

Tepelná bilance varu chladiva v mezikruhovém kanále s přímým ohřevem stejnosměrným elektrickým proudem

Text k úloze

Ing. Jan Štěpánek
j.stepanek@fs.cvut.cz

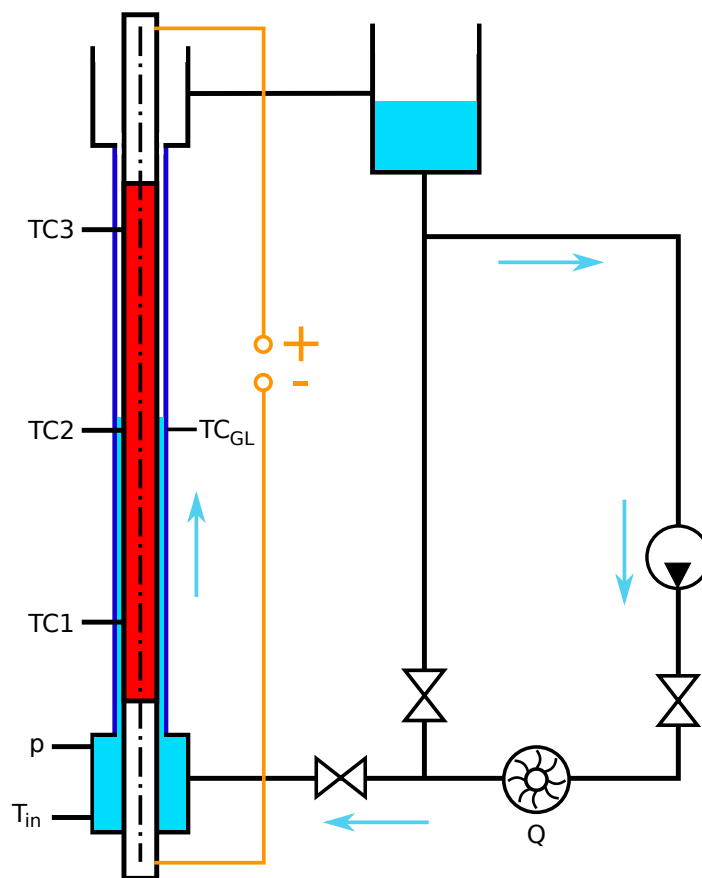
Ú12115 Ústav energetiky
FS, ČVUT v Praze

14. prosince 2017

Popis úlohy

1.1 Měřicí zařízení

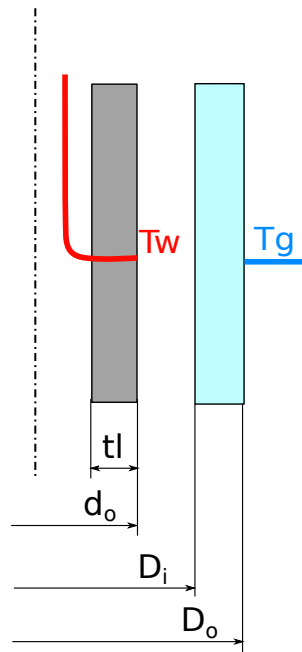
Měření probíhá na experimentálním zařízení pro studium krize přestupu tepla a problematiky přestupu tepla během smáčení vysoce rozehřátých povrchů.



Obrázek 1.1: Experimentální zařízení

Testovací sekce je tvořena ocelovou trubkou ohřívanou přímým průchodem stejnosměrného proudu, která je vložena uvnitř trubice z křemenného skla. Tato konfigurace tedy tvoří mezikruhový průtočný průřez.

Vyhřívaná trubka je po výšce osazena trojicí termočlánků typu K s roztečí 0,5m. Tyto termočlánky jsou vedeny vnitřkem trubice a jsou vpájeny přímo do otápené stěny a dávají tak informaci o povrchové teplotě trubky na jejím vnějším povrchu jak ukazuje obrázek 1.2.



Obrázek 1.2: Umístění termočlánků

1.2 Provedení experimentu

- Dle pokynů vyučujícího zaplavte testovací sekci kompletně vodou a zapojte systém sběru dat.

Měřené údaje jsou:

- Čas
 - Teploty termočlánků TC1, TC2, TC3 [$^{\circ}\text{C}$]
 - Teplota povrchu křemenné trubice TG [$^{\circ}\text{C}$]
 - Napětí na svorkách zdroje proudu U_s [V]
 - Napětí na svorkách bočnicku U_b [V]
- Na zdroji stejnosměrného proudu nastavte požadovaný topný proud (doporučeno cca 100A)
 - Spusťte sběr dat
 - Připojte zdroj k testovací sekci a začněte s ohřevem
 - Sledujte jak se voda vypařuje z testovací sekce
 - Po dosažení hladiny spodního termočlánku ukončete experiment (odpojte zdroj proudu a ukončete sběr dat)

Úkoly

Z naměřených dat spočítejte a vynesete do grafů:

- Průběhy teplot z měřících bodů
- Průběhy lineárních tepelných příkonů testovací sekce
- Plošný tepelný tok do chladiva z vytápěné trubky
- Tepelný tok skrze vnější bariéru (křemennou trubici) během varu chladiva
- Průměrné rychlosti odparu chladiva
- Průměrné hodinové parní výkony testovací sekce

Vyhodnocení

3.1 Časový krok

Výpočet ze dvou po sobě jdoucích časových údajů scanů hodnot:

$$dt = t[i] - t[i - 1] \quad (3.1)$$

3.2 Převod napětí na bočníku na proudové hodnoty

Proudový rozsah [A]	0	250
Napětí [mV]	0	50

Tabulka 3.1: Parametry bočníku

$$I[A] = 250 \cdot \frac{U_b[V] \cdot 1000}{50} \quad (3.2)$$

3.3 Výpočet výkonu jdoucího do testovací sekce

$$P[W] = U_s[V] \cdot I[A] \quad (3.3)$$

3.4 Geometrické parametry

do	9.144mm
Di	13.5mm
Do	17mm

Tabulka 3.2: Rozměry dle obrázku 1.2

Termočlánek	Pozice [mm]	Síla stěny tli [mm]
TC1	335	1.58
TC2	835	0.89
TC3	1335	0.64

Tabulka 3.3: Termočláanky v testovací sekci

- Průřez ohřívání trubky v místě termočlánku

$$A_i[mm^2] = \frac{\pi}{4} \cdot (d_o^2 - (d_o - 2 \cdot tl_i)^2) \quad (3.4)$$

- Objem ohřívání trubky na jednotku délky v místě termočlánku i

$$V_i[m^3/m] = A_i[m^2] \cdot 1 \quad (3.5)$$

- Plocha ohřívání trubky na jednotku délky

$$S_i[m^2/m] = \pi \cdot d_o[m^2] \cdot 1 \quad (3.6)$$

- Průřez křemenné trubice

$$A_g[m^2] = \frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D_i^2) \quad (3.7)$$

3.5 Derivace teplot

Vyjadřují změnu teploty v čase. Vypočteme jako jednobodové derivace pro každý časový okamžik a pro každý termočlánek jako:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T[t] - T[t - dt]}{dt} \quad (3.8)$$

3.6 Lineární tepelný příkon

c	479 J/kg/K
r	0.777 $\Omega/mm^2/m$
ρ	7882 kg/m ³

Tabulka 3.4: Vlastnosti materiálu Monel (pro 60°C)

Lineární tepelný příkon vypočteme jako Joulovo teplo ze známého odporu, geometrie a protékajícího proudu:

$$q'[W/m] = \frac{r}{A_i[mm^2]} \cdot I^2 \cdot 1 \quad (3.9)$$

3.7 Tepelná bilance v místě měření

Teplo, které bude akumulováno ve vyhřívané tyči musí být rovno rozdílu tepla získaného z průchodu elektrického proudu mínus teplo, které je odvedeno chladičem (axiální vedení tepla lze zanedbat):

$$\Delta Q_{acc} = Q_{el} - Q_{voda} \quad (3.10)$$

Potom tedy:

$$Q_{voda} = -\Delta Q_{acc} + Q_{el} \quad (3.11)$$

Kde

$$Q_{el}[W] = q' \quad (3.12)$$

$$\Delta Q_{acc}[W] = \frac{dT}{dt} \cdot c \cdot \rho \cdot Vi \quad (3.13)$$

V kompletní podobě můžeme napsat:

$$Q_{voda}[W] = -\frac{dT}{dt} \cdot c \cdot \rho \cdot Vi + q' \quad (3.14)$$

Tímto způsobem vypočteme tepelné toky do chladiča během experimentu pro jednotlivé termočlánky.

3.8 Plošný tepelný tok do chladiča

Ze známého objemového toku vypočteme tok na jednotku plochy:

$$q''_{voda}[W/m^2] = \frac{Q_{voda}}{S_i} \quad (3.15)$$

3.9 Teplota vnějšího povrchu křemenné trubice během varu na její vnitřní straně

Okamžik, o kterého se na vnitřní straně křemenné trubice nachází sytá kapalina nebo sytá pára nalezneme v grafu teplotního profilu prostředního termočlánku TC2, Jelikož ten je umístěn ve stejné poloze jako termočlánek na křemenné trubici (viz obrázek 1.2).

Od tohoto okamžiku známe teplotu na vnitřní straně, která bude rovna teplotě sytosti $T_{sat} = 99.64^\circ C$

Tepelný spád skrze křemennou stěnu je od tohoto okamžiku možno počítat jako:

$$\Delta T_{g-sat} = T_{sat} - T_g \quad (3.16)$$

3.10 Tepelný tok skrze křemennou trubici

c	780	J/kg/K
ρ	2200	kg/m ³
λ	1.38	W/m/K

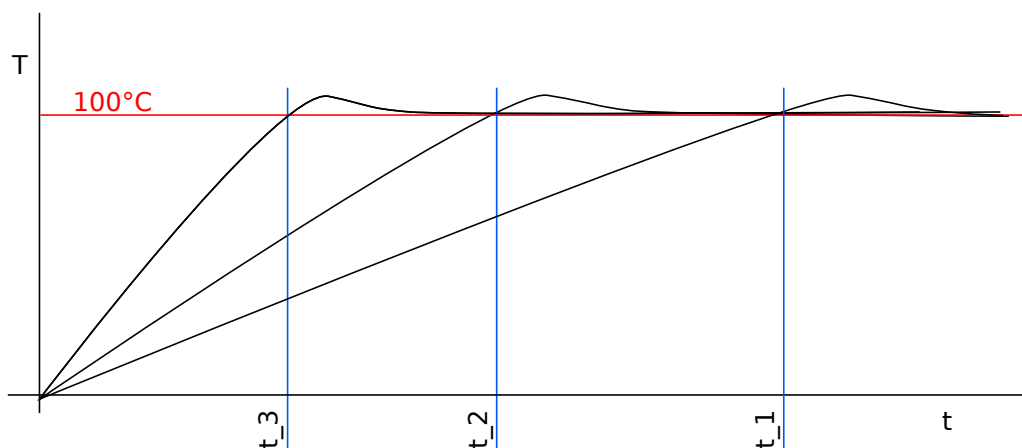
Tabulka 3.5: Vlastnosti křemenného skla

Vedení tepla skrze válcovou stěnu:

$$q'_g[\text{W/m}] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta T_{g-sat}}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (3.17)$$

3.11 Rychlost odparu chladiva

Ze známé rozteče umístění termočlánků (0.5m) a jednoznačně určených bodů v teplotních profilech v daném čase spočítáme rychlost odparu chladiva. Body určujícími dosažení termočlánků uvažujte okamžiky, kde teplotní profil protíná hodnotu 100°C.



Obrázek 3.3: Odečtení časového rozdílu mezi měřeními body

Čas dosažení termočlánku označme t_i kde i je index termočlánku $i=1,2,3$.

Průměrnou rychlost odparu chladiva mezi termočlánky 3 a 2 pak vypočteme jako:

$$v_{32}[\text{mm/s}] = \frac{500}{t_3 - t_2} \quad (3.18)$$

analogicky mezi termočlánky 2 a 1

$$v_{21}[\text{mm/s}] = \frac{500}{t_2 - t_1} \quad (3.19)$$

nakonec průměrnou rychlost mezi krajními termočlánky 1 a 3

$$v_{31}[\text{mm/s}] = \frac{1000}{t_3 - t_1} \quad (3.20)$$

3.12 ”Parní” výkon

Pro výpočet parního výkonu (hmotnosti odpařeného chladiva za jednotku času) uvažujme vodu o teplotě sytosti odpařovanou v mezikruhovém kanále určenou rychlostí v_i

Vypařovaný objem chladiva:

$$V_{v32}[mm^3/s] = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2 - d_o^2) \cdot v_{32} \quad (3.21)$$

$$V_{v21}[mm^3/s] = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2 - d_o^2) \cdot v_{21} \quad (3.22)$$

Hustota chladiva: $\rho_f = 998kg/m^3$

Průměrné parní výkony:

$$m_{23}[kg/h] = V_{v32} \cdot \frac{\rho_f}{10^9} \cdot 3600 \quad (3.23)$$

$$m_{21}[kg/h] = V_{v21} \cdot \frac{\rho_f}{10^9} \cdot 3600 \quad (3.24)$$