

dr inż. Robert Geryło*

Rola jakości cieplnej okien w aspekcie użytkowym

Jakość cieplną okna określa współczynnik przenikania ciepła U_w oraz rozkład i ekstremalna wartość temperatury θ_{si} (lub bezwymiarowa temperatura f_{Rsi}) wewnętrznej powierzchni okna. Natomiast oszklenie w oknie charakteryzuje współczynnik przenikania ciepła U_g , a także jego charakterystyka optyczna i współczynnik przepuszczalności całkowitego promieniowania słonecznego g . W przypadku zastosowania nawiewnika wymaga się, aby jego jakość cieplna nie obniżyła jakości cieplnej okna. Nawiewniki ocenia się pod względem ich podatności na powierzchniową kondensację pary wodnej.

Jakość cieplną połączenia okna z przegrodami zewnętrznymi charakteryzuje wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ mostka cieplnego oraz minimalna wartość temperatury θ_{si} (lub f_{Rsi}) w tym miejscu.

Zła jakość cieplna okna lub okien zastosowanych w pomieszczeniu oraz ich połączeń z obudową może przyczynić się do:

- nadmiernego zapotrzebowania na energię do ogrzewania i ewentualnie chłodzenia;
- niedogrzewania lub przegrzewania pomieszczeń, a w efekcie dyskomfortu cieplnego;
- kondensacji pary wodnej na powierzchni okien.

W związku z tym, że typowe okna charakteryzują się gorszą jakością cieplną w porównaniu z nieprzezroczystymi przegrodami zewnętrznymi, w obowiązujących polskich przepisach są one traktowane bardziej łagodnie:

- okna mogą mieć kilkakrotnie gorszy współczynnik przenikania ciepła niż ściany, przy czym ich słabsza izolacyjność cieplna jest w bilansie cieplnym pomieszczenia częściowo rekompensowana tym, że przez okna dociera do pomieszczenia energia promieniowania słonecznego;

- w nieklimatyzowanych pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi dopuszcza się występowanie w warunkach obliczeniowych kondensacji pary wodnej na powierzchni przegród przezroczystych, zaś na powierzchni przegród nieprzezroczystych zjawisko to jest niedopuszczalne.

Kondensacja pary wodnej na powierzchni okien często jest przyczyną skarg użytkowników i w związku z tym szczegółowo omówię te zagadnienia.

Kryterium kondensacji pary wodnej na oknach

Powierzchnia okna jest zabezpieczona przed kondensacją pary wodnej wówczas, gdy jej temperatura jest wyższa od punktu rosy powietrza. Punkt rosy jest to wartość temperatury, w której powietrze zawierające określoną ilość pary wodnej osiąga stan nasycenia. Zawartość pary wodnej w powietrzu określa:

- ciśnienie cząstkowe pary wodnej p [Pa];
- wilgotność względna φ określana jako stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu o temperaturze θ do ciśnienia cząstkowego pary wodnej w stanie nasycenia p_{sat} w tej samej temperaturze, ze wzoru:

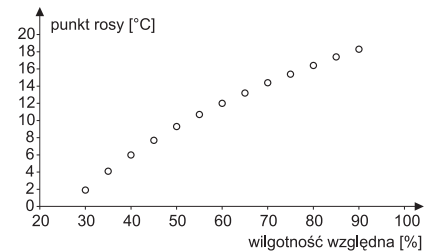
$$\varphi = \frac{p}{p_{sat}}$$

Na rysunku 1 przedstawiono zależność punktu rosy od wilgotności względnej powietrza o temperaturze 20 °C. Wartość ciśnienia cząstkowego pary wodnej w stanie nasycenia oblicza się, zgodnie z normą PN-EN ISO 13788:2003, wg wzorów:

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{dla } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{dla } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

W kryterium kondensacji pary wodnej na oknach maksymalną dopuszczalną wilgotnością względną w od-



Rys. 1. Zależność punktu rosy od wilgotności względnej powietrza o temperaturze 20 °C

niesieniu do temperatury powietrza równej temperaturze powierzchni jest stan nasycenia, czyli $\varphi_{si,dop} = 1,0$ (100%).

W przypadku powierzchni ościeży obudowy wykonanej z materiałów o budowie kapilarno-porowatej, np. wyrobów ceramicznych, wapienno-piaskowych, betonów kruszywowych i komórkowych, gipsów i zapraw, ze względu na zjawisko tzw. kondensacji kapilarnej, maksymalną dopuszczalną wilgotnością względną w odniesieniu do temperatury powietrza równej temperaturze powierzchni jest $\varphi_{si,dop} = 0,8$ (80%).

W normie PN-EN ISO 13788:2003 temperatura powierzchni wewnętrznej θ_{si} określana jest w sposób bezwymiarowy, przez podanie wartości czynnika temperaturowego f_{Rsi} . Jest to różnica temperatury θ_{si} i temperatury środowiska zewnętrznego θ_e , podzielona przez różnicę temperatury środowiska wewnętrznego θ_i i zewnętrznego θ_e . Wartość θ_{si} określona jest dla wartości oporu przejmowania ciepła R_{si} na wewnętrznej powierzchni okna, równej 0,13 m²·K/W.

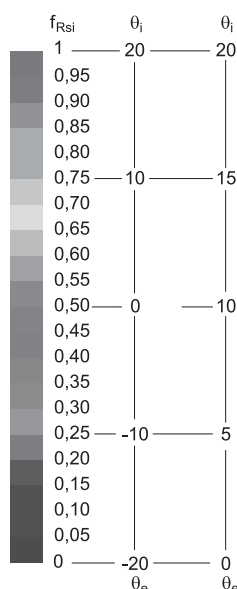
$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Czynnik temperaturowy R_{si} charakteryzuje jakość cieplną z uwagi na temperaturę powierzchni okna w sposób niezależny od wartości temperatury środowiska, a w przypadku dowolnego zestawu wartości θ_i i θ_e , wartość temperatury powierzchni okna może być obliczona wg wzoru:

$$\theta_{si} = f_{Rsi} \cdot \theta_i + (1 - f_{Rsi}) \cdot \theta_e$$

lub graficznie wg rysunku 2.

* Instytut Techniki Budowlanej



Rys. 2. Graficzne określenie wartości temperatury powierzchni okna

Normowe kryterium powierzchniowej kondensacji pary wodnej ma postać:

$$f_{Rsi,min} \geq f_{Rsi,dop}$$

Rozkład wartości czynnika temperaturowego w odniesieniu do wewnętrznej powierzchni okna f_{Rsi} przy określonej wartości oporu R_{si} , zależy od jakości cieplnej oszklenia, ramki międzyszybowej, rami okna oraz połączenia rami okna z obudową.

Kryterium powierzchniowej kondensacji pary wodnej wymaga określenia minimalnej wartości czynnika temperaturowego w odniesieniu do wewnętrznej powierzchni okna. Wartość dopuszczalną czynnika temperaturowego $f_{Rsi,dop}$ określa się z uwzględnieniem intensywności wentylacji i emisji wilgoci w pomieszczeniu. W różnych krajach europejskich wymagane wartości czynnika temperaturowego przyjmuje się dla typowych warunków użytkowania i wymiany ciepła w pomieszczeniu mieszkalnym dla zewnętrznych przegród budowlanych w przedziale 0,65 – 0,75.

Określanie czynnika temperaturowego $f_{Rsi,min}$

Pole temperatury w ościeżach, ramie okna i oszkleniu przy styku z ramą ma charakter wielowymiarowy. Rozkład temperatury na wewnętrznej powierzchni wyznacza się na podstawie wyników obliczeń komputerowych. Wyjątek stanowi centralna

część oszklenia, gdzie można przyjąć, że pole temperatury ma charakter jednowymiarowy. Wartość czynnika temperaturowego można obliczać na podstawie wartości współczynnika przenikania ciepła oszklenia U_g wg wzoru:

$$f_{Rsi}^{1D} = \frac{1}{U_g} \frac{1 - R_{si}}{1}$$

Wartość normowa oporu przejmowania ciepła R_{si} wynosi 0,13 m²·K/W.

Określanie parametrów powietrza w celu wyznaczenia $f_{Rsi,dop}$

Warunki eksploatacji charakteryzuje się przez podanie wartości temperatury powietrza zewnętrznego θ_i i jego wilgotności względnej φ_i . Zgodnie z normą temperaturę powietrza wewnętrznego θ_r przyjmuje się w zależności od przeznaczenia budynku wg przepisów krajowych, zaś wilgotność względną φ_i jako wartość stałą, jeżeli jej niezmienny poziom jest zapewniony dzięki działaniu klimatyzacji, lub oblicza wg wzoru:

$$\varphi_i = \frac{p_i}{p_{i,sat}(\theta_i)}$$

gdzie: $p_{i,sat}(\theta_i)$ oblicza się wg normy PN-EN ISO 13788:2003.

Wartość ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu wewnętrznym p_i oblicza się wg wzoru:

$$p_i = p_e + \Delta p$$

gdzie:

p_e – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu zewnętrznym [Pa];

Δp – nadwyżka ciśnienia cząstkowego pary wodnej w pomieszczeniu [Pa].

Wilgotność powietrza wewnętrznego można również określić, posługując się wilgotnością powietrza na jednostkę objętości v_i [kg/m³], określoną wg wzoru:

$$v_i = v_e + \Delta v$$

gdzie:

v_e – wilgotność powietrza na jednostkę objętości w powietrzu zewnętrznym;

Δv – nadwyżka wilgotności na jednostkę objętości.

Wartości nadwyżki Δp lub Δv zależą od:

- emisji wilgoci w pomieszczeniu;
- intensywności jego wentylacji.

Wartości te określa się na podstawie danych normowych w odniesieniu do założonej klasy wilgotności pomieszczenia (rysunek 3) lub ze wzoru:

$$\Delta v = \frac{G}{n \cdot V}$$

gdzie:

G – strumień emisji wilgoci w pomieszczeniu [kg/h];

n – krotność wymiany powietrza [h⁻¹];

V – kubatura pomieszczenia [m³].

Strumień emisji wilgoci w pomieszczeniu. Zgodnie z danymi COBR TI „Instal” dobowy strumień zysków wilgoci w modelowym mieszkaniu budynku wielorodzinnego, zamieszkałym przez rodzinę 4-osobową, zawierającym kuchnię gazową, łazienkę oraz oddzielne WC, jest następujący:

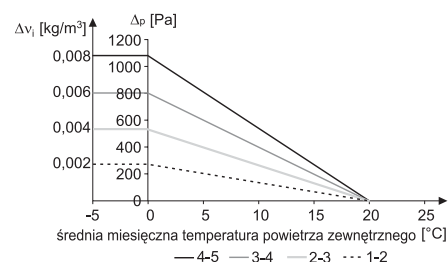
- zyski wilgoci od ludzi 3600 g/d;
- zyski wilgoci od gotowania i zmywania 2800 g/d;
- zyski wilgoci od kąpieli i pryszniców 2500 g/d;
- zyski wilgoci od prania i suszenia bielizny 1150 g/d;
- zyski wilgoci od roślin doniczkowych 1950 g/d;
- inne 200 g/d;

łącznie 12 170 g/d.

Krotność wymiany powietrza.

Z wyników badań i ekspertyz wentylacji w mieszkaniach wynika, że decydujący wpływ na jej intensywność mają lokatorzy. Mogą oni ograniczać wentylację przez:

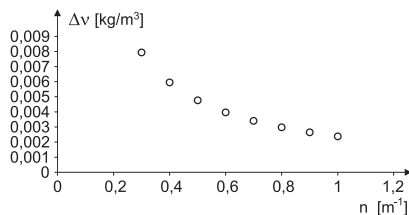
- zabudowę meblami krutek wentylacyjnych lub celowe ich zasłanianie;
- całkowite zamykanie nawiewników powietrza, jeżeli takie są zastosowane;
- unikanie regularnego, okresowego przewietrzania pomieszczeń i używania tzw. mikrouchyłtu skrzydeł okiennych.



Rys. 3. Nadwyżka ciśnienia cząstkowego, wg normy, w odniesieniu do następujących klas wilgotności pomieszczeń, w budynkach w krajach Europy Zachodniej: 1 – magazyny; 2 – biura i sklepy; 3 – mieszkania z małą liczbą lokatorów; 4 – mieszkania z dużą liczbą lokatorów; 5 – specjalne, np. pralnia, browar, basen

Orientacyjnie można przyjąć, że krotkość wymiany powietrza we współczesnych mieszkaniach, w najzimniejszym okresie sezonu grzewczego, nie jest większa niż 1 h^{-1} , a przy znacznym ograniczeniu intensywności wentylacji przez lokatorów spada poniżej $0,5 \text{ h}^{-1}$.

Nadwyżka wilgotności na jednostkę objętości Δv . Na rysunku 4 przedstawiono przykładowo obliczoną wartość Δv w zależności od krotkości wymiany powietrza w mieszkaniu o kubaturze 210 m^3 i o opisanej wcześniej emisji. Uzyskane wartości Δv odpowiadają wszystkim wymienionym normowym klasom wilgotności.



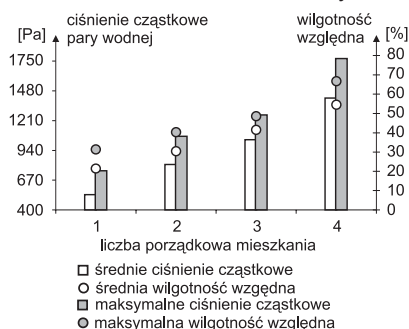
Rys. 4. Nadwyżka wilgotności na jednostkę objętości Δv

Rzeczywiste warunki ciepło-wilgotnościowe w pomieszczeniach mieszkalnych

Są one kształtowane przez lokatorów, gdyż mają oni wpływ na emisję wilgoci oraz dostosowanie do niej intensywności wentylacji. W związku z tym w mieszkaniach mogą panować różne warunki:

- na podstawie wartości średniej kilkudniowej nadwyżki Δp mogą być klasyfikowane w normowych klasach wilgotności od 1 do 4;
- chwilowe wartości nadwyżki Δp mogą osiągać poziom o klasę wyższy.

Na rysunku 5 zestawiono, na podstawie wyników badań autora i danych Zakładu Fizyki Ciepłej ITB, wyniki pomiarów wilgotności powietrza wewnętrznego w czterech wybranych mieszkaniach. Podano wartości średnie i maksymalne



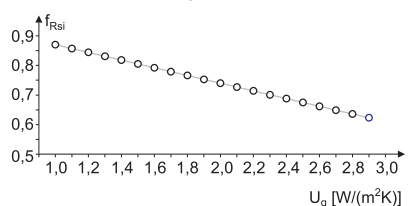
Rys. 5. Zmierzona wilgotność powietrza wewnętrznego w różnych mieszkaniach

zarejestrowane w okresach kilkunastodniowych, charakteryzujących się podobnymi warunkami zewnętrznymi (średnia wartość temperatury powietrza zewnętrznego ok. $3 \text{ }^\circ\text{C}$) i zbliżoną temperaturą powietrza wewnętrznego (średnia wartość ok. $21 \text{ }^\circ\text{C}$).

Wartości czynnika temperaturowego na powierzchni okien

Centralna część oszkleń. Na rysunku 6 przedstawiono zależność czynnika temperaturowego powierzchni oszkleń w centralnej części od wartości jego współczynnika przenikania ciepła U_g . W przypadku oszkleń z tzw. szybą niskoemisyjną wartości czynnika temperaturowego nie przekraczają wartości dopuszczalnych.

Elementem pogarszającym jakość cieplną tej części okna jest ramka międzyszybowa. Najbardziej podatny na kondensację jest dolny styk oszkleń z ramą okna, ponieważ:



Rys. 6. Zależność czynnika temperaturowego powierzchni oszkleń w centralnej części od wartości jego współczynnika przenikania ciepła U_g obliczona ze wzoru na f_{Rsi}^{ID}

– jest to strefa napływu na wewnętrzną szybę ochłodzonego na szybie zewnętrznej gazu wypełniającego przestrzeń międzyszybową;

– parapet ogranicza napływ ciepłego powietrza z grzejnika, umieszczonego przeważnie pod oknem.

Mniej podatne na kondensację są oszkleń z tzw. ciepłymi ramkami, w których ogranicza się lub eliminuje zastosowanie metali dobrze przewodzących ciepło. Pozwalają one uzyskać, w obszarze styku oszkleń z ramą, wartości $f_{Rsi,min}$ zbliżone do wymaganych z uwagi na ochronę przed kondensacją pary wodnej. W tabeli scharakteryzowano ramki międzyszybowe z różnych materiałów.

Rama okna. Zwykle w centralnej części ram drewnianych i z kształtowników z PVC nie istnieje ryzyko wystąpienia kondensacji pary wodnej. Niższe wartości $f_{Rsi,min}$ uzyskuje się na powierzchni ram z kształtowników aluminiowych z przekładką cieplną.

Charakterystyka ramek z różnych materiałów

Typ ramki		Wartość orientacyjna $f_{Rsi,min}$
materiał	współczynnik przewodzenia ciepła λ W/(m·K)	
Aluminium	160	0,5
Stal nierdzewna	17	0,6
Polimer konstrukcyjny	< 0,5	0,7

Połączenie ramy okna z obudową. Przy poprawnym wykonaniu izolacji cieplnej między ramą okna i obudową oraz zapewnieniu szczelności na przenikanie powietrza uzyskuje się wymagane wartości czynnika temperaturowego w styku ramy z obudową.

Nawiewnik w oknie. Nadszybowe nawiewniki wykonane z kształtowników aluminiowych z przekładką cieplną są najbardziej podatne na kondensację pary wodnej.

Podsumowanie

Zabezpieczenie powierzchni okna przed kondensacją pary wodnej jest możliwe, gdy jego jakość cieplna umożliwia utrzymanie temperatury powierzchni powyżej punktu rosy powietrza.

Ocenia się, że współczesne rozwiązania techniczne umożliwiają, w tzw. warunkach obliczeniowych, utrzymanie wymaganej temperatury: w centralnej części oszkleń i ramy okna oraz w połączeniach z obudową. Na oszkleń, przy ramie, zwłaszcza w dolnej części okna, istnieje prawdopodobieństwo okresowego pojawiania się kondensacji pary wodnej, szczególnie w przypadku zastosowania tradycyjnych ramek aluminiowych. Jest to dopuszczalne wg aktualnie obowiązujących przepisów.

Występowanie kondensacji pary wodnej na oknach zależy od parametrów powietrza wewnętrznego. Decydujący wpływ mają na nie użytkownicy pomieszczeń. Z powodu różnych indywidualnych nawyków, podczas eksploatacji mieszkań obserwuje się występowanie warunków ciepło-wilgotnościowych odpowiadających wszystkim normowym klasom wilgotności. Jeżeli chwilowe wartości ciśnienia cząstkowego pary wodnej osiągają poziom odpowiadający piątej klasie wilgotności, wówczas możliwa jest kondensacja pary wodnej na większej (niż podano) części powierzchni okna, np. na całej powierzchni oszkleń.