UNIWERSYTET ZIELONOGÓRSKI • ZESZYTY NAUKOWE NR 153

Nr 33 INŻYNIERIA ŚRODOWISKA 2014

TOMASZ TELESZEWSKI*

SYMULACJA KONWEKCJI WYMUSZONEJ W PRZEWODACH PROSTOOSIOWYCH PRZY PRZEPŁYWIE LAMINARNYM METODĄ ELEMENTÓW BRZEGOWYCH

S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono algorytm symulacji konwekcji wymuszonej MEB przy przepływie laminarnym w przewodach prostoosiowych niezależnie od kształtu poprzecznego przewodu. Weryfikacja algorytmu została wykonana poprzez porównanie rezultatów MEB z rozwiązaniem analitycznym. W publikacji wyznaczono zależność liczby Nusselta od liczby boków w przewodach o przekroju wielokąta foremnego.

Słowa kluczowe: konwekcja wymuszona, przewody prostoosiowe, liczba Nusselta, metoda elementów brzegowych (MEB)

WPROWADZENIE

W licznych zagadnieniach cieplno-przepływowych w inżynierii środowiska wykorzystuje się do obliczeń metody numeryczne, związanie z przejmowaniem ciepła przy wymuszonym ruchu płynu w przewodach prostoosiowych [Clark 2000, Kakac i Liu 2002]. Rozwiązania analityczne pól temperatur konwekcji wymuszonej w przewodach prostoliniowych znane są tylko dla najprostszych geometrii [Shah i London 1978, Ray i Misra 2010], natomiast w przypadku skomplikowanych kształtów przekrojów przewodów stosuje się najczęściej metody siatkowe np. metoda różnic skończonych [Sadasivam i in. 1999].

Równania różniczkowe opisujące przepływ płynu newtonowskiego i nieściśliwego wynikają z zasady zachowania masy (1), momentu pędu (2) i energii (3) [Batchelor 2000, White 2005]:

$$div\,\overline{\mathrm{v}} = 0 \tag{1}$$

* Politechnika Białostocka; Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; Katedra Ciepłownictwa

$$\rho \frac{D\overline{\mathrm{v}}}{Dt} = -\nabla \overline{\wp} + \mu \nabla^2 \overline{\mathrm{v}} \quad ; \quad \overline{\wp} = \nabla p - \rho \overline{g} \tag{2}$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T + \mu \tau_{ij} \frac{\partial \mathrm{v}_i}{\partial x_i} \tag{3}$$

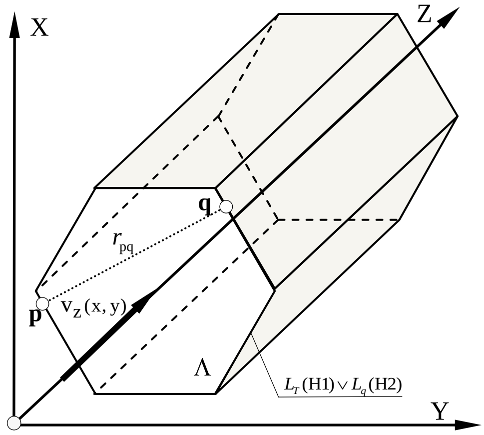
gdzie: v_i oznacza prędkość przepływu, p ciśnienie, g jest to przyśpieszenie ziemskie, ρ jest gęstością cieczy, μ jest współczynnikiem lepkości dynamicznej, C_P jest ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu, λ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła, τ_{ij} jest lepkim tensorem naprężeń, natomiast i,j są to indeksy współrzędnych kartezjańskich.

Zakładając w pełni rozwinięty przepływ laminarny, składowe prędkości wzdłuż osi współrzędnych x i y równe są zeru. Równanie (3) ulega uproszczeniu przy założeniu stałego wzdłuż osi przewodu, a także pominięciu dyssypacji lepkości. W wyniku czego równania (1-3) przybierają postać (rys.1):

$$\frac{\partial \mathrm{v}_z}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

$$\mu \left(\frac{\partial^2 \mathrm{v}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{v}_z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial p}{\partial z} \quad ; \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \tag{5}$$

$$\lambda \nabla^2 T = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial z} \mathrm{v}_z \tag{6}$$



Rys. 1. Szkic obrazujący zagadnienia brzegowe w przepływach przez kanały prostoliniowe
Fig. 1. Sketch to consideration of boundary conditions for duct flow

Następnie przyjęto dekompozycje prędkości na składową przepływu niezakłóconego v_∞ oraz przepływu wzbudzonego v_w ściankami przewodu, w wyniku czego równanie (5) zostanie zredukowane do równania Laplace'a:

$$\frac{\partial^2 \mathrm{v}_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{v}_w}{\partial y^2} = 0 \quad ; \quad \mathrm{v}_w(\mathbf{q}) = -\mathrm{v}_\infty \quad ; \quad \mathbf{q} \in L \tag{7}$$

gdzie:

$$\mathrm{v}_\infty = \frac{1}{4}\wp(x_q^2 + y_q^2) \quad ; \quad \wp = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} < 0 \tag{7a}$$

Ostatecznie prędkość w przekroju kanału wyznacza się z zależności:

$$\mathrm{v}_z = \mathrm{v}_\infty + \mathrm{v}_w \tag{8}$$

Schemat programu obliczeniowego składa się z dwóch części. W pierwszej części rozwiązywane jest równanie (7) i zależność (8), z której wyznacza się pole prędkości v_z w obszarze Λ, jest ono warunkiem dla równania (6). Przykłady zastosowania pierwszej części algorytmu MEB do określania wielkości jednoliczbowych, które opisują izotermiczne przepływy laminarne w przewodach prostoosiowych zostały przedstawione w pracach [Teleszewski i Sorko 2012, Teleszewski 2012]. W drugiej części programu z równania (6) wyznaczane jest pole temperatury na podstawie której wyznaczana jest liczba Nusselta Nu. W pracy przyjęto dwa warunki na obwodzie przewodu: warunek Dirichleta w postaci zadanej temperatury na konturze przekroju przewodu, oznaczony jako H1 i warunek Neumanna, czyli zadany stały strumień, oznaczony jako H2.

W celu wyznaczenia pól temperatur konwekcji wymuszonej w przepływie laminarnym przez przewody prostoosiowe napisano autorski program obliczeniowy FORCED_CONVECTIONinDUCT w języku Fortran.

BRZEGOWE RÓWNANIA CAŁKOWE OPISUJĄCE KONWEKCJE WYMUSZONĄ W PRZEPŁYWIE LAMINARNYM PRZEZ PRZEWODY PROSTOOSIOWE

Rozwiązaniem równania różniczkowego (7) przy założeniu podziału brzegu L zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara jest następujące równanie całkowe [Brebbia i in. 1984, Pozrikidis 1992, Teleszewski i Sorko 2011]:

$$\frac{1}{2}\mathrm{v}_w(\mathbf{p}) + \int_{(L)} g_w(\mathbf{q}) K(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_q = \int_{(L)} \mathrm{v}_w(\mathbf{q}) E(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_q \tag{9}$$

gdzie:

$$K(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{1}{r_{\mathbf{pq}}}\right) \quad ; \quad r_{\mathbf{pq}} = |\mathbf{p}-\mathbf{q}| \quad ; \quad (\mathbf{p}) \in L\,,\ (\mathbf{q}) \in L \tag{9a}$$

$$E(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi}\frac{(x_{\mathbf{p}} - x_{\mathbf{q}})n_x + (y_{\mathbf{p}} - y_{\mathbf{q}})n_y}{r_{\mathbf{pq}}^2} \quad ; \quad (\mathbf{p}) \in L\,,\, (\mathbf{q}) \in L$$

$$\left[n_x, n_y\right] = \left[\frac{\delta y_{\mathbf{q}}}{\delta L_{\mathbf{q}}}, -\frac{\delta x_{\mathbf{q}}}{\delta L_{\mathbf{q}}}\right] \tag{9b}$$

gdzie: n_x oraz n_y są to wersory normalnej do brzegu (L).

Po wyznaczeniu gęstości $g_w(\mathbf{q})$ na linii brzegowej (L), prędkość v_z w dowolnym punkcie obszaru (Λ) wyznacza się z zależności:

$$\mathrm{v}_z(\mathbf{p}) = -\int_{(L)} g_w(\mathbf{q}) K(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_q + \int_{(L)} \mathrm{v}_w(\mathbf{q}) E(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_q + \mathrm{v}_\infty(\mathbf{p}) \tag{10}$$

$$(\mathbf{p}) \in \Lambda\,;\, (\mathbf{q}) \in L$$

Zagadnienie brzegowe dla równania różniczkowego (6) formułuje się w postaci złożonego warunku brzegowego Dirichleta i Neumanna zakładającego znane wartości temperatury $\tilde{T}(\mathbf{q})$ (H1) na części brzegu L_T ($\mathbf{q} \in L_T$) i znane wartości strumienia ciepła $\tilde{q}(\mathbf{q})$ (H2) na części brzegu L_q ($\mathbf{q} \in L_q$) (rys. 1). Wyznaczone pole $v_z(\mathbf{p})$ w obszarze (Λ) uwzględnia się w równaniu (6), którego rozwiązaniem jest następujące równanie całkowe:

$$-\chi(\mathbf{p})T(\mathbf{p}) + \int_{(L_q)} q(\mathbf{q})\mathbf{K}(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_q + \int_{(L_T)} T(\mathbf{q})\mathbf{E}(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_T =$$

$$= -\int_{(L_T)} \tilde{q}(\mathbf{q})\mathbf{K}(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_T - \int_{(L_q)} \tilde{T}(\mathbf{q})\mathbf{E}(\mathbf{p},\mathbf{q}) dL_q + \rho c_p \iint_{\Lambda} \mathrm{v}_z(\mathbf{w}) \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{K}(\mathbf{w},\mathbf{q}) d\Lambda, \tag{11}$$

$$(\mathbf{p}), (\mathbf{q}) \in L\,;\, (\mathbf{w}) \in \Lambda$$

gdzie dla brzegu gładkiego $\chi(\mathbf{p})$ =1/2 oraz:

$$\mathbf{K}(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi\lambda}\ln\left(\frac{1}{r_{\mathbf{pq}}}\right) \quad ; \quad r_{\mathbf{pq}} = \sqrt{(x_{\mathbf{p}} - x_{\mathbf{q}})^2 + (y_{\mathbf{p}} - y_{\mathbf{q}})^2}\,, \tag{11a}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi}\frac{(x_{\mathbf{p}} - x_{\mathbf{q}})n_x + (y_{\mathbf{p}} - y_{\mathbf{q}})n_y}{r_{\mathbf{pq}}^2}\,, \tag{11b}$$

$$\mathbf{K}(\mathbf{w},\mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi\lambda}\ln\left(\frac{1}{r_{\mathbf{wq}}}\right) \quad ; \quad r_{\mathbf{wq}} = \sqrt{(x_{\mathbf{w}} - x_{\mathbf{q}})^2 + (y_{\mathbf{w}} - y_{\mathbf{q}})^2}\,. \tag{11c}$$

Po wyznaczeniu T(**p**) oraz q(**p**) temperaturę w dowolnym punkcie ($p \in \Lambda$) rozpatrywanego obszaru (Λ) wyznacza się ze związku całkowego:

$$T(\mathbf{p}) = \int_{(L)} T(\mathbf{q})\mathbf{E}(\mathbf{p},\mathbf{q})\, dL_q + \int_{(L)} q(\mathbf{q})\mathbf{K}(\mathbf{p},\mathbf{q})\, dL_q - \\ - \rho c_p \iint_{\Lambda} \mathrm{v}_z(\mathbf{p}) \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{K}(\mathbf{p},\mathbf{q}) d\Lambda, \\ (\mathbf{q}) \in L\, ;\, (\mathbf{p}) \in \Lambda \tag{12}$$

WERYFIKACJA METODY MEB

W celu określenia błędu metody MEB porównano rezultaty obliczeń numerycznych z rozwiązaniem analitycznym. Rozwiązanie teoretyczne pola temperatury w przewodzie okrągłym przy założeniu stałego osiowego strumienia ciepła i stałej temperatury obwodowej, opisane jest następującym wzorem [White 2005]:

$$T_{TEO}(r) = T_S - \frac{\rho C_P \mathrm{v}_{sr} R^2}{8\lambda} \frac{\partial T_S}{\partial x} \left(3 - \frac{4r^2}{R^2} + \frac{r^4}{R^4} \right) \\ \mathrm{v}_{sr} = \frac{R^2}{8\mu} \frac{dp}{dz} \quad ; \quad \mathrm{Re} = \frac{\mathrm{v}_{sr} 2R}{\nu} \tag{13}$$

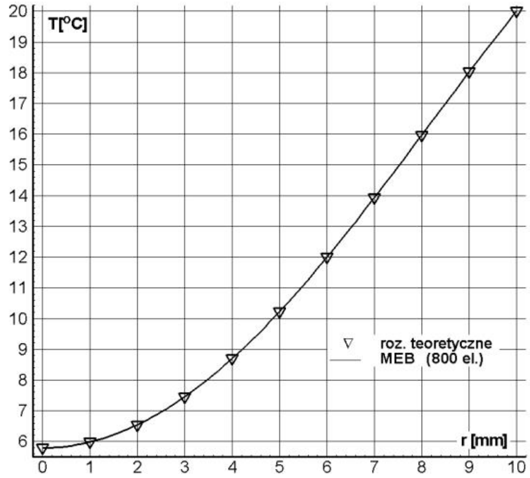
gdzie: v_{sr} jest to prędkość średnia w przewodzie kołowym, natomiast R=0,01[m] oznacza promień przewodu, ν jest współczynnikiem lepkości kinematycznej, Re to liczba Reynoldsa, T_s=20,0°C jest zadaną temperaturą ścianki przewodu, $\partial T_S / \partial x$ =1,0 jest stałym osiowym gradientem temperatury.

Do obliczeń przyjęto przepływ glikolu etylenowego o parametrach: ρ =1115,6 kg/m^3, ν =0,000019 m^2/s, C_P=2403,0 J/(kgK), λ =0,2705 W/(mK)
Względne błędy obliczeń MEB poszczególnych temperatur wyznaczono według formuły:

$$\delta T_{\mathrm{MEB}} = \left| \frac{T_{\mathrm{TEO}} - T_{MEB}}{T_{\mathrm{TEO}}} \right| \cdot 100\% \tag{14}$$

gdzie: T_{TEO} jest to rozwiązanie teoretyczne (13), natomiast T_{MEB} jest rozwiązaniem metody elementów brzegowych.

Maksymalny błąd metody elementów brzegowych nie przekracza wartości 0,05% w przypadku brzegu L składającego się z 400 elementów i 0,025% w przypadku brzegu zbudowanego z 800 elementów. Na rysunku 2 przedstawiono graficzne porównanie rezultatów numerycznych MEB z rozwiązaniem teoretycznym (13).



Rys. 2. Porównanie rezultatów obliczeń MEB z rozwiązaniem teoretycznym (13)
Fig. 2. Compare BEM results with theoretical solution (13)

PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

Poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy wykorzystania metody elementów brzegowych do wyznaczenia zależności liczby Nusselta Nu w funkcji liczby boków n przekroju poprzecznego przewodów w kształcie wielokątów foremnych. Liczba Nusselta została wyznaczona z następującego wzoru:

$$Nu = \frac{q_w D_h}{\lambda\left(T_s - T_m\right)} \tag{15}$$

$$D_h = \frac{4\Lambda}{L} \quad ; \quad T_m = \frac{1}{\Lambda \mathrm{v}_{sr}} \int_{\Lambda} \mathrm{v} T d\Lambda \quad ; \quad \mathrm{v}_{sr} = \frac{1}{\Lambda} \int_{\Lambda} \mathrm{v} d\Lambda \tag{15a}$$

gdzie: D_h jest średnicą hydrauliczną, natomiast T_m jest średnią temperaturą masową płynu.

W pracy wykonano szereg symulacji dla przekrojów poprzecznych przewodów o kształcie wielokąta foremnego w zakresie liczby boków n od 3 do 30 oraz o kształcie okręgu. Po określeniu liczb Nusselta dla każdego kształtu przekroju przewodu, stosując aproksymację wyników Nu dla warunku H1 i H2 otrzymano następujące wzory opisujące zależność liczby Nusselta od liczby boków n przekroju poprzecznego przewodu o przekroju wielokąta foremnego:

$$Nu_{H1[MEB]} = 4.364 - \frac{0.008}{n} - \frac{14.525}{n^2} + \frac{9.819}{n^3} \tag{16}$$

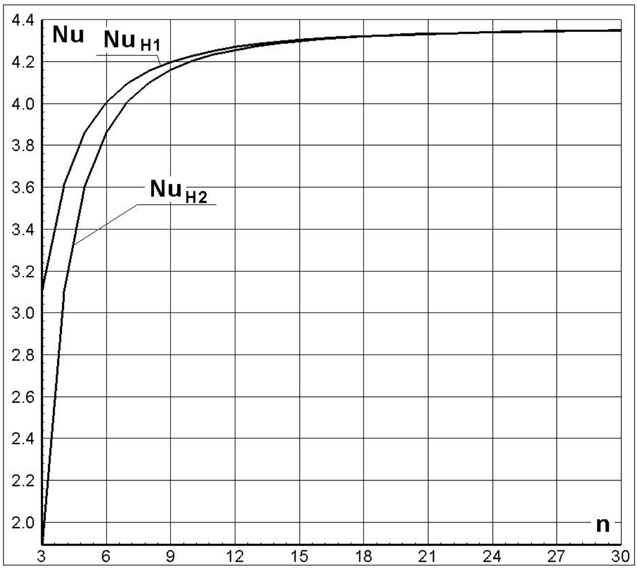
oraz

$$Nu_{H2[MEB]} = 4.364 + \frac{0.159}{n} - \frac{18.115}{n^2} + \frac{18.877}{n^3} - \frac{192.554}{n^4} + \frac{283.3}{n^5} \tag{17}$$

Rezultaty obliczeń MEB zostały porównane ze znanymi rezultatami obliczeń pracy [Cheng 1966, 1969] w tabeli 1. Błędy $\delta Nu_{\mathrm{H1[MEB]}}$ i $\delta Nu_{\mathrm{H2[MEB]}}$ zostały wyznaczone ze wzoru:

$$\delta Nu_{\mathrm{Hi[MEB]}} = \left| \frac{Nu_{\mathrm{Hi[Cheng]}} - Nu_{\mathrm{Hi}[MEB]}}{Nu_{\mathrm{Hi[Cheng]}}} \right| \cdot 100\% \quad ; \quad i = 1,2 \tag{18}$$

Na rysunku 3 wykreślono zależności liczby Nu w funkcji liczby boków wielokąta foremnego przekroju kanału dla warunku H1 i H2.



Rys. 3. Wartości liczb Nusselta Nu_{H1} i Nu_{H2} w funkcji liczby ścianek przewodu o przekroju wielokąta foremnego w laminarnym przepływie przez przewód, rozwiązanie (16-17)
Fig. 3. Regular (n-sided) polygonal ducts: Nu_{H1} and Nu_{H2}, solutions (16-17) for fully developed laminar flow

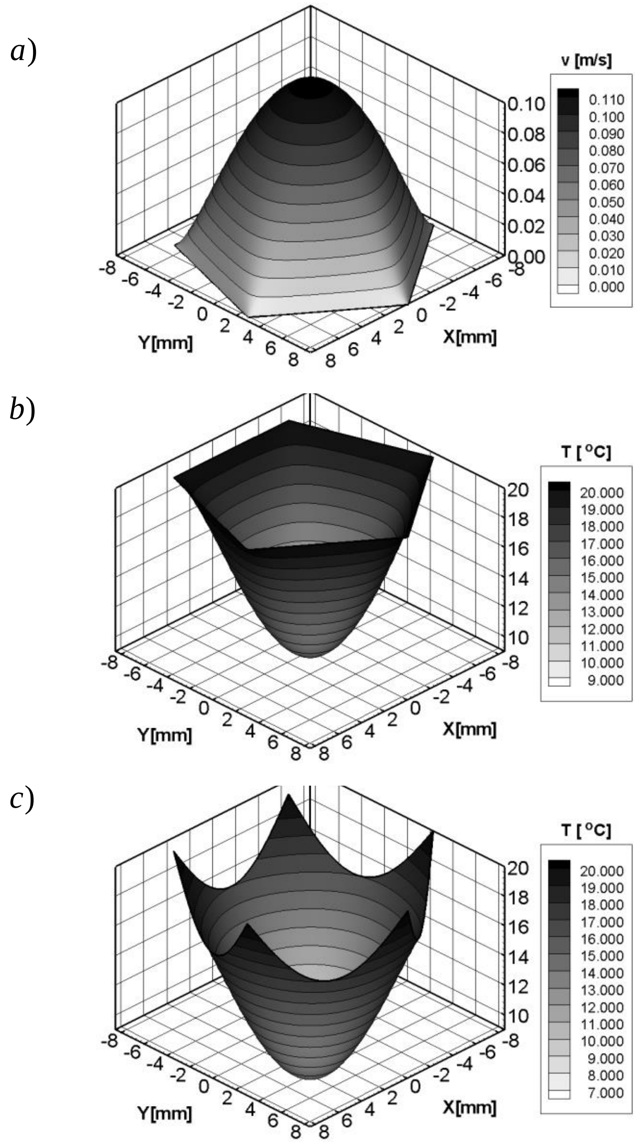
Tab. 1. Porównanie wyznaczonej zależności liczby Nusselta Nu_{H1}(16) i Nu_{H2} (17) w funkcji liczby ścian wielokąta foremnego tworzącego przekrój przewodu prostoosiowego ze znanym rozwiązaniami [Cheng 1966, 1969]
Tab. 1. Compare Nusselt Nu_{H1} (16) i Nu_{H2} (17) results with Cheng solutions [Cheng 1966, 1969]

n	Nu_{H1} [Cheng]	Nu_{H1} [MEB]	δNu_{H1} [MEB]	Nu_{H2} [Cheng]	Nu_{H2} [MEB]	δNu_{H2} [MEB]
-	-	-	%	-	-	%
3	3,111	3,111	0,000	1,892	1,892	0,000
4	3,608	3,608	0,000	3,091	3,091	0,000
5	3,859	3,860	0,026	3,605	3,605	0,000
6	4,002	4,005	0,075	3,862	3,863	0,026
7	4,102	4,095	0,171	4,009	4,009	0,000
8	4,153	4,155	0,048	4,100	4,099	0,024
9	4,196	4,197	0,024	4,159	4,159	0,000
10	4,227	4,228	0,024	4,201	4,201	0,000
11	-	4,251	-	-	4,232	-
12	-	4,268	-	-	4,254	-
13	-	4,282	-	-	4,272	-
14	-	4,293	-	-	4,285	-
15	-	4,302	-	-	4,296	-
20	4,329	4,329	0,000	4,328	4,328	0,000
25	-	4,341	-	-	4,342	-
30	-	4,348	-	-	4,350	-
10^{50}	4,364	4,364	0,000	4,364	4,364	0,000

Wzory (16) i (17) mogą być użyte w aplikacjach do prognozowania liczby Nussleta w kanałach o przekroju wielokąta foremnego z maksymalnym błędem 0,20% dla Nu_{H1} i 0,03% dla Nu_{H2}.

Poniżej przedstawiono graficzne rezultaty obliczeń MEB dla przewodu pięciokątnego przez który przepływa glikol etylenowy o parametrach
ρ =1115,6 kg/m^3, ν =0,000019 m^2/s, C_P=2403,0 J/(kgK), λ =0,2705 W/(mK). Obliczenia wykonano dla warunku H1, w którym założono temperaturę na ściance kanału T_s=20^{o}C oraz dla warunku H2 przy założeniu stałej gęstości strumienia ciepła q_w=512.535 W/m^2. Symulacje przeprowadzono dla liczby Re=40.

Na rysunku 4a przedstawiono pole prędkości w kanale pięciokątnym. Rysunek 4b przedstawia pole temperatury dla przyjętego warunku H1, natomiast rysunek 4c pole temperatury dla warunku H2.



Rys. 4. Przepływ przewodzie pięciokątnym (glikol etylenowy, Re=40) – rezultaty obliczeń MEB: a) pole prędkości, b) pole temperatury (warunek H1, Nu_{H1}=3,860), c) pole temperatury (warunek H2, Nu_{H2}=3,605)
Fig. 4. Flow in pentagon duct (ethylene glycol, Re=40) - BEM solution:
a) velocity field, b) temperature field (H1 condition's, Nu_{H1}=3,860), c) temperature field (H2 condition's, Nu_{H2}=3,605)

Wnioski

Przedstawiony w pracy algorytm metody elementów brzegowych stanowi efektywne narzędzie do badań konwekcji wymuszonej płynu w przewodach prostoosiowych niezależnie od kształtu przekroju przewodu. Główną zaletą prezentowanej metody jest eliminacja pracochłonnych przestrzennych siatek stosowanych w klasycznych siatkowych metodach numerycznych. Prezentowana metoda MEB charakteryzuje się dużą dokładnością.

W publikacji przedstawiono praktyczny przykład zastosowania metody do określenia zależności liczby Nussleta dla dwóch warunków H1 i H2 od liczby ścian tworzących przewód prostoosiowy o przekroju wielokąta foremnego.

Prezentowana metoda może być również stosowana w przepływach w mikrokanałach, tam gdzie przepływy te są zgodne z makroprzepływami.

Opracowanie zrealizowano w ramach pracy statutowej
nr S/WBiIŚ/4/2014 Katedry Ciepłownictwa Politechniki Białostockiej

Literatura

1. CLARK M. M.; 2000. Transport Modeling for Environmental Engineers and Scientists Second Edition. John Wiley&Sons.
2. KAKAC S., LIU H.; 2002. Heat exchangers selection, rating, and thermal design, Second Edition, CRC Press 2002.
3. SHAH R.K., LONDON A.L.; 1978. Laminar Flow Forced Convection in Ducts A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data. Academic Press
4. RAY S., MISRA D.; 2010. Laminar fully developed flow through square and equilateral triangular ducts with rounded corners subjected to H1 and H2 boundary conditions. International Journal of Thermal Sciences 49, 1763-1775
5. SADASIVAM R., MANGLIK R.M, JOG M. A.; 1999. Fully developed forced convection through trapezoidal and hexagonal ducts. International Journal of Heat and Mass Transfer 42, 4321-4331
6. BATCHELOR G.K.; 2000. An introduction to fluid dynamics. Cambridge University Press
7. WHITE F.; 2005. Viscous Fluid Flow. McGraw-Hill Mechanical Eng.
8. TELESZEWSKI T.J., SORKO S.A.; 2012. Wyznaczanie współczynnika Boussinesqa w przepływie laminarnym w prostoosiowych przewodach o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego metodą elementów brzegowych. Symulacja w Badaniach i Rozwoju, Vol. 3, No. 2, 115-128

9. TELESZEWSKI T.J.; 2012. Algorytm wyznaczania współczynnika Coriolisa przepływów laminarnych w kanałach prostokątnych metodą elementów brzegowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 283 Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 59, Nr 4, 131-141
10. BREBBIA C.A., TELLES J.F.C., WROBEL L.C.; 1984. Boundary element Techniques Theory and Applications in Engineering. Springer-Verlag. NY.
11. POZRIKIDIS C.; 1992. Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow. Cambridge University Press
12. TELESZEWSKI T.J., SORKO S.A.; 2011. Zastosowanie metody elementów brzegowych do wyznaczania jednokierunkowego przepływu w przewodach prostoosiowych o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego. Acta Mechanica et Automatica Vol.5, Nr 3, 124-132
13. CHENG K.C.; 1966. Laminar flow and heat transfer characteristics in regular polygonal ducts. Proc. Int. Heat Transfer Conf., 3rd, AIChE, New York, 64-76
14. CHENG K.C.; 1969. Laminar forced convection in regular polygonal ducts with uniform peripheral heat flux. J. Heat Transfer 91, 156-157

BOUNDARY ELEMENTS METHOD SIMULATION OF LAMINAR FLOW FORCED CONVECTION IN DUCT

Summary

The paper presents the numerical algorithm Boundary Element Method to simulation modelling forced convection in a duct. The efficiency and the credibility of proposed algorithm were verified by numerical tests in theoretical solution. A numerical examples are presented fully developed forced convection through pentagon duct. In this study is proposed for determining the Nusselt number in regular polygonal channels.

Key words: forced convection, flow in ducts, Nusselt number, boundary element method (BEM)