

ŁUKASZ J. ORMAN
Kielce University of Technology
e-mail: orman@tu.kielce.pl

BOILING HEAT TRANSFER PHENOMENON FROM AN ISOLATED NUCLEATION CENTER

Abstract

The paper discusses a method of boiling heat transfer investigation from a cavity of given geometrical dimensions. The testing method is described together with literature review on the subject. This experimental concept can be used to provide useful data on the creation and departure frequency of bubbles, thus giving more insight into the boiling phenomenon.

Keywords: boiling heat transfer, nucleation center

1. Introduction

Boiling is a mode of heat transfer during which considerable values of heat flux can be transferred at relatively low temperature differences. As a consequence, phase-change heat exchangers can be small and efficient. However, the knowledge about the physical phenomena occurring during bubbles production and departure is still insufficient.

Vapour bubbles are typically created at the cracks and pits of the heaters. However, if additional microstructural coating are applied that enhance heat transfer, then different mechanisms can influence boiling. For example, in the case of wire mesh coatings bubbles may be produced between the wires of the layer. A proper understanding of the process of bubbles' production and departure may be crucial for the design of heat exchangers and modeling of the heat transfer coefficient from such heat enhancing microstructures. Thus, enabling their wider industrial application.

2. Bubble growth and departure

The investigation of bubble growth and departure frequency is vital for proper understanding of the boiling phenomena and the development of a dynamic model of the boiling process. An isolated nucleation site offers better insight into the physics of bubble growth and departure than experiments on tubes or flat surfaces with many cavities as it eliminates the interaction of the surrounding active nucleation sites. As a consequence, a correlation for boiling heat flux can be produced that would apply to a number of different microstructural coatings.

Yoon et al. [1] considered the numerical approach and presented results for the growth rate of bubbles, departure radius of the bubble as well as the heat transfer. The authors claim a good congruence with experimental data. Shoji et al. [2] tested boiling phenomenon on artificial surfaces with different cavity shapes, sizes and spacing. The experiments focused, among others, on bubble behavior and the fluctuations of surface temperature. The considered shapes of the cavities were conical, cylindrical and reentrant. It was concluded that the diameter of the cavity as well as the fluctuation of temperature has a negligible effect on the bubble behavior as opposed to cavity spacing which has strong impact. Lee et al. [3] conducted research of boiling of R11 and R113 on a microheater maintained at constant temperature. The experiments considered bubble growth on such a surface with a high speed camera. The authors proposed a correlation for a radius of the bubble. In [4] the authors used their dimensionless scales regarding the radius and times in order to analyse a bubble departure radius as well as time. The results from the theoretical approach were compared to experimental data. It was concluded that the proposed relation for high and low Jacob numbers may quite successfully describe the process of departing bubbles' behavior. Siedel et al. [5] studied boiling of pentane on one or two adjacent sites. A high speed camera has been used to record bubbles growing at different superheats. The samples were placed on a cylinder with a heater through which heat was conducted to the sample. The sample had the diameter of 18 mm and the height of 40 μm . The nucleation site was produced using mechanical indentation. Its

depth was 500 μm and diameter 180 μm . It was found that the detachment volume was independent of the superheat, while the growing time was. Moreover, it was also concluded that a bubble which leaves the surface impacts the growth of the next bubble. What is more, bubble frequency proved to be generally proportional to the superheat. The phenomenon of coalescence of neighbouring bubbles seemed not to have a significant influence on vapour generation. Hutter et al. [6] experimentally analysed boiling of FC-72 on a silicon chip, on which artificial cavities had been made. The cavities were of cylindrical shape with diameter of 10 μm and depths of 40, 80, 100 μm . The authors found out that departure diameter rose with wall superheat. The cavity depth and pressure proved to have no impact. It was also concluded that waiting times decreased as superheat rose and no noticeable impact of cavity depth or pressure was observed. The authors estimated evaporative heat flux based on bubbles' departure frequencies and diameters. Phan et al. [7] proposed a model that considers the effect of the contact angle on departure of bubbles from a horizontal surface. It was concluded that in the case of wetted surfaces the departure diameter is dependent on the contact angle in the form of $\tan \theta^{-(1/6)}$.

Although the analysis of an insulated nucleation site is very helpful in understanding the process of vapour bubbles production, the heaters in practical applications may have a great many such sites. Consequently, it is vital to study also the interaction between the neighbouring sites and how the bubbles growing next to each other influence one another during their growth and departure. One of the works on the problem of bubbles' interaction was presented by Chatpun et al. [8]. The authors studies two kinds of cavity arrangement: inline and triangular pattern. It was reported that both spacing and arrangement have an impact on the departure frequency and bubble diameter. The cavities were of cylindrical shape. The diameter was 10 μm and the depth 80 μm . The spacing between the centers of the cavities ranged from 1 to 4 mm. Smallest spacing provided highest departure frequencies. The best performance in terms of heat flux as a function of superheat was observed for the inline patter and the spacing of 3 mm.

3. Experimental stand

The analysis of boiling heat transfer has been conducted by the author in many scientific works – both on the isothermal and non-isothermal surfaces. For example in [9] boiling on the copper fin was studied. Figure 1 presents the image of the fin, to which heat was

supplied on one side producing a temperature gradient along its length. Consequently, a few types of boiling patterns can be present as shown on the photo below.

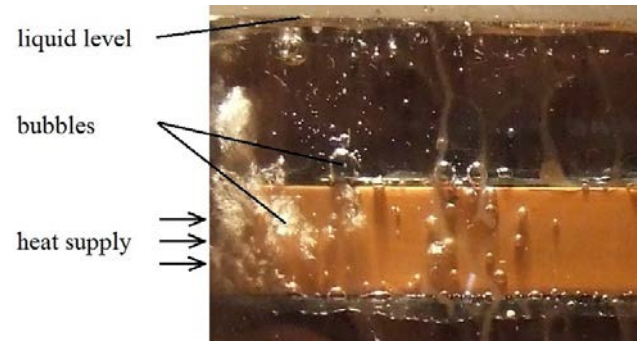


Fig. 1. Bubbles on a non-isothermal surface

At the base of the fin, where superheat is highest, a vapour blanket may be produced. As the temperature differences become lower isolated bubbles are present on the surface. They can be produced at the cracks on the surface. Further along the fin the heat transfer takes place as convection without phase change. The analysis of the temperature distribution on the other side of the fin provides information on the temperature gradient along it. This enables to determine boiling curves according to the procedure presented in [10]. Figure 2 presents an example superheat gradient along the copper fin recorded with an infrared camera. Superheat is defined as the difference between surface temperature and the saturation temperature of the boiling liquid – in this case distilled water.

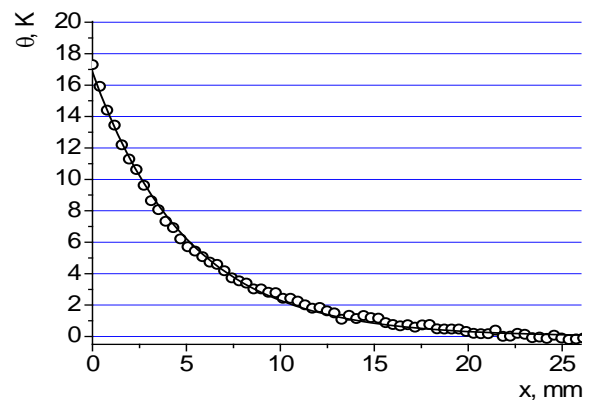


Fig. 2. Example superheat gradient along the fin

The experimental concept described earlier does not provide a good chance of visualization studies since coalescence of bubbles occurs and they are also created at different locations such as the edges. As a result, the effective visualization studies should be performed on a different stand – presented schematically below in Figure 3.

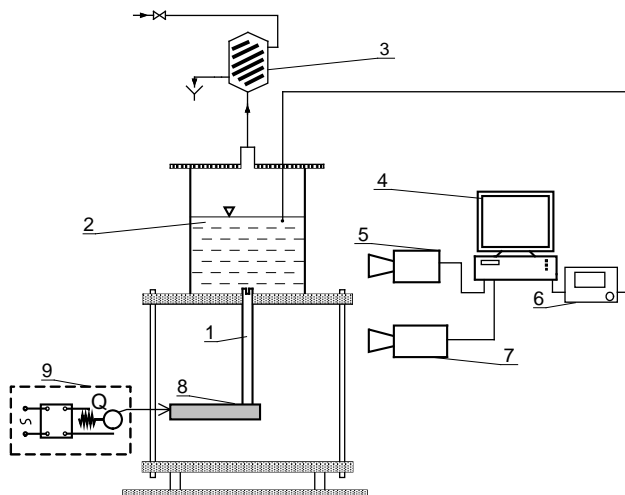


Fig. 3. Experimental stand: 1 – sample, 2 – glass vessel with boiling liquid, 3 – condensation unit, 4 – data acquisition system, 5 – high speed digital camera, 6 – temperature measuring unit, 7 – infrared camera, 8 – electric heater, 9 – autotransformer

The concept is based on using a copper element of 2 mm diameter (1) in which cavities of different geometry are drilled. This sample is heated using electric cartridge heaters in a copper block (8) supplied with electric power through an autotransformer. In this way the power and, consequently, the heat flux can be changed during the experiment. The experiments can be carried out under saturated or subcooled boiling conditions. The auxiliary heater located in the vessel enables to maintain stable saturated conditions. The generated vapour is recovered in the condensation unit supplied with cold water. The heat flux can be assessed through the analysis of the temperature distribution along the sample (1) with a thermovision camera. The copper sample is covered along its length with a special black paint of high emissivity. The measurements conducted with a high speed camera (5) contain information about the frequency of bubble departure, growth and waiting times as well as geometrical parameters of the produced bubbles. The temperature of the liquid in the vessel is controlled with the K type thermocouple.

The high speed camera produces images at extremely high rate, thus, the process of bubble formation and departure can be studied in detail. The software for data analysis enables to do it efficiently.

4. Conclusions

The phenomenon of boiling heat transfer and the mechanisms that govern the process of bubble development on heating surfaces are still not completely understood. Due to a large number of industrial applications of phase change heat exchangers a broader

knowledge should be looked for and more research is welcome. The proposed experimental method enables to obtain detailed information on the process of bubble growth and departure from a cavity of different shapes while simultaneously determining heat flux transferred from the heater.

References

- [1] Yoon H.Y., Koshizuka, S., Oka, Y.: *Direct calculation of bubble growth, departure, and rise in nucleate pool boiling*, International Journal of Multiphase Flow, 27 (2001), pp. 277-298.
- [2] Shoji M., Mosdorf R., Zhang L., Takagi Y., Yasui K., Yokota M.: *Features of boiling on an artificial surface - bubble formation, wall temperature fluctuation and nucleation site interaction*, J. of Thermal Science, Vol. 11 (3) (2002), pp. 226-234.
- [3] Lee H.C., Oh B.D., Bae S.W., Kim M.H.: *Single bubble growth in saturated pool boiling on a constant wall temperature surface*, International Journal of Multiphase Flow, 29 (2003), pp. 1857-1874.
- [4] Kim J., Kim M.H.: *On the departure behaviors of bubble at nucleate pool boiling*, International Journal of Multiphase Flow, 32 (2006), pp. 1269-1286.
- [5] Siedel S., Cioulachtjian S., Bonjour J.: *Experimental analysis of bubble growth, departure and interactions during pool boiling on artificial nucleation sites*, Experimental Thermal and Fluid Science, 32 (2008), pp. 1504-1511.
- [6] Hutter C., Kenning D.B.R., Sefiane K., Karayiannis T.G., Lin H., Cummins G., Walton A.J.: *Experimental pool boiling investigations of FC-72 on silicon with artificial cavities and integrated temperature microsensors*, Experimental Thermal and Fluid Science, 34 (2010), pp. 422-433.
- [7] Phan H.T., Caney N., Marty P., Colasson S., Gavillet J.: *A model to predict the effect of contact angle on the bubble departure diameter during heterogeneous boiling*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37 (2010), pp. 964-969.
- [8] Chatpun S., Watanabe M., Shoji M.: *Experimental study on characteristics of nucleate pool boiling by the effects of cavity arrangement*, Experimental Thermal and Fluid Science, 29 (2004), pp. 33-40.
- [9] Orman Ł.J.: *Measurements of boiling heat transfer on a single fin*, Structure and Environment, Kielce University of Technology, Vol. 3 (1) (2011), pp. 47-51.
- [10] Orzechowski T.: *Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrach z mikropowierzchnią strukturalną*, Wydawnictwo PŚk, Kielce 2003.

Acknowledgement

Work in the article was funded by statutory research of the Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering of Kielce University of Technology, No. 05.0.07.00/2.01.01.01.0033 MNŚP.IKSI.16.003.

Łukasz J. Orman

Wymiana ciepła przy wrzeniu dla wyodrębnionego centrum nukleacji

1. Wstęp

W przypadku wrzenia pęcherzykowego wymienne gęstości strumienia ciepła są bardzo duże, a różnice temperatur dość niewielkie. Wymienniki wykorzystujące zjawisko zmiany fazy są wysoce wydajne, jednak wiedza na temat zjawiska wrzenia jest nadal niepełna, a znajomość mechanizmów tworzenia się i odrywania pęcherzy może być istotna do prawidłowego projektowania tego typu wymienników ciepła.

Generalnie można stwierdzić, że pęcherze parowe tworzą się w rysach czy zagłębieniach powierzchni. Jednak w przypadku zastosowania pokryw intensyfikujących wymianę ciepła inne czynniki mogą mieć wpływ na proces wrzenia, np. w pokryciach siatkowych pęcherze mogą tworzyć się pomiędzy drutami siatki.

2. Wzrost i odrywanie się pęcherzy parowych

Badania dotyczące procesu wzrostu i częstotliwości odrywania się pęcherzy parowych są przedmiotem prac teoretycznych i eksperymentalnych. Yoon i in. [1] rozważali zagadnienie tempa wzrostu pęcherzy i ich średnicę w oparciu o analizę numeryczną. Shoji i in. [2] badali wrzenie na powierzchni ze sztucznymi zagłębieniami o różnych kształtach, rozmiarach i wzajemnej odległości między nimi. Podano, że zarówno średnica otworu, jak i fluktuacje temperatury mają pomijalny wpływ na tworzenie pęcherzy – w przeciwieństwie do odległości między otworami, która wykazała znaczący wpływ. Lee i in. [3] prowadzili badania wrzenia czynników chłodzących na mikrogrzejniku o stałej temperaturze. W pracy analizowano wzrost pęcherzy przy użyciu szybkiej kamery. Autorzy podali korelację na określenie promienia pęcherza. W [4] analizowano promień odrywającego się pęcherza parowego, a rozważania teoretyczne porównano z badaniami eksperymentalnymi. Siedel i in. [5] rozpatrywali wrzenie pentanu na powierzchni z jednym i dwoma otworami. Średnica próbek to 18 mm, a wysokość 40 μm . Podano, że pęcherz, który odrywa się z powierzchni wpływa na pęcherz dopiero co tworzący się w tym samym miejscu. Co więcej,

częstotliwość odrywania się pęcherzy była generalnie proporcjonalna do przegrzania. Hutter i in. [6] badali wrzenie FC-72 na krzemowej płytce z otworami o przekroju cylindrycznym o średnicy 10 μm i głębokościach 40, 80, 100 μm . Podano, że średnica pęcherza w momencie oderwania rosła wraz ze wzrostem przegrzania, natomiast głębokość otworu nie miała wpływu na obserwowane zjawisko. Phan i in. [7] zaproponowali model dotyczący odrywających się pęcherzy z poziomej powierzchni.

Należy zwrócić uwagę, że analiza procesu tworzenia się pęcherzy w pojedynczych otworach jest istotna, to jednak interakcja między sąsiadującymi otworami jest równie ważna. Jedną z prac na ten temat jest artykuł Chatpuna i in. [8], w którym autorzy rozpatrywali dwa rodzaje wzajemnego ułożenia cylindrycznych otworów na powierzchni grzejnej. Podano, że ułożenie to wpływa na częstotliwość odrywania pęcherzy i ich średnicę. Średnica otworów w próbkach to 10 μm , a głębokość 80 μm . Odległości między środkami otworów zmieniano w zakresie 1-4 mm. Najmniejsza odległość prowadziła do największej częstotliwości odrywania się pęcherzy.

3. Stanowisko badawcze

Wymiana ciepła przy wrzeniu była tematem prac badawczych autora – zarówno na powierzchniach izotermicznych, jak i nieizotermicznych. Przykładowo w [9] analizowano wrzenie na powierzchni żebra. Rysunek 1 przedstawia miedziane żebro, na którym widoczne są pęcherze parowe. W związku z dostarczaniem ciepła tylko z jednej strony na długości badanego elementu pojawia się gradient temperatury, który można mierzyć kamerą termowizyjną. Umożliwia on wyznaczenie krzywych wrzenia zgodnie z metodologią podaną w [10].

Badania wzrostu i odrywania się pęcherzy na przedstawionym powyżej żebrze są utrudnione, stąd pojawia się konieczność realizacji badań na innym układzie pomiarowym. Rysunek 3 przedstawia schemat stanowiska, które służy do analizy procesu tworzenia, wzrostu i odrywania się pęcherzy z izolowanego centrum enukleacji. W konsekwencji unika się wpływu

sąsiednich centrów, zjawiska łączenia pęcherzy itp. Koncepcja stanowiska polega na wykorzystaniu miedzianych próbek o średnicy 2 mm (1) z wydrążeniami o różnej średnicy i głębokości. Element ten jest ogrzewany za pomocą grzejników elektrycznych zlokalizowanych w miedzianym walcu (8). Moc elektryczna regulowana jest autotransformatorem. Wrzenie odbywa się w zbiorniku, w którym zamontowany jest dodatkowy grzejnik elektryczny, utrzymujący temperaturę saturacji w całej objętości. Generowana para jest skraplana, a skropliny zawracane do układu. Pomiar rozkładu temperatury na długości próbki niesie informację o strumieniu ciepła i jest dokonywany kamerą termowizyjną. Badania procesu tworzenia, wzrostu i odrywania pęcherzy parowych realizowane są poprzez zastosowanie szybkiej kamery cyfrowej (5), współpracującej z oprogramowaniem do analizy uzyskanych obrazów. Pomiar temperatury cieczy wrzącej odbywa się za pomocą termopary typu K.

4. Wnioski

Zjawisko wymiany ciepła przy wrzeniu i mechanizmy rządzące procesem tworzenia i wzrostu pęcherzy parowych nie są w pełni wyjaśnione. W związku z szerokim zastosowaniem wymienników pracujących w oparciu o zmianę fazy czynnika należy prowadzić dalsze badania i analizy w celu pełniejszego zrozumienia fizyki analizowanych zjawisk. Prezentowane w pracy stanowisko badawcze może przyczynić się do zwiększenia bazy eksperymentalnej w zakresie wpływu parametrów geometrycznych centrum enukleacji na wymianę ciepła przy wrzeniu.