

Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Tlakové ztráty kapilárních rohoží – Experimentální měření (část 1)



Ústav techniky prostředí

Pressure Losses of Capillary Mats – Experimental surveying (Part 1)

Recenzent

Prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

V prvním příspěvku autor předkládá experimentálně získané závislosti hydraulického chování kapilárních rohoží. Zabývá se závislostí tlakové ztráty kapilárních rohoží na průtoku ve vztahu k jejich geometrickému uspořádání a souprůdému hydraulickému zapojení. Modelování tlakových ztrát kapilárních rohoží bude naznačeno v některém z dalších článků autora.

Klíčová slova: Kapilární rohož, tlaková ztráta

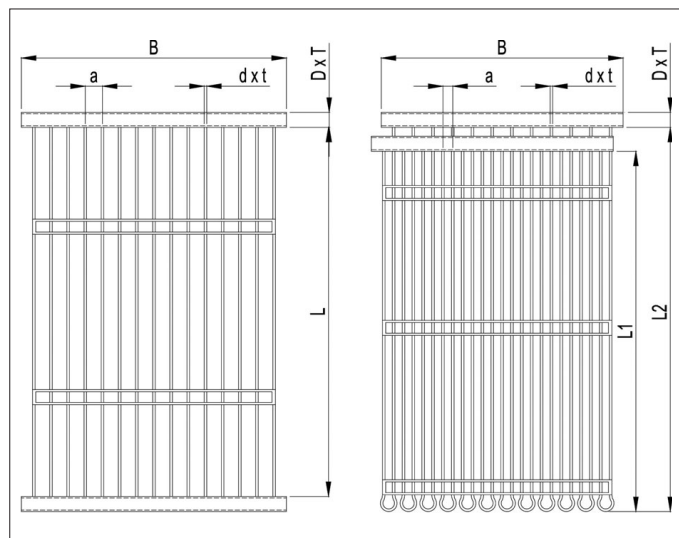
Author presents the experimentally acquired dependences of hydraulic behaviour in the field of capillary mats in this article. He deals with dependence between pressure loss of capillary mats and flow rate and all this is in relation to geometrical layout and concurrent-flow hydraulic connection. Simulation of pressure losses for capillary mats will be gestured in his next article.

Key words: Capillary mat, pressure loss

ÚVOD

Kapilární rohože jsou tvořeny sítí tenkých plastových trubiček z polypropylenu do nichž je rozváděna chladicí, nebo otopná voda [3, 4]. Základním údajem pro hydraulický návrh soustavy je závislost tlakové ztráty rohoží na průtoku teplotnosné kapaliny. Bohužel řada výrobců zmíněnou závislost neuvádí, nebo používá údaje zjištěné analyticky. Otázka tlakové ztráty a rychlosti proudění v kapilárách tak bývá často diskutována a mnohdy dochází k nedorozuměním, která plynou z nepochopení problému. Cílem série příspěvků je osvětlit hydraulické chování kapilárních rohoží, nalézt analytické řešení a ověřit ho s experimentálně zjištěnými údaji.

V prvním příspěvku na toto téma jsou uvedeny výsledky experimentálního měření, jehož cílem bylo stanovení tlakové ztráty kapilárních rohoží v souprůdém zapojení (Tichelmann). V rámci experimentálního měření byly zkoumány 2 typy rohoží různých výrobců (typ G a K.S) odlišné konstrukce obr. 1. Vnitřní průměry kapilár a výrobní rozměry jsou uvedeny v tab. 1. Každá z rohoží byla jednak proměřena samostatně z důvodu ověření vzájemné shody výrobku a dále byly stanoveny tlakové ztráty pro pole rohoží, které bylo složeno postupně z 1 až 4 rohoží stejného rozměru.



Obr. 1 Schéma zkoumaných kapilárních rohoží a) typ G, b) typ K.S

Tab. 1 Seznam zkoumaných typů kapilárních rohoží (výrobní rozměry)

Typ	Rozměr <i>B</i> × <i>L</i> [mm]	Rozteč <i>a</i>	Počet kapilár	Průměr <i>d</i> × <i>t</i>	Průměr <i>D</i> _i × <i>t</i>	Počet zkoumaných rohoží
		[mm]		[mm]		
G 30	540 × 2000	30	18	1,80 × 0,75	16 × 2	4
K.S 15	920 × 1000	15	30	2,35 × 0,5	16 × 2	4
K.S 15	920 × 2000	15	30	2,35 × 0,5	16 × 2	4
K.S 15	920 × 3000	15	30	2,35 × 0,5	16 × 2	4
K.S 15	920 × 4000	15	30	2,35 × 0,5	16 × 2	4

METODIKA MĚŘENÍ TLAKOVÉ ZTRÁTY

Metodika měření vychází z běžné praxe stanovení místní tlakové ztráty vřazeného hydraulického odporu [1] v potrubí. Před a za referenční hranici hydraulického odporu jsou v rovných úsecích náběžných potrubí umístěny vždy dva tlakové odběry v definovaných vzdálenostech *l*. Odběry snímají tlaky před vřazeným odporem p_{p1} a p_{p2} (počáteční tlak) a za vřazeným odporem p_{k1} a p_{k2} (konečný tlak). Tlakové poměry na odběrech jsou uvedeny na obr. 2.

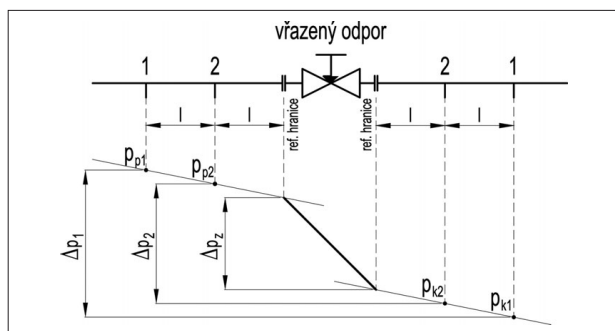
Príslušné odběry jsou zapojeny proti sobě na obrácený U-manometr a odečítají se výšky vodního sloupce na trubicích h_{p1} , h_{p2} a h_{k1} , h_{k2} (mm). Z rozdílu výšek Δh_1 a Δh_2 (mm) se stanoví rozdíly tlaků Δp_1 a Δp_2 (Pa) podle vztahu

$$\Delta p_i = \frac{\Delta h_i}{1000} g \rho_w = \frac{(h_{pi} - h_{ki})}{1000}, \quad (1)$$

kde ρ_w je hustota vody ve vodním sloupci U-manometru při teplotě okolí t_a .

Pro vyhodnocení tlakové ztráty Δp_z v místě vřazeného odporu (rozdílu tlaku mezi referenčními hranicemi odporu) se využívá stanovení průběhu rozdílu tlaků před a za hydraulickým odporem, tj. poklesu vlivem třecích ztrát v náběžném potrubí s odběry

$$\Delta p_z = \Delta p_2 - (\Delta p_1 - \Delta p_2) \quad (2)$$



Obr. 2 Průběh tlaku před a za vřazeným odporem (kapilárních rohoží)

MĚŘENÍ TLAKOVÝCH ZTRÁT

Měřicí trať

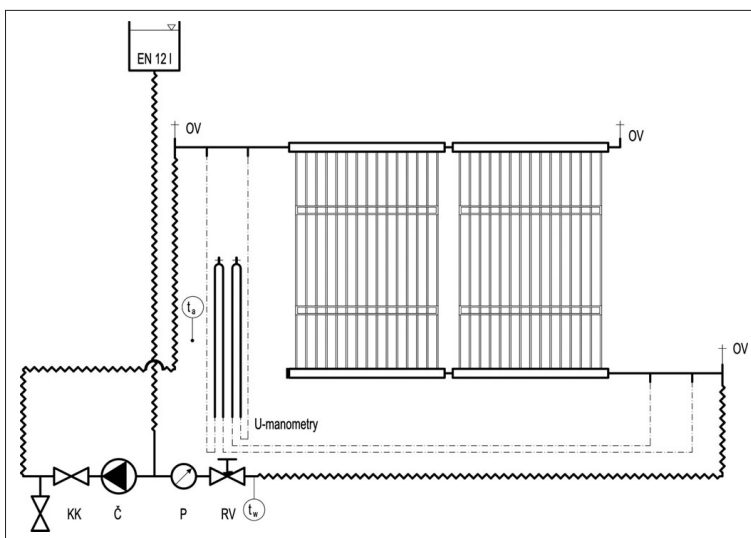
Měřicí trať pro měření tlakových ztrát kapilárních rohoží byla vybudována v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí fakulty strojní ČVUT v Praze. Měřicí trať se skládá z oběhového čerpadla Č (GRUNDFOS UPS 25–80), průtokoměru P (Recordall M25, Badgemeter Czech Republic) s impulsním výstupem, regulačního ventilu RV (CRANE D931 DN20), uzavíracích armatur KK, odvzdušňovacích ventilů OV a otevřené expanzní nádoby EN o objemu 12 l. Teplonosnou kapalinou byla vždy voda, jejíž teplota byla snímána na vstupu do průtokoměru jímkovým čidlem. Teplota proudící teplonosné kapaliny rohoží ovlivňuje její viskozitu, a tedy tlakové ztráty třením. Je nutné ji proto uvádět společně s výsledky měření. Teplota okolního vzduchu t_a v laboratoři byla snímána stíněným teploměrem TA (čidlo Pt100). Teplota okolního vzduchu je prakticky stejná jako teplota vodní náplně U-manometru a je použita pro určení hustoty vody ρ_w pro stanovení tlakových rozdílů z odečtu výšek hladin.

Pro snímání tlaků před a za rohožemi byla použita náběžná potrubí (Cu 22x1) se dvěma odběry $\varnothing$ 6 mm vzdálenými 100 mm. Tlakové odběry v odpovídajících vzdálenostech před a za měřeným registrem jsou zapojeny proti sobě na obrácené U-manometry (skleněné trubice $\varnothing$ 10 mm, výška U-manometru 2 m). Pro snímání tlaků byly použity dva odběry před měřeným registrem a dva za měřeným registrem. Schéma měřicí trati je znázorněno na obr. 3.

Ověření průměru zkoumaných kapilár

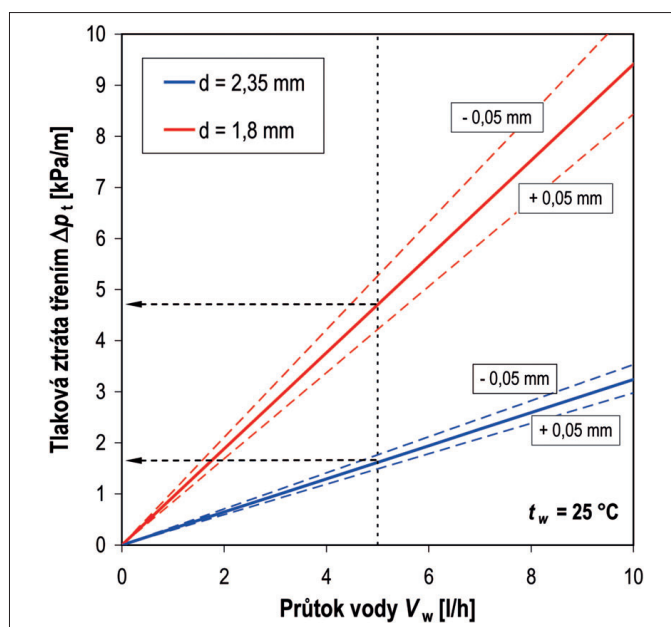
Na tlakovou ztrátu kapilárních rohoží má podstatný vliv vnitřní průměr kapiláry d_i . Jak bylo zjištěno z předběžných měření, výrobní odchylka 0,1 mm může způsobit značný rozdíl v naměřených hodnotách tlakové ztráty [5]. Na obr. 4 je znázorněna teoretická závislost tlakové ztráty třením v kapiláře Δp_t na objemovém průtoku vody V_w pro vnitřní průměr kapiláry $d_i = 1,8$ a $2,35$ mm s odchylkou $\pm 0,05$ mm. Tlaková ztráta třením při laminárním proudění v kapiláře ($\lambda = 64/\text{Re}$) je vztažena na 1 m délky kapiláry.

Průměry kapilár uvedené v tab. 1 jsou údaje poskytované výrobcí rohoží. Z důvodů uvedených v předchozím odstavci, byly kapiláry podrobeny měření vnitřního průměru váhovou metodou [6]. Na vzorku 10 kapilár každého průměru o délce cca 70 mm byla zjišťována hmotnost prázdné a naplněné kapiláry. Z technických důvodů byly kapiláry plněny vodou. Každý vzorek byl měřen celkem 5x. Z hmotnosti vody byl následně stanoven vnitřní průměr kapiláry d_i . Přesnost výsledku závisí jednak na opakovatelnosti



Obr. 3 Schéma měřicí trati zapojené souproutým Tichelmannovým způsobem

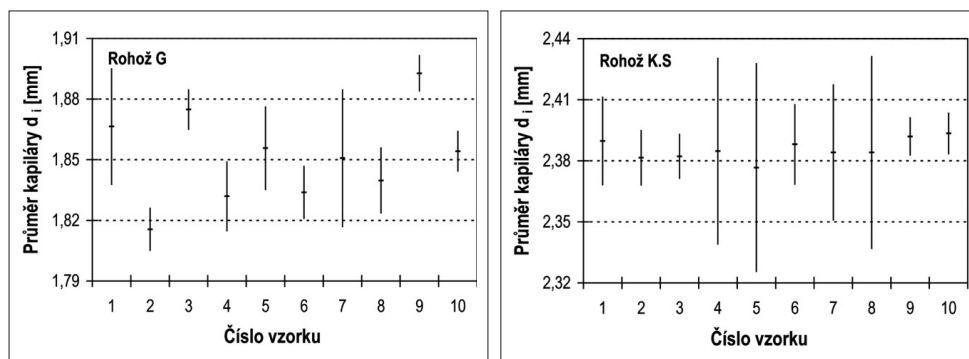
Č – oběhové čerpadlo, EN – expanzní nádoba, KK – kulový kohout, OV – odvzdušňovací ventil, P – průtokoměr, RV – regulační ventil)



Obr. 4 Tlaková ztráta třením pro různé vnitřní průměry kapiláry (laminární proudění)

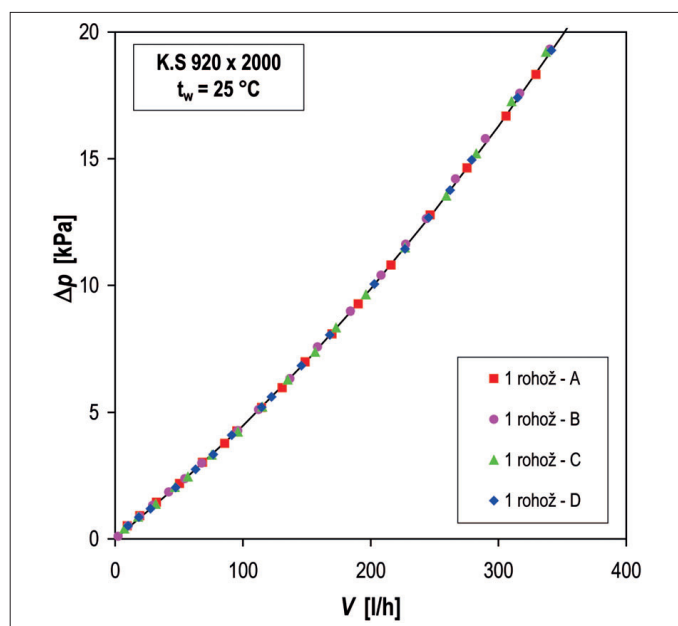
měření (nejistota typu A), dále na přesnosti vah, měření teploty vody (resp. hustoty vody) a měření délky kapiláry (nejistota typu B).

Výsledky měření vnitřního průměru váhovou metodou v podobě střední hodnoty vč. nejistoty měření jsou uvedeny na obr. 5.

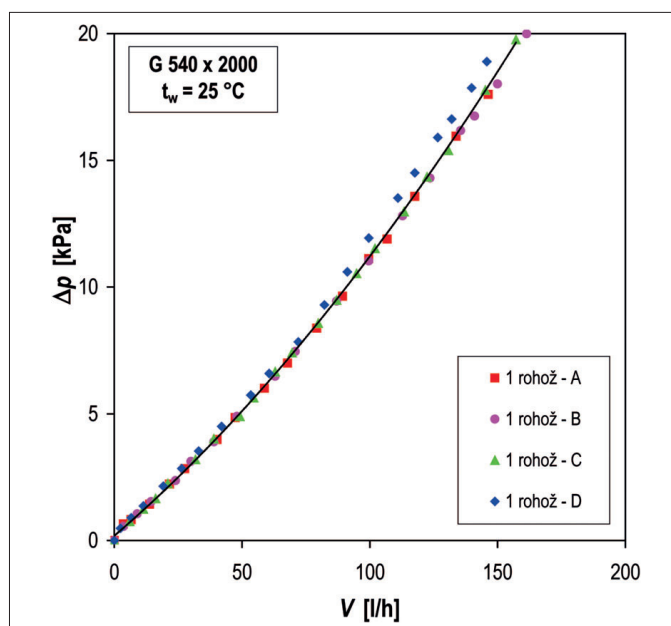


Obr. 5 Výsledky měření vnitřního průměru kapilár vč. nejistoty měření

a) kapilára rohože G, b) kapilára rohože K.S



Obr. 6a Ověření shody zkoumaných kapilárních rohoží



Obr. 6b Ověření shody zkoumaných kapilárních rohoží

Už na první pohled je z obou grafů patrná jistá odlišnost. Zatímco kapilára rohože typu K.S (obr. 5b) vykazuje dobrou shodu, u kapiláry rohože typu G (obr. 5a) je patrný určitý rozptyl obdržených hodnot. Lze usuzovat, že rozdíly jsou způsobeny kvalitativním provedením kapilár (přesností výroby).

V tab. 2 jsou uvedeny výsledné hodnoty vč. nejistoty. Skutečný vnitřní průměr kapiláry se tedy od údaje výrobce může lišit, což má vliv zejména na teoretické řešení hydraulického chování kapilár (viz obr. 4).

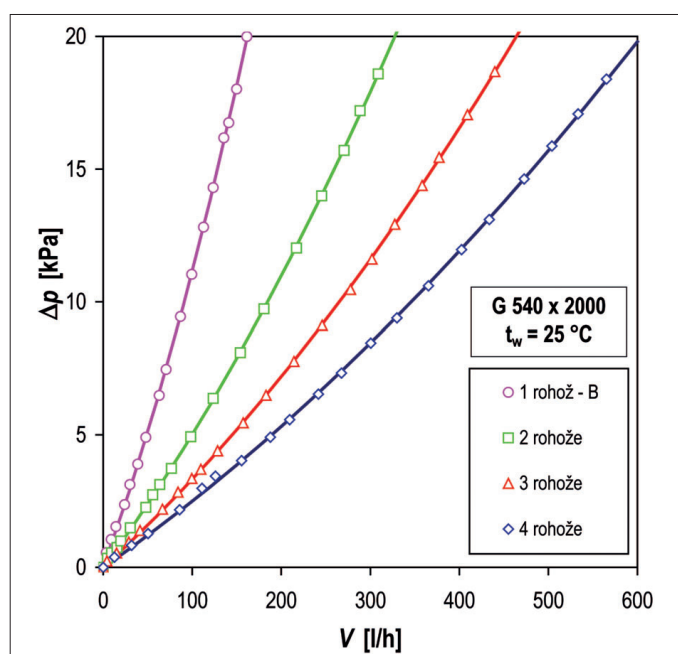
Tab. 2 Výsledný vnitřní průměr kapilár

Typ rohože	Údaj výrobce d_i	Výsledek měření d_i	Nejistota Δd
G	1,80	1,852	$\pm 0,063$
K.S	2,35	2,386	$\pm 0,023$

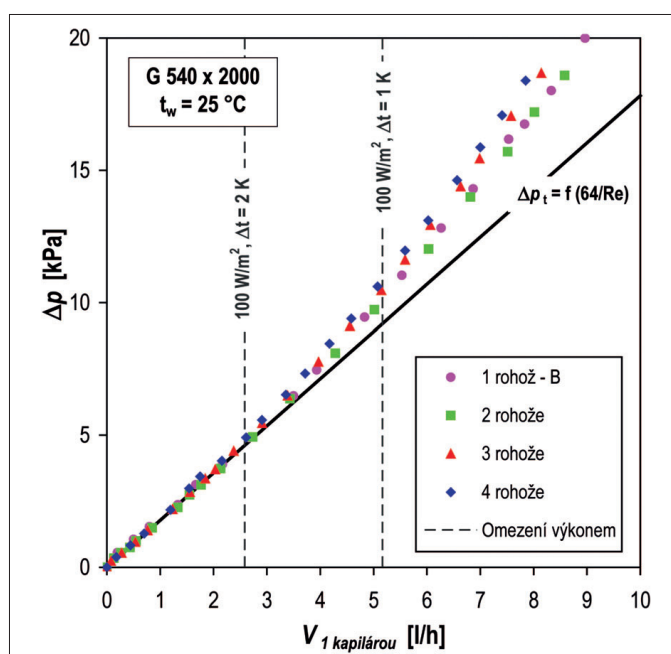
Ověření shody dodaných rohoží

K ověření shody výrobku byly všechny dodané rohože podrobeny samostatnému měření tlakové ztráty. Rohože daného rozměru byly označeny písmeny A, B, C a D. Výsledky tlakových ztrát pro daný typ a rozměr kapilární rohože byly následně porovnány. Příklad vzájemného porovnání je uveden na obr. 6. Z výsledků na obr. 6a) je zřejmá velmi dobrá shoda rohoží K.S 15 délky 2000 mm, z čehož lze usuzovat, že dodané kapilární rohože vykazují minimální výrobní odchylky. Obdobnému šetření byly podrobeny rohože K.S 15 délky 1000, 3000 a 4000 mm, které vykazují rovněž shodu. Na obr. 6b) je pak provedeno porovnání rohoží G 30, kde je už možné pozorovat mírné odchylky.

Stojí za zmínku, že k dispozici byly rovněž rohože typu G 30 délky 3000 a 4000 mm, které byly podrobeny stejnému ověření. Bohužel z důvodu vý-



Obr. 7a Tlakové ztráty kapilárních rohoží G 30–520 x 2000 – výsledky měření na průtok 1 kapilárou



Obr. 7b Tlakové ztráty kapilárních rohoží G 30–520 x 2000 – tlaková ztráta vztažená na průtok 1 kapilárou

robní nepřesnosti nebyly dále hodnoceny, neboť výsledky tohoto testu neprokázaly potřebnou shodu.

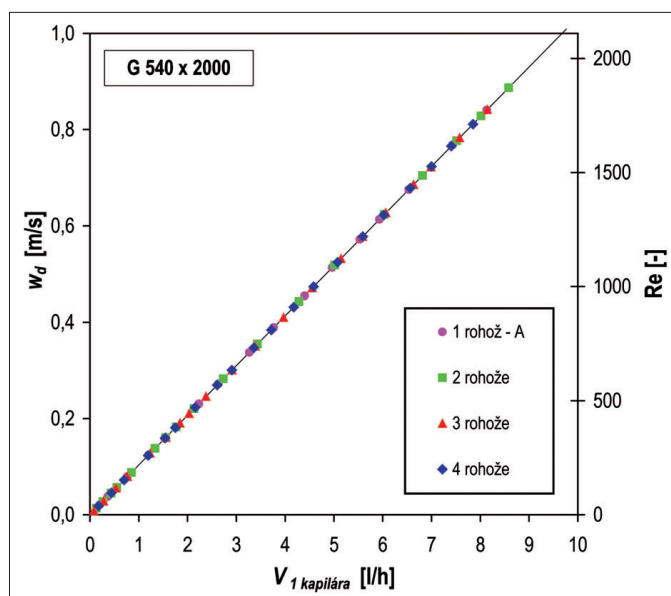
Výsledky měření

V rámci experimentálního stanovení tlakových ztrát kapilárních rohoží byla proměřována soustava, která se skládala z 1 až 4 kapilárních rohoží stejného typu a rozměru. Kapilární rohože byly vždy hydraulicky zapojeny souproutým způsobem. Naměřené výsledky v podobě závislosti tlakové ztráty kapilárních rohoží na objemovém průtoku znázorňují obr. 7 a obr. 9.

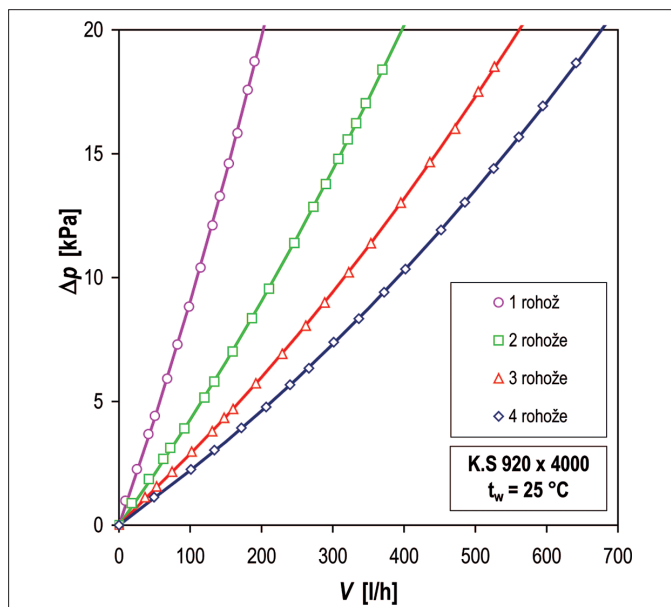
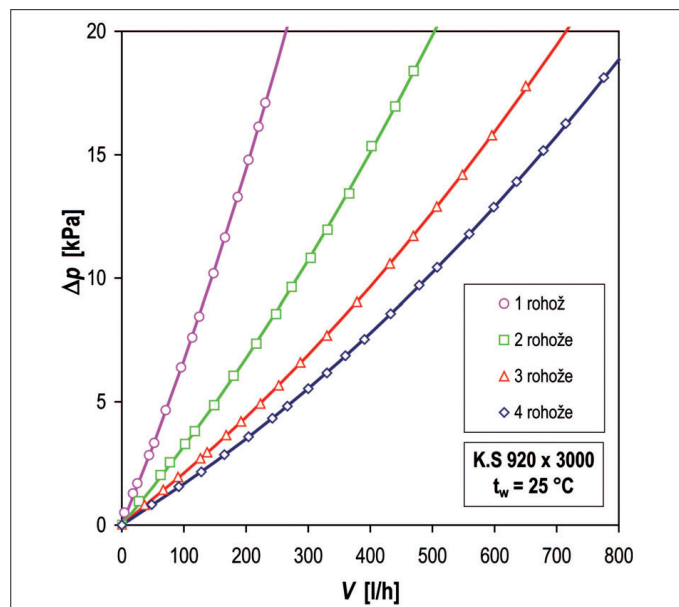
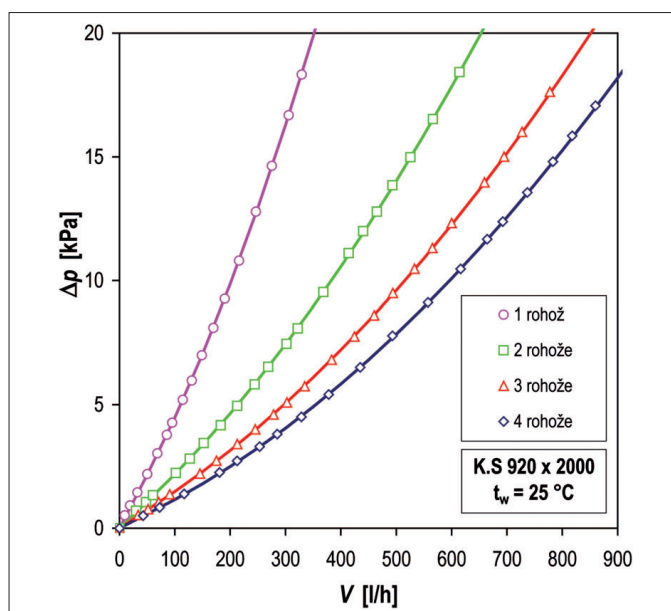
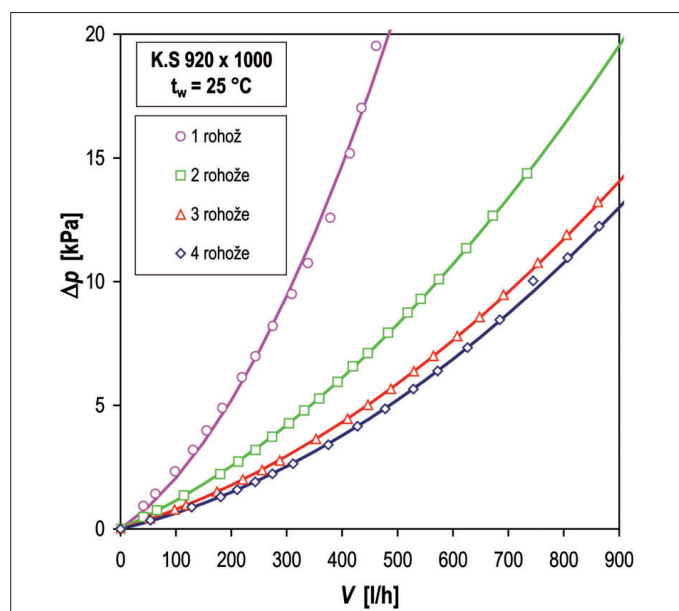
Kapilární rohož typu G 30

Na obr. 7a) jsou uvedeny výsledky měření tlakových ztrát pro kapilární rohože typu G 30 (520 × 2000). Je vidět, že prezentované charakteristiky mají parabolickou závislost. Na tlakových ztrátách kapilárních rohoží se nepodílí pouze tření v kapiláře, ale rovněž tlakové ztráty třením v rozvodném a sběrném potrubí a místní ztráty vlivem odbočení a spojení proudů.

Vztáhne-li se tlaková ztráta rohoží na průtok jednou kapilárou (za předpokladu, že každou z kapilár protéká stejné množství vody), obdržíme závis-



Obr. 8 Rychlosti proudění v kapiláře rohože G 30 o průměru 1,85 mm



Obr. 9abcd Tlakové ztráty kapilárních rohoží K.S 15 – výsledky měření

lost uvedenou na obr. 7b). Pro představu je v grafu zakreslena teoretická závislost tlakové ztráty třením v kapiláře. Je zřejmé, že pro běžné průtoky, které jsou definovány chladicím výkonem 100 W/m^2 a rozdílem teplot $\Delta t_w = 2 \text{ K}$, je tlaková ztráta třením v kapiláře dominantní.

S narůstajícím průtokem vody se již začnou projevovat tlakové ztráty v rozvodném a sběrném potrubí a charakteristiky se mění v parabolické závislosti. V oblastech s vyššími průtoky se již projevuje i vliv počtu zapojených rohoží, kdy se výrazněji projevují ztráty v rozvodném a sběrném potrubí.

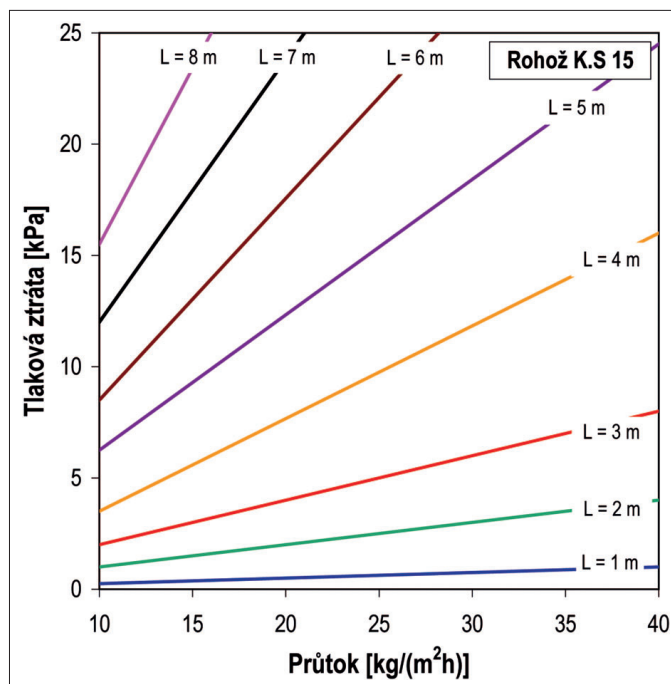
Na obr. 8 je znázorněna rychlost proudění v kapiláře w_d při předpokládaném rovnoměrném rozdělení průtoku vody do jednotlivých kapilár. Je vidět, že rychlosti proudění v kapiláře dosahují běžných hodnot, rozdíl je však v charakteru proudění, který je v kapiláře vždy laminární ($Re < 2300$).

Kapilární rohože typu K.S 15

Na obr. 9a) jsou uvedeny výsledky měření tlakových ztrát pro kapilární rohože typu K.S 15. Z uvedených závislostí je zřejmý parabolický průběh tlakové charakteristiky u většiny ze zkoumaných případů. Tvar charakteristiky pro 1 rohož je výrazně odlišný (větší tlakové ztráty) než pro více rohoží. Při stejném celkovém průtoku jsou tlakové ztráty třením v kapilárách výrazně vyšší než v ostatních případech (2 až 4 rohože), protože se průtok rozdělí do menšího počtu kapilár, a rychlost proudění v kapiláře je tak vyšší. U případů s jednou rohoží délky 3000 a 4000 mm se tlaková charakteristika jeví jako lineární. V těchto případech dominuje tlaková ztráta třením v kapiláře, v níž je laminární proudění. S narůstajícím počtem rohoží se zvyšuje průtok vody rozvodným a sběrným potrubím, v nichž se mění charakter proudění a v důsledku toho dochází ke změně průběhu tlakové ztráty.

Diskuze výsledků

Výrobce kapilár K.S 15 udává ve svých podkladech závislost tlakové ztráty na měrném průtoku vody, vztažený na 1 m^2 kapilární rohože viz obr. 10. Je zřejmé, že výrobce uvažuje s lineárním průběhem tlakové ztráty a předpokládá, že na výsledné tlakové ztrátě se podílí zejména tření v kapiláře. To ovšem platí pouze omezeně. Je pravdou, že s rostoucí délkou kapiláry se bude charakteristika tlakové ztráty blížit lineární závislosti (tlaková ztráta třením v kapiláře bude dominantní).

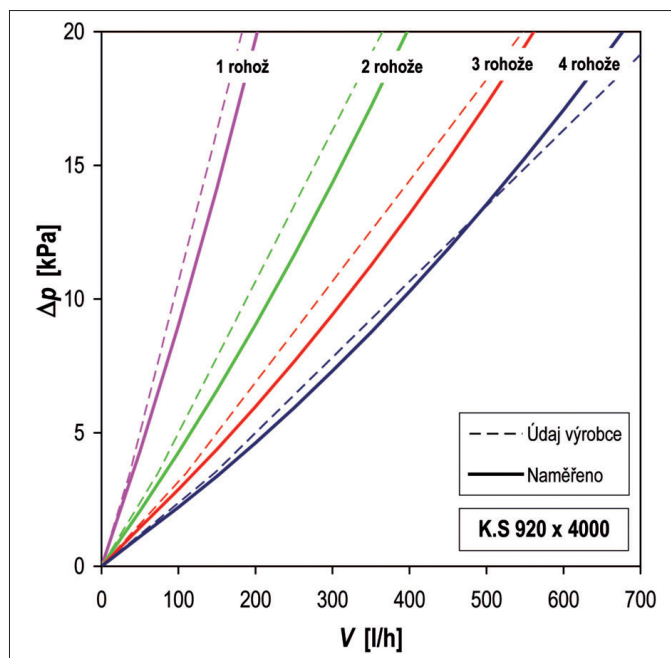
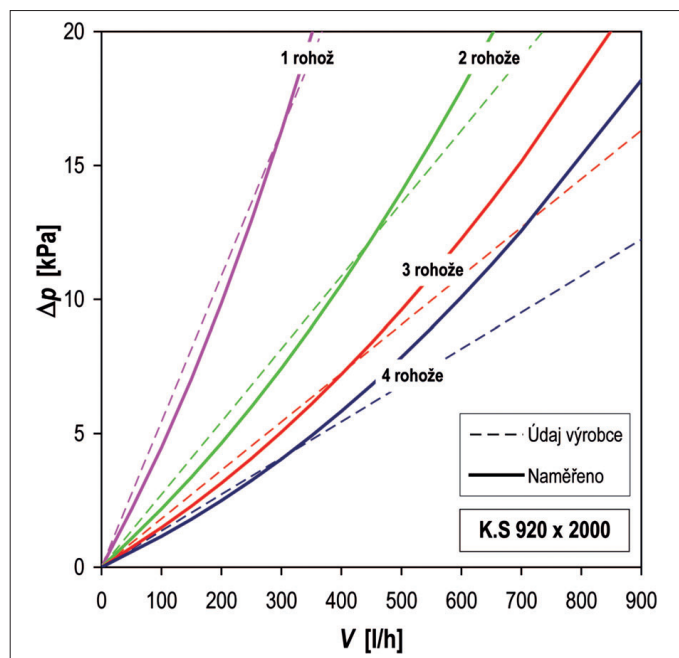


Obr. 10 Tlakové ztráty kapilárních rohoží K.S 15 udávané výrobcem

Na obr. 11 je uvedeno porovnání naměřených výsledků s údaji výrobce pro rohož typu K.S 15 příslušných délek. Zatímco rohož délky 4000 mm (obr. 11b) potvrzuje zmíněnou skutečnost a naměřené charakteristiky se přibližují lineární závislosti, pro rohož délky 2000 mm (obr. 11a) už toto tvrzení neplatí resp. pouze do určitého průtoku. Podle informací výrobce bylo pro tvorbu nomogramů použito měření na jedné rohoži a ostatní závislosti byly přepočítány analyticky.

ZÁVĚR

Tlaková ztráta (nejen kapilárních rohoží) je jedním ze základních hydraulických parametrů nutných pro správný návrh otopné nebo chladicí soustavy. Výrobci by měli tlakové ztráty uvádět ve svých katalogových listech, a to nejlépe v závislosti na průtoku teplotonosné látky. Postoj výrobců



Obr. 11 Porovnání naměřených výsledků s údajem výrobce rohože K.S 15; čárkované – údaj výrobce; plné – naměřeno

kapilárních rohoží je v tomto směru poněkud zarážející. Výrobce kapilárních rohoží K.S 15 zveřejňuje ve svých podkladech nomogramy pro určení tlakové ztráty, které však mají omezenou platnost. Na druhé straně český výrobce rohoží G 30 tlakovou ztrátu neuvádí vůbec. Z výsledků měření je zřejmé, že tlakovou ztrátu kapilárních rohoží kromě tření v kapiláře ovlivňuje i proudění v rozvodném a sběrném potrubí. Modelování tlakových ztrát kapilárních rohoží bude naznačeno v některém z dalších článků na toto téma.

Kontakt na autora: Vladimir.Zmrhal@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Matuška, T., Experimentální metody v technice prostředí. Skriptum, Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha 2005
- [2] Tureček, V., Tlakové ztráty kapilárních rohoží. Diplomová práce. ČVUT v Praze Fakulta strojní, 2009
- [3] Zmrhal, V., Kapilární rohože v praktických aplikacích. Vytápění, větrání, instalace. 2008, roč. 17, č. 4, s. 192–196. ISSN 1210–1389.
- [4] Zmrhal, V., Sálavé chladicí systémy. Monografie. Česká technika – nakladatelství ČVUT. 2009
- [5] Zmrhal, V., Matuška, T., Schwarzer, J., Modelování tlakových ztrát kapilárních rohoží. In Simulace budov a techniky prostředí. Praha: IBPSA-CZ, 2010, s. 73–78. ISBN 978–80–254–8661–0.
- [6] Kostečka, L., Tlakové ztráty kapilárních rohoží. Diplomová práce. ČVUT v Praze Fakulta strojní, 2012.

Seznam označení

- d_i vnitřní průměr kapiláry [mm]
 g tíhové zrychlení [m/s^2] ($g = 9,81 m/s^2$)
 h výška sloupce [mm]
 p statický tlak [Pa]
 Δp tlakový rozdíl [Pa]
 Re Reynoldsovo číslo [-]
 V průtok [m^3/s]
 ρ_w hustota vody [kg/m^3]
 λ součinitel tření [-]

Nová řešení výměníků pro regeneraci tepla

Německá společnost Howatherm Klimatechnik vyvinula nové žebrované lamely ecoFin pro lamelové výměníky pro regeneraci tepla. Výměníky s lamelami ecofin, vyráběné z tenkých hliníkových a měděných plechů příp. hliníkových povlakovaných plechů, mají až o 27 % vyšší měrný výkon proti konvenčním a obráceně dovolují dosáhnout stejného výkonu pouze se 79% objemem. Výměníky s novými lamelami mají nepatrnou tlakovou ztrátu, která dovoluje až o 20 % menší stavební délky. Jestliže konvenční lamely umožňují u vzduchu se vstupní teplotou 25 °C dosáhnout suchého zchlazení na 12 °C na výstupu, pak lamely ecoFin dosáhnou teploty 10,3 °C. Pro porovnání proudění a účinnosti konvenčních lamel a lamel nové geometrie bylo užito CFD simulace s vizualizací.

S jiným novým řešením protiproudých výměníků přichází německá společnost Microxal Wärmerückgewinnung. U výměníků microxal proudí voda mikrokanály průměru 1,4 mm a vzduch kanály šíře 13 až 15 mm a výšce 3 až 5 mm. Hladký povrch lamel o malé tloušťce a průtok bez změny směru proudění vedou k tlakové ztrátě na straně vody i vzduchu pouhých 5 kPa, nepatrně ve srovnání s běžnými typy. Při rychlosti proudění vzduchu 2 $m \cdot s^{-1}$ dosahuje účinnost získání tepla až 70 % a tlakové ztráty 150 kPa. Výměník je proveden z modulů 600 × 600 mm obsahujících až 10 000 protiproudých mikrokanálů a může dosáhnout délky až 900 mm. Teplosměnná plocha je až o 30 % větší než u žebrovaných provedení o stejné délce. Pájené hliníkové provedení zaručuje dobré vlastnosti a výkon. Pro výměník chráněný patentem a splňující požadavky DIN 1946–4 a VDI 6022 se hledá výrobce.

Pramen: CCI 3/2011, www.hovatherm.de a www.microxal.de

(AB)

VĚTRACÍ JEDNOTKY OBČANSKÉ A PRŮMYSLOVÉ STAVBY

Vysoká účinnost, malá hmotnost
a rozměry, vysoká variabilita



DUPLEX-S



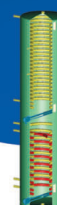
DUPLEX-N

SYSTÉMY VĚTRÁNÍ RODINNÉ DOMY, BYTY A BAZÉNY

Kompletní řešení pro nízkoenergetické
a pasivní objekty



DUPLEX-R



IZT



Tepelná čerpadla

VĚTRÁNÍ A KLIMATIZACE velko KUCHYNĚ

Větrací a osvětlovací stropy
a digestoře

Digestoře

SKV, TPV