

Krize přestupu tepla prvního druhu

Text k experimentální úloze

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
j.stepanek@fs.cvut.cz
G3-129

Ú12115 Ústav energetiky
FS, ČVUT v Praze

1. října 2019

Popis úlohy

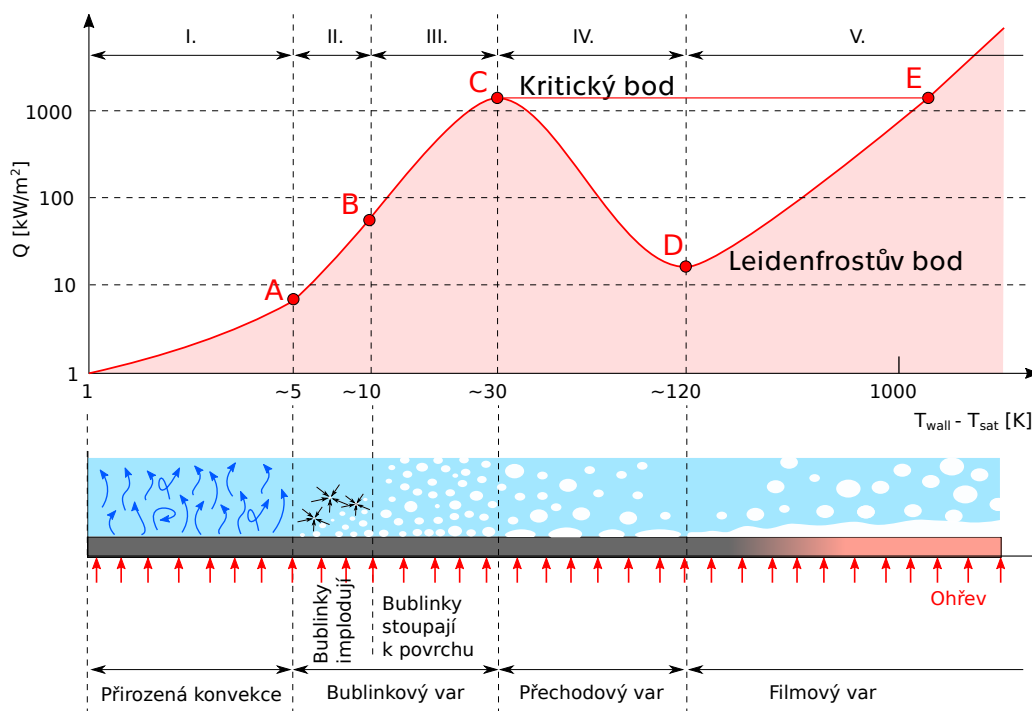
1.1 Úvod do problematiky

Přestup tepla z ochlazované stěny do vroucí kapaliny se řídí Newtonovým ochlazovacím zákonem:

$$Q = \alpha \Delta T_{wall} = \alpha(T_{wall} - T_{sat}) \quad [W/m^2] \quad (1.1)$$

Kde $T_{wall}[K]$ je teplota povrchu ochlazované stěny a $T_{sat}[K]$ je teplota sytosti chladící kapaliny. Součinitel přestupu tepla $\alpha[W/m^2/K]$, je dán charakterem proudění, druhem kapaliny, geometrií, atd... Obecně lze součinitel přestupu tepla určit dle příslušných korelací Nusseltova čísla.

V roce 1934 publikoval Shiro Niyama článek, zabývající se přestupem tepla z kovové vyhřívané stěny do vody při atmosférickém tlaku. Vytvořil tak křivku varu, která je znázorněna na obrázku 1.1 níže.



Obrázek 1.1: Křivka varu

Na obrázku 1.1 je v horní části znázorněna křivka varu (pro nepohybující se kapalinu nad rovinnou deskou), ve spodní části jsou znázorněny režimy varu pro dané oblasti křivky. Na horizontální ose se nachází míra přehřátí stěny vůči kapalině, tj. o kolik je stěna teplejší nežli vroucí kapalina. Na vertikální ose se nachází tepelný tok, který odpovídá danému režimu varu.

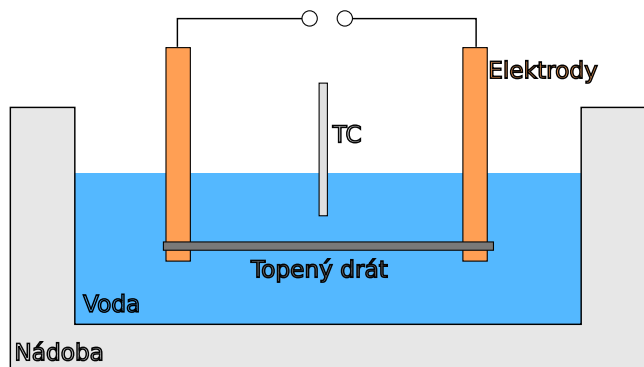
Jednotlivé oblasti křivky:

- Od počátku k bodu A - Přehřátí stěny je malé, v kapalině nedochází ke vzniku bublin. Přestup tepla probíhá pouze prostřednictvím přirozené konvekce díky rozdílným hustotám kapaliny.
- Mezi body A a B - Při povrchu ohřívané stěny se začínají objevovat první bublinky, nicméně dále od stěny je kapalina stále pod mezí teploty sytosti, tudíž bublinky odtržené od stěny v objemu implodují. Imploze bublinek je provázána vznikem rázové vlny, která se projevuje i akusticky (hlasité šustění vody v hrnci před samotným objemovým varem)
- Mezi body B a C - Teplota kapaliny již v celém objemu nabývá hodnoty teploty sytosti pro dané podmínky, a tak mohou bublinky vznikající u stěny volně stoupat až k hladině. Součinitel přestupu tepla zde nabývá nejvyšších hodnot. Prostor po parní bublince odtržené od stěny je nuceně zaplněn okolní kapalinou, tudíž dochází k intenzifikaci přestupu tepla.
- Bod C - Je bodem kritického tepelného toku. Zde mohou nastat tři situace:
 - 1. Pokud zůstane výkon konstantní, var se udrží v bublinkové oblasti
 - 2. V případě řízené teploty povrchu může dojít k přechodu do přechodového režimu varu a k poklesu tepelného toku (formující se větší bubliny brání intenzivnímu odvodu tepla). Vznikají tak stále větší a větší bubliny, dokud nevytvoří souvislou parní vrstvu v bodě C.
 - **3. Dalším nuceným zvyšováním tepelného toku dojde ke skoku z bodu C přímo do bodu E a tím prudkému nárůstu teploty povrchu. Tepelný výkon je natolik velký, že formující se bubliny na povrchu vytvoří souvislou parní vrstvu, která brání dalšímu intenzivnímu přestupu tepla, jelikož tepelná vodivost parní vrstvy je mnohonásobně nižší nežli v případě kapalně fáze**
- Dále za bodem C resp. bodem E je povrch již obklopen pouze parní vrstvou a přestup tepla do kapaliny se uskutečňuje vedením skrze tento parní film.

Krise přestupu tepla (někdy nesprávně nazývána jako krize varu) se v běžných technických aplikacích vyskytuje například kalení kovů nebo kryogenní technice. Z pohledu bezpečnosti jaderných elektráren s tlakovodními reaktory nabývá výzkum tohoto jevu na významu při zvládání těžkých havárií, například při prudkém nárůstu výkonu palivového elementu nebo při zastavení cirkulace chladiva v aktivní zóně reaktoru. Při případném výskytu krize přestupu tepla v tomto případě vede k prudkému nárůstu teploty pokrytí a paliva a jemu následnému "vypaření". To by mohlo vést k úniku radioaktivních produktů štěpení a další destrukci aktivní zóny. Úkolem bezpečnostních analýz a hydraulického návrhu reaktoru je zajistit, aby i v nejnepříznivějším případě nedošlo ke vzniku krize varu. Proto je nutné znát podmínky při kterých k jevu dochází, aby mohl být tento limit bezpečně dodržen při všech návrhových stavech, jak provozních, tak i havarijních.

1.2 Měřicí zařízení

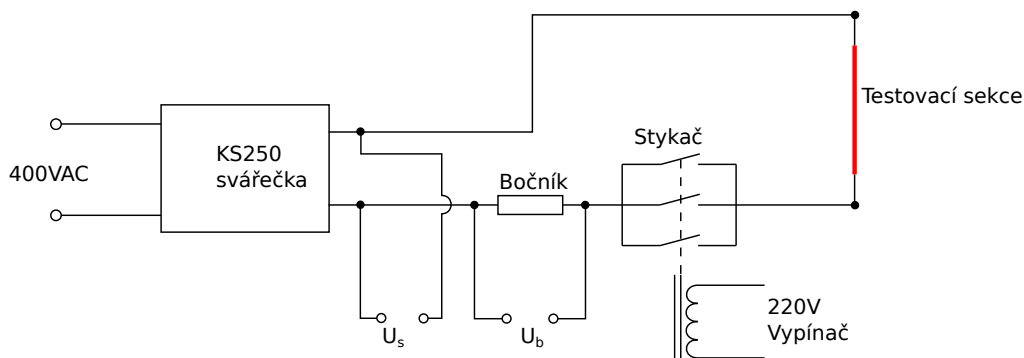
Měření probíhá na jednoduchém experimentálním zařízení pro studium krize přestupu tepla. Jedná se o nádobu s vodou, ve které je ponořený ocelový drát uchycený do svorek na elektrodách. Drát je ohříván přímým průchodem elektrického proudu - Joulovým teplem. Teplota vody v nádobě je měřena termočlánkem typu K, který je umístěn v blízkosti topného drátu.



Obrázek 1.2: Experimentální zařízení

1.2.1 Zdroj tepelného výkonu

Zdrojem tepelného výkonu je křemíková svářečka KS250 s plynulou regulací výkonu. Zdroj je na svorky testovací sekce připojen přes manuálně ovládaný stykač. Příkon testovací sekce se určí z napětí na svorkách svářečky a úbytku napětí na bočníku, který je zapojen do série s testovací sekcí.



Obrázek 1.3: Experimentální zařízení

1.3 Provedení experimentu

- Dle pokynů vyučujícího naplníte nádobu vodou a zapojte systém sběru dat. Měřené údaje jsou:
 - Čas [s]
 - Teplota kapaliny/termočlánek TC [°C]
 - Napětí na svorkách zdroje proudu U_s [V]
 - Napětí na svorkách bočníku U_b [V]
- Na zdroji stejnosměrného proudu nastavte požadovaný topný proud (doporučeno cca 60A)
- Spusťte sběr dat
- Připojte zdroj k testovací sekci a začněte s ohřevem
- Udržujte krizi přestupu tepla po několik sekund, případně do destrukce topného drátu

- Odpojte zdroj proudu a ukončete sběr dat
- Výše popsané kroky proved'te se studenou vodou a s vodou blízko bodu varu (nízké podchlazení kapaliny)

Úkoly

Kompletní protokol z měření bude obsahovat:

- Průběhy teploty kapaliny
- Průběh tepelného příkonu
- Průběh plošného tepelného toku
- Porovnání tepelného toku s korelacemi dle Zuber a Lienharda - vynesete do grafu hodnoty korelací
- Závěry výsledků

Zpracovaný protokol zašlete elektronicky na e-mailovou adresu uvedenou na titulní straně. Zpráva bude v příloze obsahovat:

- Textový dokument se zprávou
- Soubor s naměřenými daty
- Excel (nebo jiný soubor) s výpočtem

Vyhodnocení

3.1 Převod napětí na bočníku na proudové hodnoty

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

Tabulka 3.1: Parametry bočníku

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

3.2 Výpočet výkonu jdoucího do testovací sekce (drátu)

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

3.3 Geometrické parametry

d	m
L	m

Tabulka 3.2: Rozměry topeného drátu - přesné hodnoty změřte

- Průřez ohřívaného drátu

$$A[m^2] = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.4)$$

- Objem ohřívaného drátu

$$V[m^3] = A \cdot L \quad (3.5)$$

- Povrch ohřívaného drátu

$$S[m^2] = \pi \cdot d \cdot L \quad (3.6)$$

3.4 Plošný tepelný výkon

Plošný tepelný výkon vypočteme ze známého příkonu a povrchu drátu mezi elektrodami. Uvažujeme tedy, že veškerý dodaný výkon prochází pouze povrchem drátu mezi elektrodami:

$$q'' [W/m^2] = \frac{P}{S} \quad (3.7)$$

3.5 Korelace pro kritický tepelný tok

Změřený a dopočítaný tepelný tok porovnejte s následujícími korelacemi pro kritický tepelný tok:

- Zuber (1959)

$$q_{cZ}[W/m^2] = 0.131\rho_v^{0.5}h_{fg}[\sigma(\rho_l - \rho_v)g]^{0.25} \quad (3.8)$$

- Lienhard (1973)

$$q_{cL}[W/m^2] = 0.149\rho_v h_{fg} \left[\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}{\rho_v^2} \right]^{0.25} \quad (3.9)$$

Kde:

- $\rho_l[kg/m^3]$ - hustota syté kapaliny
- $\rho_v[kg/m^3]$ - hustota syté páry
- $h_{fg}[J/kg]$ - měrné skupenské teplo varu
- $\sigma[N/m]$ - povrchové napětí kapaliny
- $g[m/s^2]$ - tíhové zrychlení