

7.77 — termodynamika,  
przewodzenie ciepła,  
wpływ temperatury  
na materiały,  
naprężenia cieplne

Małgorzata Leszczyńska-Sydor

PRZEGRODY BUDOWLANE  
IZOLUJĄCE DYNAMICZNIE

17/1990

P. 269



WARSZAWA 1990

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 26 czerwca 1989 r.



56774



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 100 egz. Ark.wyd. 0,8 Ark.druk.1

Oddano do drukarni w kwietniu 1990

Nr zamówienia 161/90

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul. Śniadeckich 8

<http://rcin.org.pl>

Małgorzata Leszczyńska-Sydor  
ORT Laboratorium Badań i  
Modelowania Budynków Energo-  
oszczędnych

## PRZEGRODY BUDOWLANE IZOLUJĄCE DYNAMICZNIE

Opracowanie zawiera podstawy teoretyczne i koncepcje rozwiązań technicznych izolacyjnych przegród budowlanych nowego typu o strukturze porowatej, przepuszczalnej dla powietrza.

Przedstawiono stacjonarny rozkład temperatury w przegrodzie, równanie określające wielkość dynamicznego współczynnika przenikania ciepła, porównanie energetyczne budynku o tradycyjnej izolacji termicznej z budynkiem, w którym część izolacji zastąpiono izolacją dynamiczną.

### 1. Wprowadzenie

Celem niniejszej pracy jest zwrócenie uwagi na podstawy teoretyczne i koncepcje rozwiązań technicznych izolacyjnych przegród budowlanych nowego typu o strukturze porowatej, przepuszczalnej dla powietrza. Przegrody te są badane i eksperymentalnie stosowane jako środek skutecznie zmniejszający straty ciepła.

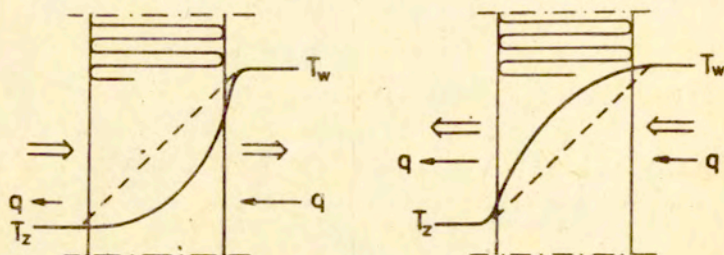
W przegrodach takich jest utrzymywany wymuszony przepływ powietrza poprzez porowatą strukturę, a zatem zachodzi ciągła wymiana masy skojarzona z wymianą ciepła. Zagadnieniami związanymi z przepływem powietrza w materiale porowatym zajmowali się wcześniej między innymi F.W. Uskow i F.Mrlík [7, 8].

Izolacje dynamiczne, które znajdują zastosowanie w Szwecji i Francji [1, 2] charakteryzują się właściwościami, które zostaną opisane poniżej.

Kierunek przepływu powietrza przez przegrodę może być zgodny lub przeciwny względem gradientu temperatury w przegrodzie co określamy odpowiednio jako izolację współprądową i przeciwprądową /Rys. 1/.

Dla uzyskania ustalonego i równomiernie rozdzielonego na całą powierzchnię przegrody przepływu, należy chronić tę powierzchnię

od strony zewnętrznej od zmian ciśnienia i powstawania wirów.



Rys. 1. Rozkład temperatury w izolacji: a/ przeciwną, b/ współprądową

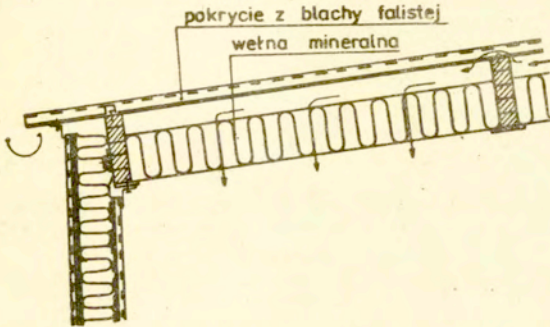
Niezbędne jest zatem utrzymanie warstwy powietrza o ciśnieniu ustabilizowanym i niewiele się różniącym od ciśnienia po drugiej stronie porowatej przegrody. W rozwiązaniach szwedzkich warstwa wełny mineralnej, wchodząca w skład konstrukcji dachowej pokrywającej halę, zabezpieczona jest od strony zewnętrznej arkuszami blachy falistej. Natomiast w rozwiązaniach francuskich zaleca się przykrywanie ściany izolującej dynamicznie taflami szkła.

Struktura przegrody winna być jednorodna w skali makro, a pory winny być otwarte w kierunku normalnym do powierzchni. Wobec małych wymiarów por oraz małych prędkości przepływu powietrza /liczby Reynolds'a niższe od krytycznych/, przepływ ma charakter laminarny, a co zatem natężenie strumienia powietrza jest proporcjonalne do różnicy ciśnień po obu stronach przegrody.

W odróżnieniu od warstwy izolacji klasycznej, która w stanie ustalonym przepływu ciepła charakteryzuje się liniowym rozkładem temperatur w przegrodach izolujących dynamicznie profil temperatury na grubości przegrody przybiera kształty krzywych przedstawionych na rys. 1.

Przegrody izolujące dynamicznie znalazły praktyczne zastosowanie w Skandynawii. W Szwecji zainstalowano konstrukcje dachowe nad halami przemysłowymi, oparte o zasadę działania izolacji

przeciwprądowej, na powierzchni 60 000 m<sup>2</sup>, zaś w Finlandii na powierzchni 500 000 m<sup>2</sup> /dane z 1986 r./. Zastosowanie izolacji przeciwprądowej w konstrukcji dachowej przedstawiono na rys. 2.



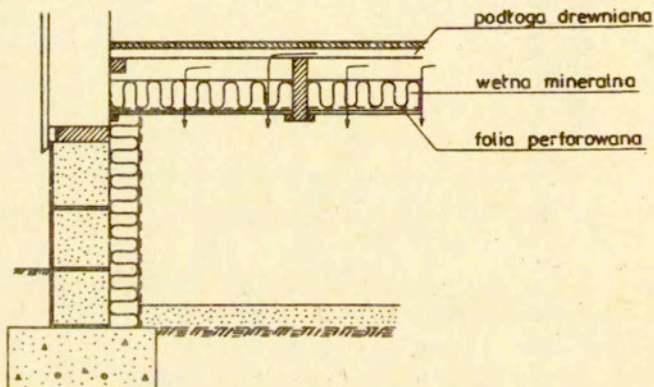
Rys. 2. Konstrukcja dachu z zastosowaniem izolacji przeciwprądowej

Zewnętrzną, nieprzepuszczalną warstwę tego dachu stanowią arkusze blachy falistej przykrywające przestrzeń powietrza i warstwę materiału porowatego, którym jest wełna mineralna. Elementem nośnym konstrukcji są drewniane piatwie, rozciągające się na całej długości dachu.

Nieznaczny wzrost ciśnienia wywołany wentylatorami w przestrzeni powietrznej między warstwą wełny mineralnej, a pokryciem z blachy falistej powoduje przepływ powietrza przez wełnę mineralną. Oczywiście powietrze, które napłynęło do pomieszczenia musi być usunięte. Jeśli jest ono usuwane bez odzysku ciepła, a potrzeby wentylacyjne pomieszczenia są małe to straty tym spowodowane mogą przekroczyć korzyści uzyskane wskutek zmniejszenia strat cieplnych na przegrodach izolowanych dynamicznie. Jeśli jednak pomieszczenie charakteryzują duże potrzeby wentylacyjne lub gdy entalpia usuwanego powietrza o temperaturze wnętrza jest wykorzystywana bądź w układach rekuperacyjnych, bądź też w inny sposób

/ogrzewanie pomieszczeń o niższej temperaturze, pompy ciepła/ to korzyści wynikłe z wydatnego obniżenia współczynnika przenikania ciepła przez przegrody izolowane dynamicznie stają się decydujące.

Innym przykładem ilustrującym zastosowanie przegrody izolującej dynamicznie jest konstrukcja podłogi w budynku jednorodzinnym, oparta o zasadę działania izolacji współprądowej.



Rys. 3. Konstrukcja podłogi z zastosowaniem izolacji przeciwprądowej

Zewnętrzne ściany tego budynku mają izolację przeciwprądową. Nadmiar powietrza, które wpłynęło do pomieszczenia przez te ściany, wypływa przez warstwę izolacyjną podłogi wskutek podciśnienia wytworzonego pod podłogą.

## 2. Wymiana ciepła i masy w przegrodzie

Działanie izolacji dynamicznej /dynamic insulation/ polega na zjawisku złożonego przewodnictwa ciepła przez szkielet izolacji porowatej oraz przez przepływające otwartymi porami powietrze. Rozkład temperatur w powietrzu, którego pole prędkości w układzie ortokartezjańskim określa funkcja  $\vec{v}/x, y, z, t/$  o składowych

$v_x, v_y, v_z$  przy stałym współczynniku przewodnictwa  $\lambda_p$  opisuje równanie Fourier'a - Kirchhoff'a:

$$c_p \rho_p \frac{DT}{Dt} = \lambda_p \nabla^2 T_p + \dot{q}_w \quad /1/$$

gdzie pochodna substancjalna  $DT/Dt$  wynosi

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} v_x + \frac{\partial T}{\partial y} v_y + \frac{\partial T}{\partial z} v_z$$

zaś  $c_p \rho_p$  /iloczyn ciepła właściwego i gęstości/ jest pojemnością cieplną powietrza,  $\dot{q}_w/x, y, z/$  - objętościową wydajnością wewnętrznych źródeł ciepła.

Zauważmy, że wewnętrznymi źródłami ciepła dla powietrza przepływającego przez szkielet izolacji jest ciepło wymieniane ze szkieletem, zaś dla nieruchomego szkieletu w stanie ustalonym cieplnie, pochodna substancjalna wynosi zero, a więc równanie Fourier'a - Kirchhoff'a ma postać:

$$0 = \lambda_s \nabla^2 T_s - \dot{q}_w \quad /2/$$

gdzie:  $\lambda_s$  jest współczynnikiem przewodzenia ciepła szkieletu,  $T_s$  temperaturą szkieletu.

Jeśli założymy równość temperatur powietrza i szkieletu izolacji w każdym miejscu, to

$$T_p = T_s = T$$

co pozwala na wyeliminowanie z równań /1/ i /2/ funkcji  $\dot{q}_w$ . Dodając równania stronami otrzymujemy:

$$c_p \rho_p \frac{DT}{Dt} = (\lambda_p + \lambda_s) \nabla^2 T \quad /3/$$

Równanie to opisuje w stanie ustalonym własności izolacji dynamicznej. Należy podkreślić, że występująca w równaniu pojemność cieplna  $c_p \rho_p$  jest pojemnością cieplną powietrza, natomiast prze-

wodność  $\lambda_p + \lambda_s = \lambda$  jest sumą przewodności cieplnej szkieletu izolacji i zawartego w niej powietrza. Ta sumaryczna przewodność jest powszechnie stosowaną wielkością przewodności cieplnej izolacji porowatej, którą operujemy w obliczeniach izolacji statycznej.

Dla uproszczenia przyjmujemy przepływ powietrza jednowymiarowy i jednorodny  $v = v_x = \text{const}$  oraz stałe temperatury na granicznych /brzegowych/ powierzchniach płaskiej, dostatecznie dużej w stosunku do grubości przegrody. Równanie /3/ przyjmie postać:

$$-\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \pm c_p \rho_p v \frac{dT}{dx} = 0 \quad /4/$$

gdzie znak /+/ dotyczy izolacji współprądowej zaś /-/ przeciwprądowej. Gęstość strumienia ciepła w dowolnym przekroju określa funkcja:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Biorąc pod uwagę, że przepływ strumienia energii  $e/x$  przez przekroje Z, D, O, W jest identyczny [ $e/x = e_z = e_d = e_o = e_w$ ] oraz, że gęstość strumienia energii w każdym z tych przekrojów składa się z gęstości strumienia ciepła przewodzonego wewnątrz przegrody lub przejmowanego z jej powierzchni oraz gęstości strumienia entalpii unoszonej masą powietrza, otrzymujemy z równania /4/ rozwiązanie:

$$T(x) = (T_w - T_z) \frac{\frac{\alpha_z + a}{\alpha_z} e^{-\frac{a}{\lambda} x} - e^{-\frac{a}{\lambda} d}}{\frac{\alpha_z + a}{\alpha_z} \cdot \frac{\alpha_w}{\alpha_w - a} - e^{-\frac{a}{\lambda} d}} + T_z \quad /5/$$

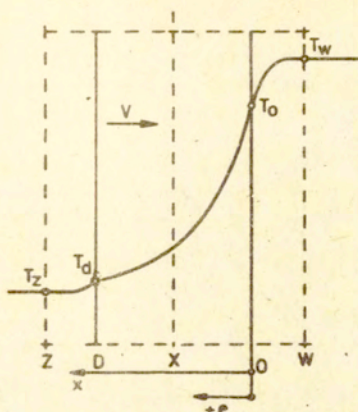
gdzie oznaczono  $a = v_p \rho_p c_p$ .

zaś:  $\alpha_w, \alpha_z$  - współczynniki przejmowania ciepła odpowiednio po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegrody,

$T_w, T_z$  - temperatury po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegrody.

W ten sposób określono stacjonarny rozkład temperatur w przegrodzie w zależności od temperatur zewnętrznych, współczynników przejmowania ciepła i parametrów przegrody. Uzyskane rozwiązanie



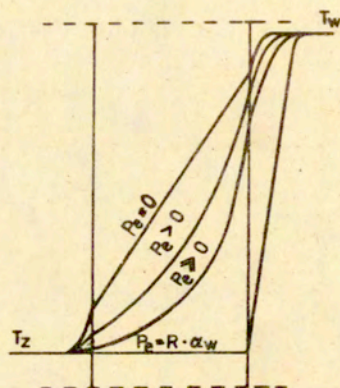


Rys. 4. Rozkład temperatur w izolacji przeciwwądowej

jest uogólnieniem wzorów zawartych w pracach [1, 2], w których przyjęto z założenia, że  $\alpha_z = \infty$  oraz  $\alpha_z = \alpha_w = \infty$ . Występująca w wykładniku równania /5/ liczba  $(\alpha/\lambda)d = (v_p g_p c_p d)/\lambda$  jest często nazywana liczbą Pecleta i oznaczona przez Pe. Wielkość  $\alpha d/\lambda = \alpha R$  jest nazywana liczbą Biota /R - opór termiczny przegrody/ i oznaczona przez Bi. Uwzględniając powyższe, wzór /5/ przybiera postać:

$$T(x) = (T_w - T_z) \cdot \frac{\frac{Bi_z + Pe}{Bi_z} \cdot \exp[Pe(1 - \frac{x}{\alpha})] - 1}{\frac{Bi_z + Pe}{Bi_z} \cdot \frac{Bi_w}{Bi_w - Pe} \exp(Pe) - 1} + T_z \quad /6/$$

Rozkład temperatur w przegrodzie według /6/ dla różnych wartości Pe oraz  $Bi_z$  i  $Bi_w$  dla  $T_w = \text{const}$  oraz  $T_z = \text{const}$  pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Rozkład temperatur w przegrodzie dla różnych wartości  $Pe$ ,  $Bi_z$ ,  $Bi_w$  przy  $T_w = \text{const}$  i  $T_z = \text{const}$

### 3. Dynamiczna efektywność przegrody. Uogólnienie równania Pecleta

W przypadku przegrody, w której występuje czyste przewodzenie bez ruchu masy, efektywność izolacyjną określa zgodnie z równaniem Pecleta statyczny współczynnik przenikania ciepła  $K_{\text{stat}}$ .

$$K_{\text{stat}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_z}}$$

gdzie:  $\alpha_w$ ,  $\alpha_z$  - współczynnik przejmowania ciepła, odpowiednio po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegrody,

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła przez przegrodę,

$d$  - grubość przegrody.

W celu wyprowadzenia analogicznego wzoru rozpatrzmy przegrodę wskazaną na rys. 5 o przeciwnym ruchu powietrza ze stałą prędkością  $v$ . Energię przechodzącą do otoczenia przy istnieją-

cym dopływie powietrza  $a = v_p \rho_p c_p$ , możemy zapisać jako:

$$q = e_z = \alpha_z (T_d - T_z) + \alpha (T_z - T_r) = K_{dyn} (T_w - T_z) \quad /7/$$

gdzie:  $K_{dyn}$  - dynamiczny współczynnik przenikania ciepła.

Przy obliczaniu tej straty należy przyjąć temperaturę odniesienia  $T_r = T_z$ , co oznacza zerową wartość grzewczą powietrza o temperaturze otoczenia. Równanie /7/ pozwala obliczyć  $K_{dyn}$ , gdyż temperaturę  $T_d$  określa równanie /5/ lub /6/.

Otrzymujemy wzór:

$$K_{dyn} = \frac{Pe}{\frac{Bi_z + Pe}{\alpha_z} \cdot \frac{Bi_w}{Bi_w - Pe} \exp(Pe) - 1} \quad /8/$$

Warto zauważyć, że dla  $Pe \rightarrow 0$  wyrażenie to zmierza do wzoru Pecleta, co oczywiście jest jednym z warunków poprawności otrzymanej formuły.

$$\lim_{Pe \rightarrow 0} \frac{\frac{Pe}{R}}{\frac{\alpha_z + \frac{Pe}{R}}{\alpha_z} \cdot \frac{\alpha_w}{\alpha_w - \frac{Pe}{R}} \exp(Pe) - 1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_z} + R + \frac{1}{\alpha_w}}$$

Gdy  $Pe \rightarrow \alpha_w R = Bi_w$ , to wartość dynamicznego współczynnika przenikania ciepła  $K_{dyn} \rightarrow 0$ , co sugeruje brak strat energetycznych. Lecz z brakiem strat energetycznych związany jest napływ do budynku ogrzanego do temperatury  $T_w$  powietrza, które dla utrzymania ciśnienia i bilansu masowego należy usuwać.

Sposób ewentualnego wykorzystania energii cieplnej zawartej w usuwanym powietrzu stanowi identyczne zagadnienie, jak sposób wykorzystania ciepłego strumienia wentylacyjnego w rozwiązaniach tradycyjnych.

W tym miejscu nasuwa się wniosek przeprowadzenia takiego energetycznego porównania budynku o tradycyjnej izolacji termicznej z budynkiem, w którym część izolacji zastąpiono izolacją dynamiczną uwzględniającą potrzeby wentylacyjne budynku.

#### 4. Porównanie energetyczne

Gdy budynek o izolacji tradycyjnej ma cechy:

- zapotrzebowanie wentylacji -  $Q$ ,
  - straty ciepła, które nie mogą być zmienione wymianą systemu izolacji /np. otwory okienne, ściany zewnętrzne nośne itp./ -  $N_o$ ,
  - straty ciepła, które mogą być zmienione na powierzchni  $F$  przez zastąpienie izolacji tradycyjnej o stałym współczynniku  $K$  przez izolację dynamiczną przeciwproudową -  $N_{st}$
- to całkowite straty wynoszą:

$$N = Q \cdot c_p \rho (T_w - T_z) + N_o + N_{st} \quad /9/$$

gdzie

$$N_{st} = K \cdot F (T_w - T_z)$$

Przyjmując oznaczenia:

$$\frac{Q c_p \rho (T_w - T_z)}{N} = r$$

$$\frac{N_o}{N} = q \quad /10/$$

$$\frac{K \cdot F (T_w - T_z)}{N} = p$$

otrzymujemy:

$$r + q + p = 1 \quad /11/$$

Gdy budynek po zmianie izolacji na powierzchniach  $F$  ma straty  $N'$ :

$$N' = Q c_p \rho (T_w - T_z) + N_o + F \cdot K_{dyn} (T_w - T_z) \quad /12/$$

należy rozpatrzyć dwa przypadki:

1° gdy ilość powietrza, która wchodzi do budynku przez izolację dynamiczną przekracza zapotrzebowanie wentylacji Q

$$Q \ll F \cdot v$$

2° nie przekracza zapotrzebowania wentylacji Q

$$Q \gg F \cdot v$$

Interesujący jest przede wszystkim stosunek:

$$\frac{N-N'}{N} = \frac{\Delta N}{N}$$

czyli oszczędność względna energii, która opisana została dla dwóch przypadków wzorami /13/ i /14/

$$\frac{\Delta N}{N} = r - p \frac{P_e}{R \cdot K} + p \left( 1 - \frac{\frac{P_e}{R \cdot K}}{\frac{A_z}{A_w} \exp(P_e) - 1} \right) \quad /13/$$

$$\text{dla } P_e \gg \frac{r}{p} R \cdot K$$

$$\frac{\Delta N}{N} = p \left( 1 - \frac{\frac{P_e}{R \cdot K}}{\frac{A_z}{A_w} \exp(P_e) - 1} \right) \quad /14/$$

$$\text{dla } P_e \leq \frac{r}{p} R \cdot K$$

gdzie:

$$A_z = 1 + \frac{P_e}{B_{iz}}$$

$$A_w = 1 - \frac{P_e}{B_{iw}}$$

Maksymalny zysk energetyczny osiągalny przez zastosowanie izolacji dynamicznej ma miejsce przy  $q = 0$  i wynosi przy  $p = 0,3-0,5$

około 25%. Te wartości  $p$  odpowiadają  $r = 0,5-0,7$ , to znaczy budynkom o dużych potrzebach wentylacyjnych.

Biorąc pod uwagę, że znaczna część izolacji nie może być zastąpiona izolacją dynamiczną i biorąc pod uwagę umiarkowane potrzeby wentylacyjne np.  $r = 0,1-0,3$  okazuje się, że osiągalne zyski teoretyczne wynoszą kilka lub kilkanaście procent.

#### Literatura:

- 1 ANDERLIND G., JOHANSSON B.: Dynamic insulation. A theoretical analysis thermal insulation through which a gas or fluid flows, Swedish Council for Building Research D8: 1983.
- 2 ARQUIS E.; LANGLAIS C.: What Scope for 'Dynamic insulation'?, Batiment international building and practice, March/April 1986.
- 3 STANISZEWSKI B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1963.
- 4 HOBLER T.: Inżynieria chemiczna. Ruch ciepła i wymienniki. PWT, Warszawa 1959.
- 5 GDULA S.J.: Przewodzenie ciepła. PWN, Warszawa 1984.
- 6 BOGOSŁAWSKI W.N.: Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach. Arkady, Warszawa 1985.
- 7 USKOW F.W.: Stroitel'naja Promyšlennost. No. 8, Moskva 1951.
- 8 MRLIK F.: Air Flow through Porous Materials and its Effects on the Internal Surface Temperature. VUPS, Praha, Czechoslovakia.

SPIS TREŚCI

	str.
Streszczenie	3
1. Wprowadzenie	3
2. Wymiana ciepła i masy w przegrodzie	6
3. Dynamiczna efektywność przegrody. Uogólnienie równania Pecleta	10
4. Porównanie energetyczne	12