



ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В НАДГИГРОСКОПИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ВО ВРЕМЯ ЕЕ ОТТАИВАНИЯ

Ненчо Делийски¹ – Славчо Соколовски¹ – Ладислав Дзуренда²

Abstract

An approach for the computation of the thermal conductivity λ of frozen wood during its defrosting has been suggested. The approach takes into account the physics of the process of thawing of the ice, which is created in the wood by both the hygroscopically bounded and the free water. It also reflects for the first time the influence of the fiber saturation point of wood species on the value of their λ during water defreezing and the influence of the temperature on the fiber saturation point of frozen and non-frozen wood.

For the computation of λ according to the suggested approach a software program has been prepared in FORTRAN, which has been input in the calculation environment of Visual FORTRAN Professional. With the help of the program computations have been made for the determination of λ of often used in the veneer and plywood production beech and poplar frozen wood with moisture content $0,4 \leq u \leq 1,2 \text{ kg.kg}^{-1}$ in the temperature range between $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ and $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ during ice defreezing in the wood.

Key words: *frozen wood, thermal conductivity, defrosting, bounded water, free water, computation, mathematical description*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, коэффициент теплопроводности древесины λ характеризует интенсивность передвижения тепла в ней. С точки зрения теории теплопроводности, влажная древесина представляет собой трехкомпонентную дисперсную систему, состоящую из древесного вещества, воды и воздуха. Теплопроводность каждой из этих компонентов, а также воды и льда, различны.

Например, теплопроводность находящейся в порах древесины воды в жидком состоянии около 2 раз выше теплопроводности древесного вещества в плотном состоянии и около 20 раз больше теплопроводности воздуха. Поэтому замена воздуха в порах древесины водой вызывает пропорциональное увеличение ее λ .

С увеличением плотности, т.е. с уменьшением пористости древесины, ее λ увеличивается. На λ влияет не только пористость, но и форма, размеры и

¹ University of Forestry, Kliment Ohridski Bd. 10, 1756 Sofia, BULGARIA
e-mail: deliiski@netbg.com; s_sokolovski@yahoo.com

² Technical University of Zvolen, T.G.Masaryka 24, 960 53 Zvolen, SLOVAKIA
e-mail: dzurenda@vsld.tuzvo.sk

расположение пор. Так как размеры пор отличаются друг от друга в отдельных анатомических направлениях, то и λ имеет анизотропный характер.

Коэффициент теплопроводности воды при 0 °С равен 0,551 W.m⁻¹.K⁻¹, а льда при той же температуре он составляет 1,047 W.m⁻¹.K⁻¹, т.е. почти в два больше. С уменьшением температуры коэффициент теплопроводности льда увеличивается и при -50 °С он достигает значения 2,780 W.m⁻¹.K⁻¹ (Chudinov 1968). Это вызывает увеличение λ если вода в древесине переходит от жидкого в твердое состояние, а также если при наличии льда в древесине ее температура понижается.

В (Deliiski 2003) составлено математическое описание λ содержащей и несодержащей льда древесины. В нем вычисление λ производится с независимым от температуры значением влагосодержания древесины на пределе ее гигроскопичности u_{fsp} для отдельных древесных пород, которое принимается равным приводимому в литературе значению u_{fsp} при 20 °С.

Более точное определение λ древесины требует учитывать и влияние температуры на u_{fsp} . Поэтому целью настоящей работы является предложение подхода для точного вычисления λ содержащей лед древесины во время ее оттаивания в надгигроскопическом диапазоне с учетом влияния и температуры на u_{fsp} .

ВЛИЯНИЕ T НА ПРЕДЕЛ ГИГРОСКОПИЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

На основе результатов обширных экспериментальных исследований J. F. Siau (1984) предлагает следующее уравнение, которое отражает влияние температуры на предел гигроскопичности u_{fsp} несодержащей льда древесины:

$$u_{fsp} = u_{fsp}^{20} - 0,001(T - 293,15), \quad (1)$$

где u_{fsp} – влагосодержание древесины на пределе ее гигроскопичности, kg.kg⁻¹;

u_{fsp}^{20} – влагосодержание древесины на пределе ее гигроскопичности при 20 °С, kg.kg⁻¹;

T – температура, К.

Поскольку уравнение (1) является общепринятым в литературе и относящимся ко всем древесным породам, то его можно использовать при вычислении коэффициента теплопроводности несодержащей льда древесины.

Из-за отсутствия опубликованных сведений о влиянии T на u_{fsp} мерзлой древесины, при вычислении ее коэффициента теплопроводности целесообразно использовать значения u_{fsp} , которые получаются для соответствующей древесной породы по уравнению (1) после замещения в нем температуры окончательного растаивания льда, образовавшегося в ней от замерзания гигроскопически связанной воды.

Как известно, когда древесина содержит как связанную, так и свободную воду, т.е. когда она находится в надгигроскопическом диапазоне, количество связанной воды в ней равно пределу гигроскопичности данной древесной породы. Chudinov

(1968) установил, что в этом случае полное растаивание льда от адсорбционно связанной воды происходит при температуре $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. при $T = -271,15\text{ K}$. Следовательно, согласно выдвинутой гипотезе, u_{fsp} мерзлой древесины в надгигроскопическом диапазоне можно определять по уравнению, аналогичному (1) после замещения в нем $T = 271,15\text{ K}$, т.е.

$$u_{\text{fsp}} = u_{\text{fsp}}^{20} - 0,001(271,15 - 293,15) = u_{\text{fsp}}^{20} + 0,02. \quad (2)$$

АКТУАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ λ

Прибавлением уравнений (1) и (2) к приведенному в (Deliiski 2003) и (Dzurenka & Deliiski 2010) математическому описанию коэффициента теплопроводности содержащей и не содержащей льда древесины в нем отражено влияние T на u_{fsp} с целью более точного определения λ . Актуализированное таким образом математическое описание λ получает следующий вид:

$$\lambda = \lambda_0 \gamma [1 + \beta(T - 273,15)], \quad (3)$$

$$\lambda_0 = K_a v [0,165 + (1,39 + 3,8u) (3,3 \cdot 10^{-7} \rho_b^2 + 1,015 \cdot 10^{-3} \rho_b)], \quad (4)$$

$$v = 0,15 - 0,07u \quad @ \quad u \leq u_{\text{fsp}} + 0,1 \text{ kg.kg}^{-1}, \quad (5)$$

$$v = 0,1284 - 0,013u \quad @ \quad u > u_{\text{fsp}} + 0,1 \text{ kg.kg}^{-1}, \quad (6)$$

- При не содержащей льда древесине, т.е. когда все количество воды в древесине находится в жидком состоянии после растаивания льда в ней, а также когда $T \leq 271,15\text{ K}$ & $u \leq u_{\text{nfw}}$:

$$\gamma = 1,0, \quad (7)$$

$$\beta = (2,05 + 4,0u) \left(\frac{579}{\rho_b} - 0,124 \right) \cdot 10^{-3} \quad @ \quad u \leq u_{\text{fsp}} + 0,1 \text{ kg.kg}^{-1}, \quad (8)$$

$$\beta = 3,65 \left(\frac{579}{\rho_b} - 0,124 \right) \cdot 10^{-3} \quad @ \quad u > u_{\text{fsp}} + 0,1 \text{ kg.kg}^{-1}, \quad (9)$$

$$u_{\text{fsp}} = u_{\text{fsp}}^{20} - 0,001(T - 293,15) \quad (10)$$

- При содержащей лед древесине:

$$\gamma = 1 + 0,34 [1,15(u - u_{\text{nfw}})] \quad @ \quad u > u_{\text{nfw}} \quad \& \quad T \leq T_{\text{nfw}}, \quad (11)$$

$$\beta = 0,002(u - u_{\text{fsp}}) - 0,0038 \left(\frac{579}{\rho_b} - 0,124 \right) \quad @ \quad u > u_{\text{nfw}} \quad \& \quad T \leq T_{\text{nfw}}, \quad (12)$$

$$u_{\text{nfw}} = 0,12 + (u_{\text{fsp}} - 0,12) \exp[0,0567(T - 271,15)], \quad (13)$$

$$T_{\text{nfw}} = 271,15 + \frac{\ln \frac{u_{\text{nfw}} - 0,12}{u_{\text{fsp}} - 0,12}}{0,0567}, \quad (14)$$

$$u_{\text{fsp}} = u_{\text{fsp}}^{20} + 0,02. \quad (15)$$

где ρ_b – базисная плотность древесины, kg.m^{-3} ;

u – влагосодержание древесины, kg.kg^{-1} ;

u_{nfw} – количество незамерзающей гигроскопически связанной воды в древесине при данной температуре $T \leq 271,15 \text{ K}$, kg.kg^{-1} .

ВЫЧИСЛЕНИЕ λ МЕРЗЛОЙ ДРЕВЕСИНЫ БУКА И ТОПОЛЯ ПРИ ЕЕ ОТТАИВАНИИ

На рис. 1 и рис. 2 показано вычисленное по уравнениям (1) ÷ (15) изменение коэффициента теплопроводности поперек волокон λ_c мерзлой древесины бука и тополя в надгигроскопическом диапазоне, в зависимости от t и u в диапазонах $-60 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq -2 \text{ }^\circ\text{C}$ и $0,4 \text{ kg.kg}^{-1} \leq u \leq 1,2 \text{ kg.kg}^{-1}$.

Вычисления произведены при $\rho_b = 560 \text{ kg.m}^{-3}$ и $u_{\text{fsp}}^{20} = 0,31 \text{ kg.kg}^{-1}$ для бука и при $\rho_b = 355 \text{ kg.m}^{-3}$ и $u_{\text{fsp}}^{20} = 0,35 \text{ kg.kg}^{-1}$ для тополя (Videlov 2003), а также для установленных в (Deliiski 2003) значений коэффициента K_a поперек волокон в уравнении (4), равных соответственно $K_a = 1,28$ для бука и $K_a = 1,49$ для тополя.

На рис. 1 и рис. 2 видно, что при повышении t от $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ значение λ_c буковой древесины с $u = 40\%$ уменьшается с $0,412 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ на $0,332 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, т.е. на 19,4%, а для той же древесины с $u = 120\%$ λ_c уменьшается с $0,888 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ на $0,597 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, т.е. на 32,8%. При том же повышении t значение λ_c тополевой древесины с $u = 40\%$ уменьшается с $0,316 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ на $0,231 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, т.е. на 26,9%, а для той же древесины с $u = 120\%$ λ_c уменьшается с $0,674 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ на $0,405 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, т.е. на 39,9%. Это вызывается отмеченным выше уменьшением коэффициента теплопроводности льда при повышении t (Chudinov 1968). Увеличение λ_c с повышением t происходит по линейной зависимости согласно уравнению (3).

На рис. 1 и рис. 2 также видно, что увеличение влажности мерзлой древесины u вызывает пропорциональное увеличение ее коэффициента теплопроводности. При этом наклон изменения λ_c в зависимости от температуры не зависит от u . При $t = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ изменение u буковой древесины от $0,4 \text{ kg.kg}^{-1}$ на $1,2 \text{ kg.kg}^{-1}$ вызывает увеличение ее λ_c с $0,412 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ на $0,888 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, т.е. в 2,16 раз. При тех же условиях λ_c тополевой древесины изменяется с $0,316 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ на $0,674 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, т.е. в 2,13 раз.

Из-за большей плотности буковой древесины ее λ_c выше λ_c тополя от 30% до 47% для различных температур и влажностей во время оттаивания.

Как видно на рис. 1 и рис. 2, изменение λ_C мерзлой древесины заканчивается при $t = -2,0$ °C и скачком переходит к λ_C оттаявшей древесины. Это свидетельствует о правильном отражении в математическом описании λ_C постановки теории тепловой древесины, согласно которой именно при этой температуре заканчивается оттаивание льда, образовавшегося в древесине с $u > u_{\text{fsp}}$ от замерзания адсорбционно связанной воды в ней (Chudinov 1968, Trebula & Klement 2002).

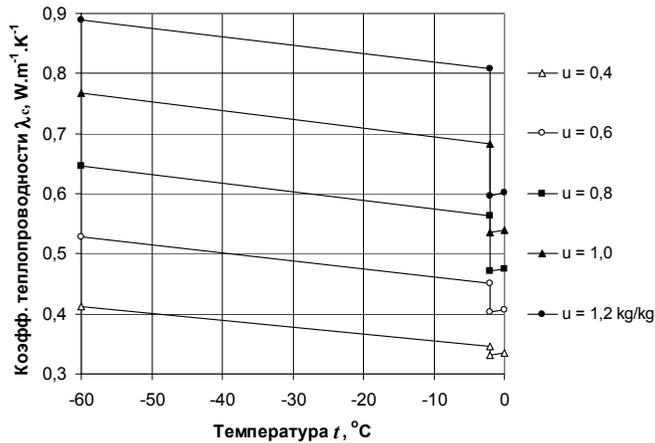


Рис. 1. Изменение коэффициента теплопроводности поперек волокон λ_C древесины бука в зависимости от t и u

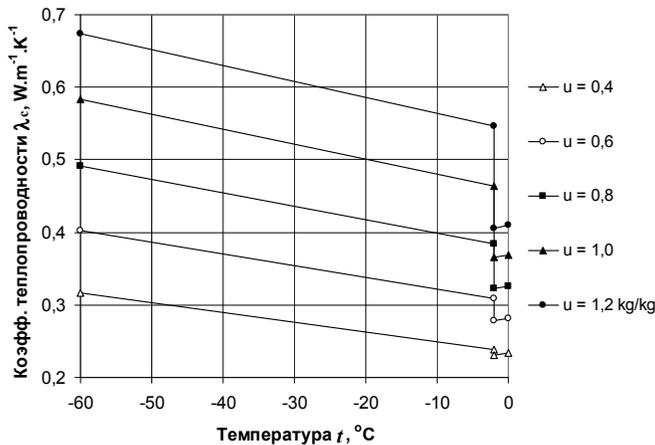


Рис. 2. Изменение коэффициента теплопроводности поперек волокон λ_C древесины тополя в зависимости от t и u

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуализированное в настоящей работе математическое описание коэффициента теплопроводности мерзлой древесины учитывает физику процесса оттаивания льда в

ней, в том числе влияние предела гигроскопичности каждой древесной породы на ее коэффициент теплопроводности и впервые влияние температуры на предел гигроскопичности мерзлой древесины.

Полученные результаты показывают, что при повышении температуры от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение коэффициента теплопроводности мерзлой древесины бука с определенной влажностью в надгигроскопическом диапазоне уменьшается в пределах от 19,4% до 32,8%, а λ_c древесины тополя – от 26,9% до 39,9%. Установлено также, что при изменении влагосодержания древесины от $0,4\text{ kg.kg}^{-1}$ до $1,2\text{ kg.kg}^{-1}$ при данном значении температуры значение λ_c как бука, так и тополя, увеличивается немногим более 2 раз.

Актуализированное математическое описание коэффициента теплопроводности мерзлой древесины и результаты настоящей работы можно использовать в разнообразных технологических расчетах, а также в софтуере современных систем модельно базированного автоматического управления процессами тепловой и гидротермической обработки древесных материалов различного предназначения.

Acknowledgement: *This paper was performed as a part of the solution of the joined between TU in Zvolen and University of Forestry in Sofia project „Modeling and visualization of the wood defrosting processes in the technologies for wood thermal treatment”, which is supported by the Scientific Research Sector in the University of Forestry (project 114/2011).*

ЛИТЕРАТУРА

1. CHUDINOV, B.S., 1968: Theory of thermal treatment of wood. Publishing Company “Nauka”, Moscow, USSR (in Russian)
2. DELIISKI, N., 2003: Modelling and technologies for steaming wood materials in autoclaves. Dissertation for Dr.Sc., University of Forestry, Sofia (in Bulgarian)
3. DZURENDA, L., DELIISKI, N., 2010: Thermal processes in the technologies for wood processing. TU Zvolen, Slovakia (in Slovakian)
4. SIAU, J. F., 1984: Transport processes in wood, Springer-Verlag, NewYork
5. TREBULA, P., KLEMENT, I., 2002: Drying and hydrothermal treatment of wood, TU Zvolen, Slovakia (in Slovakian)
6. VIDELOV, C., 2003: Drying and thermal treatment of wood, University of Forestry in Sofia, Bulgaria (in Bulgarian)