

30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

Jednotlivý příspěvek ze sborníku



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Prenos tepla do superkritických tekutín

Michal SALAJ¹, Marek SOJÁK²

¹ Ing. Michal Salaj, Ústav tepelnej energetiky, Strojnícka fakulta, Slovenská technická univerzita, Nám. Slobody 17, Bratislava, michal.salaj@stuba.sk

² Ing. Marek Soják, Ústav tepelnej energetiky, Strojnícka fakulta, Slovenská technická univerzita, Nám. Slobody 17, Bratislava, marek.sojak@stuba.sk

Abstrakt: V oblasti superkritickej tekutiny je najdôležitejším poznatkom zánik hranice medzi kvapalnou a plynnou fázou a výrazná zmena termodynamických a transportných vlastností so zmenou tlaku a teploty. Cieľom tohto príspevku je popísať základné mechanizmy, ktoré majú vplyv na dynamiku týchto tekutín. V dôsledku týchto javov môže za určitých podmienok dôjsť k zhoršeniu prípadne k zlepšeniu koeficientu prestupu tepla oproti prestupu tepla pri subkritických parametroch, pri výpočte ktorého používame klasický Dittus Boelterovu koreláciu.

1. Úvod

Kvôli požiadavkám priemyslu na využívanie superkritických tekutín bolo uskutočnené značné množstvo experimentov a teoretických štúdií. V rôznych odvetviach priemyslu sú používané viac ako 60 rokov, avšak až v 70tich rokoch boli pochopené osobitosti termofyzikálnych vlastností a fyzika kritických bodov. Hlavné objavy v oblasti dynamických relaxačných javov sú ešte mladšie, približne 15 rokov. Napriek tomu existujú stále značné medzery v chápaní javov prenosu hmoty a energie v superkritických tekutinách.

Skúmanými látkami boli voda, hélium a oxid uhličitý. Experimentálne skúmanou látkou je však najčastejšie oxid uhličitý pre jeho parametre kritického bodu (31,1 °C; 7,38 MPa), ktoré sú v laboratórnych podmienkach ľahšie dosiahnuteľné ako kritické parametre vody (374 °C; 22,064 MPa). Niektoré výsledky z pokusov s CO₂ boli extrapolované na vodu.

2. Definícia pojmov

Pre lepšie pochopenie javov v oblasti prenosu tepla v superkritických tekutinách je potrebné najprv zadať základné pojmy a výrazy, ktoré sú používané v tejto oblasti.

Kritický stav - bod, v ktorom neexistuje fázové rozhranie medzi kvapalinou a plynom, t.j. majú rovnaký tlak, teplotu a objem. Je zadefinovaný fázovými veličinami T_{krit} , p_{krit} , v_{krit} .

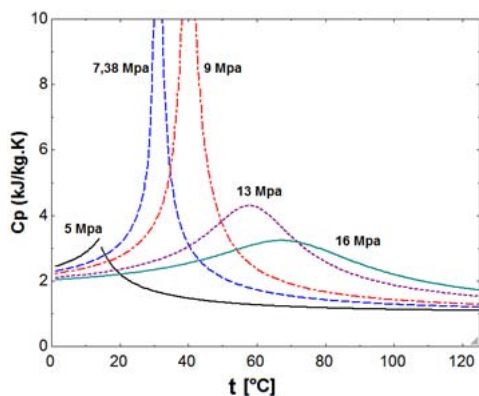
Stlačená kvapalina - tekutina, ktorej tlak $p > p_{krit}$ a teplota $T > T_{krit}$.

Superkritická tekutina - tekutina, ktorej tlak aj teplota je vyššia ako kritický tlak a teplota, avšak často sa do tejto oblasti zahŕňa aj stlačená kvapalina.

Pseudokritický bod - je definovaný parametrami p_{pk} a t_{pk} . Je to bod s tlakom $p_{pk} > p_{krit}$ a s teplotou $t_{pk} > t_{krit}$, v ktorom špecifická tepelná kapacita c_p dosahuje maximum pre daný tlak.

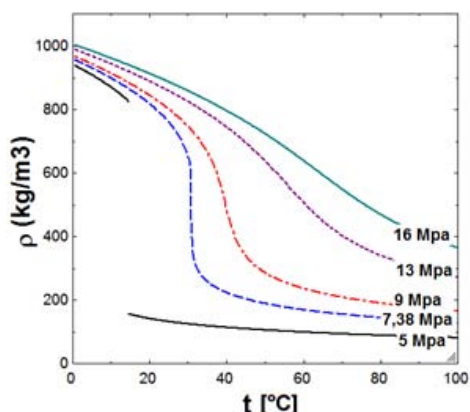
3. Vlastnosti superkritických tekutín

Jednou z najdôležitejších charakteristík superkritických tekutín v blízkosti kritického bodu je prudká zmena vlastností s teplotou pri izobarickom deji (ktorý uvažujeme v zjednodušených prípadoch vo výmenníkoch tepla), najviac v pseudokritických bodoch. Na obr. 1-5 sú znázornené závislosti niektorých fyzikálnych veličín CO₂ od teploty a tlaku.

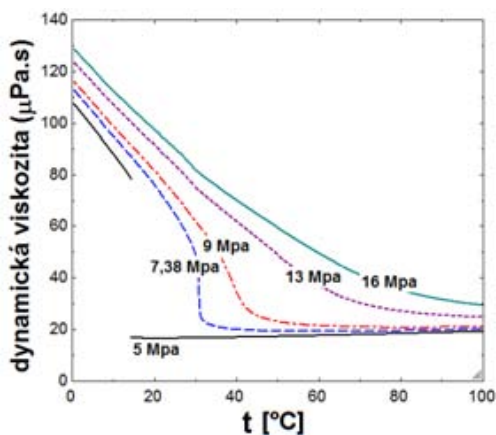


Obrázok 1: Závislosť c_p CO₂ od teploty a tlaku

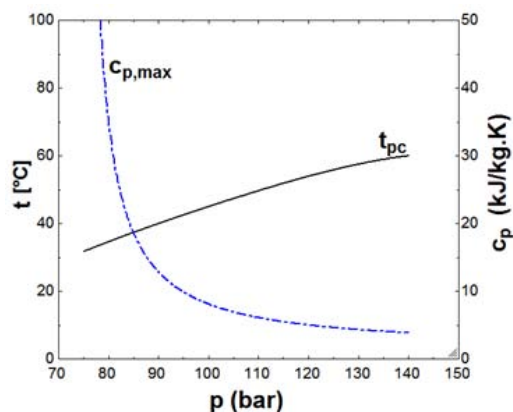
Transportné vlastnosti sú dôležité pri prenose tepla a vzniku tlakových strát. Na obr. 3 a 5 je znázornená závislosť tepelnej vodivosti a viskozity od teploty pri podkritických a nadkritických tlakoch. Prandtlovo kritérium je dôležitý parameter pre prestup tepla. Najvyššiu hodnotu dosahuje pri pseudokritickej teplote a so stúpajúcim tlakom maximálna hodnota klesá.



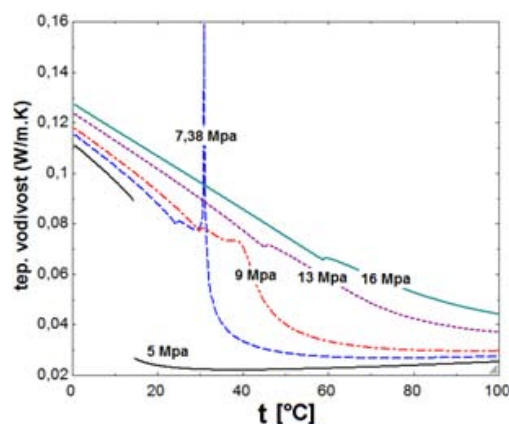
Obrázok 2: Závislosť hustoty CO₂ od teploty a tlaku



Obrázok 3: Závislosť dynamickej viskozity CO₂ od teploty a tlaku



Obrázok 4: Závislosť pseudokrit. teploty a max. špecifickej tepelnej kapacity CO₂ od tlaku



Obrázok 5: Závislosť tepelnej vodivosti CO₂ od teploty a tlaku

4. Režimy prestupu tepla do superkritických tekutín

V dôsledku výraznej zmeny fyzikálnych vlastností v blízkosti kritického a pseudokritického bodu a prevádzkovým podmienkam dochádza k nasledovným režimom prenosu tepla: [1]

1. *Normálny prestup tepla (NHT)* - koeficient prestupu tepla je rovnaký ako pri subkritickom prenose tepla ďaleko od kritickej oblasti. Výpočet sa Nusseltovho kritéria je podľa Dittus Boelterovej korelácie:

$$Nu = 0,0023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (1)$$

2. *Zlepšený prestup tepla (IHT)* - koeficient prestupu tepla je vyšší ako u NHT, najmä v

pseudokritickej oblasti, v dôsledku čoho je teplota steny v niektorých častiach nižšia.

3. *Zhoršený prestup tepla (DHT)* - koeficient prestupu tepla je nižší ako u NHT, v dôsledku čoho je teplota steny v niektorých častiach oveľa vyššia.

K rôznym režimom dochádza v dôsledku toho, že pri istých parametroch sa mení výrazne vplyv vztlačkových síl na prúdenie, ktoré ovplyvňujú mieru turbulencií a modifikujú rýchlostný profil. Okolnosti, ktoré sa najviac podieľajú na charaktere prestupu tepla pri superkritickom tlaku: [1]

- Teplota steny aj tekutiny je menšia ako t_{PK}
- Teplota steny je väčšia a teplota tekutiny je menšia ako t_{PK}
- Teplota steny aj tekutiny je vyššia ako t_{PK}
- Vysoké hodnoty tepelného toku
- Vstupná oblasť
- Smer vertikálneho prúdenia
- Horizontálne prúdenie
- Vplyv gravitačných síl pri nízkych hmotnostných prietokoch

Pozdĺž ohrievaného povrchu môže dôjsť k dvom špeciálnym prípadom:

A. *pseudo-var* - je podobný varu pri subkritickom tlaku. V dôsledku ohrevu superkritickéj tekutiny s teplotou pod T_{pk} , niektoré vrstvy v blízkosti povrchu dosiahnu $T > T_{pk}$. Táto tekutina s oveľa nižšou hustotou sa odtrháva z povrchu v podobe bublín.

B. *pseudo-blanový var* - je podobný blanovému varu pri subkritickom tlaku. Vzniknutá blana s nízkou hustotou na povrchu steny bráni kontaktu vysoko-hustej tekutine s povrchom.

5. Prehľad vytvorených závislostí pre Nusseltovo kritérium

Pri výpočte koeficientu prestupu tepla α vychádzame z Nusseltovho kritéria:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad (2)$$

Pre tekutiny s fyzikálnymi vlastnosťami, ktoré môžeme považovať za teplotne nezávislé je všeobecne používaný vzťah na výpočet Nu od Jacksona a Halla: [3]

$$Nu_{CP} = \frac{\alpha_{CP} \cdot d_i}{\lambda_B} = 0,0183 \cdot Re_B^{0,82} \cdot Pr_B^{0,5} \quad (3)$$

kde Nu_{CP} je Nusseltovo číslo pre prípad konštantných vlastností, získaných pre určujúcu teplotu t_B , α_{CP} je príslušný koeficient prestupu tepla, λ_B je tepelná vodivosť tekutiny, Re_B a Pr_B je Reynoldsovo a Prandtllovo číslo pri určujúcej teplote.

Fyzikálne vlastnosti sú považované za konštantné v radiálnom smere. V pozdĺžnom smere rúrky sa určujúca teplota t_B a tým aj fyzikálne vlastnosti menia, preto z rovnice (3) určíme len miestny koeficient prestupu tepla. V blízkosti pseudokritického bodu sa tepelná vodivosť, viskozita a špecifická tepelná kapacita menia výrazne. Preto vzťah (3) môže byť použitý na predvídanie koeficientu prestupu tepla pri superkritických podmienkach len pri malých teplotných rozdieloch medzi teplotou steny a určujúcou teplotou, pretože len vtedy môžeme považovať fyzikálne vlastnosti za konštantné v radiálnom smere. Pri veľkom teplotnom rozdiely vznikajú výrazné gradienty vlastností v radiálnom smere. [2]

Aby mohli byť použité klasické prístupy, ktoré sú založené na konštantných vlastnostiach tekutiny, boli do týchto rovníc zahrnuté členy, ktoré obsiahnu zmenu vlastností tekutiny v radiálnom smere. Väčšina odvodených vzťahov pre Nusseltovo kritérium pre nútenú konvekciu má tvar modifikovanej Dittus-Boelterovej rovnice: [4]

$$Nu_X = C \cdot Re_X^n \cdot Pr_X^m \cdot F \quad (4)$$

V tab. 1 uvádzam prehľad vybraných závislostí. Sú odvodené pre Nusseltovo kritérium pri prestupe tepla do superkritickéj

tekutiny v rúrkach kruhového prierezu. Index X označuje referenčnú teplotu, pri ktorej sú určované vlastnosti tekutiny: B – pri určujúcej teplote v priereze prúdu; S – pri teplote steny

aj v oblasti subkritickéj kvapaliny a v oblasti prehriatej pary.

	X	C	n	m	F
Dittus-Boelter (1930)	B	0,023	0,80	0,33	1,0
Bishop (1965)	B	0,0069	0,90	0,66	$\left(\frac{\bar{c}_p}{c_p}\right)^{0,66} \cdot \left(\frac{\rho_S}{\rho_B}\right)^{0,43} \cdot [1 + 2,4 \cdot D/L]$
Swenson (1965)	S	0,00459	0,92	0,61	$\left(\frac{\bar{c}_p}{c_p}\right)^{0,61} \cdot \left(\frac{\rho_S}{\rho_B}\right)^{0,23}$
Yanagata (1972)	B	0,0135	0,85	0,80	$\left\{Pr_{PK}, \frac{\bar{c}_p}{c_p}\right\}$
Jackson, Hall (2002)	B	0,0183	0,82	0,50	$\left(\frac{\bar{c}_p}{c_p}\right)^n \left(\frac{\rho_S}{\rho_B}\right)^{0,3}$
Griem (1996)	X	0,0169	0,83	0,43	$\left(\frac{\bar{c}_f}{c_p}\right)^{0,43} \left(\frac{\rho_S}{\rho_B}\right)^{0,23} \cdot \omega\{h_B\}$

Tabuľka 1: Prehľad závislostí pre Nusseltovo kritérium [3]

a X – pri „zmiešanej“ teplote. Koeficient C a exponenty n a m boli určené z experimentálnych hodnôt. Korekčný faktor F zahŕňa vplyvy zmeny vlastností v radiálnom smere a vstupnú oblasť.

$$F = f\left[\frac{\rho_S}{\rho_B}, \frac{\bar{c}_p}{c_p}, \frac{\lambda_S}{\lambda_B}, \frac{L}{D}\right] \quad (5)$$

Kang a Chang (2009) vytvorili závislosť (6), ktorá zahŕňa zmenu vlastností pri stene a odhaduje Nusseltovo kritérium s presnosťou $\pm 20\%$ pre 94,6% experimentálnych hodnôt, ktorých bolo 7022.

$$Nu_B = 0,0244 \cdot Re_B^{0,762} \cdot Pr^{0,552} \left(\frac{\rho_S}{\rho_B}\right)^{0,0293} \quad (6)$$

Mokry (2009) vytvoril závislosť, aplikovateľnú aj na podmienky jadrového reaktora chladeného superkritickou vodou: [1]

$$Nu_B = 0,0061 \cdot Re_B^{0,904} \cdot Pr^{0,684} \left(\frac{\rho_S}{\rho_B}\right)^{0,564} \quad (7)$$

Podľa poslednej štúdie Zahlan (2010) dosahuje práve závislosť (7) najlepšie výsledky v predikcii koeficientu prestupu tepla v supekritickej oblasti. Okrem toho v porovnaní s ostatnými závislosťami ho dobre predpovedá

Je všeobecná zhoda, že korelácie vykazujú dostatočnú zhodu s experimentmi, pre ktoré boli vytvorené. Pre rozdielne pracovné podmienky - iná tekutina, geometria a parametre systému, však nemožno zabrániť veľkým odchýlkam v odhade súčiniteľa prestupu tepla. Zavedené obmedzenia pre každú koreláciu by preto mali byť brané do úvahy predtým, než dané vzťahy použijeme v praktických aplikáciách.

6. Literatúra

- [1] PIORO I. L., MOKRY S.: HEAT TRANSFER TO FLUIDS AT SUPERCRITICAL PRESSURES, HEAT TRANSFER - THEORETICAL ANALYSIS, EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND INDUSTRIAL SYSTEMS, 2011, S. 482-504
- [2] KRAAN M., PEETERS M. M. W. A KOL.: THE INFLUENCE OF VARIABLE PHYSICAL PROPERTIES AND BUOYANCY ON HEAT EXCHANGER DESIGN FOR NEAR- AND SUPERCRITICAL CONDITION, JOURNAL OF SUPERCRITICAL FLUIDS 34, 2005, S. 99-105
- [3] PIORO I.L., DUFFEY R.B.: HEAT TRANSFER AND HYDRAULIC RESISTANCE AT SUPERCRITICAL PRESSURES IN POWER ENGINEERING APPLICATIONS, NEW YORK, ASME PRESS, 1997
- [4] SCALABRIN G., PIAZZA L.: ANALYSIS OF FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER TO SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE INSIDE TUBES USING NEURAL NETWORKS, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 46, 2003, S. 1139-1154