестационарного теплообмена. Установлено, что для пакета из 11 слоев березового шпона толщиной 2 мм коэффициент температуропроводности составляет $1,93 \cdot 10^{-6}$ м²/с. На основе фундаментальной теории теплопроводности древесины получены зависимости для расчета продолжительности склеивания теплоизоляционных материалов ячеистой конструкции. Доказано, что продолжительность склеивания фанерной ячеистой плиты толщиной 22 мм из березового лущеного шпона под давлением составляет 14,5 мин при температуре плит пресса 110 °С. Определены теплотехнические характеристики нового плитного древесного материала ячеистой конструкции из лущеного шпона: коэффициент теплопроводности плиты плотностью 530 кг/м³ – 0,081 Вт/(м·К); прочность при статическом изгибе плиты параллельно волокнам наружных слоев – 14 МПа, перпендикулярно волокнам – 10 МПа. Обосновано применение мало используемой древесины мягких лиственных пород с низкими эксплуатационными свойствами в качестве теплоизоляционного материала там, где не требуются высокие прочностные показатели, так как ее коэффициент теплопроводности в 2 раза ниже, чем у аналогичного материала – сплошной фанерной плиты.

Для цитирования: Lukash A.A., Lukutsova N.P. The Thermal Conductivity and Structural Parameters of Materials Honeycomb // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 146–153. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-146-153

Ключевые слова: плита фанерная ячеистая, древесина мягких лиственных пород, теплопроводность, шпон, склеивание, теплообмен.

Введение

Одной из активно развивающихся отраслей в России является жилищное строительство. Древесина обладает определенными прочностными и хорошими теплоизоляционными показателями. Малоэтажное деревянное домостроение в наибольшей степени обеспечивает благоприятные и комфортные условия проживания [3, 5]. Создание эффективных теплоизоляционных материалов для деревянного домостроения соответствует Федеральному закону № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Использование древесины мягких лиственных пород соответствует Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 г. [11]. Поэтому совершенствование технологий по созданию эффективных теплоизоляционных материалов из малоиспользуемой древесины мягких лиственных пород актуально и значимо.

Цель исследования – определение теплопроводности новых древесных материалов ячеистой конструкции из лущеного шпона.

Научной новизной обладают предложенные нами зависимости для определения теплопроводности материалов ячеистой конструкции.

Практическая значимость исследований заключается в разработке ресурсо- и энергосберегающих технологий получения новых теплоизоляционных материалов с улучшенными теплотехническими характеристиками из древесины с низкими эксплуатационными свойствами.

Объекты и методы исследования

Исследуемым материалом являлась древесина мягких лиственных пород в виде пакета из 11 слоев березового шпона толщиной 2 мм.

Для исследований применялись положения теории теплопроводности древесины.

Теоретически и экспериментально обоснована возможность создания новых теплоизоляционных материалов из древесины мягких лиственных пород с теплоизоляционными свойствами, превосходящими свойства существующих аналогичных видов продукции.

Результаты исследования и их обсуждение

Хорошие эксплуатационные свойства хвойной древесины [17] обеспечивают повышенный спрос, в результате чего в европейской части России наблюдается ее дефицит. Объемы использования древесины мягких лиственных пород составляют всего 15 % от объемов годовой расчетной лесосеки. Поэтому вопросы переработки мало востребованной лиственной древесины мягких лиственных пород актуальны для производства. В промышленно развитых странах появляется повышенный интерес к практическому использованию лиственной древесины из-за ее быстрого роста [14, 18].

Древесные материалы из мягких лиственных пород наиболее рационально применять для теплоизоляции там, где не предъявляются жесткие требования к прочности. Но новые строительные материалы будут востребованы только в том случае, если будут иметь более высокие эксплуатационные показатели по сравнению с существующими аналогичными видами продукции.

Как известно, основным отличием микростроения лиственных пород от хвойных является наличие сосудов [1, 12]. Сильно развитые сосуды смещают соседние клетки, вследствие чего древесина лиственных пород не имеет того правильного строения, которое характерно для древесины хвойных. Наличие сосудов обеспечивает хорошие пропиточные свойства [13, 15, 16, 18, 19] и возможность применение деформирующей обработки без образования трещин [20]. Наличие в сосудах замкнутых воздушных полостей гарантирует ей низкую теплопроводность. Поэтому для снижения теплопроводности в новых древесных теплоизоляционных материалах необходимо создавать ячеистую структуру с замкнутыми воздушными прослойками.

Примером нового теплоизоляционного материала является предложенная нами плита фанерная ячеистая из шпона (рис. 1) [5, 8].



Рис. 1. Плита фанерная ячеистая из шпона

Новизна способа и устройства для изготовления ячеистой плиты подтверждены патентами [4, 7]. Внутренние слои этой плиты состоят из полос шпона, уложенных с зазором таким образом, чтобы каждая последующая полоса перекрывала зазор между предыдущим слоем. Наличие зазоров между полосами шпона внутренних слоев не только способствует увеличению теплоизоляционных свойств изделия, но и экономит сырье. Для склеивания применяется горячий пресс.

Плита фанерная ячеистая является мало изученным материалом, отсутствуют режимы ее склеивания, а также теплотехнические характеристики.

Известно, что продолжительность склеивания древесных слоистых материалов сплошной конструкции зависит от времени, затраченного на нагрев склеиваемого пакета до температуры 100 °С и выше, а продолжительность нагрева определяется коэффициентом теплопроводности склеиваемого материала. Структура существующих древесных слоистых материалов однородна по всему сечению. При их нагреве перенос тепла происходит с постоянной скоростью по всему сечению, что делает теплообмен стационарным.

Процесс переноса тепла внутри пакета фанерной ячеистой плиты из лущеного шпона толщиной ($S_{ш}$, мм), содержащей внутренние воздушные прослойки, не является постоянным из-за различных коэффициентов теплопроводности древесины и воздуха. Поэтому произведен расчет коэффициента теплопроводности материалов с неоднородной внутренней структурой в условиях нестационарного теплообмена. Физическая модель нагрева пакета фанерной ячеистой плиты толщиной (S , мм) между плитами пресса представлена на рис. 2.

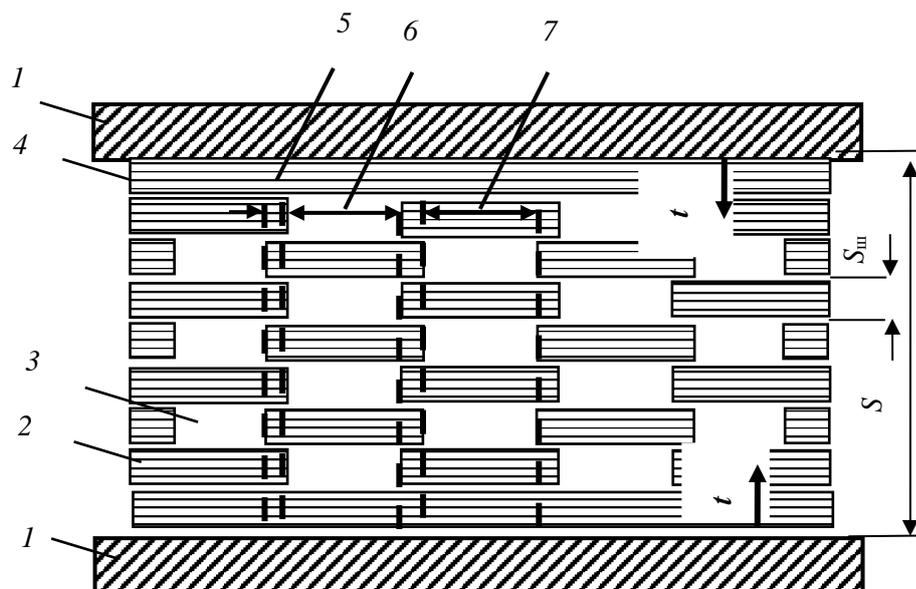


Рис. 2. Физическая модель нагрева пакета: 1 – нагревательные плиты пресса; 2 – полосы шпона; 3 – воздушные прослойки; 4 – полноформатный лист шпона; 5 – участок без воздушных прослоек; 6 – участок с максимальным количеством воздушных прослоек; 7 – участок с воздушными прослойками

Поперечное сечение пакета шпона условно можно разделить на сплошные участки без воздушных прослоек 5 и участки с воздушными прослойками 6 и 7. Рассчитаем продолжительность нагрева до температуры 100 °С наиболее удаленного от плиты пресса внутреннего клеевого слоя на каждом из участков. Вначале произведем расчет на содержащем наибольшее количество воздушных прослоек участке 7. Пакет на этом участке состоит из n слоев:

$$n = k + m = (m - 1) + m = 2m - 1, \quad (1)$$

где k – количество воздушных прослоек, шт.; m – количество слоев древесины.

Нагреву пакета шпона препятствует термическое сопротивление (R , (м²·К)/Вт):

$$R = S / \lambda, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности пакета, Вт/(м·К).

Общее термическое сопротивление пакета шпона определяется как сумма термических сопротивлений слоев воздуха (R_v , (м²·К)/Вт) и древесины (R_d , (м²·К)/Вт) [9, 10]:

$$R = k R_v + m R_d. \quad (3)$$

Отсюда

$$S/\lambda = k \delta_{\text{в}} / \lambda_{\text{в}} + m \delta_{\text{д}} / \lambda_{\text{д}}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{в}}$ и $\delta_{\text{д}}$ – толщина соответственно воздушной прослойки и слоя древесины, м; $\lambda_{\text{в}}$ и $\lambda_{\text{д}}$ – коэффициент теплопроводности соответственно воздуха и древесины, Вт/(м·К).

При использовании шпона одинаковой толщины имеем

$$\delta_{\text{в}} = \delta_{\text{д}} = S_{\text{ш}}. \quad (5)$$

Учитывая (1) – (4), получаем

$$(2m - 1) S_{\text{ш}} / \lambda = (m - 1) S_{\text{ш}} / \lambda_{\text{в}} + m S_{\text{ш}} / \lambda_{\text{д}}, \quad (6)$$

или

$$(2m - 1) / \lambda = (m - 1) / \lambda_{\text{в}} + m / \lambda_{\text{д}}. \quad (7)$$

Коэффициент теплопроводности λ численно равен произведению коэффициента температуропроводности (α), плотности (ρ) и удельной теплоемкости (c):

$$(2m - 1) / (\alpha_{\text{п}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}) = (m - 1) / (\alpha_{\text{в}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}) + m / (\alpha_{\text{д}} \rho_{\text{д}} c_{\text{д}}), \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{в}}$ и $\alpha_{\text{д}}$ – коэффициент температуропроводности соответственно пакета шпона, воздуха и древесины, м²/с; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{д}}$ – плотность соответственно пакета шпона, воздуха и древесины, кг/м³; $c_{\text{п}}$, $c_{\text{в}}$ и $c_{\text{д}}$ – удельная теплоемкость соответственно пакета шпона, воздуха и древесины, кДж/(кг·К).

Плотность пакета шпона определяется по формуле

$$\rho_{\text{п}} = [(m - 1) \rho_{\text{в}} + m \rho_{\text{д}}] / (2m - 1). \quad (9)$$

Аналогично находим его удельную теплоемкость:

$$c_{\text{п}} = [(m - 1) c_{\text{в}} + m c_{\text{д}}] / (2m - 1). \quad (10)$$

Тогда коэффициент температуропроводности пакета

$$\alpha_{\text{п}} = (2m - 1) / \{ [(m - 1) / (\alpha_{\text{в}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}) + m / (\alpha_{\text{д}} \rho_{\text{д}} c_{\text{д}})] \rho_{\text{п}} c_{\text{в}} \}. \quad (11)$$

Температура пакета шпона при нагреве изменяется от 20 до 100 °С. Для упрощения расчетов принимаем значения удельной теплоемкости пакета шпона и коэффициента температуропроводности как средние арифметические.

Удельную теплоемкость древесины ($c_{\text{в}}$) в зависимости от ее влажности и температуры выбираем согласно [2, с. 145]: при относительной влажности воздуха 40...50 % и температуре 20 °С $c_{\text{в}} = 1,005$ кДж/(кг·К), а при 100 °С – 1,009 кДж/(кг·К). Для расчетов принимаем $c_{\text{в}} = 1,007$ кДж/(кг·К).

Коэффициент температуропроводности древесины (α_d) выбираем в зависимости от ее влажности и температуры [2]: при влажности 15 % и температуре 20 °С $\alpha_d = 1,51 \cdot 10^{-7}$ м²/с, а при 100 °С – $1,61 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Для расчетов принимаем $\alpha_d = 1,56 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Коэффициент температуропроводности воздуха (α_v) при относительной влажности воздуха 40...50 % и температуре 20 °С составляет $20,80 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а при температуре 100 °С – $33,10 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Для расчетов принимаем $\alpha_v = 27,00 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Для пакета шпона толщиной 22 мм, в котором на участке (5) (рис. 2) находится 6 слоев древесины и 5 слоев воздуха, при толщине каждого слоя 2 мм имеем:

плотность пакета

$$\rho_n = [5 \cdot 1,225 + 6 \cdot 640] / 11 = 350 \text{ кг/м}^3;$$

удельная теплоемкость пакета

$$c_n = [5 \cdot 1,007 + 6 \cdot 2,250] / 11 = 1,680 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Таким образом, при склеивании плиты фанерной ячеистой, состоящей из 11 слоев березового шпона толщиной 0,002 м, $\alpha_n = 1,93 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Данные, необходимые для расчета продолжительности нагрева пакета, приведены в таблице.

Параметры склеиваемого пакета

Показатель	Древесина	Воздух	Пакет
Плотность ρ , кг/м ³	640	1,225	350
Коэффициент температуропроводности α , м ² /с	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$26,95 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	2,250	1,007	1,680

Произведем расчет продолжительности склеивания этого пакета. Наиболее удаленный от плиты пресса клеевой слой находится на расстоянии (X , м), равном половине толщины пакета ($1/2 S$, м), или 0,011 м. Тогда расчетное соотношение

$$X/S = 0,011/0,022 = 0,5.$$

В связи с тем, что начальная температура пакета составляет 20 °С, заданная температура нагрева наиболее удаленного от плиты пресса клеевого слоя – 100 °С, температура плит пресса – 110 °С, безразмерная температура (Θ) для заданных условий

$$\Theta = \frac{110 - 100}{110 - 20} = 0,11.$$

Критерий Фурье F_0 выбираем по графическим зависимостям, приведенным в работе [2, с. 145] в зависимости от значения Θ и расчетного соотношения X/S . Для $\Theta = 0,11$ и $X/S = 0,5$ критерий Фурье $F_0 = 1,05$. Учитывая, что продолжительность нагрева (τ_1 , с) до 100 °С наиболее удаленного от плит пресса клеевого слоя определяется как

$$\tau_1 = S^2 F_0 / (4 \alpha_n). \quad (12)$$

После подстановки

$$\tau_1 = \frac{0,022^2 \cdot 1,05}{4 \cdot 0,000000156} = 814,4 \text{ с} = 13,6 \text{ мин.}$$

Общее время склеивания ($\tau_{ц}$, мин) с учетом продолжительности желатинизации при температуре 100 °С ($\tau_2 = 0,9$ мин):

$$\tau_{ц} = \tau_1 + \tau_2 = 13,6 + 0,9 = 14,5 \text{ мин.}$$

Обоснованность предложенных зависимостей подтверждена экспериментально. Для этого из березового лущеного шпона была склеена плита фанерная ячеистая толщиной 22 мм при температуре плит пресса 110 °С и продолжительности выдержки под давлением 14,5 мин. Установлены ее теплотехнические характеристики: коэффициент теплопроводности плиты плотностью 530 кг/м³ – 0,082 Вт/(м·К); коэффициент теплопроводности по прибору ИТП-МГ4 «100» (согласно ГОСТ 7076–99) – 0,081 Вт/(м·К).

Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных подтверждает обоснованность расчетов. Коэффициент теплопроводности плиты ячеистой фанерной в 2 раза ниже, чем у обычной фанерной плиты; прочность при статическом изгибе плиты параллельно волокнам наружных слоев – 14 МПа, перпендикулярно волокнам – 10 МПа.

Выводы

1. Разработана физическая модель нагрева пакета слоистого материала ячеистой конструкции из лущеного шпона, предложены зависимости для определения его теплопроводности в условиях нестационарного теплообмена. Для пакета из 11 слоев березового шпона толщиной 2 мм коэффициент температуропроводности равен $1,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

2. На основе фундаментальной теории теплопроводности древесины получены зависимости для расчета продолжительности склеивания

теплоизоляционных материалов ячеистой конструкции. Установлено, что продолжительность склеивания под давлением плиты фанерной ячеистой толщиной 22 мм из березового лущеного шпона составляет 14,5 мин при температуре плит пресса 110 °С.

3. Определены теплотехнические характеристики нового древесного материала: коэффициент теплопроводности ячеистой фанерной плиты плотностью 530 кг/м³ – 0,081 Вт/(м·К); прочность при статическом изгибе плиты параллельно волокнам наружных слоев – 14 МПа, перпендикулярно волокнам – 10 МПа.

4. Обосновано применение мало используемой древесины мягких лиственных пород с низкими эксплуатационными свойствами в качестве теплоизоляционного материала, где не требуются высокие прочностные показатели, так как ее коэффициент теплопроводности в 2 раза ниже, чем у аналогичного материала – сплошной фанерной плиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боровиков А.М., Уголев Б.Н.* Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с.
2. *Кречетов И.В.* Сушка древесины. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Бриз, 1997. 500 с.
3. *Левинский Ю.Б., Расев А.И., Косарин А.А., Красухина Л.П.* Деревянное домостроение. СПб.: Изд-во «Стратегия будущего», 2008. 303 с.
4. *Лукаш А.А.* Формирователь линии сборки древесных слоистых материалов: патент № 2298469 Российская Федерация, МПК С1В27 D3/00. 4 с.
5. *Лукаш А.А., Плотников В.В., Савенко В.Г., Ботаговский М.В.* Новые строительные материалы – рельефная фанера и плита фанерная ячеистая // Строит. материалы. 2006. № 12. С. 38–39.
6. *Лукичев А.В.* Перспективы деревянного каркасного домостроения в России // Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века. 2008. № 11. С. 44–45.
7. *Савенко В.Г., Лукаш А.А.* Способ склеивания древесных слоистых материалов: патент № 2252865 Российская Федерация, МПК С1В27 D1/06, В32 В3/22. 2 с.
8. *Савенко В.Г., Лукаш А.А., Шкиль К.К.* Ячеистая фанерная плита // Деревообrab. пром-сть. 2006. № 6. С. 14–15.
9. СНиП 23-02–2003. Тепловая защита зданий: приняты Постановлением Госстроя РФ от 26 июня 2003 г. № 113. Взамен СНиП 23-01–99. Введ. 01.10.2003. М.: НИИСФ РААСН, 2003. 36 с.
10. СП 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий. Взамен СП 23-101–2000. Введ. 01.06.2004. М.: НИИСФ, 2004. 122 с.

11. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года: утв. Приказом Минпромторга России и Минсельхоза России от 31 окт. 2008 г. № 248/482.
12. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: МГУЛ, 2007. 340 с.
13. Gaff M., Gašparik M., Matlák J. 3D Molding of Veneers by Mechanical Means. *BioResources*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 412–422.
14. Goli G., Cremonini C., Negro F., Zanuttini R., Fioravanti M. Physical-Mechanical Properties and Bonding Quality of Heat Treated Poplar (I-214 Clone) and Ceiba Plywood. *iForest*, 2014, vol. 8, iss. 5, pp. 687–692. DOI: [10.3832/ifor1276-007](https://doi.org/10.3832/ifor1276-007)
15. Gu H., Zink-Sharp A., Sell J. Hypothesis on the Role of Cell Wall Structure in Differential Transverse Shrinkage of Wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2001, vol. 59, iss. 6, pp. 436–442. DOI: [10.1007/s001070100240](https://doi.org/10.1007/s001070100240)
16. Joffre T., Isaksson P., Dumont P.J.J., Rolland du Roscoat S., Sticker S., Orgéas L., Gamstedt E.K. A Method to Measure Moisture Induced Swelling Properties of a Single Wood Cell. *Experimental Mechanics*, 2016, vol. 56, iss. 5, pp. 723–733. DOI: [10.1007/s11340-015-0119-9](https://doi.org/10.1007/s11340-015-0119-9)
17. Nikulshin S., Semishkur S., Tambi A., Chubinsky A. Strength of Spruce Wood. *Internationale Studierenkonferenz “SPRUNGBRETT”, Center for Development and Cooperation CDC, Berner Fachhochschule*. Biel, Schweiz, 2015, vol. 0, pp. 133–138.
18. Pan Y., Zhong Z. Micromechanical Modeling of the Wood Cell Wall Considering Moisture Absorption. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 91, pp. 27–35. DOI: [10.1016/j.compositesb.2015.12.038](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.038)
19. Wu G.-F., Lang Q., Qu P., Jiang Y.-F., Pu J. Effect of Chemical Modification and Hot-Press Drying on Poplar Wood. *BioResources*, 2010, vol. 5, iss. 4, pp. 2581–2590.
20. Zamilova A.F., Galikhanov M.F., Safin R.R., Ziatdinov R.R., Mikryukova Y.K. Change of the Properties of Plywood during the Thermomodification of Veneer and the Polarization of the Glue. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1886, iss. 1, art. 020053. DOI: [10.1063/1.5002950](https://doi.org/10.1063/1.5002950)

Поступила 03.06.19