

ŁUKASZ J. ORMAN

Kielce University of Technology,
Faculty of Civil and Environmental Engineering
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland

e-mail: orman@tu.kielce.pl

MEASUREMENTS OF BOILING HEAT TRANSFER ON A SINGLE FIN

Abstract

Heat exchangers are part of mechanical devices. It is often important to determine the heat transfer characteristics of such exchangers to enable their proper design and operation. The article presents a combination of modern measuring techniques based on infrared technology and visualisation studies of boiling heat transfer on a fin – a basic heat exchanging element. The results obtained for distilled water are compared with a selected model of boiling from literature.

Keywords: boiling, heat transfer

1. Introduction

Boiling is a highly effective mode of heat transfer, which enables to dissipate significant amounts of heat – up to 10^6 W/m² and more. Consequently, attention is now paid to research into boiling due to a need to find efficient ways of cooling electronic or mechanical devices. It is also possible to produce smaller and more effective heat exchangers for refrigeration industry if boiling on specially prepared surfaces is applied.

Measurements of boiling heat transfer are almost always conducted on isothermal surfaces. Only a few works deal with boiling on non – isothermal surfaces, which are most often encountered in practical applications. Thus, it is necessary to carry out tests on a non – isothermal surface of a fin to determine a true nature of heat transfer in heat exchangers working with a change of phase of a coolant.

Boiling heat transfer is traditionally described with a boiling curve, which is a dependence of heat transfer coefficient or heat flux on wall superheat. The superheat is defined as a difference between saturation temperature of the liquid and surface temperature.

If the temperature of the heater surface is elevated over the boiling temperature of the fluid, at first no vapour bubbles are present and heat is transferred in the natural convection mode. Then, when the liquid is slightly superheated and superheat is high enough – ca. 2 to 6°C for water [2], boiling begins and vapour bubbles get created on the surface. It is a nucleate

boiling regime. Here, a sudden rise in dissipated heat is observed and heat transfer is more and more intense as the temperature of the surface is increased further. A rise in heat flux is linked with more vapour being produced and, consequently, neighbouring bubbles join together to finally produce a vapour film which insulates the surface from the liquid. It leads to a decrease in dissipated heat flux. A new unfavourable mode of heat transfer occurs – film boiling. Any further rise in heat flux is attributed mainly to radiation heat transfer [1]. From the practical point of view the most interesting mode of heat transfer is nucleate boiling, since it offers high heat dissipation rate at small temperature differences.

2. Experimental set – up

Generally, for many years a common technique to measure boiling heat transfer has been the use of experimental stands whose electric heater increased (or decreased) the measured temperature of the surface several times to determine points on the boiling curve. The temperature at every point of the surface has had to be the same (an isothermal surface), however, modern engineering devices are usually non – isothermal and research needs to be performed on finned surfaces, which is the focus of this paper.

The presented technique has been adopted from Orzechowski [5] and used to perform measurements on a single fin. The principal element of the experimental set – up is a vertical fin (Fig. 1). It is part

of one side of a vessel, in which liquid (in the present project distilled water) is boiled. On the inside the fin is in contact with the liquid and on the other side with air – this side is observed with an infrared camera. Heat is supplied to the base of this fin by an electric heater. Consequently, there is a temperature gradient along the fin. Measurements of temperature distribution have been conducted with a long-wave (8-14 μm) infrared camera equipped with a detector of 384 x 288 pixels whose thermal resolution is 0,08 K.

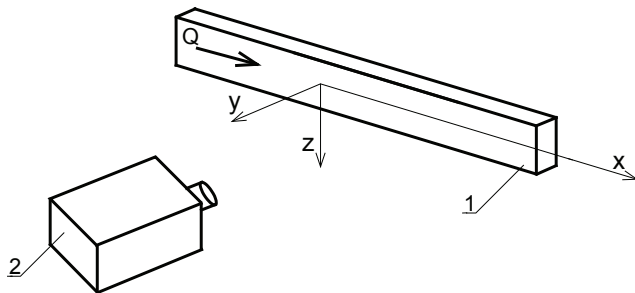


Fig. 1. Schematic of the measuring unit:
1 – fin, 2 – infrared camera [4]

Based on the temperature distribution along the fin and its numerical differentiation, assuming that boiling heat transfer coefficient depends exponentially on superheat, local values of the heat transfer coefficient are determined using a method presented by Orzechowski [5] and described below.

The formula for temperature distribution in the fin is:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = m^2 \theta^{n+1} \quad (1)$$

which was analysed by Ünal in [7].

Parameter m^2 is defined as:

$$m^2 = \frac{aP}{\lambda F} \quad (2)$$

P and F stand for the circumference and area of the fin, respectively, while λ is the thermal conductivity of the fin's material. θ is a difference between surface temperature and saturation temperature of the liquid. Constants a and n are determined experimentally, which leads to the formula for heat transfer coefficient, according to the equation:

$$\alpha = a \theta^n \quad (3)$$

Differentiation of (1) leads to the relation for superheat gradient along the fin, which in logarithmic coordinates takes the form of:

$$\ln\left(\frac{d\theta}{dx}\right)^2 = \ln\left(\frac{2m^2}{n+2}\right) + (n+2) \ln \theta \quad (4)$$

For fins whose length is considerable no heat transfer at the tip can be assumed. In this case integration contact C is 0, as considered in (4).

From (3) the presented technique enables to determine the boiling curve as a function of local values of heat transfer coefficient and superheat based on the temperature distribution along the fin.

Figure 2 presents the temperature distribution on the smooth fin from Figure 1. It can be readily noticed that boiling heat transfer is very effective in cooling the element – temperature drops very close from the base of the fin and reaches the saturation temperature.

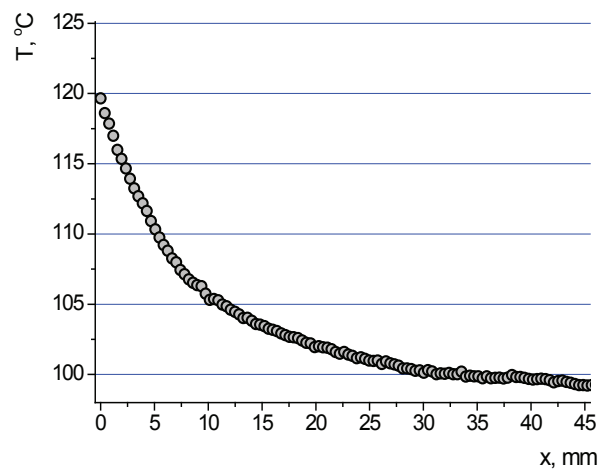


Fig. 2. Temperature distribution along the fin

Visualisation studies conducted from the liquid side of the fin (Fig. 3) reveal that there are two modes of heat transfer present on the fin. At first nucleate boiling regime is observed, which is a highly efficient way of dissipating heat. Here, bubbles and vapour columns are formed as seen in the picture (Fig. 3).

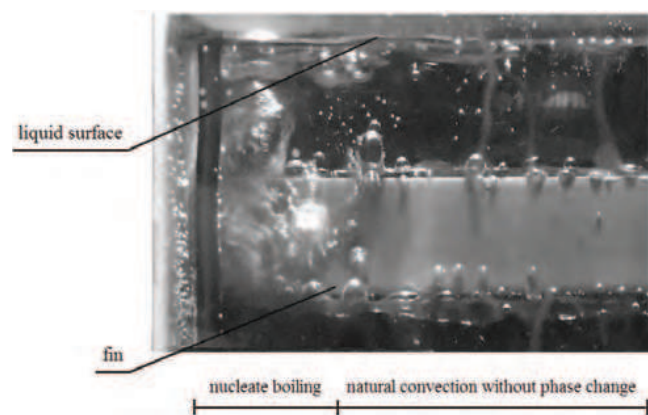


Fig. 3. Heat transfer modes on the fin

Then, heat is transferred through natural convection without phase change. A few bubbles are observed only on the edge of the sample and a sealing. Comparison

on the temperature distribution for the smooth copper fin and the visualisation studies of the boiling modes leads to a conclusion that a change from nucleate boiling into natural convection occurs at superheats of a few Kelvin, which is in agreement with the literature data mentioned earlier [2], so water in the presented experiment is still slightly superheated in the area of the fin where heat is dissipated by natural convection (and just behind the boiling area).

3. Comparison of the experimental results with the model

The method described above enables to determine the relationship for the heat transfer coefficient and, consequently, for heat flux (based on the Newton law). The obtained results will be compared with literature data.

One of the models of boiling heat transfer is based on the assumption of forced convection, which has been applied by Forster and Zuber [3]. They used their own equations for vapour bubble growth and determined that the Reynolds number does not depend on the bubble radius. The equation for heat flux is:

$$q = 0.00122 \left(\frac{\lambda_l^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} r^{0.24} \rho_v^{0.24}} \right) \theta^{1.24} \Delta P_{sat} \quad (5)$$

where indices l , v , w , sat stand for liquid, vapour, wall and saturation, respectively, while μ is dynamic viscosity, ρ – density, σ – surface tension, r – latent heat of vaporisation, c_p – specific heat and ΔP – difference in saturation pressure corresponding to a difference in saturation temperature equal to the superheat.

Another model was proposed by Rohsenow [6]. Here, heat transfer is affected by the movement of vapour bubbles in the vessel. It is related to the suction of liquid behind bubbles and the creation of convective currents. Consequently, the phenomenon can be modelled as a single phase forced convection. Heat flux can be calculated from the following formula:

$$q = \left(\frac{c_{pl} \theta}{Cr} \right)^{\frac{1}{0.33}} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \mu_l r Pr_l^{-\frac{s}{0.33}} \quad (6)$$

Where the values of constants C and s differ depending on the surface morphology, its material and the kind of the boiling liquid, while Pr is the Prandtl number.

The comparison of the experimental and calculation results based on the Rohsenow model are presented in Figure 4. A good congruence is observed in the analysed superheat range.

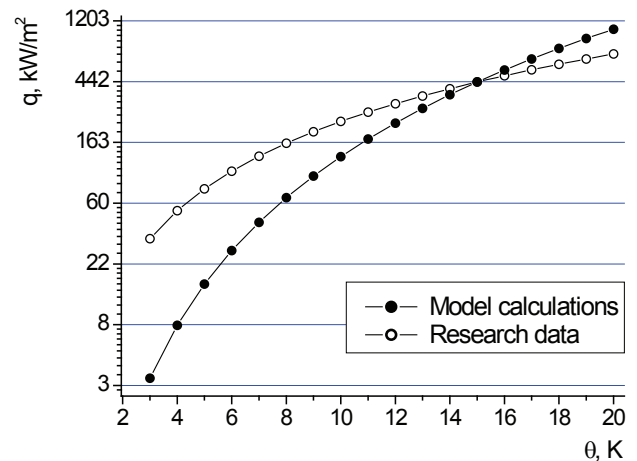


Fig. 4. Boiling curves for the investigated smooth surface and Rohsenow model calculations

4. Conclusions

Boiling heat transfer can be investigated using both temperature measurements e.g. with a thermovision camera, or visualisation studies. Each approach gives an insight into the physics of this phenomenon and enables to better understand the operation of phase change heat exchangers. It can also improve the design of such devices.

References

- [1] Carey V.P.: *Liquid–vapor phase–change phenomena*. An introduction to the thermophysics of vaporization and condensation in heat transfer equipment, Hemisphere, 1992.
- [2] Cengel Y.A.: *Heat Transfer: a practical approach*, McGraw-Hill, 2003.
- [3] Forster, H.M., Zuber N.: *Dynamics of vapor bubbles and boiling heat transfer*, AIChE J., Vol. 1, 1955, pp. 531-535.
- [4] Orman Ł.J.: *Nucleate boiling heat transfer on a smooth surface of a fin*, Proc. of Int. Conf Heat Transfer and Renewable Sources of Energy, 2008, pp. 363-369.
- [5] Orzechowski T.: *Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrach z mikropowierzchnią strukturalną*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2003.
- [6] Rohsenow W.M.: *A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids*, Trans. ASME, vol. 74, 1952, pp. 969-975.
- [7] Ūnal H.C.: *Determination of the temperature distribution in an extended surface with non – uniform heat transfer coefficient*, Int J Heat Mass Transfer, vol. 28, 1985, pp. 2279-2283.

Łukasz J. Orman

Badania wymiany ciepła przy wrzeniu na pojedynczym żebrze

1. Wprowadzenie

Wymiana ciepła przy wrzeniu umożliwia odprowadzanie znacznych gęstości strumienia ciepła. W związku z tym proces ten jest bardzo interesujący z punktu widzenia poszukiwania nowych możliwości odprowadzania dużych ilości ciepła z urządzeń elektronicznych czy mechanicznych. Możliwe jest również wytwarzanie mniejszych i bardziej efektywnych wymienników ciepła dla przemysłu chłodniczego, jeśli wrzenie będzie odbywać się na specjalnie zaprojektowanych powierzchniach.

Badania wymiany ciepła są zwykle prowadzone na powierzchniach izotermicznych. Niewiele prac dotyczy powierzchni nieizotermicznych, które w praktyce spotykane są najczęściej. W związku z tym należy prowadzić badania właśnie na takich powierzchniach żeber, celem poszerzenia wiedzy na temat analizowanego zjawiska.

Wrzenie rozpoczyna się, gdy temperatura powierzchni zanurzonej w cieczy będzie wyższa niż temperatura nasycenia tej cieczy. Na początku nie pojawiają się pęcherze, a wymiana ciepła odbywa się w drodze konwekcji swobodnej. Później, gdy ciecz jest nieznacznie przegrzana (dla wody wymagane przegrzanie to ok. 2 do 6°C [2]) następuje tworzenie pęcherzy parowych na powierzchni. Jest to wrzenie pęcherzykowe. W tym obszarze wymiana ciepła jest intensywna, a wraz ze wzrostem dostarczanego strumienia ciepła rośnie ilość wytwarzanej pary. Sąsiednie pęcherze łączą się, aż wreszcie na powierzchni wytwarza się film parowy izolujący ją od cieczy. Wówczas gęstość odbieranego strumienia ciepła obniża się. Jest to wrzenie błonowe. Dalszy wzrost gęstości strumienia ciepła odprowadzanego z powierzchni jest związany z radiacyjną wymianą ciepła [1]. Z praktycznego punktu widzenia największe znaczenie ma wrzenie pęcherzykowe.

2. Procedura eksperymentalna i wyniki badań

Przez wiele lat badania wymiany ciepła prowadzono na stanowiskach, w których grzejnik elektryczny regulował temperaturę powierzchni celem wyznaczenia kolejnych punktów na krzywej wrzenia, czyli zależności gęstości strumienia ciepła lub współczynnika przejmowania ciepła od temperatury.

Zaprezentowana technika w niniejszym artykule pochodzi z pracy [5]. Podstawowym elementem jest żebro (rys. 1). Stanowi ono część ścianki bocznej naczynia z wrzącą cieczą. Żebro z jednej strony jest w kontakcie z cieczą, a z drugiej z powietrzem i ta strona jest obserwowana kamerą termowizyjną. Ciepło dostarcza się do podstawy żebra. W konsekwencji tworzy się gradient temperatury na długości. W oparciu o zmierzony kamerą termowizyjną rozkład temperatury wyznacza się lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła według metodyki zaprezentowanej przez Orzechowskiego [5].

Rysunek 2 przedstawia rozkład temperatury na powierzchni gładkiego żebra. Łatwo można zauważyć, że wrzenie jest bardzo efektywne do chłodzenia rozpatrywanego elementu. Temperatura spada blisko podstawy i osiąga temperaturę nasycenia.

Badania wizualizacyjne wykonane od strony cieczy (rys. 3) ujawniają istnienie dwóch rodzajów wymiany ciepła na żebrze: wrzenia pęcherzykowego przy podstawie z widocznymi pęcherzami parowymi, a dalej konwekcji swobodnej.

3. Porównanie wyników z modelem

W oparciu o przedstawioną metodę można wyznaczyć lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła i porównanie otrzymanych wyników z danymi literaturowymi. Jednym z modeli, opartym o założenie konwekcyjnej wymiany ciepła (konwekcja wymuszona) jest zależność zaproponowana przez Fostera i Zuberę [3]. Można również skorzystać

z modelu Rohsenowa [6], w którym zakłada się, że na wymianę ciepła wpływa ruch pęcherzy w cieczy. Porównanie wyników badań z obliczeniami modelowymi prezentuje rysunek 4, na którym można zaobserwować zgodność obydwu wielkości.

4. Wnioski

Wymiana ciepła przy wrzeniu może być analizowana w oparciu o rozkład temperatury na rozpatrywanym elemencie czy badaniach wizualizacyjnych. Obydwie metody dają pogląd na zachodzące procesy i umożliwiają ich lepsze zrozumienie. W oparciu o wyniki takich badań możliwe jest lepsze projektowanie wymienników ciepła, działających w oparciu o zmianę fazy czynnika.