

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Zmiana efektywności wymiany masy i ciepła poprzez zastosowanie warstw antykondensacyjnych

ANDRZEJ GRZEBIELEC, ARTUR RUSOWICZ

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY ENERGETYKI I LOTNICTWA,
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ**

Słowa kluczowe: wymiana ciepła i masy, warstwy antykondensacyjne

STRESZCZENIE

W wielu dziedzinach techniki, zwłaszcza związanych z przechowywaniem i transportem żywności, można spotkać się z przegrodami budowlanymi, które w pewnych okresach są zawilgocone. Powstawanie wilgoci związane jest głównie z procesem chłodzenia, ale jest także naturalnym zjawiskiem w godzinach porannych – na zewnętrznych stronach przegród budowlanych. Pojawianie się kropeł wody na nieosłoniętych powierzchniach powoduje, że intensyfikuje się proces wymiany ciepła przez te przegrody, a one same także ulegają degradacji. Przedstawiona praca ma na celu pokazać, w jaki sposób zmienia się to zjawisko, gdy stosowane są warstwy antykondensacyjne. Praca przedstawia badania eksperymentalne, jak i wyniki modelowania matematycznego opisywanego zjawiska.

Changing the efficiency of heat and mass transfer through the use of anti-condensation layer

Keywords: heat and mass transfer, anti-condensation layer

ABSTRACT

In many areas of technology, especially relating to the storage and transport of food you can meet with baffles building, which at certain times are damp. Formation of moisture is mainly related to the cooling process. But it is also a natural phenomenon in the morning – on the outer sides of the building envelope. The appearance of water droplets results in a process that enhances heat transfer through the barrier, and they are degraded. This paper aims to show how to change this phenomenon when applied anti-condensation layer. The paper presents experimental studies and the results of mathematical modeling of this phenomenon.

1. WSTĘP

Kondensacja pary wodnej na zimnych powierzchniach może utrudnić eksploatację obiektów budowlanych oraz powodować nieprzewidziane straty energii. Przykładem są chłodnie z metalową konstrukcją dachową, gdzie wykroplona woda dostaje się do izolacji cieplnej drastycznie pogarszając jej właściwości izolacyjne. Co gorsze, mokra powierzchnia charakteryzuje się większym współczynnikiem wnikania ciepła, a to przekłada się na większe rachunki za energię elektryczną. Uciążliwe w użytkowaniu jest również zalewanie ścian chłodni np. podczas rozładunku towaru. Zagadnienie wykraplania się wody nie dotyczy jednak jedynie chłodni. Na nieizolowanych dachach hal magazynowych, jest ono niepożądane ze względu na możliwe uszkodzenia w składowanych produktach wrażliwych na wilgoć oraz korozję elementów konstrukcyjnych dachu. Z kolei w zagrodach hodowlanych skapująca z dachu woda spowoduje zawilgocenie ściółki i pogorszenie warunków chowu. Problem pojawia się także na statkach morskich na wewnętrznych ścianach z zewnątrz omywanych przez zimną wodę. Odpowiedzią na niektóre z tych problemów są powierzchnie antykondensacyjne, którymi pokrywane są miejsca narażone na kondensację wilgoci, coraz częściej stosowane na polskim rynku.

Powłoki antykondensacyjne posiadają zdolność do wchłonięcia określonej ilości wody w zależności od ich typu i grubości. Ponadto umożliwiają szybkie odparowanie przy zmianie warunków otoczenia lub po dostarczeniu strumienia ciepła [6] (np. promieniowanie słoneczne padające na dach). Zamiast wykraplać się na zimnej powierzchni, wilgoć zostaje zaadsorbowana przez porowatą strukturę powłoki. Zapewnia to także izolację podłoża od wilgoci zapobiegając degradacji czy też korozji. Powłoki tego typu poprawiają również izolację cieplną dachu utrzymując pierwotne właściwości materiału izolacyjnego oraz zmniejszając straty ciepła przez ścianę (w porównaniu ze ścianą wilgotną bez powłoki). Powodują również wytłumienie drgań arkuszy blachy.

W skład farb antykondensacyjnych wchodzi: dwutlenek tytanu, perlit, zeolit, żywice absorbujące wodę, tributylfosforan, emulgator OP-10 oraz emulsja kopolimeru styrenu i akrylanu [8].

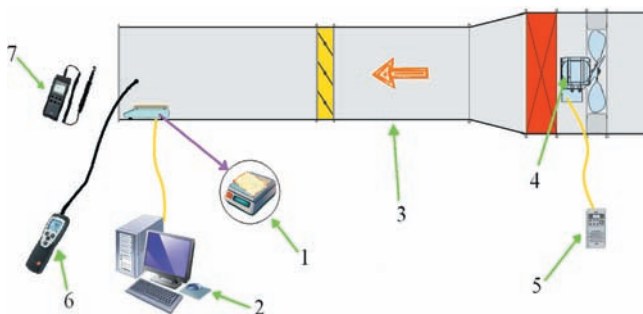
W pracy zostały określone strumienie wilgoci oddawane przez powłoki pokryte warstwami antykondensacyjnymi oraz powłoki bez tych warstw

w warunkach konwekcji swobodnej i wymuszonej. Porównano strumienie otrzymane na drodze eksperymentalnej z otrzymanymi na podstawie obliczeń z wymiany ciepła i masy.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

2.1 Budowa stanowiska

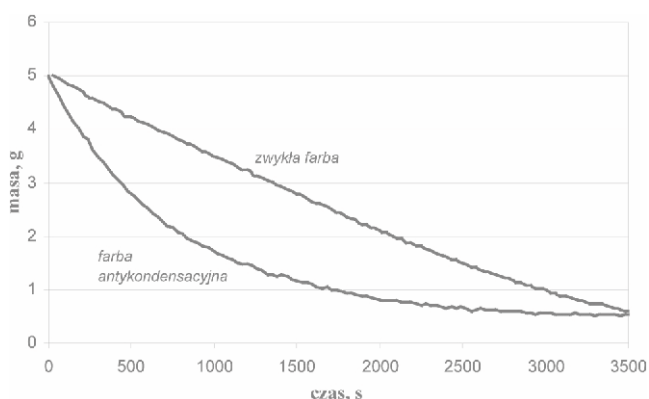
Do badań eksperymentalnych przygotowano płaskie płytki. Część z nich została pokryta warstwą powłoki antykondensacyjnej o grubości 0,5 mm, a część zwykłą farbą emulsyjną. Przed przystąpieniem do badań, każda z powierzchni płytek została nawilżona tą samą ilością wody. Następnie każda z płytek została umieszczona na stanowisku pomiarowym w położeniu poziomym z powłoką antykondensacyjną skierowaną do góry. Najważniejszym elementem stanowiska pomiarowego była elektroniczna waga laboratoryjna (1) o dokładności ważenia do 0,001 g, na której umieszczane były badane próbki. Wagę połączono z komputerem klasy PC (2), dzięki czemu wyniki pomiarów zapisywano bezpośrednio do pliku. Aby była możliwość prowadzenia badań w warunkach konwekcji naturalnej, jak i konwekcji wymuszonej, wagę umieszczono w kanale wentylacyjnym (3) z wentylatorem (4). Wentylator zasilano poprzez falownik (5), dzięki czemu istniała możliwość płynnej regulacji prędkości obrotowej, co w konsekwencji dało możliwość sterowania prędkością przepływu powietrza w kanale. Pomiaru prędkości przepływu powietrza oraz jego temperatury dokonywano za pomocą anemometru elektronicznego (6). Natomiast poziom wilgotności powietrza mierzony był za pomocą elektronicznego higrometru (7). Badania eksperymentalne umożliwiły wyznaczenie szybkości suszenia powłok antykondensacyjnych. Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione na Rysunku 1 [4].



Rysunek 1 Stanowisko pomiarowe
Figure 1 The measuring apparatus

2.2 Wyniki badań

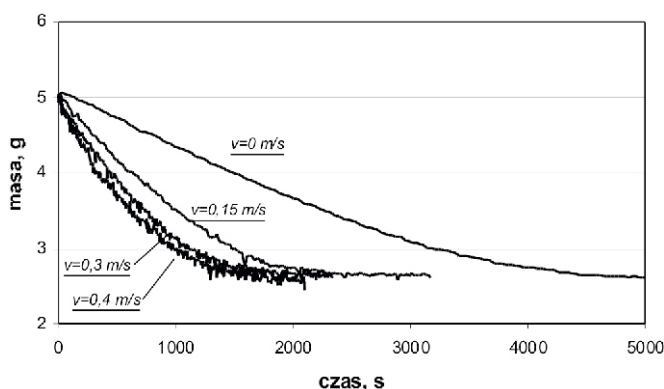
W pierwszej części badań zostało sprawdzone, jaka jest różnica pomiędzy oddawaniem wilgoci z powłok antykondensacyjnych i powłok bez tych warstw. Na Rysunku 2 został przedstawiony wynik badań eksperymentalnych dla prędkości przepływu powietrza na poziomie $v=1,2$ m/s. Szybkość oddawania wilgoci przez warstwę antykondensacyjną jest zdecydowanie większa, niż szybkość oddawania wilgoci bez takiej powłoki.



Rysunek 2 Oddawanie wilgoci dla badanych warstw w funkcji czasu

Figure 2 Donation of moisture for the test layers as a function of time

Natomiast na Rysunku 3 została przedstawiona zależność suszenia dla warstwy antykondensacyjnej, dla różnych prędkości przepływającego powietrza. Im większa prędkość przepływającego powietrza, tym proces suszenia był szybszy, przy czym po przekroczeniu pewnej prędkości zmiana jest nieistotna z technicznego punktu widzenia.



Rysunek 3 Suszenie powłok antykondensacyjnych dla różnych prędkości powietrza

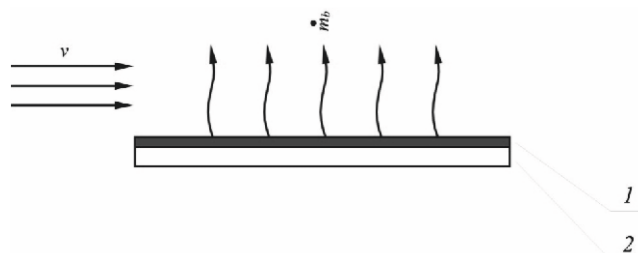
Figure 3 Drying the anti-condensation coatings for various air velocities

Jak do tej pory został określony wpływ warstwy antykondensacyjnej na proces wymiany masy. Okazuje się, że przy zastosowaniu warstwy anty-

kondensacyjnej powierzchnia schnie szybciej, niż w przypadku zwykłych farb. Dodatkowo wzrost prędkości przepływającego powietrza przyspiesza ten proces. Aby określić wpływ warstwy antykondensacyjnej na wymianę ciepła trzeba wprowadzić model matematyczny.

3. MODEL MATEMATYCZNY

Na Rysunku 4 został zaprezentowany uproszczony schemat stanowiska pomiarowego, który posłużył także jako podstawa do budowy modelu matematycznego [5]. Do powierzchni warstwy farby A_s dociera strumień ciepła \dot{Q} na drodze konwencji i radiacji. Radiacja w wielu publikacjach jest pomijana [1], jednak z obliczeń wynika, że stanowi ona prawie 50% [7] całkowitej wartości strumienia wymianianego ciepła, zwłaszcza w przypadku konwencji swobodnej dla niewielkich różnic temperatury powierzchni T_{surf} i temperatury powietrza T_{air} .



Rysunek 4 Idea transportu masy z powłoki:

- 1 – wilgotna farba, 2 – płytka izolowana od spodu
Figure 4 Mass transfer from coating: 1 – damp paint, 2 – plate insulated from the bottom

Można zatem zapisać równanie określające strumień ciepła:

$$\dot{Q} = h_{heat} A_s (T_{air} - T_{surf}) + A_s \sigma \varepsilon (T_{air}^4 - T_{surf}^4) \quad (1)$$

W tym samym czasie z płytki odparowuje strumień wody o wartości

$$\dot{m}_b = h_{mass} A_{ef} (\rho_{w,surf} - \rho_{w,air}) \quad (2)$$

gdzie h_{mass} to współczynnik wnikania masy, A_{ef} to efektywna powierzchnia wymiany masy, $\rho_{w,surf}$ to gęstość wody w objętości farby, a $\rho_{w,air}$ gęstość wody w powietrzu. Wykorzystując równanie stanu gazu doskonałego można zapisać równanie zachowania energii

$$h_{heat} A_s (T_{air} - T_{surf}) + A_o \sigma \varepsilon (T_{air}^4 - T_{surf}^4) = \dot{m}_b h_{fg} + \frac{m_{ws} c_{p,ws} dT_{surf}}{dt} \quad (3)$$

oraz równanie zachowania masy

$$\frac{dm}{dt} = -\dot{m}_b \quad (4)$$

W celu określenia strumienia odparowującej wilgoci z powierzchni zgodnie z zależnością (2) potrzebna jest znajomość współczynnika wnikania masy h_{mass} . W pracy posłużono się dwoma metodami wyznaczenia współczynnika wnikania masy. W pierwszym przypadku zastosowano analogię wymiany ciepła i masy opartą na korelacjach empirycznych, zaprezentowanych w Tabeli 1 [2].

W drugim przypadku wykorzystano analogię Clintona-Colburna [3] pomiędzy konwekcyjną wymianą ciepła a konwekcyjną wymianą masy. Analogia ta pozwala na wykorzystanie zależności kryterialnych słusznych dla wymiany ciepła do określenia strumienia wymienionej masy. Aby skorzystać z analogii należy przyjąć, że strumienie ciepła i masy nie wpływają na siebie i można je liczyć osobno. Zjawisko takie zachodzi w przypadku, gdy strumień masy w kierunku normalnym do powierzchni przez przepływający czynnik nie różni się zasadniczo od strumienia przenieszonego drogą dyfuzyjną, a więc koncentracje jego muszą być niewielkie. Po drugie dyfuzyjny strumień masy musi być na tyle mały, aby nie zaburzał pola przepływu. Oznacza to, że pole prędkości powinno być takie samo, jak w przypadku występującej tylko wymiany ciepła. Analogia Clintona-Colburna jest słuszna dla $0,6 < Pr < 60$ oraz $0,6 < Sc < 3000$ i wiąże współczynniki wnikania masy i ciepła zależnością:

$$h_{mass} = \frac{h_{heat}}{\rho_p Le^{\frac{2}{3}}} \quad (5)$$

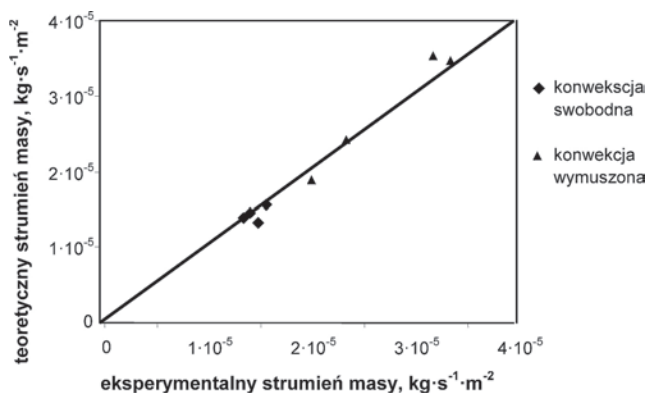
Tabela 1 Zależności kryterialne dla wymiany ciepła i masy z powierzchni płaskich

Table 1 Depending criterial for heat and mass exchange with the flat surfaces

WYMIANA CIEPŁA NA DRODZE KONWEKCYJ	WYMIANA MASY NA DRODZE KONWEKCYJ
Konwekcja swobodna nad płaską płytą	
$Nu = 0,27(Gr \cdot Pr)^{1/4}$ dla $10^5 < Gr \cdot Pr < 10^{11}$	$Sh = 0,27(Gr \cdot Sc)^{1/4}$ dla $10^5 < Gr \cdot Sc < 10^{11}$
Konwekcja wymuszona nad płaską płytą	
Przepływ laminarny ($Re < 5 \times 10^5$)	
$Nu = 0,664 \cdot Re_L^{0,5} \cdot Pr^{1/3}$ dla $Pr > 0,6$	$Sh = 0,664 \cdot Re_L^{0,5} \cdot Sc^{1/3}$ dla $Sc > 0,5$
Przepływ turbulentny ($5 \times 10^5 < Re < 10^7$)	
$Nu = 0,037 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$ dla $Pr > 0,6$	$Sh = 0,037 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Sc^{1/3}$ dla $Sc > 0,5$

Gdzie liczby podobieństwa to: Gr – liczba Grashofa, Nu – liczba Nusselta, Pr – liczba Prandtla, Re – liczba Reynoldsa, Sc – liczba Schmidta, Sh – liczba Sherwooda.

Na podstawie przedstawionych dwóch metod wyliczania współczynnika wnikania masy zweryfikowana została poprawność modelu matematycznego. Na Rysunku 5 została przedstawiona rozbieżność pomiędzy wynikami modelowania, a wynikami pomiarów.

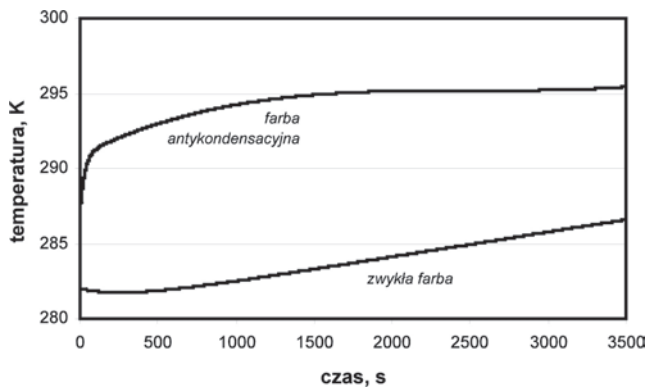


Rysunek 5 Porównanie teoretycznego i rzeczywistego strumienia masy

Figure 5 Comparison of the theoretical and real mass flow coefficient

Zbieżność obliczeń matematycznych z wynikami eksperymentu jest bardzo duża. Dzięki temu można stwierdzić, że dalsze modelowanie wykorzystujące przedstawiony model będzie równie poprawne. Kolejnym etapem obliczeń matematycznych jest określenie, jak warstwa antykondensacyjna wpływa na wymianę ciepła. W tym celu została wyliczona zmiana temperatury powierzchni w czasie. Wyniki zostały przedstawione na Rysunku 6.

Temperatura powierzchni z warstwą antykondensacyjną jest wyższa niż temperatura powierzchni bez warstwy antykondensacyjnej przez cały proces wymiany ciepła i masy. Powoduje to, że jeśli



Rysunek 6 Temperatura powierzchni
Figure 6 The surface temperature

warstwa będzie położona na zimnej przegrodzie (po drugiej stronie przegrody będzie niższa temperatura), wymiana ciepła zostanie zintensyfikowana. Stąd można wysnuć wniosek, że warstwa antykondensacyjna niekorzystnie wpływa na proces wymiany ciepła.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz obliczeń matematycznych można wysunąć następujące wnioski. Farba antykondensacyjna:

- zapobiega wykrapaniu się na powierzchni wody;
- szybciej oddaje zgromadzoną wilgoć, niż zwykła farba;
- powinna być stosowana tam, gdzie mamy do czynienia z okresową zmianą temperatury lub wilgotności.

Okresowość wynika z faktu, że farba antykondensacyjna może pochłoniąć jedynie określoną ilość wody. Ta ilość jest kilkakrotnie większa niż w przypadku zwykłej farby, jednak jest ona wartością skończoną. Po przekroczeniu wartości nasycenia woda zacznie się na niej wykrapać. Farba antykondensacyjna z jednej strony pozytywnie wpływa na właściwości izolacyjne, gdyż chroni wewnętrzne warstwy przez zawilgoceniem, z drugiej strony, ponieważ szybciej wysycha, będzie miała o wiele wyższą temperaturę, a to spowoduje, że wymiana ciepła będzie bardziej intensywna. W modelu matematycznym nie uwzględniono pogorszenia się właściwości izolacyjności przegrody w wyniku zawilgocenia, stąd też trudno jednoznacznie określić, czy wpływ na wymianę ciepła, w ostatecznym efekcie, będzie pozytywny czy negatywny. W dalszych badaniach należy uwzględnić wpływ zawilgocenia przegrody, gdyż w przyjętym modelu wpływ warstwy antykondensacyjnej na wymianę ciepła jest zdecydowanie negatywny.

LITERATURA

- [1] Avci A., Can M., Etemoglu A. B., A theoretical approach to the drying process of thin film layers, Applied Thermal Engineering 21 (2001) 465-479.
- [2] Bower S. M., Saylor J. R., A study of the Sherwood-Rayleigh relation for water undergoing natural convection-driven evaporation, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 3055-3063.
- [3] Cengel Y. A. 2006, Heat and Mass transfer: A practical Approach, Mc Graw Hill.
- [4] Grzebielec A., Kosiński T., Mierzejewski T., Popławski W., Rusowicz A., Szlągowski A., Powłoki antykondensacyjne – pochłanianie wilgoci i suszenie, Chłodnictwo 3/2012, 18-20.
- [5] Grzebielec A., Rusowicz A., Experimental and theoretical studies on heat and mass transfer in anticondensation coatings, Archives of thermodynamics Vol. 32(2011), No. 3, 1-12.
- [6] Kołodziej A., Rusowicz A., Badania powłok antykondensacyjnych przy konwekcji swobodnej. Chłodnictwo 3/2011, 26-30.
- [7] Kreith F., Heat and Mass Transfer, CRC Press LLC, 1999.
- [8] Wang G., Chen D., Lu L., Wang X., Yang Y., A novel anti-condensation coating, Journal of Coatings Technology 883 (1998), 55-59.