

## WNIKANIE CIEPŁA PRZY WRZENIU CIECZY

### 1. Wprowadzenie

Z wrzeniem cieczy jednoskładnikowej A mamy do czynienia wówczas, gdy proces przechodzenia cząstek cieczy w parę zachodzi w takiej temperaturze, w której prężność pary nasyconej danej cieczy  $p_A^0$  jest większa od ciśnienia w otaczającej przestrzeni  $P$ . Ciśnienie  $P$  jest sumą ciśnienia w fazie gazowej nad cieczą  $P_z$  i ciśnienia hydrostatycznego  $P_h$ . Znak nierówności we wzorze (1) jest związany z koniecznością przewyższenia sił napięcia powierzchniowego, które przeciwdziałają tworzeniu się i wzrostowi pęcherzyków pary.

$$p_A^0 > P_z + P_h = P. \quad (1)$$

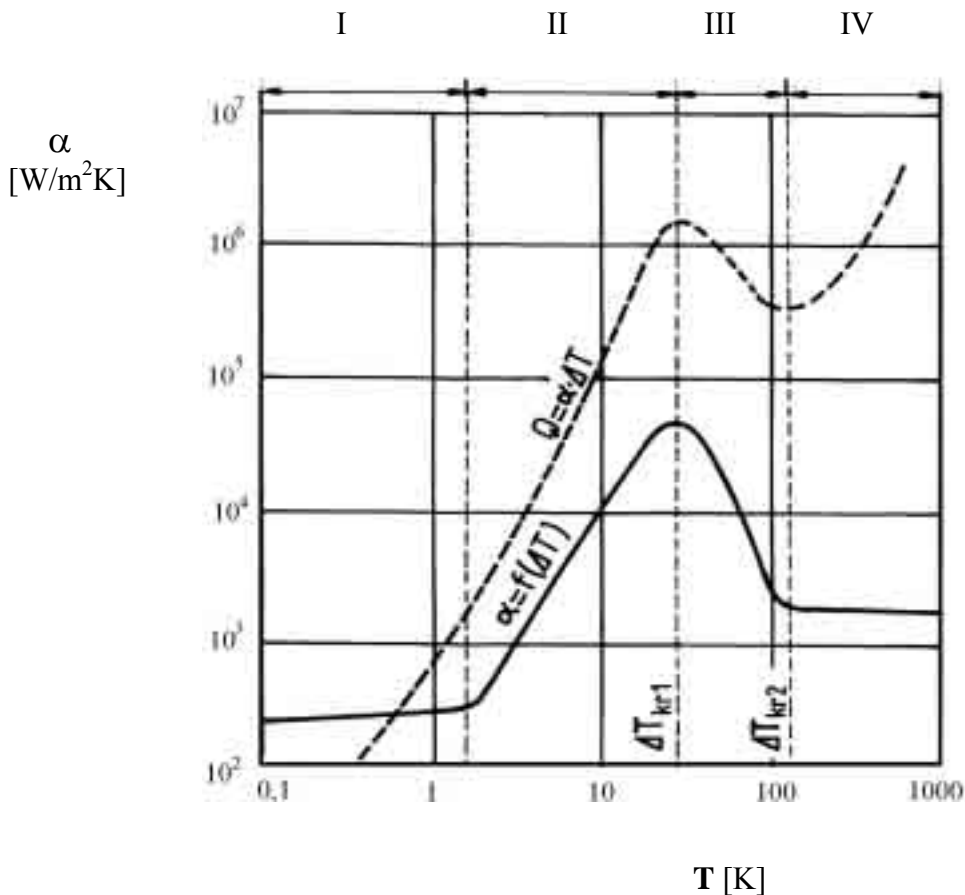
W układach wieloskładnikowych z wrzeniem cieczy do czynienia mamy wówczas, gdy proces przechodzenia cząstek cieczy w parę następuje w takiej temperaturze, w której suma prężności parcjalnych wszystkich składników układu jest większa od ciśnienia w otaczającej przestrzeni

$$\sum_1^n P_i > P = P_z + P_h \quad (2)$$

Wrzenie cieczy występuje wówczas, gdy pęcherzyki fazy parowej tworzą się zarówno na powierzchni grzejnej, jak i w masie cieczy. Temperatura pary w pęcherzyku, zwana temperaturą nasycenia  $T_s$ , zależy od rodzaju cieczy i ciśnienia  $P$ . Przy  $P = \text{const}$  temperatura nasycenia ma dla poszczególnych cieczy określoną wartość, która jest stałą podczas całego procesu wrzenia.

Jakob rozróżnia dwa rodzaje wrzenia cieczy: wrzenie pęcherzykowe i wrzenie filmowe. Jeżeli wrząca ciecz dobrze nawilża powierzchnię grzejną, to podmywa tworzące się pęcherzyki parowe, które wtedy mają kształt kulisty i punktowo dotykają powierzchni, co powoduje łatwe ich odrywanie się. Jeżeli natomiast wrząca ciecz źle zwilża powierzchnię grzejną, to pęcherzyki pary mają kształt bardziej spłaszczony i przylegają na znacznej powierzchni do ściany.

Zależność obciążenia cieplnego powierzchni grzejnej  $q = \alpha \Delta T$  oraz współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  od różnicy temperatur  $\Delta T = T_{sc} - T_s$  dla wrzącej pod ciśnieniem  $P = 1.01325 \cdot 10^5$  Pa ( $P = 1 \text{ atm}$ ) wody destylowanej przedstawia rys.1. Z rysunku widać, że podczas słabego ogrzewania powierzchni grzejnej (małe  $q$ , małe  $\Delta T$ ) współczynniki wnikania ciepła  $\alpha$  są mniejsze od  $10^3$ , a zatem są tego samego rzędu co podczas ruchu



Rys.1. Wykres zależności  $\alpha=f(\Delta T)$  i  $q=f(\Delta T)$  dla wody destylowanej wrzącej pod ciśnieniem  $P=1.01325 \cdot 10^5$  Pa  
 I- wrzenie w warunkach ruchu swobodnego cieczy, II- wrzenie pęcherzykowe,  
 III-nietrwale wrzenie filmowe, IV- trwałe wrzenie filmowe

ciepła w warunkach konwekcji naturalnej. Prądy konwekcyjne powodują ruch cieczy do góry, gdzie odparowuje ona na powierzchni do otoczenia.

Po przekroczeniu  $\Delta T = 5\text{K}$  i  $q = 6 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$  współczynniki  $\alpha$  silnie wzrastają i dla  $\Delta T = 25\text{K}$  i  $\dot{q} = 1.45 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$  osiągają bardzo dużą wartość  $\alpha = 6 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dla zakresu  $\Delta T = 5\text{--}25\text{K}$  charakterystyczne jest tworzenie się pęcherzyków pary na powierzchni grzejnej, przy czym równoległe ze wzrostem  $\Delta T$  lub  $q$  zwiększa się liczba ośrodków produkujących pęcherzyki pary. Po przekroczeniu  $\Delta T = 25\text{K}$  wrzenie pęcherzykowe przechodzi w nietrwale wrzenie filmowe, któremu towarzyszy zmniejszenie się współczynników  $\alpha$  i natężenia strumienia cieplnego  $\dot{q}$ . Jest to spowodowane zmniejszaniem się efektywnej powierzchni grzejnej, wywołane wzrastającym stopniem pokrycia powierzchni przez parę. Szczegółowe omówienie mechanizmu wrzenia cieczy można znaleźć w literaturze [2] s. 80-84.

Dla pęcherzykowego wrzenia cieczy w dużej objętości Krużylin wyprowadził teoretycznie wzór na współczynnik wnikania ciepła:

$$\alpha = 7.77 \cdot 10^{-2} \left( \frac{\rho_p r}{\rho_c - \rho_p} \right)^{0.033} \left( \frac{\rho_c}{\sigma} \right)^{0.333} \frac{\lambda_c^{0.75} q^{0.7}}{\eta_c^{0.45} c_p^{0.12} T_s^{0.37}} \quad (3)$$

Wzór ten może być stosowany do obliczenia współczynników wnikania ciepła  $\alpha$  pod dowolnym ciśnieniem aż do krytycznego, a jego poprawność została potwierdzona doświadczalnie dla różnych cieczy, gdy  $\dot{q} \leq \dot{q}_{kr}$ . Parametry fizyczne wrzącej cieczy w równaniu (3) należy przyjmować w temperaturze nasycenia  $T_s$ .

Dla danej cieczy, wrzącej pod określonym ciśnieniem, wszystkie parametry fizyczne w równaniu (3) mają stałe wartości, co umożliwia sprowadzenie go do postaci  $\alpha = f(P, \dot{q})$ . Dla wody szczegółowa postać tego uproszczonego równania jest następująca:

$$\alpha = 0.56q^{0.7} P^{0.15}, \quad (4)$$

lub uwzględniając zależność  $q = \alpha\Delta T$

$$\alpha = 0.14465\Delta T^{2.33} P^{0.5} \quad (5)$$

w których P jest ciśnieniem w N/m<sup>2</sup>

## 2. Cel ćwiczenia

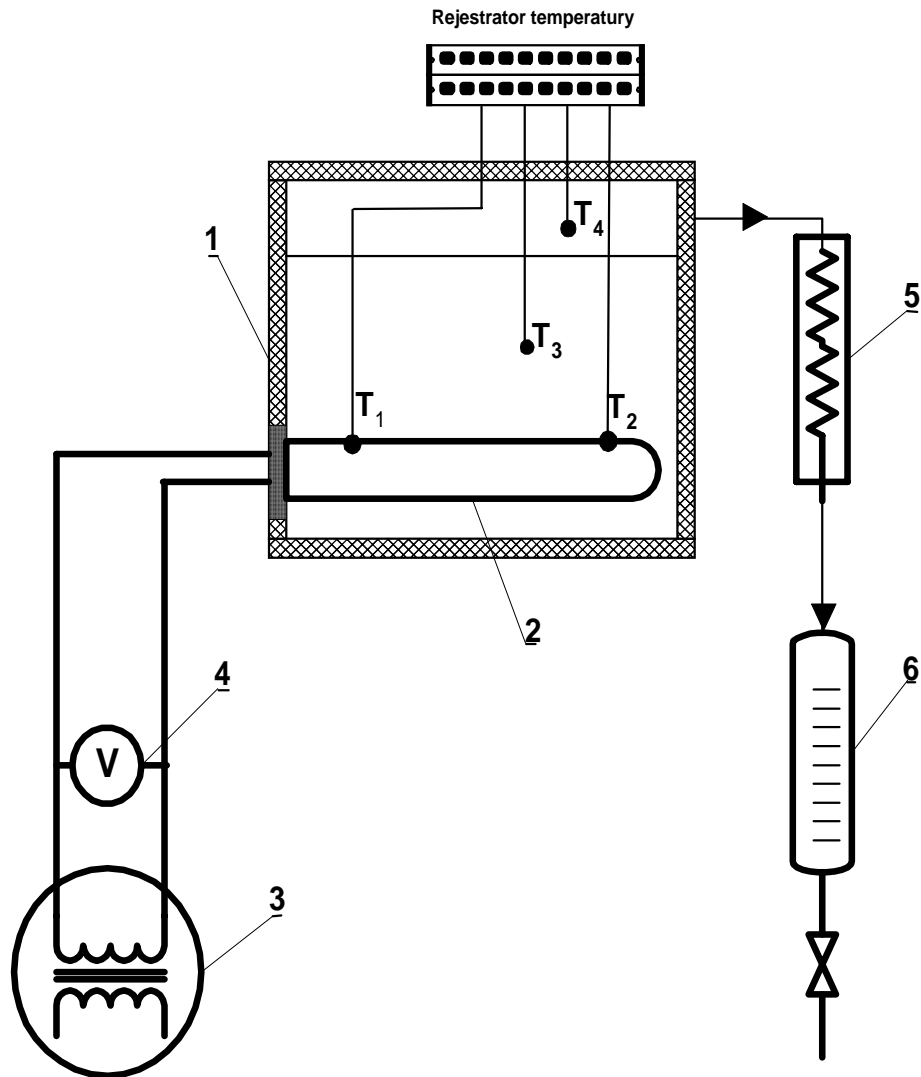
Celem ćwiczenia jest doświadczalne określenie zależności współczynnika wnikania ciepła od różnicy temperatur ścianki grzejnej i temperatury nasycenia  $\alpha = f(\Delta T)$  dla wrzenia wody destylowanej pod stałym ciśnieniem.

Wyznaczone doświadczalnie współczynniki wnikania ciepła  $\alpha_d$  należy porównać z wielkościami obliczonymi  $\alpha_{teoret}$  na podstawie wzoru Krużylina.

## 3. Aparatura

Schemat aparatury przedstawiony jest na rysunku 2. Zasadniczym elementem jest zbiornik 1, wykonany ze stali kwasoodpornej i izolowany z zewnątrz wełną szklaną.

W zbiorniku zamontowana jest grzałka 2 o oporności 24.5Ω. Ma ona kształt litery U a jej przekrój jest kołowy. Długość grzałki wynosi L=0.812 m, średnica d=0.0085 m. Napięcie zasilania ustawiane jest autotransformatorem 3 i kontrolowane woltomierzem 4. W zbiorniku umieszczone są cztery końcówki termoelementów żelazo-konstantan, służących do pomiaru temperatury.



Rys.2. Schemat aparatury doświadczalnej do badania wnikania ciepła przy wrzeniu cieczy  
 1-zbiornik, 2- grzałka, 3-autotransformator, 4-woltomierz, 5-kondensator, 6-zbiornik

Czujniki  $T_1$  i  $T_2$  są przylutowane do powierzchni grzałki,  $T_3$  -mierzy temperaturę cieczy a  $T_4$  - temperaturę oparów nad cieczą. Są one połączone z rejestratorem o zapisie ciągłym.

Para powstająca podczas wrzenia cieczy przepływa do kondensatora 5, gdzie zostaje wykroplona. Stamtąd kondensat sływa do wyskalowanego zbiornika 6.

#### 4. Metodyka pomiarów

Pomiar współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  polega na określeniu w stanie równowagi cieplnej układu:

- a) strumienia cieplnego  $Q$ ,
- b) różnicy temperatur ścianki grzejnej i wrzącej cieczy.

Współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  oblicza się za pomocą wzoru Newtona

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T, \quad (6)$$

w którym

$$\Delta T = T_{\acute{s}c} - T_{wrz} \quad (7)$$

$T_{\acute{s}c}$  - temperatura ścianki grzejnej,

$T_{wrz}$  - temperatura wrzącej cieczy,

$A$  - powierzchnia grzejna.

Strumień wymienionego podczas pomiaru ciepła oblicza się z zależności

$$\dot{Q} = \dot{m}r \quad (8)$$

gdzie:  $\dot{m}$  - natężenie odbioru kondensatu,

$r$  - ciepło parowania wrzącej cieczy,

Obliczona w ten sposób wartość  $\dot{Q}$  będzie równa tylko wówczas strumieniowi ciepła rzeczywiście wymienionego pomiędzy powierzchnią grzejną i wrzącą cieczą gdy:

- a) cała ilość odebranego kondensatu powstaje z pary wytworzonej na powierzchni grzejnej  $A$ ,
- b) cała ilość wytworzonej na powierzchni grzejnej pary dostaje się do skraplacza,
- c) w skraplaczu następuje całkowite skroplenie pary.

Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru należy wykonać następujące czynności wstępne:

- 1) napełnić zbiornik wodą destylowaną do połowy wysokości cieczowskazu,
- 2) włączyć ogrzewanie i ustalić żądane napięcie na grzałce w zbiorniku,
- 3) włączyć przepływ wody chłodzącej do skraplacza,
- 4) włączyć miernik temperatury.

Z chwilą ustalenia się równowagi cieplnej w aparaturze doświadczalnej ( stałość wszystkich temperatur w czasie). Należy rozpocząć właściwy pomiar, mierząc w czasie ilość odebranego kondensatu  $\dot{m}$  i różnicę temperatur  $\Delta T = T_{\acute{s}c} - T_{wrz}$

## 5. Opracowanie wyników pomiarów

Współczynniki wnikania ciepła  $\alpha$  dla wszystkich pomiarów oblicza się za pomocą równania (6). Pomiar różni się między sobą wielkościami  $\dot{Q}$  i  $\Delta T = T_{\acute{s}c} - T_{wrz}$ , które są wynikiem zmian napięcia na grzałce.

Sprawozdanie winno zawierać:

- 1) w układzie podwójnie logarytmicznym wykres zależności  $\alpha = f(\Delta T)$  dla wrzenia wody destylowanej,
- 2) porównanie doświadczalnych wartości  $\alpha$  z teoretycznymi, obliczonymi wg równań (3), (4) i (5).