

EKSPERYMENTALNA I NUMERYCZNA ANALIZA NIESTABILNOŚCI TERMICZNYCH POCHYLONEGO MODELU WYMIENNIKA CIEPŁA

Krzysztof DEKAJŁO

STRESZCZENIE

Artykuł dotyczy badań podstawowych, analizy niestabilności przepływów termicznych w modelu wymiennika ciepła. Praca bazuje na wynikach badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych realizowanych w prostokątnym kanale przepływowym będącym modelem pochylonego wymiennika ciepła. Zastosowanie optycznych metod pomiaru pól prędkości i temperatury pozwoliło wyodrębnić trzy podstawowe reżimy konwekcji w funkcji kąta nachylenia kanału w zakresie jego zmian od 0° do 90° .

Przeprowadzone symulacje numeryczne potwierdziły te obserwacje. Opierając się na rezultatach symulacji numerycznych wyznaczono wpływ kąta pochylenia kanału na liczbę Nusselta (Nu) opisującą efektywność wymiany ciepła badanego kanału. Stwierdzono, że liczbę Nu można zwiększyć 2 krotnie zmieniając kąt nachylenia kanału w zakresie zmian od 0° do 90° a maksymalny strumień ciepła pojawia się dla kąta pochylenia $\phi = 70^\circ$.

WSTĘP

W pasywnych wymiennikach ciepła podstawowym mechanizmem transportu ciepła jest konwekcja naturalna. Głównymi parametrami, dzięki którym można sterować efektywnością wymiany ciepła jest powierzchnia wymiany i wartość strumienia ciepła przepływającego przez wymiennik. W wielu przypadkach przemysłowych wymienników ciepła można by zastosować kolejny parametr ich optymalizacji, a mianowicie kąt pochylenia powierzchni wymiany. Przykładem pochylonych wymienników ciepła są kolektory słoneczne. W literaturze możemy znaleźć kilka prac dotyczących tej tematyki [Hollands, 1976; Raithby, 1998].

Zmiana kąta pochylenia powierzchni wymiany powoduje zmianę struktury przepływu płynu roboczego znajdującego się wewnątrz wymiennika. Istnieje potrzeba dokładniejszego zbadania tych struktur i ich wpływu na strumień ciepła pomiędzy ściankami pochylonego modelu wymiennika ciepła.

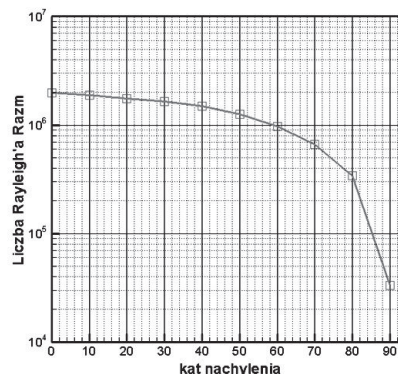
Analizowany eksperymentalnie i numerycznie model wymiennika ciepła jest prostokątnym kanałem przepływowym. Do opisu parametrów przepływowych zastosowano liczbę Rayleigh'a (Ra) w zmodyfikowanej formie (Ra_{zm}), uwzględniającą stosunek wymiarów (wysokości do długości H/L) i zmianę kąta pochylenia kanału przepływowego w zakresie ϕ 0° do 90° . Liczby Ra i Ra_{zm} wyznaczono z następujących zależności:

$$Ra = \frac{\Delta T \cdot g \cdot \beta \cdot H^3}{\nu \cdot a} \quad (1)$$

$$Ra_{zm} = \frac{H}{L} \cdot Ra \cdot \cos \phi \quad (2)$$

gdzie: ΔT – zadana różnica temperatury pomiędzy ściankami kanału, g - przyspieszenie ziemskie, β - współczynnik rozszerzalności cieplnej, H - wysokość kanału, ν – współczynnik lepkości kinematycznej, a – dyfuzyjność termiczna, L – długość kanału, ϕ - kąt pochylenia kanału.

Poniżej na rys. 1. zaprezentowana jest zmiana liczby Ra_{zm} od kąta nachylenia ϕ wyznaczona na podstawie parametrów opisanych w podpunkcie „EKSPERYMENT”. Zmodyfikowana liczba Ra_{zm} wyraźnie maleje i dla $\phi = 0^\circ$ do $\phi = 90^\circ$ zmniejsza się o dwa rzędy wielkości w zakresie od 2×10^6 do 3×10^4 . Można się więc spodziewać, że tak duża zmiana Ra_{zm} od kąta nachylenia ϕ będzie miała także duży wpływ na zmianę parametrów cieplnych badanego przez nas pochylonego modelu wymiennika ciepła.



Rys. 1. Zależność zmodyfikowanej liczby Rayleigh'a Ra_{zm} od kąta nachylenia ϕ

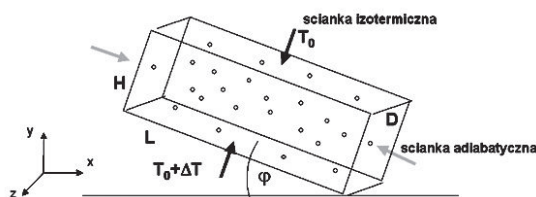
Przeprowadzona analiza struktur przepływu w badanym modelu wymiennika ciepła wykorzystuje nowoczesne techniki pomiarów pozwalające na wyznaczenie w przepływie całościowych pól prędkości i temperatury. Badania eksperymentalne wsparto symulacjami numerycznymi dzieląc domenę obliczeniową na 768 tysięcy objętości kontrolnych dla rozwiązania układu równań mechaniki płynów i energii.

Krzysztof DEKAJŁO

Institut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk, Warszawa

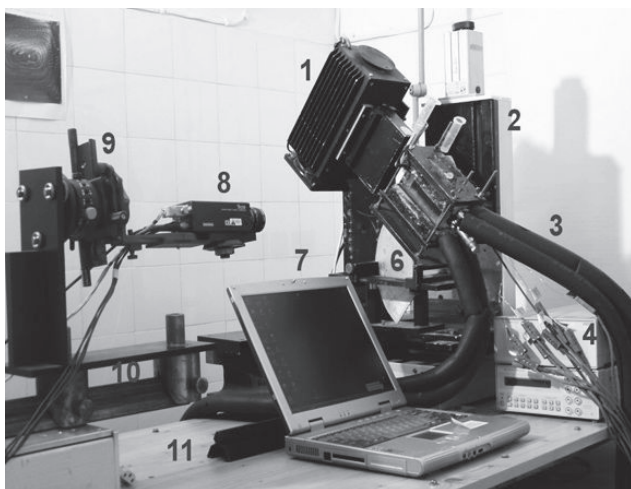
EKSPERYMENT

Badania eksperymentalne pochylonego modelu wymiennika ciepła przeprowadzono w prostopadłościennym kanale przepływowym wykonanym z Plexiglasu (por. rys. 2.). Kanał miał wysokość $H = 0.038$ m, długość $L = 0.114$ m oraz głębokość $D = 0.038$ m. Posiadał dwie przeciwległe izotermiczne ścianki, górną i dolną wykonane z miedzi oraz cztery boczne ścianki adiabatyczne wykonane z Plexiglasu o grubości 4 mm. Dzięki dwóm termostatom temperatury ścianek izotermicznych były utrzymywane na stałym poziomie, dolna (ciepła ścianka) $T = 305$ K i górna (zimna ścianka) $T = 299$ K. Różnica temperatury pomiędzy dolną a górną ścianką wynosiła $\Delta T = 6$ K wymuszała przepływ konwekcyjny wewnątrz kanału przepływowego.



Rys. 2. Schemat ogólny pochylonego modelu wymiennika ciepła

Mechanizm mocujący kanał przepływowy pozwalał na płynną regulację kąta nachylenia ϕ w zakresie od 0° do 90° . Rysunek 3 znajdujący się poniżej przedstawia fotografię stanowiska pomiarowego podczas pracy.



Rys. 3. Fotografia stanowiska pomiarowego; widok z przodu pochylonego kanału i lampy oświetleniowej

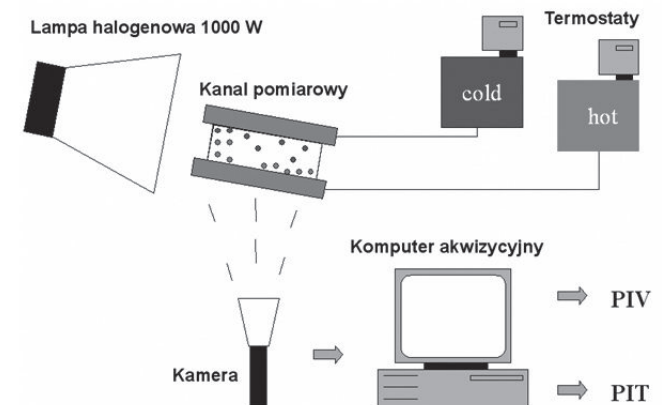
Podstawowymi elementami stanowiska pomiarowego są:

- 1 – Halogenowa lampa oświetleniowa o mocy 1 kW wytwarzającą płaszczyznę świetlną do analizy pól prędkości temperatury metodami PIV i PIT,
- 2 – Pionowa suwnica sterowana silnikiem krokowym,
- 3 – Przewody doprowadzające wodę z termostatów do izotermicznych ścianek kanału pomiarowego,
- 4 – Wielokanałowy rejestrator temperatury PTM 3040 Prema, do którego podłączono 9 termopar pomiarowych,
- 5 – Kanał pomiarowy,
- 6 – Mechanizm umożliwiający płynną zmianę kąta nachylenia kanału pomiarowego,

- 7 – Komputer PC z kartą akwizycyjną,
- 8 – Kolorowa kamera rejestrująca obrazy,
- 9 – Mechanizm umożliwiający płynną zmianę kąta pochylenia kamery,
- 10 – Pozioma suwnica kamery,
- 11 – Stół laboratoryjny.

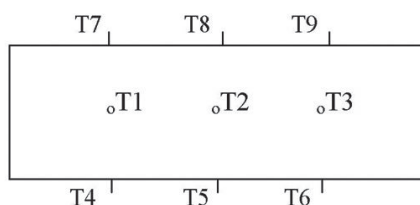
Pod stołem laboratoryjnym znajdują się nie widoczne na fotografii dwa stabilizatory termiczne (termostaty firmy Julabo F-30), stabilizujące temperaturę dwóch izotermicznych ścianek kanału pomiarowego. Temperaturę wody krążącej w układzie pomiędzy termostatem a komorami przylegającymi do izotermicznych ścianek kanału pomiarowego kontrolowały dwa czujniki oporowe Pt-100.

W kanale pomiarowym znajdowała się odgazowana woda destylowana z dodatkiem znaczników w postaci $50 \mu\text{m}$ kapsulek materiału ciekłokrystalicznego TLC (ang. Thermochromic Liquid Crystals). Kolorowa kamera rejestrowała obrazy znaczników w środkowej płaszczyźnie kanału pomiarowego oświetlonej halogenową lampą, „nożem świetlnym” (por. rys. 4.). Wykonano serię 10 eksperymentów w zakresie zmian ϕ od 0° do 90° zmieniając kąt nachylenia kanału pomiarowego, co 10° . Podstawową metodą pomiarową była technika anemometrii obrazowej PIV (ang. Particle Image Velocimetry). W tej metodzie kamera rejestruje sekwencje obrazów tych znaczników w ustalonych odstępach czasowych. Korelacja tych obrazów pozwala na wyznaczenie dwuwymiarowego pola prędkości. Do wyznaczenia pola temperatury zastosowano metodę termometrii obrazowej PIT (ang. Particle Image Thermometry), polegającej na analizie zmian barwy znaczników ciekłokrystalicznych TLC znajdujących się w badanym przepływie. Szczegółowy opis tych metod pomiarowych znajduje się w pracy [Kowalewski T. A., 2007].



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego ilustrujący technikę akwizycji obrazów z wykorzystaniem „noża świetlnego” wytwarzanego przez lampę halogenową i kolorową kamerę

Uzupełnieniem optycznej metody pomiaru pola temperatury PIT był system punktowego pomiaru temperatury. W tym celu w kanale pomiarowym umieszczono 9 termopar podłączonych do wielokanałowego rejestratora (PTM 3040 Prema). Schemat rozmieszczenia termopar podano na rysunku poniżej.



Rys. 5. Rozmieszczenie termopar na ściankach kanału pomiarowego

Termopary oznaczone symbolami: T4, T5, T6, T7, T8, T9 są termoparami służącymi do kontroli warunków eksperymentu. Umieszczone były w dolnej oraz górnej ściance kanału pomiarowego. Dzięki odczytom z tych termopar możliwa była dokładna korekta wartości temperatury ustawianej na termostatach odpowiedzialnych za utrzymywanie żądanych temperatur na ściankach kanału pomiarowego.

Termopary oznaczone symbolami: T1, T2, T3 są termoparami pomiarowymi. Umieszczone były na bocznej tylnej ściance kanału pomiarowego. Odczyty z tych termopar posłużyły do dalszej analizy eksperymentów wykonywanych dla różnych kątów pochylenia ϕ pochylonego modelu wymiennika ciepła.

PODZIAŁ NA REŻIMY

Analiza zmian struktur przepływu zarejestrowanych w funkcji kąta nachylenia ϕ kanału pomiarowego pozwoliła na wyodrębnienie trzech charakterystycznych reżimów opisanych poniżej.

R-RaBa – reżim struktur typu Rayleigh’a – Benarda, $\phi = 0^\circ \div 20^\circ$

Reżim struktur typu Rayleigh’a – Benarda został wyodrębniony dla przepływów z zakresu zmian kąta nachylenia kanału $\phi = 0^\circ \div 20^\circ$. Analizę rozpoczynamy od $\phi = 0^\circ$. Jest to szczególnie przypadek przepływu, często nazywany jest komórkami konwekcyjnymi Rayleigh’a – Benarda, stąd też wzięta się nazwa tego reżimu. Komórki te są jednym z podstawowych sposobów organizacji konwekcji w atmosferze.

Na rys. 6a [na wkładce kolorowej] zaprezentowano chwilowe pole temperatury, na którym widoczne są miejsca powstawania ciepłych termików (kolor niebieski), które odrywają się od ciepłej dolnej ścianki kanału pomiarowego i unoszą się do góry. Na górnej ściance sytuacja jest odwrotna, zimne termiki (kolor czerwony) spływają wzdłuż bocznych ścianek kanału. Powstawanie oraz zanikanie termików jest bardzo szybkie. Układ ten charakteryzuje się silną konwekcją, powstaje bliska symetrycznej wirowa struktura przepływu. Przepływ jest silnie zmienny w czasie, kierunek przepływu w powstałych komórkach jest przemienny.

Powstawanie konwekcyjnych komórek typu Rayleigh’a – Benarda możemy także zaobserwować dla kątów $\phi = 10^\circ$ i $\phi = 20^\circ$. Niewielkie już pochylenie kanału pomiarowego wymusza na przepływie ruch w kierunku tego pochylenia. Nie zauważa się już symetrycznej struktury dwu-komórkowej a jedynie strukturę niesymetryczną. Powstające ciepłe i zimne termiki poruszają się w kierunku pochylenia ścianek kanału.

Rysunek 7 [na wkładce kolorowej] prezentuje wyniki otrzymane dla konfiguracji $\phi = 20^\circ$. Na rysunku tym przedstawiono pole temperatury widoczne w barwach ciekłych kryształów TLC i strukturę przepływu. Powstające ciepłe termiki

przemieszczając się wzdłuż ścianki kanału pomiarowego, zwiększają zajmowaną objętość aż do momentu, w którym nastąpi ich swobodne oderwanie oraz przemieszczenie się ku górze.

Główny mechanizm przepływu dla tej konfiguracji prezentuje rys. 7b. Widzimy na nim niesymetryczną strukturę dwukomórkową. Mniejsza komórka znajduje się w cieplejszej, górnej części kanału, widoczna w obrazie ciekłokrystalicznym jako obszar o kolorze niebieskim. Większa komórka w obszarze temperatur niższych znajduje się w dolnym obszarze kanału i jest uwidoczniła przez ciekłe kryształy kolorem czerwonym (por. rys. 7a). Przy ściankach zimnej i ciepłej występują termiki, które przy ściance górnej opadają w dół do prawej dolnej przestrzeni kanału pomiarowego, a przy ściance dolnej unoszą się do góry.

Przepływ w reżimie R-RaBa jest niestacjonarny w całym kanale. Cechuje go duża intensywność mieszania konwekcyjnego. Wymiana ciepła odbywa się na drodze silnej konwekcji komórkowej.

R-OS – reżim struktur oscylacyjnych, $\phi = 30^\circ \div 60^\circ$

Reżim oscylacyjny R-OS został wyodrębniony dla przepływów z zakresu zmian kąta nachylenia kanału $\phi = 30^\circ \div 60^\circ$. Podstawową różnicą pomiędzy strukturami z reżimu R-RaBa i R-OS jest występowanie tylko jednej pętli cyrkulacyjnej wewnątrz kanału pomiarowego. W miarę zwiększania kąta nachylenia ϕ dla tego reżimu, pętla cyrkulacyjna zmniejsza na tyle swoją prędkość, że widoczna jest jej struktura bliska stacjonarnej. Charakterystyczne natomiast jest intensywne powstawanie ciepłych i zimnych termików, które rosnąc przemieszczają się wzdłuż izotermicznych ścianek kanału pomiarowego, ciepłe termiki podążają do góry, zimne zaś spływają w dół kanału. Część z nich zdąży na tyle urosnąć, aby oderwać się i przemieścić ku górze, część z nich wpadnie w obszar zimniejszego lub cieplejszego obszaru i po prostu wygaśnie.

Powstawanie oraz zanikanie ciepłych i zimnych termików jest głównym mechanizmem przepływu dla tego reżimu. Pojawiają się dzięki temu oscylacje zmian pola prędkości i temperatury i na tej podstawie reżim ten został nazwany reżimem struktur oscylacyjnych R-OS. Oscylacjom towarzyszy stratyfikacja temperatury zwiększająca się wraz ze wzrostem kąta nachylenia ϕ kanału pomiarowego. Wymiana ciepła dla tego reżimu odbywa się na drodze słabnącej konwekcji i rosnącemu przewodzeniu zależnemu od wzrostu kąta nachylenia ϕ kanału pomiarowego.

R-ST – reżim struktur stacjonarnych, $\phi = 70^\circ \div 90^\circ$

Reżim struktur stacjonarnych R-ST został wyodrębniony dla przepływów z zakresu kątów nachylenia $\phi = 70^\circ \div 90^\circ$.

Przepływ w tym reżimie charakteryzuje się tym, że nie posiada struktur wirowych przemieszczających się wewnątrz kanału pomiarowego tak jak to miało miejsce dla poprzednich reżimów R-RaBa i R-OS. Nie są widoczne także miejsca powstawania ciepłych i zimnych termików. Prędkość przepływu w centralnej części kanału zanika niemal do zera. Pole temperatury (por. rys. 9a) [na wkładce kolorowej] wygląda bardzo charakterystycznie, jest to uwarstwiona, niemieszająca się struktura. Zauważa się dużą pionową stratyfikację temperatury takiego przepływu. Cały ruch konwekcyjny jest ograniczony do cienkiej warstwy przysiennej. Wymiana ciepła dla tego reżimu odbywa się na drodze silnego przewodzenia.

Poniżej na rysunku 10 [na wkładce kolorowej] zaprezen-

towane są zmiany średnich różnice temperatur zmierzonych termoparami T1, T2 i T3 umieszczonymi wewnątrz kanału pomiarowego. Z analizy wykresu wynika, że najmniejsze różnice temperatury są dla konfiguracji $\phi = 0^\circ$ a największe dla $\phi = 90^\circ$. Dla reżimu R-RaBa wartości $\Delta(T1-T2)$ i $\Delta(T2-T3)$ są najmniejsze i zmieniają się w zakresie $0.1 \div 0.3$. Świadczy to o intensywnej konwekcji płynu wewnątrz kanału pomiarowego. Dla reżimu R-OS wartości $\Delta(T1-T2)$ i $\Delta(T2-T3)$ zwiększają się (z dużym przybliżeniem liniowo) wraz ze wzrostem kąta ϕ . Świadczy to o rosnącej stratyfikacji temperatury badanego płynu. Dla reżimu R-ST, dla $\phi > 70^\circ$ stratyfikacja temperatury jest największa. W miarę wzrostu kąta nachylenia ϕ kanału pomiarowego wartości $\Delta(T1-T2)$ oraz $\Delta(T2-T3)$ rosną od wartości $0.1 \div 1.2$ i pojawia się efekt przejścia charakteru przepływu od niestacjonarnego do stacjonarnego.

SYMULACJE NUMERYCZNE

Zastosowanie kodów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) ma coraz szersze zastosowanie w nauce. Kody numeryczne są bardzo dobrym narzędziem do pogłębienia analizy wyników uzyskanych drogą eksperymentalną. Celem symulacji numerycznych przeprowadzonych w tej pracy jest potwierdzenie istnienia reżimów przepływu zauważonych w badaniach eksperymentalnych. Wymaga to doboru odpowiedniego kodu numerycznego, oraz opracowanie metodologii obliczeniowej. W omówionych wyżej badaniach eksperymentalnych zaobserwowano trzy reżimy przepływu: R-RaBa - reżim struktur przepływu Rayleigh'a – Benarda, R-OS - reżim struktur oscylacyjny i R-ST - reżim struktur stacjonarnych. Do ich analizy numerycznej istnieje konieczność zastosowania kodu numerycznego umożliwiającego poprawne obliczenie przepływów niestacjonarnych, zmiennych w czasie. Zdecydowano się na kompletny pakiet komercyjny Fluent 2D [Fluent, 2002] oparty na metodzie objętości skończonych. Zastosowano strukturalną dwuwymiarową siatkę numeryczną o wymiarach takich jak w eksperymencie, długość $L = 0.114$ m i wysokość $H = 0.038$ m. Obliczenia były prowadzone w oparciu o parametry fizykochemiczne wody w temperaturze $T = 300$ K. Kąt nachylenia ϕ prostokątnej domeny obliczeniowej był parametrem zmienianym co 10° . Wykonano 10 symulacji numerycznych zmieniając kąt nachylenia ϕ w zakresie od $0^\circ \div 90^\circ$. Podczas modelowania numerycznego kodem Fluent 2D rozwiązywano równania zachowania masy, pędu oraz równanie energii dwu wymiarowego niestacjonarnego w czasie przepływu.

Obliczenia numeryczne potwierdziły istnienie opisywanych trzech reżimów. Porównano wyniki eksperymentów z wynikami obliczeń numerycznych i stwierdzono, że wyniki uzyskane modelem Fluent 2D są wiarygodne i mogą posłużyć do dalszej analizy modelu pochylonego wymiennika ciepła [Dekajto, 2008].

WYZNACZENIE PARAMETRÓW CIEPLNYCH DLA REŻIMÓW PRZEPŁYWU

Na podstawie symulacji numerycznych obliczono wartości strumieni ciepła Q transportowanego pomiędzy izotermicznymi ściankami kanału. Wartości strumieni cieplnych dla trzech wcześniej zdefiniowanych reżimów przepływu zastały wy-

znaczone na podstawie 20 ostatnich rozwiązań otrzymanych w odstępach 10 sekundowych czasu rzeczywistego symulacji dla w pełni rozwiniętego przepływu po ok. 1000 s obliczeń niestacjonarnego modelu.

Do opisu efektywności wymiany ciepła badanego modelu wybrano bezwymiarową liczbę Nusselta (Nu). Wyraża ona stosunek transportu ciepła na drodze wnikania do jego transportu na drodze przewodzenia została wyliczona na podstawie następujących zależności:

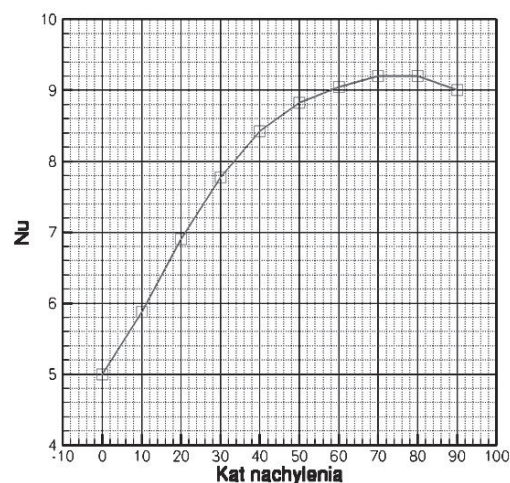
$$Nu = \frac{h_{eff} \cdot L}{k} \quad (3)$$

gdzie:

$$h_{eff} = \frac{Q_{sr}}{T_{ścianki} - T_{sr}} \quad (4)$$

gdzie: h_{eff} – efektywny współczynnik przekazywania ciepła, k – współczynnik przewodzenia cieplnego, Q_{sr} - średni strumień ciepła, $T_{ścianki}$ – temperatura ścianki, T_{sr} – temperatura średnia pomiędzy izotermicznymi ściankami kanału, L – długość ścianki kanału.

Rysunek 11 prezentuje zmianę liczby Nusselta (Nu) w funkcji kąta nachylenia ϕ kanału pomiarowego.



Rys. 11. Zależność liczby Nu od kąta nachylenia ϕ kanału pomiarowego

Wartość liczby Nusselta rośnie wraz ze wzrostem kąta nachylenia ϕ kanału pomiarowego. Dla $\phi = 0^\circ \div 30^\circ$ (reżim R-RaBa) obserwujemy liniową zmianę liczby Nu , zwiększa się ona o 1 na każde 10° zwiększającego kąta ϕ . W zakresie zmian $\phi = 40^\circ \div 60^\circ$ (reżim R-OS) obserwujemy nieliniową zmianę liczby Nu , zmienia się ona ok. 0.5 na każde 10° zwiększającego kąta ϕ . Maksymalną wartość liczby Nu zaobserwowano dla reżimu R-ST dla $\phi = 70^\circ$. Dla pozostałych kątów $\phi = 80^\circ$ i $\phi = 90^\circ$ z reżimu stacjonarnego zauważa się nieznaczną zmianę wartości liczby Nu , zmniejsza się ona wraz ze wzrostem pochylenia kanału pomiarowego. Interesujące jest, że maksymalne strumienie ciepła występują dla kątów zbliżonych do 70° . Oznacza to, że lekkie pochylenie pionowego wymiennika ciepła może poprawić jego efektywność nawet o około 5%.

PODSUMOWANIE

Eksperymentalna i numeryczna analiza niestabilności termicznych pochylonego modelu wymiennika ciepła dostarczyła nam cennych informacji o powstających strukturach przepływu. Pozwoliła na podział tych struktur na trzy reżimy. Określono podstawowe cechy jakościowe (struktury przepływu) charakterystyczne dla każdego reżimu i ilościowe (strumienie ciepła, liczba Nu) mające wpływ na wydajność wymiany ciepła.

Reżim rozwiązań typu Rayleigh'a - Benarda (R-RaBa) cechuje się silną konwekcją. Reżim oscylacyjny (R-OS) jest reżimem pośrednim, wymiana ciepła ma charakter mieszany. Składa się z konwekcji i przewodzenia. Reżim struktur stacjonarnych (R-ST) cechuje zanik przepływu konwekcyjnego a ruch ciepła odbywa się głównie na drodze przewodzenia. W tym reżimie wartości strumieni ciepła są największe i efektywność wymiany ciepła (liczba Nu) osiąga największą wartość dla $\phi = 70^\circ$.

Z przeprowadzonych badań wynika, że dla kąta nachylenia $\phi = 0^\circ$ liczba Nu wynosi 5 a dla $\phi > 60^\circ$ osiąga wartości powyżej 9. Daje to prawie 100 % możliwości regulacyjne zwiększania efektywności wymiany ciepła zakresie zmian kąta nachylenia od $\phi = 0^\circ \div 90^\circ$.

Dla wymienników pionowych gdzie $\phi = 90^\circ$ można zwiększyć efektywność pochylając powierzchnię wymiany do $\phi = 70^\circ$, dzięki czemu uzyskamy maksymalną wartość liczby Nu i osiągniemy ok. 5 % wzrost efektywności wymiany ciepła.

Podsumowując możemy stwierdzić, że wszędzie tam gdzie nie ma możliwości na okresowe zwiększanie powierzchni wymiany ciepła lub na zmianę strumienia przepływu płynu roboczego (czynnika chłodzącego) możemy zastosować pochylone wymienniki ciepła. Dzięki zmianie kąta pochylenia powierzchni wymiany ciepła możemy dodatkowo sterować ich wydajnością. Rozważany w tej pracy model pochylonego wymiennika ciepła stanowi tylko część kolektora słonecznego tj. pomiędzy przezroczystą osłoną a płytą absorbera.

LITERATURA

- Hollands K.G.T., 1984, *Multi – Prandtl Number Correlation Equations for Natural Convection in Layers and Enclosures*, Int. J. Heat Transfer, 98, 189-193.
- Raithby G.D., Hollands K.G.T., 1998, *Natural convection*. In W.M. Roshenow, J.P. Hartnett, and Y.I. Cho, editors, *Handbook of Heat Transfer*, chapter 4, McGraw-Hill, New York, 3rd edition.
- Fluent 2002, *Users Guide ver. 6.0*, Fluent Inc., Lebanon, NH.
- Kowalewski T.A., 2007, *Thermochromic Liquid Crystals*, w *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Tropea C.; Yarin A. L.; Foss, J. F. (Eds.), in chap. B7.1, pp. 487-499.
- Dekajto K., 2008, *Analiza Stabilności Przepływów Termicznych w Pochylonej Geometrii*, Praca Doktorska, Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Zakład Mechaniki i Fizyki Płynów.