

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 804

ISSN 1213-4198

thesis
IS

Ing. Petr Kracík

**Hodnocení přestupu tepla
na skrápěném trubkovém svazku**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

Ing. Petr Kracík

**HODNOCENÍ PŘESTUPU TEPLA
NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU**

HEAT TRANSFER EVALUATION
ON FALLING FILM TUBE BUNDLE

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Oponenti: doc. Ing. Michal Masaryk, Ph.D.
Ing. Milan Kořista, Ph.D.
Datum obhajoby: 4. května 2016

Klíčová slova:

Přestupu tepla, součinitele přestupu tepla, skrápění, horizontální trubkový svazek, termovizní měření, teplotní pole.

Keywords:

Heat transfer, heat transfer coefficient, sprinkled, horizontal tube bundle, thermal measuring, thermal field.

Místo uložení práce:

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

© Petr Kracík, 2016

ISBN 978-80-214-5356-2

ISSN 1213-4198

OBSAH

ÚVOD.....	5
CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	6
1 TEORIE PŘESTUPU TEPLA NA SKRÁPĚNÉ TRUBCE	7
1.1 Režimy skrápění	7
1.2 Matematické modely přestupu tepla.....	8
1.3 Matematický model přestupu tepla vroucí kapaliny	9
1.4 Vliv suchých míst na skrápěném trubkovém svazku	10
1.5 Vliv rozpustných příměsí ve vodě.....	11
2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	12
2.1 Podtlakový stand.....	12
2.2 Atmosférický stand.....	14
4 STANOVENÍ PŘESTUPU TEPLA Z MĚŘENÝCH VELIČIN.....	15
5 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	17
5.1 Výsledky dosažené u atmosférickém standu.....	17
5.2 Výsledky dosažené u podtlakového standu.....	19
5.3 Porovnání výsledků s jinými studii	21
ZÁVĚR.....	23
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	25

ÚVOD

Horizontální trubkový svazek, po kterém stéká tenký kapalný film (v textu bude dále označován jako skrápěcí kapalina), je využíván v různých technologických procesech. Jeho největší výhodou je, že při varu skrápěcí kapaliny na povrchu svazku se může rychle a efektivně oddělovat plynná složka skrápěcí kapaliny od kapalně složky, jakmile je to možné, oproti varu ve velkém objemu. Tím je zvyšována efektivita přenosu tepla z vytápěné trubky do skrápěcí kapaliny. Tato technologie se využívá například při destilaci mořské vody a díky využití skrápěných výměníků může proces probíhat při relativně nízkých teplotách, které jsou v řádech desítek stupňů Celsia. Pro dosažení varu je však nutné adekvátně snížit tlak prostředí, ve kterém je svazek umístěn. Pro var kapaliny může být využito nízko potenciální odpadní teplo z jiných energetických procesů, geotermálních pramenů, solárních kolektorů apod.

Další nejčastější aplikace skrápěných výměníků je v absorpčních jednotkách, ve kterých je tepelná energie za pomoci mechanické práce transformována na chlad. Chlad je nepostradatelnou součástí v potravinářském, chemickém i strojírenském průmyslu a v poslední době se dynamicky rozvíjí jeho spotřeba při zvyšování pohody prostředí nejen v nákupních centrech, kancelářských budovách ale hlavně v domácnostech. Chlad se dnes převážně vyrábí pomocí kompresorových chladicích zařízení, která mají vysokou spotřebu elektřiny. Jejich reálnou alternativou je absorpční cyklus, kde je kompresor nahrazen tzv. termochemickým kompresorem, který se skládá z čerpadla, jež zajišťuje přechod kapaliny z dolní tlakové úrovně do horní, a dvou výměníků, které jsou provozovány při podtlaku – absorbér a desorbér. V absorbéru jsou páry teplotnosné látky ochlazovány a absorbovány do absorbentu. Zjednodušeně řečeno se jedná o skrápěný výměník, na kterém kondenzuje parovodní směs. Směs teplotnosné kapaliny a absorbentu jsou dopravovány do desorbéru (vyšší tlakové úrovně). V desorbéru je dodáváno primární teplo do cyklu v podobě přímého spalování paliva (nejčastěji realizováno plynovými hořáky), nebo z libovolné teplotnosné látky o vhodné teplotě, která proudí uvnitř skrápěných trubek [1], [2].

Za ideálních podmínek dochází k varu skrápěcí kapaliny na celé ploše výměníku, ale u praktických realizací je nutné uvažovat s tím, že v místech, kde dochází k úvodnímu kontaktu kapaliny se stěnou výměníku, nebude docházet k varu na povrchu trubek, ale pouze k ohřevu skrápěcí kapaliny. A právě touto problematikou se zabývá předložená dizertační práce.

CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní cíle dizertační práce, které byly stanoveny při Státní doktorské zkoušce, jsou:

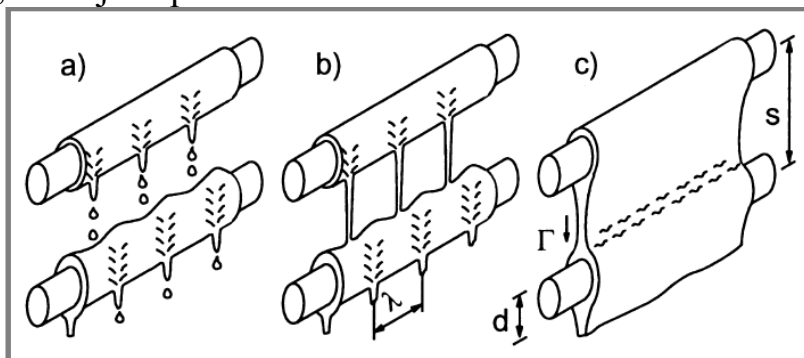
- **Experimentální stanovení součinitelů přestupu tepla na skrápěných výměnících.**
- **Na základě získaných výsledků zpřesnit matematický model přestupu tepla na skrápěné straně vyhřívaného výměníku.**

Dílčí cíle dizertační práce lze v souladu s diskusí a závěry při Státní doktorské zkoušce formulovat do následujících bodů:

- Rešerše základních faktorů, které ovlivňují přestup tepla na skrápěné straně vyhřívaného výměníku.
- Matematický popis a vyhodnocení experimentálních dat s cílem stanovení součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku, kde je kapalina ohřívána anebo dochází k jejímu varu.
- Vyhodnocení experimentálních dat s cílem vyjádřit součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku pro různé typy povrchů a různé geometrie výměníku (počty trubek a rozteče trubek).
- Vytvořit metodiku pro vyhodnocení teplotních polí na skrápěném trubkovém svazku při využití termovizní kamery.
- Zhodnotit vliv změny rozteče a počtu trubek na teplotní pole skrápěného svazku při využití termovizní kamery
- Na základě získaných výsledků zpřesnit matematický model přestupu tepla na skrápěné straně vyhřívaného výměníku.
- Zhodnocení a porovnání dosažených výsledků a závěrů

1 TEORIE PŘESTUPU TEPLA NA SKRÁPĚNÉ TRUBCE

Kapalina stékající po horizontálním trubkovém svazku může vytvářet tři základní režimy skrápění, které jsou patrné z obr. 1.

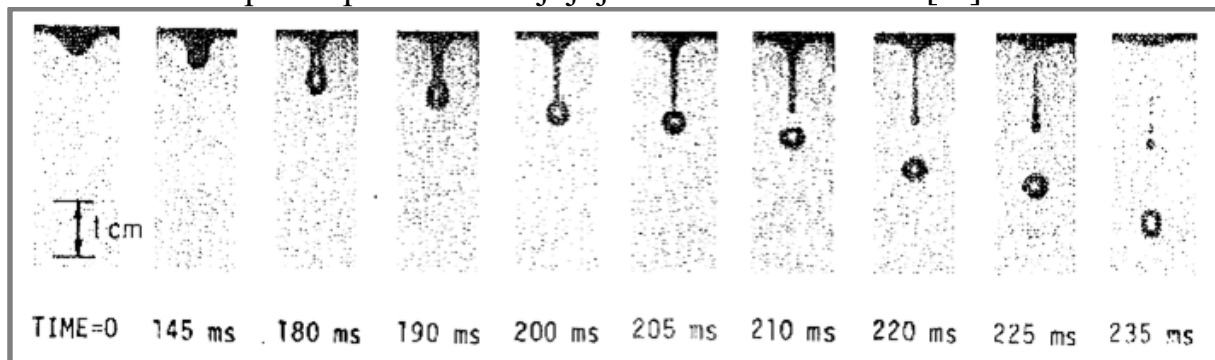


Obr. 1 Režimy skrápění [3]

Při malém průtoku kapalina kape z trubky na trubku tzv. kapkový režim, který je na obr. 1 označen písmenem „a)“. Při zvyšování průtoku skrápěcí kapaliny se kapky spojují a vytváří sloupce tj. sloupcový režim, který je označen písmenem „b)“. Při dalším navyšování průtoku se sloupce spojují a vytváří nejprve listy, které se při dalším navýšení průtoku spojují mezi sebou, až vyplní celou mezeru mezi trubkami. Proto je tento režim nazýván listový, nebo také blánový. Ten je označen písmenem „c)“. Vlivů na jednotlivé typy režimů a současně na přestup tepla je několik. První oblastí je testování režimů skrápění pro různé průměry trubek, rozteče trubek i materiály trubek a určování rozhraní pro jednotlivé režimy. Druhou oblastí je zkoumání přestupu tepla a stanovení součinitele přestupu tepla na skrápěných trubkových svazcích pro různé kapaliny, ať již docházelo k varu či nikoliv.

1.1 REŽIMY SKRÁPĚNÍ

U kapkového a sloupcového režimu při detailním pohledu na spodní stranu obtékané trubky je patrná proměnná tloušťka kapalného filmu, která je ve tvaru vln. Vzdálenost mezi nejvyššími místy, ze kterých se oddělují kapky, které se při zvětšujícím průtoku spojí do sloupců, definovali na základě pokusů například [4], [5], [6]. Dospěli k závěru, že vzdálenost mezi místy, kde se oddělují kapky, se shoduje se vzdáleností sloupců kapek a označují ji jako vlnovou délku λ [m].



Obr. 2 Sekvence oddělení kapky z kapalného filmu (etanol při 20°C) [5]

Tvorba kapky je značně ovlivněna povrchovým napětím kapaliny. Na obr. 2 v čase nula milisekund je nakumulován v jednom místě relativně velký objem etanolu, který

se snaží vlivem povrchového napětí zaujmout co nejmenší povrch, k čemuž s narůstajícím časem a objemem postupně i dochází (z pohledu povrchového napětí je nejideálnějším geometrickým tvarem koule, při kterém je nejmenší energie na povrchu). Než však dojde k úplnému odtržení kapky (tzv. primární), je spojena s filmem prostřednictvím „chvostu“, který se postupně prodlužuje a zužuje, až se na jeho konci primární kapka odtrhne. Poté dochází i k odtržení tohoto „chvostu“ od filmu. Tento „chvost“ se posléze rozpadne na několik menších sekundárních kapek, protože výhodnější tvar než válec je již zmíněná koule. Rovnice pro stanovení velikosti primárních kapek definovali například [7], [8] a na základě známého průměru d_p [m], a vlnové délky lze vypočítat hmotnostní průtok skrápěcí kapaliny vztahený na délku skrápěné zóny

$$\Gamma = 0,81 \cdot \frac{\rho_f}{\lambda} \cdot \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma}{\rho_f \cdot \lambda^3}} \quad [kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}], \quad (1.1)$$

kde ρ_f [$kg \cdot m^{-3}$] je hustota kapaliny a σ [$N \cdot m^{-1}$] její povrchové napětí.

Vlivů na tvorbu kapek a potažmo i režimů proudění je několik. Mimo fyzikálních parametrů skrápěcí kapaliny je to například změna průtoku skrápěcí kapaliny, u které i přes monotónnost změny mohou být dosahovány mírně odlišné výsledky [9]. Dalšími vlivy jsou například průměr obtékané trubky, či rozteč (vzdálenost) trubek, případně vzdálenost mezi distribuční trubkou a obtékanou trubkou. Komplexní mapy jednotlivých režimů pro vodu, jako skrápěcí kapalinu stanovili [10], [11], [12].

U jednotlivých režimů skrápění lze rozlišovat i režim proudění. Mimo běžné užívaného laminárního a turbulentního režimu se v případě skrápěných svazků využívá také režim pseudo laminární. Ten je definován tak, že na povrchu laminární vrstvy se tvoří tenké (kapilární) vlnky [13], [14].

1.2 MATEMATICKÉ MODELY PŘESTUPU TEPLA

Pro praktické využití experimentálních výsledků a jejich zobecnění pro široký rozsah provozních parametrů navrhl Chun a Seban (1971) [15] matematickou závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově čísle, které vystihuje průtok skrápěcí kapaliny, Prandtlově čísle, které je funkčně závislé hlavně na teplotě skrápěcí kapaliny, a v případě, že dochází k varu na povrchu skrápěné trubky, tak uvažuje i hustotu tepelného toku. Obecně definovali funkci Nusseltova čísla nevroucí kapaliny:

$$Nu = \bar{\alpha}_o \cdot \sqrt[3]{\frac{v^2}{g \cdot \lambda^3}} = a_1 \cdot Re^{a_2} \cdot Pr^{a_3} \quad [-], \quad (1.2)$$

kde hodnoty a_1 až a_3 jsou empiricky odvozené konstanty.

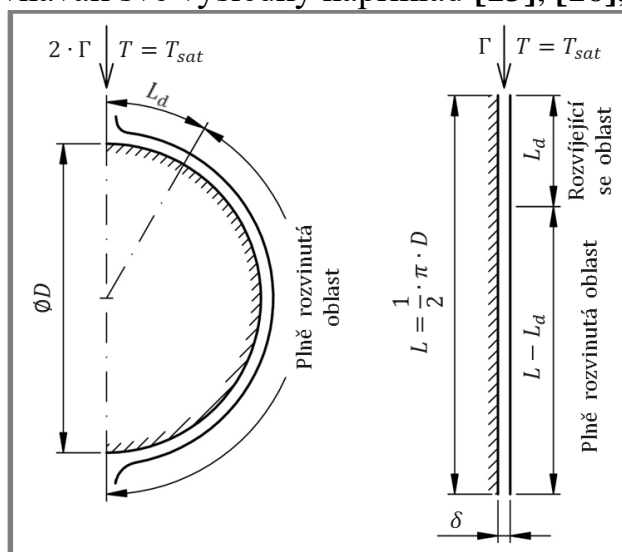
V dizertační práci jsou uvedeny tři matematické modely, které využívají tuto obecnou matematickou funkci. Modely byly odvozeny pro skrápěcí kapalinu, která je na povrchu skrápěného trubkového svazku ohřívána, případně je na hranici podchlazeného varu, tj. kapalina má stav sytosti, ale k varu ještě nedochází. První uvedený model publikoval Parkena a kol. (1990) [16], který odvodili na základě

experimentů na jedné elektricky vyhříváné mosazné trubce. Experimenty prováděli v rozsahu teplot skrápěcí kapaliny (vody) 45,0 až 127,0 °C a rozsahu hmotnostního průtoku vztaženého na délku skrápěné zóny 0,135 až 0,366 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. Druhý model stanovil Sernas a kol. (1979) [17]. Ten také prováděl experimenty na jedné elektricky vyhříváné mosazné trubce v rozsahu teplot skrápěcí kapaliny (vody) 44,9 až 117,0 °C a rozsahu hmotnostního průtoku vztaženého na délku skrápěné zóny 0,133 až 0,292 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. U obou studií byly experimenty prováděny na jedno a dvou coulové trubce a pro každý průměr vyjádřili zvlášť kritériální rovnici.

Autorem třetího matematického modelu je Owens (1978) [18]. Ten prováděl experimenty na jedné elektricky vyhříváné ocelové hladké trubce, u které testoval i vzdálenost distribuční trubky. Proto v kritériálních rovnicích využívá člen zohledňující poměr rozdílu rozteče a průměru trubek k průměru trubky. Mimo to kritériální rovnice rozdělil podle režimu proudění (laminární a turbulentní). U laminárního proudění je mimo členu zohledňujícího rozteč a průměr trubky ještě Nusseltovo číslo funkcí Reynoldsova čísla. U turbulentního proudění je mimo členu zohledňujícího rozteč a průměr trubky ještě Nusseltovo číslo funkcí Prandtlova čísla.

1.3 MATEMATICKÝ MODEL PŘESTUPU TEPLA VROUCÍ KAPALINY

Lorenz a Yung [19] vytvořili matematický model vroucí kapaliny publikovaný v roce 1979 pro predikci součinitele přestupu tepla na povrchu jedné skrápěné horizontální trubky při využití zjednodušené geometrie, která je patrná z obr. 3. S tímto modelem porovnávali své výsledky například [13], [16], [20].



Obr. 3 Zjednodušená geometrie pro matematický model

Při matematickém výpočtu je uvažována jedna vertikální polovina horizontální trubky (na obr. 3 vlevo), která je rozvinuta (na obrázku vpravo). Při tomto zjednodušení lze ve výpočtu uvažovat se svislou rovinnou deskou o celkové výšce L [m]. V matematickém modelu dále uvažují, že kapalina dopadající na vyhřívanou trubku má teplotu syté kapaliny. Proto vznikají při dalším ohřevu na trubce dvě základní oblasti. První z nich je přechodná konvektivní oblast, kde dochází k rozvoji varu, a v druhé oblasti je již plně vyvinutý var, při němž dochází k odpařování

skrápěcí kapaliny. Pro celkový střední součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěné horizontální trubky platí součet dílčích součinitelů přestupu tepla (na hranici varu α_{ob} , rozvíjející se oblasti α_{od} a plně rozvinuté oblasti α_{oc}), které jsou definovány níže a jsou korigovány délkou, pro kterou byla stanovena jejich střední hodnota, vůči celkové zkoumané délce (rozvinu)

$$\bar{\alpha}_o = \alpha_{ob} + \alpha_{od} \cdot \frac{L_d}{L} + \alpha_{oc} \cdot \left(1 - \frac{L_d}{L}\right) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]. \quad (1.3)$$

Chien a Cheng (2006) [13] uvádí, že model Chuna a Sešana (1971) [15], na základě kterého byl počítán součinitel plně vyvinuté oblasti v předchozím matematickém modelu, není v dobré shodě s prakticky naměřenými výsledky pro různá chladiva, resp. má velkou chybu. Proto navrhuje využít model pro vodorovnou trubku, který vychází z toho, že při výpočtu součinitele přestupu tepla na povrchu trubek by měl být zahrnut i vznik bublin. Model vychází z principu superpozice, tj. výsledný součinitel přestupu tepla je složen z více složek, které po sečtení dávají jeho výslednici. Tento model vyvinul Chen (1966) [21] a je dán základní rovnicí

$$\alpha_o = S \cdot \alpha_{ob} + \alpha_{cv} = S \cdot \alpha_{ob} + E \cdot h_l \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \quad (1.4)$$

která je shodná i pro proudění uvnitř kanálu, kde $S [-]$ značí faktor potlačení součinitel přestupu tepla na hranici vzniku varu α_{ob} a α_{cv} je součinitel konvektivního přestupu tepla, který se rovná součinu dvoufázového posilového faktoru $E [-]$ a součiniteli přestupu tepla pro jednofázové kapalně proudění. Pro faktor potlačení a dvoufázový posilový faktor doporučují Chien a Cheng (2006) rovnice využívající Martinelliho parametr $X_{tt} [-]$ díky kterému lze rovnici využít pro výpočet součinitele přestupu tepla dvoufázového proudění jakéhokoliv média.

1.4 VLIV SUCHÝCH MÍST NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

Oproti konvenčním zaplaveným výměníkům mají skrápěné výměníky vyšší součinitel přestupu tepla a může být zmenšena teplosměnná plocha. [22] Pro optimální přestup tepla a vývoj parní fáze skrápěcí kapaliny je třeba určit její optimální průtok a k tomu přiřadit optimální velikost teplosměnné plochy. Příliš nízký průtok skrápěcí kapaliny vede k tvorbě suchých míst, což v důsledku sníží součinitel přestupu tepla [23]. Naopak neúměrně vysoký průtok skrápěcí kapaliny může vést k zaplavení výměníku nebo jejímu návratu zpět do sběrné nádoby, čímž je zbytečně vynaložena práce čerpadla, které ji dopravuje do distribuční trubky.

Jedny z prvních výsledků v tomto směru publikoval Ganic (1980) [24], který při experimentech podchlazeného varu definoval minimální průtok skrápěcí kapaliny, při kterém se na teplosměnné ploše nevyskytují suchá místa, protože při dalším snížení průtoku dochází k rychlému propadu součinitele přestupu tepla na povrchu svazku. Ganic označuje již tento průběh jako „dryout“, přestože na svazku ještě fyzicky suchá místa nejsou. Například Ribatski (2007) [23] označuje tento stav jako „non-dryout“ a až v případě výskytu suchých míst stav popisují jako „dryout“. Roques (2007) [25] rozlišuje dva stavy pojmu „dryout“. Film, kde nedochází k varu kapaliny, je velmi tenký, a proto je odebrané teplo velmi malé. Ve druhém případě u filmu

dochází k varu a jsou myšlena suchá místa vytvořená v rychle rostoucích bublinách. Wei (2011) [26] uvádí, že u vody, jako skrápěcí kapaliny, by měl mít kapalný film na svazku tloušťku alespoň 3,2 mm, aby bylo možné pozorovat nukleační místa.

1.5 VLIV ROZPUSTNÝCH PŘÍMĚSÍ VE VODĚ

Již v úvodu této práce je zmíněna jedna z hlavních aplikací skrápěných výměníků. A to pro odsolování mořské vody termickou cestou. V literatuře je podíl soli ve vodě uváděn několika způsoby. První je v procentech. Například 1,5 % představuje množství, vyjádřené druhým způsobem, 15 gramů soli v jednom litru vody. Třetím způsobem je uvádění množství na jednu miliontinu (v angličtině „parts per million“, zkráceně „ppm“). Uvedené procentuální množství představuje 15 000 ppm ($mg \cdot l^{-1}$) [27], [28].

Yang a Shen (2008) [29] porovnávali součinitel přestupu tepla, kde skrápěcí kapalinou byla pitná (sladká) voda a mořská voda. Dospěli k závěru, že přestože má mořská voda o něco vyšší viskozitu, nemá tato skutečnost zásadní vliv na součinitel přestupu tepla. Sice je u jejich experimentů součinitel o něco nižší a tento rozdíl je přibližně konstantní v celém měřeném rozsahu průtoků, ale plochy patnácti procentní relativní odchylky se překrývají. Ve svém příspěvku ovšem neuvádí množství soli v mořské vodě.

Shen a kol. (2014) [27] testovali přestup tepla na hliníkové trubce, která byla elektricky vyhřívána. Při teplotě saturace 60 °C, což pro pitnou vodu odpovídá podle [30] tlaku cca 20,0 kPa(abs), porovnávali vliv množství soli ve vodě na součinitel přestupu tepla v rozmezí průtoku skrápěcí kapaliny 0,017 až 0,870 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ a dospěli k závěru, že nejvyšší koeficient je u čisté vody. S nárůstem množství soli ve vodě součinitel klesá přibližně rovnoměrně v celém testovaném rozsahu průtoku skrápěcí kapaliny. Při 1,5 % soli ve vodě klesne součinitel o cca 15 %, při zdvojnásobení množství soli (3,0 %) klesne o dalších cca 15 % a při ztrojnásobení množství soli (4,5 %) klesne součinitel přestupu o dalších cca 10 %.

Shahzad a kol. (2012) [28] testovali vliv množství soli ve vodě v rozsahu tlaku v testovací komoře 0,93 až 3,60 kPa(abs), kde nejmenší tlaková úroveň odpovídá hrubému vakuu. Z jejich výsledků je patrné, že vliv množství soli není významný u horní testované tlakové úrovně, tj. při 3,60 kPa(abs) a se snižujícím se tlakem dochází k poklesu součinitele s narůstajícím množstvím soli. Průběh se zdá být relativně lineární a potvrzuje závěry [27].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

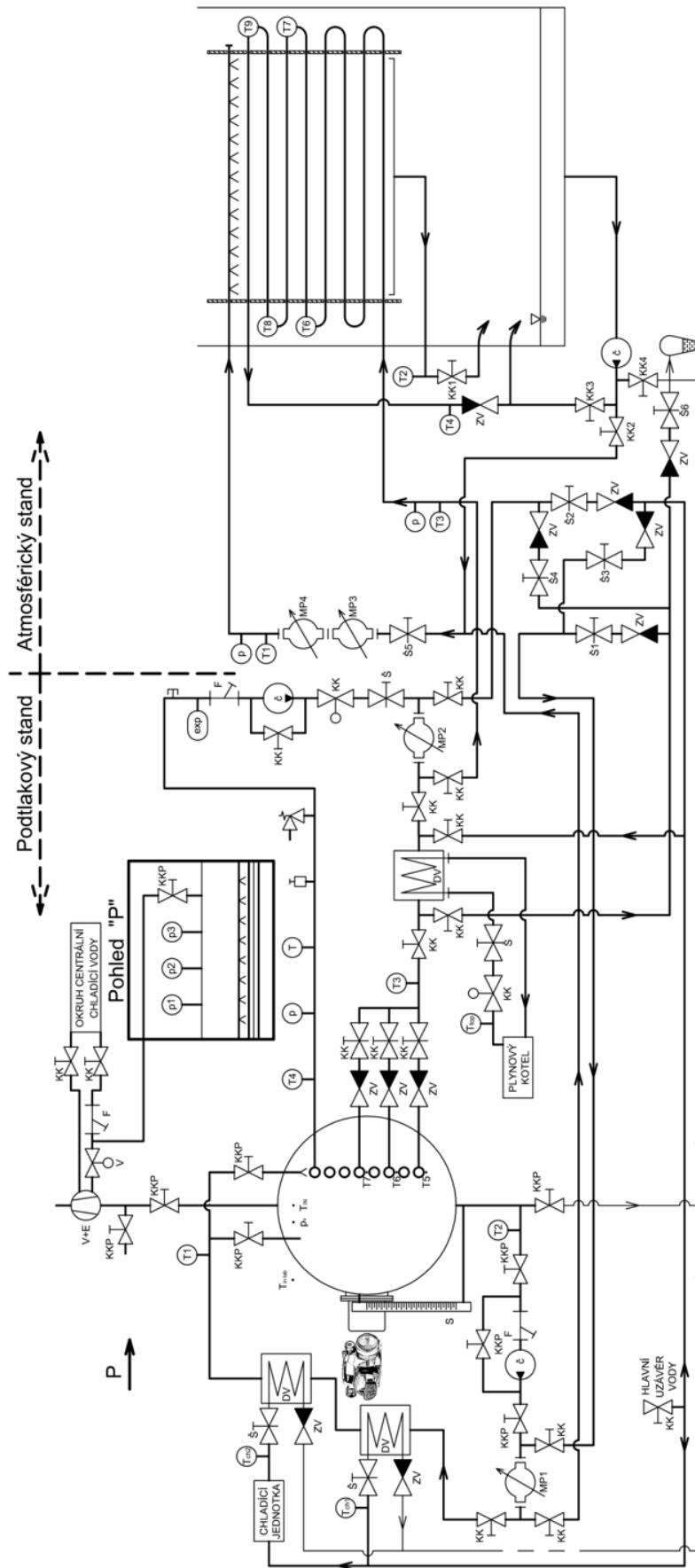
Pro zkoumání přestupu tepla na skrápěných trubkových svazcích byly postaveny dvě experimentální zkušební zařízení, která jsou vzájemně propojena a jež využívají společně některé části. Podle hlavního pracovního tlaku, na který jsou experimentální zařízení navrženy, jsou nazývány. Jejich společné schéma je na obr. 4. Podle hlavního pracovního tlaku, na který jsou experimentální zařízení navrženy, jsou nazývány. A to „podtlakový stand“ (přibližně dolní polovina schématu) a „atmosférický stand“ (přibližně horní polovina schématu).

2.1 PODTLAKOVÝ STAND

Trubkový svazek, na kterém může být simulován var i kondenzace, je umístěn v nádobě, ve které je vodokružnou vývěvou, skrze ejektor, tvořen podtlak, který může dosahovat vzhledem k teplotám skrápěcí vody až cca 1 kPa(abs). Komora zkušebního zařízení je válcová nádoba s třemi průzory o vnitřním průměru cca 305 mm a délce cca 1,2 m, v níž je umístěn trubkový svazek o zkoumané délce 940,0 mm.

Na zkušební komoru jsou napojeny dvě uzavřené smyčky (topná a skrápěcí), ve kterých cirkuluje pitná voda, která není nijak upravena a ani obohacena. Topná smyčka je navržena pro přetlak až 1,0 MPa a jejími základními součástmi jsou manometr, teploměr, pojistný ventil, expanzní nádoba, čerpadlo, regulační ventil, indukční průtokoměr (MP2) a deskový výměník, který je napojen na plynový kotl, ze kterého je dodáváno teplo topné kapaliny. Teplota topné vody přitékající od kotle je měřena před deskovým výměníkem termočlánkem (T_{top}). Smyčka, ve které cirkuluje skrápěcí kapalina a při experimentech je v ní podtlak, je z větší části tvořena měděnými trubkami a kulovými kohouty, které jsou k sobě pájeny. Dále je smyčka osazena čerpadlem, jehož výkon je regulován pomocí frekvenčního měniče, indukčním průtokoměrem (MP1) a deskovými výměníky, ve kterých může být skrápěcí kapalina ochlazována dvoufázově. V prvním výměníku je skrápěcí kapalina ochlazována studenou pitnou vodou z vodovodního řádu, jejíž teplota je měřena termočlánkem (T_{ch1}) a ve druhém výměníku je ochlazována skrápěcí kapalina pitnou vodou, která je ochlazena v chladicí jednotce, ze které může vytékat až o teplotě cca 1,0 °C, což je měřeno před výměníkem termočlánkem (T_{ch2}).

Trubkový svazek je složen z měděných trubek o průměru 12,0 mm, horizontálně umístěných pod sebou, které jsou spojeny pomocí měděných kolen a T-kusů spojených pájenými spoji. Uvnitř svazku proudí topná voda ze spodu nahoru. Topnou vodu lze do svazku pouštět až ve třech místech. Pokud je například svazek složen z osmi trubek, lze vytápět pouze první čtyři, šest, nebo všech osm trubek ve směru toku skrápěcí kapaliny. Průtok topné vody lze rozdělit i do jednotlivých částí smyčky současně, ale měření je pouze celkový průtok před rozdělením. Teplotní stavy topné kapaliny jsou měřeny termočlánky na vstupu do svazku (T_3) a výstupu ze svazku (T_4). Pro přiblížení rozvrstvení teplot topné kapaliny jsou umístěny termočlánky mezi první a druhou, druhou a třetí a třetí a čtvrtou trubkou.



Obr. 4 Schéma měřicích zařízení

Vysvětlivky:

č - čerpadlo, DV - deskový výměník, exp - expanzní nádoba, F - filtr, KK - kulový kohout, KKP - kulový kohout pájený, MP - indukční průtokoměr, p - manometr, p1 - p3 - vakuometr, S - stavoznak, Š - Soupě, T - teploměr, T (s dalším(-i) symbolem(-ly)) - termočlánek, V+E - vývěva + ejektor, ZV - zpětný ventil

Nad trubkovým svazkem je umístěna měděná distribuční trubka o průměru 12,0 mm, ve které jsou otvory o průměru 1,0 mm s roztečí 9,2 mm. Počáteční teplota skrápěcí vody je měřena termočlánkem na vstupu do distribuční trubky (T1). Výstupní teplota skrápěcí vody za testovanou částí trubkového svazku je měřena termočlánky pod vstupními otápenými trubkami.

Pro měření podtlaku v nádobě slouží tři vakuometry. První vakuometr je určen k vizuální kontrole a je rtuťový (p1), druhý digitální vakuometr Baumer TED6 (p2) měří v celém požadovaném spektru podtlaku, ale při velmi nízkých tlacích je méně přesný. Pro přesné měření tohoto nízkého spektra slouží třetí digitální vakuometr v rozsahu 2,0 kPa – 0 Pa. Všechny zkoumané veličiny jsou napřímo (termočlánky) anebo skrze převodníky snímány měřicími kartami DAQ 56 a zaznamenávány v měřicím počítači v prostředí LabView.

Pro umožnění zkoumání teplotních polí na trubkovém svazku i při podtlaku v nádobě, bylo do prostředního nahlížecího hrdla umístěno FLIR IR Window, což je okénko, které vyplňuje krystal fluoridu vápenatého (CaF_2), jenž je transparentní i pro infračervené záření. Teplotní pole na povrchu skrápěného trubkového svazku lze tedy snímat termovizní kamerou.

2.2 ATMOSFÉRICKÝ STAND

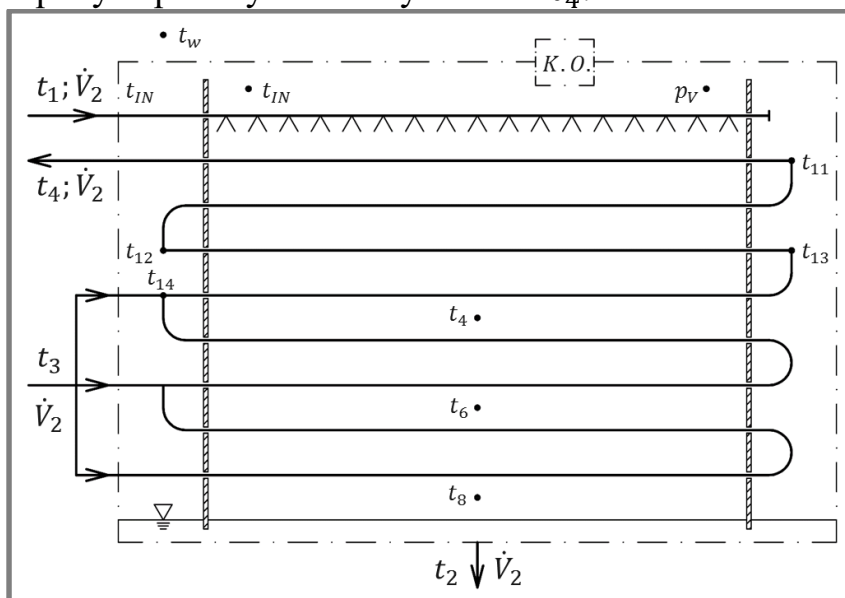
Vzhledem ke komplikovanosti a náročnosti přípravy trubkového svazku, potažmo celého experimentálního zařízení (podtlakového standu), byl rekonstruován a vybaven novými přesnějšími měřicími přístroji atmosférický stand, na kterém začínal výzkum skrápěných výměníků na Odboru energetického inženýrství. Skrápěný svazek se může skládat z jedné až 20 trubek o vnějším průměru 12,0 mm a zkoumané délce 1,0 m. Spojení jednotlivých trubek v trubkovém svazku je realizováno pomocí hadiček ze silikonové pryže, které jsou na konci trubek připevněny pomocí hadicových spon. Proto je příprava trubkového svazku relativně jednoduchá a rychlá. Trubky jsou umístěny v distančních plechách, které mají ve čtyřech sloupcích (A až D) po 21 dírách s roztečemi v rozmezí 15,0 až 70,0 mm.

Tepelných stavů médií (vody) proudících vně a uvnitř výměníku je dosahováno směřováním teplé a studené vody. Studená voda pro směřování je brána přímo z vodovodního řádu. Teplá voda je dodávána ze stejného výměníku, který je napojen na plynový kotel, jako v případě podtlakového standu. Ve výměníku je ohřívána studená voda proudící z vodovodního řádu. Označení měřicích bodů je totožné se značením u PS.

Mimo vlivů teplot a průtoků proudících médií na zkoumaný součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek byl zkoumán také vliv povrchu trubek. Experimenty byly prováděny na hladkém, pískovaném a rádlovaném (rýhovaném) trubkovém svazku.

4 STANOVENÍ PŘESTUPU TEPLA Z MĚŘENÝCH VELIČIN

Matematický model pro jednofázové proudění je odvozen na základě zdrojů [31] a [32]. V tomto modelu je teplota skrápěcí vody na vstupu do distribuční trubky označena symbolem t_1 a průtok skrápěcí vody je označen symbolem \dot{V}_1 . Konečná teplota ohřátí skrápěcí kapaliny za výměníkem je označena symbolem t_2 . V případě topné kapaliny je její průtok označen symbolem \dot{V}_2 a teplota na vstupu do výměníku symbolem t_3 , resp. výstupu z výměníku symbolem t_4 .



Obř. 5 Zjednodušené schéma skrápěného výměníku v PS

Vyhodnocení naměřených dat při jednofázovém proudění vychází z tepelné bilance mezi topnou kapalinou cirkulující uvnitř trubek a skrápěcí smyčkou podle, tj. Zákona zachování energie. Přenos tepla je realizován konvekcí, vedením a zářením. Při nižších teplotách je teplo přenášené zářením zanedbatelné, proto není při dalším výpočtu uvažováno. Výpočet zkoumaného součinitele přestupu tepla vychází z Newtonova zákona přestupu tepla a Fourierova zákona vedení tepla, které jsou využity pro formulaci následujícího vztahu

$$\alpha_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \left[\frac{1}{k_S} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot r_i} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_S} \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \right]}, \quad (4.1)$$

kde α_o [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] je součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek
 α_i [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] je součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky stanovený pro plně vyvinuté turbulentní proudění podle [33]

r_o ; r_i [m] jsou vnější a vnitřní průměr trubky

λ_S [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je tepelná vodivost

k_S [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je prostup tepla, který je stanoven na základě výše zmíněných zákonů určujících tepelný tok, který je dopočítán z tepelné bilance topné strany smyčky, a proto musí platit

$$\dot{Q}_S = k_S \cdot L \cdot \Delta T_{ln} = \dot{M}_{34} \cdot c_p \left(\frac{T_3 + T_4}{2} \right) \cdot (T_3 - T_4), \quad (4.2)$$

kde $\dot{M}_{34} [kg \cdot s^{-1}]$ je hmotnostní tok topné vody

$c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ je měrná tepelná kapacita vody při konstantním tlaku vztážená ke střední teplotě uvnitř smyčky

$L [m]$ je celková délka svazku

$\Delta T_{ln} [K]$ je logaritmický teplotní, kde bylo uvažováno s protiproudým výměníkem

Výše uvedený výpočet je platný pouze pro přestup tepla z vody proudící uvnitř trubek do skrápěcí kapaliny, která na povrchu nevře, případně na poslední trubce dochází v lokálních místech k zanedbatelnému varu. Pokud již dochází z větší části na trubkovém svazku k varu, resp. trubkový svazek je skrápěn vodou o sytosti, resp. vyšší, při odpovídajícím tlaku v komoře $p_v [Pa]$, je nutné uvažovat dvoufázové proudění. Množství vyvinuté páry je možné dopočítat na základě Zákona zachování hmotnosti. Tj. součet hmotnostního průtoku páry $\dot{M}_p [kg \cdot s^{-1}]$ a hmotnostního průtoku stékající vody za výměníkem $\dot{M}_v [kg \cdot s^{-1}]$ musí být roven hmotnostnímu průtoku vytékajícímu z distribuční trubky $\dot{M}_1 [kg \cdot s^{-1}]$. V této rovnici jsou dvě neznámé. Proto je nutné pro výpočet využít ještě Zákon zachování energie. Tedy součet energie potřebné pro vývin páry $\dot{Q}_p [W]$ a energie předané skrápěcí vodě $\dot{Q}_v [W]$ se musí rovnat energii dodané topnou kapalinou $\dot{Q}_s [W]$. Pak pro výpočet množství vyvinuté páry platí

$$\dot{M}_p = \frac{\dot{Q}_s - \dot{M}_1 \cdot [i_2(t_2; x = 0) - i_1(t_1; x = 0)]}{i_{IN}(t_{IN}; p_v) - i_2(t_2; x = 0)} \quad (4.3)$$

Za předpokladu, že teplota skrápěcí vody $t_1 [^\circ C]$ v distribuční trubce je maximálně na mezi sytosti, resp. mírně pod ní. Ve zmíněné rovnici $i_{IN} [J \cdot kg^{-1}]$ značí entalpii vyvinutého parního polštáře, který má teplotu $t_{in} [^\circ C]$, a $i_2 [J \cdot kg^{-1}]$ značí entalpii ohřáté skrápěcí vody která má teplotu $t_2 [^\circ C]$, za poslední trubkou.

Zkoumaný součinitel přestupu tepla lze stanovit na základě Newtonova zákona přestupu tepla, kde teplota stěny je určena jako střední teplota topné vody a teplota obtékající kapaliny jako střední hodnota teploty skrápěcí vody vytékající z distribuční trubky a teploty parního polštáře.

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q}_p &= \alpha_p \cdot S \cdot (T_w - T_\infty) \\ \Rightarrow \alpha_p &= \frac{\dot{M}_p \cdot [i_{IN}(t_{IN}; p_v) - i_1(t_1; x = 0)]}{S \cdot \left(\frac{t_3 + t_4}{2} - \frac{t_{in} + t_1}{2} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

kde $S [m^2]$ označuje teplosměnnou plochu, resp. povrch trubkového svazku.

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

5.1 VÝSLEDKY DOSAŽENÉ U ATMOSFÉRICKÉM STANDU

Vzhledem k relativní jednoduchosti přípravy trubkového svazku u atmosférického standu byly testovány rozteče trubek v rozmezí 15,0 až 30,0 mm po 5,0 mm a počet trubek ve svazku byl 4, 6, 8, nebo 10. V součtu bylo u jednotlivých typů povrchů testováno 16 geometrií. Při jednotlivých experimentech byla udržována teplota topné vody, která vstupuje do poslední (spodní) trubky, na úrovni 40,0 °C s přípustným rozsahem $\pm 1,0$ °C a průtokem $7,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ s přípustným rozsahem $\pm 0,1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Teplota skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky byla udržována na úrovni 15,0 °C s přípustným rozsahem $\pm 1,0$ °C. Po dobu každého experimentu byl měněn pouze průtok skrápěcí kapaliny, přičemž na začátku každého experimentu byl průtok nejvyšší vzhledem k podmínkám v daném čase, a byl postupně snižován po velmi malých krocích.

Z provedených experimentů vyplývá, že nejvyššího součinitele přestupu tepla bylo dosaženo u trubkových svazků s rádlovaným povrchem. Nejvyšší relativně ustálené hodnoty se pohybovali v případě čtyř a šestitrubkového svazku bez rozlišení rozteče trubek na průměrné úrovni $11,1 \pm 0,9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a $10,2 \pm 1,6 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. K ustálení součinitele docházelo u obou počtů trubek ve svazku na přibližně shodné úrovni u všech testovaných roztečí. V případě nejmenší rozteče (A1) to bylo na úrovni cca $0,12 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, u roztečí B1 a C1 se zlom pohybuje na úrovni cca 0,10 až $0,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ a při nejvyšší rozteči, tj. A2 zlom klesne až k hodnotě cca $0,09 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Při klesajícím trendu součinitele se u čtyř a šestitrubkového svazku pohybují hodnoty na přibližně shodné úrovni. V tabulkách v příloze dizertační práce jsou relativní odchylky při nízkém průtoku relativně vysoké, ale absolutní odchylky jsou v řádech desetin kilowattu na metr čtverečný a Kelvin. Při dalším navyšování trubek je v této oblasti rozptyl absolutních hodnot daleko významnější. Přičemž u rozteče A2 jsou hodnoty nejnižší a při zmenšování rozteče je součinitel při stejném průtoku vyšší.

U trubkového svazku s hladkými trubkami jsou nejvyšší hodnoty součinitele přestupu tepla také u čtyřtrubkového svazku, ale relativně stabilní úsek dosahuje jen na průměrnou úroveň cca $8,5 \pm 0,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ při neuvažování průběhu s roztečí A2, u kterého došlo k ustálení o cca $2,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ níže. I přes to je oproti svazku s rádlovaným povrchem propad průměrné hodnoty o cca 23,4 %. U šestitrubkového svazku bez rozlišení rozteče je průměrná hodnota součinitele na úrovni cca $7,0 \pm 0,7 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ u relativně ustáleného úseku. U osmitrubkového svazku je průměrná hodnota nižší o cca 12,9 % a u desetitrubkového svazku je průměrná hodnota na úrovni cca $5,4 \pm 1,0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Ustálení u rozteče A2 dochází při průtoku cca $0,08 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ a se zmenšující se roztečí se tato hranice navyšuje, kde u roztečí B1 a C1 je na úrovni 0,10 až $0,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. V případě rozteče A1 je výrazná hranice pouze v případě čtyřtrubkového svazku, ale s narůstajícím počtem

trubek se průběh narovnává a u desetitrubkového svazku již zlom není téměř znatelný, resp. průběh je téměř lineární.

U pískovaného trubkového svazku je zajímavý výsledek součinitele přestupu tepla v případě rozteče trubek A1, kde jsou průběhy na srovnatelné úrovni, resp. průměrná hodnota je $7,3 \pm 0,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. U dalších geometrií jsou hodnoty na maximálně srovnatelné úrovni. Při srovnání s hladkým trubkovým svazkem a jednotlivých geometrií mezi sebou, jsou dosažené výsledky nižší nebo se maximálně toleranční pole překrývají.

Tradičním způsobem měření lze kvantifikovat střední hodnotu součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku, ale jen obtížně lze hodnotit chování skrápěcí kapaliny obtékající svazek. To lze posoudit například vizuálně, či jinými bezkontaktními metodami. V dizertační práci byla využita metoda snímání infračerveného záření termovizní kamerou. U jednotlivých experimentů byly při ustálených stavech pořizovány záznamy sekvencí, kde každá sekvence obsahovala 181 snímků, které byly zaznamenávány při frekvenci 30 Hz po dobu 6 sekund. Tyto sekvence byly analyzovány v programu Matlab R2010b. Výsledkem analýzy byla průměrná hodnota teploty povrchu skrápěcí kapaliny každé trubky při konstantním průtoku skrápěcí kapaliny společně s její směrodatnou odchylkou. Bylo zjištěno, že v testovaném rozsahu průtoků skrápěcí kapaliny, je dostačující zhruba poloviční počet snímků, a při započtení hodnot dalších snímků se hodnoty mění pouze v řádu desetin stupně Celsia. Přesto byly při analýzách započítány všechny snímky. Tímto způsobem bylo možné pohlížet na dynamický děj jako na statický. Ze snímků je patrný pozitivní vliv rádlovaného i pískovaného povrchu trubkového svazku na zrovnoměrnění proudění, resp. teplotního pole na svazku, a při nízkých průtocích skrápěcí kapaliny i možná rychlá a přesná detekce suchých míst, vzhledem k různým emisivitám vody a mědi.

Z výsledků tradičně provedených experimentů, z nichž byl odvozen součinitel přestupu tepla na povrchu svazku, a z výsledků bezkontaktně detekovaných teplotních polí lze závěrem shrnout, že zmenšování teplosměnné ploch vedlo ke zvýšení měrného toku a zároveň s tím i zvýšení součinitele přestupu tepla. Z pohledu teplotních polí skrápěcí kapaliny na trubkovém svazku, byl nejvýhodnější rádlovaný povrch, který narušoval mezní vrstvy, čímž zrovnoměrhoval proudění tekutiny na svazku, která již neměla tendence proudit v pásech. Ovšem při nejvyšších testovaných průtocích byla již tloušťka filmu natolik vysoká, že k proudění v pramenech přesto docházelo. V těchto případech byl již průtok zbytečně vysoký, protože se pohyboval v relativně stabilní oblasti součinitele přestupu tepla a jeho snížením k hraně zlomu součinitele přestupu tepla by se snížila práce čerpadla bez podstatného vlivu na součinitel přestupu tepla. Z pohledu roztečí trubkového svazku na rozložení teplotních polí je nejvýhodnější při daných podmínkách rozteč B1. S dalším navyšováním celkové výšky trubkového svazku se po oblast zlomu součinitele přestupu tepla sice snižovala, ale při nižších průtocích rychleji rostla nadbytečná oblast, na které již nedocházelo k ohřevu skrápěcí kapaliny.

Na základě experimentálně získaných údajů byly testovány dva základní tvary rovnic. Mocnná funkční závislost a lineární kombinace mocninných funkcí. U obou tvarů rovnic byly u jedné zvolené geometrie testovány vlivy Reynoldsova čísla, Prandtlova čísla a měrného tepelného toku odebraného topné kapaliny. Bylo zjištěno, že základní tvar výsledné funkce určuje Reynoldsovo číslo a Prandtlovo číslo ovlivňuje rozptyl (šířku pásu funkce). Ale přesto je nutné pro zvýšení přesnosti funkce zahrnout i měrný tepelný příkon, který nejlépe korigoval místo zlomu (propadu) součinitele přestupu tepla. Výsledná průměrná chyba u obou testovaných funkcí je na stejné úrovni, ale její směrodatná odchylka je o cca 0,4 procentního bodu menší u lineární kombinace mocninných funkcí a maximální chyba je na poloviční úrovni, tj. 17,0 %.

Experimentální výsledky byly rozděleny do třech souborů podle typu povrchu a u jednotlivých hodnot byly nejdříve testovány vlivy Reynoldsova i Prandtlova čísla a měrného tepelného příkonu. U všech třech proměnných se prokázala jejich významnost. Poté byly testovány další členy zohledňující počet, rozteč trubek a průměr trubek v různých kombinacích. Nejlépe dané trendy vystihovaly zahrnuté členy počet trubek a poměr mezery mezi trubkami k vnějšímu průměru trubky u mocninné funkční závislosti (varianta A9), u které byly výsledky dílčích průběhů uvedeny v příloze dizertační práce.

5.2 VÝSLEDKY DOSAŽENÉ U PODTLAKOVÉHO STANDU

Na výsledky experimentů provedených na atmosférickém standu bylo navázáno při experimentech u podtlakového standu. Vzhledem ke komplikovanosti a náročnosti přípravy trubkového svazku, který musí být pájený, a podtlakové komory před prvním uvedením daného výměníku do provozu, byla zvolena rozteč trubek B1 a osm hladkých trubek, přičemž lze otáčet pouze první čtyři nebo šest trubek. Jako první byl testován vliv podtlaku na součinitel přestupu tepla při teplotním spádu stejném, jako byl realizován u atmosférického standu. U šestitrubkového svazku při průtoku skrápěcí kapaliny $8,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ byl v podtlakové nádobě postupně snižován tlak. Při ustálených stavech dílčích tlakových úrovní byly pořizovány termovizní kamerou sekvence, které byly vyhodnoceny stejným způsobem jako v případě experimentů u atmosférického standu. Z vyhodnocení vyplynulo, že při snižování tlaku v komoře po cca $55 \text{ kPa}(abs)$ se mírně snižovala teplotní diference (velikost ohřátí skrápěcí kapaliny) a zároveň s ní klesal i její rozptyl. To znamená, že míra ohřátí povrchu kapaliny sice mírně klesla, ale teplotní pole bylo stabilnější. Při tomto experimentu byly zaznamenávány také jednotlivé měřené veličiny. Z nich odvozený průběh součinitele přestupu tepla měl mírně stoupající tendenci v rámci celého měřeného tlakového rozsahu.

U šestitrubkového svazku byl podrobně testován vliv podtlaku v rozsahu průtoků skrápěcí kapaliny $4,0$ až $9,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Z vrstevnicového grafu, ve kterém byla vynesena výsledná průměrná Nusseltova čísla, odvozená ze součinitele přestupu tepla na povrchu svazku, v závislosti na průtoku skrápěcí kapaliny a tlaku v komoře je patrný obdobný průběh, jako v případě výsledku u atmosférického standu. Při nízkém

průtoku je výrazný propad součinitele (Nusseltova čísla) a při průtoku okolo cca $6,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ dochází k jeho stabilizaci. Zároveň je patrný pozitivní vliv mírného podtlaku na Nusseltovo číslo, jež mírně vzrostlo.

U všech třech počtů trubek byl sledován vliv změny teploty, jak skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky, kde bylo testováno $15,0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$, tak teploty topné kapaliny vstupující do svazku, kde bylo testováno $40,0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Tolerované odchylky testovaných teplot byly $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Testovány byly teplotní spády 20/40, 15/40 a 20/50 $^\circ\text{C}$ v rozmezí průtoků skrápěcí kapaliny 4,0 až $6,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Jedním z důvodů takto relativně úzkého rozmezí průtoků bylo následné testování varu na svazku. Dalším důvodem bylo, že jednotlivé testované oblasti měrných tepelných příkonů na sebe navazovali, při vynášení Nusseltova čísla ve vrstevnicovém grafu, jež bylo závislé ještě na absolutním tlaku v komoře. Jednotlivé teplotní spády na sebe navazovali od nejmenšího (20/40 $^\circ\text{C}$) po nejvyšší (20/50 $^\circ\text{C}$), přičemž při každém teplotním spádu byla vytvářena svislá lokální minima a maxima. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo v případě čtyřtrubkového svazku při teplotním spádu 15/40 $^\circ\text{C}$.

Testování vývoje varu na skrápěném trubkovém svazku navazovalo na jednotlivé experimenty, při kterých byl zkoumán vliv změny teploty topné a skrápěcí kapaliny. Tj. při počátečních teplotních spádech 20/40, 15/40 a 20/50 $^\circ\text{C}$ v rozmezí průtoků skrápěcí kapaliny 4,0 až $6,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Tento relativně malý průtok byl zvolen proto, že byl testován vliv tenkého kapalného filmu na množství generované páry v oblasti propadu součinitele přestupu tepla, přičemž tento vliv se u provedených experimentů neprokázal. Experimenty probíhaly tak, že při nastaveném teplotním spádu bylo dosaženo minimálního možného tlaku v nádobě v daný čas. Při dosažení minimálního tlaku v komoře již byla teplota skrápěcí kapaliny za výměníkem minimálně na bodu sytosti, ale v celkové bilanci byl vliv varu na poslední trubce zanedbatelný. Poté byla po malých krocích zvyšována teplota skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky a v důsledku toho se mez sytosti postupně posouvala na výměníku směrem vzhůru, přičemž vliv varu se začal projevovat výrazněji. Na základě energetické bilance byly pro jednotlivé experimenty určeny hranice plochy, na kterých již dochází k varu skrápěcí kapaliny, v závislosti na teplotě skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky ponížené o teplotu saturace odpovídající aktuálnímu tlaku v komoře. U všech provedených experimentů docházelo při teplotě skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky ponížené o teplotu saturace odpovídající aktuálnímu tlaku v komoře cca $-1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ k varu skrápěcí kapaliny na 75 % výšky svazku (uvažováno od poslední trubky). Zároveň na úrovni této teploty docházelo ke stabilizaci součinitele přestupu tepla parní fáze na povrchu svazku. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u šestitrubkového svazku při teplotě topné vody $50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ a součinitel měl v závislosti na průtoku kapalného filmu vrůstající tendenci, ale dominantní částí celkového součinitele přestupu tepla, zahrnujícího jak kapalnou tak plynnou složku, je součinitel kapalného filmu. Proto trendy výsledného celkového součinitele přestupu tepla kopírují trendy součinitele přestupu tepla kapalně fáze skrápěcí kapaliny. Nejvyšších hodnot je dosaženo v případě čtyřtrubkového svazku a nejnižších hodnot v případě osmitrubkového svazku, přičemž hodnoty stanovené při teplotě topné vody

40,0 °C leží na společném průběhu s hodnotami určenými při teplotě topné vody 50,0 °C. V případě množství generované páry dosahují hodnoty stanovené při teplotě 40,0 °C u všech třech trubkových svazků stejné výše cca $0,25 \pm 0,04 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$. Při 50,0 °C se již projevila velikost teplosměnné plochy a ideálního rozložení teplotního pole. Nejvíce páry bylo generováno u šestitrubkového svazku, a to v průměrné výši cca $0,60 \pm 0,03 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, u čtyřtrubkového svazku byla průměrná hodnota množství cca $0,45 \pm 0,02 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ a průměrná hodnota u osmitrubkového svazku byla ve výši $0,51 \pm 0,02 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž pole směrodatných odchylek se překrývala s poli generovaných množství na čtyř a šestitrubkovém svazku.

Při experimentech se projevila závislost výsledného součinitele přestupu tepla na regulovaných veličinách. V případě jednofázového proudění byl součinitel závislý zejména na teplotě skrápěcí kapaliny na výtoku z distribuční trubky a jejím průtoku, teplotě topné vody na vstupu do výměníku a průtoku topné vody. Okrajový vliv měl tlak v komoře. U dvoufázového proudění, kde byl var rozvinut na podstatné části výměníku, měli hlavní vliv teplota topné vody vstupující do výměníku, její průtok a tlak v komoře.

5.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S JINÝMI STUDIEMI

Součinitele přestupu tepla na povrch skrápěného svazku v případě, kdy byla skrápěcí kapalina pouze ohřívána a nedocházelo k jejímu varu, byly porovnány s třemi matematickými modely. Všechny tři byly stanoveny na základě experimentů. Přesto je nutné brát srovnání pouze jako orientační a to hned z několika důvodů. Uvedení autoři zkoumali součinitel přestupu tepla na jedné krátké elektricky vyhřívané trubce o délce do jednoho metru, průměru 1" a 2", přičemž trubky v případě Parkena a kol. (1990) [16] a Sernase a kol. (1979) [17] byly z mosazi a v případě Owens (1978) [18] z nerezi. V případě prvních dvou matematických modelů autoři vytvořili kritériální rovnice pro každý testovaný průměr mosazné trubky zvlášť a v případě kritériální rovnice stanovené Owensem obsahovala člen zohledňující vzdálenost distribuční trubky od otápné skrápěné trubky podělený průměrem skrápěné trubky. Nejvýznamnější shody bylo dosaženo s porovnávanými výsledky získanými na atmosférického standu u osmitrubkového svazku. Avšak ani jeden z matematických modelů neuvažoval s prudkým poklesem součinitele přestupu tepla při tenkém kapalném filmu skrápěcí kapaliny na svazku, který odebírá malý tepelný tok.

Výsledky celkových součinitelů tepla při dvoufázovém proudění byly porovnány se dvěma matematickými modely. První matematický model, jehož hlavní strukturu stanovili Lorenze a Yunga (1979) [19], vychází z proudění po vertikální stěně, na kterou je rozvinuta jedna polovina horizontální trubky. Při porovnání tohoto modelu s výsledky experimentů však nebyla dosažena dobrá shoda, resp. hodnoty spočítané podle tohoto modelu pro naměřené veličiny dosahovali průměrné úrovně $2,25 \pm 0,25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a byly menší v rozmezí 29,5 % až 59,1 % oproti hodnotám stanoveným podle kapitoly.

Druhý matematický model pro dvoufázové proudění definoval Chien a Cheng (2006) [13]. Tento model lze vzhledem ke své obecnosti a Martinelliho parametru využít pro různá skrápěcí média. S tímto matematickým modelem již byla celkem dobrá shoda, resp. hodnoty celkového součinitele přestupu tepla stanovené podle tohoto druhého modelu byly menší průměrně o $(13,6 \pm 2,9)\%$, přičemž nejvyšší rozdíl byl 17,9 %. Jedním z možných důvodů dobré shody bylo to, že při výpočtu byl využit součinitel přestupu tepla jednofázového kapalného proudění.

ZÁVĚR

Horizontální trubkové svazky, po kterých stéká tenký kapalný film, nejsou novou technologií. Jsou využívány především ve výparnicích a kondenzátorech absorpční jednotky či při destilaci vody. Jeho velkou výhodou je, že v případě varu skrápěcí kapaliny na trubkovém svazku, se rychle odděluje plynná fáze média od kapalné, jakmile je to možné, což v důsledku zvyšuje součinitel přestupu tepla na povrchu svazku. Faktorů ovlivňující přestup tepla na skrápěném svazku je několik a výzkumy v této oblasti lze rozdělit do dvou základních oblastí. První oblastí je testování režimů skrápění pro různé průměry trubek, materiálů trubek, geometrie jejich povrchu a určování rozhraní pro jednotlivé režimy, kterými jsou kapkový, sloupcový a blánový (listový). Druhou oblastí je zkoumání přestupu tepla a stanovení součinitele přestupu tepla na skrápěných trubkových svazcích pro různé kapaliny, ať již docházelo k varu či nikoliv.

Většina publikovaných výsledků pro vodu, jako skrápěcí kapalinu, je většinou založena na experimentech s jednou elektricky vyhřívanou krátkou trubkou, před kterou je v některých případech předřazena jedna či více trubek, které mají za úkol stabilizovat (rozprostřít) kapalný film, a za přísně laboratorních a předem striktně definovaných podmínek stanovují zmíněné zkoumané závislosti. Na skrápěné trubky nebylo pohlíženo z provozního hlediska, kde je více trubek ve svazku s proměnlivými tepelnými toky v různých částech svazku, na kterých může zároveň skrápěcí kapalina proudit při různých režimech a s odlišně vysokými přestupy tepla. Této oblasti je v některých částech světa v poslední době soustředěn výzkum s ohledem na odsolování mořské vody při využití nízko potenciálního tepla ať již odpadního z různých technologií nebo třeba z geotermálních pramenů. A právě problematice skrápěných výměníků, na kterých je skrápěcí kapalina ohřívána nebo dochází i k jejímu varu, je zaměřena tato práce.

Pro experimentální účely bylo rekonstruováno a vylepšeno experimentální zařízení atmosférický stand a pro testování skrápěných výměníků v podtlaku bylo postaveno experimentální zařízení podtlakový stand. Hlavním cílem experimentů u atmosférického standu bylo stanovit součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných svazků při stejných podmínkách pro různé geometrie a povrchy svazku. U obou zařízení byly využity měděné trubky o vnějším průměru 12,0 mm. Testovány byly hladké, pískované, a rádlované trubky, přičemž po dobu každého experimentu byly všechny trubky ve svazku o jednotném povrchu. Pískovaného (zdrsněného) povrchu bylo dosaženo opískováním vysokopecní struskou, přičemž úběr materiálu neměl významný vliv na vnější průměr trubky. Rádlovaného povrchu bylo dosaženo objemovým tvářením za studena a to rádlováním (rýhováním). Při tomto způsobu nedochází k úběru materiálu a střední hodnota vnějšího průměru je zachována.

Na základě získaných experimentálních výsledků při stejných okrajových podmínkách u různých geometrií byl zpřesněn obecný matematický model pro výpočet součinitele přestupu tepla (Nusseltova čísla). Oproti dříve definovaným funkčním závislostem, které byly funkcí Reynoldsova a (nebo) Prandtlova čísla se ukázalo nezbytné model rozšířit o měrný tepelný příkon, který nejlépe vystihoval

zlom průběhu součinitele a který se užíval v případech, kdy již docházelo k varu skrápěcí kapaliny. Dále bylo v matematickém modelu testováno několik variant zohledňujících počet trubek a jejich rozteč. U všech testovaných variant se ukázaly oba členy jako nezbytné, přičemž nebyl zásadní jejich tvar.

V průběhu jednotlivých experimentů byly zaznamenávány teplotní pole na skrápěném svazku při vybraných průtocích skrápěcí kapaliny. Díky vytvoření metodice bylo možné popsat a kvantifikovat vliv geometrie svazku na optimální teplotní pole.

Experimenty prováděné u podtlakové standu navazovaly na výsledky u atmosférického standu. První část provedených experimentů byla zaměřena na přestup tepla při podtlaku, kdy nedochází k varu skrápěcí kapaliny na svazku. Z výsledků tradičně provedených experimentů i s experimentů při využití termovizní kamery vyplývá, že se sice se snižujícím tlakem snižuje míra ohřátí kapalného filmu, ale teplotní pole je stabilnější a mírně vzrůstá součinitel přestupu tepla. Následně byl testován rozvoj varu na svazku až po plně vyvinutý var skrápěcí kapaliny na celé ploše svazku. Z výsledků vyplývá, že při dosažení teploty skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky cca $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pod bodem sytosti odpovídajícímu aktuálnímu tlaku v komoře již dochází k varu na cca 75 % plochy svazku a zároveň dochází ke stabilizaci součinitele přestupu tepla.

Při experimentech se projevila závislost výsledného součinitele přestupu tepla na regulovaných veličinách. V případě jednofázového proudění byl součinitel závislý zejména na teplotě skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky a jejím průtoku, teplotě topné vody na vstupu do výměníku a průtoku topné vody. Okrajový vliv měl tlak v komoře. U dvofázového proudění, kde byl var rozvinut na podstatné části výměníku, měli hlavní vliv teplota topné vody vstupující do výměníku, její průtok a tlak v komoře.

Závěrem lze konstatovat, že cíle vymezené při Státní doktorské zkoušce byly splněny a v některých ohledech i překročeny a to zejména v oblasti detekce teplotních polí bezkontaktní metodou při využití termovizní kamery. Za hlavní přínos práce lze považovat: (1) Stanovení součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku o různých geometriích (počtech trubek a roztečích trubek) a třech různých typech povrchů při shodné teplotní úrovni topné kapaliny vstupující do trubkového svazku a skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky. (2) Na základě získaných součinitelů přestupu tepla byl zpřesněn matematický model, který již zahrnuje i vliv „pseudo suchých“ míst na trubkovém svazku, jeho povrch, rozteč a velikost teplosměnné plochy. (3) Byla vytvořena metodika vyhodnocení teplotních polí na skrápěném trubkovém svazku při využití termovizní kamery, kterou lze využít i u jiných snímaných objektů, na kterých probíhá dynamická změna teploty. (4) Byl zjištěn pozitivní vliv mírného podtlaku na součinitel přestupu tepla a na teplotní pole na skrápěném trubkovém svazku. (5) Byly definovány hlavní vlivy rozvoje varu na skrápěném trubkovém svazku na součinitel přestupu tepla parní a kapalně fáze a množství generované páry.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HEROLD, K., RADERMACHER R. a S. KLEIN. *Absorption chillers and heat pumps*. Boca Raton: CRC Press, 1996, 329 s. ISBN 08-493-9427-9.
- [2] POSPÍŠIL, J. a J. FIEDLER. Systémy společné výroby elektrické energie, tepla a chladu. *Tzb-info.cz*. Praha: Topinfo s.r.o., 2010, č.1, 325-329. ISSN 1801-4399.
- [3] ARMBRUSTER, R. a J. MITROVIC. Evaporative cooling of a falling water film on horizontal tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1998, roč. 18, č. 3, s. 183-194. doi: 10.1016/S0894-1777(98)10033-X. ISSN 0894-1777.
- [4] TANG, J., LU, Z., YU-CHI, B. a S. LIN. Droplet Spacing of Falling Film Flow on Horizontal Tube Bundles. In: *Proceedings of the 18th International Congress of Refrigeration*. Montreal, Quebec, Canada: International Institute of Refrigeration, Paris, France, 1991, s. 474-478. ISBN 2-9802798-0-3.
- [5] YUNG, D., LORENZ, J. a E. GANIĆ. Vapor/Liquid Interaction and Entrainment in Falling Film Evaporators. *Journal of Heat Transfer*. 1980, roč. 102, č. 1, 20-25. doi: 10.1115/1.3244242. ISSN 00221481.
- [6] GONZALEZ, G., JABARDO, J., a W. STOECKER. *Falling film Ammonia Evaporators*. Air Conditioning and Refrigeration Center. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992, 60 s.
- [7] KILLION, J. a S. GARIMELLA. Pendant Droplet Motion for Absorption on Horizontal Tube Banks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004, roč. 47, č. 19-20, s. 4403-4414. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.032. ISSN 0017-9310.
- [8] FUJITA, T. Falling Liquid Films in Absorption Machines. *International Journal of Refrigeration*. 1993, roč. 16, č. 4, s. 282-294. doi: 10.1016/0140-7007(93)90081-I. ISSN 0140-7007.
- [9] JAFAR, F. A., THORPE, G. R. a Ö. F. Turan. Flow Mode Characterisation of Liquid Films Falling on Horizontal Plain Cylinders. In *Computational fluid dynamics seventh international conference on CFD in the minerals and process industries*. Melbourne, Vic.: CSIRO, 2009, s. 6. ISBN 978-064-3098-251. Dostupné z < http://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/038JAF.pdf >
- [10] ARMBRUSTER, R. a J. MITROVIC. Patterns of falling film flow over horizontal smooth tubes. *Proceedings of the 10th international heat transfer conference: Brighton, UK*. 1994, č. 3, 275-280.
- [11] HU, X. a A. JACOBI. The Intertube Falling Film: Part 2 - Mode Effects on Sensible Heat Transfer to a Falling Liquid Film. *Journal of Heat Transfer*. 1996, roč. 118, č. 3, 626-636. doi: 10.1115/1.2822678. ISSN 0022-1481.

- [12] ROQUES, J., DUPONT, V. a J. THOME. Falling Film Transitions on Plain and Enhanced Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 2002, roč. 124, č. 3, s. 491-499. doi: 10.1115/1.1458017.
- [13] CHIEN, L.-H. a C.-H. CHENG. A Predictive Model of Falling Film Evaporation with Bubble Nucleation on Horizontal Tubes. *HVAC*. 2006, roč. 12, č. 1, s. 69-87. doi: 10.1080/10789669.2006.10391168. ISSN 1078-9669.
- [14] WILKE, W. Wärmeübergang an Rieselfilme. *VDI-Forschungsheft*. 1962, č. 490, s. 36.
- [15] CHUN, K. a R. SEBAN. Heat Transfer to Evaporating Liquid Films. *Journal of Heat Transfer*. 1971, roč. 93, č. 4, s. 391-396. DOI: 10.1115/1.3449836. ISSN 0022-1481.
- [16] PARKEN, W., FLETCHER, L., SERNAS, V. a J. HAN. Heat Transfer Through Falling Film Evaporation and Boiling on Horizontal Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1990, roč. 112, č. 3, s. 744-750. DOI: 10.1115/1.2910449. ISSN 0022-1481.
- [17] SERNAS, V. Heat Transfer Correlation for Subcooled Water Films on Horizontal Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1979, roč. 101, č.1, s. 176-178. doi: 10.1115/1.3450913. ISSN 0022-1481.
- [18] OWENS, W. Correlation of Thin Film Evaporation Heat Transfer Coefficients for Horizontal Tubes. *Proceedings, Fifth Ocean Thermal Energy Conversion Conference, Miami Beach, Florida*. 1978, s. 71-89.
- [19] LORENZ, J. a D. YUNG. A Note on Combined Boiling and Evaporation of Liquid Films on Horizontal Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1979, roč. 101, č. 1, s. 178-180. doi: 10.1115/1.3450914. ISSN 0022-1481.
- [20] LORENZ, J. a D. YUNG. Combined Boiling and Evaporation of Liquid Films on Horizontal Tubes. *Proceedings, Fifth Ocean Thermal Energy Conversion Conference, Miami Beach, Florida*. 1978, s. 46-69.
- [21] CHEN, J. Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1966, roč. 5, č. 3, s. 322-329. doi: 10.1021/i260019a023. ISSN 0196-4305.
- [22] RIBATSKI, G. a A. JACOBI. Falling Film Evaporation on Horizontal Tubes - a critical review. *International Journal of Refrigeration*. 2005, roč. 28, č. 5, s. 635-653. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.12.002. ISSN 0140-7007.
- [23] RIBATSKI, G. a J. THOME. Experimental Study on the Onset of Local Dryout in an Evaporating Falling Film on Horizontal Plain Tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007, roč. 31, č. 6, s. 483-493. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2006.05.010. ISSN 0894-1777.
- [24] GANIC, E. a M. ROPPO. An Experimental Study of Falling Liquid Film Breakdown on a Horizontal Cylinder During Heat Transfer. *Journal of Heat*

Transfer. 1980, roč. 102, č. 2, s. 342-346. doi: 10.1115/1.3244285. ISSN 0022-1481.

- [25] ROQUES, J. F. a J. THOME Falling Films on Arrays of Horizontal Tubes with R-134a, Part II: Flow Visualization, Onset of Dryout, and Heat Transfer Predictions. *Heat Transfer Engineering*. 2007, roč. 28, č. 5, s. 415-434. doi: 10.1080/01457630601163736. ISSN 0145-7632.
- [26] LI, W., WU, X.-Y. LUO, Z. a R. WEBB. Falling Water Film Evaporation on Newly-Designed Enhanced Tube Bundles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011, roč. 54, č. 13-14, s. 2990-2997. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.052. ISSN 0017-9310.
- [27] SHEN, S. CHEN, X. MU, X. WANG, Y. a L. GONG. Heat Transfer Characteristics of Horizontal Tube Falling Film Evaporation for Desalination. *Desalination and Water Treatment*. 2014, roč. 55, č. 12, 3343-3349. doi: 10.1080/19443994.2014.946726. ISSN 1944-3994.
- [28] SHAHZAD, M. MYAT, A. CHUN, W. a K. NG. Bubble-Assisted Film Evaporation Correlation for Saline Water at Sub-Atmospheric Pressures in Horizontal Tube Evaporator. *Applied Thermal Engineering*. 2013, roč. 50, č. 1, s. 670-676. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.07.003. ISSN 1359-4311.
- [29] YANG, L. a S. SHEN. Experimental Study of Falling Film Evaporation Heat Transfer outside Horizontal Tubes. *Desalination*. 2008, roč. 220, č. 1-3, s. 654-660. doi: 10.1016/j.desal.2007.02.046. ISSN 00119164
- [30] HOLMGREN, M. *X Steam: IAPWS IF97 Excel Steam Tables* [počítačový soubor .xls - freeware]. Ver. 2.6. [cit. 30.11.2010].
- [31] PAVELEK, M. *Termomechanika*. 3. přepracované vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [32] JIROUŠ, F. *Aplikovaný přenos tepla a hmoty*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, 207 s. ISBN 978-80-01-04514-5.
- [33] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [34] WANG, X., HRNJAK, P., ELBEL, S., JACOBI, A. a M. HE. Flow Modes and Mode Transitions for Falling Films on Flat Tubes. *Journal of Heat Transfer*. 2011, roč. 134, č. 2, s. 021801-9. DOI: 10.1115/1.4005095. ISSN 0022-1481.
- [35] CHEN, H. a R.S. JEBSON, Factors Affecting Heat Transfer in Falling Film Evaporators. *Food and Bioproducts Processing*. 1997, roč. 75, č. 2, s. 111-116. doi: 10.1205/096030897531423. ISSN 0960-3085.

ŽIVOTOPIS AUTORA

OSOBNÍ INFORMACE

Jméno
Adresa
Telefon
E-mail
Národnost
Datum narození

KRACÍK PETR
ARNULTOVICE 86, 543 72 RUDNÍK, ČESKÉ REPUBLIKA
+420 732 181 205
kracik@fme.vutbr.cz
česká
8. července 1985

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

- Období (od – do) 10/2011 – dosud
- Jméno a adresa zaměstnavatele Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno
- Oblast podnikání nebo název odvětví Vzdělávací instituce – vysoká škola
 - Dosažená pozice Odborný technický pracovník
 - Hlavní pracovní náplň a odpovědnost
 - Příprava, realizace a vyhodnocení experimentálních úloh.
 - Aplikovaný výzkum na základě požadavků objednavatele.
- Období (od – do) 1/2016 – dosud
- Jméno a adresa zaměstnavatele EKOL, spol. s r.o., člen skupiny ShaanGu
- Oblast podnikání nebo název odvětví Návrh, výroba a dodávky tepelných zařízení (parní turbíny, spalovací turbíny a parní kotle a kotelny) anebo kompletních energetických celků
- Dosažená pozice Konstruktor – výpočtář
- Hlavní pracovní náplň a odpovědnost Termodynamický návrh parní turbíny a s ní související energetická zařízení
- Období (od – do) 6/2006 – 9/2006
- Jméno a adresa zaměstnavatele Step TRUTNOV a.s., Horská 695, 541 02 Trutnov 4
- Oblast podnikání nebo název odvětví Výroba a dodávky tepelných a energetických zařízení
- Dosažená pozice Projektant, konstruktér
- Hlavní pracovní náplň a odpovědnost Zpracování projekční a konstrukční dokumentace
- Období (od – do) 6/2005 – 9/2005
- Jméno a adresa zaměstnavatele G - Team Progres, spol. s r. o., Petříkovická 472, 541 03 Trutnov
- Oblast podnikání nebo název odvětví Výroba a dodávky tepelných a energetických zařízení
- Dosažená pozice Projektant, konstruktér
- Hlavní pracovní náplň a odpovědnost Zpracování projekční a technologické dokumentace

VZDĚLÁNÍ A KURZY

- Období (od – do) 2011 – dosud
- Název a typ organizace 6/2014 složena Státní doktorská zkouška
- Úroveň v národní klasifikaci Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- Doktorský studijní program: Stroje a zařízení - konstrukční a procesní inženýrství

<ul style="list-style-type: none"> • Období (od – do) • Název a typ organizace <ul style="list-style-type: none"> • Získaný titul • Úroveň v národní klasifikaci 	<p>2009 – 2011</p> <p>Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství Inženýr (Ing.) Magisterský navazující studijní program: Energetické inženýrství</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Období (od – do) • Název a typ organizace <ul style="list-style-type: none"> • Získaný titul • Úroveň v národní klasifikaci 	<p>2005 – 2009</p> <p>Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství Bakalář (Bc.) Bakalářský studijní program: Strojní inženýrství</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Období (od – do) • Název a typ organizace • Úroveň v národní klasifikaci 	<p>2001 – 2005</p> <p>Střední průmyslová škola a Střední odborné učiliště, Trutnov Maturitní studijní obor: Strojírenství – počítačová grafika</p>
OSOBNÍ SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI	
MATEŘSKÝ JAZYK	ČESKÝ
OSTATNÍ JAZYKY	ANGLICKY – aktivně na úrovni běžné komunikace
ORGANIZAČNÍ SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI	Vedení odborných cvičení na Energetickém ústavu FSI VUT v Brně. Vedení studentů při tvorbě vysokoškolských závěrečných prací. Vedení týmu při realizování experimentů. Komunikace s objednateli aplikovaného výzkumu. Komunikace s dodavateli materiálu a služeb.
TECHNICKÉ SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI	Software: Odborná znalost MS WORD, MS Excel, MS PowerPoint, Kreslení a modelování (AutoCAD, Autodesk Inventor), Matematické výpočty (Matlab), Termovizní měření (kamera FLIR SC 660, ThermaCAM Researcher Pro2.10)
OSTATNÍ SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI	Včelaření, In-line bruslení, sjezdové lyžování
ŘIDIČSKÝ PRŮKAZ	Skupina „B“

ABSTRAKT

Skrápěné trubkové svazky, po kterých stéká tenký kapalný film, jsou využívány v různých technologických procesech, u kterých je potřeba rychle a efektivně oddělit parní fázi od kapalné. Proces probíhá převážně při nízkých teplotách při adekvátním snížení tlaku kolem trubkového svazku. Takovou technologií je například výparník u absorpčních jednotek nebo výparník pro odsolování mořské vody. Za ideálních podmínek dochází k varu vody na celé ploše výměníku, ale u praktických realizací je nutné uvažovat s tím, že v místech, kde dochází k úvodnímu kontaktu vody se stěnou výměníku, nebude docházet k varu na povrchu trubek, ale pouze k ohřevu skrápěné kapaliny. Touto problematikou se zabývá předložená dizertační práce. Hlavním cílem práce bylo stanovit součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubkových svazků různých geometrií při atmosférickém tlaku i podtlaku. Za tímto účelem byly provedeny experimenty na trubkových svazcích, které se skládaly z měděných trubek o průměru 12,0 mm horizontálně umístěných pod sebou a které byly vytápěny vodou. Byly testovány tři druhy povrchů trubek (hladké, pískované a rádlované) při čtyřech různých roztečích (15,0 až 30,0 mm po 5,0 mm). Zároveň byly jednotlivé geometrie svazku složeny ze 4, 6, 8, nebo 10 trubek se shodnou povrchovou úpravou. Na základě provedených experimentů byl zpřesněn matematický model přenosu tepla, který se skládá převážně z podobnostních kritérií. V průběhu prováděných experimentů bylo snímáno teplotní pole na povrchu skrápěného trubkového svazku termovizní kamerou a dle vytvořené metodiky byl hodnocen vlivy geometrie a úpravy povrchu svazku na režim proudění a ve výsledku i na přestup tepla.

ABSTRACT

Sprinkled tube bundles with a thin liquid film flowing over them are used in various technology processes where it is necessary to separate the vapour and liquid phases quickly and efficiently. The process occurs predominantly at low temperatures with a corresponding decrease of pressure around the tube bundle. Such a technology is represented for instance by an evaporator at absorption units or an evaporator for sea water desalination. In ideal conditions water boils at the whole surface of an exchanger, but in practice it must be considered that in original spots of contact between water and the exchanger wall the water will not boil at the tubes' surface but the cooling liquid will merely be heated-up. The presented dissertation thesis focuses on this issue. The objective of the thesis was to determine the heat transfer coefficient at the surface of sprinkled tube bundles of various geometries at atmospheric pressure as well as low pressure. For this purpose experiments have been carried out at tube bundles consisting of copper tubes of 12,0 mm diameter placed horizontally one above another that were heated by water. Three types of tubes (smooth, sandblasted and grooved) of four various pitches (15,0 to 30,0 mm by 5,0 mm increments) have been tested. Simultaneously individual bundles' geometries consisted of 4, 6, 8 and 10 tubes with identical surface finish. Based on the conducted experiments the mathematical model of heat transfer that involves mainly analogy criteria has been made more accurate. A temperature field at the sprinkled tube bundle surface has been scanned by a thermographic camera during the performed experiments. Influence of geometry and tube surface finish on flow mode and consequently also on heat transfer has been assessed in accordance with the compiled methodology.