

JERZY KWIATKOWSKI*, JOANNA RUCIŃSKA, MACIEJ MIJAKOWSKI,
ALEKSANDER PANEK**

METODY OCENY RYZYKA WYSTĄPIENIA KONDENSACJI PARY WODNEJ NA WEWNĘTRZNYCH POWIERZCHNIACH PRZEGRÓD

METHODS OF CONDENSATION RISK ESTIMATION ON INTERNAL ENVELOPE SURFACES

Streszczenie

Przegrody zewnętrzne powinny być zaprojektowane w taki sposób, aby zapobiec rozwojowi pleśni i grzybów na wewnętrznych powierzchniach. Nowe wymagania w Polsce dotyczące tego problemu oparte są na normie PN-EN ISO 13788. Na rynku istnieje wiele programów komputerowych opracowanych na podstawie normy PN EN ISO 13788, jednak w obliczeniach przyjmuje się różne dane wejściowe. W niniejszym artykule zaprezentowano różne metody obliczeń. Pokazano, że wyniki różnią się w zależności od danych wejściowych i metody obliczeniowej. Ponadto, bez względu na stosowaną metodę, przegroda spełniająca wymogi izolacyjności cieplnej spełni także wymogi odnośnie ryzyka rozwoju mikroorganizmów. Ostatecznie stwierdzono, że spełniając wymogi minimalnych oporów cieplnych automatycznie spełnia się wymogi dotyczące ryzyka rozwoju pleśni i grzybów.

Słowa kluczowe: kondensacja pary wodnej, rozwój pleśni i grzybów, wymagania

Abstract

The envelope should be designed in such a way to prevent mould development on internal surfaces. In Poland, new requirements are based on European standard EN ISO 13788. However, on the software market there are several computer programs that calculate risk of microbiological growth on internal surfaces and in each different input data is used. In this paper different calculation approaches are presented. It is shown that the results differ depending on the input data and calculation approach. Moreover, no matter which approach is used, an envelope that meets minimum thermal requirements will always meet the mould growth risk requirements. The final conclusion is that the mould growth risk calculation can be avoided as following thermal requirements automatically satisfies the first ones.

Keywords: water vapour condensation, mould growth, requirements

* Dr inż. Jerzy Kwiatkowski, projekt NOWY EKSPERT, Fundacja Poszanowania Energii.

** Mgr inż. Joanna Rucińska; dr inż. Maciej Mijakowski; dr inż. Aleksander Panek, Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska.

Oznaczenia

$f_{Rsi,max}$	–	maksymalny współczynnik temperaturowy [–]
$f_{Rsi,min}$	–	współczynnik temperaturowy [–]
p_e	–	zewnątrzne ciśnienie cząstkowe pary [Pa]
p_i	–	wewnętrzne ciśnienie cząstkowe pary [Pa]
$p_{sat,e}$	–	zewnątrzne ciśnienie nasycenia [Pa]
$p_{sat}(θ_{si})$	–	ciśnienie nasycenia na wewnętrznej powierzchni przegrody [Pa]
R_{si}	–	opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody [m^2K/W]
U	–	współczynnik przenikania ciepła dla przegrody [W/m^2K]
$Δp$	–	dodatek ciśnienia pary wodnej związany z zyskami wilgoci [Pa]
$φ_e$	–	zewnątrzna wilgotność względna [–]
$φ_{si}$	–	wilgotność względna na powierzchni przegrody [–]
$θ_e$	–	temperatura zewnętrzna w miesiacu [$^{\circ}C$]
$θ_i$	–	temperatura powietrza wewnętrznego [$^{\circ}C$]
$θ_{si,min}$	–	minimalna dopuszczalna temperatura powierzchni [$^{\circ}C$]

1. Wstęp

W ostatnich latach komfort użytkowników oraz jakość powietrza w pomieszczeniach są jednymi z ważniejszych problemów w budownictwie. Przedmioty te są interesujące nie tylko dla inżynierów, którzy poszukują najbardziej optymalnych rozwiązań zapewniających komfort użytkowania, ale także dla biologów i lekarzy, którzy badają, jakie nieodpowiednie warunki klimatu mają wpływ na zdrowie i komfort mieszkańców. Uwaga drugiej grupy jest skupiona zarówno na emisji lotnych związków organicznych, jak i na rozwoju pleśni i grzybów na wewnętrznych powierzchniach przegród.

Grzyby i pleśnie mogą powodować choroby i alergie [1], a tym samym przyczyniać się do pogorszenia zdrowia i komfortu mieszkańców. Bardzo dobre warunki do rozwoju pleśni występują w temperaturach 18–35°C i przy wilgotności względnej wyższej niż 60% [1]. Dlatego też ważne jest sprawdzenie poprawności zaprojektowanej przegrody zewnętrznej w celu uniknięcia zbyt wysokiej wilgotności względnej na powierzchni konstrukcji.

W Polsce poprzednie wymagania dotyczące oceny ryzyka kondensacji oparte były na obliczeniach temperatury rosy na wewnętrznej powierzchni przegrody. Dobrze zaprojektowana konstrukcja musiała spełniać wymóg – temperatura na wewnętrznej powierzchni przegrody w pomieszczeniach o wilgotności względnej 55% musiała być zawsze wyższa od temperatury rosy powiększonej o jeden stopień. Obecne wymagania dotyczące oceny ryzyka kondensacji pary wodnej są oparte na europejskiej normie EN ISO 13788 „Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa. Metody obliczania”. Nowe wymogi są bardziej restrykcyjne niż poprzednie, ponieważ obliczenia odnoszą się do ryzyka wystąpienia warunków sprzyjających rozwojowi pleśni, a nie do temperatury punktu rosy.

Obecnie na rynku istnieje kilka programów komputerowych, które pozwalają na wykonywanie obliczeń zgodnie z normą PN-EN ISO 13788, jednak każde z tych narzędzi wymaga innych danych wejściowych. W jednym założono parametry powietrza zewnętrznego

na poziomie -20°C i 100% wilgotności względnej, w innych w obliczeniach używa się średnich miesięcznych wartości parametrów powietrza. Niektóre programy pozwalają użytkownikowi na indywidualne definiowanie parametrów. Również parametry powietrza wewnętrznego nie są takie same w każdym programie i mogą różnić się od tych zawartych w „Warunkach technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie”. W związku z tym w niniejszym artykule porównano różne metody obliczania w celu sprawdzenia, które podejście jest najlepsze dla polskiego klimatu. Obliczenia wykonane zostały tylko w celu oceny ryzyka związanego z rozwojem pleśni, natomiast kondensacja międzywarstwowa nie była brana pod uwagę.

2. Metoda obliczeniowa zgodna z PN-EN ISO 13788

W normie PN-EN ISO 13788 zawarto opis metod obliczeniowych stosowanych w kalkulacjach ryzyka wystąpienia warunków sprzyjających rozwojowi pleśni i grzybów oraz ewentualnej kondensacji międzywarstwowej w przegrodzie. Obliczenia obejmują określenie minimalnej temperatury powierzchni wewnętrznej, przy której mogą wystąpić warunki do rozwoju mikroorganizmów. W normie PN-EN ISO 13788 wilgotność względna równa 80% stosowana jest jako krytyczna wilgotność względna powietrza, powyżej której następuje rozwój pleśni i grzybów. W literaturze można znaleźć wiele prac określających progi temperatury i wilgotności względnej powietrza, których przekroczenie pozwoli na rozwój grzybów na ścianach. Pułap 80% wilgotności względnej jest zgodny z informacjami w literaturze [2–4], dlatego też warunek taki wydaje się być uzasadniony.

Procedura obliczeniowa obejmuje następujące czynności:

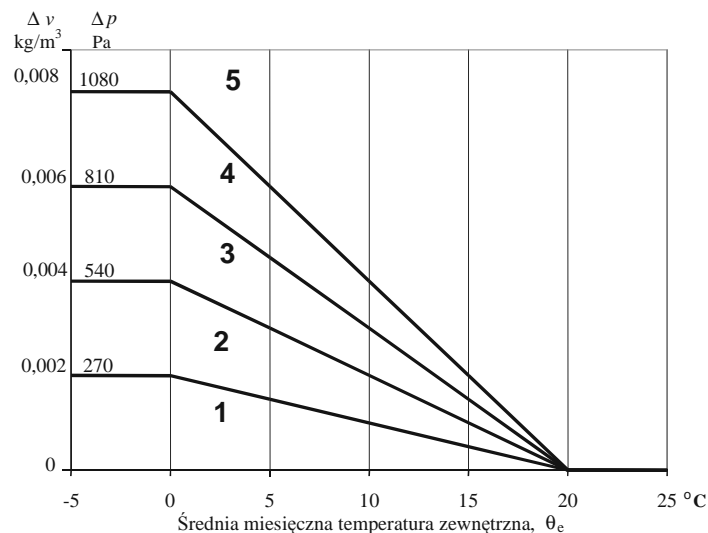
- Zdefiniowanie miesięcznej średniej temperatury i wilgotności zewnętrznej w zależności od lokalizacji budynku (dane pogodowe).
- Obliczenia zewnętrznego ciśnienia cząstkowego pary wodnej.
- Zdefiniowanie projektowanej temperatury wewnętrznej.
- Ustalenie wewnętrznego ciśnienia cząstkowego pary wodnej.
- Obliczenia temperatury powierzchni dla danej temperatury wewnętrznej, ciśnienia cząstkowego pary wodnej oraz krytycznej wilgotności względnej równej 80%.
- Określenie współczynnika obliczeniowego dla wewnętrznej temperatury powierzchni.

W budynkach z wentylacją naturalną wewnętrzne ciśnienia pary jest obliczane jako funkcja zewnętrznego ciśnienia pary i klasy obciążenia wilgotnością wewnętrzną budynku. Klasy te przedstawiono w tabeli 1, a na rys. 1 przedstawiono zależność zmiany wilgotności wewnętrznej klasy od temperatury zewnętrznej.

Tabela 1

Klasy obciążenia wilgotnością wewnętrzną

Klasa wilgotności	Typ budynku
1	Magazyny
2	Biura, sklepy
3	Mieszkania z małą liczbą mieszkańców
4	Mieszkania z dużą liczbą mieszkańców, sale sportowe, kuchnie, stołówki, budynki ogrzewane piecykami gazowymi bez przewodów spalinowych
5	Budynki specjalne, np.: pralnie, baseny kąpielowe



Rys. 1. Zależność zmiany wilgotności wewnętrznej klasy od temperatury zewnętrznej

Fig. 1. The variation of internal humidity classes with external temperature

W ostatnim etapie obliczany jest miesięcznych współczynnik temperaturowy wewnętrznej powierzchni zgodnie z następującym wzorem

$$f_{R_{si}, \min} = \frac{\theta_{si, \min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (1)$$

gdzie:

- $\theta_{si, \min}$ – minimalna dopuszczalna temperatura powierzchni [°C],
- θ_e – średnia temperatura zewnętrzna w miesiącu [°C],
- θ_i – temperatura powietrza wewnętrznego [°C].

W dobrze zaprojektowanych przegrodach maksymalna wartość miesięcznych współczynników temperaturowych temperatury powierzchni wewnętrznych powinna być mniejsza niż współczynnik opisany według następującego wzoru

$$f_{R_{si}} = \frac{\left(\frac{1}{U} - R_{si} \right)}{\frac{1}{U}} \quad (2)$$

gdzie:

- U – współczynnik przenikania ciepła dla przegrody [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
- R_{si} – opór przyjmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]. EN ISO 13788 przyjęto, że wartość R_{si} powinna być stosowana dla najgorszej sytuacji (np. naroża pokoju) i przyjęto stałą wartość równą 0,25 [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$].

3. Porównanie różnych metod obliczeniowych

Obliczenia w normie oparte są na kilku parametrach: średnia miesięczna zewnętrzna temperatura i wilgotność, projektowana temperatura wewnętrzna i wilgotność względna (dla budynków klimatyzowanych) lub klasa budynku (w budynkach bez klimatyzacji). Polskie wymagania [5] odwołują się do przedstawionej procedury wyliczeń z PN-EN ISO 13788, jednak w obliczeniach w budynkach z naturalną wentylacją wewnętrzną wilgotność względna jest przyjmowana na poziomie 50%. Inne podejścia można także znaleźć w różnych programach obliczeniowych na rynku.

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń przy użyciu różnych metod. Analizy zostały wykonane dla ściany zewnętrznej, która spełnia wymagania dla budynków mieszkalnych w Polsce (patrz: [5]). Taka przegroda charakteryzuje się wartością współczynnika $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. W obliczeniach wykorzystano dane pogodowe dla Warszawy. W tabeli 2 przedstawiono opis wariantów obliczeniowych.

Tabela 2

Opis wariantów obliczeniowych

Wariant	Parametry powietrza zewnętrznego		Parametry powietrza wewnętrznego	
	temperatura	wilgotność	temperatura	wilgotność
I	średnia miesięczna	średnia miesięczna	20°C	klasa wilgotności 3/4
II	średnia miesięczna	średnia miesięczna	20°C	50% RH
III	min. miesięczna	max miesięczna	20°C	klasa wilgotności 3/4
IV	min. miesięczna	max miesięczna	20°C	50% RH
V	-20°C	100% RH	20°C	klasa wilgotności 3/4
VI	-20°C	100% RH	20°C	50% RH
VII	wartości godzinowe	wartości godzinowe	20°C	klasa wilgotności 3/4

Obliczenia przeprowadzone zostały dla kilku wariantów: średniej miesięcznej zewnętrznej temperatury i wilgotności względnej powietrza, minimalnej miesięcznej zewnętrznej temperatury i maksymalnej miesięcznej wilgotności, krytycznej sytuacji z temperaturą równą -20°C i 100% wilgotności względnej oraz dla danych godzinowych. Wewnętrzna temperatura była stała i równa 20°C, a wewnętrzna wilgotność względna została ustalona z klasy wilgotności dla budynku mieszkalnego (określona granicą pomiędzy trzecią i czwartą klasą wilgotności) lub ustalona na stałym poziomie 50%.

Wyniki obliczeń dla wariantu I (zgodnie z procedurą PN-EN ISO 13788) przedstawione są w tabeli 3.

W tabeli 3 θ_e jest temperaturą powietrza zewnętrznego [°C], ϕ_e jest zewnętrzną wilgotnością względną, $p_{sat,e}$ jest zewnętrznym ciśnieniem nasycenia [Pa], p_e jest zewnętrznym ciśnieniem cząstkowym pary [Pa], Δp jest dodatkiem ciśnienia pary wodnej związanym z zyskami wilgoci i określonym na podstawie klas wilgotności [Pa], p_i jest wewnętrznym ciśnieniem cząstkowym pary [Pa], ϕ_{si} jest krytyczną wilgotnością na powierzchni przegrody, $p_{sat}(\theta_{si})$ to ciśnienie nasycenia na wewnętrznej powierzchni przegrody [Pa], $\theta_{si,min}$ jest minimalną temperaturą powierzchni [°C], dla której wilgotność względna jest równa 80%, θ_i jest temperaturą w pomieszczeniu, $f_{Rsi,min}$ jest współczynnikiem temperaturowym, a $f_{Rsi,max}$ jest maksymalnym współczynnikiem temperaturowym w ciągu roku. Obliczenia

wykonano dla każdego wariantu, a wyniki minimalnej temperatury wewnętrznej powierzchni i maksymalnego współczynnika f_{Rsi} przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 3

Wyniki obliczeń dla wariantu I

Miesiąc	θ_e °C	φ_e	$P_{sat,e}$ Pa	P_e Pa	Δp Pa	P_i Pa	φ_{si}	$P_{sat}(\theta_{si})$ Pa	$\theta_{si,min}$ °C	θ_i °C	$f_{Rsi,min}$
Styczeń	-1,2	0,86	554	476	810	1367	0,8	1709	15,0	20	0,766
Luty	-0,9	0,83	566	470	810	1361	0,8	1701	15,0	20	0,759
Marzec	4,4	0,78	838	653	631	1347	0,8	1683	14,8	20	0,667
Kwiecień	6,3	0,72	957	692	553	1300	0,8	1625	14,3	20	0,580
Maj	12,2	0,69	1420	986	316	1334	0,8	1668	14,7	20	0,316
Czerwiec	17,1	0,74	1949	1446	118	1575	0,8	1969	17,3	20	0,055
Lipiec	19,2	0,74	2221	1654	33	1690	0,8	2113	18,4	20	-0,979
Sierpień	16,6	0,76	1888	1433	138	1584	0,8	1980	17,4	20	0,221
Wrzesień	12,8	0,81	1480	1199	291	1519	0,8	1898	16,7	20	0,538
Październik	8,2	0,85	1086	919	479	1446	0,8	1807	15,9	20	0,654
Listopad	2,9	0,87	752	656	692	1418	0,8	1772	15,6	20	0,743
Grudzień	0,8	0,89	646	577	778	1433	0,8	1791	15,8	20	0,780
$f_{Rsi,max}$											0,780

Tabela 4

Wyniki obliczeń dla wszystkich wariantów

Wariant	$\theta_{si,min}$ [°C]	$f_{Rsi,max}$
I	14,3	0,780
II	14,1	0,721
III	11,9	0,803
IV	14,1	0,817
V	10,2	0,754
VI	14,1	0,852
VII	8,7	0,827
Poprzednie przepisy	11,7	-

Należy zaznaczyć, że minimalna temperatura powierzchni i współczynnik $f_{Rsi,max}$ nie występują w tym samym miesiącu w każdym wariantcie. Minimalna temperatura powierzchni została obliczona jako temperatura punktu rosy na powierzchni powiększona o jeden dla warunków wewnętrznych 20°C i wilgotności względnej 50%.

Wartość maksymalna współczynnika f_{Rsi} różni się dla poszczególnych wariantów i zależy od danych początkowych. Najwyższą wartość uzyskano dla wariantu VI (stała zewnętrzna temperatura -20°C i wilgotność względna 100% oraz wewnętrzna wilgotność względna 50%). Najniższą wartość uzyskano dla wariantu II (średnia miesięczna zewnętrzna temperatura i wilgotność względna oraz stałej wewnętrzna wilgotność względna 50%). Ten wariant został obliczony zgodnie z obecnymi wymaganiami w Polsce [5]. Należy również zaznaczyć, że w [5] podano, że możliwe jest zastosowanie współczynnika f_{Rsi} równego 0,720 jako wymaganej wartości.

Dodatkowo wyznaczono współczynnik f_{Rsi} dla ściany zewnętrznej zaprojektowanej zgodnie z polskimi przepisami (wartość $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$). Współczynnik f_{Rsi} dla dobrze zaprojektowanych ścian w budynku mieszkalnym jest równy 0,925. Wartość ta jest wyższa niż wartości $f_{Rsi,max}$ we wszystkich wariantach obliczeń. Można stwierdzić zatem, że bez względu na metodę obliczeniową przegrody zaprojektowane według kryteriów zawsze spełnią wymogi w zakresie ryzyka wystąpienia warunków sprzyjających rozwojowi pleśni i grzybów.

Pokazano również, że obecne wymogi są bardziej restrykcyjne niż poprzednie. Minimalna temperatura na powierzchni wewnętrznej jest zawsze wyższa od temperatury punktu rosy plus jeden (patrz: tabela 4). Niższe wartości uzyskano dla wariantu V i VII, jednak temperatura punktu rosy dla tych wariantów jest niższa niż uzyskane wartości (dla wariantu VII jest równa $6,7^\circ\text{C}$).

4. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy było pokazanie różnych metod obliczania ryzyka wystąpienia warunków sprzyjających rozwojowi pleśni i grzybów. Obecne przepisy w Polsce, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie wymagań technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie zostały porównywane z normą EN ISO 13788 „Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej. Metody obliczania.” Inne metody obliczeń, występujące w dostępnym oprogramowaniu komputerowym, również zostały sprawdzone. Metody różnią się stosowanymi danymi początkowymi, takimi jak: zewnętrzna temperatura i wilgotność względna oraz obliczenia wewnętrznej wilgotności względnej. Pokazano, że obliczony współczynnik f_{Rsi} różni się dla każdego wariantu, jednakże wymogi określone dla przegrody zewnętrznej są zawsze spełnione. Można zatem stwierdzić, że wymagania odnośnie ryzyka rozwoju pleśni i grzybów, dla nowych budynków spełniających wymagania izolacyjności przegród z Warunków technicznych, nie muszą podlegać weryfikacji i są zawsze spełnione. Można również wywnioskować, iż w dobrze zaprojektowanych przegrodach konstrukcyjne mostki cieplne mogą zmniejszyć opór cieplny przegrody dwukrotnie, a wymagania nadal będą spełnione. Problem określenia, która metoda jest najlepsza dla polskiego klimatu nie może być rozwiązany, ponieważ wymagania są spełnione dla wszystkich wariantów obliczeń.

Literatura

- [1] Deoux P., Deoux S., *Le Guide de l'Habitat Sain*, 2eme Edition, Medico Editions, Andorra, 2004.
- [2] Adan O., *On the Fungal Defacement of Interior Finishes*, Technische Universiteit Eindhoven, Thesis, Eindhoven, 1994.
- [3] IEA, *Annex 14: Condensation and Energy, Final Report*, International Energy Agency, 1991.
- [4] ASHRE, *Fundamentals*, 2001.
- [5] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku w sprawie: Warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.



Praca ta jest wspierana przez Unię europejską w ramach programu Innowacyjna Gospodarka, projekt „NOWY EKSPERT” Fundacji Poszanowania Energii.



Joanna Rucińska jest wspierana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”.



This work is supported by the NEW EXPERT Project of Energy Conservation Foundation (FPE) and financed by the European Union in the Innovative Economy Program.



Joanna Rucińska is supported by the European Union in the framework of European Social Fund through the Warsaw University of Technology Development Programm.