

Dariusz KURZ\*

## PROCESY CIEPLNE ZACHODZĄCE W INSTALACJACH Z DACHÓWKAMI FOTOWOLTAICZNYMI

W pracy przedstawiono klasyfikację sposobów przyjmowania ciepła oraz sposób postępowania podczas wyznaczania równań kryterialnych w zależności od rodzaju wymiany ciepła. Opisano współczynniki przyjmowania ciepła oraz opór przyjmowania ciepła przez konwekcję. Wskazano schemat postępowania w celu wyznaczenia ilościowego przepływu ciepła w rozpatrywanym układzie dachówek fotowoltaicznych instalowanych w konstrukcji dachu.

SŁOWA KLUCZOWE: dachówka fotowoltaiczna, konwekcja, radiacja, kondukcja, przyjmowanie ciepła

### 1. WPROWADZENIE

Ogniwa fotowoltaiczne będące pod ciągłym wpływem promieniowania słonecznego, oprócz generowania energii elektrycznej, ulegają nagrzewaniu się, przez co pogarsza się ich sprawność. W instalacjach fotowoltaicznych zbudowanych w oparciu o dachówki solarne może dochodzić do innych procesów cieplnych (sposobów wymiany ciepła) w porównaniu do instalacji złożonych z paneli PV, umieszczonych na konstrukcji wsporczej nad dachem. Dachówki PV, wbudowane w konstrukcję dachu nie są naturalnie chłodzone przez wiatr a zgromadzone powietrze w szczelinie pomiędzy dachówkami a konstrukcją dachu ulega nagrzewaniu się od ogniw PV i oddaje akumulowane ciepło z różnym stopniem, w zależności od izolacji termicznej dachu i sposobu użytkowania poddasza budynku. W takich przypadkach praktycznie nie występuje żaden wymuszony ruch powietrza znajdującego się w szczelinie dachu, który mógłby chłodzić spodnią część dachówek fotowoltaicznych i niwelować negatywny wpływ wzrostu temperatury na sprawność konwersji fotowoltaicznej.

Wymiana ciepła pomiędzy dachówkami fotowoltaicznymi, konstrukcją dachu i powietrzem znajdującym się pomiędzy nimi może być realizowana przez trzy różne pod względem fizycznym sposoby, obejmujące [3, 4, 5]:

- kondukcję (przewodzenie): przekazywanie energii kinetycznej mikroskopowego ruchu cząstek (atomów, jonów, elektronów) pomiędzy bezpośrednio stykającymi się częściami jednego lub różnych ciał;

---

\* Politechnika Poznańska.

- konwekcję (unoszenie): przepływ ciepła związany z makroskopowym ruchem cząsteczek. Może występować w przestrzeniach ograniczonych i nieograniczonych oraz być spowodowana różnicą temperatur (a więc i różnicą gęstości i ciśnień – konwekcja naturalna) lub wymuszona działaniem sił zewnętrznych (konwekcja wymuszona);
- radiację (promieniowanie): przekazywanie energii pomiędzy ciałami lub częściami tego samego ciała za pośrednictwem promieniowania elektromagnetycznego temperaturowego. Można rozpatrywać to zjawisko jako wytwarzanie energii promienistej w źródle promieniowania, jako reakcja odbiornika, do którego dociera ta energia lub jako proces rozchodzenia się promieniowania w środowisku oddzielającym źródło od odbiornika. Emisji promieniowania cieplnego przez ciało towarzyszy ciągle pochłanianie promieniowania, które dociera do niego z zewnątrz. Jeśli te efekty się równoważą, to ciało pozostaje w stanie równowagi termodynamicznej. Jeśli zaś ilość energii wypromieniowanej przez ciało lub jego część jest różna od ilości energii pochłoniętej, powstaje wymiana energii promienistej pomiędzy ciałami a wypadkowa moc będzie przepływać z ciała o wyższej do ciała o niższej temperaturze, co nosi nazwę przepływu ciepła przez promieniowanie.

W bardzo wielu przypadkach występuje przepływ ciepła pomiędzy różnymi ciałami z jednoczesnym zachodzeniem dwóch bądź trzech wymienionych sposobów wymiany ciepła w różnym stopniu.

## 2. PRZEJMOWANIE CIEPŁA

Konwekcja jest przepływem ciepła występującym głównie w ośrodkach płynnych, w których cząsteczki podlegają ruchom makroskopowym, ze względu na posiadanie dużej swobody ruchu. Równocześnie zachodzi proces przewodzenia, polegający na przekazywaniu ruchu energii bezładnego przez sąsiadujące ze sobą cząsteczki. Istotny wpływ na wartość całkowitej gęstości strumienia cieplnego i pole temperatury wywiera konwekcja a w kierunku przepływu ciepła określonego gradientem temperatury występują składowe prędkości płynu różne od zera. Jednak w płynie tym może wystąpić wyłącznie przepływ ciepła przez przewodzenie (brak składowych ruchu konwekcyjnego w kierunku określonym gradientem temperatury), np. w warstwie przyściennej przy opływie ciał stałych przez takie płyny. Prędkość płynu zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem się odległości do powierzchni ciała stałego, na której osiąga najniższą wartość równą zero. Jeśli ta powierzchnia jest izotermiczna, to następuje jedynie przepływ ciepła przez przewodzenie. Istnienie warstwy przyściennej oznacza, że przepływ ciepła między tymi ośrodkami odbywa się poprzez konwekcję i kondukcję, co nazywane jest przejmowaniem ciepła przez konwekcję. Dodatkowo, gdy wystą-

pi dopływ lub odpływ ciepła w wyniku promieniowania, to zachodzi tzw. przejmowanie ciepła [3, 4, 5].

Zagadnienie przejmowania ciepła wiąże się ze zdefiniowanymi współczynnikami przejmowania ciepła występującymi przy formułowaniu warunków brzegowych trzeciego rodzaju, zwanych warunkami Fouriera [3, 4]. Jeżeli ciało  $A$  znajduje się w płynie  $B$ , to do elementarnej powierzchni  $dF$  dopływa ciepło z procesu konwekcji. Również może do tej powierzchni docierać ciepło przekazywane na drodze radiacji. Łącznie do  $dF$  dopływa w wyniku konwekcji i radiacji strumień cieplny o całkowitej gęstości  $q_\alpha$  [ $W/m^2$ ]. Zakładając, że płyn otaczający ciało  $A$  ma w dostatecznie dużej odległości od powierzchni  $F$ , np. na brzegu  $U$  rozpatrywanego układu termodynamicznego, temperaturę  $t_{U,k} = t_U$ , to można przyjąć, że gęstość strumienia cieplnego  $q_\alpha$  jest proporcjonalna do różnicy temperatur  $t_F - t_U$ , czyli:

$$q_\alpha = \alpha(t_U - t_F) \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik przejmowania ciepła [ $W/m^2K$ ].

Wyrażenie (1) stanowi matematyczną postać warunku brzegowego trzeciego rodzaju. Współczynnik  $\alpha$  wyraża wartość strumienia cieplnego (mocy cieplnej) równej 1 W dopływającej (gdy  $t_U > t_F$ ) lub odpływającej (gdy  $t_U < t_F$ ) przez jednostkę powierzchni  $1m^2$  przy różnicy temperatur między  $dF$  i brzegiem  $U$  równej 1 K.

Przy jednoczesnym występowaniu radiacji i konwekcji wypadkowa gęstość strumienia cieplnego  $q_\alpha$  jest sumą składowych gęstości promieniowania przekazywanego przez konwekcję ( $q_k$ ) oraz radiację ( $q_r$ ):

$$q_\alpha = q_k + q_r \quad (2)$$

gdzie:  $q_k$  – gęstość strumienia cieplnego przekazywanego do powierzchni  $dF$  przez konwekcję,  $q_r$  – gęstość strumienia cieplnego przekazywanego do powierzchni  $dF$  przez promieniowanie.

Przejmowanie ciepła może odbywać się zarówno od powierzchni  $U$  do  $F$  jak i odwrotnie. Składniki sumy 2 określone są zależnościami:

$$q_k = \alpha_k(t_{U,k} - t_F) \quad (3)$$

$$q_r = \alpha_r(t_{U,r} - t_F) \quad (4)$$

Wartość współczynnika  $\alpha$  w równaniu 1 uwzględnia przejmowanie ciepła na drodze konwekcji i radiacji a wzór 1 przyjmuje postać:

$$q_\alpha = \alpha_k(t_{U,k} - t_F) + \alpha_r(t_{U,r} - t_F) \quad (5)$$

Przy zachodzeniu równości  $t_{U,k} = t_{U,r} = t_U$  suma współczynników proporcjonalności  $\alpha_k + \alpha_r = \alpha$ .

Jeśli w ośrodku płynnym w dostatecznie dużej odległości od powierzchni  $F$  pole temperatury jest jednorodne, to strumień cieplny  $P_k$  przejmowany przez konwekcję z ośrodka  $A$  do  $B$  przez powierzchnię  $F$  jest równy:

$$P_k = \int_F q_k dF \quad (6)$$

Rozkład gęstości strumienia ciepłego  $q_k$  można określić na podstawie prawa Newtona (opisanego zależnością (3)), natomiast po przyrównaniu równań (3) i (6) otrzymuje się zależność 7, opisującą współczynnik ciepła przez konwekcję:

$$\alpha_k = \frac{dP_k}{dF} \frac{l}{t_{U,k} - t_F} \quad (7)$$

Jeśli składowe prędkości poszczególnych strug płynu skierowanych ku różnym elementom powierzchni  $F$  nie są sobie równe, należy wyznaczyć średni współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję:

$$\bar{\alpha}_k = \frac{l}{F} \int_F \alpha_k dF \quad (8)$$

Natomiast całkowity strumień ciepły przejmowany przez powierzchnię  $F$  wynosi:

$$P_k = (t_{U,k} - t_F) \int_F \alpha_k dF = \bar{\alpha}_k F (t_{U,k} - t_F) \quad (9)$$

### 3. OPÓR I WSPÓŁCZYNNIK PRZEJMOWANIA CIEPŁA PRZY KONWEKCJI

Współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję  $\alpha_k$  jest miarą strumienia ciepłego (mocą cieplną) przenoszoną przez jednostkowy element powierzchni granicznej między dwoma ośrodkami  $A$  i  $B$ , pod wpływem jednostkowej różnicy temperatur  $t_F - t_{U,k}$ , przy czym  $t_F$  jest temperaturą tego elementu a  $t_{U,k}$  temperaturą ośrodka płynnego  $A$  z dala od powierzchni granicznej.

Z ruchem ciepła przez przejmowanie związany jest opór cieplny przewodzenia, wyrażony ilorazem różnicy temperatur i mocy cieplnej. Występowanie oporu na drodze przepływu ciepła w jednowymiarowym polu temperatury powoduje spadek temperatury  $\Delta t = t_{U,k} - t_F$ , przy czym większy spadek występuje w warstwie przyściennej  $\Delta t' = t' - t_F$ , gdzie występuje tylko przewodzenie ciepła. Opór cieplny tej warstwy wynosi [2, 4, 5]:

$$W' = \frac{\Delta l}{\lambda \Delta F} \quad [\text{K/W}] \quad (10)$$

gdzie:  $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa płynu w warstwie przyściennej o grubości  $\Delta l$  [W/mK],  $\Delta F$  – element skończony powierzchni granicznej przejmującej ciepło [W/mK].

Dodatkowo występuje jeszcze opór szeregowy  $W''$ , na którym spadek temperatury wynosi  $\Delta t'' = t_{U,k} - t'$ . Całkowity opór przyjmowania ciepła jest sumą tych dwóch oporów, czyli:

$$W_k = W' + W'' \quad (11)$$

Oznaczając przez  $\Delta P_k$  strumień cieplny przyjmowany przez element powierzchni granicznej  $\Delta F$  oraz uwzględniając prawo Newtona otrzymano

$$W_k = \frac{t_{U,k} - t_F}{\Delta P_k} = \frac{t_{U,k} - t_F}{q_k \Delta F} = \frac{l}{\alpha_k \Delta F} \quad (12)$$

lub

$$\bar{W}_k = \frac{l}{\alpha_k F} \quad (13)$$

gdzie:  $\bar{\alpha}_k$  – średni współczynnik przyjmowania ciepła na całej powierzchni granicznej  $F$ .

Z równania (13) wynika, że opór przyjmowania jest odwrotnie proporcjonalny do współczynnika przyjmowania ciepła  $\alpha$ , zależnego m.in. od ciepła właściwego płynu  $c$ . Opór ten wzrasta wraz ze wzrostem przewodności cieplnej właściwej  $\lambda$  warstwy przyściennej i zmniejszaniem się jej grubości. Przewodność cieplna właściwa  $\lambda$  zależy m.in. od gęstości płynu  $\rho$  natomiast grubość warstwy przyściennej zależy od prędkości płynu  $w$  i jego lepkości dynamicznej  $\mu$ .

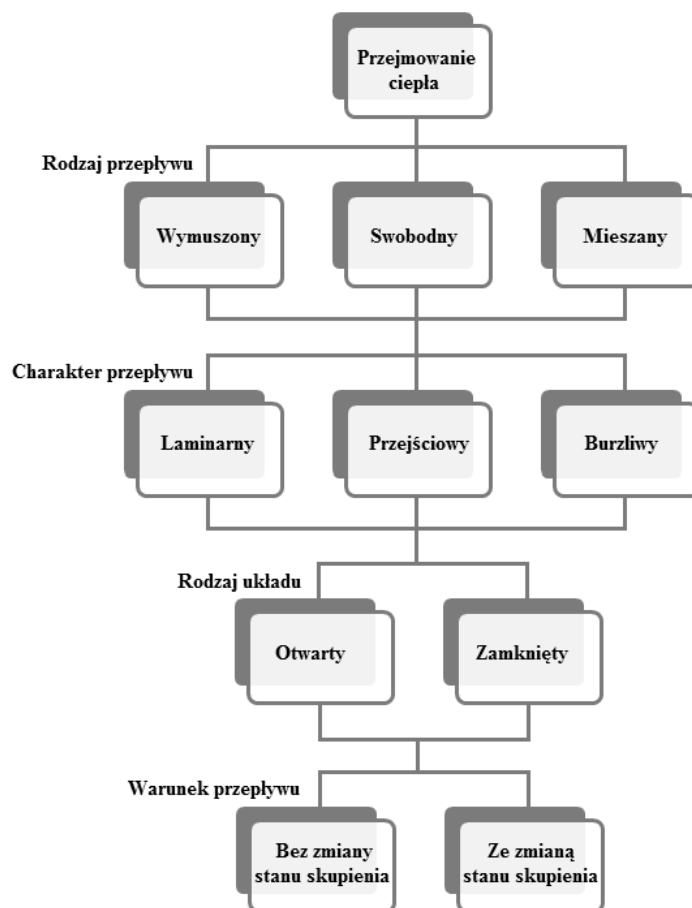
Wiedząc, że warstwa płynu w pobliżu powierzchni granicznej nie charakteryzuje się jednorodnością temperatury  $t$ , a wielkości takie jak  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $c$  są funkcjami temperatury, konieczne jest wprowadzenie tzw. temperatury obliczeniowej  $t_m$ , tzn. takiej, dla której w obliczeniach  $\alpha_k$  przyjmować się będzie wartości parametrów charakteryzujących środowisko płynne. Wartość temperatury obliczeniowej wyznaczą się z równania [3, 4, 6, 7]:

$$t_m = \frac{t_{U,k} + t_F}{2} \quad (14)$$

Wartość  $t_{U,k}$  jest temperaturą płynu z dala od powierzchni  $F$ , w strefie poza obszarem zakłóceń cieplnych, często na umownej granicy układu termodynamicznego w płynie.

#### 4. RODZAJE PRZEJMOWANIA CIEPŁA

Rodzaj przepływu płynu, biorącego udział w procesie wymiany ciepła, pozwala na wyróżnienie trzech podstawowych sposobów przyjmowania ciepła: przy przepływie wymuszonym, swobodnym lub mieszanym. Klasyfikację rodzajów przyjmowania ciepła przedstawiono na rysunku 1 [4].



Rys. 1. Klasyfikacja rodzajów przejmowania ciepła [4]

Podczas wymuszonego przepływu płynu jego cząsteczki wprawiane są w ruch przez siły zewnętrzne (np. wentylatory, pompy), natomiast przy przepływie swobodnym ruch cząstek płynu zachodzi w wyniku siły ciężenia. Gdy dwie cząsteczki posiadają różną temperaturę, to będzie zachodziła pomiędzy nimi wymiana ciepła, czyli będzie zmieniała się ich temperatura a tym samym i ich gęstość. Przez to, w skutek siły ciężenia, cząsteczki będą się przemieszczać. Gdy obydwa rodzaje będą występować jednocześnie, wtedy wystąpi przejmowanie ciepła przy przepływie mieszanym. Często, zwłaszcza przy dużych prędkościach płynu udział przejmowania ciepła z przepływem swobodnym jest pomijalnie mały w porównaniu do przepływu wymuszonego.

Jako charakter przepływu można wyróżnić trzy rodzaje: laminarny, przejściowy i burzliwy, co związane jest z lepkością płynu. W obszarach dostatecznie

oddalonych od powierzchni granicznych wpływ lepkości na charakter przepływu płynu jest nieznaczący. Ma ona jednak duże znaczenie w obszarach przyległych do powierzchni granicznych, gdzie na styku rozpatrywanych powierzchni prędkość płynu  $w$  [m/s] maleje do zera. Przekroczenie pewnej prędkości krytycznej  $w_{kr}$  przepływu płynu zmienia charakter przepływu ciepła w układzie. Poniżej prędkości krytycznej płyn porusza się w sposób uporządkowany (jego strugi nie ulegają zawirowaniom), czyli laminarny. Powyżej tej prędkości, pojawiają się zaburzenia w ruchu płynu a jego cząsteczki poruszają się w sposób chaotyczny. Taki przepływ nazywa się burzliwym lub turbulentnym. Wartość współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha_k$  przy przepływie burzliwym jest większa niż przy przepływie laminarnym.

Prędkość krytyczna płynu  $w_{kr}$  jest wprost proporcjonalna do jego lepkości kinematycznej  $\nu$  a odwrotnie proporcjonalna do wymiaru charakterystycznego  $l$  ciała, z którym to płyn wymienia ciepło, co można zapisać równaniem [4]:

$$w_{kr} = C \frac{\nu}{l} \quad (15)$$

gdzie:  $\nu$  – lepkość kinematyczna płynu [ $m^2/s$ ],  $l$  – wymiar charakterystyczny liniowy [m],  $C$  – współczynnik proporcjonalności [–].

Współczynnik  $C$  w równaniu (15) jest równy kryterium Reynoldsa  $Re$ . Poniżej wartości krytycznej kryterium Reynoldsa (analogicznie jak dla prędkości krytycznej) przepływ płynu jest laminarny, a jego wartość zależy od typu i geometrii układu termokinetycznego. Ponieważ wartość  $Re$  może cechować się dużym rozrzutem, wprowadzono pojęcie przepływu przejściowego, dla którego określono zakres wartości  $Re$ .

Wymienione trzy charaktery przepływu mogą zachodzić również przy swobodnym lub mieszanym przepływie płynu, jednak granice pomiędzy nimi mogą nie być tak wyraźne jak przy przepływie wymuszonym. Dlatego też przy przepływie swobodnym, granice pomiędzy przepływami o różnych charakterach nie określa się za pomocą kryterium  $Re$ , lecz za pomocą kryterium Grashofa  $Gr$  lub iloczynu kryterium Grashofa i Prandtla  $Pr$ .

Rozpatrując rodzaj układu można wyróżnić układy otwarte i zamknięte. W układach otwartych powierzchnie ograniczające układ znajdują się w dużej odległości od miejsca wymiany. W układach zamkniętych natomiast, grubość warstwy przyściennej jest porównywalna z wymiarem charakterystycznym układu, przez co powierzchnie ograniczające układ wywierają istotny wpływ na warunki ruchu płynu.

Kolejnym kryterium klasyfikującym rodzaj przejmowania ciepła jest warunek przepływu gdy dochodzi bądź nie do zmiany stanu skupienia płynu uczestniczącego w procesie.

Wyszczególnione kryteria podziału pozwalają na wyodrębnienie pewnych grup procesów przejmowania ciepła, opisywanych podobnymi równaniami kryterialnymi.

## 5. RÓWNANIA KRYTERIALNE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA PRZEZ KONWEKCJĘ

W celu wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję można posługiwać się wieloma metodami analitycznymi i empirycznymi, opartymi głównie na równaniach Fouriera-Kirchhoffa, Naviera-Stockesa czy równaniu ciągłości strugi płynu nieściśliwego. Współczynnik  $\alpha_k$  zależy od bardzo wielu zmiennych, co wprowadza konieczność stosowania wielu założeń uproszczających przy rozwiązywaniu skomplikowanych równań różniczkowych, i w efekcie daje wyniki o małej dokładności, nieporównywalne z wartościami wyznaczonymi doświadczalnie. Dlatego też do analizy przejmowania ciepła pomocne okazały się badania empiryczne w powiązaniu z teorią prawdopodobieństwa zjawisk fizycznych. Zamiast określania  $\alpha_k$  jako funkcji wielu zmiennych, opisuje się proces przejmowania ciepła za pomocą liczb podobieństwa (liczb kryterialnych, modułów bezwymiarowych) [3, 4].

Na podstawie teorii prawdopodobieństwa można wyznaczyć, dla zjawisk przejmowania ciepła przez konwekcję, następujące liczby kryterialne [1, 3, 4, 5, 6, 7]:

- Nusselta (łączy ruch ciepła w strumieniu płynu z wnikaniem ciepła do ściany):

$$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda} \quad (16)$$

- Reynoldsa (stanowi stosunek sił bezwładności do sił tarcia wewnętrznego płynu):

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad (17)$$

- Grashofa (określa stosunek sił wyporu do sił tarcia wewnętrznego płynu):

$$Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu^2} \quad (18)$$

gdzie:  $\beta$  – współczynnik rozszerzalności objętościowej [1/K], wyznaczony jako odwrotność temperatury obliczeniowej z równania 14:

$$\beta = \frac{2}{t_{U,k} + t_F} \quad (19)$$

gdzie:  $g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],

- Prandtla (charakteryzuje podobieństwo rodzaju płynu):



$$Pr = \frac{c\mu}{\lambda} \quad (20)$$

gdzie:  $c$  – ciepło właściwe [Ws/kgK],  $\mu$  – lepkość dynamiczna [Ns/m<sup>2</sup>].

Aby ruch ciepła na drodze przejmowania ciepła przez konwekcję w układach podobnych geometrycznie był podobny (dla stanów ustalonych przepływu ciepła i płynu), to szukana (nieokreślająca) liczba  $Nu$  musi być funkcją następujących, określających liczb podobieństwa cieplnego i mechanicznego [3, 4]:

– dla konwekcji swobodnej:

$$Nu \approx f(Gr, Pr) \quad (21)$$

– dla konwekcji wymuszonej:

$$Nu \approx f(Re, Pr) \quad (22)$$

Jeśli płynami są gazy jednoatomowe, to  $Pr = const$ , to z równań (21) i (22) można wykluczyć liczbę  $Pr$ , a wartość  $\alpha_k$  można wyznaczyć po przekształceniu równania (16) do postaci (23), gdzie liczba Nusselta jest funkcją tylko jednej liczby kryterialnej: Reynoldsa bądź Grashofa, w zależności od rodzaju konwekcji [4].

$$\alpha_k = \frac{Nu\lambda}{l} \quad (23)$$

Niekiedy wynika konieczność uzupełnienia określających liczb podobieństwa dodatkowymi, geometrycznymi czy fizycznymi, modułami bezwymiarowymi. Z analizy wymiarowej i badań doświadczalnych wynika, że przebiegi powyższych funkcji można przybliżyć następującymi równaniami wykładniczymi [2, 3]:

$$Nu \approx C_1(Gr Pr)^i \quad (24)$$

$$Nu \approx C_2 Re^n Pr^m \quad (25)$$

Uwzględniając równania 24 i 25 oraz 16 ÷ 20, otrzymuje się:

$$\frac{\alpha_k l}{\lambda} = C_1 \left( \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu^2} \frac{c\mu}{\lambda} \right)^i \quad (26)$$

$$\frac{\alpha_k l}{\lambda} = C_2 \left( \frac{wl}{\nu} \right)^n \left( \frac{c\mu}{\lambda} \right)^m \quad (27)$$

O charakterze przepływu czynnika decyduje wartość wyrażen  $GrPr$  dla konwekcji swobodnej lub  $Re$  dla konwekcji wymuszonej. Małe wartości tych wyrażen wskazują na laminarny charakter przepływu, średnie – przejściowy a duże – burzliwy. Wyznaczone doświadczalnie przebiegi funkcji opisane równaniami (26) i (27) przybliża się przebiegami o niezmiennych wartościach współczynników:  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $i$ ,  $n$ ,  $m$ , w zakresie zmienności wartości wyrażen  $GrPr$  i  $Re$  odpowiadającym wymienionym charakterom przepływu. Można wyróżnić także szczególne przypadki konwekcji swobodnej zachodzącej w szczelinach płaskich, cylindrycznych lub kulistych.

Aby skorzystać z literaturowych przebiegów funkcji opisujących zjawisko przejmowania ciepła przez konwekcję należy [3]:

- wybrać przebieg funkcji odpowiadający badanemu zjawisku pod względem fizycznym i geometrycznym,
- wyznaczyć wartości wielkości fizycznych płynu,
- wyliczyć wartości wyrażeń  $GrPr$  lub  $Re$  i dobrać odpowiadające im wartości współczynników  $C_1, C_2, i, n, m$ ,
- obliczyć wartość  $Nu$ ,
- wyznaczyć wartość  $\alpha_k$ ,
- znaleźć szukaną  $q_\alpha$  ze wzoru (3).

Najczęściej, dla przejmowania ciepła przy konwekcji swobodnej występującej w przestrzeniach nieograniczonych, przyjmuje się wyrażenia zaproponowane przez Micheeva [3]:

$$\begin{aligned} Nu &= 1,18(GrPr)^{0,125} & \text{dla } 10^{-3} < GrPr < 5 \cdot 10^2 \\ Nu &= 0,54(GrPr)^{0,25} & \text{dla } 5 \cdot 10^{-2} < GrPr < 2 \cdot 10^7 \\ Nu &= 0,135(GrPr)^{0,33} & \text{dla } 2 \cdot 10^{-7} < GrPr < 10^{13} \end{aligned} \quad (28)$$

Wzory (28) mają na tyle ogólną postać, że można je zastosować do wyznaczenia wartości  $\alpha_k$  dla płaszczyzn ułożonych równolegle do powierzchni ziemi, przyjmując jako wymiar charakterystyczny  $l$  szerokość płaszczyzny. Po wyznaczeniu z powyższych wzorów wartości  $\alpha'_k$ , można obliczyć wartość rzeczywistą  $\alpha_k$  dla [3]:

- płaszczyzn oddających ciepło w górę:

$$\alpha_k = 1,3\alpha'_k \quad (29)$$

- płaszczyzn oddających ciepło w dół:

$$\alpha_k = 0,7\alpha'_k \quad (30)$$

Z uwagi na specyfikę montażu i pracy instalacji fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem wymiana ciepła przez konwekcję będzie następowała przy swobodnym przepływie powietrza.

## 6. PRZEJMOWANIA CIEPŁA PRZY PRZEPLYWIE SWOBODNYM

Swobodny przepływ płynu odbywa się wskutek sił wyporu, powstałych z powodu zmiany gęstości płynu wywołanego zmianami jego temperatury. Z uwagi na fakt, że prędkość płynu zależy od temperatury (co jest opisane kryterium  $Gr$ ), konwekcję swobodną można opisać równaniem (21). W rzeczywistości jednak na pole prędkości (oprócz sił ciężenia) mają jeszcze wpływ, choć

niewielki, siły bezwładności. Dlatego też kryterium Grashofa występuje w iloczynie z kryterium Prandtla, które można zastąpić kryterium Rayleigha [4, 6, 7]:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{a \nu} \quad (31)$$

gdzie:  $a$  – dyfuzyjność cieplna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  
wyznaczona jako:

$$a = \frac{\nu \lambda}{c \mu} \quad (32)$$

Ogólna zależność (21) przyjmuje więc postać (33):

$$Nu = f(Ra) \quad (33)$$

W ogólnym przypadku, przy przepływie swobodnym wyrażonym według kryterium Rayleigha, może wystąpić ruch płynu laminarny, przejściowy lub burzliwy.

## 7. WNIOSKI

Rozważając formy wymiany ciepła w układach z dachówkami fotowoltaicznymi, umieszczonymi w strukturze dachu, należy zwrócić uwagę na wiele czynników mających wpływ na rozkład i sposoby wymiany ciepła. Przedstawione równania pozwalają na określenie i wyznaczenie odpowiednich równań kryterialnych w odniesieniu do przejmowania ciepła na drodze konwekcji swobodnej, która będzie dominującą w rozpatrywanym przypadku. Wyznaczenie wartości poszczególnych liczb kryterialnych pozwoli na określenie rodzaju konwekcji, przy otrzymanym rodzaju ruchu płynu (powietrza), znajdującym się w przestrzeni pomiędzy konstrukcją dachu a dachówkami. Należy także określić charakter układu (otwarty czy zamknięty), w którym dochodzi do wymiany ciepła, oraz kształt szczeliny i kierunek przepływu ciepła. Oddawanie ciepła odbywać się będzie w większości przypadków od spodniej strony dachówki PV w kierunku konstrukcji dachowej, gdzie te dwie płaszczyzny, są do siebie równoległe i nachylone pod pewnym kątem w odniesieniu do podłoża.

## LITERATURA

- [1] Abdolzadeh M., Zarei T., Optical and Thermal Simulation of Photovoltaic Modules with and without Tracking System, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 138 (1), 2016.
- [2] Armstrong S., Hurley W. G., A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric condition, *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, 2010, pp. 1488 – 1495.
- [3] Hauser J., *Podstawy elektrotermicznego przetwarzania energii*, Zakład Wydawniczy K.Domke, Poznań, 1996.

- [4] Hering M., Termokinytyka dla elektryków, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1980.
- [5] Pudlik W., Wymiana i wymienniki ciepła, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012.
- [6] Toress-Lobera D., Valkealahti S., Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions, Solar Energy, vol. 93, 2013, pp. 183 – 194.
- [7] Toress-Lobera D., Valkealahti S., Inclusive dynamic thermal and electric simulation model of solar PV system under varying atmospheric conditions, Solar Energy, vol. 105, 2014, pp. 632 – 647.

#### **THERMAL PROCESSES TAKING PLACE IN INSTALLATIONS WITH PHOTOVOLTAIC ROOF TILES**

The paper presents the classification of methods of heat transfer, and the procedure when determining criterion equations depending on the type of heat exchange. Describes the heat transfer coefficients and resistance of heat transfer by convection. Indicated workflow to determine the quantitative heat flow in the present system of photovoltaic roof tiles installed in the roof structure.

*(Received: 1. 02. 2016, revised: 3. 03. 2016)*