

ZMIENNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI WILGOCI W DREWIE ŚWIERKU NORWESKIEGO

Jadwiga ŚWIRSKA-PERKOWSKA*

Wydział Budownictwa i Architektury Politechnika Opolska
ul. Katowicka 48 45-061 Opole, email: j.swirska@po.opole.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika dyfuzji wilgoci i współczynnika przejmowania wilgoci dla drewna świerku norweskiego (*Picea abies*), w przypadku dyfuzji wzdłuż i stycznie do włókien. Wykorzystano przy tym wyniki badań desorpcji wilgoci w próbkach świerku pospolitego przedstawione w pracy S.V. Dvinskikh *et al.* [1], zrealizowane przy pomocy magnetycznego rezonansu jądrowego. Współczynników dyfuzji wilgoci poszukiwano na drodze minimalizacji funkcji błędu, przy założeniu warunków brzegowych III rodzaju i stałym współczynnikiem przejmowania wilgoci na brzegu próbki. Każdorazowo analizowano dwa przypadki zmienności współczynnika dyfuzji wraz z wilgotnością materiału, a mianowicie w postaci: stałej oraz funkcji kwadratowej.

Słowa kluczowe: Wilgoć, dyfuzja, współczynnik, drewno, algorytm minimalizacyjny

1. WPROWADZENIE

Drewno jest odnawialnym, ekologicznym materiałem, stosowanym w budownictwie od wieków. Jest ono wykorzystywane między innymi do wykonywania więźb dachowych, ustrojów szkieletowych, dźwigarów dachowych, stropów oraz do wykańczania wnętrz. Ostatnio obserwuje się również znaczący wzrost zainteresowania tradycyjnym budownictwem drewnianym. Jednakże o przydatności drewna na danego typu konstrukcję decyduje wiele czynników, między innymi jego wytrzymałość, odkształcalność, stabilność wymiarowa oraz możliwość wystąpienia korozji biologicznej. Na wszystkie wyżej wymienione cechy znaczący wpływ ma wilgotność zastosowanego surowca drzewnego, o której decyduje między innymi wartość współczynnika dyfuzji wilgoci w materiale. Od współczynnika tego zależy przebieg procesu suszenia drewna oraz możliwość jego powtórnego zawilgocenia w niesprzyjających warunkach. Jest z nim

związany także przebieg naprężeń skurczowych występujących w drewnie w trakcie jego suszenia oraz mogące pojawić się w ich efekcie spękania [2].

Z punkt widzenia warunków eksploatacyjnych, istotnym zakresem wilgotności drewna jest zakres wilgotności higroskopijnych. Jest to obszar zawarty pomiędzy wilgotnością drewna odpowiadającą stanowi suchemu, a wilgotnością występującą w stanie pełnego nasycenia przestrzeni międzycellarnych błon komórkowych, czyli zakres wilgotności drewna od 0% do ~30% (w odniesieniu do masy drewna suchego) [3]. W omawianym zakresie wilgotności woda występuje w drewnie w postaci pary wodnej (głównie w światłach komórek) oraz wody związanej siłami powierzchniowymi i wiązaniami wodorowymi [4] w przestrzeniach międzycellarnych ścian komórkowych, a zmiany w jej zawartości prowadzą do zjawisk skurczu lub pęcznienia drewna.

W związku z tym, że drewno jest porowatym, włóknistym, hierarchicznie zbudowanym kompozytem [5], dlatego zachodzący w nim transport wilgoci jest procesem skomplikowanym, zależnym od kierunku przepływu wilgoci. W literaturze przedmiotu dominuje pogląd, 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 w ściankach komórek, a efektywny współczynnik dyfuzji wilgoci rośnie wraz ze wzrostem wilgotności [3].

W pracy podjęto próbę zweryfikowania tej hipotezy poprzez wyznaczenie zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci w drewnie świerku pospolitego (*Picea abies*) wraz z koncentracją wilgoci w materiale w postaci funkcji kwadratowej. Wystąpienie ekstremum na tego typu krzywej

* Autor korespondencyjny, e-mail: j.swirska@po.opole.pl

świadczy o zmianie dominującego mechanizmu transportu wilgoci, w rozważnym przypadku przepływu, przy danej koncentracji wilgoci, natomiast brak ekstremów – o dominującym znaczeniu jednego z mechanizmów transportu w całym analizowanym zakresie wilgotności.

2. METODY BADAŃ

W opracowaniu wykorzystano wyniki badań desorpcji wilgoci w próbkach świerku pospolitego przedstawione w pracy S.V. Dvinskikh et al. [1], zrealizowane przy wykorzystaniu magnetycznego rezonansu jądrowego w zakresie wilgotności odpowiadających wilgotnościom względnym powietrza od 94% do 33%. Współczynników dyfuzji wilgoci poszukiwano na podstawie rozkładów pomierzonych stężeń wilgoci w próbce w poszczególnych chwilach trwania eksperymentu, na drodze minimalizacji funkcji błędu, przy założeniu warunków brzegowych III rodzaju i stałym współczynnikiem przejmowania wilgoci na brzegu próbki. Każdorazowo analizowano dwa przypadki zmienności współczynnika dyfuzji wraz z wilgotnością materiału, a mianowicie w postaci: stałej oraz funkcji kwadratowej. Obliczenia przeprowadzono wykorzystując wyniki uzyskane dla dyfuzji wzdłuż włókien oraz stycznie do włókien drewna.

Badania dotyczyły próbek drewna świerku pospolitego (*Picea abies*) o gęstości 420 kg/m³ i zostały szczegółowo opisane w pracy [1]. Poniżej podane zostaną tylko podstawowe informacje dotyczące przeprowadzonego eksperymentu.

Z jednego kawałka deski wycięto cylindryczne próbki o średnicy 8 mm i długości 20 mm, których osie były odpowiednio równoległe do jednej z trzech osi ortotropii materiału. Przed rozpoczęciem eksperymentu próbki kondycjonowano nad roztworem soli, utrzymującym wilgotność względną powietrza na poziomie 65%. Następnie odpowiednio zaizolowane próbki umieszczono w standardowych szklanych tubach o średnicy 10 mm przeznaczonych do badań NMR (*Nuclear Magnetic Resonance*) nad nasyconymi roztworami soli, utrzymującymi odpowiednio wilgotność 33%, 65% i 94%. Powierzchnie sorbujące lub desorbujące próbek zlokalizowano w odległości 35 mm od lustra roztworów. Następnie w wybranych chwilach trwania eksperymentu mierzono profile wilgotności w próbkach przy wykorzystaniu obrazowania za pomocą protonowego rezonansu magnetycznego.

Postępując w ten sposób otrzymano rozkład koncentracji wilgoci wzdłuż próbek w wybranych momentach czasowych przy wilgotnościach względnych powietrza zmieniających się w zakresach: od 65% do 94%, od 94% do 33%, od 33% do 65%. Badania każdorazowo prowadzono przy zapewnieniu jednowymiarowego transportu wilgoci w próbkach i w temperaturze 23°C.

W pracy wykorzystano profile koncentracji wilgoci, odpowiadające procesowi desorpcji przy wilgotności względnej powietrza zmieniającej się skokowo od 94% do 33%, otrzymane w przypadku próbek, dla których przepływ wilgoci realizowany był odpowiednio w kierunku równoległym i stycznym do słoń. Wykresy te przedstawiały rozkłady wilgotności w próbkach na odcinkach długości około 15 mm, licząc od desorbującej powierzchni materiału.

3. MODEL MATEMATYCZNY

Eksperyment opisany w pracy [1] cechuje się jednowymiarowym przepływem wilgoci, w jednym z kierunków ortotropii materiału, realizowanym na drodze dyfuzji pary wodnej i wody związanej. Sumaryczny bilans wilgoci migrującej w materiale można więc sprowadzić do następującego równania dyfuzji [6]

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

w którym indeks I odnosi się do kierunku przepływu wilgoci w drewnie, wielkość C^w opisuje bezwzględną wilgotność drewna (odniesioną do masy suchego materiału) w kg/kg, a D_I^w – współczynnik dyfuzji wilgoci w drewnie [m²/s].

Po zdyskretyzowaniu, zgodnie z ideą metody różnic skończonych (przy zastosowaniu schematu jawnego i centralnych różnic przestrzennych), równanie (1) przyjmijmy formę zależności

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

gdzie Δ oznacza przyrost danej wielkości, t – czas, 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 omawianym przypadku warunek początkowy odpowiadać będzie jednorodnemu rozkładowi wilgoci w próbce

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

natomiast warunki brzegowe na desorbującej ($x = 0$) i zaizolowanej powierzchni próbki ($x = 20 \text{ mm}$) będą miały postać

$$-\left(D_I^w\right)_{0,j} \frac{C_{1,j}^w - C_{-1,j}^w}{2\Delta x} = \kappa_I \left(C_\infty^w - C_{0,j}^w\right) \quad (4)$$

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

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

W równaniach tych n jest indeksem węzła na końcu próbki, -1 i $n+1$ są indeksami węzłów fikcyjnych, leżących poza próbką w odległości Δx od jej końców, natomiast κ_I – współczynnikiem przejmowania wilgoci na brzegu próbki prostopadłym do kierunku anatomicznego I wyrażonym w m/s.

4. ALGORYTM OBLICZENIOWY

W prezentowanej pracy rozważano dwa przypadki zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci wraz z wilgotnością materiału, to jest w postaci stałej i wielomianu drugiego stopnia

$$D_I^w(C^w) = D_{I0}, \quad D_I^w(C^w) = a_I + b_I C^w + c_I (C^w)^2 \quad (6)$$

W obu przypadkach założono, że współczynnik przejmowania masy na desorbującej powierzchni próbki jest wielkością stałą ($\kappa_I = const.$).

Wartości współczynników (D_{I0} , κ_{I0}) oraz (a_I , b_I , c_I , κ_I) każdorazowo dobierano w ten sposób, aby obliczone zgodnie z równaniami (2)-(5) rozkłady zawartości wilgoci w próbce były jak najbardziej zgodne z rozkładami przedstawionymi w pracy [5]. Stopień dopasowania danego zestawu współczynników do danych doświadczalnych oceniano na podstawie wartości funkcji F będącej sumą bezwzględnych odchyłek kwadratowych pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi

$$F(D_I^w, \kappa_I) = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \left(C_{i,j}^{we} - C_{i,j}^{wo}\right)^2 \quad (7)$$

gdzie: $C_{i,j}^{we}$, $C_{i,j}^{wo}$, p , n to odpowiednio: zmierzona i obliczona zawartość wilgoci w węzle przestrzennym i w chwili j , liczba pomiarów rozkładów wilgotności w próbce, liczba węzłów przestrzennych. W przedstawionej funkcji celu pomijano wartości C^{we} odpowiadające pierwszemu, leżącemu na desorbującej powierzchni próbki, węzłowi. Czynniono tak z powodu występujących w tym punkcie dużych błędów pomiaru – ze względu na rozdzielczość aparatu wartości C^{we} w tym punkcie ujmowały częściowo wielkości dotyczące powietrza otoczenia.

Dla każdego z analizowanych kierunków przepływu (wzdłuż włókien L i stycznego T) w pierwszej kolejności znajdowano wartość stałego współczynnika dyfuzji wilgoci oraz odpowiadającą mu wartość współczynnika przejmowania wilgoci. Poszukiwano więc zestawu parametrów (D_{I0} , κ_{I0}), obliczając rozkład koncentracji wilgoci w próbce przy wykorzystaniu metody różnic skończonych (MRS) oraz dokonując minimalizacji funkcji F przy wykorzystaniu algorytmu optymalizacyjnego Levenberga-Marquardta, którego punkt startowy dobierano na podstawie danych literaturowych. Stosując metodę MRS, w każdej próbce wprowadzano 41 węzłów przestrzennych. W dalszej kolejności obliczano stałe a_I , b_I i c_I oraz współczynnik κ_I odpowiadające przypadkowi kwadratowej zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci. Wykorzystywano przy tym jak poprzednio MRS oraz algorytm Levenberga-Marquardta, którego punktem startowym był punkt o współrzędnych ($a_I = D_{I0}$, $b_I = 0$, $c_I = 0$, $\kappa_I = \kappa_{I0}$). Wszystkie algorytmy obliczeniowe zostały napisane przez autorkę pracy w środowisku programowym MATLAB. Poprawność uzyskanych wyników oceniano na podstawie dopasowania krzywych obliczeniowych do krzywych eksperymentalnych przy wykorzystaniu globalnego błędu dopasowania, wyznaczonego zgodnie z zależnością

$$e = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \left(C_{i,j}^{we} - C_{i,j}^{wo}\right)^2}{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \left(C_{i,j}^{we}\right)^2} \cdot 100 \quad (8)$$

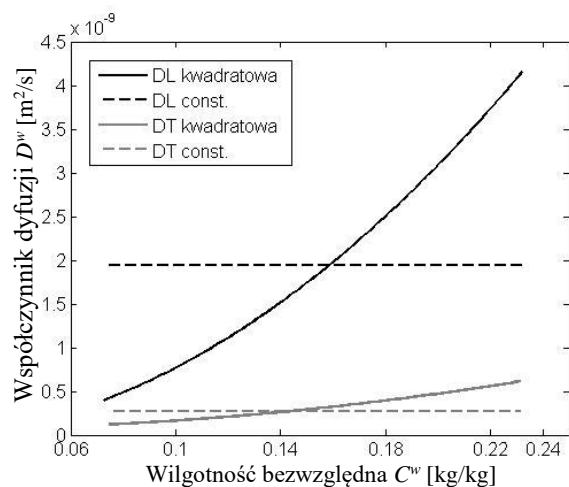
5. WYNIKI OBLICZEŃ

W efekcie przeprowadzonych symulacji dla każdego z analizowanych kierunków przepływu uzyskano zestawy współczynników, których wartości podano w tabeli 1. Przy czym przez model 1 i 2 oznaczono odpowiednio przypadki stałego oraz kwadratowego współczynnika dyfuzji wilgoci. W tabeli tej zamieszczono również wartości globalnego błędu dopasowania krzywej obliczeniowej do krzywej eksperymentalnej, wyznaczone zgodnie ze wzorem (8).

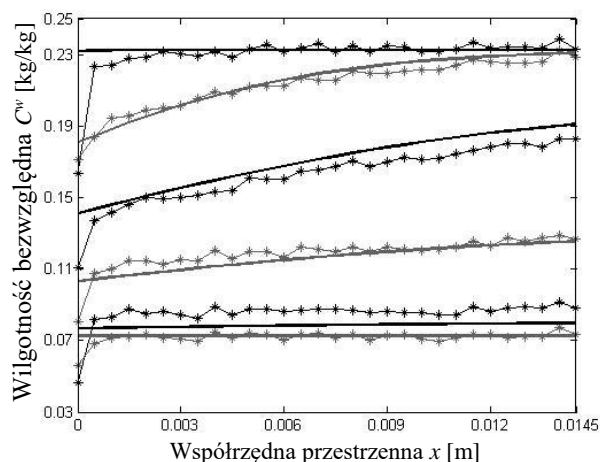
Tabela 1. Wyniki obliczeń współczynnika dyfuzji wilgoci i współczynnika przejmowania masy
Table 1. Results of calculations of moisture diffusion coefficient and surface emission coefficient

Współczynniki funkcji D_l^w i κ						
Kierunek	Model	D_{l0}/a_l [m ² /s]	b_l [(m ² ·kg)/(s·kg)]	c_l [(m ² ·kg ²)/(s·kg ²)]	κ_l [m/s]	e [%]
L	1	$1,94 \cdot 10^{-9}$	–	–	$1,43 \cdot 10^{-7}$	3,20
	2	$-3,14 \cdot 10^{-11}$	$3,99 \cdot 10^{-10}$	$7,59 \cdot 10^{-8}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$	2,16
T	1	$2,69 \cdot 10^{-10}$	–	–	$8,68 \cdot 10^{-8}$	3,12
	2	$6,98 \cdot 10^{-11}$	$-1,39 \cdot 10^{-10}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$	2,28

Przebieg funkcji D_l^w , dla przypadku dyfuzji wzdłuż włókien i dla kierunku stycznego, zilustrowano na rysunku 1. Dodatkowo na rysunkach 2, 3 i 4, 5 przedstawiono dopasowanie krzywych obliczeniowych do krzywych eksperymentalnych zawartych w pracy [5], w przypadku stałego i zmiennego współczynnika dyfuzji wilgoci, odpowiednio dla kierunków: wzdłuż włókien i stycznie do słoików. Obliczeniowe profile zawartości wilgoci odpowiadają wartościom współczynników jak w tabeli 1.

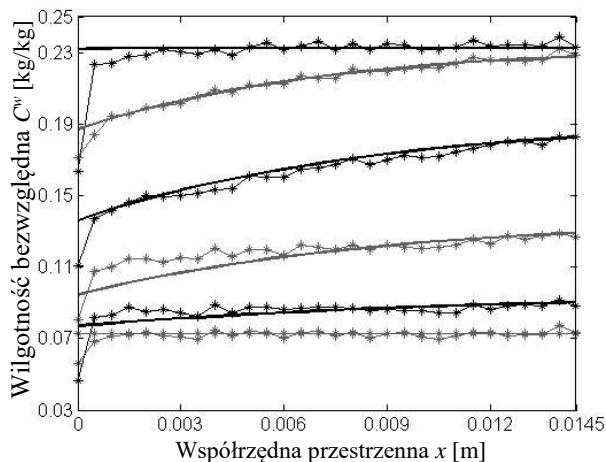


Rys. 1. Zmienność współczynnika dyfuzji wilgoci – kierunek podłużny (L) i radialny (T)
Fig. 1. Variation of moisture diffusion coefficient – longitudinal (L) and tangential (T) direction



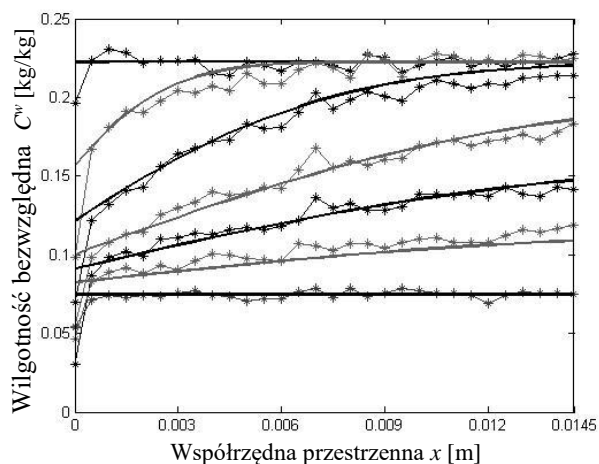
Rys. 2. Porównanie eksperymentalnych (linie z gwiazdkami) i obliczeniowych rozkładów koncentracji wilgoci w przypadku dyfuzji wzdłuż włókien dla stałego D^w . Kolejne krzywe, poczynając od góry, odpowiadają chwilom: 0h, 4h, 1dzień, 3dni, 8 dni, 89 dni.

Fig. 2. A comparison of experimental (lines with stars) and computational distributions of moisture concentration in the case of diffusion along fibres for the constant D^w . The subsequent curves, starting from the top, correspond to the moments: 0h, 4h, 1day, 3 days, 8 days, 89 days.



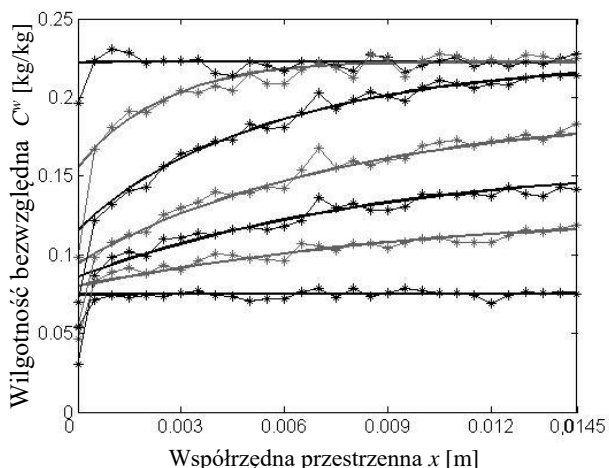
Rys. 3. Porównanie eksperymentalnych (linie z gwiazdkami) i obliczeniowych rozkładów koncentracji wilgoci w przypadku dyfuzji wzdłuż włókien dla modelu kwadratowego. Kolejne krzywe, poczynając od góry, odpowiadają chwilom: 0h, 4h, 1dzień, 3dni, 8 dni, 89 dni.

Fig. 3. A comparison of experimental (lines with stars) and computational distributions of moisture concentration in the case of diffusion along fibres for the quadratic model. The subsequent curves, starting from the top, correspond to the moments: 0h, 4h, 1day, 3 days, 8 days, 89 days.



Rys. 4. Porównanie eksperymentalnych (linie z gwiazdkami) i obliczeniowych rozkładów koncentracji wilgoci w przypadku dyfuzji stycznie do włókien dla stałego D^w . Kolejne krzywe, począwszy od góry, odpowiadają chwilom: 0h, 4h, 1dzień, 4dni, 8 dni, 15 dni, 89 dni.

Fig. 4. A comparison of experimental (lines with stars) and computational distributions of moisture concentration in the case of diffusion in the tangential direction for the constant D^w . The subsequent curves, starting from the top, correspond to the moments: 0h, 4h, 1day, 3 days, 8 days, 15 days, 89 days.



Rys. 5. Porównanie eksperymentalnych (linie z gwiazdkami) i obliczeniowych rozkładów koncentracji wilgoci w przypadku dyfuzji stycznie do włókien dla modelu kwadratowego. Kolejne krzywe, począwszy od góry, odpowiadają chwilom: 0h, 4h, 1dzień, 4dni, 8 dni, 15 dni, 89 dni.

Fig. 5. A comparison of experimental (lines with stars) and computational distributions of moisture concentration in the case of diffusion in the tangential direction for the quadratic model. The subsequent curves, starting from the top, correspond to the moments: 0h, 4h, 1day, 3 days, 8 days, 15 days, 89 days.

6. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Analizując dane zawarte w tabeli 1 można zauważyć, że w przypadku obu ocenianych kierunków przepływu uzyskano zmniejszenie wartości funkcji błędu przy przejściu ze stałej do kwadratowej zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci (w każdym z przypadków błąd ten zmniejszył o około 1%).

Jak wynika z rysunków 1 i 2, zarówno w przypadku transportu wilgoci stycznie do włókien, jak i transportu wzdłuż włókien, współczynnik dyfuzji rośnie monotonicznie wraz z zawartością wody w materiale. Taki przebieg wykresów $D_T^w(C^w)$ świadczy o dominującej roli dyfuzji wody związanej w całokształcie procesu przenoszenia wilgoci, w obu rozważanych przypadkach. Przeczy to powszechnej opinii, że w przypadku dyfuzji w kierunkach podłużnym proces ten zdominowany jest przez dyfuzję pary wodnej, a jego intensywność maleje wraz ze wzrostem wilgotności materiału.

Jednakże ze względu na skomplikowaną budowę i dużą niejednorodność drewna oraz niewielkie rozmiary badanych próbek należy założyć, że charakter otrzymanych wyników jest właściwy jedynie dla analizowanych próbek drewna. Niejednoznaczność wyników w tym zakresie została również odnotowana w pracach [7, 8]. Uzyskane w tych pracach przebiegi zmienności wykresów funkcji $D_T^w(C^w)$ w przypadku próbek takich drzew jak dąb, lipa i sosna dla przepływów realizowanych w każdym z kierunków ortotropii drewna, świadczą o wzajemnym nakładaniu się obu mechanizmów dyfuzyjnych, w całokształcie procesów przenoszenia wilgoci we wszystkich analizowanych kierunkach. Natomiast w pracy [4] uzyskano malejący wraz z wilgotnością materiału współczynnik dyfuzji w kierunku stycznym do słojów w przypadku próbek buku zwyczajnego. Nasuwa się więc wniosek, że tematyka ta wymaga dużej ostrożności przy formułowaniu uogólniających stwierdzeń i prowadzenia ciągłych badań. Oczywiście jest też, że prowadząc pomiary współczynników transportowych w drewnie, badania te powinno się wykonywać na jak największej ilości próbek lub na próbkach możliwie dużych rozmiarów w celu uśrednienia lokalnych różnic w budowie tego surowca.

VARIABILITY OF MOISTURE DIFFUSION COEFFICIENTS FOR NORWAY SPRUCE WOOD

Summary: This work presents results of calculations of diffusion coefficient and surface emission coefficient for wood of Norway spruce (*Picea abies*) in the case of diffusion along fibres and tangentially to rings of wood. The results of moisture desorption in the samples of spruce presented in the article by S. V. Dvinskikh et al. [1] and realized by means of nuclear magnetic resonance were employed in the work. The values of moisture diffusion coefficients and mass surface emission coefficient were found using the method of minimizing the fitting function,

assuming boundary conditions of the second and third kind with constant surface emission coefficient on the suitable edges of samples. Moreover two cases of variations of the moisture diffusion coefficient together with moisture content of the material were analysed each time: in the form of a constant and quadratic function.

Literatura

- [1] Dvinskikh S.V., Henriksson M., Mendicino A.L., Fortino S., Toratti T. *NMR imaging study and multi-Fickian numerical simulation of moisture transfer in Norway spruce samples*. Engineering Structures 33 (2011) 3079-3086
- [2] Houška M., Koc P. *Sorptive stress estimation: An important key to the mechano-sorptive effect in wood*. Mechanics of Time-Dependent Materials 4 (2000) 81-98
- [3] Kang W., Chung W.Y., Eom C., Yeo H. *Some considerations in heterogeneous nonisothermal transport models for wood: a numerical study*. Journal of Wood Science 54 (2008) 267-277
- [4] 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) 677-691
- [5] Wadsö L. *Studies of water vapour transport and sorption in wood*. Dissertation, Lund University 1993
- [6] Świrska-Perkowska J. *Adsorpcja i ruch wilgoci w porowatych materiałach budowlanych w warunkach izotermicznych*. Studia z Zakresu Inżynierii 77, KILiW PAN, Warszawa 2012
- [7] Perkowski Z., Świrska-Perkowska J., Gajda M. *Comparison of moisture diffusion coefficients for pine, oak and linden wood*. DOI: 10.1177/1744259116673967, Journal of Building Physics (First Published October 24 2016) (2016) 1-27
- [8] Świrska-Perkowska J., Gajda M. *Wyznaczanie współczynnika dyfuzji wilgoci w drewnie sosny zwyczajnej* Roczniki Inżynierii Budowlanej 16 (2016) 17-28