

## WYZNACZANIE WSPÓLCZYNNIKA DYFUZJI WILGOCI W DREWIE SOSNY ZWYCZAJNEJ

Jadwiga ŚWIRSKA-PERKOWSKA, Marek GAJDA  
Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Opolska, Opole, Polska

**Słowa kluczowe:** *dyfuzja wilgoci, drewno, kinetyka sorpcji, minimalizacja funkcji celu.*

### 1. Wprowadzenie

Drewno jest odnawialnym, ekologicznym materiałem o bardzo szerokim wachlarzu zastosowań. Jednakże możliwość jego zastosowania zależy od wielu czynników, między innymi od wytrzymałości, stabilności wymiarowej oraz trwałości drewna. Na wszystkie z wyżej wymienionych cech istotny wpływ ma wilgotność surowca drzewnego, na którą z kolei znacząco wpływa wartość współczynnika dyfuzji wilgoci w tym materiale.

Znaczącym zakresem wilgotności drewna jest zakres wilgotności higroskopijnych, czyli obszar zawarty pomiędzy wilgotnością drewna odpowiadającą stanowi suchemu, a wilgotnością występującą w stanie pełnego nasycenia przestrzeni międzymicelarnych błon komórkowych (w punkcie nasycenia włókien FSP), czyli zakres wilgotności bezwzględnych drewna od 0% do ~30% [2]. Punktem nasycenia włókien (*fiber saturation point*) nazywa się górną granicę chłonności błon komórkowych. Drewno o takiej wilgotności zawiera maksimum wody związanej bez udziału wody wolnej (mogącej występować w cewkach i naczyniach). Natomiast wilgotność bezwzględna drewna jest to wyrażony w procentach stosunek masy wody zawartej w drewnie do masy całkowicie suchego materiału.

W zakresie wilgotności higroskopijnych woda występuje w drewnie w postaci pary wodnej (głównie w światłach komórek) oraz wody związanej (głównie wewnątrz błon komórkowych). Ponieważ drewno jest porowatym, hierarchicznie zbudowanym kompozytem o złożonej budowie chemicznej [8], dlatego zachodzący w nim transport wilgoci jest procesem skomplikowanym i zależnym od kierunku przepływu masy [1,2]. Generalnie uważa się, że w przypadku transportu w kierunku podłużnym decydujące znaczenie w przenoszeniu wilgoci ma dyfuzja pary wodnej w lumenach, a efektywny współczynnik dyfuzji spada wraz ze wzrostem wilgotności. Natomiast w przypadku transportu w kierunku poprzecznym do włókien (stycznym lub radialnym) dominującym mechanizmem ruchu wilgoci jest przepływ wody związanej poprzez ścianki komórek, a efektywny współczynnik dyfuzji wilgoci rośnie wraz ze wzrostem wilgotności [2]. Przy tym współczynnik dyfuzji w kierunku radialnym jest zazwyczaj większy od współczynnika w kierunku stycznym, natomiast współczynnik dyfuzji wzdłuż włókien jest przeszło o rząd wielkości większy od obu pozostałych współczynników [6,10].

W rzeczywistości problem ten jest o wiele bardziej złożony, a przepływ składa się z wielu mechanizmów cząstkowych takich jak: przepływ przez ścianki komórkowe, jamki, komórki promieniowe. W literaturze można znaleźć wiele różnych modeli takich przepływów opartych na analogiach elektrycznych [2,9].

W niniejszej pracy badano proces adsorpcji pary wodnej w próbkach drewna sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.), w zakresie wilgotności bezwzględnych od 4% do 18%, odpowiadających wilgotnościom względnym powietrza od 25% do 85%. Celowo wybrano do badań gatunek drewna, mający bardzo szerokie zastosowanie w budownictwie. Eksperyment przeprowadzono przy dyfuzji przebiegającej każdorazowo w jednym z trzech kierunków anatomicznych i jednocześnie głównych kierunków ortotropii materiału: wzdłuż włókien oraz w kierunku stycznym i promieniowym do słoików. Współczynników dyfuzji wilgoci poszukiwano na podstawie zmian masy sorbujących próbek na drodze minimalizacji funkcji błędu, przy założeniu warunków brzegowych III rodzaju i stałym lub zmiennym liniowo współczynnikiem przejmowania wilgoci na brzegu próbki. Każdorazowo analizowano cztery przypadki zmienności współczynnika dyfuzji wraz z wilgotnością materiału, a mianowicie w postaci: stałej, funkcji liniowej, funkcji kwadratowej oraz funkcji eksponencjalnej, przy założeniu stałości współczynnika przejmowania wilgoci. Dodatkowo, w kierunku radialnym i stycznym, przeanalizowano przypadek zmienności liniowej zarówno współczynnika dyfuzji wilgoci jak i współczynnika przejmowania wilgoci. Przeprowadzone badania pozwalają lepiej zrozumieć proces dyfuzji wilgoci zachodzący w drewnie i ocenić udział wymienionych mechanizmów dyfuzyjnych w procesie przenoszenia wilgoci w tym materiale.

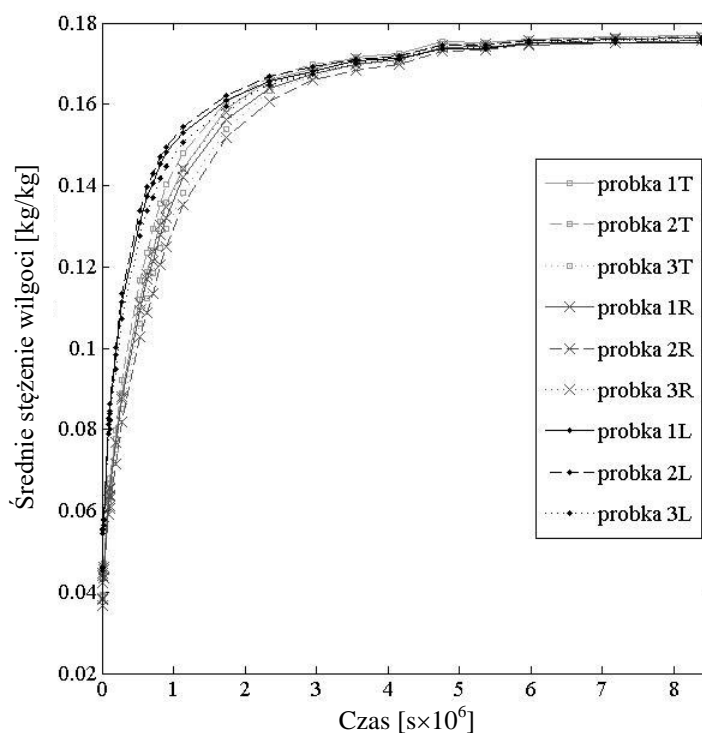
## 2. Badania eksperymentalne

Badania sorpcji przeprowadzono na próbkach drewna sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.), pochodzącej z terytorium Polski. Do eksperymentu przygotowano 9 próbek, wycinając je z jednej deski, ze stref wolnych od anomalii i uszkodzeń. Próbki miały kształt prostopadłościanów o wymiarach boków od 1,7 do 5 cm. Powierzchnie próbek wyrównano papierem ściernym i oczyszczono, a następnie wszystkie kawałki drewna zostały przełożone do komory cieplnej i wysuszone do stałej masy. Po wyjęciu z komory próbki zostały zaizolowane na pięciu bokach, tak aby sorpcja wilgoci zachodziła tylko przez jedną powierzchnię, a proces dyfuzji można było uznać za jednokierunkowy.

Wykonując izolację, próbki podzielono na trzy grupy. Wszystkie trzy próbki wchodzące w skład danej grupy izolowano tak, aby dyfuzja wilgoci zachodziła w nich wszystkich w jednym z oczekiwanych kierunków ortotropii tzn.: wzdłuż włókien (*L*) lub w kierunku stycznym (*T*) lub w kierunku radialnym (*R*). Po zaizolowaniu, próbki powtórnie umieszczono w komorze do badań cieplnych i ponownie wysuszone je do stałej masy.

Kiedy masa próbek osiągnęła stałą wartość, przeniesiono je do komory klimatycznej i sezonowano w powietrzu o temperaturze 20°C i o wilgotności względnej równej 25%. W celu sprawdzenia przyrostów masy, próbki były ważone na wadze o dokładności  $\pm 0,001$  grama, znajdującej się na zewnątrz komory. Po ustabilizowaniu się masy próbek, wilgotność powietrza w komorze klimatycznej została podniesiona do wartości 85% i rozpoczęto pomiar kinetyki sorpcji, mierząc masę próbek za pomocą wagi w różnych chwilach trwania procesu. Należy tu zauważyć, że każdy z takich pomiarów wymagał otwarcia komory i wyciągnięcia z niej próbek, co w efekcie zaburzało analizowany proces adsorpcji oraz warunki cieplno-wilgotnościowe panujące w komorze. Jednak przy szybkim i sprawnym wykonywaniu omawianych pomiarów zaburzenia te są niewielkie [7].

Wykresy przyrostów średnich wilgotności poszczególnych próbek w przypadku dyfuzji w każdym z kierunków ortotropii zostały pokazane na rys. 1.



Rys. 1. Wykres zmian w czasie średniej koncentracji wilgoci w próbkach (*L* – wzdłuż włókien, *T* – w kierunku stycznym, *R* – w kierunku promieniowym).

Fig. 1. Diagram of changes of average moisture content in samples of pine wood vs. time (*L* – along fibres, *T* – in the tangential direction, *R* – in the radial direction).

### 3. Równania modelu

W przypadku jednowymiarowego przepływu wilgoci wzdłuż jednego z kierunków ortotropii materiału, który to przepływ realizowany był podczas przedstawianego w pracy eksperymentu, równanie dyfuzji wilgoci przyjmie formę zależności [7]

$$\frac{\partial C^w}{\partial t} = \frac{\partial D_I^w}{\partial x} \frac{\partial C^w}{\partial x} + D_I^w \frac{\partial^2 C^w}{\partial x^2}, \quad I = L, R, T, \quad (1)$$

w której indeks *I* odnosi się do kierunku przepływu wilgoci w drewnie (*L*, *T* lub *R*), a wielkość  $C^w$  nie jest zdefiniowana jak w klasycznej teorii mieszanin, lecz opisuje bezwzględną wilgotność drewna (odniesioną do masy suchego materiału).

Równanie różniczkowe (1) zdyskretyzowano zgodnie z ideą metody różnic skończonych (MRS) według schematu

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^w - C_{i,j-1}^w}{\Delta t} &= \\ &= \frac{(D_I^w)_{i+1,j-1} - (D_I^w)_{i-1,j-1}}{2\Delta x} \frac{C_{i+1,j-1}^w - C_{i-1,j-1}^w}{2\Delta x} + (D_I^w)_{i,j-1} \frac{C_{i+1,j-1}^w - 2C_{i,j-1}^w + C_{i-1,j-1}^w}{(\Delta x)^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie  $\Delta$  oznacza przyrost,  $x$  współrzędną przestrzenną pokrywającą się z osią próbki, natomiast wskaźniki dolne  $i$  oraz  $j$  odnoszą się odpowiednio do węzła przestrzennego i punktu czasowego dyskretyzowanej przestrzeni  $(x,t)$ .

W analizowanym przypadku warunek początkowy opisywać będzie jednorodny rozkład wilgoci w próbce

$$C_{i,0}^w = C_0^w, \quad (3)$$

natomiast warunki brzegowe na zaizolowanej i niezaizolowanej (sorbującej) powierzchni próbki będą dane odpowiednio zależnościami

$$-(D_I^w)_{n,j} \frac{C_{n+1,j}^w - C_{n-1,j}^w}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow C_{n+1,j}^w = C_{n-1,j}^w, \quad (4)$$

$$-(D_I^w)_{0,j} \frac{C_{1,j}^w - C_{-1,j}^w}{2\Delta x} = \kappa_I (C_\infty^w - C_{0,j}^w) \Rightarrow C_{-1,j}^w = C_{1,j}^w + \frac{2\kappa_I \Delta x}{(D_I^w)_{0,j}} (C_\infty^w - C_{0,j}^w), \quad (5)$$

gdzie  $n$  jest indeksem węzła na końcu próbki,  $-1$  i  $n+1$  są indeksami węzłów fikcyjnych, łączących poza próbką w odległości  $\Delta x$  od jej końców, natomiast  $\kappa_I$  współczynnikiem przejmowania wilgoci na brzegu próbki prostopadłym do kierunku anatomicznego  $I$ .

#### 4. Procedura obliczeniowa

W niniejszej pracy analizowano cztery przypadki zmienności współczynnika dyfuzji wraz z wilgotnością materiału (przy stałym współczynniku przejmowania masy na powierzchni próbki  $\kappa_I = \text{const}$ ), a mianowicie w postaci: stałej, funkcji liniowej, funkcji kwadratowej oraz funkcji eksponencjalnej,

$$D_I^w(C^w) = D_{I0}, \quad D_I^w(C^w) = a_I + b_I C^w, \quad (6)$$

$$D_I^w(C^w) = a_I + b_I C^w + c_I (C^w)^2, \quad D_I^w(C^w) = a_I \exp(b_I C^w). \quad (7)$$

Przypadki te zostały oznaczone w dalszej części pracy odpowiednio jako: model 1, model 2, model 3 i model 4. Dodatkowo, w przypadku radialnego i stycznego kierunku przepływu wilgoci przeanalizowano model liniowej zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci oraz współczynnika przejmowania masy (przypadek ten oznaczono jako model 5)

$$D_{R,T}^w(C^w) = a_{R,T} + b_{R,T} C^w, \quad \kappa_{R,T}^w(C^w) = d_{R,T} + f_{R,T} C^w. \quad (8)$$

Wartości współczynników  $(D_{I_0}, a_I, b_I, c_I)$  oraz współczynnika przejmowania  $\kappa_I$  dobierano każdorazowo tak, aby obliczone zgodnie z równaniami (2)-(5) rozkłady zawartości wilgoci w próbce dały możliwie najbardziej zgodne z eksperymentem przyrosty masy próbki. Stopień dopasowania danego zestawu współczynników do danych doświadczalnych oceniano na podstawie wartości funkcji  $F$  będącej sumą bezwzględnych odchyleń kwadratowych pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczonymi

$$F(D_I^w, \kappa_I) = \sum_{k=1}^p (\Delta m_{e,k} - \Delta m_{o,k})^2, \quad (9)$$

gdzie:  $m_e, m_o, p$  to odpowiednio: masy próbki zmierzone i obliczone, liczba pomiarów zmiany masy. Dla każdego kierunku przepływu obliczenia rozpoczynano od znalezienia wartości stałego współczynnika dyfuzji wilgoci oraz odpowiadającego mu stałego współczynnika przejmowania wilgoci. Poszukiwano więc zestawu parametrów  $(D_{I_0}^a, \kappa_{I_0}^a)$ , zakładając przy tym, że rozkład koncentracji wilgoci w próbce dany jest wyrażeniem odpowiadającym analitycznemu rozwiązaniu równania (1) przy  $D_I^w = const$  i analizowanych warunkach początkowo-brzegowych. Minimum funkcji dopasowania  $F$  znajdowano przy wykorzystaniu metody numerycznego przeszukiwania dziedziny, określając obszar przeszukiwań na podstawie wykresu zależności  $F(D_{I_0}^a, \kappa_{I_0}^a)$ . Następnie powtarzano poszukiwania  $(D_{I_0}, \kappa_{I_0})$ , obliczając rozkład koncentracji wilgoci w próbce przy wykorzystaniu metody różnic skończonych (MRS) oraz dokonując minimalizacji funkcji  $F$  przy wykorzystaniu algorytmu optymalizacyjnego Levenberga-Marquardta, którego punktem startowym był zestaw parametrów  $(D_{I_0}^a, \kappa_{I_0}^a)$  uzyskany z poprzedniego podejścia. Stosując metodę MRS, w każdej próbce wprowadzano 31 węzłów przestrzennych. W dalszej kolejności obliczano stałe  $a_I$  i  $b_I$  oraz współczynnik  $\kappa_I$  odpowiadające przypadkowi liniowej zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci. Wykorzystywano przy tym również MRS oraz algorytm Levenberga-Marquardta, którego punktem startowym był punkt o współrzędnych  $(a_I = D_{I_0}, b_I = 0, \kappa_I = \kappa_{I_0})$ . Taką samą procedurę obliczeniową powtórzono w przypadku kwadratowej i eksponencjalnej zmienności współczynnika  $D_I^w$ , startując odpowiednio z punktów  $(a_I = D_{I_0}, b_I = 0, c_I = 0, \kappa_I = \kappa_{I_0})$  i  $(a_I = D_{I_0}, b_I = 0, \kappa_I = \kappa_{I_0})$  oraz w przypadku liniowej zmienności obu współczynników (punktem startowym był punkt  $(a_{R,T} = D_{R_0,T_0}, b_{R,T} = 0, d_{R,T} = \kappa_{R_0,T_0}, f_{R,T} = 0)$ ). Wszystkie algorytmy obliczeniowe zostały napisane przez autorów pracy w środowisku programowym MATLAB.

## 5. Wyniki obliczeń

W efekcie przeprowadzonych obliczeń, w przypadku każdej z próbek uzyskano zestawy współczynników, których wartości zestawiono w tabeli 1. W tabeli tej zamieszczono również wartości globalnego błędu dopasowania krzywej obliczeniowej do krzywej eksperymentalnej, wyznaczone zgodnie z zależnością [3,4]

$$e = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^p (\Delta m_{o,k} - \Delta m_{e,k})^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p (\Delta m_{e,k})^2}} 100\%. \quad (10)$$

Tabela 1. Wartości wyznaczonych stałych w poszukiwanych funkcjach (? – parametr niemożliwy do jednoznacznego wyznaczenia).

Kierunek	Model	Numer próbki	Wyznaczone współczynniki					$F$ [kg <sup>2</sup> ]	$e$ [%]
			$D_{I_0} / a_I$ [m <sup>2</sup> /s]	$b_I$ [m <sup>2</sup> /s] / [-]	$c_I$ [m <sup>2</sup> /s]	$\kappa_I / d_{R,T}$ [m/s]	$f_{R,T}$ [m/s]		
L	1	1	$1,379 \cdot 10^{-9}$	–	–	?	–	$1,7839 \cdot 10^{-8}$	3,46
		2	$1,343 \cdot 10^{-9}$	–	–	?	–	$1,4820 \cdot 10^{-8}$	3,27
		3	$1,372 \cdot 10^{-9}$	–	–	?	–	$1,8312 \cdot 10^{-8}$	3,29
	2	1	$4,985 \cdot 10^{-9}$	$-2,583 \cdot 10^{-8}$	–	?	–	$2,7323 \cdot 10^{-9}$	1,36
		2	$4,766 \cdot 10^{-9}$	$-2,447 \cdot 10^{-8}$	–	?	–	$2,3521 \cdot 10^{-9}$	1,31
		3	$4,626 \cdot 10^{-9}$	$-2,343 \cdot 10^{-8}$	–	?	–	$2,5817 \cdot 10^{-9}$	1,24
	3	1	$-1,393 \cdot 10^{-9}$	$7,160 \cdot 10^{-8}$	$-3,551 \cdot 10^{-7}$	?	–	$1,1632 \cdot 10^{-9}$	0,89
		2	$-9,847 \cdot 10^{-10}$	$6,351 \cdot 10^{-8}$	$-3,211 \cdot 10^{-7}$	?	–	$1,1318 \cdot 10^{-9}$	0,91
		3	$-9,829 \cdot 10^{-10}$	$6,287 \cdot 10^{-8}$	$-3,163 \cdot 10^{-7}$	?	–	$1,2792 \cdot 10^{-9}$	0,87
	4	1	$1,163 \cdot 10^{-8}$	-16,184	–	?	–	$5,0507 \cdot 10^{-9}$	1,84
		2	$1,062 \cdot 10^{-8}$	-15,630	–	?	–	$4,1677 \cdot 10^{-9}$	1,73
		3	$1,014 \cdot 10^{-8}$	-15,224	–	?	–	$4,5123 \cdot 10^{-9}$	1,63
T	1	1	$2,141 \cdot 10^{-10}$	–	–	$1,133 \cdot 10^{-7}$	–	$8,7339 \cdot 10^{-10}$	1,37
		2	$2,161 \cdot 10^{-10}$	–	–	$1,097 \cdot 10^{-7}$	–	$1,3875 \cdot 10^{-9}$	1,80
		3	$1,663 \cdot 10^{-10}$	–	–	$1,100 \cdot 10^{-7}$	–	$8,0333 \cdot 10^{-10}$	1,45
	2	1	$5,003 \cdot 10^{-10}$	$-1,935 \cdot 10^{-9}$	–	$6,845 \cdot 10^{-8}$	–	$3,0575 \cdot 10^{-10}$	0,81
		2	$7,036 \cdot 10^{-10}$	$-3,304 \cdot 10^{-9}$	–	$5,740 \cdot 10^{-8}$	–	$3,1713 \cdot 10^{-10}$	0,86
		3	$3,797 \cdot 10^{-10}$	$-1,447 \cdot 10^{-9}$	–	$6,344 \cdot 10^{-8}$	–	$2,2305 \cdot 10^{-10}$	0,76
	3	1	$-2,994 \cdot 10^{-10}$	$9,868 \cdot 10^{-9}$	$-4,297 \cdot 10^{-8}$	$1,033 \cdot 10^{-7}$	–	$1,890 \cdot 10^{-10}$	0,64
		2	$-3,497 \cdot 10^{-10}$	$1,134 \cdot 10^{-8}$	$-5,073 \cdot 10^{-8}$	$9,372 \cdot 10^{-8}$	–	$1,564 \cdot 10^{-10}$	0,60
		3	$-2,399 \cdot 10^{-10}$	$7,918 \cdot 10^{-9}$	$-3,459 \cdot 10^{-8}$	$9,366 \cdot 10^{-8}$	–	$1,134 \cdot 10^{-10}$	0,54

Tabela 1. Cd.

Kierunek	Model	Numer próbki	Wyznaczone współczynniki					$F$ [kg <sup>2</sup> ]	$e$ [%]
			$D_{I_0} / a_I$ [m <sup>2</sup> /s]	$b_I$ [m <sup>2</sup> /s] / [-]	$c_I$ [m <sup>2</sup> /s]	$\kappa_I / d_{R,T}$ [m/s]	$f_{R,T}$ [m/s]		
T	4	1	$6,652 \cdot 10^{-10}$	-7,653	–	$6,649 \cdot 10^{-8}$	–	$3,4111 \cdot 10^{-10}$	0,86
		2	$1,364 \cdot 10^{-9}$	-12,370	–	$5,298 \cdot 10^{-8}$	–	$4,3730 \cdot 10^{-10}$	1,01
		3	$4,986 \cdot 10^{-10}$	-7,452	–	$6,169 \cdot 10^{-8}$	–	$2,5280 \cdot 10^{-10}$	0,81
	5	1	$5,231 \cdot 10^{-10}$	$-2,024 \cdot 10^{-9}$	–	$7,869 \cdot 10^{-8}$	$-1,109 \cdot 10^{-7}$	$3,0394 \cdot 10^{-10}$	0,81
		2	$7,488 \cdot 10^{-10}$	$-3,544 \cdot 10^{-9}$	–	$6,192 \cdot 10^{-8}$	$-6,159 \cdot 10^{-8}$	$3,1422 \cdot 10^{-10}$	0,85
		3	$3,976 \cdot 10^{-10}$	$-1,517 \cdot 10^{-9}$	–	$7,503 \cdot 10^{-8}$	$-1,209 \cdot 10^{-7}$	$2,2078 \cdot 10^{-10}$	0,75
R	1	1	$1,762 \cdot 10^{-10}$	–	–	$1,337 \cdot 10^{-7}$	–	$1,2977 \cdot 10^{-9}$	1,37
		2	$1,558 \cdot 10^{-10}$	–	–	$1,028 \cdot 10^{-7}$	–	$8,1571 \cdot 10^{-10}$	1,80
		3	$2,056 \cdot 10^{-10}$	–	–	$1,008 \cdot 10^{-7}$	–	$1,2619 \cdot 10^{-9}$	1,45
	2	1	$4,667 \cdot 10^{-10}$	$-1,980 \cdot 10^{-9}$	–	$6,652 \cdot 10^{-8}$	–	$2,6248 \cdot 10^{-10}$	0,81
		2	$3,327 \cdot 10^{-10}$	$-1,199 \cdot 10^{-9}$	–	$6,140 \cdot 10^{-8}$	–	$2,6126 \cdot 10^{-10}$	0,86
		3	$5,610 \cdot 10^{-10}$	$-2,413 \cdot 10^{-9}$	–	$5,764 \cdot 10^{-8}$	–	$3,0677 \cdot 10^{-10}$	0,76
	3	1	$-2,953 \cdot 10^{-10}$	$9,411 \cdot 10^{-9}$	$-4,165 \cdot 10^{-8}$	$1,076 \cdot 10^{-7}$	–	$5,8709 \cdot 10^{-11}$	0,64
		2	$-2,040 \cdot 10^{-10}$	$7,039 \cdot 10^{-9}$	$-3,079 \cdot 10^{-8}$	$8,944 \cdot 10^{-8}$	–	$1,3748 \cdot 10^{-10}$	0,60
		3	$-3,035 \cdot 10^{-10}$	$1,005 \cdot 10^{-8}$	$-4,454 \cdot 10^{-8}$	$8,923 \cdot 10^{-8}$	–	$1,5210 \cdot 10^{-10}$	0,54
	4	1	$6,988 \cdot 10^{-10}$	-9,412	–	$6,332 \cdot 10^{-8}$	–	$3,3617 \cdot 10^{-10}$	0,84
		2	$4,133 \cdot 10^{-10}$	-6,621	–	$6,019 \cdot 10^{-8}$	–	$2,8801 \cdot 10^{-10}$	0,84
		3	$8,712 \cdot 10^{-10}$	-9,745	–	$5,470 \cdot 10^{-8}$	–	$3,7957 \cdot 10^{-10}$	0,88
	5	1	$4,879 \cdot 10^{-10}$	$-2,079 \cdot 10^{-9}$	–	$7,665 \cdot 10^{-8}$	$-1,090 \cdot 10^{-7}$	$2,5950 \cdot 10^{-10}$	0,74
		2	$3,524 \cdot 10^{-10}$	$-1,269 \cdot 10^{-9}$	–	$7,588 \cdot 10^{-8}$	$-1,516 \cdot 10^{-7}$	$2,5763 \cdot 10^{-10}$	0,80
		3	$5,866 \cdot 10^{-10}$	$-2,538 \cdot 10^{-9}$	–	$6,204 \cdot 10^{-8}$	$-5,564 \cdot 10^{-8}$	$3,0528 \cdot 10^{-10}$	0,79

W przypadku dyfuzji wzdłuż włókien, przy stałej wartości współczynnika  $D_L^w$ , dla wszystkich badanych próbek nie udało się znaleźć wartości współczynnika przejmowania wilgoci  $\kappa_L$ , ze względu na bardzo słabo uwarunkowane minimum funkcji  $F$  względem tego parametru (minimum położone było w wąskim, długim „żlebie” równoległym do osi opisującej wartości współczynnika  $\kappa_L$ ). Stwierdzono również, że dla każdej dowolnej wartości współczynnika  $\kappa_L$  większej niż  $\sim 10^{-6}$  m/s otrzymuje się w zasadzie taką samą wartość parametrów występujących w funkcji współczynnika dyfuzji  $D_L^w$ .

Analizując dane zawarte w tabeli 1 można zauważyć, że w przypadku wszystkich próbek oraz każdego kierunku przepływu uzyskano zmniejszenie wartości funkcji błędu przy przejściu ze stałej do liniowej zmienności współczynnika  $D_I^w(C^w)$ . Przy czym poprawa ta jest najbardziej widoczna w przypadku dyfuzji wilgoci wzdłuż włókien. Z powyższej tabeli wynika również, że w przypadku wszystkich próbek uzyskano poprawę dopasowania krzywej obliczeniowej do eksperymentalnej przy przejściu z liniowej do kwadratowej postaci funkcji  $D_I^w(C^w)$ . Model ten okazuje się dawać najlepsze dopasowanie obu krzywych. Zastosowanie, najczęściej wykorzystywanej w literaturze przedmiotu [4,5], eksponencjalnej zależności  $D_I^w(C^w)$  daje wprawdzie poprawę dopasowania w stosunku do stałej wartości współczynnika  $D_I^w$ , lecz dopasowanie to jest nieco gorsze (przypadek dyfuzji wzdłuż włókien) lub porównywalne (przypadki dyfuzji w kierunku stycznym i radialnym) z dopasowaniem uzyskiwanym przy zastosowaniu funkcji liniowej. Nieco lepsze wyniki uzyskuje się przy wykorzystaniu modelu 5 (liniowej zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci i współczynnika przejmowania masy).

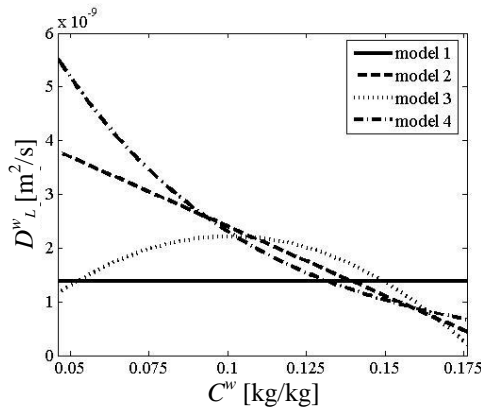
Na rysunkach poniżej (rys. 2-4) przedstawiono przykładowo, każdorazowo dla próbki nr 1, przebiegi wyznaczonych funkcji  $D_I^w(C^w)$  i  $\kappa_I(C^w)$  w przypadku wszystkich analizowanych kierunków przepływu. Ze względu na podobny charakter wykresów w przypadku poszczególnych próbek, zrezygnowano z zamieszczania w pracy wykresów w przypadku wszystkich próbek.

Jak wynika z prezentowanych rysunków, w przypadku wszystkich kierunków dyfuzji uzyskano liniowy spadek współczynnika dyfuzji wraz z wilgotnością materiału. Przeczy to powszechnej opinii, że w przypadku dyfuzji w kierunkach stycznym i radialnym proces ten zdominowany jest przez dyfuzję wody związanej poprzez ścianki komórek, a jego intensywność rośnie wraz ze wzrostem wilgotności materiału. Malejący wraz z wilgotnością materiału współczynnik dyfuzji w kierunku stycznym w przypadku buka zwyczajnego uzyskali także Olek, Perré i Weres [3] oraz w przypadku sosny zwyczajnej w kierunku radialnym Olek i Weres [4].

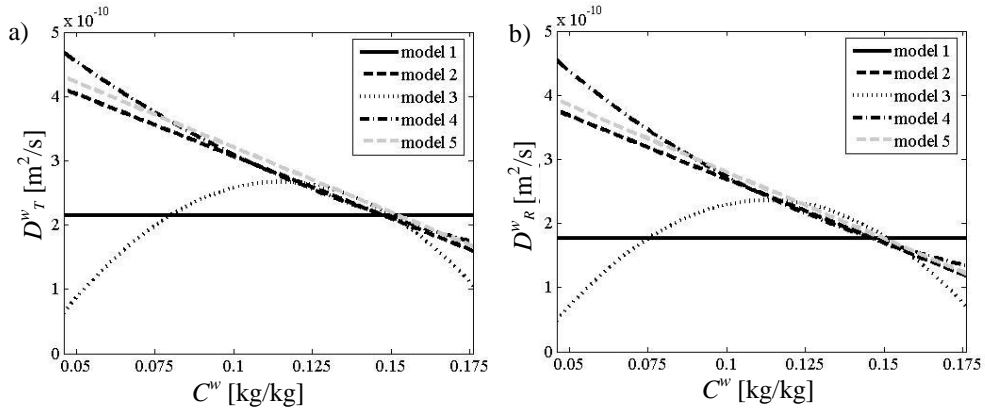
Jak już wspomniano wcześniej, w przypadku przepływu w każdym z kierunków ortotropii drewna, proste  $D_I^w(C^w)$  zawsze mają przebieg malejący, natomiast funkcje kwadratowe najpierw rosną, a następnie maleją osiągając maksimum wewnątrz analizowanego przedziału koncentracji wilgoci. Taki przebieg wykresów  $D_I^w(C^w)$ , świadczy o wzajemnym nakładaniu się i zbliżonym udziale obu mechanizmów dyfuzyjnych, omówionych we wprowadzeniu do pracy, w całokształcie procesu przenoszenia wilgoci we wszystkich analizowanych kierunkach.

Natomiast na rys. 4 widać, że zarówno w przypadku dyfuzji wilgoci w kierunku radialnym jak i stycznym, współczynnik przejmowania masy maleje wraz z koncentracją wilgoci w materiale.

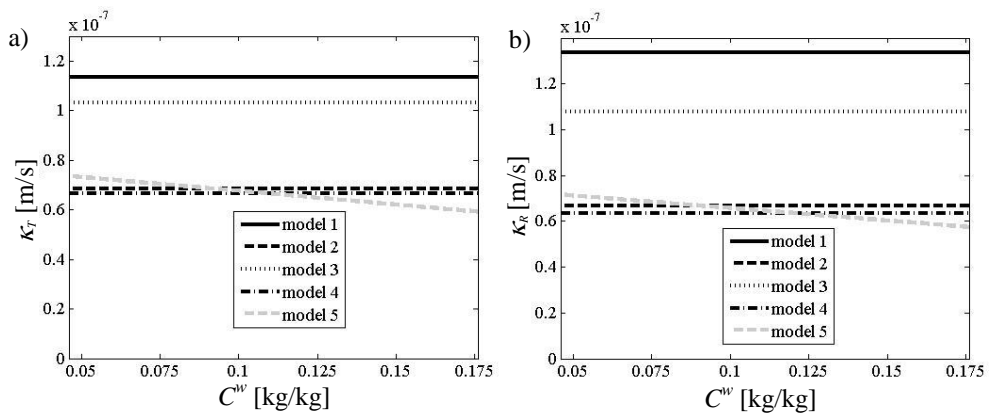




Rys. 2. Zmienność współczynnika dyfuzji wilgoci w kierunku podłużnym.  
 Fig. 2. Variation of moisture diffusion coefficient in the longitudinal direction.



Rys. 3. Zmienność współczynnika dyfuzji wilgoci – kierunek styczny (a) i radialny (b).  
 Fig. 3. Variation of moisture diffusion coefficient – tangential (a) and radial (b) direction,



Rys. 4. Zmienność współczynnika przejmowania masy – kierunek styczny (a) i radialny (b).  
 Fig. 4. Variation of surface emission coefficient – tangential (a) and radial (b) direction.

## 6. Wnioski końcowe

Z wyników obliczeń prezentowanych w niniejszej pracy wynika, że najlepsze, spośród wszystkich analizowanych modeli zmienności  $D_I^w(C^w)$ , dopasowanie krzywej obliczeniowej kinetyki sorpcji do krzywej eksperymentalnej uzyskuje się przy zastosowaniu funkcji kwadratowej. Założenie, najczęściej wykorzystywanej w literaturze przedmiotu, eksponencjalnej zależności  $D_I^w(C^w)$  daje wprawdzie poprawę dopasowania w stosunku do stałej wartości współczynnika dyfuzji, lecz dopasowanie to jest porównywalne z dopasowaniem uzyskiwanym przy zastosowaniu funkcji liniowej.

Uzyskane przebieg zmienności wykresów funkcji  $D_I^w(C^w)$  w przypadku każdego z kierunków przepływu, świadczą o wzajemnym nakładaniu się obu mechanizmów dyfuzyjnych w całokształcie procesów przenoszenia wilgoci we wszystkich analizowanych kierunkach. Przy czym w kierunku stycznym i radialnym, na wykresach funkcji kwadratowych  $D_I^w(C^w)$  obserwuje się przesunięcie maksimum tych funkcji w kierunku wyższych wilgotności i wydłużenie fragmentu rosnącego funkcji, co dowodzi większego udziału dyfuzji wody powierzchniowej w tych przypadkach w porównaniu do procesu przenoszenia wilgoci wzdłuż włókien. Wynik ten jest częściowo zgodny z powszechnym przekonaniem [2], że przy dyfuzji w kierunkach stycznym i radialnym proces ten zdominowany jest przez dyfuzję wody związanej poprzez ścianki komórek, z tym, że wskazuje on raczej na większy, a nie dominujący udział wzmiankowanego mechanizmu w procesie przenoszenia wilgoci w omawianych przypadkach. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na fakt, że w literaturze przedmiotu można również znaleźć prace, których autorzy uzyskali malejące wraz z wilgotnością współczynniki dyfuzji wilgoci w kierunkach poprzecznych do włókien [3,4]. Dlatego też tematyka ta wymaga dalszych badań i dużej ostrożności przy formułowaniu uogólniających stwierdzeń.

## Oznaczenia symboli

- $C^w$  – koncentracja wilgoci w odniesieniu do suchej masy materiału, moisture concentration related to the mass of dry material, [kg/kg],
- $D_I^w$  – współczynnik dyfuzji wilgoci w kierunku anatomicznym  $I$ , moisture diffusion coefficient in the anatomical direction  $I$ , [ $m^2/s$ ],
- $F$  – funkcja dopasowania, fitting function, [ $kg^2$ ],
- $e$  – globalny błąd dopasowania, global fitting error, [%],
- $m$  – masa, mass, [kg],
- $t$  – czas, time, [s],
- $x$  – współrzędna przestrzenna, spatial coordinate, [m],
- $\Delta$  – przyrost wielkości, increment of quantity,
- $\kappa$  – współczynnik przejmowania masy, coefficient of mass surface emission, [m/s].

## Literatura

- [1] Englund E. T., Thygesen L. G., Svenson S., Hill C. A. S.: A critical discussion the physics of wood-water interactions, Wood Science and Technology, 47, 2013, pp. 141-161.

- [2] Kang W., Chung W. Y., Eom C., Yco H.: Some considerations in heterogeneous nonisothermal transport models for wood: a numerical study, *Journal of Wood Science* 54, 2008, pp. 267-277.
- [3] Olek W., Perré P., Weres J.: Implementation of a relaxation equilibrium term in the convective boundary condition for a better representation of the transient bound water diffusion in wood, *Wood Science and Technology*, 45, 2011, pp. 677-691.
- [4] Olek W., Weres J.: Effects of method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modelling bound water transfer in wood, *Transport in Porous Media*, 66, 2007, pp. 135-144.
- [5] Silva W. P., Silva L. D., Oliveira Farias V. S., Silva C. M. D. P. S., Ataíde J. S. P.: Three-dimensional numerical analysis of water transfer in wood: determination of an expression for the effective mass diffusivity, *Wood Science and Technology*, 47, 2013, pp. 897-912.
- [6] Stamm A. J.: *Wood and cellulose science*, Ronald, 1964, New York.
- [7] Świrska-Perkowska J.: Adsorpcja i ruch wilgoci w porowatych materiałach budowlanych w warunkach izotermicznych, *Studia z Zakresu Inżynierii* 77, KILiW PAN, 2012, Warszawa.
- [8] Wadsö L.: *Studies of water vapour transport and sorption in wood*, Dissertation, Lund University, 1993.
- [9] Xu H. L., Chung W. X.: Estimation of the chestnut mass transfer coefficient through its microscopic structure, *Journal Korean of Wood Science and Technology*, 40 (5), 2012, pp. 352-362.
- [10] Zohou S., Agoua E., Degan G., Perre P.: An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime, *Heat and Mass Transfer* 39, 2003, pp. 147-155.

## **DETERMINATION OF MOISTURE DIFFUSION COEFFICIENTS FOR SCOTS PINE WOOD**

### **Summary**

This paper presents an experimental research on the moisture diffusion coefficient in wood of Scots pine within the scope of hygroscopic moisture. It included measurements of kinetics of moisture adsorption within the range of air relative humidity from 25% to 85%. The experiment was carried out with unidirectional flow of moisture, in each of the material principal orthotropic directions. Values of moisture diffusion coefficients and mass surface emission coefficient were found using the method of minimizing the fitting function, that is by fitting the computational adsorption kinetics curves to the experimental curves. At the same time, four cases of variations of the moisture diffusion coefficient together with moisture content of the material have been analysed each time: in the form of a constant, linear function, quadratic function and exponential function, assuming a constant value of mass surface emission coefficient on the absorbing surface of samples. In addition, for the tangential and radial directions, the case of simultaneous linear variations of moisture diffusion coefficient and mass surface emission coefficient was examined. The performed calculations allowed determining what is the impact of various diffusion mechanisms on the whole process of transferring moisture in the considered cases.

