

Tadeusz Michał WÓJCIK, Robert KANIOWSKI, Piotr Jarosław MROCZEK

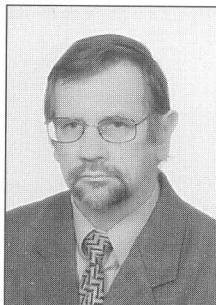
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA W KIELCACH, WYDZIAŁ MECHATRONIKI I BUDOWY MASZYN, KATEDRA TERMODYNAMIKI I MECHANIKI PŁYNÓW

Wizualizacja wrzenia na mikropowierzchniach rozwiniętych

Dr inż. Tadeusz Michał WÓJCIK

Ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W 1997r. uzyskał stopień doktora na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Autor ponad 40 prac. Specjalista w z zakresu intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu. Kierownik trzech grantów badawczych KBN. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Świętokrzyskiej.

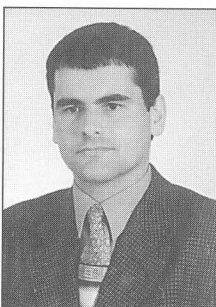
e-mail: tmptw@tu.kielce.pl



mgr inż. Piotr Jarosław MROCZEK

Absolwent Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, dyplom (1999) w zakresie specjalności Pojazdy Samochodowe. Obecnie pracuje w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Świętokrzyskiej jako asystent.

e-mail: mroczek@tu.kielce.pl



mgr inż. Robert KANIOWSKI

W 2004 r. ukończył studia na wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Pracuje jako asystent w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

e-mail: kaniowski@tu.kielce.pl



Celem prac jest uzyskanie możliwie dużego strumienia ciepła przy małej różnicy temperatur między powierzchnią grzejącą i cieczą. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu zmiany fazy czynnika roboczego w procesie wrzenia.

Chociaż wymiana ciepła przy wrzeniu jest bardzo intensywna to rozwój nowoczesnej techniki wymaga odprowadzania tak dużych gęstości strumienia ciepła, jakich nie zapewnia proces wrzenia na powierzchni technicznie gładkiej. W związku z tym pojawiła się potrzeba opracowania metod intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu. Polegają one między innymi na zastosowaniu rozwiniętych mikropowierzchni grzejnych tzn. między innymi pokrywaniu powierzchni wymiany ciepła strukturami kapilarno-porowatymi (SKP).

Metalowa, włóknista struktura kapilarno - porowata jest warstwą usypanych drucików, spiekanych ze sobą i z powierzchnią grzejącą, rys.1. Główne parametry strukturalne pokrycia, wykonanego najczęściej z miedzi lub stali to: średnica drucika d_w , jego długość l_w , porowatość warstwy II i jej grubość δ . Wahają się one w zakresach: $d_w = 10 - 100 \mu\text{m}$, $l_w = 1 - 10 \text{ mm}$, $II = 40 - 86\%$, $\delta = 0,2 - 2 \text{ mm}$. Dla metalowych pokryć włóknistych są one do uzyskania w sposób planowy, w przeciwieństwie do innych metod, np. techniki natrysku cieplnego. Warstwy miedziane, włókniste o zaplanowanych parametrach strukturalnych, tzn. grubości i porowatości mogą być stosowane w konstrukcji płaskich i cylindrycznych powierzchni wymiany ciepła.

Streszczenie

Podstawę do analizy procesu wrzenia stanowi wiedza o warunkach tworzenia się pęcherzyków i ich oderwania od powierzchni wymiany ciepła. Do wizualizacji procesu w miedzianej, włóknistej strukturze porowatej, pokrywającej rurowe powierzchnie zastosowano technikę szybkiego fotografowania. Do tego celu użyto kamery cyfrowej do szybkich zdjęć FT-1 oraz kamery cyfrowej CV-M40. Badania wymiany ciepła wykonano dla zmiennych parametrów włóknistej pokrycia (porowatości i grubości) i dla dużej objętości wody destylowanej, etanolu i freonu 123. Opracowano własne oprogramowanie, pozwalające na wyznaczanie średnic D_d i częstotliwości f odrywających się pęcherzy parowych. Trzeci istotny parametr wrzenia tj. gęstość ośrodków nukleacji n obliczono analizując obrazy zarejestrowane przy dłuższych czasach naświetlania. Oceniono wpływ charakterystyk pęcherzy na wartość współczynnika przejmowania ciepła.

Abstract

The knowledge of nuclei generation and departure provides the basis for boiling process analysis. High-speed photography was used in order to visualize the process in the copper, fibrous, porous structure covering pipe surfaces. The photographs were taken with a high speed camera FT-1 and camera CV-M40. Heat transfer investigations were conducted for changeable parameters of the fibrous covering (porosity and thickness) for distilled water pool boiling. The authors worked out the software which enabled them to determine diameters D_d and the frequency f of the departing vapor bubbles. The third relevant boiling parameter, i.e. nucleation centers density n , was computed due to the analysis of images recorded at long exposure period. The impact of the characteristics of bubble dynamics on the value of the heat transfer coefficient was evaluated.

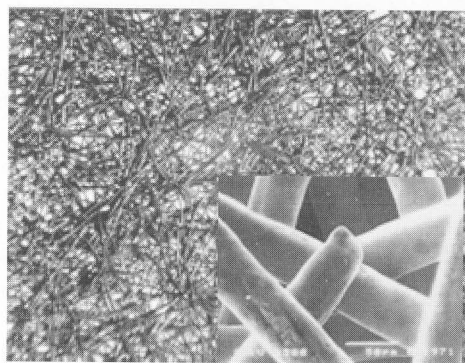
Słowa kluczowe: wrzenie, struktura porowata, wizualizacja

Keywords: boiling, porous structure, visualization

1. Wprowadzenie

Miniaturyzacja i wzrost mocy podzespołów elektronicznych wymaga opanowania nowych technik ich chłodzenia. Do urządzeń wytwarzających duże strumienie ciepła oprócz układów cyfrowych (o stale wzrastającej skali integracji) zaliczamy także kompaktowe wymienniki ciepła, rury cieplne, reaktory jądrowe, silniki spalinowe, turbiny gazowe, źródła promieniowania rentgenowskiego i świetlnego dużej mocy.

W wielu ośrodkach prowadzone są badania mające na celu zwiększenie efektywności urządzeń i instalacji, w których realizowane są procesy wymiany ciepła. Intensyfikacja wymiany ciepła jest jednym z ważniejszych zagadnień współczesnej techniki.



Rys.1. Struktura porowata, metalowa, włóknista
Fig.1. Metal, fiber porous structure

Włókniste pokrycia porowate powierzchni grzejnych, mają udokumentowane zalety w porównaniu z warstwami wykonanymi innymi metodami [1]. Charakteryzują się one wysoką szkieletową przewodnością cieplną i wyłącznie otwartą porowatością. Inne zalety to; możliwość nakładania pokrycia porowatego na powierzchnie podłoża o złożonym kształcie a przede wszystkim duża wartość współczynnika przejmowania ciepła, potwierdzona w licznych badaniach eksperymentalnych.

Intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu na powierzchniach pokrytych warstwą porowatą nie można wyjaśniać wyłącznie faktem rozwinięcia powierzchni grzejnej. Do chwili obecnej brak jest jednolitego poglądu wyjaśniającego przyczyny wzrostu współ-

czynnika przejmowania na powierzchniach z uzdatnioną lub nałożoną warstwą kapilarno-porowatą.

Główną cechą wrzenia pęcherzykowego jest obecność w cieczy pęcherzyków pary. Wiedza o warunkach tworzenia się pęcherzyków i ich oderwania od powierzchni wymiany ciepła stanowi podstawę do analizy tego zakresu wrzenia. Niezwykle istotne są takie parametry wrzenia jak liczba pęcherzyków n przypadająca na jednostkowe pole powierzchni, średnice ich oderwania D_d od powierzchni grzejnej oraz częstotliwość ich tworzenia f .

Opis procesów wrzenia opiera się w dużej mierze na modelach tworzenia się i odrywania pojedynczych pęcherzy pary. Na bazie znajomości dynamiki pęcherzy opracowane zostały modele mechanistyczne. Wiedza o wartościach eksperymentalnych gęstości strumienia ciepła q , (ewentualnie współczynnika przejmowania ciepła α) w funkcji przegrzania powierzchni wymiany ciepła ponad temperaturę nasycenia czynnika wrzącego ΔT , z jednoczesną analizą charakterystyk pęcherzy umożliwia ilościową analizę tych modeli.

Wielu badaczy stoi obecnie na stanowisku, że głównie badania wizualizacyjne mogą przynieść postęp w wiedzy mechanizmach tworzenia pęcherzy parowych i ich dynamiki w chwili oderwania. Badania wizualizacyjne wrzenia w strukturach kapilarno-porowatych są trudne, gdyż tworzenie się pary zachodzi wewnątrz nieprzezroczystych, cienkich warstw. Dane uzyskiwane z obserwacji zewnętrznej (najczęściej górnej) powierzchni pokrycia kapilarno-porowatego dają jedynie pośrednią wiedzę do wnioskowania, co zachodzi wewnątrz pokrycia. Nieliczne prace eksperymentalne, dotyczące zjawisk zachodzących wewnątrz struktury kapilarno-porowatej, nie dają jednoznacznej odpowiedzi, co do sposobu odprowadzania pary i zasilania cieczą, w których miejscach struktury zachodzi parowanie oraz gdzie i jak położone są powierzchnie międzyfazowe

2. Cel badań

W Politechnice Świętokrzyskiej od kilkunastu lat prowadzone są badania eksperymentalne i teoretyczne wymiany ciepła w na płaskich i cylindrycznych powierzchniach grzejnych, pokrytych miedzianą, włóknistą strukturą kapilarno porowatą [1,2].

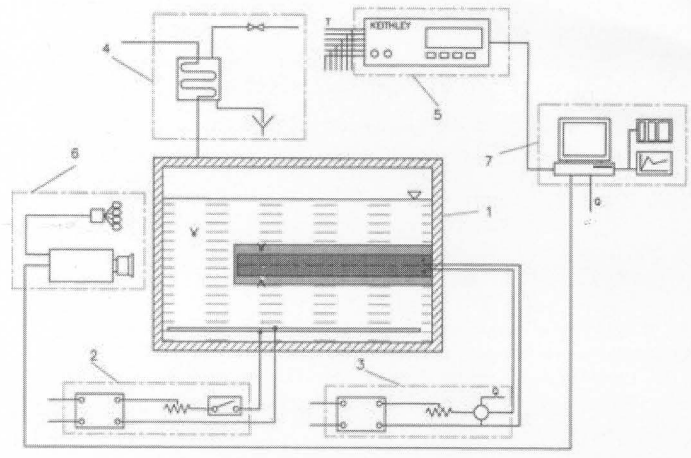
Celem prac było rozpoznanie własności tych struktur w wymianie ciepła. Pozwoliło to na opracowanie technologii wytwarzania struktury miedzianej, włóknistej o zaplanowanych własnościach w wymianie ciepła, przede wszystkim uzyskanie maksymalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła. Istotnym zagadnieniem była weryfikacja modeli wrzenia oraz wyjaśnienie podstaw fizycznych zjawiska poprzez badania wizualizacyjne; ilościowe (pomiar parametrów pęcherzy w chwili oderwania) i jakościowe (obserwacje mechanizmu tworzenia się pęcherzyków). Obserwacja pojedynczych pęcherzy pary w czasie ich rozwoju od nukleacji do oderwania się od powierzchni struktury kapilarno - porowatej pozwala na, lepsze rozpoznanie zjawisk inicjacji wrzenia, histerezy nukleacji, kryzysu wewnątrzwarstwowego. Wymagało to budowy dwóch odrębnych stanowisk; do rejestracji procesu tworzenia pary wewnątrz struktur i rejestracji dynamiki pęcherzy na zewnątrz struktury.

3. Metodyka badań eksperymentalnych

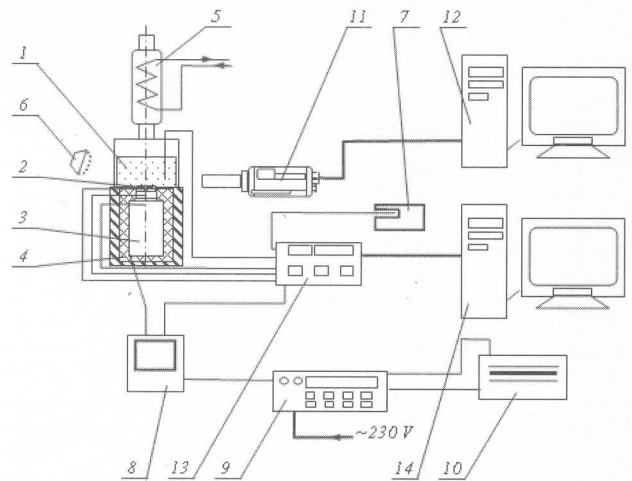
3.1 Stanowiska badawcze

Stanowiska badawcze pozwalają na pomiar wartości przegrzania powierzchni grzejnej ponad temperaturę saturacji czynnika wrzącego ΔT , dla ustalonej gęstości strumienia ciepła q oraz rejestrację procesu tworzenia pęcherzyków pary. Schemat stanowiska badawczego do badania charakterystyk pęcherzy na powierzchniach cylindrycznych przedstawiono na rys.2 a powierzchni płaskich na rys.3

Badania wizualizacyjne charakterystyk pęcherzy na powierzchniach cylindrycznych (rurowych) wykonywano przy użyciu kamery monochromatycznej cyfrowej firmy „ARCO“, o rozdzielczości 658x496. Kamera umożliwia rejestrację od 8 do 13 300 zdjęć na sekundę. Ze względu na znaczną ilość informacji zapisywaną oraz przetwarzaną w krótkim czasie zastosowano komputer z procesorem CELERON 2,4



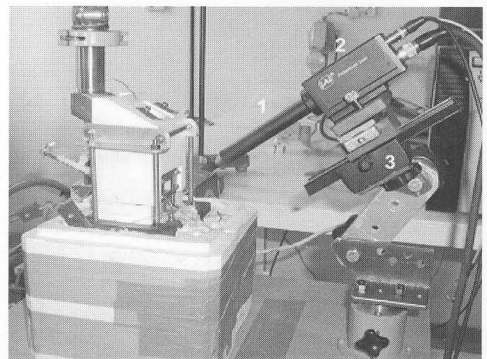
Rys.2. Schemat stanowiska pomiarowego wraz z układami współpracującymi: 1 - moduł podstawowy; 2 - kompensacja strat ciepła; 3 - układ grzejny wraz z pomiarem elektrycznej; 4 - układ chłodzenia pary i odzysk kondensatu; 5 - układ pomiaru temperatury; 6 - układ akwizycji obrazu wrzenia; 7 - komputer
Fig.2. Diagram of experimental set-up with collaborative systems: 1 - basic module; 2 - heat loss compensation; 3 - heating system with electric power measurement; 4 - vapour cooling and condensate recovery system; 5 - temperature measurement system; 6 - boiling image acquisition system; 7 - computer



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - komora wrzenia; 2 - badana próbka; 3 - walec miedziany z grzałką; 4 - izolacja; 5 - chłodnica; 6 - oświetlenie; 7 - piecyk kalibracyjny; 8 - watomierz; 9 - zasilacz; 10 - autotransformator; 11 - kamera cyfrowa CV-M40; 12 - komputer z kartą akwizycji obrazu; 13 - stacja akwizycji danych; 14 - komputer rejestrujący
Fig. 3. Schematic diagram of the test system: 1 - boiling liquid; 2 - investigated sample; 3 - copper bar with heater; 4 - insulation; 5 - condenser; 6 - light; 7 - dry-well calibrator; 8 - wattmeter; 9 - power supply and fuses; 10 - autotransformer; 11 - digital camera CV-M40; 12 - PC with frame grabber; 13 - data logger; 14 - PC

GHz, z szyną FSB 800 MHz oraz z układem Chipset Intel 845EP. Dane z kamery przesyłane są poprzez interfejs równoległy ECP.

Podstawowym elementem modułu cyfrowej rejestracji obrazu wrzenia wewnątrz struktur na powierzchniach płaskich jest cyfrowa kamera JAI M - 40 (2), wraz z obiektywem Rodenstock Macro CCD4 (1). Cechą charakterystyczną tego obiektywu jest duża odległość od obserwo-



Rys. 4. Moduł podstawowy stanowiska wraz z kamerą CCD CV- M40 (JAI) do obserwacji i rejestracji procesów wrzenia w strukturach kapilarno - porowatych
Fig. 4. The stand basic module with CCD CV- M40 (JAI) camera for observation and registration of boiling capillary - porous structures

wanego obiektu wynosząca 70 mm. Precyzyjne ustawienie pola widzenia kamery zapewnia specjalnie zaprojektowana głowica (3) (rys. 4).

W badaniach wizualizacyjnych bardzo ważne jest prawidłowe oświetlenie obserwowanego obiektu. Do wizualizacji wrzenia w metalowych włóknistych strukturach kapilarno - porowatych, przy wykorzystaniu kamery JAI M-40, zastosowano halogenowy oświetlacz z przewodami światłowodowymi, co zapewnia możliwość regulacji prędkości migawki kamery, która decyduje o jakości zarejestrowanych zdjęć.

3.2. Metodyka badań

Wykonano badania wpływu głównych parametrów odrywających się pęcherzy pary dla trzech czynników wrzących (wody, etanolu i freonu 123) na wymianę ciepła przy wrzeniu w miedzianej, włóknistej strukturze porowatej, pokrywającej powierzchnie płaskie i cylindryczne. Analizowano następujące parametry: liczba pęcherzyków n przypadająca na jednostkowe pole powierzchni, średnice ich oderwania od powierzchni wymiany ciepła D_d oraz częstotliwość ich tworzenia f . Pomiarów przeprowadzono dla zróżnicowanych parametrów strukturalnych warstwy (porowatość 40% i grubości 2 oraz 0,5 mm) oraz dla zwiększających się i zmniejszających wartości strumienia ciepła dostarczanego do ścianki grzejnej.

Metodyka badań eksperymentalnych wymagała z pomiarem parametrów pęcherzy wyznaczenia krzywej wrzenia (czyli określania przegrzania ΔT dla zadanej wartości gęstości strumienia ciepła, q). Niezbędna jest znajomość strumienia ciepła, pola powierzchni wymiany ciepła i minimum dwóch pomiarów temperatury: temperatury nasycenia wrzącej cieczy i temperatury powierzchni grzejnej. Ponieważ zagadnienia pomiarów temperatury i mocy cieplnej (poprzez elektryczną moc grzejnika) są ogólnie znane, skupiono się na pomiarach dynamiki pęcherzy.

Rejestrację średnic odrywających się pęcherzyków oraz częstotliwości prowadzono dla małych zakresów gęstości strumienia ciepła, do wartości ok. 11 kW/m². W tych warunkach pola widzenia nie przesłaniały jeszcze odrywające się pęcherzyki z niższych partii rury.

Do wyznaczenia średnicy oderwania D_d oraz częstotliwości tworzenia f użyto własnego programu. Program dokonuje pomiaru długości odcinków, po uprzednim wyznaczeniu parametru C (w mm/piksel). Parametr C wyznacza się poprzez pomiar wielkości znanej na ekranie monitora.

Dla obiektywu 1:1,6 z pierścieniem makro otrzymano równanie prostej:

$$C = 0,0000468657 \cdot l + 0,000735821, \quad (1)$$

gdzie: l = odległość obiektu od obiektywu, mm.

Błąd bezwzględny pomiaru wielkości liniowej (średnicy pęcherza, odległości pomiędzy pęcherzami) wynosi 0,06 mm dla średnicy $D_d = 2$ mm i odległości obiektu od kamery $l = 100$ mm.

4. Wyniki badań eksperymentalnych

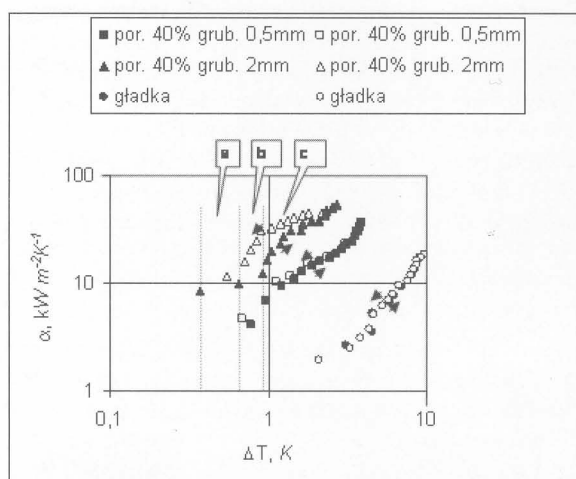
4.1. Współczynnik przejmowania ciepła

Współczynnik przejmowania ciepła α związany jest z gęstością strumienia ciepła q i przegrzaniem ΔT następującą zależnością:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T} \quad (2)$$

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów wartości współczynnika przejmowania ciepła dla rur: gładkiej i pokrytych strukturą o porowatości 40% w funkcji przegrzania powierzchni grzejnej ponad temperaturę saturacji. Czynnikiem wrzącym jest woda.

Dla badanych warstw porowatych stwierdzono znaczną intensyfikację wymiany ciepła w porównaniu z powierzchnią gładką, przy czym współczynnik przejmowania ciepła α uzależniony jest od grubości pokrycia. Spośród badanych próbek najlepsze efekty uzyskano dla grubości warstwy $\delta = 2$ mm. Także cienka warstwa - 0,5 mm - daje zwiększenie współczynnika przejmowania ciepła w porównaniu z powierzchnią o naturalnej chropowatości. O intensyfikacji wymiany ciepła po nałożeniu struktury porowatej świadczy stosunek współ-



Rys. 5. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od przegrzania dla rury gładkiej i rur o zmiennej grubości pokrycia porowatego, $II = 40\%$, woda, ciśnienie atmosferyczne; a,b,c oznaczenia z rys. 6

Fig. 5. Dependence of heat transfer coefficient on heat flux for smooth tube and tubes with porous covering in two thicknesses (0.5 and 2mm), $II = 40\%$, water. a,b,c from Fig.6

czynnika przejmowania ciepła dla powierzchni pokrytej warstwą porowatą α_p do współczynnika dla powierzchni gładkiej α_g . Osiągnął on wartość $\alpha_p/\alpha_g = 19,7$ dla $\Delta T \sim 2$ K i grubości warstwy 2 mm.

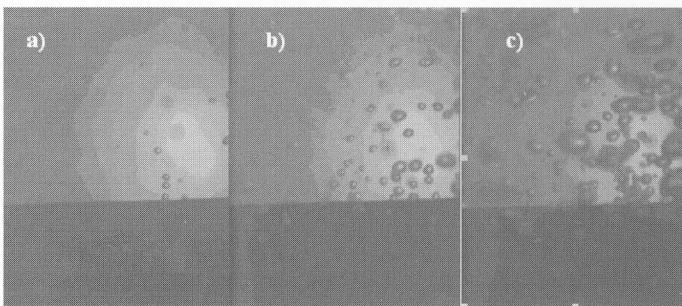
4.2. Obserwacje procesu wrzenia

Na rysunku 6 przedstawiono wrzenie pęcherzykowe wody na powierzchni z pokryciem kapilarno - porowatym, przy temperaturze saturacji 372,2 K i ciśnieniu atmosferycznym. Przy małych gęstościach strumienia ciepła rzędu 3,2 - 6,4 kW/m² tworzą się niewielkie pęcherze pary, zbliżone wielkością do siebie, rzędu 0,5 mm. Ośrodki nukleacji działają nieprzerwanie, są rozrzucone po całej powierzchni i nie wpływają na siebie, rys.6b.

Dla większych gęstości strumienia ciepła ($q > 11$ kW/m²) średnice pęcherzyków znacznie się różnią od siebie, co jest widoczne na rys. 6c. Pęcherzyki zaczynają łączyć się ze sobą jeszcze przed oderwaniem (koalescencja pozioma) i po oderwaniu (koalescencja pionowa). Niektóre pory działają cały czas aktywnie produkując nieprzerwanie pęcherzyki. W innych, z małą częstotliwością tworzone są pojedyncze pęcherze. Wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła wzrastają średnie rozmiary pęcherzy pary. Zwiększa się również liczba ośrodków wrzenia. Obserwacje wskazują, że pory o większych rozmiarach generują większe pęcherze. Powyżej wartości gęstości strumienia ciepła 11 kW/m² obserwacje ilościowe stają się utrudnione, ze względu na przesłanianie obrazu przez pęcherzyki tworzone na bocznych powierzchniach rury.

Zdjęcia, rys. 6, dowodzą, że procesy wymiany ciepła odbywają się w wodzie o temperaturze nasycenia, gdyż oderwane pęcherze nie zanikają przy przejściu przez ciecz.

Na rysunku 5 zaznaczono odpowiednie mechanizmy wrzenia z rys. 6.



Rys.6. Rura z pokryciem o porowatości 40%, grubość warstwy 2 mm, czynnik wrzący - woda, ciśnienie atmosferyczne a) początek wrzenia, $\Delta T = 0,4$ K, $q = 3,2$ kW/m², b) $\Delta T = 0,7$ K, $q = 6,4$ kW/m², c) $\Delta T = 0,9$ K, $q = 11,1$ kW/m²
Fig.6. Tube with covering of 40% porosity, layer thickness 2 mm, boiling agent - water, atmospheric pressure a) boiling incipience, $\Delta T = 0.4$ K, $q = 3.2$ kW/m², b) $\Delta T = 0.7$ K, $q = 6.4$ kW/m², c) $\Delta T = 0.9$ K, $q = 11.1$ kW/m²

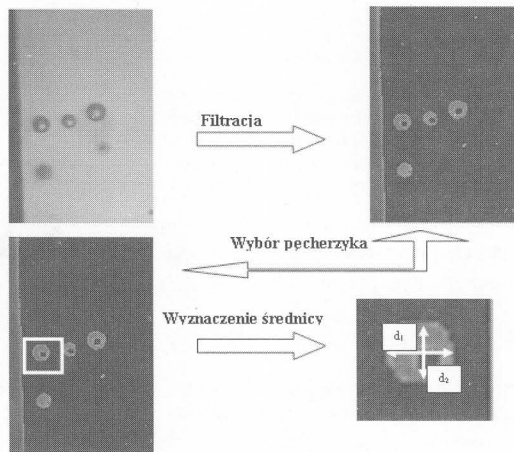
4.3. Średnice pęcherzy w chwili oderwania

Średnice większości pęcherzyków próbek z pokryciem porowatym mieściły się w zakresie od 0,2 do 2,5 mm. Rozmiary pęcherzy zmieniały się zarówno dla jednej działającej pory, jak i między porami. Zależały również od parametrów struktury porowatej i rodzaju czynnika wrzącego. W związku z tym do analizy pobierano większą liczbę obiektów (po 30 pęcherzyków, z 3-4 miejsc).

Procedurę wyznaczenia średnicy odrywających się pęcherzy pary D_d przedstawiono na rys. 7.

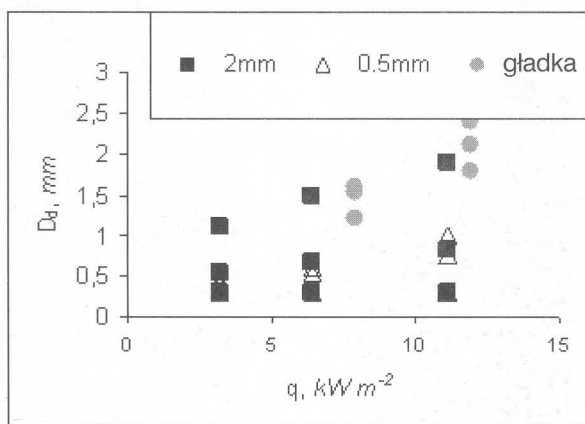
Średnicę obliczano korzystając z zależności:

$$D_d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$



Rys. 7. Procedura wyznaczenia średnicy odrywających się pęcherzy pary D_d
Fig. 7. Procedure for the determination of diameters of departing vapour bubbles D_d

Przykład wyników pomiarów maksymalnych, minimalnych i średnich rozmiarów odrywających się pęcherzyków przedstawiono na rys.8.



Rys. 8. Średnice pęcherzy w funkcji q dla wody i miedzianej, włóknistej struktury, porowatość 40%, grubości 0,5 i 2 mm
Fig.8. Values of bubble diameters as the function of q for water boiling, copper, fibrous structure, porosity 40%, thickness 0.5 and 2 mm.

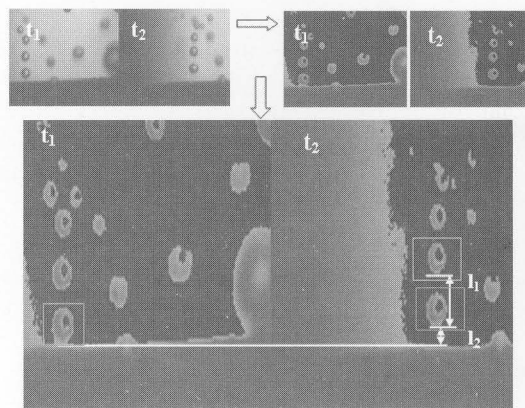
Pęcherzyki dla rury z mikropowierzchnią rozwiniętą są mniejsze niż dla powierzchni gładkiej. Przy wzrastającym strumieniu ciepła średnice odrywających się pęcherzyków nieco rosną zarówno dla powierzchni gładkiej i rozwiniętej.

4.4. Częstotliwość odrywania się pęcherzy

Do analizy pobierano do 30 pęcherzyków, z 3-4 miejsc na powierzchni rury.

Do pomiaru częstotliwości wybierane są dwa kolejne pęcherze, obliczana różnica czasu $\Delta t = t_2 - t_1$ a program wyznacza żądany parametr $f = (\Delta t)^{-1}$. Obliczenia czasu między odrywaniem się dwóch kolejnych pęcherzy Δt dokonuje się według zależności:

$$\Delta t = t_2 - t_1 - \left(\frac{l_2(t_2 - t_1)}{l_1} \right) \quad (4)$$

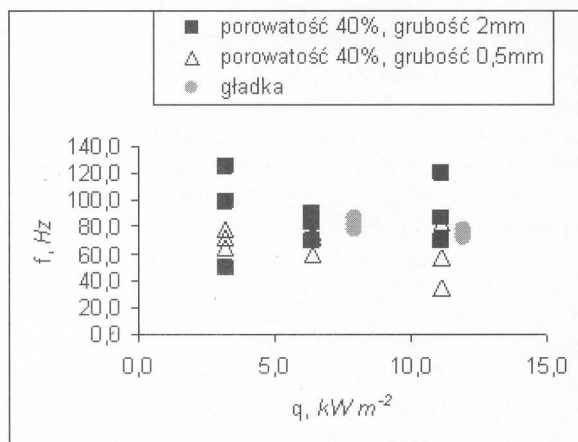


Rys. 9. Procedura wyznaczenia częstotliwości f odrywających się pęcherzy pary, 87 zdjęć na sekundę

Fig. 9. Procedure for the determination of frequency of departing vapour bubbles f , 87 fps

gdzie: l_1, l_2 - oznaczenia zgodne z rys.9, mm.

Dla powierzchni z nałożoną strukturą porowatą częstotliwość odrywania się pęcherzyków nieznacznie maleje przy wzroście strumienia ciepła, rys. 10.



Rys.10. Częstotliwości odrywania się pęcherzyków przy wrzeniu wody w funkcji strumienia ciepła

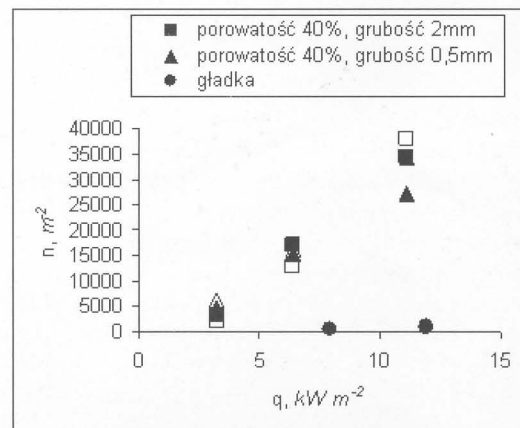
Fig.10. Frequency of departing bubbles for water vs. heat flux

4.5. Gęstość ośrodków nukleacji

Gęstość aktywnych ośrodków wrzenia wyznaczano wykonując fotografię bocznej powierzchni rury. Zdjęcia wykonywano przy dłuższych czasach naświetlania (1/10 s), co pozwoliło uwidocznnić kolumny parowe. Zastosowano zależność:

$$n = \frac{N}{0,5F} \quad (5)$$

gdzie: N - liczba widocznych na fotografii kolumn parowych, F - pole powierzchni wymiany ciepła rury.



Rys.11. Gęstość aktywnych ośrodków nukleacji w funkcji strumienia ciepła
Fig.11. Active site density vs. heat flux

Na rys.11 pokazano zależność gęstości aktywnych miejsc nukleacji od strumienia ciepła, przy jego wzroście (znaczniki pełne) i zmniejszaniu (znaczniki niewypełnione).

Liczba miejsc, w których tworzone są pęcherze wyraźnie rośnie wraz ze wzrostem strumienia ciepła, szczególnie dla powierzchni pokrytej SKP.

4.2. Analiza procesu wrzenia

Za Nakayamą [3] założono następujący mechanizm zjawiska wrzenia. Na skutek usuwania pary na zewnątrz przez odrywające się aktywne pęcherze następuje podsysanie cieczy do wnętrza struktury. Nieaktywne pory spełniają rolę elementów zasilających. Ciecz rozplywa się wzdłuż kanałów, a odparowanie następuje z menisków.

W analizie zakłada się, że pory wewnętrzne pokryte są subwarstwą cieczy. Miejscami uwalniania pęcherzy są aktywne pory, przez które wypływa wytworzona para. Proces wymiany ciepła jest dodatkowo intensyfikowany ruchem odrywających się pęcherzy parowych, które powodują dodatkowe mieszanie cieczy.

Na całkowity strumień ciepła składa się:

- strumień ciepła parowania, wynikający z odparowania warstewki cieczy wewnątrz pora, q_L
- strumień ciepła przenoszony przez konwekcję nad zewnętrzną powierzchnią pokrycia q_s

Całkowita gęstość strumienia ciepła:

$$q = q_L + q_s \quad (6)$$

Udział strumienia ciepła parowania obliczono z zależności:

$$q_L = \rho_v n f \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) h_{fg} \quad (7)$$

gdzie:

- n - gęstość aktywnych ośrodków nukleacji, m^{-2} ,
- f - częstotliwość pęcherzy pary w chwili oderwania, Hz,
- R - promień pęcherzy pary w chwili oderwania, m
- ρ_v - gęstość pary, $kg\ m^{-3}$
- h_{fg} - ciepło parowania, $J\ kg^{-1}$,

Gęstość strumienia ciepła przenoszonego przez konwekcję nad zewnętrzną powierzchnią próbki wyliczono z zależności przedstawionej przez Haidera i Webba [4]:

$$q_s = 2(\pi \lambda_l \rho_l c_{pl} f)^{1/2} D_d^2 n (\Delta T) \left[1 + (0,66 \pi C / Pr_l^{1/6})^k \right]^{1/k} \quad (8)$$

gdzie:

- λ_l - przewodność cieplna cieczy, $W\ K^{-1}\ m^{-1}$,
- c_{pl} - ciepło właściwe cieczy, $J\ K^{-1}\ kg^{-1}$,
- D_d - średnica pęcherzy pary w chwili oderwania, m,
- ρ_l - gęstość cieczy, $kg\ m^{-3}$,
- Pr - liczba Prandtla,
- C, k - stałe: $C = 6,62$; $k = 2$.

Bazując na danych otrzymanych w procesie wizualizacji wykonano obliczenia całkowitej gęstości strumienia ciepła, q_{calc} , dla wody, etanolu i freonu 123 oraz struktur o porowatości 40%, (przykład, tabela 1).

Tabela 1. Wyniki pomiarów i obliczeń dla struktury o grubości 2 mm i wody jako czynnika wrzącego
Table 1. Results of the calculations for structure of 2 mm thickness and water as boiling agent

No	q_{exp} kWm^{-2}	ΔT K	Dane wizualizacyjne			q_{calc}		
			D_d	f	n	q_L	q_S	$q_L + q_S$
			mm	Hz	m^{-2}	kWm^{-2}	kWm^{-2}	kWm^{-2}
1	7,9	2,2	3,9	40	1274	2,1	0,1	2,2
2	11,9	2,6	4,7	43	2229	6,9	0,3	7,2
3	15,9	3,3	4,7	47	2866	9,7	0,4	10,1
4	23,9	4,6	7,9	29	3175	33,6	1,8	35,4
5	31,8	5,7	7,8	41	3981	53,4	2,7	56,1
6	47,7	7,9	7,0	40	5096	50,4	3,9	54,3

5. Wnioski końcowe

Badania wizualizacyjne są koniecznym uzupełnieniem podstawowych badań wymiany ciepła w strukturach kapilarno - porowatych. Pozwalają one na obserwację zjawisk towarzyszących wzrostowi strumienia ciepła, od konwekcji, poprzez wrzenie pęcherzykowe aż do kryzysu wrzenia. Duże wymagania stawiane są przed kamerą, która oprócz powiększenia obserwowanego obiektu musi zapewnić bardzo dużą prędkość zapisu.

Analiza wyników badań eksperymentalnych prowadzi do następujących wniosków:

- 1) Podstawową przyczyną wzrostu współczynnika przejmowania ciepła przy zwiększaniu strumienia jest, dla rury z pokryciem porowatym powiększająca się liczba aktywnych por,
- 2) Różnice w wartościach współczynnika przejmowania ciepła pomiędzy strukturami o różnych grubościach (dla tych samych wartości gęstości strumienia ciepła) powstają w wyniku różnic w rozmiarach i częstotliwościach odrywających się pęcherzy. Dla struktury o grubości 2 mm większa wartość współczynnika przejmowania ciepła wynika z większych średnic i częstotliwości odrywających się pęcherzy.
- 3) Obliczenia przeprowadzone na podstawie parametrów odrywających się pęcherzy wskazują na dominujący wpływ strumienia ciepła parowania na wartość współczynnika przejmowania ciepła.
- 4) Należy zauważyć, że najlepszym sposobem jakościowej analizy powstawania i rozwoju pęcherzy jest forma plików multimedialnych, krótkich filmów, które są efektem rejestracji ciągu kilkuset pojedynczych klatek.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych jako projekt badawczy T10B 021 23.

6. Literatura

- [1] M. Poniewski: Wrzenie pęcherzykowe na rozwiniętych mikro-powierzchniach. Wyd. PŚK, Kielce 2001.
- [2] M.E. Poniewski, T.M. Wójcik: Experimental Investigation of Boiling Heat Transfer Hysteresis on Metal Fibrous Porous Coverings. Archives of Thermodynamics 1999, Vol. 20, no. 1-2.
- [3] W. Nakayama, T. Daikoku, H. Kuwahara and T. Nakajima: Dynamic model of enhanced boiling heat transfer on porous surfaces. Part II: Analytical modelling. J. Heat Transfer 1980, Vol. 102.
- [4] L.-H. Chien, R.L. Webb: Measurement of Bubble Dynamics on Enhanced Boiling Surface. Experimental Thermal and Fluid Science 1998, Vol. 16.

Title: Visualization of boiling from enhanced micro-surfaces

Artykuł recenzowany