

dr inż. Maciej Mijakowski¹⁾

Wymiana pary wodnej pomiędzy materiałami budowlanymi a powietrzem w pomieszczeniu

Water vapour transport between buildings materials and indoor air

DOI: 10.15199/33.2019.01.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące transportu (wymiany) wilgoci pomiędzy powietrzem a higroskopijnymi materiałami budowlanymi i wyposażenia wnętrza. Opisano właściwości higroskopijne materiałów porowatych oraz uproszczony model wzajemnego oddziaływania materiału porowatego z otaczającym go powietrzem. Następnie scharakteryzowano wpływ materiałów wyposażenia wnętrza i przegród budowlanych na wilgotność powietrza wewnętrznego. Stanowi to podstawę do określenia możliwości wykorzystania pojemności higroskopijnej budynku do kształtowania warunków wilgotnościowych w pomieszczeniach.

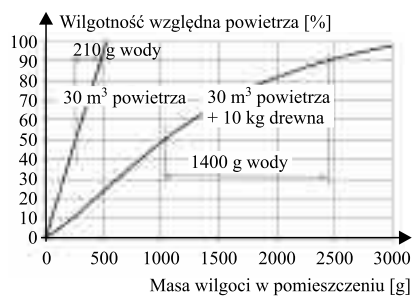
Słowa kluczowe: materiał porowaty; higroskopijność; transport wilgoci; wilgotność powietrza wewnętrznego.

Abstract. In the paper the issues the regarding transport (exchange) of moisture between air and hygroscopic building materials and interior furnishings have been presented. The hygroscopic properties of porous materials and a simplified model of interaction of porous material with the surrounding air have been described. Then, the influence of interior furnishing materials and building partitions on indoor air humidity has been characterized. This set the basis for determining the possibility of using the hygroscopic capacity of the building to shape the humidity conditions in the rooms.

Keywords: porous material; hygroscopic; moisture transport; indoor relative humidity.

Wykorzystanie materiałów higroskopijnych do stabilizacji wilgotności powietrza, np. w przypadku przechowywania produktów w niewielkich opakowaniach, stosowane jest z powodzeniem od wielu lat. Zastosowanie tego zjawiska w większej skali (np. pomieszczenia) nie jest jednak szerzej praktykowane. Jednocześnie istnieje wiele prac [5, 6, 10, 13, 14 ÷ 16] oraz programów komputerowych [4, 8] dotyczących modelowania zjawisk ciepło-wilgotnościowych w materiałach porowatych, które z powodzeniem można wykorzystać do określenia wymiany wilgoci pomiędzy materiałem higroskopijnym a otaczającym go powietrzem. Jeśli weźmiemy pod uwagę powietrze o temperaturze 20°C i wilgotności 50% znajdujące się w szczelnym pomieszczeniu o kubaturze 30 m³ pozbawionym materiałów porowatych, to okaże się, że wprowadzenie do niego 210 g wody spowoduje wzrost wilgotności do 90% RH – przy temperaturze 20°C (rysunek 1). Jeśli natomiast w rozpatrywanym pomieszczeniu będzie znajdowało się np. 10 kg drewna (lub podobna ilość

papieru), to potrzeba ok. 1 400 g wody, aby wilgotność powietrza wyniosła 90% RH (rysunek 1).



Rys. 1. Wzrost wilgotności względnej powietrza w szczelnym pomieszczeniu w zależności od ilości wprowadzonej pary wodnej

Fig. 1. Growth of indoor relative humidity in tight room according to water content

Oddziaływanie materiału budowlanego i powietrza

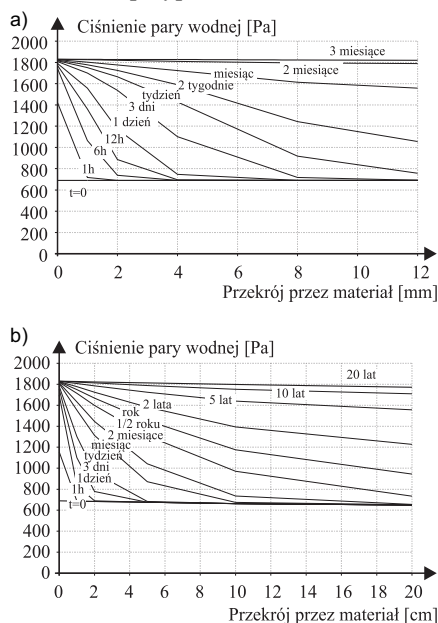
Pomiędzy materiałami budowlanymi i wyposażenia wnętrza a powietrzem w pomieszczeniach zachodzi proces wymiany wilgoci. W większości przypadków materiały te możemy traktować jako ośrodki porowate, higroskopijne. Wilgoć jest w nich akumulowana w postaci zaabsorbowanych na ściankach szkieletu mono- i/lub poliwarstewek molekuł wody, a także w postaci wody kapilarnej. W określonych warunkach wilgotności oraz temperatury osiągany

jest stan ustalony, w którym ilość wody wnikażącej do materiału jest równa ilości wody oddawanej do otaczającego powietrza. Wynika z tego, że zawartość wilgoci w materiale w stanie nasycenia z otaczającym powietrzem jest funkcją wilgotności powietrza, temperatury oraz ciśnienia – $w(\varphi)$ [3]. W przypadku typowych materiałów budowlanych funkcja ta bardzo silnie zależy od wilgotności powietrza, a znacznie mniej od temperatury [1, 2, 4, 8]. W określonym ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze funkcja $w(\varphi)$ jest określana jako izoterma sorpcji. W większości przypadków higroskopijne materiały budowlane oraz materiały wyposażenia pomieszczeń charakteryzują się II i III typem izoterm sorpcji (w klasyfikacji izoterm BET – Brunauer, Emmett, Teller [7, 9]).

Dotyczy to jednak warunków ustalonych, które bardzo rzadko występują w rzeczywistości. W przypadku typowej eksploatacji budynku wilgotność powietrza w pomieszczeniach (oprócz pomieszczeń typu kuchnia czy łazienka) zmienia się od 10–20% RH zimą do nawet ponad 70% RH latem. Dynamikę procesu można określić, bazując na modelach transportu masy (wilgoci) i ciepła w materiałach porowatych. Wyznaczone na tej podstawie krzywe przedsta-

¹⁾ Politechnika Warszawska; Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska; maciej.mijakowski@pw.edu.pl

wijające rozkład ciśnienia cząstkowego podczas procesu wnikania wilgoci do materiału przedstawiono na rysunku 2. Wyniki obliczeń dotyczą drewna sosnowego o grubości 12 mm oraz betonu o grubości 20 cm. Obliczenia przeprowadzono w warunkach gwałtownego zwiększenia wilgotności otaczającego powietrza z 30% RH do 80% RH, przy stałej temperaturze powietrza 20°C. Warto zwrócić uwagę na czas, po jakim osiągnane są warunki ustalone, a więc 90 dni w przypadku drewna i przeszło 20 lat – w przypadku betonu.



Rys. 2. Zmiany ciśnienia cząstkowego pary wodnej po gwałtownej zmianie wilgotności powietrza w: a) drewnie sosnowym; b) betonie

Fig. 2. Changes of partial vapor pressure after indoor relative humidity growth in: a) pine wood; b) concrete

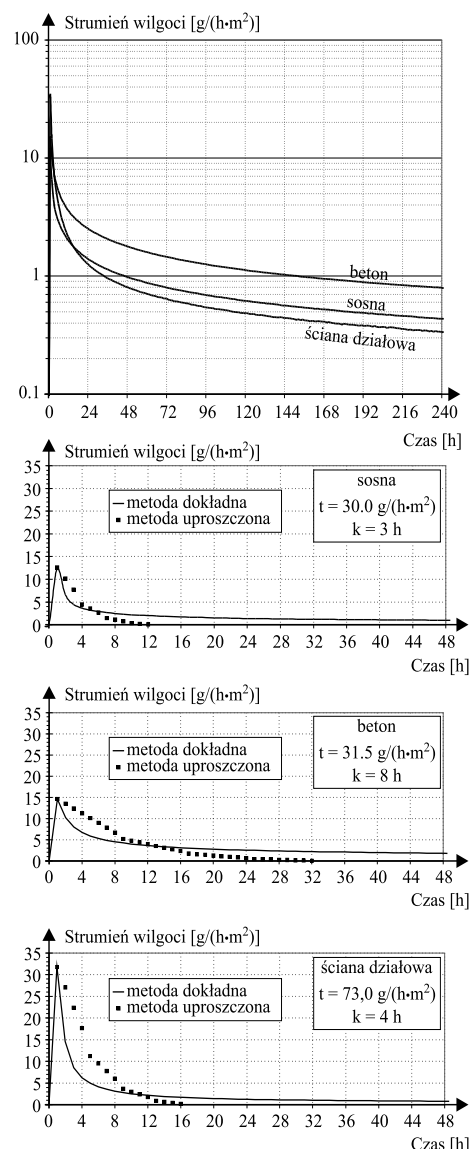
Istnieją również prostsze modele, kładące nacisk na wymianę wilgoci pomiędzy materiałem a otaczającym powietrzem. Większość z nich powstała na bazie opisu teoretycznego oraz informacji pochodzących z pomiarów prowadzonych w warunkach, w jakich model miał znaleźć zastosowanie. Dzięki temu wprowadzono i następnie określano wartości współczynników występujących w modelu tak, aby opis teoretyczny jak najbardziej odpowiadał rzeczywistości. W pracy [10] proces wymiany pary wodnej pomiędzy materiałem a powietrzem został opisany zgodnie z równaniem:

$$A = \kappa \cdot F \cdot \left(\varphi - \sum_{k=1}^n (w_k \cdot \varphi_{t-k(\tau/n)}) \right) \quad (1)$$

Ilość pary wodnej akumulowanej lub oddawanej do powietrza w pomieszczeniu przez materiały porowate wyrażona została jako iloczyn: stałej sorpcyjnej κ , powierzchni materiału F oraz różnicy pomiędzy bieżącą φ i średnią ważoną przeszłą wartością wilgotności względnej powietrza wewnętrznego φ_t . Poprzednia wartość wilgotności względnej powietrza określana jest jako średnia ważona z okresu τ , przy czym wagi w_k wynikają z wartości współczynników odpowiedzi impulsowej materiału porowatego na zmianę wilgotności względnej powietrza. Stała κ określa masę pary wodnej podlegającej sorpcji lub desorpcji w jednostce czasu w materiałach wyposażenia wnętrza i przegrodach budowlanych odniesioną do powierzchni referencyjnej (powierzchnia materiału, przegród zewnętrznych lub pomieszczenia). Średnia ważona przeszłej wartości wilgotności względnej jest odpowiednikiem „pamięci higroskopowej” i charakteryzuje dynamikę procesu. Wartość stałej sorpcyjnej κ oraz czas uśredniania wartości przeszłej wartości wilgotności względnej określone są eksperymentalnie. W [15] w przypadku podobnego modelu podano wartość stałej κ (odniesionej do m^2 powierzchni materiału kontaktującego się z powietrzem) od $90 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ dla drewna do $274 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ dla płyty MDF. Zgodnie z pomiarami podanymi w [15], „pamięć higroskopowa” tych materiałów wynosi odpowiednio 8,5 h oraz 2,15 h. Natomiast w [4] jako średnie typowe wartości w przypadku budynków mieszkalnych proponuje się przyjmować $\kappa = 16,2 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ oraz czas uśredniania poprzednich wartości wilgotności względnej powietrza wynoszący 72 h. Korzystając z tego typu modeli, można wyznaczyć wpływ akumulacji wilgoci w materiałach na wilgotność powietrza w pomieszczeniu.

Przykłady wpływu akumulacji wilgoci w materiałach na wilgotność powietrza w pomieszczeniu

Przykładowe strumienie wilgoci akumulowane przez materiały higroskopijne przedstawiono na rysunku 3. Obliczenia wykonano metodą uproszczoną oraz dokładną [12], w przypadku gwał-



Rys. 3. Przebieg zmienności strumienia wilgoci

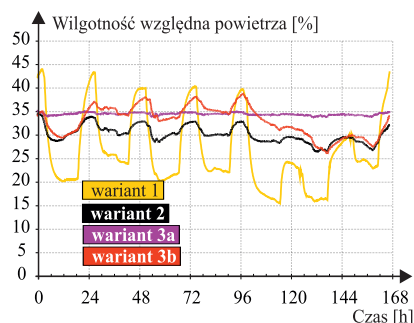
Fig. 3. The course of variability of the moisture flow

townej zmiany wilgotności powietrza od 30% RH do 80% RH i trzech materiałów: drewna sosnowego grubości 12 mm, betonu grubości 20 cm oraz ścianki działowej (farba emulsyjna, płyta gips-karton – grubości 1,0 cm oraz cegła – grubości 12 cm).

Ilość pary, jaka wnika w materiał porowaty w ciągu dwóch godzin po wzroście wilgotności powietrza, wynosi od $9,4 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ w przypadku drewna do $23,5 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ – w przypadku ścianki działowej. W porównaniu np. z emisją pary od ludzi (wynoszącą ok. $50 \text{ g}/\text{h}$) jest to duża ilość, a ze względu na długi okres trwania procesu sorpcji/de-

sorpcji oraz powierzchnię materiałów porowatych, istotny strumień pary ($1,0 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) jest wymieniany w przypadku betonu nawet po tygodniu od zmiany parametrów otaczającego powietrza. Wykorzystując te informacje, można przedstawić wpływ wymiany wilgoci przez materiały porowate na wilgotność powietrza w przykładowym pomieszczeniu.

Do analizy wybrano sypialnię w budynku jednorodzinny. Wykonane obliczenia dotyczą typowego tygodnia okresu zimowego w trzech wariantach wykorzystania chłonności wilgotnościowej materiałów budowlanych i wyposażenia wnętrz. W wariantcie 1 założono brak akumulacji pary, wariant 2 – akumulacja jak w przypadku typowych pomieszczeń mieszkalnych [3, 6], wariant 3 – akumulacja znacznie większa od typowych wartości, przy czym w wariantcie 3a dziesięciokrotnie zwiększono chłonność materiałów akumulujących parę, a w wariantcie 3b dziesięciokrotnie zwiększono szybkość akumulacji. Pozostałe założenia zostały opisane w pracy [11]. Wyniki zamieszczono na rysunku 4.



Rys. 4. Wilgotność względna powietrza w sypialni

Fig. 4. Indoor air humidity in a bedroom

Oceniając przebieg zmienności wilgotności względnej powietrza w przypadku różnych wariantów obliczeń stwierdzono, że wpływ materiałów wyposażenia wnętrz i przegród budowlanych na warunki wilgotnościowe jest istotny. Przykładowo, typowa akumulacja pozwala ustabilizować wartość wilgotności wynoszącą 30 – 35% RH, podczas gdy brak akumulacji prowadzi do zmiany od 15% RH do 45% RH. Bilansując przepływ pary wodnej, okazuje się, że akumulacja to ok. 20% w bilansie wilgotnościowym pomieszczenia

(pozostałe 80% to emisja pary wodnej oraz transport pary z przepływającym powietrzem wentylacyjnym). Świadczy to nie tylko o potrzebie uwzględniania tego zjawiska przy określaniu wilgotności powietrza wewnętrznego, ale również o możliwościach, jakie „pojemność higroskopijna” pomieszczeń stwarza w ograniczaniu niekorzystnych, ekstremalnych wartości wilgotności względnej powietrza.

Podsumowanie

Higroskopijne materiały budowlane nie „oddychają”. Jednak podobne efekty dla jakości powietrza wewnętrznego uzyskuje się dzięki procesom sorpcji i desorpcji. Wpływają one stabilizując na warunki wilgotnościowe w pomieszczeniach przez ograniczenie skrajnych wartości wilgotności względnej powietrza. W szczególności dotyczy to ograniczenia czasu występowania suchego powietrza wewnętrznego w okresie ekstremalnie niskiej temperatury powietrza zewnętrznego. W związku z tym, że proces sorpcji i desorpcji charakteryzuje się bardzo długim okresem do osiągnięcia warunków ustalonych, istnieje możliwość akumulacji wilgoci w okresie letnim oraz oddawania jej do powietrza w czasie zimy.

Sorpcja i desorpcja/akumulacja stanowi istotną pozycję w bilansie ciepło-wilgotnościowym pomieszczenia. Jest to ok. 20% wymiany wilgoci w typowym pomieszczeniu mieszkalnym, w którym pozostałe 80% stanowi emisja i transport wilgoci z powietrza. Stwarza to możliwość wykorzystania akumulacji jako pasywnej metody kontroli wilgotności powietrza i poszerza obszar stosowania metod pasywnych w budownictwie, które dotychczas koncentrowały się na procesach cieplnych. Ma to szczególne znaczenie w budynkach o precyzyjnie kontrolowanej wilgotności, jak np. muzea, archiwa, budynki zabytkowe.

Literatura

- [1] ASHRAE Handbook, Fundamentals, SI Editions, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 1997.
 [2] ASHRAE Handbook, HVAC Applications, SI Editions, American Society of Heating, Refri-

gerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 1995.

[3] Axley J. 1991. „Reversible sorption modelling for multi-zone contaminant dispersal analysis”. *Proceedings of Building Simulation '91*: 20 – 28, Nice, France; August 20 – 22.

[4] Burch D. M., J. Chi. 1997. MOIST a PC program for predicting heat and moisture transfer in building envelopes. Release 3.0, National Institute of Standards and Technology, Washington.

[5] Emmerich S. J., A. K. Persily, S. J. Nabinger. 2002. „Modelling moisture in residential buildings with a multizone IAQ program, Indoor Air 2002”. *Proceedings: 9th International Conference on IAQ and Climate*. Monterey, California, June 30 – July 5, 2002

[6] Haupl P., H. Fechner, J. Grunewald, H. Petzold. 2001. The thermal improvement of a wooden framework house by means of a capillary active inside insulation, *Materiały Konferencyjne VIII Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*. Łódź.

[7] Kubik Jan. 2000. *Przepływy wilgoci w materiałach budowlanych*. Opole. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej.

[8] Kunzel H. M. 1996. WUFI: Simultaneous heat and moisture transport in building components, Fraunhofer Institut Bauphysik, Stuttgart.

[9] Michałowski S., K. Wańkiewicz. 1993. *Termodynamika procesowa*. Warszawa. WNT.

[10] Mijkowski Maciej. 2003. *Akumulacja pary wodnej w materiałach porowatych – uproszczona metoda obliczeniowa na potrzeby bilansowania wilgoci w powietrzu pomieszczeń*. IX Polska Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”. Łódź, str. 485 – 492.

[11] Mijkowski Maciej. 2005. „Symulacja wilgotności powietrza w budynku jednorodzinny z uwzględnieniem akumulacji pary wodnej”. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Czasopismo Naukowe*, Tom 1: 265 – 272. Łódź.

[12] Mijkowski Maciej, Jerzy Kwiatkowski. 2010. Moisture flow between indoor air and porous materials – simplified two parameters method and detailed TRNSYS simulation, *Proceedings of the 1st Central European Symposium on Building Physics*, edited by D. Gawin, T. Kisilewicz, str. 395 – 400, Cracow – Lodz, Poland.

[13] Patfield Tim. 1998. The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity, Ph. D. thesis, The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

[14] Pedersen C. Rode. 1989. *Combined heat and moisture transfer in building constructions*. Dissertation, Denmark Technical University.

[15] Plathner P., J. Littler., R. Stephen. 1999. Dynamic water vapour sorption: Measurement and modelling, The 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air 99 1, Edinburgh.

[16] Straube J. F., J. P. deGraauw. 2001. Indoor air quality and hygroscopically active materials, *ASHRAE Transactions*, Vol. 107, Pt 1.

Przyjęto do druku: 19.12.2018 r.