

**Anna Barbara DEMIANIUK,
Sławomir Adam SORKO**

Politechnika Białostocka, WBiIŚ, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok
E-mail: a.b.demianiuk@10g.pl, s.sorko@pb.edu.pl

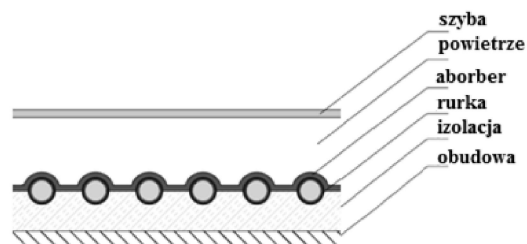
Modelowanie procesów transportu masy i ciepła w płaskich kolektorach słonecznych

1 Wstęp

Podstawowym celem każdego systemu słonecznego, zarówno aktywnego jak i pasywnego jest pozyskanie energii promieniowania słonecznego i przekazanie jej w sposób zaplanowany do odbiorcy, przy jak największej sprawności konwersji. W wielu aktywnych i pasywnych systemach słonecznych podstawowym elementem pełniącym funkcję odbiornika energii promieniowania słonecznego jest płaski kolektor słoneczny, którego podstawowym elementem jest absorber płytowy lub rurowy. W przypadku absorbera płytowego przepływ czynnika odbierającego ciepło odbywa się powierzchniowo pod płytą absorbera, a medium odbierającym i transportującym ciepło może być zarówno ciecz, jak też powietrze. W większości rozwiązań kolektorowych stosuje się absorbery rurowe (kanałowe), gdzie do płyty absorbera dołączone są elementy rurowe, usytuowane równolegle względem siebie, tworząc szereg kanałów. W rozwiązaniach instalacyjnych rury lub kanały są wypełnione cieczą, natomiast w rozwiązaniach pasywnych medium jest najczęściej powietrze. Inną formą kolektorów rurowych są kolektory próżniowe, w których przewody transportujące ciepło są umieszczone w szklanych rurach próżniowych w celu zmniejszenia strat ciepła od medium będącego jego nośnikiem do otoczenia [1]. W zaawansowanych konstrukcjach przeznaczonych do konwersji energii słonecznej na energię użyteczną na płycie absorbera są umieszczane panele ogniw fotowoltaicznych. W tego typu ogniwach (PV/T) zachodzi przekształcenie energii promieniowania słonecznego na energię cieplną i energię elektryczną w proporcji zależnej od konstrukcji urządzenia.

Różnorodne rozwiązania konstrukcyjne oraz rodzaje kolektorów słonecznych w zależności od zastosowania i charakteru pracy (systemy pasywne i aktywne), typu stosowanego medium (powietrza lub cieczy), możliwości połączenia z panelami fotowoltaicznymi oraz zastosowanych materiałów zastały szczegółowo opisane w literaturze [2,3,4].

Na rysunku 1 pokazano przykładowy przekrój poprzeczny płaskiego cieczowego kolektora słonecznego z elementami rurowymi, przez które przepływa ciecz.

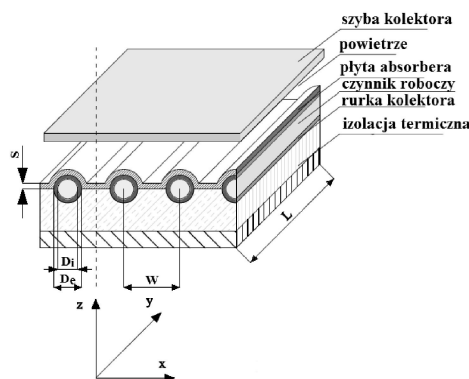


Rys. 1 Przekrój przez płaski kolektor słoneczny z przewodami o przekroju kołowym
 Fig. 1. Flat plate liquid collector with tubes of circular cross-section

2 Równania bilansu cieplnego kolektora

Rozważania dotyczące zjawisk cieplnych w kolektorze opierają się na jego bilansie cieplnym. Równania bilansowe układu absorber-układ rurowy w najprostszej postaci otrzymuje się z analizy strumienia ciepła w płycie absorbera i strumienia ciepła przejmowanego przez płyn w układzie rurowym kolektora.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat kolektora płaskiego z układem rur o kołowym kształcie przekroju poprzecznego.



Rys. 2. Schemat płaskiego kolektora słonecznego z jego wymiarami
 Fig. 2. The layout of a flat plate liquid collector with its dimensions

W celu osiągnięcia jak najbardziej efektywnej pracy kolektora dąży się do maksymalnego ograniczenia strat ciepła, czyli istotne jest, aby opór cieplny elementów oddzielających główną część odbiornika promieniowania słonecznego, czyli powierzchnię pochłaniającą (absorber) od otoczenia, był jak największy. Natomiast w przypadku samej powierzchni pochłaniającej konieczna jest intensyfikacja procesów wymiany ciepła w absorberze. Ważne, aby opór ciepła był jak najmniejszy w poprzek płyty absorbera (między rurami lub kanałami), a także między płytą a rurą lub kanałem. Poniżej przeanalizowano zjawiska wymiany ciepła zachodzące przy pozyskiwaniu energii promieniowania słonecznego w płycie absorbera i przy przekazywaniu jej czynnikowi przepływającemu w elementach rurowych.

W ramach najprostszego matematycznego opisu pól temperatury w płycie absorbera i układzie rurowym kolektora, prowadzącego do wyznaczenia podstawowych właściwości energetycznych kolektora słonecznego (model Hottela-Whilliera [2,5]), rozkład temperatury w płycie absorbera $T_p \equiv T_p(x)$ i temperatury płynu $T_f \equiv T_f(y)$ w układzie rur kolektora można opisać równaniami:

$$\frac{\partial^2 T_p(x)}{\partial x^2} - C_p T_p(x) = -C_p \left(T_a + \frac{G_{sa}}{U_L} \right), \quad (1)$$

gdzie: $C_p = \frac{U_L}{\lambda_p \delta}$

z warunkami brzegowymi:

$$T_p(x) \Big|_{x=0} = 0 \quad ; \quad T_p(x) \Big|_{x=h=\frac{(W-D_e)}{2}} = T_b, \quad (1a^*)$$

$$\frac{\partial T_f(y)}{\partial y} - C_f T_f(y) = C_f \left(T_a + \frac{G_{sa}}{U_L} \right), \quad (1b)$$

gdzie: $C_f = \frac{nWU_o}{m\dot{c}_p}$

z warunkiem brzegowym

$$T_f(y) \Big|_{y=0} = T_i, \quad (1b^*)$$

gdzie:

U_L – współczynnik kompleksowych strat ciepła [W/(m²K)],

U_o – współczynnik strat ciepła pomiędzy otoczeniem zewnętrznym (powietrze)
i cieczą w rurach kolektora,

G_{sa} – gęstość strumienia promieniowania słonecznego [W/m²],

T_a – temperatura otoczenia [K],

\dot{m} – strumień masy [kg/s],

c_p – ciepło właściwe cieczy [J/(kg K)],

λ_p – przewodność cieplna materiału absorbera [W/(m K)],

δ – grubość warstwy absorbera [m],

W – rozstaw rur kolektora [m],

n – liczba rur kolektora płaskiego [-],

T_b – temperatura w polu kontaktu płyty absorbera z elementem rurowym [K],

T_i – temperatura cieczy we wlocie rury kolektora [K].

Po rozwiązaniu równań otrzymuje się zależności opisujące rozkład temperatury w płycie absorbera i w czynniku przepływającym w elementach rurowych:

$$T_p(x) = \frac{\cosh(C_p x) \left(T_b - T_a + \frac{G_{sa}}{U_L} \right)}{\cosh(C_p h)} + T_a + \frac{G_{sa}}{U_L}, \quad (2a)$$

$$T_f(y) = \exp(-C_f y) \left(T_i - T_a - \frac{G_{sa}}{U_L} \right) + T_a + \frac{G_{sa}}{U_L}. \quad (2b)$$

Wprowadzając współczynnik odprowadzenia ciepła z kolektora F_R :

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{S_c (G_{sa} - U_L (T_i - T_a))}, \quad (3)$$

gdzie: S_c oznacza powierzchnię kolektora, $T_o = T_f(y=L)$ temperaturę czynnika na wylocie rury kolektora wyznaczoną z równania (2b), gęstość energii pozyskiwanej przez kolektor i użyteczną moc cieplną kolektora można przedstawić zależnościami:

$$q_u = F_R (G_{sa} - U_L (T_i - T_a)), \quad (4a)$$

$$Q_u = S_c \cdot q_u. \quad (4b)$$

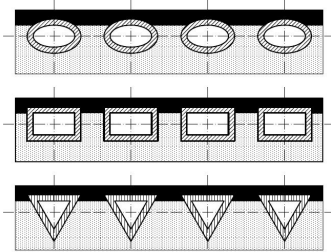
Odnosząc gęstość energii konwertowanej przez kolektor określoną równaniem (4a) do gęstości strumienia promieniowania słonecznego otrzymuje się wyrażenie określające sprawność pozyskiwania energii przez kolektor słoneczny:

$$\eta_{cth} = \frac{q_u}{G_{sa}}. \quad (5)$$

W przedstawionych wyżej zależnościami istotnym czynnikiem determinującym parametry energetyczne kolektora słonecznego, obok właściwości cieplnych materiałów absorbera, układu rurowego, czynnika oraz różnicy temperatury czynnika i otoczenia, jest strumień masy czynnika przepływający w układzie rurowym kolektora.

Wyznaczenie strumienia masy czynnika przepływającego w układzie rurowym kolektora jest proste w przypadku, kiedy rury mają w przekroju poprzecznym kształt kołowy.

Na rysunku 3 przedstawiono przekroje płaskich rurowych kolektorów słonecznych o kształtach przekroju poprzecznego: eliptycznym, trójkątnym i prostokątnym. W różnorodnych rozwiązaniach konstrukcyjnych przewody mogą mieć dowolny kształt uzyskany w wyniku profilowania układów przepływowych z arkuszy blachy.



Rys. 3. Płaskie rurowe kolektory słoneczne o kształtach przekroju poprzecznego różnych od kołowego

Fig. 3. Flat plate liquid collector with non-circular shaped tubes

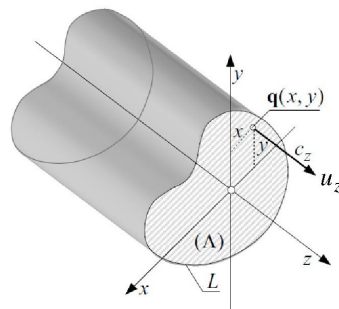
W przypadku kształtów innych niż kołowy rur kolektora do optymalizacji parametrów konstrukcyjnych konieczne staje się wyznaczenie pola prędkości przepływu czynnika i wyznaczenie objętościowego i masowego natężenia przepływu poprzez całkowanie rozkładu prędkości w obszarze opisanym konturem przekroju przewodu. Wyznaczenie pola prędkości w systemie przepływowym kolektora jest istotnym elementem optymalizacji parametrów konstrukcyjnych kolektora.

3 Wyznaczanie jednokierunkowego przepływu cieczy lepkiej przez prostoosiowe przewody o niekołowym kształcie przekroju poprzecznego

Wystarczającym modelem do analizy przepływu płynu przez rury lub przewody w układzie hydraulicznym kolektora jest model ustalonego, jednorodnego i jednokierunkowego przepływu laminarnego nieściśliwego cieczy lepkiej [6].

3.1 Sformułowanie zagadnienia

Jednokierunkowy laminarny, ustalony przepływ lepkiej cieczy newtonowskiej w prostoosiowym przewodzie o dowolnym kształcie w przekroju poprzecznym (Λ), ograniczonym linią brzegową (L), jest opisany równaniem Stokesa z warunkiem brzegowym zakładającym zerową wartość prędkości na sztywnej i nieprzepuszczalnej granicy materialnej (na ścianie przewodu) [7]:



Rys. 4. Jednokierunkowy przepływ przez przewód prostoosiowy

Fig. 4. Unidirectional flow through a straight duct

$$\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) = -\Delta P, \quad \text{gdzie: } \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} = -\Delta P \quad (6)$$

z warunkiem brzegowym:

$$u_z|_L = 0. \quad (6a)$$

Jedną z metod rozwiązywania sformułowanego wyżej zagadnienia brzegowego dla równania Poissona (6) jest rozłożenie funkcji $u_z \equiv u_z(x, y)$ na część jednorodną $\bar{u}_z \equiv \bar{u}_z(x, y)$, która spełnia równanie Laplace'a oraz niejednorodną $\tilde{u}_z \equiv \tilde{u}_z(x, y)$, spełniającą równanie Poissona:

$$u_z = \bar{u}_z + \tilde{u}_z, \quad (7)$$

gdzie część jednorodna i niejednorodna spełniają odpowiednio równania:

$$\nabla^2 \bar{u}_z = 0 \quad ; \quad \bar{u}_z(x, y) \rightarrow \forall (x, y) \in \Lambda \cup L, \quad (7^1)$$

$$\nabla^2 \tilde{u}_z = -\Delta P \quad ; \quad \tilde{u}_z(x, y) \rightarrow \forall (x, y) \in \Lambda \cup L. \quad (7^2)$$

Niejednorodna część może zostać zapisana jako:

$$\tilde{u}_z = -\Delta P v, \quad (8)$$

przy czym funkcja $v \equiv v(x, y)$ jest dowolnie wybraną funkcją spełniającą równanie Poissona $\nabla^2 v = 1$, $v(x, y) \rightarrow \forall (x, y) \in \Lambda \cup L$ w obszarze (Λ).

Z uwagi na równość (7) warunek brzegowy (6a) przybiera następującą postać:

$$\bar{u}_z = -\tilde{u}_z = \Delta P v \quad ; \quad \forall (x, y) \in L, \quad (9)$$

3.2 Sformułowanie całkowego równania przepływu jednokierunkowego

Korzystając z drugiej tożsamości Greena, jednorodny składnik prędkości przepływu ($\bar{u}_z(\mathbf{p})$), spełniający równanie Laplace'a w obszarze (Λ) ograniczonym brzegiem (L) można opisać równaniem:

$$\bar{u}_z(\mathbf{p}) = - \int_L \frac{\partial \bar{u}_z(\mathbf{q})}{\partial n_{\mathbf{q}}} G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dL_{\mathbf{q}} + \Delta P \int_L v(\mathbf{q}) E(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dL_{\mathbf{q}} \quad (10)$$

$$\mathbf{p}, \mathbf{q} \in L$$

gdzie $\mathbf{p}(x_{\mathbf{p}}, y_{\mathbf{p}})$ i $\mathbf{q}(x_{\mathbf{q}}, y_{\mathbf{q}})$ są odpowiednio punktem ustalonym i punktem bieżącym całkowania, a funkcja Greena $G(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ i funkcja Neumanna $E(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ są rozwiązaniami podstawowymi równania Laplace'a:

$$G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{r_{\mathbf{p}\mathbf{q}}} \right), \quad r_{\mathbf{p}\mathbf{q}} = |\mathbf{p} - \mathbf{q}| = \sqrt{(\delta x_{\mathbf{p}\mathbf{q}})^2 + (\delta y_{\mathbf{p}\mathbf{q}})^2}; \quad (10^1)$$

$$E(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{\partial G(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\partial n_{\mathbf{q}}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta x_{\mathbf{p}\mathbf{q}} n_{y\mathbf{q}} + \delta y_{\mathbf{p}\mathbf{q}} n_{x\mathbf{q}}}{r_{\mathbf{p}\mathbf{q}}^2}, \quad (10^2)$$

gdzie: $\delta x_{\mathbf{p}\mathbf{q}} = (x_{\mathbf{p}} - x_{\mathbf{q}})$; $\delta y_{\mathbf{p}\mathbf{q}} = (y_{\mathbf{p}} - y_{\mathbf{q}})$, $\mathbf{n}_{\mathbf{q}} = [n_{\mathbf{q}}^x, n_{\mathbf{q}}^y] = \left[\frac{\delta y_{\mathbf{q}}}{\delta L_{\mathbf{q}}}, \frac{\delta x_{\mathbf{q}}}{\delta L_{\mathbf{q}}} \right]$, jest

wektorem normalnym do granicy (L) w punkcie $\mathbf{q}(x_{\mathbf{q}}, y_{\mathbf{q}})$.

Po podstawieniu zależności (9) do równania (10) i wydzieleniu wartości głównej z drugiej całki, po prawej stronie, w związku z właściwościami jądra całkowego $E(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ na granicy (L), gdy $\mathbf{p}(x_{\mathbf{p}}, y_{\mathbf{p}}) \equiv \mathbf{q}(x_{\mathbf{q}}, y_{\mathbf{q}})$, przy założeniu, że brzeg obszaru jest gładki, brzegowe równanie całkowe przyjmuje postać:

$$\int_L \bar{g}(\mathbf{q}) G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dL_{\mathbf{q}} = \Delta P \left[-\frac{1}{2} v(\mathbf{p}) + \int_L v(\mathbf{q}) E(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dL_{\mathbf{q}} \right], \quad (11)$$

gdzie:

$$\bar{g}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \bar{u}_z(\mathbf{q})}{\partial n_{\mathbf{q}}}. \quad (11^*)$$

Równanie (11) jest równaniem całkowym Fredholma pierwszego rodzaju względem gęstości $g(\mathbf{q})$ na brzegu obszaru. Całka po prawej stronie równania z uwagi na osobliwość funkcji $E(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ opisanej zależnością (10²) w punktach ($\mathbf{p} \equiv \mathbf{q}$) jest rozumiana w znaczeniu wartości głównej Cauchy'ego.

Po rozwiązaniu równania (11) wartości funkcji $\bar{u}_z(\mathbf{v})$ w punktach $\mathbf{v}(x_{\mathbf{v}}, y_{\mathbf{v}})$ wewnątrz obszaru (Λ) są wyznaczane z zależności:

$$\bar{u}_z(\mathbf{v}) = - \int_L \bar{g}(\mathbf{q}) G(\mathbf{v}, \mathbf{q}) dL_{\mathbf{q}} + \Delta P \int_L v(\mathbf{q}) E(\mathbf{v}, \mathbf{q}) dL_{\mathbf{q}} \quad (12)$$

$\mathbf{v} \in \Lambda ; \mathbf{q} \in L$

Natężenie przepływu objętościowego jednokierunkowego przepływu przez przewód o powierzchni przekroju poprzecznego (Λ) jest równe:

$$Q = \iint_{\Lambda} u_z(\mathbf{v}) d\Lambda_{\mathbf{v}}. \quad (13)$$

Podstawienie wyrażeń (7) i (8) jako funkcji podcałkowych do równania (13) i zastosowanie drugiej tożsamości Greena pozwala uzyskać wyrażenie opisujące natężenie przepływu przez prostoosiowy przewód o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego:

$$Q = \int_L \bar{u}_z(\mathbf{q}) \frac{\partial v(\mathbf{q})}{\partial n_{\mathbf{q}}} dL_{\mathbf{q}} - \Delta P \int_L v(\mathbf{q}) \frac{\partial \bar{u}_z(\mathbf{q})}{\partial n_{\mathbf{q}}} dL_{\mathbf{q}}. \quad (14)$$

Natężenie przepływu masowego jest iloczynem natężenia przepływu objętościowego opisanego przez powyższe wyrażenie i ciężaru właściwego płynu.

3.3 Rozwiązanie numeryczne

Najprostszym sposobem dyskretyzacji równania całkowego jest aproksymacja brzegu obszaru (L), będącego krzywą zamkniętą, J -elementowym zbiorem prostych odcinków z centralnymi punktami kolokacji, przy czym gęstość funkcji jest stała dla każdego z tych elementów.

Przybliżając brzeg (L) obszaru (Λ) układem liniowych elementów o stałym rozkładzie gęstości nieznannej funkcji w obrębie elementów, równanie całkowe (11) zostaje sprowadzone do J -elementowego systemu liniowych równań algebraicznych względem

funkcji $[g(\mathbf{q}_j)]_{j=1}^J$ w punktach $[\mathbf{q}_j]_{j=1}^J$ na brzegu obszaru:

$$\sum_{j=1}^J g(\mathbf{q}_j) G^*(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) = \Delta P \left[-\frac{1}{2} v(\mathbf{p}_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^J v(\mathbf{q}_j) E^*(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) \right], \quad (15)$$

Gdzie

$$G^*(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) = \frac{1}{2\pi} \int_{L_j} G(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) dL_j = \frac{1}{2\pi} \int_{L_j} \ln \left(\frac{1}{r_{\mathbf{p}_i \mathbf{q}_j}} \right) dL_j, \quad (15a)$$

$$E^*(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) = \frac{1}{2\pi} \int_{L_j} E(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) dL_j = \frac{1}{2\pi} \int_{L_j} \frac{\delta x_{\mathbf{p}_i \mathbf{q}_j} n_{y \mathbf{q}_j} + \delta y_{\mathbf{p}_i \mathbf{q}_j} n_{x \mathbf{q}_j}}{r_{\mathbf{p}_i \mathbf{q}_j}^2} dL_j, \quad (15b)$$

oraz:

$$v(\mathbf{q}_j) = \frac{r_{0j}^2}{4} = \frac{1}{4} \left[(\delta x_{0 \mathbf{q}_j})^2 + (\delta y_{0 \mathbf{q}_j})^2 \right]. \quad (15c)$$

Po określeniu rozkładu gęstości funkcji $[g(\mathbf{q}_j)]_{j=1}^J$ na brzegu obszaru, wartości funkcji

$[\bar{u}_z(\mathbf{v}_k)]_{k=1}^K$ w punktach $[\mathbf{v}_k]_{k=1}^K$ wewnątrz obszaru (Λ) wyznacza się z zależności:

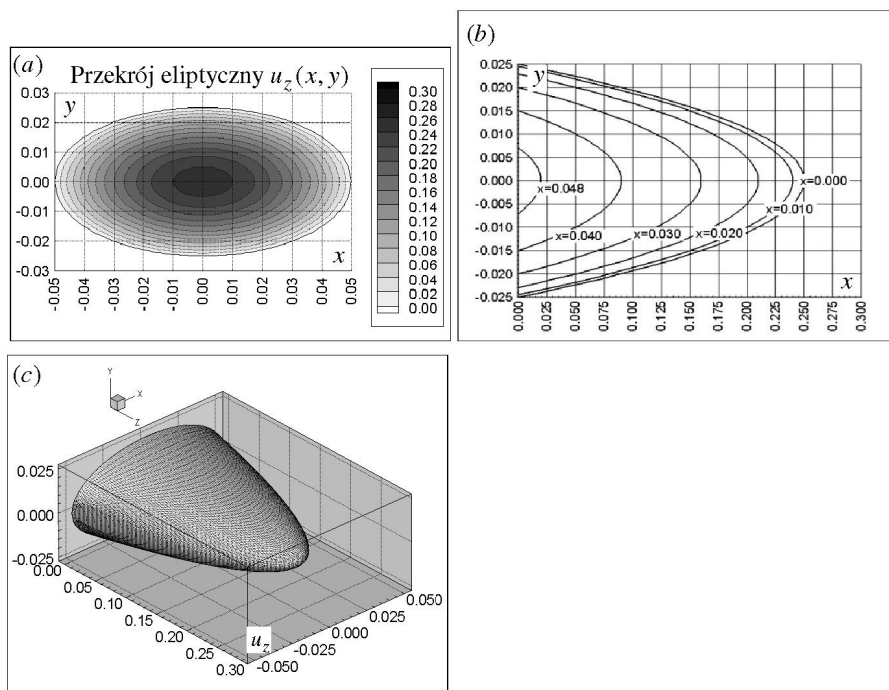
$$\bar{u}_z(\mathbf{v}_k) = \sum_{j=1}^J g(\mathbf{q}_j) G^*(\mathbf{v}_k, \mathbf{q}_j) = + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^J v(\mathbf{q}_j) E^*(\mathbf{v}_k, \mathbf{q}_j). \quad (16)$$

4 Pole prędkości w przewodach o przekroju niekołowym

Pole prędkości przepływu ustalane jest dla przepływu przez prostoosiowy przewód lub zamknięty kanał całkowicie wypełniony cieczą o gęstości $\rho = 1000.00 \text{ kg/m}^3$, lepkości $\mu = 1000.00 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (glikol etylenowy 20% H_2O w temperaturze 20°C) przy wymuszeniu $\Delta P = 1000.00 \text{ s}^{-1} \text{m}^{-1}$.

4.1 Przepływ przez kanał o eliptycznym przekroju poprzecznym

Pole prędkości przepływu wyznaczono dla przewodu eliptycznego o następujących wymiarach: $a=0,050\text{ m}$, $b=0,025\text{ m}$. Graficzną interpretację wyników obliczeń przedstawiono na rysunkach 5a - 5c.

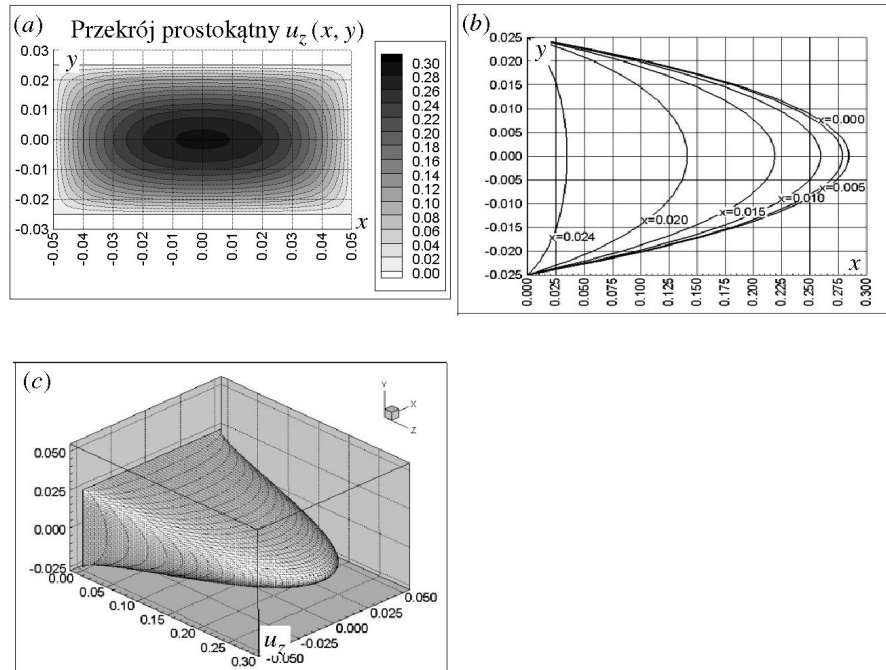


Rys. 5. Rozkład prędkości w przewodzie o przekroju eliptycznym: a) wykres izol linii pola prędkości; b) wykres prędkości w przekrojach: $x=const$; c) profil prędkości

Fig. 5. Velocity distribution in a straight pipe of elliptical cross-section: a) contour line chart of the velocity; b) velocity chart in the cross-sections: $x=const$; c) velocity profile

4.2 Przepływ przez kanał o prostokątnym przekroju poprzecznym

Pole prędkości przepływu wyznaczono dla przewodu prostokątnego o wymiarach krawędzi: $a=0,050\text{ m}$, $b=0,025\text{ m}$. Graficzną interpretację wyników obliczeń przedstawiono na rysunkach 6a - 6c.

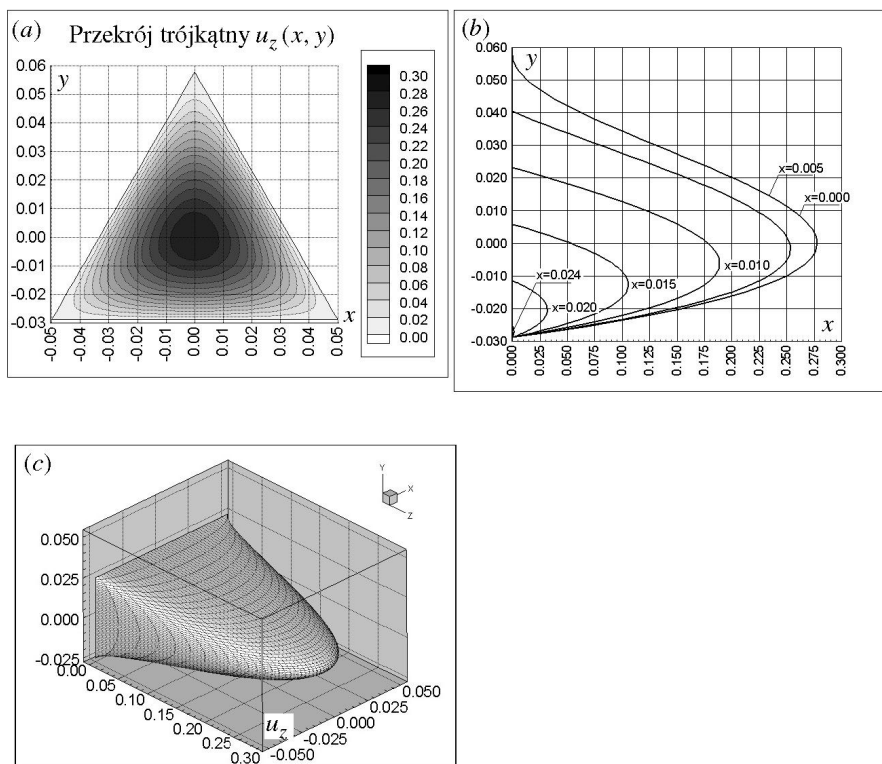


Rys. 6. Rozkład prędkości w kanale o przekroju prostokątnym: a) wykres izolinii pola prędkości; b) wykres prędkości w przekrojach: $x=const$; c) profil prędkości

Fig. 6. Velocity distribution in a straight duct of rectangular cross-section: a) contour line chart of the velocity; b) velocity chart in the cross-sections: $x=const$; c) velocity profile

4.3 Przepływ przez kanał o trójkątnym przekroju poprzecznym

Pole prędkości przepływu wyznaczono dla przewodu trójkątnego (równobocznego) o boku długości $a=0,050$ m. Graficzną interpretację wyników obliczeń przedstawiono na rysunkach 7a – 7c.



Rys. 7. Rozkład prędkości w kanale o przekroju trójkątnym: a) wykres izol linii pola prędkości; b) wykres prędkości w przekrojach: $x=const$; c) profil prędkości

Fig. 7. Velocity distribution in a straight duct of triangular cross-section: a) contour line chart of the velocity; b) velocity chart in the cross-sections: $x=const$; c) velocity profile

5 Wnioski

W opracowaniu przedstawiono klasyczny model obliczeń rozkładu temperatury w płycie absorbera oraz w układzie przepływowym w płaskim kolektorze słonecznym, a następnie wyznaczono sprawność energetyczną urządzenia. Przedstawiony model opisuje zjawisko przepływu i konwekcyjnej wymiany ciepła w układach przewodów o przekroju kołowym. Wyznaczanie pól prędkości i pól temperatury w układach przepływowych kolektorów cieczowych jest podstawowym elementem termicznej i przepływowej optymalizacji kolektorów słonecznych.

Rozwiązania dokonano przy użyciu metody elementów brzegowych (MEB), która umożliwia modelowanie i wyznaczanie przepływów w układach przepływowych kolektorów słonecznych w sytuacji, gdy kształty przekroju poprzecznego są różne od kołowego. Zaprezentowane podejście daje możliwość określania pola prędkości i natężenia przepływu w przypadku przepływu laminarnego cieczy lepkiej

w przewodach prostoosiowych i zamkniętych kanałach o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego.

Literatura

1. Chwieduk D.: *Energetyka słoneczna budynku*, Wyd. Arkady, 2011
2. Zondag H. A.: Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 891–959, 2008
3. Zhang X., Xudong Zhao X., Smith S., Xu J., Yuc X.: Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, 2012
4. Charalambous P.G., Maidment G.G., Kalogirou S.A., Yiakoumetti K.: Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, 2007
5. Alvarez A., Cabeza O., M.C. Muñoz M.C., Varela L.M.: Experimental and numerical investigation of a flat-plate solar collector, *Energy*, Vol. 35, 2010
6. Batchelor G.K.: *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge Univ. Press, 1967
7. Pozrikidis C.: *Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992
8. Brebbia K., Telles, J.C.F., Wrobel, L.C.: *Boundary Element Techniques. Theory and Applications in Engineering*. Springer-Verlag, 1984

Streszczenie

Przedmiotem opracowania jest zagadnienie technicznej optymalizacji płaskich rurowych kolektorów słonecznych. Przedstawiono podstawowe elementy energetycznej analizy parametrów użytkowych kolektorów słonecznych opisane równaniem Hottela-Whilliera. Zwrócono uwagę na konieczność szczegółowej analizy przepływu cieczy przez elementy przepływowe kolektorów rurowych, w szczególności w układach, w których przewody mają kształt przekroju poprzecznego różny od przekroju kołowego, i na potrzebę dokładnego matematycznego opisu złożonych zjawisk przejmowania ciepła. Pokazano, że zaawansowana analiza zjawisk przepływowych i cieplnych w złożonych układach wymiany ciepła w przepływie, jakimi są rurowe, cieczowe kolektory słoneczne, umożliwia techniczną racjonalizację rozwiązań technicznych tych urządzeń.

Słowa kluczowe: płaski kolektor słoneczny, optymalny przepływ masowy, transport ciepła

Modeling of heat and mass transport phenomena in flat plate solar collectors

Summary

The subject of this case study is an issue of optimisation of flat tube solar collectors. Basic elements of energy analysis of performance parameters described by Hottel-Whillier equation are presented in the article. It is considered to be crucial to precisely analyse fluid flow through flow elements in evacuated tube collectors. It is especially important in the case of systems with channels of cross-sections shapes different from circular and for the use of detailed mathematical description of complex film conduction phenomena. It is presented that the advanced analysis of the flow and thermal phenomena in complex heat transfer systems, represented by evacuated tube collectors, enables engineering rationalisation of technical solutions for these devices.

Keywords: flat plate solar collector, heat transfer, fluid flow in pipes, optimum mass flow rate boundary equation method

Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego Politechniki Białostockiej S/WBiŚ,5/11