

## Вычисление удельной теплоемкости мерзлой древесины во время оттаивания льда в ней от адсорбционно связанной воды

НЕНЧО ДЕЛИЙСКИ<sup>1</sup>, ЛАДИСЛАВ ДЗУРЕНДА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кафедра Машинознания и автоматизации производства, Лесотехнический университет – София, Болгария

<sup>2</sup>Кафедра Обработки древесины, Технический университет – Зволен, Словакия

**Abstract:** Calculation of the specific heat capacity of frozen wood during its defrosting in hygroscopic diapason. An approach for the calculation of the specific heat capacity  $c$  of frozen wood with ice in it, which is created from the freezing of hygroscopically bounded water, has been suggested. The approach takes into account the physics of the process of towing of this ice in the wood. It reflects for the first time the influence of the fiber saturation point  $u_{fsp}$  of the separate wood species on the specific heat capacity of frozen wood  $c$  during wood defrosting in hygroscopic diapason and also the influence of the temperature on the  $u_{fsp}$  and  $c$ .

For the calculation of  $c$  according to the suggested approach a software program has been prepared, which has been input in the developed by Microsoft calculation environment of Visual Fortran Professional. With the help of the program computations have been made for the determination of  $c$  during towing of the mentioned above ice in oak wood with moisture content  $0 \leq u \leq u_{fsp}$  at the temperature range between  $-60^{\circ}\text{C}$  and  $-0^{\circ}\text{C}$ .

*Keywords:* specific heat capacity, ice from hygroscopically bounded water, defrosting of the wood, wood species

### ВВЕДЕНИЕ

При технологических и других инженерных расчетах процессов тепловой и гидро-термической обработки древесных сортиментов необходимо располагать информацией о теплофизических характеристиках древесины и о влиянии многочисленных факторов на них. Важной такой характеристикой является удельная теплоемкость древесины  $c$ .

Основными факторами, оказывающими влияние на  $c$ , являются влагосодержание древесины и агрегатное состояние воды в ней, а также температура. Влияние этих факторов на  $c$  охвачено в составленном ранее первым соавтором математическом описании  $c$  мерзлой и оттаявшей древесины (Deliiski 1990).

Наши дальнейшие исследования показали, что более точное математическое описание  $c$  должно отражать еще и влияние микроструктурных особенностей отдельных древесных пород, выражаемое посредством их предела гигроскопичности  $u_{fsp}$  (Делийски 2003), а также учитывать влияние температуры на  $u_{fsp}$ .

Целью настоящей работы является учет влияния температуры на  $u_{fsp}$  в математическом описании удельной теплоемкости мерзлой древесины в гигроскопическом диапазоне и вычисление при помощи улучшенного описания  $c$  такой древесины во время ее оттаивания.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА  $u_{fsp}$  В МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕРЗЛОЙ ДРЕВЕСИНЫ ВО ВРЕМЯ ЕЕ ОТТАИВАНИЯ

Удельная теплоемкость мерзлой древесины  $c$  в гигроскопическом диапазоне представляет собой сумму удельных теплоемкостей самой древесины  $c_w$  и льда  $c_{bw}$ , образовавшегося в древесине от замерзания адсорбционно связанной воды в ней (Чудинов 1968, Делийски 2003, Dzurenda & Deliiski 2010), т.е.

$$c = c_w + c_{bw} . \quad (1)$$

В (Deliiski 1990, 2003, 2004) выведены следующие уравнения для вычисления  $c_w$  и  $c_{bw}$  в гигроскопическом диапазоне, т.е при влагосодержании древесины  $u \leq u_{fsp}$ :

- для содержащей лед древесины:

$$c_w = K_w \frac{526 + 2,95T + 0,0022T^2 + 2261u + 1976u_{nfw}}{1 + u} , \quad (2)$$

$$K_w = 1,06 + 0,04u + \frac{0,00075(T - 271,15)}{u_{nfw}} , \quad (3)$$

$$u_{nfw} = 0,12 + (u_{fsp} - 0,12)\exp[0,0567(T - 271,15)] \quad @ \quad T \leq 271,15 \text{ K} , \quad (4)$$

$$c_{bw} = 1,8938 \cdot 10^4 (u_{fsp} - 0,12) \frac{\exp[0,0567(T - 271,15)]}{1 + u} \quad @ \quad u_{nfw} < u \leq u_{fsp} \& \quad T \leq 271,15 \text{ K} , \quad (5)$$

- для несодержащей лед древесины:

$$c_w = \frac{2097u + 826}{1 + u} + \frac{9,92u + 2,55}{1 + u} T + \frac{0,0002}{1 + u} T^2 , \quad (6)$$

$$c_{bw} = 0 \quad @ \quad T > 271,15 \text{ K} , \quad (7)$$

где  $T$  – температура, К;

$u$  – влагосодержание древесины,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;

$u_{fsp}$  – влагосодержание древесины на пределе ее гигроскопичности,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;

$u_{nfw}$  – количество незамерзающей воды в древесине при данной температуре,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Для более точного определения  $c_w$  и  $c_{bw}$  необходимо учесть и зависимость  $u_{fsp}$  от температуры. На основе результатов обширных экспериментальных исследований J. F. Siau (1984) предлагает следующее уравнение, которое отражает влияние температуры на влагосодержание несодержащей льда древесины на пределе ее гигроскопичности  $u_{fsp}$ :

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

(8)

где  $u_{fsp}^{20}$  – влагосодержание древесины на пределе ее гигроскопичности при 20<sup>0</sup>С, kg.kg<sup>-1</sup>.

В литературе отсутствуют сведения о влиянии  $T$  на  $u_{fsp}$  древесины, которая содержит лед, образовавшийся от замерзания адсорбционно связанной воды в ней. Единственно Б.С.Чудинов (1968) отмечает, что с понижением  $T$  следует ожидать понижение  $u_{fsp}$  такой древесины, так как та часть гигроскопически связанной воды, которая замерзает, перестает быть связанной и переходит в свободную.

Поскольку уравнение (8) является общепринятым в специализированной литературе и относящимся ко всем древесным породам, то его можно использовать при вычислении удельной теплоемкости несодержащей льда древесины.

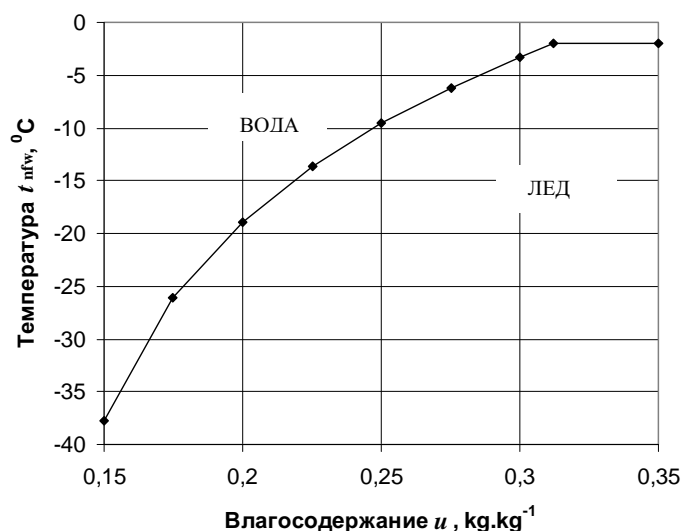
Из-за отсутствия опубликованных сведений о влиянии  $T$  на  $u_{fsp}$  содержащей лед древесины, при вычислении удельной теплоемкости льда, образовавшегося от гигроскопически связанной воды в древесине целесообразно использовать значения  $u_{fsp}$ , которые получают для соответствующей древесной породы по уравнению (8) после замещения в нем температуры окончательного оттаивания этого льда  $T = T_{nfw}$ , которая, как показано ниже, зависит от  $u$ .

После решения уравнения (4) по отношению к  $T$  получается следующее уравнение для определения температуры  $T = T_{nfw}$ , при которой заканчивается оттаивание льда, образовавшегося в древесине от замерзания гигроскопически связанной воды в ней:

$$T_{nfw} = 271,15 + \frac{\ln \frac{u_{nfw} - 0,12}{u_{fsp} - 0,12}}{0,0567},$$

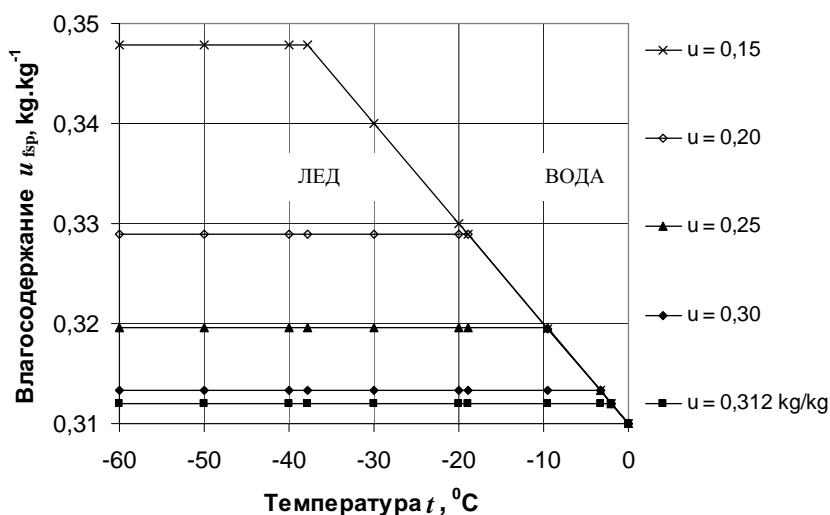
(9)

На рис. 1 показано вычисленное по уравнению (9) с использованием и уравнений (4) и (8) изменение  $t_{nfw} = T_{nfw} - 273,15$  дубовой древесины с  $u_{fsp}^{20} = 0,29$  kg.kg<sup>-1</sup> (Dzurenda & Deliiski 2010) в зависимости от влагосодержания древесины  $u$  при условии  $u_{nfw} = u$ .



**Рис. 1.** Изменение  $t_{\text{nfw}}$  в дубовой древесине с  $u_{\text{fsp}}^{20} = 0,29 \text{ kg.kg}^{-1}$  в зависимости от  $u$

На рис. 2 при помощи наклонной линии показано вычисленное по уравнению (8) изменение  $u_{\text{fsp}}$  несодержащей льда дубовой древесины с  $u_{\text{fsp}}^{20} = 0,29 \text{ kg.kg}^{-1}$  в зависимости от  $t$  и  $u$  при  $-60 \leq t \leq 0^{\circ}\text{C}$  и  $0,15 \leq u \leq u_{\text{fsp}}$ . Горизонтальные линии на этом рисунке, соответствующие различным постоянным значениям  $u_{\text{fsp}} = \text{const}$ , пересекают наклонную линию при температурах  $t_{\text{nfw}}$ , которые получаются по уравнению (9) для показанных в легенде рис. 2 значений влагосодержания  $u$  после замещения в (9) условия  $u_{\text{nfw}} = u$ .



**Рис. 2.** Изменение  $u_{\text{fsp}}$  дубовой древесины с  $u_{\text{fsp}}^{20} = 0,29 \text{ kg.kg}^{-1}$  в зависимости от  $t$  и  $u$

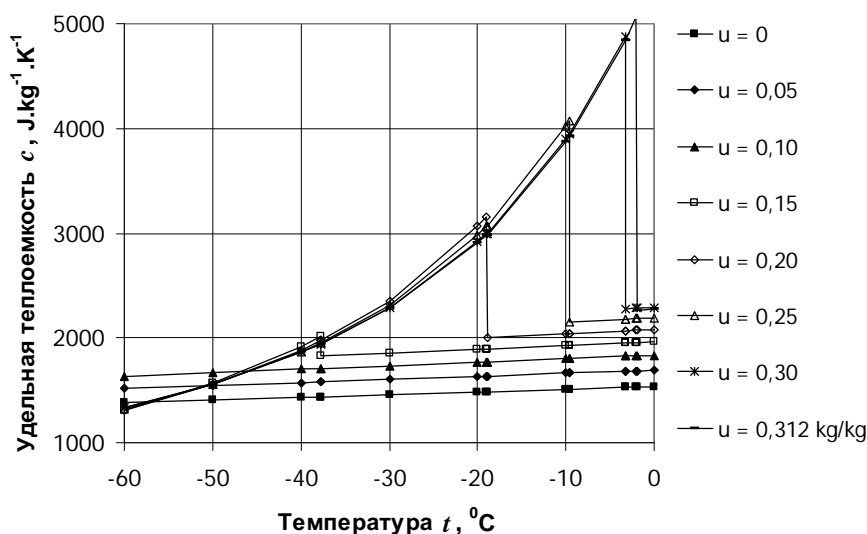
Как видно из рис. 2, получающиеся указанным способом значения  $u_{\text{fsp}} = \text{const}$  для содержащей лед древесины уменьшаются с увеличением  $u$ , что полностью соответствует отмеченному выше мнению Б.С.Чудинова (1968) о физике рассматриваемого процесса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕРЗЛОЙ И ОТТАЯВШЕЙ ДРЕВЕСИНЫ

Для вычисления удельной теплоемкости древесины по уравнению (1) с использованием уравнений (2) ÷ (9) нами изготовлена программа, которая введена в функционирующей в Windows вычислительной среде Visual Fortran Professional. Программа позволяет вычислять  $c_w$  и  $c_{bw}$ , а также их сумму  $c$  при произвольных заданных величинах шагов изменения температуры и влагосодержания древесины в диапазонах  $-60 \leq t \leq 0^\circ\text{C}$  и  $0 \leq u \leq u_{fsp}$ .

На рис. 3 в качестве примера показано вычисленное при помощи программы изменение удельной теплоемкости дубовой древесины в зависимости от  $t$  и  $u$  в указанных диапазонах. Этой программой получены также и показанные на рис. 1 и рис. 2 результаты.

Известно, что максимальное количество льда от замерзания гигроскопически связанной воды в древесине получается при  $u = u_{fsp}$ . Как было отмечено выше, исследования Б.С.Чудинова (1968) показали, что оттаивание максимально возможного количества такого льда заканчивается при  $t = -2^\circ\text{C}$ , т.е. при  $T = T_{nfw} = 271,15 \text{ K}$ . После замещения этого значения  $T$  в уравнение (8) определено максимальное значение  $u$ , при котором находящаяся в древесине вода является только связанной, т.е. в древесине отсутствует свободная вода. Таким образом установлено, что максимально возможное количество связанной воды в дубовой древесине равно  $u_{fsp} = 0,312 \text{ kg.kg}^{-1}$ . До этого максимального значения  $u$  исследовано изменение  $c$ , которое показано на рис. 3.



**Рис. 3.** Изменение удельной теплоемкости мерзлой и оттаявшей дубовой древесины с  $u_{fsp}^{20} = 0,29 \text{ kg.kg}^{-1}$  в зависимости от  $t$  и  $u$

На рис. 3 видно, что повышение  $t$  вызывает экспоненциальное нарастание удельной теплоемкости  $c$  содержащей гигроскопический лед и линейное увеличение  $c$  несодержащей такого льда древесины для всех исследованных значений  $u$ .

Увеличение  $u$  при данном значении  $t$  обуславливает пропорциональное понижение  $c$  мерзлой древесины и повышение  $c$  оттаявшей древесины. На рисунке видно также, что когда  $u$  находится в диапазоне  $u_{nfw} < u \leq u_{fsp}$  температура  $t = t_{nfr}$ , при которой заканчивается оттаивание льда от гигроскопически связанной воды в древесине, является критической. При этой температуре происходит скачок в сторону

понижения от достигнутого максимального для данного  $u$  значения  $c$  к значению  $c$  для оттаявшей древесины, так как при  $t > t_{nfr}$  больше нет льда в древесине.

С уменьшением  $u$  при  $u_{nfw} < u \leq u_{fsp}$  скачок зависимостей  $c(t, u, u_{fsp})$  перемещается к более низким значениям  $t_{nfw}$  из-за обстоятельства, что при меньших значениях  $u$  полное оттаивание льда от гигроскопически связанной воды в древесине происходит при более низких температурах (Чудинов 1968).

На рис. 3 видно, что скачок зависимостей  $c(t, u, u_{fsp})$  для дубовой древесине происходит в соответствии с показанной на рис. 1 кривой  $t_{nfw}(u)$ , а именно: при  $t_{nfw} = -37,76^{\circ}\text{C}$  для  $u = 0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$ ; при  $t_{nfw} = -18,93^{\circ}\text{C}$  для  $u = 0,20 \text{ kg.kg}^{-1}$ ; при  $t_{nfw} = -9,56^{\circ}\text{C}$  для  $u = 0,25 \text{ kg.kg}^{-1}$ ; при  $t_{nfw} = -3,26^{\circ}\text{C}$  для  $u = 0,30 \text{ kg.kg}^{-1}$  и при  $t_{nfw} = -2,00^{\circ}\text{C}$  для  $u \geq 0,312 \text{ kg.kg}^{-1}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен метод для вычисления удельной теплоемкости мерзлой древесины, содержащей лед от замерзания гигроскопически связанной воды в ней. Метод учитывает физику процесса оттаивания этого льда в древесине. Он отражает влияние предела гигроскопичности  $u_{fsp}$  отдельных древесных пород на удельную теплоемкость древесины во время ее размораживания, а также влияние температуры на  $u_{fsp}$ . С использованием метода вычислены и графически представлены зависимости удельной теплоемкости для дубовой древесины в диапазонах  $-60 \leq t \leq 0^{\circ}\text{C}$  и  $0 \leq u \leq u_{fsp}$ .

Полученные результаты могут быть использованы в технологических и энергетических расчетах процессов оттаивания мерзлых древесных сортиментов и в модельно базированных системах автоматического управления этими процессами (Deliiski 2004).

## ЛИТЕРАТУРА

1. ДЕЛИЙСКИ, Н., 2003: Моделиране и технологии за пропарване на дървени материали в автоклави. Дисертация за д.т.н., С., ЛТУ; 358 с.
2. ЧУДИНОВ, Б. С., 1968: Теория тепловой обработки древесины. Наука, М.; 255 с.
3. DELIISKI, N., 1990: Mathematische Beschreibung der spezifischen Wärmekapazität des aufgetauten und gefrorenen Holzes. VIII International Symposium 'Fundamental Research of Wood', Warszawa; 229-233.
4. DELIISKI, N., 2004: Modeling and automatic control of heat energy consumption required for thermal treatment of logs. Drvna Industrija, Volume 55, № 4; 181-199.
5. DZURENDA, L., DELIISKI, N., 2010: Tepelné procesy v technológiách spracovania dreva. Vysokoškolska učebnica, TU-Zvolen; 266 s.
6. SIAU, J. F., 1984: Transport processes in wood, Springer-Verlag, NewYork

Streszczenie: Pojemność cieplna zamrożonego drewna dębu podczas rozmrażania. Rozważano możliwość wyliczenia pojemności cieplnej c zamrożonego drewna wraz z lodem, powstałym wskutek zamrażania higroskopijnie związanej wody. Wzięto pod uwagę wpływ punktu nasycenia włókien różnych gatunków oraz temperatury na pojemność cieplną układu drewno-lód. Wykonano specjalne oprogramowanie na bazie Visual Fortran Professional firmy Microsoft. Wyznaczono pojemności cieplne zamrożonego drewna dębu o wilgotności od zera do punktu nasycenia włókien, w zakresie temperatur od  $-60^{\circ}\text{C}$  do  $-0^{\circ}\text{C}$

### Corresponding authors:

Nencho Deliiski,  
Faculty of Forest Industry, University of Forestry,  
Kliment Ohridski Bd. 10, 1756 Sofia, BULGARIA,  
e-mail: deliiski@netbg.com

Ladislav Dzurenda,  
Faculty of Wood Technology, Technical University of Zvolen,  
T.G.Masarika 24, 96053 Zvolen, SLOVAKIA,  
e-mail: dzurenda@vsld.tuzvo.sk