

# 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

# Optimalizácia veľkosti absorbéra absorpčného chladiaceho zariadenia vzhľadom na správanie sa pracovnej látky počas procesu absorpcie

Marek SOJÁK<sup>1</sup>, Peter Kubáň<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ing. Marek Soják, Ústav tepelnej energetiky, Strojnícka fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Nám. slobody 17, Bratislava, marek.sojak@stuba.sk

<sup>2</sup> Ing. Peter Kubáň, Ústav tepelnej energetiky, Strojnícka fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Nám. slobody 17, Bratislava, peter.kuban@stuba.sk

**Abstrakt:** Predkladaný článok pojednáva o možnosti úpravy veľkosti absorbéra absorpčného chladiaceho zariadenia malého výkonu pre použitie v rezidenčných aplikáciách. Rozdelením absorpcie pri stekaní roztoku na tri časti a porovnaním miery absorpcie pripadajúcej na každú z nich, vieme určiť pre daný prietok, v ktorej časti je miera absorpcie najvyššia. V článku sú spomenuté spôsoby zabezpečenia optimálneho stekania roztoku po rúrkach absorbéra. Jedná sa o najmä o ovplyvňovanie povrchového napätia roztoku, s cieľom eliminovať tvorbu kvapalinového mosta na spodnej strane rúrky. V dôsledku zmeny vzdialenosti rúrok je možné umiestnenie danej teplovýmennej plochy do menšieho objemu absorbéra a tým ovplyvniť jeho celkovú veľkosť.

## 1. Úvod

V súčasnosti sa problematika absorpčných chladiacich zariadení (ACHZ) stále viac sústreďuje na možnosť aplikácie takýchto zariadení v rezidenčnej sfére na klimatizovanie objektov. Z tohto dôvodu je potrebné sa zamerať na optimalizovanie veľkosti zariadenia, vzhľadom k jeho výkonu. Jedná sa hlavne o veľkosť základných častí – absorbéra, výparníka, kondenzátora a generátora. Pracovnými látkami takéhoto ACHZ je roztok LiBr (absorbent) a voda (absorbát). V tomto príspevku je analyzovaná možnosť úpravy veľkosti absorbéra a v konečnom dôsledku aj celého absorpčného chladiaceho zariadenia ovplyvnením roztoku stekajúceho po rúrkach



Obrázok 1: Konštrukcia absorbéra v experimentálnom ACHZ

Zmena veľkosti absorbéra (jeho „objemu“) je možná niekoľkými spôsobmi. Jednak zmenou priemeru rúrok, zmenou tvaru a usporiadania rúrok a tiež zmenou rozostupu medzi rúrkami. Práve možnosť zmeny vzdialenosti medzi rúrkami je popísaná v tomto článku.

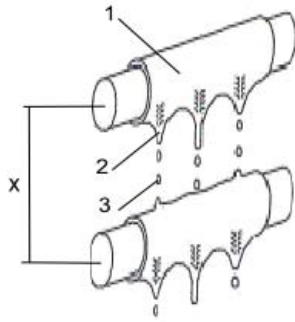
## 2. Konštrukcia absorbéra

Absorbér ACHZ je vo väčšine prípadov tvorený zväzkom rúrok, ktoré sú ostrekované horúcim roztokom, privádzaným do absorbéra z generátora. V rúrkach prúdi chladiace médium, ktoré odvádza teplo, vznikajúce pri absorpcii. Pre daný výkon absorbéra je potrebná určitá teplovýmenná plocha, tvorená rúrkami. Tá je umiestnená v objeme absorbéra, ktorý tvorí jeho veľkosť.

## 3. Proces absorpcie

Pokročilé štúdie absorpcie v súčasnosti rozdeľujú stekanie roztoku po rúrkach počas absorpcie na tri časti (obrázok 2) [1]:

- film obtekajúci rúrku
- formovanie kvapky v spodnej časti rúrky
- voľný pád kvapky roztoku medzi rúrkami



Obrázok 2: Obtekanie horizontálne uložených rúrok: 1- stekajúci film, 2- formovanie kvapky, 3-pád kvapky

Pre rozstupovú medzeru medzi kvapkami podľa platí vzťah[1]:

$$\lambda = \left( 0,836 \frac{2\pi\sqrt{3}}{1 + 2(\xi/d_o)^2} - 0,863 \frac{Re_f}{Ga^{1/4}} \right) \xi \quad (1)$$

kde:

$Re_f$  - Reynoldsovo číslo v stekajúcom filme  
( $Re = 4\dot{m}_s/\mu$ ) [-]

$Ga$  - Galileovo číslo [-]

$d_o$  - vonkajší priemer rúrky [mm]

$\xi$  - dĺžka kapiláry (pre 60% LiBr pri 40°C je 2,3mm) [mm]

Pre režim stekania filmu je hrúbka stekajúceho filmu daná vzťahom[1]:

$$\delta_f = \left[ \frac{3\mu\dot{m}_s}{(WR)\rho^2 g \sin\theta} \right]^{1/3} \quad (2)$$

kde:

$\dot{m}_s$  - hmotnostný prietok roztoku na jednotku dĺžky [kg/m s]

$WR$  - pomer zmáčania rúrky [-]

$\theta$  - uhol meraný od vrchnej časti rúrky [rad]

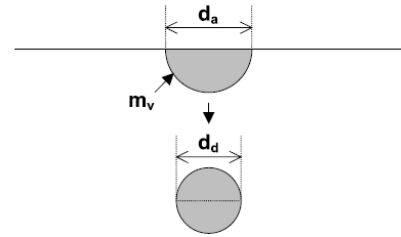
Pre celkový čas stekania filmu po rúrke platí vzťah[1]:

$$t_{film} = \int dt = \int_0^\pi \frac{r_o}{\bar{u}} d\theta \quad (3)$$

kde:

$r_o$  - vonkajší polomer rúrky [mm]

$\bar{u}$  - priemerná rýchlosť



Obrázok 3: Rozmery formujúcej sa kvapky a padajúcej kvapky

Kritický priemer prichytenej kvapky sa vypočíta[1]:

$$d_{a,cri} = 2^{1/3} d_d \quad (4)$$

kde:

$d_d$  - priemer odtrhnutej kvapky [mm]

Čas potrebný na formovanie kvapky ( $t_{form}$ ) vypočítame nasledovne[1]:

$$t_{form} = \frac{m_d}{2\dot{m}_s\lambda} \quad (5)$$

kde:

$m_d$  - hmotnosť odtrhnutej kvapky [kg]

Porovnaním koeficientu prestupu hmoty od rôznych výskumníkov dostaneme nasledujúcu rovnicu[1]:

$$K_{form} = c_2 \left[ \frac{D}{\pi t_{form}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

kde:

$D$  - difuzivita [m<sup>2</sup>/s]

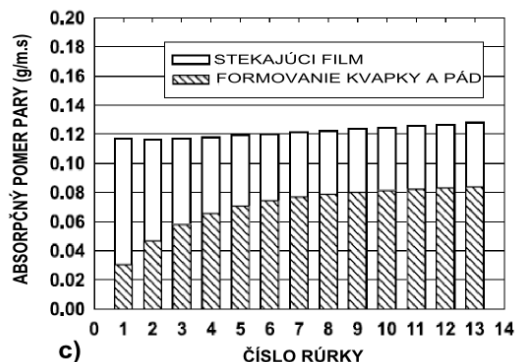
Na základe tohto koeficientu prestupu látky je množstvo pary absorbovanej do kvapky, počas režimu formovania kvapky, dané nasledujúcim vzťahom[1]:

$$m_v = \rho K_{form} \frac{\pi}{2} d_a^2 t_{form} \frac{(x_{s,o} - x_{s,e})}{100} \quad (7)$$

Vo vyššie uvedenej rovnici  $x_{s,o}$  je koncentrácia roztoku, prúdiaceho zo stekajúceho filmu a  $x_{s,e}$  predstavuje rovnovážnu koncentráciu pri danej teplote roztoku a tlaku pary.

Matematický model a experimentálne merania preukázali, že vodná para je absorbovaná predovšetkým v režime stekajúceho filmu a v režime formovania kvapky. Pri nízkych hmotnostných prietokoch

roztoku distribuovaného na rúrky ( $r=0,006$  kg/m s) bolo preukázané, že najviac pary je absorbovanej v režime stekajúceho filmu. Pri nízkych hmotnostných prietokoch je množstvo pary absorbovanej do jednej kvapky väčšie v porovnaní s množstvom absorbovaným v stekajúcom filme, avšak frekvencia tvorby kvapôčky je nižšia. Z toho vyplýva, že konečným výsledkom je nižšia miera absorpcie v režime formovania kvapky. Pri strednej hodnote hmotnostného prietoku roztoku ( $r=0,024$  kg/m s) je podiel množstva pary absorbovanej v režime formovania kvapky asi polovičný. Pri vysokom prietoku roztoku ( $r=0,024$  kg/m s) režim formovania kvapky hrá veľmi dôležitú úlohu, pretože dochádza k zvýšeniu frekvencie tvorby kvapky a dochádza k zintenzívneniu vnútorných cirkulácií vo formujúcej sa kvapke. Práve tieto cirkulácie zabezpečujú premiešavanie kvapaliny v kvapke, prichytenej na spodnej časti rúrky a tým umožňujú tvorbu tzv. nových povrchov, na ktorých môže prebiehať absorpcia.[1] Cirkulácia a tvorba nového povrchu majú veľký vplyv na proces absorpcie.

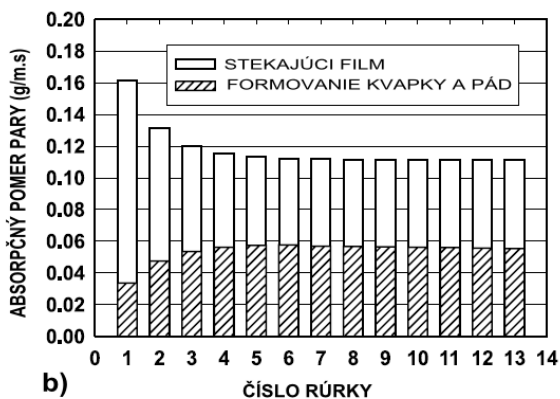
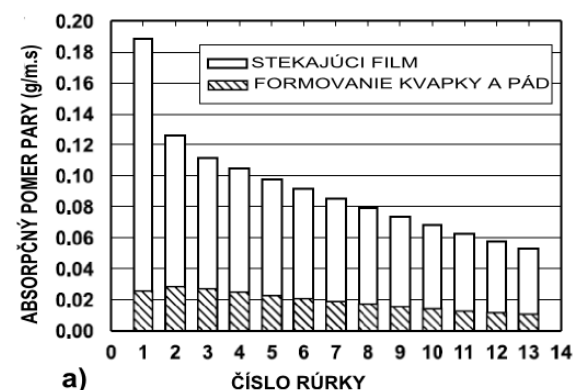


Obrázok 4: Podiel absorpcie pary v jednotlivých režimoch pre a) nízky prietok roztoku b) stredný prietok roztoku c) vysoký prietok roztoku[1]

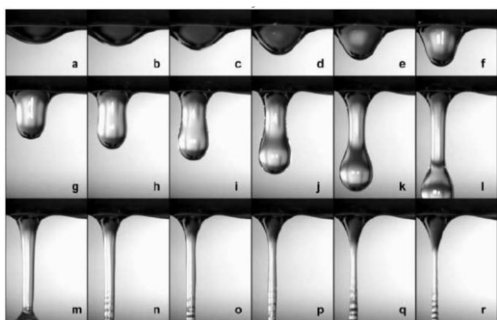
Vplyv absorpcie pár na povrchu padajúcej kvapky je vzhľadom k celkovej miere absorpcie zanedbateľný. Je to v dôsledku adiabatickej absorpcie a hlavne veľmi krátkeho času pádu kvapky.

#### 4. Ovplyvňovanie správania sa roztoku pri stekaní po rúrke

Ak sa zameriame na režim formovania kvapky, tak je možné pozorovať, že kvapka sa neodtrhne od povrchu rúrky naraz, ale až keď dosiahne určitý kritický objem. Vtedy sa kvapka stáva nestabilná. Keď k tomu dôjde, začne sa kvapka oddeľovať a rýchlosť jej klesania sa začne zvyšovať (obrázok 5). Gravitačná sila pôsobí na telo kvapky viac ako sily povrchového napätia. Ako gravitačná sila začne zrýchľovať spodnú časť kvapky, začne sa kvapka odťahovať od rúrky rýchlejšie, než do nej stačí vtekať nové množstvo kvapaliny z filmu. To spôsobí vytvorenie a následné postupné zúženie kvapalného mostu medzi spodnou časťou kvapky a stekajúcim filmom na rúrke.[2] Napriek tomu, že kvapalinový most tvorí nový povrch, kde môže prebiehať absorpcia, môžeme predpokladať v dôsledku toho, že cirkulácie v ňom nie sú v takej miere ako pri formovaní kvapky, bude na jeho povrchu absorbované menšie množstvo pary, ako keby sa už vytvárala ďalšia nová kvapka. Tvorbu kvapalinového mostu ovplyvňuje povrchové napätie kvapaliny. V dôsledku poznania správania sa roztoku stekajúceho po rúrkach je možné elimináciou kvapalinového



mosta upraviť vzdialenosť rúrok absorbéra a tým umiestniť danú teplovýmennú plochu do menšieho objemu.

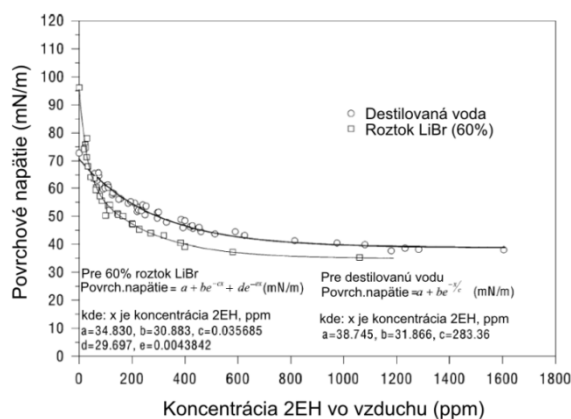


Obrázok 5: Tvorba kvapky na spodnej strane rúrky (a-f: tvorba zárodka kvapky, g-m: tvorba kvapalného mostu n-r :odtrhnutie kvapky)[2]

Možnosti ovplyvňovania povrchového napätia roztoku LiBr/H<sub>2</sub>O:

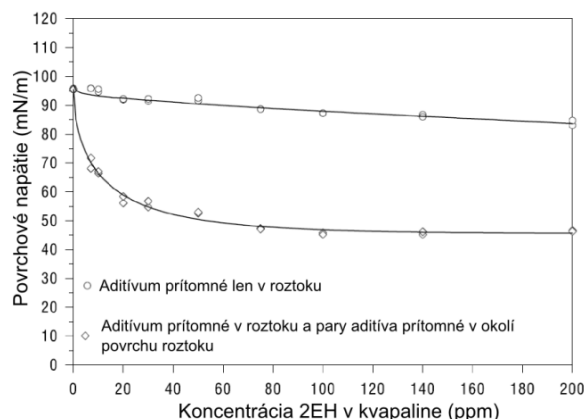
- prítomnosťou povrchovo aktívnych látok – najčastejšie 2-etylhexanol (ďalej len 2EH)
- zmenou teploty roztoku

Pri skúmaní vplyvu povrchovo aktívnych látok na povrchové napätie roztoku LiBr/H<sub>2</sub>O, môže byť aditívum, distribuované k povrchu roztoku vo forme pár alebo sa priamo zmieša s roztokom. Na obrázku 6 je vidieť zmenu povrchového napätia roztoku v závislosti od koncentrácie pár povrchovo aktívnych látok. Povrchové napätie pre 60% roztok LiBr/H<sub>2</sub>O klesá s rastúcou koncentráciou 2EH, až kým nedosiahne stabilnú úroveň (39 mN/m).. Na obrázku 6 je tiež uvedená krivka, ktorá prezentuje hodnoty pre destilovanú vodu.



Obrázok 6: Povrchové napätie čistej vody a 60% roztoku LiBr s 2EH vo vzduchu[3]

V prípade aditíva, zmiešaného s roztokom, je pokles povrchového napätia so stúpajúcou koncentráciou menší. Na obrázku 7 horná krivka ukazuje zmenu povrchového napätia, ak je aditívum prítomné len v roztoku.



Obrázok 7: Povrchové napätie 60% LiBr v závislosti na koncentracii 2EH v kvapalnej vzorke[3]

## 5. Záver

Zmenu povrchového napätia vieme ovplyvňovať pridaním aditíva, ako bolo uvedené vyššie. V blízkej dobe budeme realizovať experiment, v ktorom na základe Stalagmometrickej metódy stanovíme závislosť povrchového napätia od teploty roztoku, pri rôznych koncentráciách. Pri aplikácii myšlienky ovplyvňovania povrchového napätia zmenou teploty na experimentálny model bude potrebné zbilancovať, či sa nám podarí udržať daný výkon absorbéra, nakoľko bude roztok privádzaný do absorbéra pri vyššej teplote. Predpokladáme však, že na základe úpravy režimu prúdenia bude tento vplyv eliminovaný.

## 6. Literatúra

- [1] GARIMELLA S., JEONG S. Z.: FALLING FILM AND DROPLET MODE HEAT AND MASS TRANSFER IN A HORIZONTAL TUBE LIBR/WATER ABSORBER, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER, 2001
- [2] KILLION JESSE D., GARIMELLA S. Z.: DEVIATION FROM IDEALIZED FLOW PATTERNS AND IMPLICATIONS FOR HEAT AND MASS TRANSFER, INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION, 2003
- [3] HEROLD K., YUAN Z. Z.: SURFACE TENSION OF PURE WATER AND AQUEOUS LIBR WITH 2-ETYL-HEXANOL, APPLIED THERMAL ENGINEERING, 2001