



Numeryczne testy założeń zmodyfikowanej metody monotonicznego wymuszenia cieplnego

JERZY SYPEK, KAROL REĆKO, ANDRZEJ JAROSŁAW PANAS

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Instytut Techniki Lotniczej,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
j.sypek@mon.gov.pl, karolrecko@gmail.com, Andrzej.Panas@wat.edu.pl

Streszczenie. Praca dotyczy wyznaczenia i porównania parametrów konwekcyjnej wymiany ciepła dla bryły o regularnym kształcie przy jej wymuszonym opływie płynem nieściśliwym, dla dwóch przypadków płynów o różnych właściwościach fizycznych. W niniejszym przypadku przedstawiono i poddano analizie wyniki obliczeń numerycznych zagadnienia stacjonarnego opływu walca i prostopadłościanu. Analizowano modele numeryczne przejmowania ciepła w dwóch cieczach: wodzie i etanolu. Badano trzy różne orientacje obiektu wobec napływającego płynu. Obliczenia przeprowadzono dla wybranych prędkości płynu z zakresu $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ przy użyciu programu ANSYS. Wyznaczone wartości współczynników przejmowania ciepła, charakteryzujące konwekcyjną wymianę ciepła pomiędzy płynem a ciałem stałym, odniesiono do wartości uzyskanych na podstawie zależności kryterialnych. Wyniki wykonanych badań i analiz stanowią dopełnienie studiów dotyczących uwarunkowania metrologicznego zmodyfikowanej metody monotonicznego wymuszenia cieplnego, stosowanej do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej — w danym przypadku dla próbki walcowej i prostopadłościennej, przy skokowej zmianie temperatury powierzchni próbki. Ponieważ metodami symulacji numerycznych objęto również przypadki nieobjęte zależnościami kryterialnymi, uzyskano w rezultacie dodatkowe potwierdzenie poprawności proponowanej metody badań.

Słowa kluczowe: dyfuzyjność cieplna, współczynnik wyrównywania temperatury, przejmowanie ciepła przy wymuszonym opływie ciał, zmodyfikowana metoda monotonicznego wymuszenia cieplnego, numeryczne modelowanie przepływów

DOI: 10.5604/12345865.1131456

1. Wprowadzenie

Dyfuzyjność cieplna jest jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących właściwości cieplno-fizyczne materiałów. Wiąże ona ze sobą inne parametry,

takie jak współczynnik przewodzenia ciepła, gęstość i ciepło właściwe. Ze względu na sposób zdefiniowania tej wielkości, zawiera ona w sobie złożoną informację o możliwości przewodzenia ciepła z uwzględnieniem zdolności do akumulacji lub uwalniania ciepła przez przewodnik, którego pole temperatury zmienia się w funkcji czasu. Innymi słowy, będąc proporcją właściwości transportowych energii do właściwości akumulacyjnych, wielkość ta charakteryzuje przebieg procesu wyrównywania się temperatury zachodzący na skutek procesu fizycznego przewodzenia ciepła. Dyfuzyjność cieplna jest zatem kluczowym parametrem charakteryzującym przewodzenie ciepła w czasie procesów nieustalonych w czasie. Wielkość ta ma więc istotne znaczenie przy projektowaniu, modelowaniu procesów czy też analizie warunków eksploatacji wszędzie tam, gdzie procesy cieplne odgrywają istotną rolę i muszą być brane pod uwagę.

Opracowano wiele różnorodnych metod pomiaru tej wielkości, które mogą być systematyzowane przy uwzględnieniu różnych kryteriów. Biorąc pod uwagę charakter wymuszenia cieplnego, powodującego zaburzenie pola temperatury w próbce badanego materiału, jednymi z najmniej problematycznych w realizacji technicznej są metody monotonicznego wymuszenia cieplnego, a wśród nich metoda wymuszenia skokowego. Jej podstawy są osadzone w teorii uporządkowanej wymiany ciepła [3, 11]. Wykonanie pomiaru metodą wymuszenia skokowego wymaga wymuszenia skokowej zmiany temperatury powierzchni badanej próbki. W praktyce można to zapewnić na wiele różnych sposobów, włączając w to techniki radiacyjne czy bombardowanie powierzchni wiązką elektronów (por. [11]). Najczęściej jednak realizacja pomiaru polega na umieszczeniu próbki w płynie o temperaturze różniącej się od jej temperatury początkowej. Przy takim sposobie wymuszenia pojawia się problem dokładności odwzorowania skoku temperatury, który oryginalnie jest opisywany jednorodnym warunkiem brzegowym pierwszego rodzaju [9], warunkiem brzegowym trzeciego rodzaju opisującym przejmowanie ciepła od płynu na powierzchni próbki [1, 9]. Wiarygodność i dokładność pomiaru zależy w takim przypadku od intensywności konwekcyjnej wymiany ciepła, przy czym im bardziej intensywna jest ta wymiana, tym mniejsze są błędy pomiarowe. Możliwe jest oczywiście stosowanie poprawek uwzględniających opory cieplne przejmowania w zależnościach ogólnych, ale i w tym przypadku istnieje pewna granica poprawności badań wyznaczona określoną wartością liczby Biota Bi :

$$Bi = \frac{\alpha d}{\lambda_s}, \quad (1)$$

gdzie: α jest współczynnikiem przejmowania ciepła pomiędzy płynem i próbką badanego ciała stałego, d — wymiarem charakterystycznym tej próbki, natomiast λ_s oznacza przewodność cieplną badanej próbki ciała stałego.

Ze względu jednak na trudności w określeniu rzeczywistych wartości czy to współczynnika przejmowania ciepła, czy to liczby Biota, ten sposób postępowania

jest mało efektywny¹. Regułą jest zatem przeprowadzanie badań w taki sposób, by spełniony był warunek [11]:

$$Bi \geq 100. \quad (2)$$

W Laboratorium Termodynamiki WAT opracowano inny niż wprowadzanie poprawek obliczeniowych sposób kompensacji zjawiska skończonej wartości oporu przejmowania ciepła, przy wymianie ciepła pomiędzy próbką w otaczającym ją płynie, w badaniach metodą wymuszenia skokowego. Sposób ten ujęto w opisie procedury zmodyfikowanej metody monotonicznego — skokowego wymuszenia cieplnego pomiaru dyfuzyjności cieplnej [5, 6]. Dla metody zostały określone uwarunkowania metrologiczne [7], metodę także sprawdzono w drodze symulacji numerycznych oraz w praktyce [8]. Ze względu jednak na fakt, że u podstaw sformułowania założeń metody tkwią analityczne zależności kryterialne, przy wykonywaniu pomiarów należy przestrzegać zaleceń dotyczących warunków opływu badanej próbki, w tym np. zalecenia dotyczącego jej orientacji w stosunku do kierunku napływu płynu. Ewentualne złagodzenie restrykcji dotyczących procedury pomiarowej wymaga potwierdzenia niektórych założeń metody dla bardziej ogólnych przypadków opływu próbki. Mając na uwadze złożoność zjawisk cieplno-przepływowych, realizacja tego zadania wymaga włączenia do analizy technik numerycznego modelowania przepływów.

Niniejsze opracowanie poświęcono omówieniu zagadnienia symulacji numerycznej sprzężonych zjawisk cieplno-przepływowych, jakie występują w badaniach dyfuzyjności cieplnej metodą wymuszenia skokowego. Formułując problem i budując model numeryczny, uwzględniono uwarunkowania metody zmodyfikowanej — metody dwóch płynów. W toku przeprowadzonych badań nacisk położono przede wszystkim na sprawdzenie założenia dotyczącego utrzymania stałej proporcji współczynników przejmowania ciepła dla dwóch różnych płynów, przy zmieniających się warunkach opływu określonych prędkością i kątem napływu płynu.

2. Zmodyfikowana metoda monotonicznego wymuszenia cieplnego

Jednym z głównych utrudnień w stosowaniu klasycznej metody wymuszenia monotonicznego jest stosunkowo niska dokładność metody. Poprawę dokładności można osiągnąć przy spełnieniu pewnych dodatkowych warunków realizacji pomiaru, przez co błąd względny, uwarunkowany oporem termicznym przejmowania ciepła, może zostać zmniejszony. Opór ten, powstający pomiędzy płynem oraz

¹ Nie dotyczy to metody doświadczalnej tzw. α -kalorymetru, w którym układ jest cechowany dla konkretnej geometrii próbki. Procedura ta, opisana np. w monografii [2], wymaga jednak stosowania próbek o ściśle określonych kształtach i wymiarach i jest mało elastyczna.

próbką, zmniejsza szybkość zmiany temperatury w danym punkcie kontrolnym we wnętrzu próbki i powoduje zaniżenie wyliczanej wartości dyfuzyjności cieplnej a w stosunku do wartości rzeczywistej. Wyznaczenie poprawek przy zastosowaniu wzorów kryterialnych jako metoda poprawy dokładności też nie sprawdza się w praktyce. Przyczyną są trudności dokładnego odtworzenia warunków modelowych eksperymentu i wyznaczenia podstawowych jego parametrów.

W celu poprawy dokładności pomiaru dyfuzyjności termicznej w Laboratorium Termodynamiki WAT opracowano zmodyfikowaną metodę monotonicznego wymuszenia cieplnego [5, 8]. Jej cechą charakterystyczną jest dwukrotna realizacja procesu wymuszenia cieplnego, w dwóch płynach różniących się między sobą właściwościami cieplnymi. Jeżeli oba doświadczenia zostaną wykonane w tych samych warunkach — dla tej samej prędkości ruchu płynu i tej samej konfiguracji przepływu — to różnice w wynikach będą uwarunkowane tylko właściwościami fizycznymi płynów. Dla tej samej próbki umieszczonej na przemian w jednym lub w drugim płynie, oznaczonym odpowiednio indeksem 1 lub 2, wymiana ciepła będzie opisywana różnymi współczynnikami przejmowania ciepła, odpowiednio α_1 i α_2 , natomiast tempo ogrzewania (lub chłodzenia) przyjmie analogicznie wartości b_1 lub b_2 . Zachowanie tej samej wartości wymiaru charakterystycznego l oraz prędkości v sprowadza zatem problem różnic współczynników przejmowania ciepła wyłącznie do różnic wynikających z różnicy właściwości cieplno-fizycznych płynów. Nawet postać konkretnej zależności kryterialnej przestaje w tym przypadku odgrywać specjalną rolę. W praktyce rolę płynów-środowisk, w których realizowane jest wymuszenie cieplne, pełnią dwie ciecze termostatujące.

Powtórzenie doświadczenia w zmienionych warunkach dostarcza więc dodatkowej informacji, dzięki czemu metoda nabiera charakteru metody absolutnej. Przy zastosowaniu tradycyjnej procedury metoda wymuszenia skokowego jest co najwyżej metodą względną i wymaga przeprowadzenia doświadczenia referencyjnego z zastosowaniem próbki wzorcowej o znanych a priori właściwościach — jak we wspomnianym przypadku zastosowania tzw. α -kalorymetru [2].

Jedną z podstawowych zalet metody zmodyfikowanej jest szeroka tolerancja dla wymiarów i kształtu badanych próbek. Ma to istotne znaczenie w przypadku badań materiałów trudno dostępnych bądź niełatwych w obróbce. Możliwość doboru kształtu próbek umożliwi także, dla odpowiednich zestawów preparatów, badanie składowych kierunkowych dyfuzyjności cieplnej materiałów o niejednorodnych właściwościach cieplnych.

Dla metodyki obliczania dyfuzyjności termicznej metodą zmodyfikowaną kluczowe znaczenie ma iloraz współczynników przejmowania ciepła, opisany zależnością:

$$k = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}. \quad (3)$$

Podczas opracowywania wyników eksperymentów jest on wykorzystywany do skorygowania efektów oporu cieplnego zjawisk przejmowania ciepła [6, 8].

Opór cieplny można w tym przypadku rozpatrywać jako wartość bezwzględna lub jako względną, odniesioną do oporu samego tylko przewodzenia ciepła w próbce. To drugie podejście jest o tyle korzystniejsze, że pokazuje „stopień” zniżania wartości dyfuzyjności cieplnej, jeżeli nie zostanie wprowadzona procedura korekcji, zgodnie z założeniem zmodyfikowanej metody monotonicznej. Ocenę problemu umożliwia analiza liczby podobieństwa Biota (1).

Jak wspomniano we wstępie, jednym z głównych ograniczeń dla stosowania metody monotonicznej w wydaniu klasycznym jest stosunkowo niska dokładność. Można ją poprawić poprzez stwarzanie takich warunków pomiaru, aby liczba Biota (1) osiągała możliwie największe wartości. Spełnienie warunku (2) ogranicza błąd względny pomiaru, powodowany występowaniem oporu cieplnego, do wartości nie większej niż 2% [11]. Wbrew pozorom, wypełnienie tego warunku nie jest łatwe i oczywiste. Wystarczy zauważyć, że w zależności (1) występuje przewodność cieplna ciała stałego — wielkość, która jest przedmiotem pomiaru i którą dopiero chcemy określić.

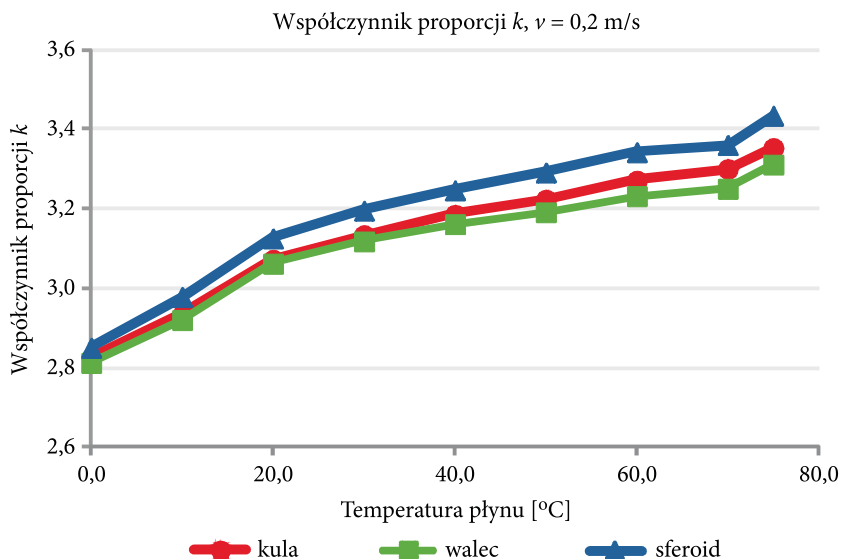
Zastosowanie dwukrotnego pomiaru, w dwóch płynach, zgodnie z procedurą metody zmodyfikowanej, pozwala usunąć opisane wyżej niedogodności. Po pierwsze, przestaje obowiązywać istotne ograniczenie obrazowane nierównością (2). Analizując zależność opisującą liczbę Biota, łatwo można zauważyć, że powstaje możliwość stosowania szerszego „wachlarza” płynów (ze względu na współczynnik α), rozszerza się także zakres dopuszczalnych wymiarów i kształtów próbek (większa tolerancja wymiarów charakterystycznych próbek l). Badana może być także szersza grupa materiałów, przynależnych nie tylko do klasy słabych przewodników ciepła (dopuszczalna wyższa wartość λ_s). Po trzecie metoda zmodyfikowana, korygując wynik pomiaru dyfuzyjności o wpływ oporu cieplnego, pozwala poprawić dokładność pomiarów.

W celu określenia współczynnika proporcji, opisanego zależnością (3), pomocne jest wyrażenie pozwalające określić w oparciu o teorię podobieństwa współczynnik przejmowania ciepła dla jednego lub drugiego płynu:

$$\alpha = \frac{\text{Nu}_l}{l} \lambda, \quad (4)$$

gdzie: Nu_l jest liczbą Nusselta, λ oznacza przewodność cieplną płynu, a l jest wymiarem charakterystycznym badanej próbki.

Liczbę Nusselta oblicza się w tym przypadku, wykorzystując wybraną zależność kryterialną. W literaturze dostępne są różne zależności [9, 10]. Dla brył dotyczą one najczęściej wartości uśrednionej współczynnika przejmowania ciepła α . Istniejące rozwiązania charakteryzują się różnym stopniem uniwersalności, tak pod względem wymiarów i kształtu brył, jak i przedziału liczby Reynoldsa Re , charakteryzującej



Rys. 1. Współczynnik proporcji k określony w oparciu o zależność kryterialną, dla zestawu cieczy: woda i etanol

rodzaj przepływu. Szerzej problem optymalnego wyboru zależności kryterialnej przedstawiono w [4], gdzie analizie poddano trzy modele: model Ranza i Marshalla stosowany do brył w kształcie kuli, model Żukauskasa przeznaczony do obliczeń walców o nieskończonej długości oraz model Yovanovicha, obejmujący stosunkowo szeroką gamę brył klasyfikowanych pod nazwą sferoidów, wśród których mieszczą się zarówno walce, jak i graniastopy. Przedstawiono w [4] również wyniki obliczeń wartości współczynników przejmowania ciepła dla dwóch cieczy: wody i etanolu. Analizą objęto założony przedział prędkości przepływu płynów Δv oraz wybrany przedział temperatury płynów ΔT od 0°C do 75°C .

Wyznaczone, w oparciu o wspomniane wyżej trzy modele, wartości współczynników przejmowania α ciepła różniły się między sobą nawet o 40% (dla danego płynu o temperaturze T i prędkości przepływu ν). Najniższe wartości uzyskano dla sferoidów — w oparciu o zależność Yovanovicha. Należy przy tym podkreślić, że dla wspomnianych trzech modeli współczynnik proporcji k , obliczony zgodnie z zależnością (3), przyjmującą dla omawianych cieczy postać:

$$k = \frac{\alpha_{\text{woda}}}{\alpha_{\text{etanol}}}, \quad (5)$$

posiadał zbliżone wartości wynoszące około 3. Przeprowadzona analiza wykazała ponadto zależność proporcji (5) od temperatury, przy czym wartości tego współczynnika rosły wraz z temperaturą płynów (na rysunku 1 przedstawiono wartości

tego współczynnika obliczone dla poszczególnych modeli, dla prędkości płynu $v = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Stwierdzono natomiast brak istotnej zależności współczynnika proporcji k od prędkości płynu. Mała „czułość” wartości opisanej zależnością (5) na rodzaj zastosowanego modelu i prędkość opływu dowodzi dobrego uwarunkowania metrologicznego metody.

Do opracowania metodyki pomiarów i przeprowadzenia dodatkowych analiz wybrano wzór kryterialny proponowany przez Yovanovicha [10]:

$$\overline{\text{Nu}}_{\delta} = \overline{\text{Nu}}_{\delta}^0 + \left[C_1 \left(\frac{l_{pr}}{\delta} \right)^{0,5} \text{Re}_{\delta}^{0,5} + C_2 \text{Re}_{\delta}^{0,566} \right] \text{Pr}^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

gdzie: C_1 i C_2 są stałymi wynoszącymi odpowiednio 0,15 i 0,35, δ jest wymiarem charakterystycznym obliczanym jako pierwiastek z powierzchni S badanego sferoidu, l_{pr} jest z kolei maksymalnym wymiarem równikowym równoważnego obiektowi sferoidu w kierunku prostopadłym do przepływu niezaburzonego.

Zredukowana do zerowej prędkości liczba Nusselta wynosi:

$$\overline{\text{Nu}}_{\delta}^0 = 3,443. \quad (7)$$

Za wyborem zależności (6) przemawiał szeroki zakres jej stosowania w przedziale liczb Reynoldsa $0 < \text{Re}_{\delta} \leq 2 \cdot 10^5$ oraz możliwość jej wykorzystania dla sferoidów — pod tym pojęciem mieści się szeroka grupa kształtów, obejmująca m.in. te najczęściej stosowane w badaniach dyfuzyjności metodą zmodyfikowaną.

Metodę zmodyfikowaną badano również na drodze analizy numerycznej. Wnikanie ciepła można rozpatrywać jako złożenie dwóch etapów: procesu przejmowania ciepła zachodzącego na granicy ciała i płynu oraz przewodzenia we wnętrzu próbki. W dotychczas zrealizowanym modelowaniu uwagę skupiono przede wszystkim na etapie drugim, tj. ocenie rozkładu pól temperatury w ciele stałym i określeniu tempa osiągania przez próbkę równowagi termicznej z płynem, pozostawiając modelowanie przejmowania ciepła jako następny cel analizy numerycznej dotyczącej metody zmodyfikowanej.

Założenia pokrótce omówionej powyżej metody pomiarowej zostały także poddane weryfikacji na drodze eksperymentalnej [5, 8]. W trakcie praktycznej realizacji pomiarów badana próbka była umieszczana na przemian w jednym z termostatów wyposażonych w komorę (łaźnię) zalaną wodą lub etanolem. Ruch (cyrkulacja) płynów był wymuszony przez elementy konstrukcyjne urządzeń. Przyjmowano jako założenia, że:

- prędkość wymuszonego ruchu obu płynów (możliwa do określenia w sposób szacunkowy, co pozwala tylko na oszacowanie liczby Reynoldsa) oraz charakter przepływu są jednakowe,

- przepływ płynów ma charakter ustalony, jednokierunkowy, prostopadły do osi podłużnej próbek, jednakowy dla wody i etanolu.

Badano materiały o budowie wewnętrznej jednorodnej, np. materiały wybuchowe, oraz niejednorodnej, m.in. kompozyty, które ze względu na rozkład włókien zbrojenia w materiale osnowy wykazywały ortotropowość właściwości cieplno-fizycznych [8]. Badano ponadto materiały o dobrze poznanych właściwościach cieplnych (np. polimetakrylan metylu PMMA). Uzyskane wyniki posłużyły w tym przypadku do potwierdzenia poprawności proponowanej metody oraz oceny błędu pomiarowego obliczeń dyfuzyjności cieplnej.

3. Założenia analizy numerycznej i charakterystyka modelu

Należy podkreślić, że wymienione powyżej założenia dotyczące charakteru przepływu cieczy w komorze termostatu są w praktyce trudne do uzyskania. Ograniczone rozmiary łaźni urządzenia oraz wymiary i sposób wymuszenia ruchu cieczy mogą powodować niejednorodność przepływu. Wskutek tego, w badaniach rzeczywistych może zmieniać się kierunek napływu cieczy względem badanej próbki.

Istnieje zatem potrzeba określenia ewentualnego wpływu nieregularności przepływu na wyniki badań dyfuzyjności termicznej. Ponieważ przy zastosowaniu zależności kryterialnych trudno było ocenić wpływ zaburzeń kierunku napływu cieczy na wartość współczynnika proporcji k , należało podjąć dodatkowe badania obejmujące przede wszystkim proces przejmowania ciepła przy wymuszonym opływie próbki.

Najkorzystniejszym rozwiązaniem w tej sytuacji było zastosowanie modelowania numerycznego, które mogło spełnić rolę badań uzupełniających i weryfikujących. W modelu numerycznym istniała możliwość zdefiniowania bryły o zadanym kształcie, wymiarach i orientacji względem napływającej cieczy, zanurzonej w płynie posiadającym ustalony jednorodny przepływ o zadanej prędkości. W konsekwencji możliwe było postawienie następujących celów badań numerycznych:

- określenie współczynników przejmowania ciepła α_1 i α_2 , a następnie współczynnika proporcji k dla wybranych prędkości cieczy,
- przeprowadzenie analizy wpływu zmiany orientacji próbki względem napływającego strumienia cieczy na wartość współczynnika proporcji k ,
- porównanie wyników analizy numerycznej z wartościami uzyskanymi w oparciu o wzory kryterialne.

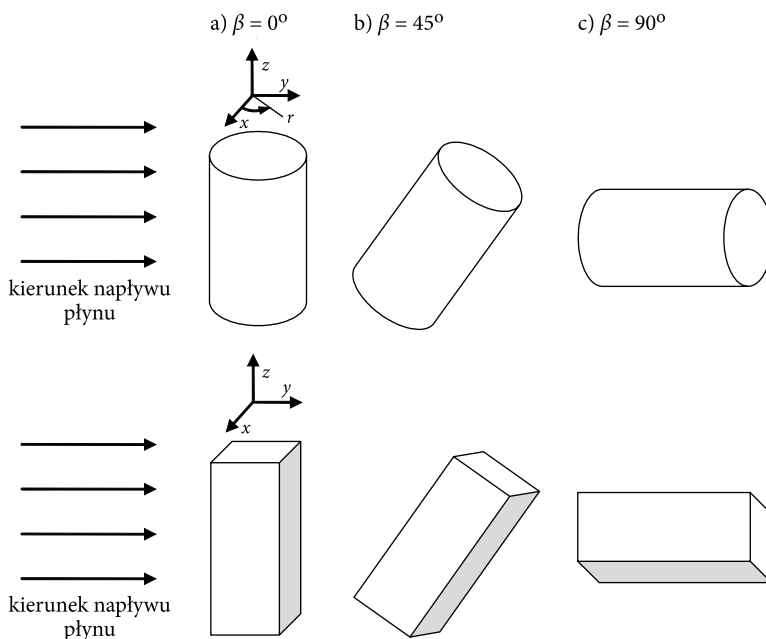
Modelowanie procesów zachodzących podczas wymiany ciepła w warunkach wymuszonego opływu ciał przeprowadzono przy zastosowaniu pakietu ANSYS CFX 12.0 firmy ANSYS. W obliczeniach wykorzystano moduł wymiany ciepła (*Heat Transfer Module*) przy zastosowaniu modelu turbulencji SST. Celem przygotowania modelu do analizy numerycznej dokonano dyskretyzacji badanej (modelowanej) przestrzeni (domeny) w pakiecie ICFM CFD (liczba elementów siatki strukturalnej

równa 270 000). Modelowano wymianę ciepła dla dwóch cieczy — wody i etanolu, których parametry cieplno-fizyczne występujące w modelach przedstawiono w tabeli 1. Wartości te zostały przyjęte na podstawie danych biblioteki własnej programu ANSYS, dla temperatury $T = 25^{\circ}\text{C}$.

TABELA 1
Parametry płynów przyjęte dla modelowania numerycznego, $T = 25^{\circ}\text{C}$

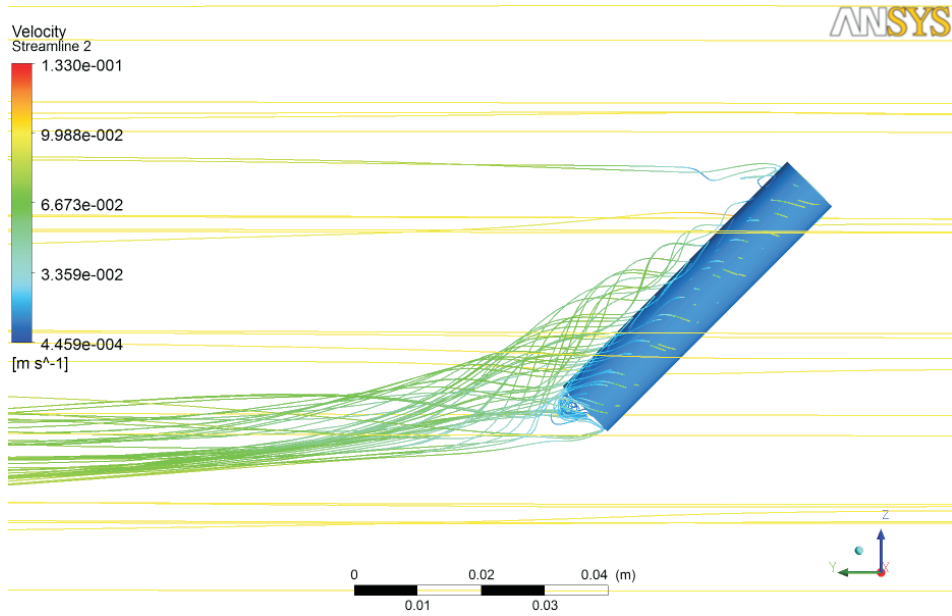
Parametr		Woda	Etanol
Przewodność cieplna	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0,6069	0,177
Współczynnik lepkości dynamicznej	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	8,90E-04	1,20E-03
Gęstość	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	997	789
Ciepło właściwe	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	4181,7	2400
Współczynnik rozszerzalności	K^{-1}	2,57E-04	1,08E-03

Modelowano wymuszony przepływ cieczy wokół dwóch modelowanych próbek: walca (średnica $d = 10 \text{ mm}$ i wysokość $h = 50 \text{ mm}$) oraz prostopadłościanu (o podstawie kwadratowej o boku $a = 10 \text{ mm}$ i wysokości $h = 50 \text{ mm}$). Poddano analizie trzy warianty różniące się orientacją próbek względem opływającego je płynu (rys. 2).

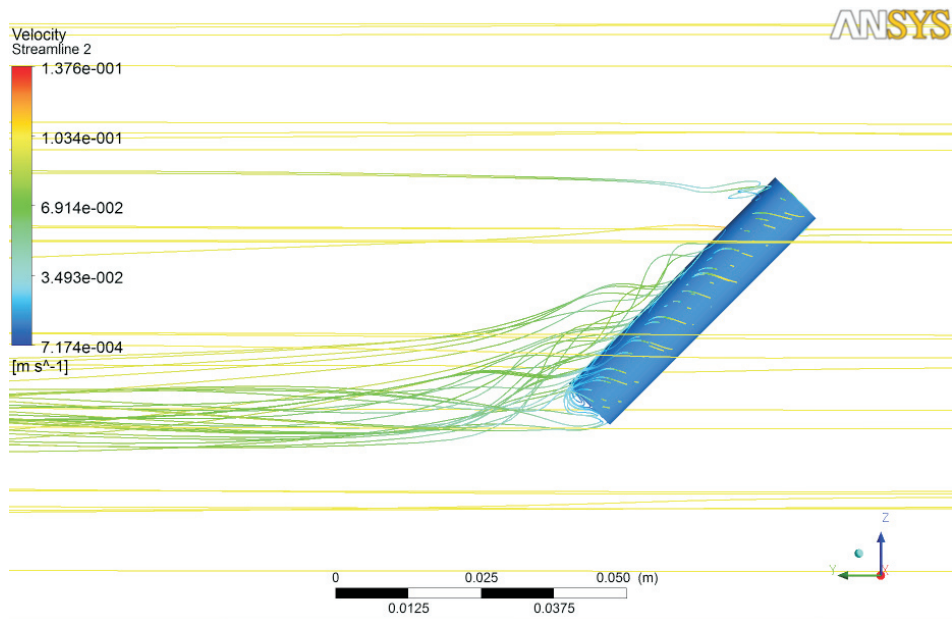


Rys. 2. Schemat orientacji modeli numerycznych (β — kąt pomiędzy kierunkiem napływającego płynu i osią y)

a) etanol



b) woda

Rys. 3. Rozkład linii prądu — model numeryczny walca, $\beta = 45^\circ$

W modelu numerycznym przyjęto, że różnica temperatury ΔT pomiędzy powierzchnią próbki T_s a płynem T_p jest stała w trakcie procesu i wynosi 1°C . Obliczenia realizowano dla zamodelowanego wymuszonego ruchu cieczy, z prędkością mieszczącą się w przedziale $0,02 \div 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (walec) lub $0,01 \div 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (prostopadłościan). Wartości te przyjęto na podstawie oszacowanych granicznych prędkości ruchu cieczy w wannach termostatów stosowanych w pomiarach eksperymentalnych [4, 8]. W programie ANSYS wyznaczano całkowity strumień ciepła wymieniany pomiędzy płynem i próbką o powierzchni S oraz obliczano współczynnik przejmowania ciepła ze wzoru:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{S} \cdot \frac{1}{\Delta T} = q \cdot \frac{1}{1[\text{K}]}, \quad (8)$$

gdzie: \dot{Q} oznacza całkowity strumień ciepła, natomiast q to uśredniona gęstość strumienia ciepła.

Na rysunku 3 przykładowo przedstawiono linie prądu dla badanych płynów wygenerowane w środowisku ANSYS dla modelu numerycznego walca. Oba rysunki dotyczą przypadku, gdy prędkość cieczy, odpowiednio etanolu lub wody, jest taka sama i wynosi $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Możliwe do zaobserwowania różnice rozkładu linii prądu na obu rysunkach wynikają zatem jedynie z różnych właściwości cieplno-fizycznych płynów.

4. Wyniki obliczeń numerycznych i ich omówienie

Określone, wyznaczone według zależności (8), uśrednione współczynniki przejmowania ciepła α , odpowiednio dla wody lub etanolu, przedstawiono w tabeli 2 (dla walca) i tabeli 3 (dla prostopadłościanu).

TABELA 2

Wartości współczynników przejmowania ciepła — symulacja opływu walca

Prędkość przepływu pływu $v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	β —	Współczynnik przejmowania ciepła w wodzie $\alpha_{\text{woda}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	Współczynnik przejmowania ciepła w etanolu $\alpha_{\text{etanol}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
0,02	0°	984,6	319,6
	45°	890,5	280,0
	90°	580,9	190,6
0,05	0°	1537,4	491,6
	45°	1381,4	429,5
	90°	895,9	292,3

cd. tabeli 2

0,1	0°	2195,9	688,5
	45°	1787,0	542,1
	90°	1497,0	438,9
0,2	0°	3058,3	917,8
	45°	2288,2	673,3
	90°	2413,7	709,3
0,5	0°	4717,4	1355,6
	45°	3448,1	1016,5
	90°	4773,1	1318,4
1,0	0°	6852,1	1915,4
	45°	5135,1	1497,0
	90°	7541,7	2129,4

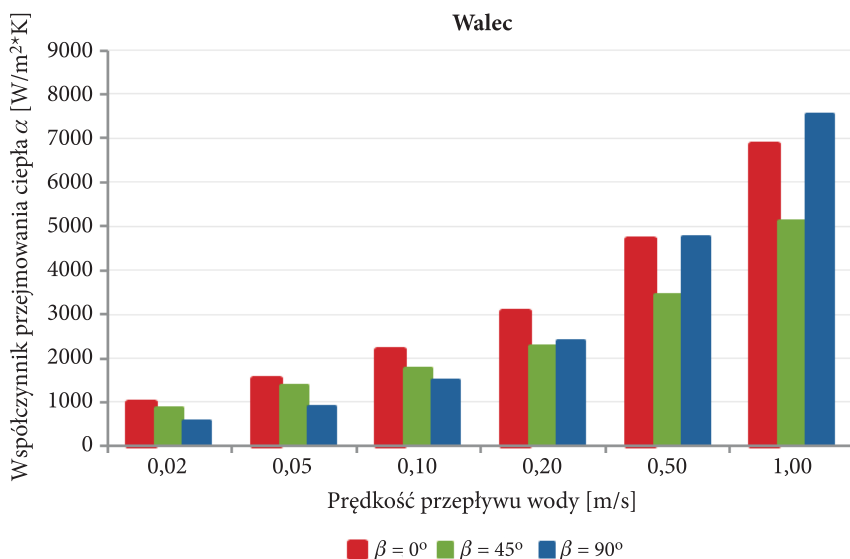
TABELA 3

Wartości współczynników przejmowania ciepła — symulacja opływu prostopadłościanu

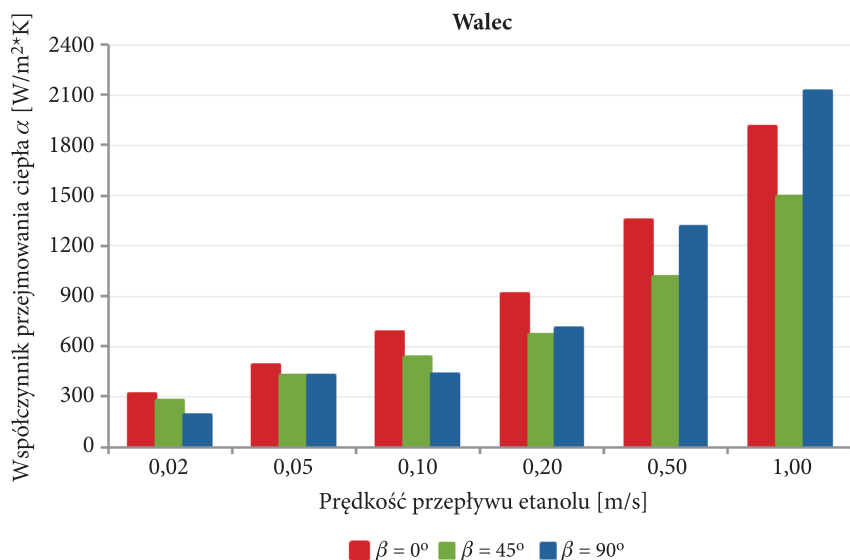
Prędkość przepływu pływu v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	β —	Współczynnik przejmowania ciepła w wodzie α_{woda} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]	Współczynnik przejmowania ciepła w etanolu α_{etanol} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
0,01	0°	443,3	152,4
	45°	531,5	173,1
	90°	339,5	109,7
0,05	0°	905,3	279,3
	45°	1259,7	393,4
	90°	692,5	214,6
0,10	0°	1288,5	381,7
	45°	1776,3	546,2
	90°	1075,1	311,3
0,20	0°	1748,1	512,2
	45°	2410,5	723,9
	90°	1556,6	446,7

Prezentacja w formie graficznej (rysunek 4 i 5) wyników zawartych w tabeli 2 pozwala zaobserwować wzrost współczynnika przejmowania ciepła wraz ze wzrostem prędkości płynu. Daje się przy tym zauważyć, że tempo przyrostu tego współczynnika ma nieco odmienny charakter w zależności od orientacji modelu względem napływającego płynu. Dla modelu walca współczynniki przejmowania ciepła, niemal

w całym zakresie analizowanych prędkości płynu, przyjmują największe wartości dla $\beta = 0^\circ$. Warto podkreślić, że prawidłowość ta została zaobserwowana zarówno w wodzie (rys. 4), jak i w etanolu (rys. 5).

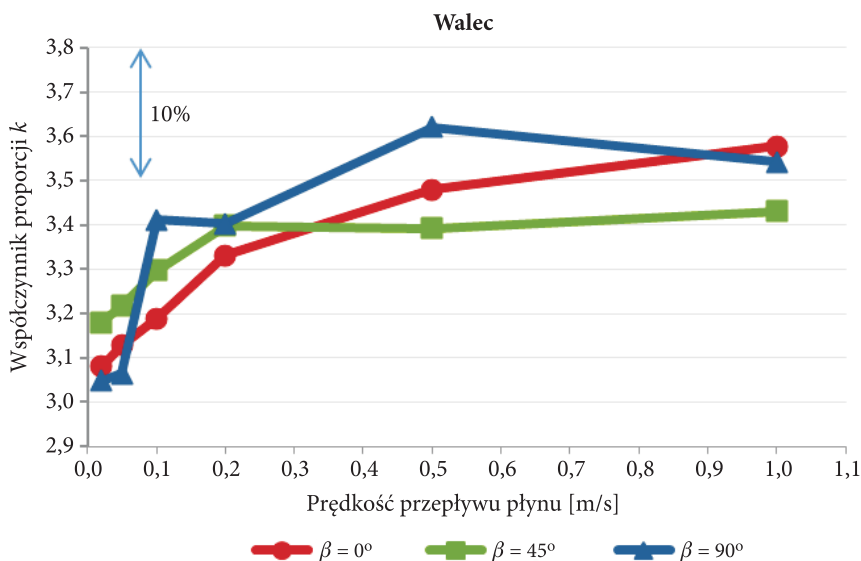


Rys. 4. Porównanie obliczeniowych wartości współczynnika przejmowania ciepła dla walca opływającego wodą

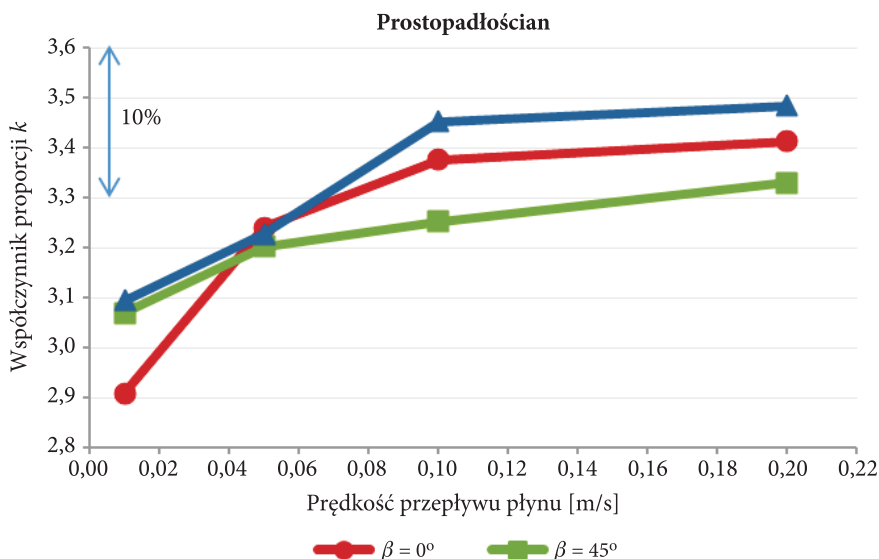


Rys. 5. Porównanie obliczeniowych wartości współczynnika przejmowania ciepła dla walca opływającego etanolem

Dla numerycznego modelu prostopadłościanu (dane tylko w formie tabelarycznej — tabela nr 3) sytuacja przedstawia się nieco inaczej. Wyniki analizy numerycznej pokazują, że najbardziej efektywne, z punktu widzenia procesu przejmowania ciepła, jest ustawienie próbki ukośnie względem napływającego płynu ($\beta = 45^\circ$).



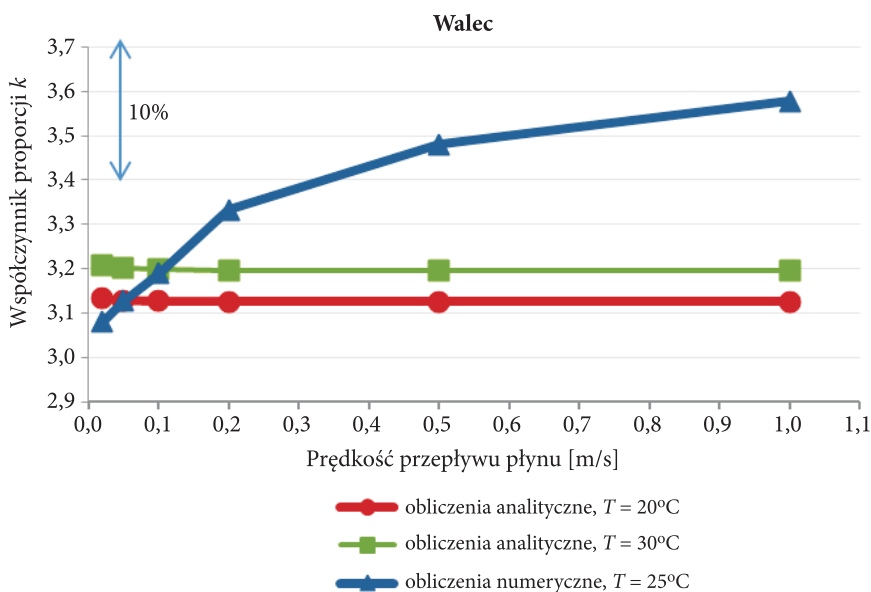
Rys. 6. Modelowanie opływu walca — współczynnik proporcji k w funkcji prędkości cieczy



Rys. 7. Modelowanie opływu prostopadłościanu — współczynnik proporcji k w funkcji prędkości cieczy

Zgodnie z przedstawionymi wyżej założeniami, dla zmodyfikowanej metody monotonicznej szczególne znaczenie ma nie tyle wartość współczynników przejmowania ciepła w obu cieczach, co ich wzajemna relacja, czyli współczynnik proporcji k . Wartości współczynnika k dla modelu walca i prostopadłościanu przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

W obu przypadkach widoczny jest trend wzrostowy współczynnika k (w zakresie od 3,08 do 3,58) wraz ze wzrostem prędkości przepływu płynów. Mając na uwadze zależność (5), oznacza to, że przyrost wartości współczynnika przejmowania ciepła dla wody jest odpowiednio szybszy niż dla etanolu. Zarówno dla walca, jak i dla prostopadłościanu, tendencja ta jest wyraźna, a wzrost wynosi około 10-20% w analizowanym przedziale prędkości cieczy i dotyczy praktycznie każdej orientacji modelu względem płynu.



Rys. 8. Rozkład współczynnika proporcji k dla zależności kryterialnych i obliczeń numerycznych

Tendencja ta jest trudna do interpretacji, biorąc pod uwagę wyniki dotychczasowych obserwacji, a zwłaszcza wyniki obliczeń uzyskane w oparciu o wzory kryterialne. Jak wspomniano bowiem we wstępie niniejszej publikacji, z obliczeń analitycznych wynika, że wartość współczynnika k praktycznie nie ulega zmianie w funkcji prędkości płynu [4]. W celu zobrazowania zaobserwowanych rozbieżności, na rysunku 8 zestawiono wartości współczynnika proporcji uzyskane dla zależności kryterialnej Yovanovicha, dla temperatury płynu $T = 20^{\circ}\text{C}$ i 30°C , oraz wyniki uzyskane w ramach obliczeń numerycznych (dla temperatury $T = 25^{\circ}\text{C}$).

Oceniając znaczenie stwierdzonych różnic pomiędzy wynikami symulacji numerycznych i wynikami obliczeń analitycznych, należy podkreślić, że nie przekraczają one 15% w wartościach względnych w całym zakresie analizowanych prędkości przepływu. Nawet przyjęcie stałej dla danej temperatury i niezależnej od prędkości wartości współczynnika proporcji k skutkować będzie jedynie pojawieniem się proporcjonalnego błędu wyznaczenia nie dyfuzyjności cieplnej, tylko wartości poprawki uwarunkowanej niezerowym oporem przejmowania ciepła. Przy spełnieniu warunku (2) bezpośredni błąd niezerowego oporu termicznego nie przekracza 2%, zatem odstępstwo wartości dyfuzyjności cieplnej wyznaczonej metodą zmodyfikowaną od wartości rzeczywistej nie powinno być większe niż $0,15 \cdot 0,02 = 0,003 = 0,3\%$. Dotyczy to najbardziej niekorzystnego przypadku, a samo rozumowanie ma zastosowanie również dla innych wartości prędkości napływu płynu i innych wartości liczby Bi , także niespełniających warunku (2).

Należy w tym miejscu przypomnieć, że potencjalną alternatywą dla stosowania zmodyfikowanej procedury badań jest procedura klasyczna, tj. pomiar w jednym płynie oraz obliczenie z zależności kryterialnych poprawki dla tego płynu. Przyjmując w takim przypadku uzyskane wyżej wyniki obliczeń numerycznych i odnosząc je do np. wyników obliczeń w oparciu o wzory kryterialne, można zauważyć, że błąd wyznaczenia poprawki byłby zdecydowanie większy niż przy metodzie wykorzystującej dwa płyny. Porównując bowiem wprost współczynniki przejmowania ciepła uzyskane w modelowaniu numerycznym i obliczone ze wzorów kryterialnych², okazuje się, że różnice pomiędzy nimi sięgają od 30% do 100% w badanym przedziale prędkości (np. tab. 2, $\nu = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\beta = 0^\circ$). Są to zatem różnice wyraźnie większe od różnic współczynnika proporcji zaobserwowanych w symulacjach numerycznych osiagających zaledwie 15% w stosunku do wartości wyznaczonych drogą obliczeń wykorzystujących wzory kryterialne. Bezsprzecznie daje się więc zauważyć korzyść ze stosowania procedury zmodyfikowanej — obliczenie współczynnika proporcji niejako „tłumi” zmiany wartości współczynników przejmowania ciepła.

Komentując wyniki obliczeń i analiz, można stwierdzić, że symulacje numeryczne potwierdzają, iż różnice w wartościach bezwzględnych współczynników przejmowania ciepła wyznaczanych dla różnych warunków opływu nie przenoszą się na wartości współczynnika proporcji właściwości dwóch różnych płynów. Przy badaniach dyfuzyjności cieplnej metodą zmodyfikowaną nie jest konieczna zatem dokładna znajomość warunków doświadczenia, ważne jest jedynie ich powtórzenie w dwóch eksperymentach wykonywanych w dwóch różnych płynach.

² Na przykład z zależności (6). Więcej danych dotyczących wyników obliczeń uzyskanych przy zastosowaniu zależności kryterialnych przedstawiono w opracowaniu [4].

5. Podsumowanie

W publikacji przedstawiono wyniki analizy numerycznej wymuszonego opływu ciał przez jednorodny, stacjonarny strumień cieczy. Obliczenia przeprowadzono dla wybranych prędkości płynów (wody i etanolu) obejmujących zakres prędkości, w którym mieściły się oszacowane prędkości płynów występujące w doświadczeniach eksperymentalnych.

Realizując założone cele pracy, obliczono współczynniki przejmowania ciepła dla obu płynów, a następnie współczynniki proporcji k , charakteryzujące stosunek współczynników przejmowania ciepła w wodzie i etanolu.

Stwierdzono, że sposób orientacji próbki względem napływającego płynu nie przekłada się istotnie na wartość współczynnika proporcji. Co prawda zaobserwowano istotny wpływ orientacji próbki na wartość współczynnika przejmowania ciepła, ale efekt wpływu orientacji, występujący odpowiednio w obu płynach, jest kompensowany przy zastosowaniu poprawek wyznaczanych na podstawie założenia znanej wartości współczynnika proporcji właściwości płynów. Fakt ten jest potwierdzeniem dobrego uwarunkowania metrologicznego metody zmodyfikowanej i trafnie prezentuje jej przewagę nad stosowaniem metody w wydaniu klasycznym.

Analizując uzyskane wyniki, zaobserwowano jednak rozbieżności dotyczące charakteru zmian współczynnika k w funkcji prędkości płynu v przy porównaniu wyników obliczeń numerycznych z zależnościami funkcyjnymi wyznaczonymi na podstawie zależności kryterialnej. Wyjaśnienie różnic wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań, ale samo określenie przyczyny rozbieżności nie ma znaczenia z punktu widzenia problemu rozważanego w niniejszej pracy. Celem pracy było bowiem uzyskanie dodatkowego potwierdzenia możliwości wyznaczenia wartości współczynnika określającego proporcję intensywności zjawisk przejmowania ciepła w płynach różniących się właściwościami cieplno-fizycznymi. Obliczenia numeryczne dostarczyły dodatkowych danych pozwalających na przeprowadzenie skrupulatnej analizy uwarunkowań metrologicznych analizowanej metody pomiaru.

W ocenie ogólnej można stwierdzić, że wykonane badania numeryczne dostarczają dodatkowych argumentów potwierdzających poprawność i dobre uwarunkowanie metrologiczne zmodyfikowanej metody monotonicznego-skokowego wymuszenia cieplnego pomiaru dyfuzyjności cieplnej ciał stałych. Pozwalają również rozszerzyć uzasadnienie teoretyczne proponowanej metody badań na przypadki nieobjęte zależnościami kryterialnymi, w tym przypadek uwzględnienia zmiennego kąta napływu płynu.

LITERATURA

- [1] BEJAN A., *Convection Heat Transfer*, John Willey & Sons, Inc., New York, 1995, 326, 587, 595-596.
- [2] FODEMSKI T.R., *Pomiary cieplne, cz. 2. Badania cieplne maszyn i urządzeń*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [3] KONDRATIEV G.M., *Regular Thermal Regime*, Gostekhizdat Publ., Moskwa, 1954.
- [4] PANAS A.J., *Analiza możliwości wykorzystania zmodyfikowanej metody monotonicznego wymuszenia cieplnego w kompleksowych badaniach właściwości termofizycznych*, Sprawozdanie z PBW 920/2005, WAT, 2005.
- [5] PANAS A.J., *Pomiar dyfuzyjności cieplnej w warunkach uporządkowanej wymiany ciepła*, Instrukcja laboratoryjna — ćw. nr 13, WMT, WAT, 2006 (www.wmt.wat.edu.pl/images/itl/zait/dokumenty/materialy/Cwiczenie%2013%20-%202011.pdf).
- [6] PANAS A.J., SYPEK J., *Validation of Thermal Diffusivity Measurement Results Obtained Using Modified Monotonic Heating Regime Procedure*, International Journal of Thermophysics, vol. 27, no 6, November 2006.
- [7] PANAS A., *Analysis of Metrological Conditioning of Modified Monotonic Heating Regime Procedure for Thermal Diffusivity Investigation*, 18th European Conference on Thermophysical Properties, Pau, France, 1st-4th September 2008.
- [8] SYPEK J., *Badanie właściwości cieplnych materiałów kompozytowych i wybuchowych z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody monotonicznego wymuszenia cieplnego*, rozprawa doktorska, WAT, 2006.
- [9] WIŚNIEWSKI S., WIŚNIEWSKI T.S., *Wymiana ciepła*, WNT, wydanie piąte, Warszawa, 2004.
- [10] YOVANOVICH M.M., *General expression for forced convection heat and mass transfer from isopotential spheroid*, Paper no. AIAA 88-0743, AIAA 26th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, January 11-14, 1988.
- [11] VOLOKHOV G.M., KASPEROVICH A.S., *Thermal Diffusivity Measurements Method*, vol. III, Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods, Plenum Press, New York, 1984, 299-454.

J. SYPEK, K. REĆKO, A.J. PANAS

Numerical tests of metrological conditioning of modified monotonic heating methodology for thermal diffusivity evaluation

Abstract. Problem of a heat transfer from a certain solid object under forced convection of thermostatic fluid has been discussed. The analysed objects were a cylinder and a cuboid. They were studied while subjected to a stationary fluid flow at different angles of attack. Several values of the inflow velocity ranging from $0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ have been taken into consideration. The analysed fluids were of the water and the ethanol properties, respectively. The analysis has been performed applying the CFD (Computer Fluid Dynamics) ANSYS code. The obtained results complement results of previous analytical studies that had created of a theoretical background for the modified step heating i.e. regular heating regime. In addition, they confirmed a good metrological condition of the developed procedure.

Keywords: thermal diffusivity (TD), temperature equilibration constant, forced convection heat transfer, modified step heating procedure of TD determination, computer fluid dynamics