

ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ПРЕДАВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРА НА ДЪРВЕСИНАТА В ХИГРОСКОПИЧНИЯ ДИАПАЗОН ПО ВРЕМЕ НА РАЗМРАЗЯВАНЕТО ѝ

Ненчо Делийски¹, Ладислав Дзуренда², Славчо Соколовски¹, Васил Тодоров¹

¹ Лесотехнически университет, София

² Технически университет, Зволен, Словакия

Резюме

В работата се предлага методика за изчисляване на коефициента на предаване на температура на съдържача лед дървесина в хигроскопичния диапазон по време на размразяването ѝ. Методиката отразява физиката на процеса на разтопяване на леда, образува се в дървесината от замръзването на адсорбционно свързаната вода. Тя включва за първи път и влиянието на влагосъдържанието при границата на насищане на клетъчните стени на различните дървесни видове върху коефициента им на предаване на температура и влиянието на температурата върху това влагосъдържание. Предложената методика е използвана за изчисляване на коефициента на предаване на температура на букова и дъбова дървесина в температурния диапазон от -60°C до 0°C . Получените резултати могат да се използват при технологични и други инженерни пресмятания и за анализ на процесите на термично и хидротермично обработване на дървесината, а също и софтуера на системи за моделно базирано и моделно предсказващо автоматично управление на тези процеси.

Ключови думи: коефициент на предаване на температура, замръзнала дървесина, хигроскопичен диапазон.

Key words: temperature conductivity, frozen wood, hygroscopic diapason.

JEL: Q23.

Увод

При технологични и други инженерни изчисления, свързани с топлинното и хидротермичното обработване на дървени материали, често се използва коефициентът на предаване на температура на дървесината a . Известно е, че той представлява отношение на коефициента на топлопроводност λ към произведението на специфичния топлинен капацитет c и плътността ρ на материала [3, 4, 6].

При изчисляване на процеси на нагриване и/или охлаждане на несъдържача лед дървесина нейният коефициент на предаване на температура може да бъде определян съгласно това отношение, използвайки стойностите на c , λ и ρ на дървесината при конкретната температура t и влагосъдържание u или осреднено за съответните диапазони на t и u .

При изчисляване на процеси на размразяване на съдържачи лед дървени материали в хигроскопичния диапазон, т.е. при стойности на u , по-малки от тези при границата на насищане на клетъчните стени u_{fsp} , обаче е необходимо да се взема под внимание влиянието върху a на специфичния топлинен капацитет както на самата дървесина c , така и на леда c_{bw} , образува се от замръзването на адсорбционно свързаната вода в дървесината.

При прецизно определяне на a е необходимо да се взема под внимание и влиянието на влагосъдържанието u_{fsp} , което при различните дървесни видове се изменя в широки граници от

0,2 до $0,4 \text{ kg.kg}^{-1}$ [1, 2, 3, 6], а също и влиянието на t върху u_{fsp} .

Цел на настоящата работа е съставяне на методика за изчисляване на коефициента на предаване на температура на съдържача и несъдържача лед дървесина в хигроскопичния диапазон с отчитане влиянието на u_{fsp} върху a , а също за първи път и на температурата върху u_{fsp} .

1. Моделиране на a в хигроскопичния диапазон

Съгласно резултатите от обширни теоретични и експериментални изследвания, приведени в [2, 4], при изчисляването на процеси на размразяване на съдържача лед дървесина при $T \leq 271,15 \text{ K}$ коефициентът a на предаване на температура a следва да се определя с отчитане на влиянието върху a на сумата от специфичните топлинни капацитети c и c_{bw} , а при изчисляване на a на несъдържача лед дървесина (след приключване на разтопяването на леда) – само това на c , т.е. математичният модел на a в хигроскопичния диапазон може да се изрази чрез следните уравнения:

- при наличие на лед в дървесината:

$$a(T, u, u_{fsp}) = \frac{\lambda(T, u, u_{fsp})}{[c(T, u, u_{fsp}) + c_{bw}(T, u, u_{fsp})] \rho(\rho_b, T, u, u_{fsp})^{20}}, \quad (1)$$

- при липса на лед в дървесината:

$$a(T, u, u_{fsp}) = \frac{\lambda(T, u, u_{fsp})}{c(T, u, u_{fsp}) \rho(\rho_b, T, u, u_{fsp}^{20})} \quad (2)$$

където

u_{fsp}^{20} е влагосъдържанието на дървесината при границата на насищане на клетъчните й стени при 20 °C, kg.kg⁻¹;

ρ_b - базисната плътност на дървесината на съответния дървесен вид, kg.m³.

Участващите в уравнения (1) и (2) математични описания на λ , c , c_{bw} и ρ във функция от влияещите им фактори при $u_{fsp} = u_{fsp}^{20}$ е приведено в [2, 3]. За по-точно изчисляване на a е необходимо в тези описания да се отрази още и влиянието на T върху u_{fsp} .

2. Влияние на температурата върху u_{fsp} при моделирането на a

Въз основа на резултати от обширни експериментални изследвания А. J. Stamm [5] извежда следното уравнение, отразяващо влиянието на температурата върху u_{fsp} на несъдържаща лед дървесина:

$$u_{fsp} = u_{fsp}^{20} - 0,001(T - 293,15), \quad (3)$$

където

u_{fsp} е влагосъдържанието на дървесината при границата на насищане на клетъчните стени, kg.kg⁻¹;

T – температурата, К.

В специализираната литература липсват сведения за влиянието на T върху u_{fsp} на дървесина, съдържаща лед от хигроскопично свързаната вода. Единствено Б. С. Чудинов [4] отбелязва, че с понижаване на T се очаква u_{fsp} на такава дървесина да намалява, тъй като частта от хигроскопично свързаната вода, която преминава в лед, престава да бъде свързана и става свободна (образуващият се лед се разполага в порите).

Тъй като уравнение (3) е общоприето в специализираната литература, то при математичното описание на a по-долу това уравнение е използвано за отразяване на влиянието на T върху u_{fsp} на дървесината при $t < 0$ °C след настъпване на пълното разтопяване на леда, образувал се от хигроскопично свързаната вода.

Докато трае разтопяването на този лед в математичното описание се използва неизменна стойност на u_{fsp} , която дървесината има при температурата на пълното разтопяване на леда, означена по-долу като T_{nfw} (в К) или t_{nfw} (в °C).

Въз основа на поместени в [5] експериментални данни в [2] са изведени следните уравне-

ния за определяне на T_{nfw} и u_{nfw} на подложена на размразяване дървесина:

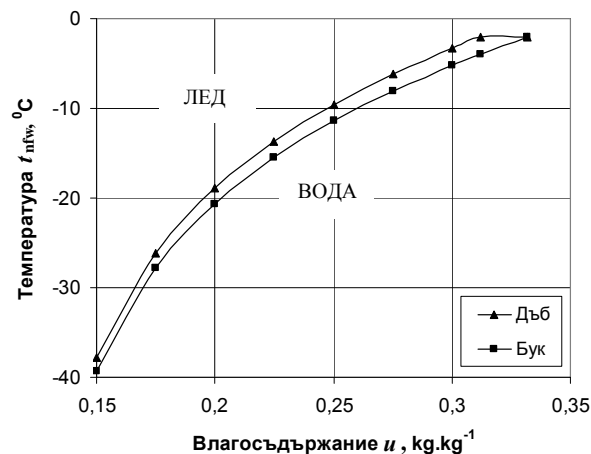
$$T_{nfw} = 271,15 + \frac{\ln \frac{u_{nfw} - 0,12}{u_{fsp} - 0,12}}{0,0567}, \quad (4)$$

$$u_{nfw} = 0,12 + (u_{fsp} - 0,12) \exp[0,0567(T - 271,15)], \quad (5)$$

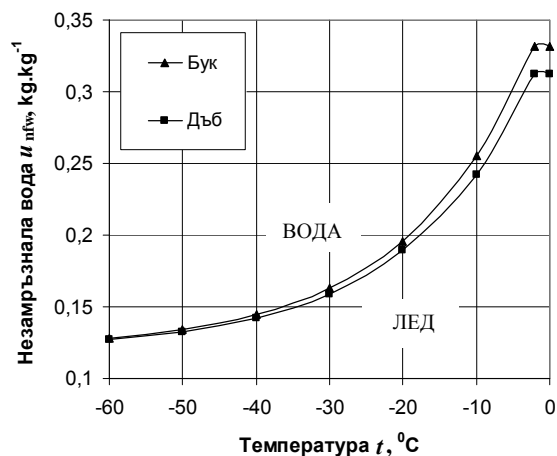
където

u_{nfw} е количеството на незамръзнала вода в дървесината при дадена температура $T \leq 271,15$ К, kg.kg⁻¹ [4].

На фиг. 1 и фиг. 2 е показано изчисленото по уравнения (4) и (5) изменение съответно на t_{nfw} и u_{nfw} на букова дървесина $u_{fsp}^{20} = 0,31$ kg.kg⁻¹ и на дъбова дървесина с $u_{fsp}^{20} = 0,29$ kg.kg⁻¹ [1, 3] в зависимост от влияещите им фактори.

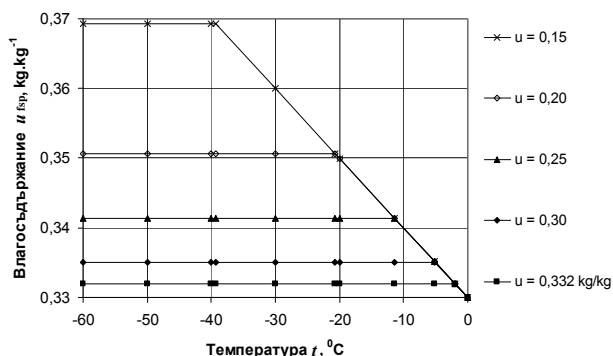


Фиг. 1. Изменение на t_{nfw} на букова и дъбова дървесина в зависимост от u

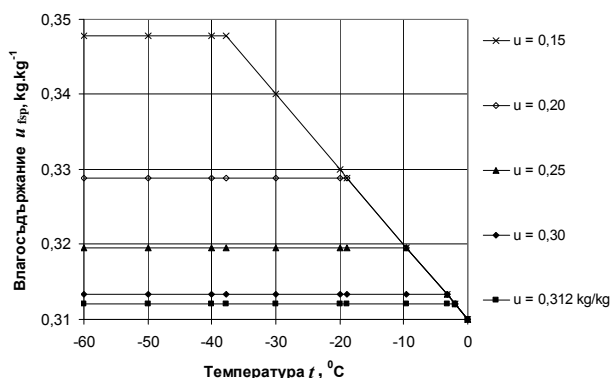


Фиг. 2. Изменение на u_{nfw} на букова и дъбова дървесина в зависимост от t

На фиг. 3 и фиг. 4 с наклонените линии е показано изчисленото по уравнение (3) изменение на u_{fsp} на несъдържаща лед дървесина в зависимост от t при $t < 0$ °C и u при $0,15 \leq u \leq u_{fsp}$.



Фиг. 3. Изменение на u_{fsp} на буквата дървесина в зависимост от t и u



Фиг. 4. Изменение на u_{fsp} на дъбовата дървесина в зависимост от t и u

Хоризонталните линии с $u_{fsp} = const$ пресичат наклонените линии на тези фигури при температури, които съответстват на изчислените по уравнение (4) (след залагане в него на условието $u_{nfv} = u$) стойности на t_{nfv} за показаните в легендите на фиг. 3 и фиг. 4 стойности на u . Поради липса на публикувани сведения за влиянието на t върху u_{fsp} на съдържаща лед дървесина, за изчисляване на a при $T < T_{nfv}$ се използват показаните в левите части на фиг. 3 и фиг. 4 постоянни стойности на u_{fsp} , които се получават за съответния дървесен вид по уравнение (3) след залагане в него на $T = T_{nfv}$.

На фиг. 3 и фиг. 4 се вижда, че u_{fsp} на съдържащата лед букова и дъбова дървесина има следните постоянни стойности, докато трае разтопяването на леда: съответно $0,369 \text{ kg.kg}^{-1}$ и $0,348 \text{ kg.kg}^{-1}$ при $u = 0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$; $0,351 \text{ kg.kg}^{-1}$ и $0,329 \text{ kg.kg}^{-1}$ при $u = 0,20 \text{ kg.kg}^{-1}$; $0,341 \text{ kg.kg}^{-1}$ и $0,320 \text{ kg.kg}^{-1}$ при $u = 0,25 \text{ kg.kg}^{-1}$; $0,335 \text{ kg.kg}^{-1}$ и $0,314 \text{ kg.kg}^{-1}$ при $u = 0,30 \text{ kg.kg}^{-1}$.

Тези стойности на u_{fsp} показват и това добре се вижда на фиг. 3 и фиг. 4, че поради наличието на обратно пропорционална зависимост на T_{nfv} от u стойностите на u_{fsp} на съдържаща лед дървесина намаляват с увеличаване на u , което изцяло съответства на отбелязаното по-горе схващане на Б. Чудинов [4] за физиката на разглеждания процес.

3. Симуляционно изследване на изменението на a в хигроскопичния диапазон

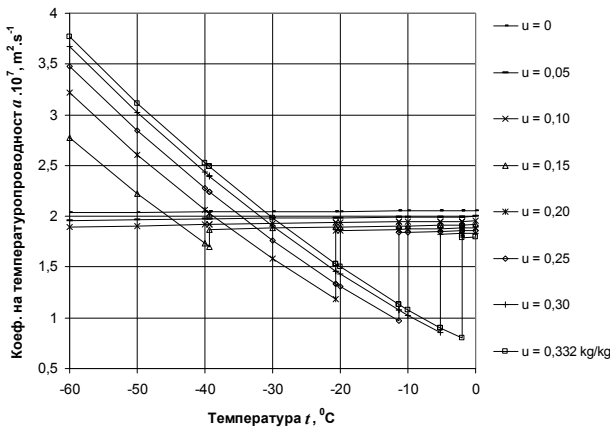
Чрез добавяне на уравнение (3) в приведените в [2] и [3] математични описания на коефициента на топлопроводност, на плътността и специфичния топлинен капацитет на съдържаща и несъдържаща лед дървесина, а също на специфичния топлинен капацитет на леда, образуван се в дървесината от адсорбционно свързаната вода в нея, е отразено изложеното по-горе влияние на T върху u_{fsp} , а оттам – и върху изброените топлофизични характеристики.

Актуализираните по този начин математични описания са използвани за изчисляване по уравнения (1) и (2) на коефициента на предаване на температура напречно на влакната a_c на букова с $\rho_b = 560 \text{ kg.m}^{-3}$ и дъбова с $\rho_b = 670 \text{ kg.m}^{-3}$ дървесина по време на размразяването ѝ в хигроскопичния диапазон при изменение на температурата от -60 °C до 0 °C. Получените по уравнения (1) и (2) резултати за изменението на a_c в зависимост от t и u са показани на фиг. 5 за буквата дървесина и на фиг. 6 за дъбовата дървесина.

Известно е, че максимално количество лед от хигроскопично свързана вода в дървесината се получава при $u = u_{fsp}$. Изследванията на Б. Чудинов [4] показват, че разтопяването на максимално възможното количество такъв лед приключва при $t = -2$ °C, т.е. при $T = T_{nfv} = 271,15 \text{ K}$.

След залагане на тази стойност на T в уравнение (3) са изчислени максималните стойности на u , при които намиращата се в дървесината вода е изцяло свързана. По този начин е установено, че максимално възможното количество свързана вода при $T = 271,15 \text{ K}$ в букова дървесина с $u_{fsp}^{20} = 0,31 \text{ kg.kg}^{-1}$ е равно на $0,332 \text{ kg.kg}^{-1}$, а в дъбова дървесина с $u_{fsp}^{20} = 0,29 \text{ kg.kg}^{-1}$ то е равно на $0,312 \text{ kg.kg}^{-1}$. До тези стойности на u е изследвано изменението на a_c , което е показано на фиг. 5 и фиг. 6. Анализът на графиките на фиг. 5 и фиг. 6 показва, че при дадена стойност на t увеличаването на u предизвиква нелинейно нарастване на a_c на дървесина, която съдържа лед от свързаната вода и намаляване на a_c на дървесина, в която липсва такъв лед.

От графиките на фиг. 5 и фиг. 6 се вижда, че повишаването на t при дадена стойност на u предизвиква значително намаляване на a_c на



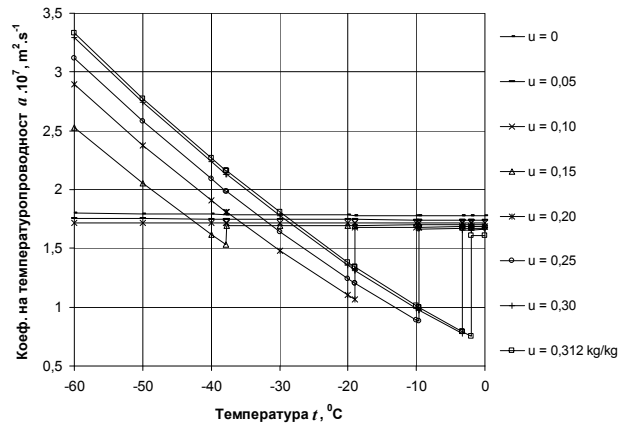
Фиг. 5. Изменение на a_c на буквата дървесина в зависимост от t и u

Отклонение от тази закономерност се наблюдава единствено при несъдържаща лед дъбова дървесина с $u=0 \text{ kg.kg}^{-1}$ и $u=0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$, където повишаването на t обуславя изключително слабо увеличаване на a_c . Изменението на a_c в зависимост от t с достатъчна за практически изчисления може да се приеме за линейна както при съдържаща, така и при несъдържаща лед дървесина. На фиг. 5 и фиг. 6 се вижда също, че когато при повишаване на температурата на дървесина, съдържаща лед от адсорбционно свързаната вода, се достигне стойността t_{nfw} , при която този лед се разтопява окончателно, настъпва скок в изменението на a_c . Причината за този скок е фазовото превръщане на последната порция замръзнала адсорбционно свързана вода в дървесината при съответните стойности на $t=t_{nfw}$ и u , при което се проявява влиянието върху a_c на значителната разлика на специфичния топлинен капацитет на водата в твърдо и в течно агрегатно състояние. Останалите порции такава вода вече са се разтопили при по-ниски t [4].

На фиг. 5 и фиг. 6 се вижда, че скок и смяна на наклона на зависимостите $a_c(t, u)$ при буквата и дъбовата дървесина настъпва съответно:

- при $t_{nfw}=-39,35 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{nfw}=-37,76 \text{ }^\circ\text{C}$ за $u=0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$;
- при $t_{nfw}=-20,68 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{nfw}=-18,93 \text{ }^\circ\text{C}$ за $u=0,20 \text{ kg.kg}^{-1}$;
- при $t_{nfw}=-11,39 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{nfw}=-9,56 \text{ }^\circ\text{C}$ за $u=0,25 \text{ kg.kg}^{-1}$;
- при $t_{nfw}=-5,15 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{nfw}=-3,26 \text{ }^\circ\text{C}$ за $u=0,30 \text{ kg.kg}^{-1}$;
- при $t_{nfw}=-2,00 \text{ }^\circ\text{C}$ за $u=0,332 \text{ kg.kg}^{-1}$ (бук) и $u=0,312 \text{ kg.kg}^{-1}$ (дъб).

съдържаща лед дървесина и съвсем слабо увеличаване на a_c на несъдържаща лед дървесина.



Фиг. 6. Изменение на a_c на дъбовата дървесина в зависимост от t и u

Наличието на нарастващ с увеличаването на u скок в стойностите на a_c на фиг. 5 и фиг. 6 свидетелства за коректно отразяване в математичния модел на a_c на постановката от теорията на топлинното обработване на дървесината [4], според която, когато $u_{nfw} \leq u \leq u_{fsp}$ именно при $t=t_{nfw}$ приключва разтопяването на последната порция от леда в дървесината, който се е образувал от замръзването на адсорбционно свързаната вода в нея.

Сравняването помежду им на приведените на фиг. 5 и фиг. 6 резултати показва, че при едни и същи t и u стойностите на a_c на буквата дървесина са по-големи от аналогичните стойности на a_c на дъбовата дървесина от 8% до 12% при наличие на лед и от 11 до 16% при липса на лед в дървесината. Основна причина за това е с около 12% по-малката плътност на бука в сравнение с тази на дъба, която участва в знаменателя на уравнения (1) и (2) и, следователно, влияе обратно пропорционално на a_c .

Сравняването на показаните на фиг. 5 стойности на a_c на буквата дървесина с приведените в [3] аналогични стойности на a_c на същата дървесина, които обаче са получени без отчитане влиянието на t върху u_{fsp} , показва, че прецизираните в настоящата работа с отчитане на това влияние стойности на a_c са по-малки в границите до 10% при наличие на лед в буквата дървесина. Освен това при отчитане влиянието на t върху u_{fsp} стойностите на температурата t_{nfw} , при която настъпва окончателното разтопяване на леда в буквата дървесина, се оказват с около $2 \text{ }^\circ\text{C}$ (при $u=0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$) и с около $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (при $u=0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$) по-ниски спрямо получените без отчитане на това влияние. Това означава, че след въвеждане на установеното влияние на t

върху u_{fsp} в математичните модели, по които се изчислява и управлява разходът на топлинна енергия, необходим за размразяване на дървени материали [3], по-прецизно прогнозираният с моделите специфичен енергиен разход ще се понижи с около 5%.

Заклучение

В работата е предложена методика за изчисляване на коефициента на предаване на температура на съдържаща лед дървесина в хигроскопичния диапазон по време на размразяването ѝ. Методиката отразява физиката на процеса на разтопяване на леда, който се е образувал в дървесината от замръзването на адсорбционно свързаната вода. Тя отразява за първи път влиянието на влагосъдържанието при границата на насищане на клетъчните стени на различните дървесни видове върху коефициента им на предаване на температура и влиянието на температурата върху това влагосъдържание.

Получените резултати могат да се използват при технологични и други инженерни изчисления и анализ на процеси на термично обработване на дървени материали с цел пластифицирането им в производството на фурнир, а също в софтуера на автоматични системи за моделно базирано или моделно предсказващо управление на такива процеси. Отразяването на уст-

новеното влияние на t върху u_{fsp} в софтуера на тези системи може да осигури понижаване с около 4% на специфичния разход на топлинна енергия, необходим за размразяване на съдържащи лед обли и призматични дървени материали.

Благодарности

Тази работа е изготвена като част от разработването на съвместен проект между ЛТУ, София и ТУ, гр. Зволен, Словакия, на тема „Моделиране и визуализация на процесите на размразяване на дървесината в технологиите за термичното ѝ обработване“, който се подпомага финансово от НИС при ЛТУ (проект 114/2011 г.).

Литература

1. Виделов, Х. Сушене и топлинно обработване на дървесината. ЛТУ. София. 2003.
2. Делийски, Н. Моделиране и технологии за пропарване на дървени материали в автоклави. Дисертация за д.т.н. ЛТУ. София. 2003.
3. Делийски, Н., Дзуренда, Л. Моделиране на топлинни процеси в технологиите за обработване на дървесина. Изд. „Авангард Прима“. София. 2010.
4. Чудинов, Б. Теория тепловой обработки древесины. Наука. Москва. 1968.
5. Stamm, A. *Wood and cellulose science*. The Ronald Press Company. New York. 1964.
6. Trebula, P., Klement, I. *Drying and hydrothermal treatment of wood*. TU Zvolen, Slovakia. 2002. (in Slovakian).

COMPUTATION OF THE WOOD TEMPERATURE CONDUCTIVITY IN THE HYGROSCOPIC DIAPASON DURING DEFROSTING OF THE WOOD

Nencho Deliiski¹, Ladislav Dzurenda², Slavcho Sokolovski¹, Vasil Todorov¹

¹ University of Forestry, Sofia, Bulgaria

² Technical university, Zvolen, Slovakia

Abstract

An approach for the computation of the temperature conductivity of frozen wood during its defrosting in a hygroscopic diapason has been suggested. The approach takes into account the physics of the processes of thawing of the ice, which is formed in the wood by hygroscopically bounded water in it. It reflects for the first time also the influence of the fiber saturation point of each wood species on its temperature conductivity coefficient in a frozen state and the influence of the temperature on the fiber saturation point. In this paper the suggested approach for the computation of the temperature conductivity of beech and oak wood in the hygroscopic diapason and in the temperature range from -60 °C to 0 °C is used. The obtained results can be used both for technological and other engineering calculations and for analysis of processes of thermal and hydrothermal treatment of wood materials, as well as in software of systems for model based automatic control of such treatment.