VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

HODNOCENÍ PŘESTUPU TEPLA NA SKRÁPĚNÉM TRUBKOVÉM SVAZKU

HEAT TRANSFER EVALUATION ON FALLING FILM TUBE BUNDLE

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. PETR KRACÍK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

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.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

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.

KEYWORDS

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

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRACÍK, P. *Hodnocení přestupu tepla na skrápěném trubkovém svazku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 124 s., 40 s. příloh Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci *Hodnocení přestupu tepla na skrápěném trubkovém svazku* vypracoval samostatně pod vedením svého školitele doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D. s použitím podkladu uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Ing. Petr Kracík

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli a vedoucímu dizertační práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné vedení, podporu, cenné rady a připomínky po celou dobu řešení tématu dizertační práce a za svůj čas, který mi věnoval. Poděkování patří rovněž zaměstnancům Energetického ústavu za nesčetné diskuze nad dílčími problémy tématu dizertační práce. Současně bych chtěl také poděkovat své rodině za podporu, kterou mně během celého vysokoškolského studia poskytovala.

Tato práce vznikla za finanční a technické podpory projektů výzkumné infrastruktury OP VaVpI **ED0002/01/01** ***NETME Centre*** a navazujícího projektu **LO1202** ***NETME Centre PLUS*** s finanční podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci Národního programu udržitelnosti I. Za což tímto děkuji.

Ing. Petr Kracík

OBSAH

Úvod **13**
Cíle dizertační práce **15**
1 Teorie přestupu tepla na skrápěné trubce **16**
1.1 Podobnostní kritéria 16
1.2 Režimy skrápění 18
1.2.1 Změna průtoku skrápěcí kapaliny 19
1.2.2 Vliv průměru skrápěné trubky 22
1.2.3 Vliv rozteče skrápěných trubek 23
1.2.4 Komplexní stanovení oblastí režimů skrápění 24
1.3 Režimy proudění 26
1.4 Zjednodušený matematický model přestupu tepla 27
1.5 Matematický model přestupu tepla vroucí kapaliny 31
1.5.1 Součinitel přestupu tepla na hranici vzniku varu 31
1.5.2 Součinitel přestupu tepla přechodné oblasti 33
1.5.3 Součinitel přestupu tepla plně vyvinuté oblasti 33
1.6 Matematický model pro dvoufázové proudění 34
1.7 Vliv suchých míst na skrápěném trubkovém svazku 35
1.8 Vliv rozpustných příměsí ve vodě 37
2 Měřicí zařízení **39**
2.1 Podtlakový stand 39
2.2 Atmosférický stand 41
2.3 Použité termočlánky 42
2.4 Souhrn nejistot typu B použitých měřících zařízení 43
3 Stanovení přestupu tepla z měřených veličin **44**
3.1 Matematický model nevroucí kapaliny 44
3.1.1 Tepelná bilance podtlakového standu 44
3.1.2 Odvození rovnice přestupu tepla přes kruhovou stěnu 45
3.1.3 Výpočet přestupu tepla na vnější straně trubky 46
3.2 Vyhodnocení naměřených dat 48
3.2.1 Matematický model vyhodnocení nejistoty měření 48
3.2.2 Nejistota součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky 49
3.3 Transformace zkoumaných veličin na bezrozměrná kritéria 51
3.4 Dvoufázové proudění 52
4 Příprava a nastavení experimentálních zařízení **55**
4.1 Postup měření u podtlakového standu 55
4.2 Příprava a postup měření u atmosférického standu 55
5 Výsledky experimentů u atmosférického standu **56**
5.1 Součinitel přestupu tepla na povrchu svazku 56
5.2 Teplotní pole na povrchu skrápěného svazku 64
5.3 Regresní analýza 72
6 Výsledky experimentů u podtlakového standu **83**
6.1 Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku při podtlaku 83
6.2 Porovnání výsledků naměřených na AS a PS 89
6.3 Var na skrápěném trubkovém svazku 92
7 Porovnání výsledků s jinými studiemi **99**
7.1 Porovnání součinitele přestupu tepla nevroucí kapaliny 99
7.2 Porovnání součinitele přestupu tepla vroucí kapaliny 102
Závěr **105**
Zapojení autora ve VaV projektech a další aktivity **111**

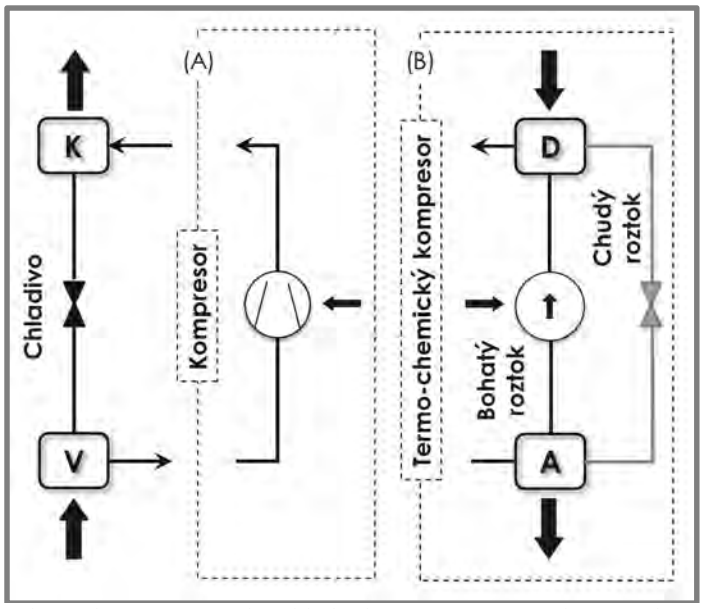
Obsah

Seznam autorských děl **116**
Seznam zkratek a symbolů **119**
Seznam obázků **121**
Seznam tabulek **123**
Seznam příloh **124**

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 kapalné 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 v tomto odvětví prováděli výzkum v poslední době například Yang a Shen (Dalian University of Technology, China) **[1]**, Sharma and Sushanta (Indian Institute of Technology, India) **[2]**, Calle a kol. (Plataforma Solar de Almería, Španělsko) **[3]** či Kouhikamali (University of Guilan, Iran) **[4]**. Termická destilace při využití skrápěných výměníků může být provozována při nízkých teplotách, které jsou v řádech desítek stupňů Celsia, ale pro dosažení varu je nutné adekvátně snížit tlak prostředí, ve kterém je trubkový svazek umístěn. Výhodou této metody je, že lze využít nízko potenciální odpadní teplo z jiných energetických procesů, geotermálních pramenů, solárních kolektorů apod.

Studium skrápěných svazků nejen v Číně je vedeno za cílem odsolování mořské vody, neboť začínají mít v některých oblastech citelný nedostatek pitné vody. V Austrálii ve Victoria University pro úspory pitné vody studují režimy skrápění z pohledu distribuce vody při zavlažování. Více ve **[5]**. V evropských zemích a Americe je kladen důraz primárně na minimalizaci spotřeby energií a sekundárně na úsporu primárního paliva, které vstupuje do energetických procesů, které by měly mít co nejvyšší účinnost. Mimo zefektivnění energetických procesů a snížení spotřeby energie je možné odpadní teplo využít při výrobě chladu. 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, kancelářský budovách ale hlavně v domácnostech. Chlad se dnes převážně vyrábí pomocí kompresorových chladicích zařízení, která mají vysokou spotřebu elektrické energie. Jejich reálnou alternativou je absorpční cyklus. Rozdíl mezi těmito technologiemi výroby je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 1 Schéma kompresorového chladícího zařízení (A) a absorpčního cyklu (B)

V kompresorovém chladicím zařízení je teplonosnou látkou chladivo, které obíhá v uzavřeném cyklu. Chladivo proudící z kondenzátoru expanduje za expanzním ventilem ve výparníku. Latentní teplo potřebné pro vypařování je odebíráno ochlazované látce. Parní směs je dále stlačována v kompresoru, který dodává energii do cyklu. Vlivem ochlazování

při vyšším tlaku začne parní směs kondenzovat a vzniklý kondenzát opět teče do expanzního ventilu, čím je cyklus uzavřen.

U absorpční jednotky je energie dodávána do cyklu v podobě tepla buď přímým spalováním paliva v absorpční jednotce (nejčastěji realizováno plynovými hořáky) nebo z libovolné teplonosné látky o vhodné teplotě (např. kapalinou ze solárních kolektorů nebo parou z teplárenských celků, kde již není technicky či ekonomicky výhodné ji expandovat v turbíně, či spalinami). Parní směs proudící z výparníku, kde je teplo odnímáno ochlazované látce, do absorbéru, kde je absorbována do kapalné absorpční látky (absorbentu) při současném uvolnění absorpčního tepla. Směs absorbentu a chladiva je dále stlačována čerpadlem a dopravována do desorbéru, kde je dodávána již výše zmíněná tepelná energie do cyklu. Zvyšováním teploty dochází k vypařování chladiva, které následně proudí do kondenzátoru. Z desorbéru odchází absorpční látka prosta chladiva z vysokotlaké části cyklu přes redukční ventil zpět do nízkotlaké části, tedy do absorbéru. Chladivo v kondenzátoru kondenzuje při vhodném odvodu tepla z cyklu a kondenzát odchází přes redukční ventil do výparníku, kde se po prudkém snížení tlaku začne vypařovat. Latentní teplo potřebné k vypařování je odnímáno opět ochlazované látce, čímž je celý cyklus uzavřen.

Při výběru vhodných látek využitelných v absorpčních oběžích hraje hlavní roli dobrá rozpustnost chladiva v absorpční látce. Dalším kritériem při výběru jsou tepelné stavy, při kterých látky prochází fázovou přeměnou, na čemž celý cyklus stojí. Těmto kritériím vyhovují nejlépe kombinace látek (chladivo / absorbent) H_2O / LiBr (bromid lithný), H_2O / NaOH (hydroxid sodný), H_2O / LiCl (chlorid lithný) či NH_3 (amoniak) / H_2O. V současných instalacích se převážně používá dvojice H_2O / LiBr. Jelikož je voda v této kombinaci chladivem, vyplývají z ní omezené pracovní teploty využití, které musí být nad bodem mrazu, tedy větší než 0°C. Bromid lithný je sůl získávaná z mořské vody. Je tedy netoxická a šetrná k životnímu prostředí, ale v kombinaci s kyslíkem má vysoké korozivní účinky na ocel **[6]**, **[7]**.

Když porovnáme závislost spotřeby elektrické energie kompresorového a absorpčního cyklu, je zřejmá výhodnost absorpčního cyklu, neboť má jen přibližně pětinovou spotřebu elektrické energie. Jeho nevýhodou jsou větší rozměry, resp. hmotnost a vyšší pořizovací cena, která je vyvážena delší dobou životnosti, protože jedinou rotační částí je čerpadlo, na které se při pořizování nekladou žádné zvláštní nároky, oproti kompresoru v kompresorovém chladicím zařízení. Investice jsou tedy do absorpčního oběhu větší, ale provozní náklady jsou nižší. Proto je doba návratnosti u absorpčního oběhu přibližně srovnatelná s dobou návratnosti u kompresorového chladícího zařízení **[8]**.

Základní součástí u jednostupňového absorpčního oběhu jsou dva výměníky, které jsou provozovány při podtlaku - absorbér a desorbér. V absorbéru jsou páry teplonosné látky ochlazovány a absorbovány do absorbentu a přebytečné teplo musí být vhodně odváděno. Zjednodušeně řečeno se jedná o skrápěný výměník, na kterém kondenzuje parovodní směs. V desorbéru je dodáváno primární teplo do cyklu, takže teplo je dodáváno skrápěné kapalině a na povrchu trubek dochází k varu. A právě studium součinitele přestupu tepla na skrápěném vytápěném trubkovém svazku je věnována tato 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

1.1 Podobnostní kritéria

Při vyhodnocovaní naměřených dat (nejčastěji u bezrozměrných kritérií) je využíván hmotnostní průtok vztažený na jednotku délky Γ $[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$. Za předpokladu, že průtok je na stěně trubky v ustáleném stavu a má konstantní tloušťku δ $[m]$ po směru toku, ho lze vyjádřit podle **[9]** jako integraci pohybové rovnice

$$\Gamma = \frac{\rho \cdot g}{\nu} \cdot \frac{\delta^3}{3} \quad [kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]. \tag{1.1}$$

Jedním z nejčastěji používaných bezrozměrných kritérií je Reynoldsovo číslo, které charakterizuje hydrodynamický režim proudu tekutiny. Je tedy závislé na setrvačných silách proudu tekutiny a viskozitě tekutiny, která charakterizuje odpor tekutiny v důsledku jejího vnitřního tření. Obecně lze Reynoldsovo číslo vyjádřit jako součin rychlosti tekutiny a charakteristického rozměru (například průměr, délka a podobně) podělený kinematickou viskozitou, jak je patrné z rovnice (1.2)

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad [-]. \tag{1.2}$$

Někteří autoři (například **[10]**, **[11]**) Reynoldsovo číslo vyjadřují jako podíl hmotnostního průtoku vztaženého na jednotku délky skrápěné trubky k dynamické viskozitě tekutiny. Viz rovnice (1.3). V případě, že autoři při matematickém popisu experimentu uvažují pouze jednu polovinu vertikálního řezu průřezu trubky (například **[12]**, **[13]**, **[14]**), je celkový hmotnostní průtok dvojnásobný oproti skutečnému a Reynoldsovo číslo a je definováno podle rovnice (1.4).

$$Re = \frac{\Gamma}{\mu} \quad [-] \tag{1.3}$$

$$Re = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu} \quad [-] \tag{1.4}$$

Podobnost rychlostních a teplotních polí proudu tekutiny vyjadřuje Prandtlovo kritérium, které vychází z podílu Pécletova kritéria a Reynoldsova čísla. Prandtlovo číslo ve výsledku vychází pouze z vlastností tekutiny a je podílem kinematické viskozity k teplotní vodivosti.

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\frac{w \cdot D}{a}}{\frac{w \cdot D}{\nu}} = \frac{\nu}{a} \quad [-] \tag{1.5}$$

Teplotní vodivost je definována jako podíl tepelné vodivosti k součinu hustoty a měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]. \tag{1.6}$$

Další využívaným bezrozměrným kritériem je Kapitzovo číslo, které je převrácenou hodnotou Galileova čísla. Galileovo kritérium charakterizuje pohyb tekutiny způsobený zemskou tíží a je podílem součinu hustoty kapaliny a povrchového napětí kapaliny ve třetí mocnině k součinu gravitačního zrychlení a dynamické viskozitě ve čtvrté mocnině

$$Ga = \frac{1}{Ka} = \frac{\rho \cdot \sigma^3}{g \cdot \mu^4} \quad [-]. \tag{1.7}$$

Kritérium zohledňující vliv povrchového napětí kapaliny a její interakci se stěnami se nazývá Weberovo kritérium. Vypočítá se jako součin hustoty, rychlosti ve druhé mocnině a charakteristického rozměru k povrchovému napětí.

$$We = \frac{\rho \cdot w^2 \cdot D}{\sigma} \quad [-] \tag{1.8}$$

Někteří autoři (například **[15]**) používají modifikované Weberovo kritérium, které je rozšířeno o plochu trubek a hmotnostní průtok, čímž je nahrazena rychlost tekutiny a je převrácena hustota tekutiny.

$$We_F = \frac{\dot{m}^2 \cdot D}{(\pi \cdot D \cdot L)^2 \cdot \rho \cdot \sigma} = \frac{\dot{m}^2}{\pi^2 \cdot D \cdot L^2 \cdot \rho \cdot \sigma} \quad [-] \tag{1.9}$$

Kritérium zohledňující poměr mezi přestupem tepla a teplotním polem se nazývá Nusseltovo. Obecně ho lze definovat jako poměr součinu součinitele přestupu tepla a charakteristického rozměru k součiniteli tepelné vodivosti.

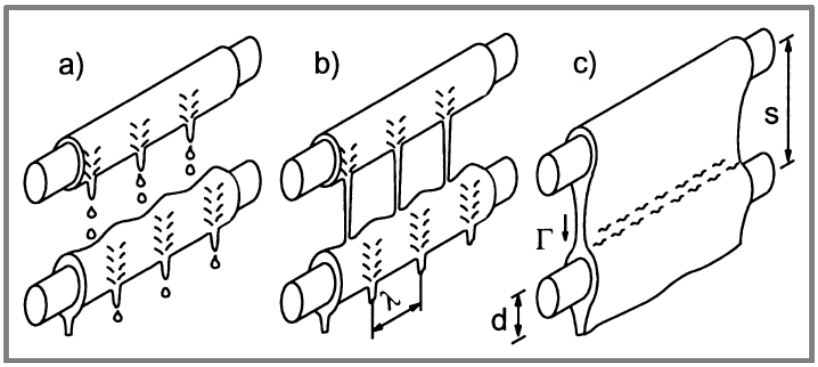
$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad [-] \tag{1.10}$$

Pro definování Nussletova čísla při režimu skrápění na vnějším povrchu je ale užívanější tvar

$$Nu = \alpha_o \cdot \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{g \cdot \lambda^3}} = \alpha_o \cdot \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{g \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}} \quad [-]. \tag{1.11}$$

1.2 Režimy skrápění

Kapalina stékající po horizontálním trubkovém svazku může vytvářet tři základní režimy skrápění, které jsou patrné z obr. 2. Jedná se o kapkový režim (a), sloupcový režim (b) a blánový (listový) režim (c). Tyto tři režimy jsou v textu dále označeny jako „K“, „S“ a „L“.



Obr. 2 Režimy skrápění **[10]**

Při stoupajícím průtoku skrápěcí kapaliny je přechod mezi režimem kapkovým a sloupcovým definován tak, že mezi kapičkami vznikne jeden stabilní sloupec kapaliny (tento přechodný režim bude v textu dále označován jako „K→S“). Přechod mezi režimem sloupcovým a blánovým (listovým) je definován tak, že se dva sloupce spojí a vytvoří malý lístek, který má trojúhelníkový tvar (dále jen „S→L“). V tomto režimu mezi sebou koexistují sloupce i listy. Při klesající průtoku skrápěcí kapaliny platí opak. Tedy při vytvoření stabilního pramínku kapaliny mezi listy je tento stav označován jako listově sloupcový (dále jen „L→S“) a při rozpadu prvního sloupce ve sloupcovém režimu a nahrazení sloupce kapkami je tento režim označován jako sloupcově kapkový (dále jen „S→K“). V případě, že dále v textu při označení přechodného režimu skrápění není šipka označující směr nárůstu / poklesu skrápěcí kapaliny, ale pomlčka, pak není brána v úvahu změna průtoku skrápěcí kapaliny.

U kapkového a sloupcového režimu při detailním pohledu na spodní stranu obtékané trubky je patrná proměnná tloušťka kapalného filmu, která je ve tvaru vln, kde vzdálenost mezi nejvyššími místy, ze kterých se oddělují kapky, které se při zvětšujícím průtoku spojí do sloupců, definovali na základě pokusů např. J. Tang (1991) **[16]** tak, že se shodovala se vzdáleností sloupců kapek, která je definována rovnicí vlnové délky

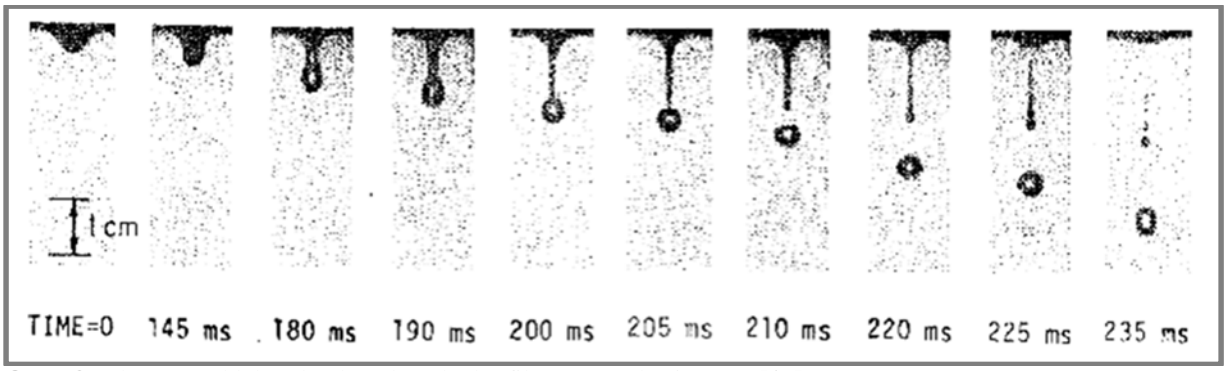
$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \sigma}{\rho_f \cdot g}} \quad [m], \tag{1.12}$$

kde **[17]**, **[18]** uvádí velikost koeficientu $n = 3\,[-]$ pro vysoký kapalný film a $n = 2\,[-]$ pro tenký film. Ganic a Roppo (1980) **[19]** uvádí na základě svých experimentů, že vlnová délka není závislá na rozteči trubek, resp. mezeře mezi trubkami.

Zmíněná rovnice (1.12) je odvozena z rovnice Taylorovi vlnové délky, která vychází z teorie varu ve velkém objemu. Pokusy v tomto směru prováděli například Lienhard a Wong (1963) **[20]**, kteří brali v úvahu poloměr topné trubky, kolem které docházelo k varu a vzhledem ke dvoufázovému rozhraní je odečítána od hustoty kapaliny hustota plynu (páry).

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{\frac{g \cdot (\rho_f - \rho_g)}{\sigma} + \frac{1}{2 \cdot R^2}}} \quad [m] \tag{1.13}$$

Velikostí kapek a jejich způsobu oddělení z kapalného filmu se zabýval například Killion (2004) **[21]**, který snímal stékající směs bromidu lithného s vodou, či Yung a kol. (1980) **[17]**. Na obr. 3 jsou snímky ze záznamu sekvence pořízené vysokorychlostní kamerou při stékání etanolu o teplotě $20\,°C$ z nevytápěné hliníkové trubky o průměru $38{,}0\,mm$ **[17]**.



Obr. 3 Sekvence oddělení kapky z kapalného filmu (etanol při 20°C) **[17]**

Tvorba kapky je značně ovlivněna povrchovým napětím kapaliny. Na obrázku v čase nula milisekund je nakumulován v jednom místě relativně velký objem vody, 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.

Yung a kol. (1980) **[17]** uvádí výslednou korelaci pro výpočet průměru primárních kapek jako funkci povrchového napětí, hustoty kapaliny a gravitačního zrychlení

$$d_p = C_1 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f \cdot g}} \quad [m], \tag{1.14}$$

kde doporučují konstantu $C_1 = 3\ [-]$ s relativní chybou $\pm$ 5,0 % pro etanol i vodu. Pro výpočet průměrů sekundárních kapek $d_s\ [m]$ lze podle autorů také využít tuto rovnici, ale s jinými konstantami C_1. Místo těchto konstant uvádí pro výpočet průměru sekundárních kapek interval, ve kterém se pohybuje poměr průměrů sekundárních kapek k primárním, viz rovnice (1.15), s odhadem, že objem sekundárních kapek vzhledem k objemu primární kapky je cca 19,0 %.

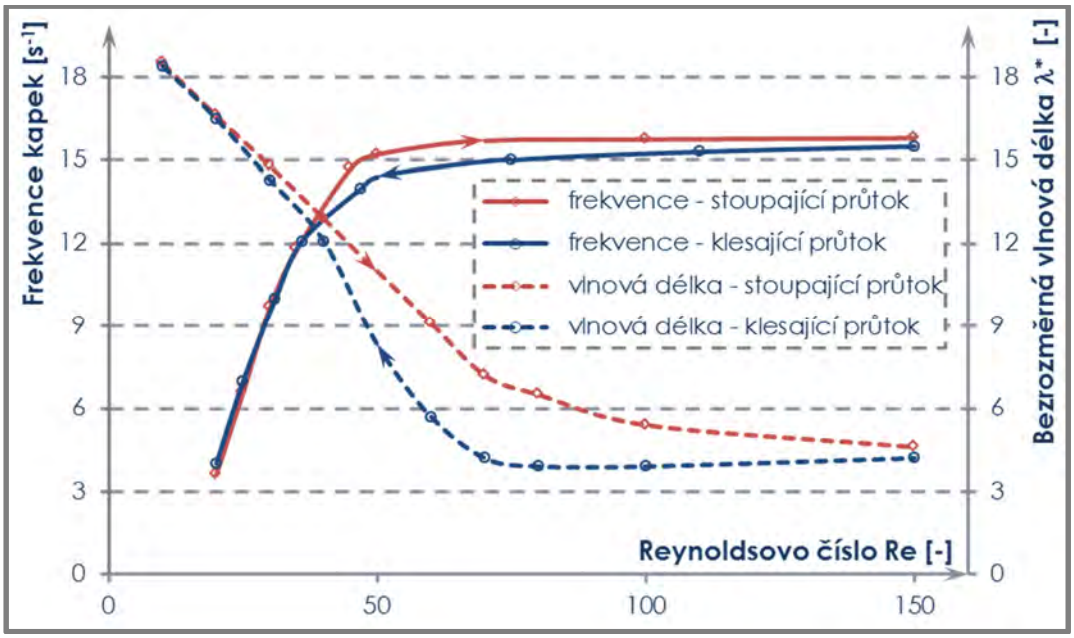
$$0{,}24 < \frac{d_s}{d_p} < 0{,}46 \quad [-] \tag{1.15}$$

Na základě známé vlnové délky a průměru primárních kapek lze spočítat hmotnostní průtok vztažený na jednotku délky podle Fujita (1993) **[22]** pro stav, kdy se objeví první sloupec mezi kapkami podle rovnice

$$\Gamma = 0{,}81 \cdot \frac{\rho_f}{\lambda} \cdot \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma}{\rho_f \cdot \lambda^3}} \quad [kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]. \tag{1.16}$$

1.2.1 Změna průtoku skrápěcí kapaliny

Na daný režim skrápění může mít vliv řada provozních parametrů. Prvním z nich je vliv změny rostoucího / klesajícího průtoku skrápěcí kapaliny na vzdálenost mezi sloupci kapek, resp. četnosti kapek popisuje studie vytvořená ve Victoria University (Austrálie) **[5]**. Na této univerzitě, pro ověření numerického modelu, vznikla experimentální souprava, která se skládala ze třech stejných válců umístěných rovnoběžně pod sebou (byly testovány tři průměry 100 mm, 50 mm a 20 mm). Vlastní režim skrápění byl zaznamenáván digitální kamerou. Na obr. 4 je ukázána závislost frekvence kapek (tedy kolik kapek za vteřinu dopadne na střední válec) a bezrozměrné vlnové délky (jež je vlnová délka podělená povrchovým napětím, které bývá označována také jako kapilární konstanta) na Reynoldsově čísle.

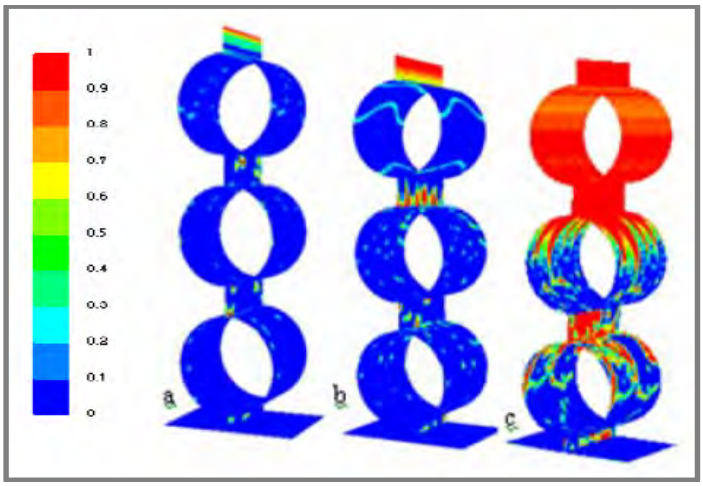


Obr. 4 Závislost frekvence kapek a bezrozměrné vlnové délky na Reynoldsově čísle **[5]**

Na tomto obrázku jsou tyto dvě veličiny vyneseny pro monotónně stoupající a klesající průtok. Měření probíhalo v rozsahu Reynoldsova čísla $20 - 150\ [-]$ a bylo zjištěno, že závislost frekvence na Reynoldsově čísle je velmi podobná, nicméně při snižování průtoku se kapičky začali oddělovat o něco pomaleji oproti stoupajícímu průtoku, což je patrné hlavně v mezích Reynoldsova čísla cca $20 - 100\ [-]$. Důvod těchto o něco menších hodnot při oddělování kapiček je možné posuzovat z bezrozměrné vlnové délky, kde při poklesu průtoku se kapalina na středním válci snaží udržet současný stav co nejdéle, resp. vzdálenost se mezi sloupci kapek dokonce zmenšuje, což má za následek samozřejmě i menší počet kapek. Při Reynoldsově čísle cca $70\ [-]$ dochází ke zlomu, kdy průtok natolik poklesnul, že vzdálenost mezi sloupci kapek začíná prudce narůstat, resp. frekvence kapiček začíná prudce klesat.

Numerický model k tomuto experimentálnímu měření byl vytvořen ve FLUENT®, kde se kontrolní objem skládal ze třech válců umístěných rovnoběžně pod sebou, z vody, která vytékala ze štěrbiny nad válci a která měla stále stejnou rychlosti při různých průtocích, a vzduchu, který vyplňoval zbylý kontrolní objem. Testované hmotnostní průtoky vztažené na jeden metr trubky byly $0{,}0125;\ 0{,}025;\ 0{,}0375;\ 0{,}0625;\ 0{,}125;\ 0{,}2;\ 0{,}325$ a $0{,}5$ $\mathrm{kg} \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ pro Reynoldsova čísla v rozsahu $20 - 150\ [-]$ **[5]**.

Na obr. 5 je ukázka numerického modelu pro tři základní režimy proudění. A to kapkového (a), sloupcového (b) a listového (c), kde červená barva označuje vodu, resp. její výskyt je na stupnici roven jedné a modrá barva označuje vzduch, resp. na barevné stupnici je pouze vzduch roven nule. Vše mezi tím je směsí vzduchu a vody a podle dominance zastoupení se hodnota, resp. barva, přiklání k modré (nule) anebo červené (jedné). Na tomto obrázku je u sloupcového režimu (b) vidět kumulace vody v druhé polovině mezery, která je mezi prvním a druhým válcem a naopak tříštění vody do pramínků, v případě listového režimu (c), na druhém válci. U obou těchto případů je dosaženo příslušného požadovaného režimu, ale není dodáván takový objem vody, který by zajistil stabilitu režimu mezi všemi třemi trubkami, neboť u sloupcového režimu (b) je mezi druhou a třetí trubkou kapkový režim a u listového režimu (c) je mezi druhou a třetí trubkou listový režim, který přechází ve druhé polovině do sloupcového režimu.



Obr. 5 Numerický model rozložení tekoucí vody **[5]**
(a) kapkový režim, (b) sloupcový režim a (c) listový režim

Vliv změny průtoku skrápěcí kapaliny na režim skrápění pro různé průměry trubek se věnoval také Hu a Jacobi **[12]**. Pro své studie vytvořili aerodynamický tunel z akrylátového průhledného plastu o průřezu $203{,}2\ x\ 304{,}8\ mm$, kde se pohybovala rychlost vzduchu proti směru proudění skrápěcí kapaliny v rozmezí $1{,}0\ až\ 15{,}0\ m \cdot s^{-1}$. Testovaný trubkový svazek se skládal z rozváděcí trubky, stabilizační trubky, která byla umístěna $1{,}4\ mm$ pod rozváděcí trubkou, testované trubky, dopadové trubky a sběrného kanálu. V rozváděcí trubce byly vyvrtány otvory o průměru $1{,}0\ mm$ po $1{,}5\ mm$ na délce $229\ mm$. Testované průměry trubek byly $9{,}5; 12{,}7; 15{,}9; 19{,}0$ a $22{,}2\ mm$.

Pro skrápěný trubkový svazek, kolem něhož je okolí klidné (rychlost proudícího vzduchu v okolí trubek je přibližně nulová) potvrdil Hu a Jacobi **[12]** výhodnost funkční závislosti Reynoldsova čísla na Galileově pro definování rozhraní jednotlivých režimů skrápění. Obecně lze tuto závislost uvést ve tvaru

$$Re = A \cdot (Ga)^B = A \cdot \left(\frac{1}{Ka}\right)^B \quad [-], \tag{1.17}$$

kde obě bezrozměrná kritéria dohromady postihují sedm fyzikálních parametrů. A to průtok skrápěcí kapaliny, dynamickou viskozita skrápěcí kapaliny, hustotu skrápěcí kapaliny, povrchové napětí skrápěcí kapaliny, průměr skrápěné trubky, mezeru mezi skrápěnými trubkami a gravitační zrychlení.

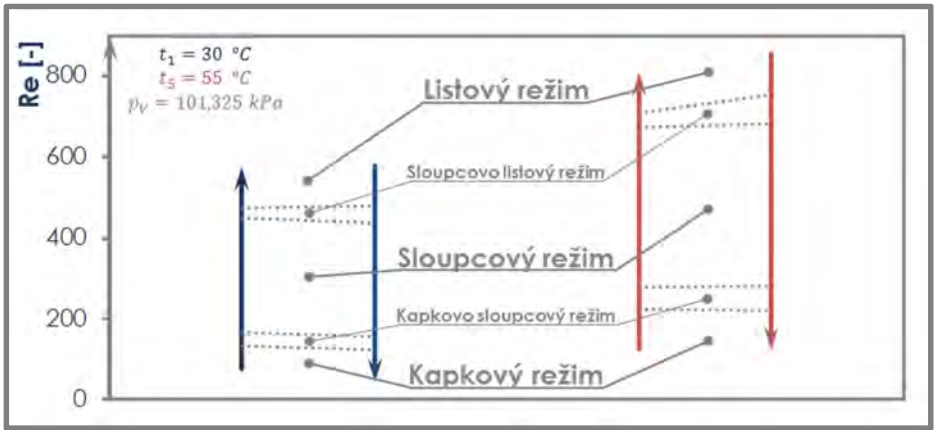
Tab. 1 Koeficienty do rovnice (1.17) pro stanovení režimu proudění podle Hu a Jacobi **[12]**

a) Stoupající průtok							
K → K-S		K-S → S		S → S-L		S-L→ L	
A	B	A	B	A	B	A	B
0,121	0,284	0,159	0,282	1,880	0,222	2,088	0,220
(8,5 %)		(6,6 %)		(4,3 %)		(4,2 %)	
b) Klesající průtok							
L → L-S		L-S→ S		S → S-K		S-K→ K	
A	B	A	B	A	B	A	B
1,004	0,250	1,064	0,244	0,057	0,321	0,045	0,321
(3,9 %)		(3,8 %)		(8,4 %)		(6,2 %)	

V tomto klidovém režimu zjistili, že rozhraní mezi jednotlivými režimy skrápění jsou rozdílná při stoupajícím a klesajícím průtoku a pro tyto režimy stanovili kriteriální funkce podle

rovnice (1.17), kde konstanty „A“ a „B“ jsou uvedeny v tab. 1 společně s relativní chybou pro každou rovnici.

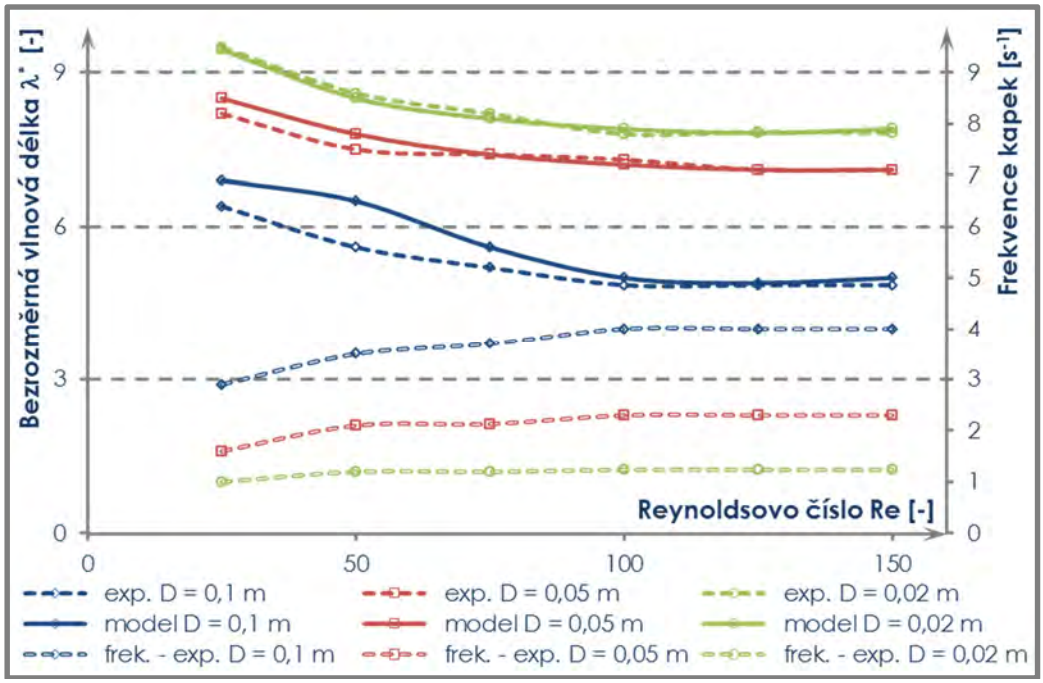
Na obr. 6 jsou vykresleny podle zmíněných rovnic hranice pro klesající a stoupající průtok skrápěcí kapaliny při atmosférickém tlaku a teplotách vody 30 °C a 55 °C, což odpovídá podle **[23]** Galileovu číslu $Ga^{0,25} \approx 476$ *a* 751 $[-]$.



Obr. 6 Hranice režimů skrápění při stoupajícím a klesajícím průtoku podle Hu a Jacobi [12]

1.2.2 Vliv průměru skrápěné trubky

V již zmíněné studii **[12]** se autoři zabývali také vlivem průměru válce na frekvenci kapiček a bezrozměrnou vlnovou délku v závislosti na Reynoldsově čísle, jež jsou vykresleny na obr. 7 pro spodní (třetí) válec. Na pravé svislé ose je vynesena frekvence kapek, resp. kolik se jich oddělilo ze středního válce za sekundu. Data, která jsou na tomto obrázku prezentována, byla získána pouze měřením a nebyla porovnávána s numerickým modelem. Zkoumány byly průměry 0,1 m, 0,05 m a 0,02 m a ve vysvětlivkách grafu jsou označeny jako „frek. – exp. D = …“. Z naměřených hodnot je patrná velká stabilita režimu po dosažení hodnoty Reynoldsova čísla cca 100 $[-]$. Avšak nárůst je před touto hodnotou relativně rovnoměrný i přesto, že v případě průměru 0,02 m činí cca 24 %, u průměru 0,05 m cca 44 % a u největšího průměru 0,1 m pak 38 %. Autoři ale neuvádějí, jaká byla rozteč a povrch válců.



Obr. 7 Vliv průměr válce na frekvenci kapiček a bezrozměrnou vlnovou délku **[5]**

V horní polovině obr. 7 jsou vyneseny závislosti bezrozměrné vlnové délky na Reynoldsově čísle pro všechny tři zkoumané průměry. U každého průměru je porovnáván výsledek experimentu (ve vysvětlivkách označen jako „exp. D = …“) a numerického modelu (ve vysvětlivkách označen jako „model D = …“). Autorům klesal rozdíl hodnot mezi experimentem a numerickým modelem se zmenšujícím se průměrem. U nejmenšího průměru autoři uvádějí odchylku v rozmezí 1,0 % až 2,0 %, u středního průměru 1,0 % až 4,5 % a u největšího průměru 1,0 % až 13,7 %. Zajímavou je výsledná stabilita po dosažení hodnoty Reynoldsova čísla cca 100 $[-]$, která se projevila v těchto mezích i u frekvence kapek, i když u této veličiny bylo stability dosaženo dříve.

1.2.3 Vliv rozteče skrápěných trubek

Vliv mezery mezi skrápěnými trubkami na typ režimu proudění testovali Wang a kolektiv **[24]**. Testovací svazek se skládal z distribuční trubky, ze které vytékala kapalina (byl testován etylenglykol a voda), trubky kruhového průřezu, která měla zrovnoměrnit rozložení skrápěcí kapaliny, a dvou plochých trubek, mezi kterými byl pozorován režim proudění. Testované ploché trubky byly z leštěného hliníku o rozměrech $400\ x\ 25{,}4\ x\ 3{,}18\ mm$ (délka x výška x tloušťka). Před vlastním měřením docházelo ke skrápění trubek $2-3\ hodiny$, aby kapalina ideálně přilnula k povrchu resp., aby byl povrch ideálně smáčivý). Měření probíhalo tak, že průtok byl snižován z maxima a po dosažení nulového průtoku byl zvyšován zpět na maximální možný. Měření pro každou mezeru mezi trubkami bylo opakováno třikrát a teprve z těchto výsledků byla stanovena Reynoldsova čísla pro daný přechod režimu a relativní chyba těchto hodnot.

V tab. 2 jsou uvedeny výsledky měření, kde skrápěcí kapalinou byla voda o přibližně stejných fyzikálních vlastnostech, které autoři vyjádřili pomocí Galileova čísla $Ga^{0{,}25} \approx 450\ [-]$. Této hodnotě při atmosférickém tlaku ($101\ 325\ Pa$) odpovídá teplota vody cca $27{,}4\ °C$ (dohledáno v **[23]**).

Tab. 2 Reynoldsova čísla pro různé rozteče trubek podle Wang a kol. **[25]**

Mezera mezi profily [mm]	Stoupající průtok				Klesající průtok			
	K → K-S	K-S → S	S → S-L	S-L → L	L → L-S	L-S → S	S → S-K	S-K → K
4,8	203	259	363	395	395	365	268	209
6,4	231	293	390	427	429	389	289	230
9,5	230	298	430	459	461	427	297	227
14,5	244	320	435	473	470	426	328	236
19,4	262	336	434	481	486	431	335	262
24,5	268	348	448	512	513	449	341	264
Chyba [%]	**4,21**	**1,40**	**0,84**	**2,34**	**0,87**	**0,77**	**1,53**	**4,53**

Při uvedených výsledcích měření měli autoři nastavenou mezeru mezi stabilizační trubkou a prvním profilem o velikosti $2{,}0\ mm$. Z jejich výsledků plyne, že s rostoucí mezerou mezi skrápěnými profily roste i Reynoldsovo číslo. Tento nárůst jim však nevyšel rovnoměrný, resp. v jednom případě bylo při zvětšení mezery následující Reynoldsovo číslo dokonce nižší o cca 1,0 %, což se nezdá být jako správná hodnota, neboť se zvětšující mezerou je zvětšován i horizontální skrápěný průřez, a proto pro dosažení téhož režimu skrápění u větší mezery je potřeba více kapaliny, resp. vyšší průtok. Při porovnání Reynoldsových čísel náležejících nejmenší a největší mezeře mezi profily u jednotlivých režimů, vychází nárůst v rozpětí

cca 23 % až 32 %. Rozdíl Reynoldsových čísel mezi stoupajícím a klesajícím průtokem v jednotlivých stavech se pohybuje v průměru 1,1 % se směrodatnou odchylkou 1,1 %.

1.2.4 Komplexní stanovení oblastí režimů skrápění

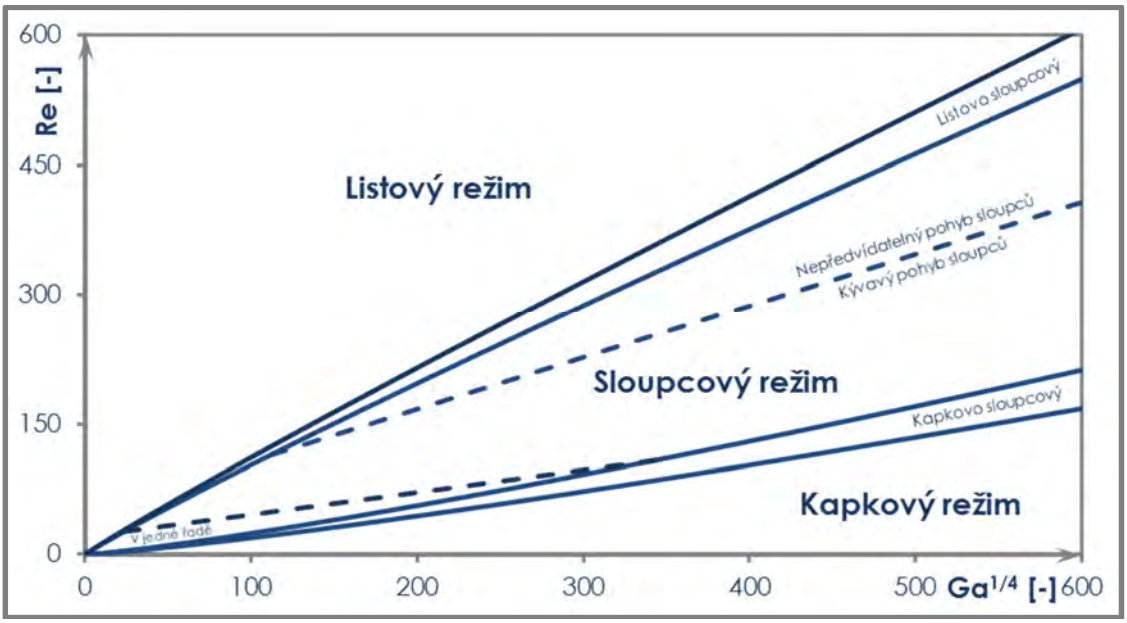
Ze svých naměřených dat Hu a Jacobi **[12]** vyvodili závěr, že průměr skrápěných trubek a ani mezera mezi nimi nemá žádný zásadní vliv na režim skrápění. Testovaný poměr mezery mezi trubkami k průměru skrápěné trubky se pohyboval v rozmezí cca $0{,}22$ až $5{,}3$ $[-]$. Pro praktické využití a pro porovnání s dalšími autory vytvořili rovnice pro jednotlivé režimy bez rozlišení, zdali je průtok skrápěcí kapaliny rostoucí anebo klesající, přičemž relativní chyba příliš nevzrostla. Konstanty pro jednotlivé rovnice odvozené podle rovnice (1.17) jsou uvedeny v tab. 3, resp. na obr. 8 jsou vykresleny v rozmezí Reynoldsova i modifikovaného Galileova čísla 0 až 600 $[-]$.

Na obr. 8 jsou také vykresleny tři druhy sloupcového režimu, které Hu a Jacobi stanovili. Prvním z nich je sloupcový režim tzv. „v jedné řadě“. Tento režim nastává při nízkých průtocích skrápěcí kapaliny a kapalina stéká ve sloupcích, které před a za trubkou na sebe navazují. Tj. jsou v jedné řadě a ve vertikálním směru se nepohybují. Pro hranici tohoto režimu stanovili rovnici (1.18), u které není rozlišeno, zda průtok stoupá či klesá a relativní chyba této rovnice je 12,5 %.

$$Re = 20{,}53 + 0{,}256 \cdot Ga^{0{,}25} \quad [-] \tag{1.18}$$

Dalšími dvěma fázemi sloupcového režimu jsou stavy, kde v prvním případě se sloupce kývají ve vertikálním směru kolem pomyslného bodu, a ve druhém případě již nelze dopředu předvídat pohyb těchto sloupců. Hranice mezi těmito fázemi je stanovena pro rostoucí i klesající průtok skrápěcí kapaliny v rovnicí (1.19), přičemž relativní chyba této rovnice je stanovena ve výši 8,3 %.

$$Re = 47{,}42 + 0{,}600 \cdot Ga^{0{,}25} \quad [-] \tag{1.19}$$



Obr. 8 Hranice režimů skrápění podle Hu a Jacobi **[12]**

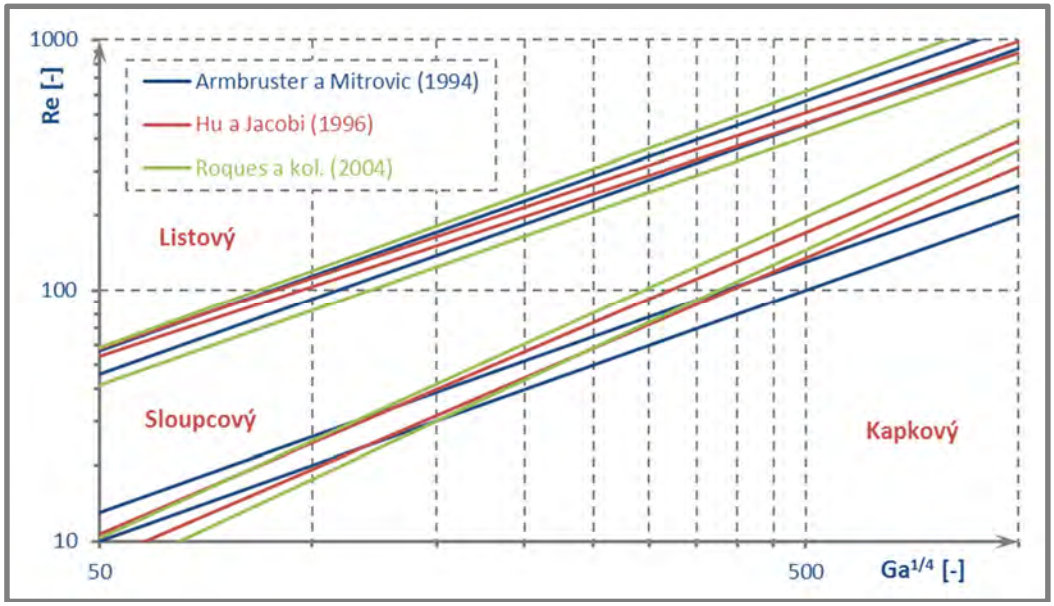
Dalšími autory, kteří se zabývali experimentálním rozdělením režimů skrápění, jsou Armbruster a Mitrovic, kteří své výsledky publikovali například v **[11]**. Jejich experimentální zařízení se skládalo z distribuční nádoby dlouhé 260 mm, v jejímž dně byly otvory o průměru 1 mm po 3 mm, stabilizační trubky umístěné těsně pod otvory o průměru 18 mm, testovací trubky (rovněž o průměru 18 mm) a sběrném žlabu. Testovanou kapalinou byla destilovaná voda v rozmezí teplot 15 až 55 $°C$. Hmotnostní průtok vody se pohyboval v rozmezí

0,02 $až$ 0,24 $kg/(s \cdot m)$, který stanovovali diferenční metodou, tj. vážili distribuční nádobu před a po měření příslušného režimu. Z naměřených bodů pro jednotlivé hranice také stanovili funkční závislosti podle rovnice (1.17) a výsledné konstanty jsou uvedeny v tab. 3. U svých rovnic však neuvádí relativní chybu.

Tab. 3 Porovnání koeficientů v rci. (1.17) vymezujících oblast skrápění určených různými autory

		Armbruster a Mitrovic [11]	Hu a Jacobi [12]		Roques a kol. [26]
Kapkový → Kapkovo sloupcový	A	0,200 0	0,074 0	(11,0 %)	0,041 7
	B	0,250 0	0,302 0		0,327 8
Kapkovo sloupcový → Sloupcový	A	0,260 0	0,096 0	(11,2 %)	0,068 3
	B	0,250 0	0,301 0		0,320 4
Sloupcový → Sloupcovo listový	A	0,920 0	1,414 0	(5,8 %)	0,855 3
	B	0,250 0	0,233 0		0,248 3
Sloupcovo listový → Listový	A	1,140 0	1,448 0	(6,6 %)	1,068 0
	B	0,250 0	0,236 0		0,256 3

V tab. 3 jsou uvedeny také výsledky Roques a kol. **[26]**. Ti pro stanovení režimů skrápění vytvořili experimentální zařízení, které se skládá z distribuční nádoby s plochým dnem o velikosti 260 x 10 mm, ve kterém vyvrtali otvory o průměru 1,0 mm po 2,0 mm na délce 200 mm. Pod tímto dnem byly umístěny tři testované měděné trubky o průměru 19,04 mm, které byly před vlastním testování očištěny pískováním, čímž vznikly na jejich povrchu prohlubně o velikosti 0,3 μm až 2,0 μm.



Obr. 9 Porovnání hranic režimů skrápění stanovených různými autory

Na obr. 9 jsou porovnány hranice jednotlivých režimů skrápění podle již zmíněných autorů a jejich určených konstant uvedených v tab. 3 do rovnice (1.17). Hodnoty jsou v grafu vyneseny v logaritmickém měřítku. Tj. Reynoldsovo číslo v rozmezí 10 až 1 000 [−] a modifikované Galileovo číslo v rozsahu 50 až 1 000 [−]. Z grafu vyplívá jistá shoda trendu, mezi sloupcovým a listovým režimem, ale v případě přechodu mezi sloupcovým a kapkovým režimem již taková shoda není. Přechodné pásy v případě Hu a Jacobi jsou nejužší, což v porovnání s výsledky Armbrustera a Mitrovice je rozdíl o cca 30 až 60 %, ale jejich údaje byly získány na menším vzorku měření.

1.3 Režimy proudění

Pro identifikaci režimu proudění Chun a Seban (1971) **[9]** formulovali základní hranice pro laminární, pseudo laminární a turbulentní proudění, které Chien a Cheng (2006) **[15]** upravili tak, že jsou závislé na Kapitzově čísle

$$laminární\ proudění: Re_{f,lam} < 2{,}43 \cdot \frac{1}{\sqrt[11]{Ka}} \quad [-], \tag{1.20}$$

$pseudo\ laminární$:

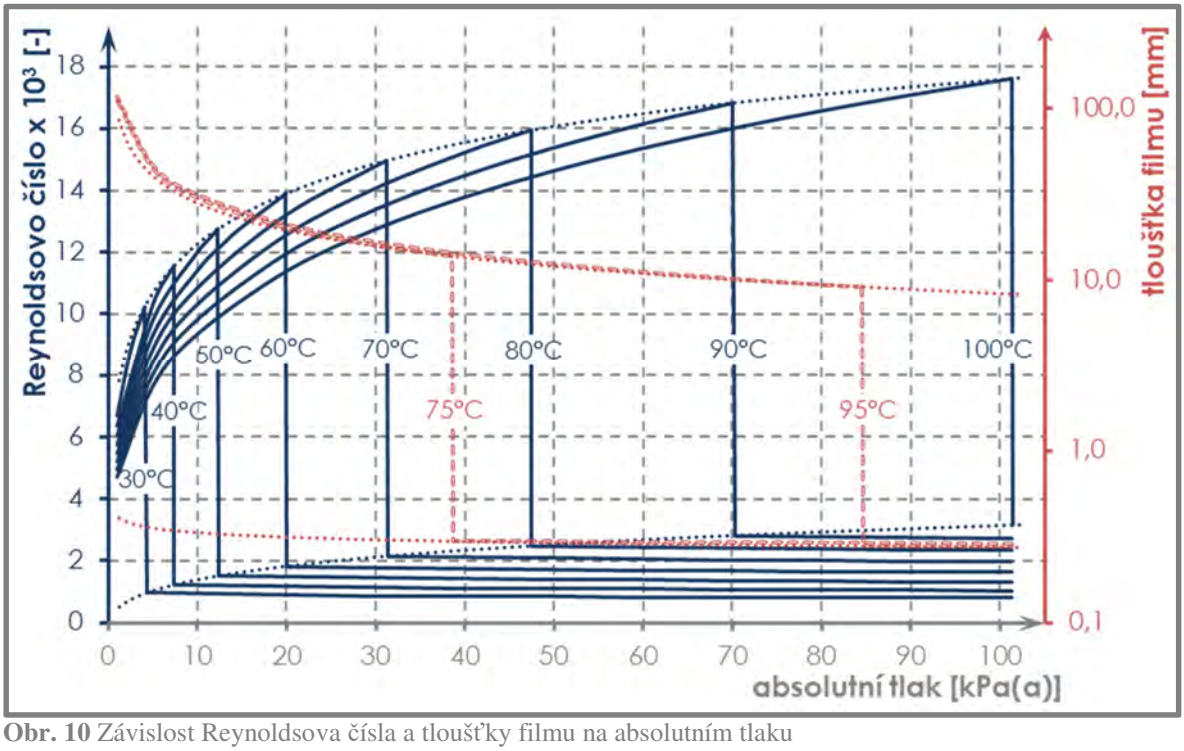
$$2{,}43 \cdot \frac{1}{\sqrt[11]{Ka}} \leq Re_{f,plam} \leq 0{,}215 \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{Ka}} \quad [-], \tag{1.21}$$

$$turbulentní\ proudění: Re_{f,tur} > 0{,}215 \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{Ka}} \quad [-]. \tag{1.22}$$

Dolní hranici Reynoldsova čísla u pseudo laminární oblasti Chun a Seban (1971) definoval tak, že na povrchu laminární vrstvy se tvoří tenké (kapilární) vlnky. Tuto rovnici stanovili z měření, které prováděli na čtyřech teplotních úrovních syté kapaliny, a na základě toho stanovili zlom, při kterém se průměrná tloušťka vrstvy snižuje působením vlnky a zvyšuje se koeficient přenosu tepla. Tyto svoje výsledky porovnávali s Wilke (1962) **[27]**, který stanovil pro přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním mez o něco níž podle rovnice

$$turbulentní\ proudění: Re_{f,tur} > 2\,460 \cdot \left(\frac{a}{\nu}\right)^{0{,}65} \quad [-]. \tag{1.23}$$

Při porovnání výsledků této rovnice (1.23) s předchozími rovnicemi (1.20) - (1.22) při identických fyzikálních stavech vychází dolní hranice přechodu v závislosti na tlaku v rozsahu Reynoldsova čísla $573 - 1\,710\ [-]$ a horní hranice $2\,396 - 2\,416\ [-]$.



Obr. 10 Závislost Reynoldsova čísla a tloušťky filmu na absolutním tlaku

Na obr. 10 jsou vykresleny hranice mezi pseudo laminárním a turbulentním prouděním podle rovnice (1.22), ze kterých je patrný vliv teploty sytosti vody na jednotlivé typy proudění, resp. s teplotou skrápěcí vody klesají hranice přechodu. V témže obrázku je v logaritmickém měřítku vynesena tloušťka filmu, která vychází z rovnice (1.1) a velikost průtoku, při kterém dochází ke skokové změně, je stanovena z rovnice (1.22). V tomto případě s klesající teplotou roste hranice (tj. tloušťka kapalného filmu na povrchu trubky) mezi jednotlivými režimy.

1.4 Zjednodušený matematický model přestupu tepla

Pro praktické využití experimentálních výsledků a jejich zobecnění pro široký rozsah provozních parametrů navrhl Chun a Seban (1971) **[9]** 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:

$$Nu = \bar{\alpha}_o \cdot \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{g \cdot \lambda^3}} = a_1 \cdot Re^{a_2} \cdot Pr^{a_3} \quad [-], \tag{1.24}$$

kde hodnoty a_1 až a_3 jsou empiricky odvozené konstanty. Jak již bylo zmíněno, tak v případě, že dochází k varu skrápěcí kapaliny na povrchu trubek, tak se vzrůstající teplotou vzrůstá i součinitel přestupu tepla a zvyšuje se i přenášený tepelný tok. Z tohoto důvodu se uvažuje při výpočtu Nusseltova čísla v rovnici i s hustotou tepelného toku

$$Nu = \bar{\alpha}_o \cdot \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{g \cdot \lambda^3}} = b_1 \cdot Re^{b_2} \cdot Pr^{b_3} \cdot \dot{q}^{b_4} \quad [-], \tag{1.25}$$

kde hodnoty b_1 až b_4 jsou opět empiricky odvozené konstanty.

Parken a kol. (1990) **[28]** publikovali výsledky svých experimentů, kde skrápěli vždy jednu mosaznou elektricky vyhřívanou trubku. Pokusy prováděli v teplotním rozsahu skrápěcí kapaliny 49 až 127°C, v rozmezí příkonu $30\ až\ 80\ kW/m^2$ a hmotnostním průtoku skrápěcí kapaliny vztaženého na délku skrápěné trubky $0{,}135\ až\ 0{,}366\ kg/(s \cdot m)$. Z těchto naměřených dat odvodili pro vodu, která na povrchu trubek nevře, empirické rovnice průměrného součinitele přestupu tepla pro průměry trubky $25{,}4\ mm$ (1") a $50{,}8\ mm$ (2") podle doporučené rovnice (1.24):

$$\bar{\alpha}_o = 0{,}042 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \left(\frac{4 \cdot \Gamma}{\mu}\right)^{0{,}15} \cdot \left(\frac{\nu}{a}\right)^{0{,}53} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.26}$$

$$\bar{\alpha}_o = 0{,}038 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \left(\frac{4 \cdot \Gamma}{\mu}\right)^{0{,}15} \cdot \left(\frac{\nu}{a}\right)^{0{,}53} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.27}$$

kde vlastnosti vody byly stanoveny z teploty, která je průměrem teplot na stěně trubky a vstupní teploty skrápěcí vody. Při stanovení rovnice (1.26) pro průměr trubky $25{,}4\ mm$ dosahovala relativní odchylka sedmi procent a sedm datových bodů z padesáti dvou se odchýlilo o více jak 10 %. U rovnice (1.27), která byla odvozena pro průměr trubky $50{,}8\ mm$, dosahovala relativní odchylka maximálně 8 %.

Pro vodu, která vře na povrchu skrápěných trubek, odvodil Parken a kol. (1990) **[28]** podle rovnice (1.25) rovnice pro stejné průměry, jako v případě nevroucí kapaliny. Rozsah příkonu byl opět totožný, Reynoldsovo číslo se pohybovalo v rozmezí 1 000 až 7 000 [−] a Prandtlovo číslo bylo v rozmezí 1,3 až 3,6 [−]

$$\bar{\alpha}_o = 0{,}000\ 82 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \mathrm{R}^{0{,}1} \cdot Pr^{0{,}65} \cdot \dot{q}^{0{,}4} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.28}$$

$$\bar{\alpha}_o = 0{,}000\ 94 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \mathrm{R}^{0{,}1} \cdot Pr^{0{,}65} \cdot \dot{q}^{0{,}4} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.29}$$

kde autoři uvádí, že maximální odchylka součinitele přestupu tepla u průměru $25{,}4\ mm$; rovnice (1.28), se pohybovala okolo 10 % a u průměru $50{,}8\ mm$ se pohybovala okolo 12 %.

Z vyhodnocení vlivu průměru trubky na součinitel přestupu tepla na povrchu této skrápěné trubky vyplývá, že v případě nevroucí kapaliny dosáhli vyššího součinitele v případě menšího průměru, ale v případě varu vody dosáhli vyšších součinitelů přestupu tepla u většího průměru. Vzhledem k tomu, že se plochy s naměřenými body značně překrývají, je nutné brát vliv průměru u těchto funkčních závislostí jako orientační.

Owens (1978) **[13]** publikoval ve svém článku výsledky svého výzkumu součinitele přestupu tepla na povrchu jedné hladké nerezové trubky o průměrech jednoho a dvou coulů, kterou skrápěli vodou, která dosahovala jak varu na povrchu trubky, tak i stav, kdy nevřela. Testovaný rozsah Reynoldsova čísla byl 120 až 10^4 $[-]$. Oproti rovnicím Chuna a Sebana (1971) **[9]**, ze kterých při odvozování vlastních empirických závislostí vycházeli již zmínění Parken a kol. (1990) **[28]**, však došel k závěru, že ne při všech stavech je Nusseltovo číslo (resp. součinitel přestupu tepla na povrchu trubek) závislé na Reynoldsově čísle. Do svých rovnic však přidal ve výsledku bezrozměrný poměr vzdálenosti mezi distribuční a skrápěnou trubkou k průměru skrápěné trubky a to vše umocněné na jednu desetinu.

Při vyhodnocení a stanovení empirické závislosti využil Owens (1978) **[13]** rozptylové grafy, ve kterých se mu osvědčilo druhou mocninnou odmocnit Prandtlovo číslo, čímž dosáhl jeho linearizace v závislosti na zbytku parametrů v následujících rovnicích při výpočtu Nusseltova čísla a to i při relativně nízkém rozptylu hodnot (pro všechny rovnice stanovil chybu 10 %). Výsledná empirická závislost součinitele přestupu tepla nevroucí vody pro laminární režim je v rovnici (1.30) a pro turbulentní režim v rovnici (1.31)

$$\bar{\alpha}_{o,lam} = 2{,}2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \left(\frac{s-D}{D}\right)^{0{,}1} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{Re}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.30}$$

$$\bar{\alpha}_{o,tur} = 0{,}185 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \left(\frac{s-D}{D}\right)^{0{,}1} \cdot \sqrt[2]{Pr} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.31}$$

přičemž přechod mezi těmito režimy stanovil Owens (1978) **[13]** v rovnici (1.32)

$$Re_{tr} = 1{,}68 \cdot \frac{1}{Pr^{1{,}5}} \quad [-]. \tag{1.32}$$

V případě, že na povrchu trubek docházelo k varu, předpokládal Owens (1978) **[13]** již plně vyvinuté turbulentní proudění, pro které platí následující rovnice

$$\bar{\alpha}_{o,tur} = 0{,}017\,5 \cdot \left(\frac{s-D}{D}\right)^{0{,}1} \cdot \sqrt[4]{\dot{q}} \cdot \sqrt[2]{Pr} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]. \tag{1.33}$$

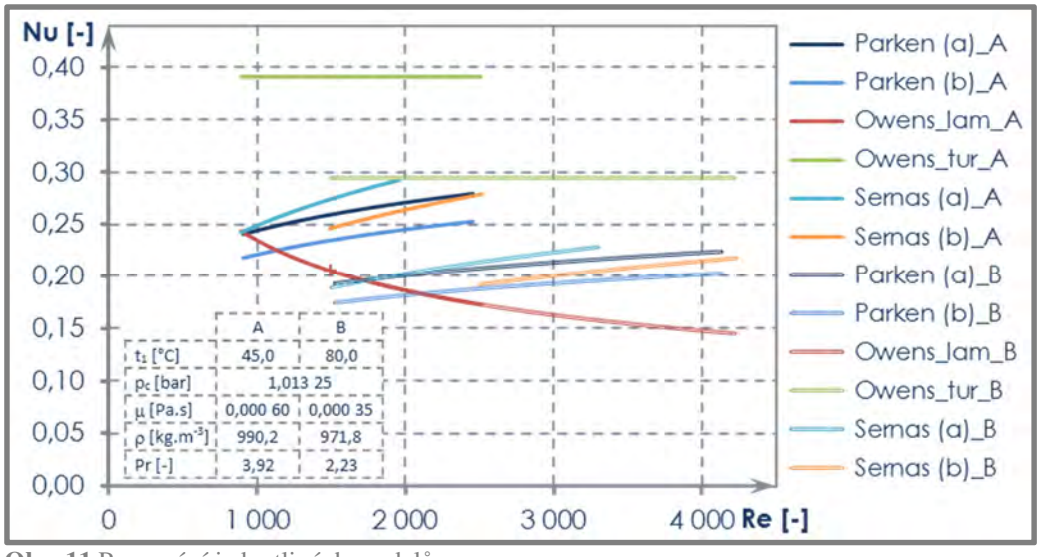
Pokud je teplota stěny trubky vyšší nežli teplota sytosti obtékající kapaliny, přestože kapalina této teploty nedosahuje, může docházet k takzvanému podchlazenému varu. Toto obecné zjednodušené tvrzení lze prohloubit kritériem, že podchlazený var lze sledovat na trubce v místech, kde se objevují bublinky, které mají na svém povrchu teplotu vyšší nebo rovnu teplotě sytosti odpovídající tlaku uvnitř bubliny. Tento jev pozoroval Sernas (1979) **[29]**, který publikoval výsledky svých experimentů, při kterých skrápěl vodou vždy jednu mosaznou elektricky vyhřívanou trubku. Pokusy prováděl v rozsahu teploty skrápěcí kapaliny 44,9 až $117\ °C$, v rozmezí příkonu 47 až 79 kW/m^2 a v rozmezí hmotnostního průtoku vztaženého na délku skrápěné trubky $0{,}133$ až $0{,}292\ kg/(s \cdot m)$. Z těchto naměřených dat odvodil empirické rovnice průměrného součinitele přestupu tepla pro průměry trubky $25{,}4\ mm$ (1.34) a $50{,}8\ mm$ (1.35)

$$\bar{\alpha}_o = 0{,}019\,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \mathrm{R}^{0{,}24} \cdot Pr^{0{,}66} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.34}$$

$$\bar{\alpha}_o = 0{,}017\,29 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda^3 \cdot g}{\nu^2}} \cdot \mathrm{R}^{0{,}24} \cdot Pr^{0{,}66} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.35}$$

kde střední kvadratická odchylka u menšího průměru vycházela 3,1 % a u většího průměru 3,3 %, přičemž u menšího průměru vybočoval z této odchylky jeden bod z 33 a u většího průměru 4 body z 39, tj. cca 10 %.

Výše zmíněné funkční závislosti byly pro dvě odlišné teplotní úrovně („A“ a „B“) vyneseny společně do grafu na obr. 11, kde jsou vyjádřeny Nusseltova čísla v závislosti na Reynoldsově čísle. První teplotní úroveň byla zvolena ve výši $45{,}0\ °C$ a druhá ve výši $80{,}0\ °C$. V obou případech byl tlak obklopující skrápěný svazek atmosférický. Na základě těchto parametrů byly v parních tabulkách [**23**] vyhledány příslušné hodnoty dynamické viskozity, hustoty kapaliny a Prandtlova čísla, které jsou uvedeny v tabulce v dolní levé části grafu. Vyčíslená hodnota Prandtlova čísla odpovídá publikovaným rozsahům výzkumů všech třech zmíněných autorů. Reynoldsovo číslo bylo pro obě teplotní úrovně dopočítáno podle rovnice (1.4), přičemž pro jeho výpočet byl volen hmotnostní průtok vztahovaný na délku skrápěné zóny v rozmezí 0,133 až 0,375 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ po kroku 0,001. U rovnic stanovených Owensem (1978) jsou mimo bezrozměrných kritérií proměnnými také rozteč a průměr trubek. Tyto hodnoty byly zvoleny podle uvedené geometrie použitých experimentálních trubkových svazků, tj. rozteč trubek byla zvolena ve výši $35{,}0\ mm$ a průměr skrápěných trubek $12{,}0\ mm$. Jednotlivé funkční závislosti jsou označeny v grafu podle jejich hlavních autorů. Rovnice (1.26) stanovené Parkenem (a) pro 1" trubku a (b) pro 2" trubku je označena rovnice (1.27). Owens odvodil rovnice pro laminární proudění (1.30) a turbulentní proudění (1.31). Sernas také stanovil rovnice podle velikosti průměru skrápěné trubky. V případě (a) se jednalo o průměr 1" a rovnici (1.34). Hodnoty pro trubku o průměru 2" byly počítány podle rovnice (1.35).



Obr. 11 Porovnání jednotlivých modelů

U obou zkoumaných teplotních úrovní se hodnoty Nusseltova čísla pohybují ve třech oblastech. První a dominantní oblastí jsou výsledky Parkena a kol. **[28]** a Sernase **[29]** u obou testovaných průměrů. Směrodatná odchylka se pohybuje při nižší teplotě ve výši cca 5,8 % kolem průměrné hodnoty Nusseltova čísla vypočítaného při totožných hmotnostních průtocích. Při vyšší zvolené teplotě se pohybuje směrodatná odchylka na úrovni cca 5,2 %. Druhou oblastí jsou výsledky Owense **[13]** u turbulentního proudění, u kterého je v rovnici zanedbán vliv

velikosti průtoku skrápěcí kapaliny a bylo uvažováno pouze s vlivem Prandtlova čísla. Třetí oblastí je průběh Owense **[13]** u laminární proudění. Ve vynesené funkci byl zanedbán vliv Prandtlova čísla naopak oproti turbulentnímu režimu a uvažoval pouze velikost průtoku skrápěcí kapaliny. Proto je při zvýšení teploty začátek průběhu pouze posunut, resp. Reynoldsovo číslo je ovlivněno dynamickou viskozitou, proto je při zvýšení teploty u stejného průtok Reynoldsovo číslo vyšší a zároveň při stejném rozmezí průtoku skrápěcí kapaliny je i interval Reynoldsova čísla širší.

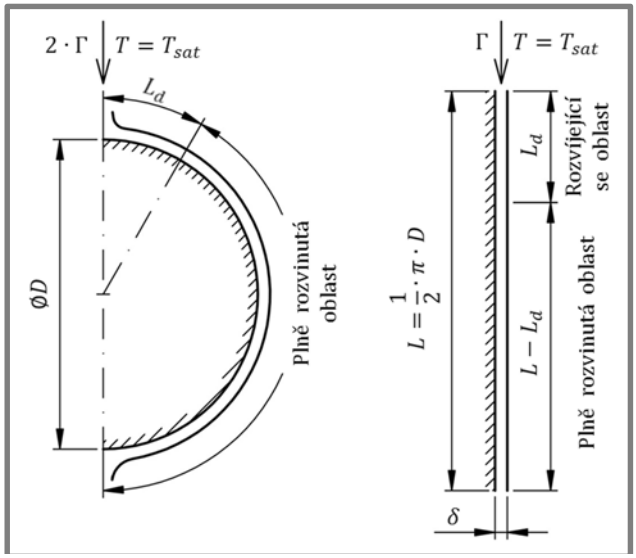
Z obr. 11 je také patrný vliv zvýšení teploty padajícího filmu na Nusseltovo číslo. Při porovnání výsledků pro stejné průtoky padajícího filmu v případě výsledků Parkera a kol. **[28]**, u obou zkoumaných průměrů, dochází shodně k poklesu Nusseltova čísla o cca 24,8 %, v případě Sernase u obou zkoumaných průměrů o shodných 28,2 % a v případě Owensova turbulentního proudění o 32,7 %.

1.5 Matematický model přestupu tepla vroucí kapaliny

Lorenz a Yung **[30]** vytvořili matematický model publikovaný v roce 1979 pro predikci součinitele přestupu tepla na povrchu jedné skrápěné horizontální trubky při využití zjednodušené geometrie, která je patrná z obr. 12. S tímto modelem porovnávali své výsledky například **[14], [15], [28]**. Při matematickém výpočtu je uvažována jedna vertikální polovina horizontální trubky (na zmíněném obrázku vlevo), která je rozvinuta (na obrázku vpravo). Při tomto zjednodušení lze ve výpočtu uvažovat se svislou rovinnou deskou o výšce:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \quad [m]. \tag{1.36}$$

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.



Obr. 12 Zjednodušená geometrie pro matematický model

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

$$\bar{\alpha}_o = \alpha_{ob} + \alpha_{od} \cdot \frac{L_d}{L} + \alpha_{oc} \cdot \left(1 - \frac{L_d}{L}\right) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]. \tag{1.37}$$

1.5.1 Součinitel přestupu tepla na hranici vzniku varu

Součinitel přestupu tepla na hranici vzniku varu (označováno také jako jádro varu) vychází z dostatečného tepelného toku, při kterém kapalina začne vřít. Podle **[30]** jsou větší tepelné toky s teplotou varu dosaženy v tenkých vrstvách kapaliny, nežli v parním prostředí, a konzervativním přístupem je využití vztahu definovaného Rohsenowem **[31]**, který v rovnici využívá mimo jiné latentní teplo (měrné skupenské teplo varu l_v $[J \cdot kg^{-1}]$)

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{ob} &= \frac{\mu \cdot l_v}{C_{sf}^3 \cdot \sqrt{\frac{g_0 \cdot \sigma}{g \cdot \rho}}} \cdot \left(\frac{c_p}{l_v \cdot Pr^s}\right)^3 \cdot \Delta T^2 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \\ kde \quad & s = 1{,}0\ [-]\ (pro\ vodu), \\ & s = 1{,}7\ [-]\ (pro\ jiné\ tekutiny), \end{aligned}\right\} \tag{1.38}$$

a parametr C_{sf} je funkcí povrchového napětí kapaliny a povrchu, po kterém kapalina stéká. Parametr C_{sf} pro vodu a různé povrchy je v tab. 4

Tab. 4 Parametr C_{sf} pro rovnici (1.38) (Rohsenowu korelaci) **[32, s. 9-8]**

Kombinace kapaliny a povrchu	C_{sf} [-]
Voda na leštěné mědi	0,012 8
Voda na lapované mědi	0,014 7
Voda na rýhované mědi	0,006 8
Voda na chemicky leptané nerezové oceli	0,013 3
Voda na mechanicky leštěné nerezové oceli	0,013 2

Pro experimentální data přestupu tepla na hranici vzniku varu vytvořil Cooper (1984) **[33]** relativně jednoduchou závislost, která je funkcí pouze redukovaného tlaku, molární hmotnosti a drsnosti povrchu skrápěného trubkového svazku. Cooper vytvořil několik totožných funkcí. Jednou z nich je při využití dekadického logaritmu

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{ob} &= \left\{90 \cdot \Delta T_{ws}^{0,67} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} \cdot p_r^m \cdot \frac{1}{[-\log_{10}(p_r)]^{0,55}}\right\}^{3,0303} \\ \alpha_{ob} \quad & [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \end{aligned}\right\} \tag{1.39}$$

kde p_r [−] je redukovaný tlak, tj. tlak v okolí trubkového svazku podělený kritickým tlakem tekutiny, která trubkový svazek obtéká. Pro vodu platí

$$p_r = \frac{p}{p_{kritický}} = \frac{p}{22\,140} \quad \left\{\left[\frac{kPa}{kPa}\right] = [-]\right\}, \tag{1.40}$$

ΔT_{ws} $[K]$ značí teplotu přehřátí, tj. od teploty stěny trubky je odečtena teplota sytosti obtékající kapaliny při daném tlaku okolního prostředí. Velké písmeno „M $[kg \cdot kmol^{-1}]$“ značí molární hmotnost a exponent m [−] je závislý na drsnosti povrchu trubky

$$\left.\begin{aligned} & m = 0{,}12 - 0{,}2 \cdot \log_{10}(R_p), \\ & kde \;\; R_p = \frac{Ra}{0{,}4} \end{aligned}\right\} \quad [\mu m], \tag{1.41}$$

kde Ra $[\mu m]$ značí průměrnou (střední) aritmetickou úchylku zkoumaného profilu daného povrchu vypočítaného z profilu drsnosti, kde Rp $[\mu m]$ je nejvyšší výška výstupků. Více v **[34]**.

Chien a Cheng **[15]** uvádí pro rovnici (1.39) odchylku $\pm 10\,\%$ při nejvyšší výšce výstupků $Rp = 0{,}25\ \mu m$. Další tvar zmíněné rovnice uvádí Cooper **[33]** a využívá přirozený logaritmus a teplota přehřátí je zaměněna za hustotu tepelného toku

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{ob} &= 93{,}5 \cdot \frac{\dot{q}^{0,67}}{\sqrt{M}} \cdot p_r^{0,12-0,434\,3 \cdot \ln(R_p)} \cdot \frac{1}{[-0{,}434\,3 \cdot \ln(p_r)]^{0,55}} \\ \alpha_{ob} \quad & [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]. \end{aligned}\right\} \tag{1.42}$$

Vliv mikrostruktury na přestup tepla a tvorbu bublin na povrchu skrápěného svazku testovala Luke (2009) **[35]**. Experimenty prováděla na měděných trubkách o průměrech v rozsahu 8,0 až 25,0 mm, které byly nejprve hladké a jež byly postupně zdrsňovány pískováním. Ve své práci dospěla k závěrům, že není možné predikovat vliv drsnosti na tvorbu bublin na základě standardizovaného parametru drsnosti, ale je třeba brát v úvahu všechny tři dimenze povrchu, protože úpravou povrchu pískování vzniká stochastická struktura, která přímo ovlivňuje smáčivost povrchu.

1.5.2 Součinitel přestupu tepla přechodné oblasti

Přechodná oblast, na které je teplo využíváno kapalinou pro své přehřátí a kde ještě nedochází k varu, resp. k odpařování, je ohraničena délkou L_d $[m]$

$$\left.\begin{aligned} L_d &= \frac{\sqrt[3]{\Gamma^4}}{4\cdot\pi\cdot\rho\cdot a}\cdot\sqrt{\frac{3\cdot\mu}{g\cdot\rho^2}} = \frac{\sqrt[3]{\Gamma^4}}{4\cdot\pi\cdot\rho\cdot\frac{\lambda}{\rho\cdot c_p}}\cdot\sqrt{\frac{3\cdot\mu}{g\cdot\rho^2}} \\ L_d &= \frac{c_p\cdot\sqrt[3]{\Gamma^4}}{4\cdot\pi\cdot\rho\cdot\lambda}\cdot\sqrt{\frac{3\cdot\mu}{g\cdot\rho^2}} \quad [m]. \end{aligned}\right\} \tag{1.43}$$

a tato rovnice je odvozena pro laminární až mírně turbulentní proudění a střední hodnota součinitele přestupu tepla na povrchu trubek v této oblasti je

$$\alpha_{od} = \frac{3}{8}\cdot c_p\cdot\frac{\Gamma}{L_d} \quad [W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}], \tag{1.44}$$

který vychází z energetické bilance **[30]**.

1.5.3 Součinitel přestupu tepla plně vyvinuté oblasti

Pro plně vyvinutou oblast na vertikální hladké trubce doporučují **[30]** pro výpočet součinitele přestupu tepla při laminárním (i pseudo laminárním) a při turbulentním proudění podle funkčních tvarů stanovených Chunem a Sebanem **[9]** následující dvě rovnice

$$\alpha_{oc,lam} = 0{,}821\cdot\sqrt[3]{\frac{\lambda^3\cdot g}{\nu^2}}\cdot\sqrt[0{,}22]{\frac{\mu}{4\cdot\Gamma}} \quad [W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}], \tag{1.45}$$

$$\alpha_{oc,tur} = 0{,}003\,8\cdot\sqrt[3]{\frac{\lambda^3\cdot g}{\nu^2}}\cdot\sqrt[0{,}4]{\frac{4\cdot\Gamma}{\mu}}\cdot\sqrt[0{,}65]{\frac{\nu}{a}} \quad [W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}]. \tag{1.46}$$

Při laminárním režimu je uvažováno i s vlivem zvlnění a vln, které mají vliv na zvýšení přestupu tepla a snížení tloušťky filmu. Obě dvě rovnice jsou funkcí Reynoldsova a Prandtlova čísla a měly by se používat pro stav při konstantním tepelném toku nebo při konstantních teplotních podmínkách na stěně trubky. Souvztažnost rovnic (1.45) a (1.46) vytváří hranici přechodu definovanou jako funkční závislost Reynoldsova na Prandtlově čísle

$$Re_{f,tr} > \frac{5\,800}{Pr^{1{,}06}} \quad [-]. \tag{1.47}$$

Tato rovnice neurčuje skutečné rozhraní mezi pseudo laminárním a turbulentním režimem, ale pouze přechod mezi rovnicemi (1.45) a (1.46). Přechod mezi jednotlivými hranicemi je definován v rovnicích (1.20) – (1.22).

Pro čistě laminární proudění doporučují Chun a Seban **[9]** Nusseltovo řešení, které vychází pouze z přenosu tepla vedením a koeficient přestupu tepla je konstantní v celém profilu toku

$$\alpha_{oc,lam} = \sqrt[3]{\frac{4}{3}}\cdot\sqrt[3]{\frac{\lambda^3\cdot g}{\nu^2}\cdot\frac{\mu}{4\cdot\Gamma}} \quad [W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}] \tag{1.48}$$

a pro zlom definovaný v rovnici (1.20)

$$\alpha_{oc,plam} = 0{,}8\cdot\left(\frac{\Gamma}{\mu}\right)^{0{,}11}\cdot\sqrt[3]{\frac{4}{3}}\cdot\sqrt[3]{\frac{\lambda^3\cdot g}{\nu^2}\cdot\frac{\mu}{4\cdot\Gamma}} \quad [W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}]. \tag{1.49}$$

1.6 Matematický model pro dvoufázové proudění

Chien a Cheng (2006) **[15]** uvádí, že model Chuna a Sebana (1971) **[9]** není v dobré shodě s prakticky naměřenými výsledky pro různá chladiva, resp. má velkou chybu. Proto navrhují 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) **[36]** a je dán základní rovnicí

$$\alpha_o = S \cdot \alpha_{ob} + \alpha_{cv} = S \cdot \alpha_{ob} + E \cdot h_l \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.50}$$

která je shodná i pro proudění uvnitř kanálu, kde $S\,[-]$ značí faktor potlačení součinitel přestupu tepla na hranici vzniku varu (α_{ob}), který je určen v kapitole 1.5.1, a α_{cv} je součinitel konvektivního přestupu tepla, který se rovná součinu dvoufázového posilového faktoru $E\,[-]$ a součiniteli přestupu tepla pro jednofázové kapalné proudění. Chien a Cheng (2006) **[15]** pro výpočet faktoru potlačení a dvoufázového posilového faktoru doporučují využít následující funkce

$$S = \frac{1}{1 + 2{,}56 \cdot 10^{-6} \cdot \left(Re_f \cdot E^{1{,}25}\right)^{1{,}17}} \quad [-], \tag{1.51}$$

$$\left.\begin{aligned} E &= 1\,[-] && pro \quad \frac{1}{X_{tt}} < 1\,[-], \\ E &= 2{,}35 \cdot \left(0{,}213 + \frac{1}{X_{tt}}\right)^{0{,}736}\,[-] && pro \quad \frac{1}{X_{tt}} \geq 1\,[-], \end{aligned}\right\} \tag{1.52}$$

kde $X_{tt}\,[-]$ je Martinelliho parametr

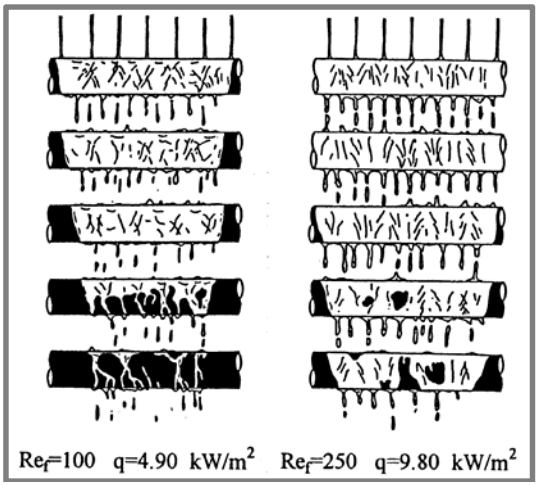
$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0{,}875} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_g}\right)^{0{,}125} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{0{,}5} \quad [-]. \tag{1.53}$$

1.7 Vliv suchých míst na skrápěném trubkovém svazku

Oproti konvenčním zaplaveným výměníkům mají skrápěné výměníky vyšší součinitel přestupu tepla a může být zmenšena teplosměnná plocha. **[37]** 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 **[38]**. 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) **[19]**, 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) **[38]** označuje tento stav jako „non-dryout“ a až v případě výskytu suchých míst stav popisují jako „dryout“. Roques (2007) **[39]** 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) **[40]** 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.

Experiment v případě Ganica **[19]** probíhal tak, že u nejmenší testované rozteče $12{,}7\ mm$ si zvolil průtok skrápěcí kapaliny a poté minimální tepelný příkon. U zvoleného průtoku tento postup opakoval ještě u dvou dalších roztečí, tj. $25{,}4\ mm$ a $50{,}8\ mm$ a došel k závěru, že s rostoucí roztečí trubek klesá potřebný minimální příkon, při kterém se nevyskytují suchá místa, vlivem zvyšující se kinetické energie padajícího proudu tekutiny.



Obr. 13 Vliv tepelného příkonu na rozložení kapalného filmu na skrápěném trubkovém svazku **[41]**

Na obr. 13 jsou dva ilustrační případy, které uvádí Fujita (1998) **[41]** pro případ, kdy je stejný průtok skrápěcí kapaliny, kterou je v tomto případě chladivo R11, a vlivem zdvojnásobení měrného tepelného příkonu došlo k lepšímu rozložení kapalného filmu a zmenšení podílu suchých míst. Zároveň došlo ke zvýšení Reynoldsova čísla kapalné fáze (Re_f), protože vlivem zvýšení tepelného příkonu vzrostla teplota kapalné fáze, na základě které je určena dynamická viskozita, resp. Reynoldsovo číslo podle rovnice (1.4).

Pro přenášený tepelný příkon v případě výskytu zdánlivě mokrých ploch („non-dryout“) formuloval Ribatski (2007) **[38]** rovnici

$$q_0 \cdot A_{total} = q_{wet} \cdot A_{wet} + q_{dry} \cdot A_{dry} \quad [W], \tag{1.54}$$

kde se celkový tepelný tok skládá ze dvou částí. První část označuje tepelný příkon ve „vlhkých oblastech“, kde je teplo odebíráno zejména prostřednictvím varu v kapalném filmu. Druhá část

označuje tepelný příkon v „suchých regionech“, kde za předpokladu klidného pohybu páry v okolí, je teplo přenášeno přirozenou konvekcí. Pak pro celkový součinitel přestupu tepla platí

$$\alpha_0 = \alpha_{wet} \cdot F + \alpha_{dry} \cdot (1 - F) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{1.55}$$

kde F $[-]$ označuje zdánlivý podíl mokré plochy vůči celkové ploše

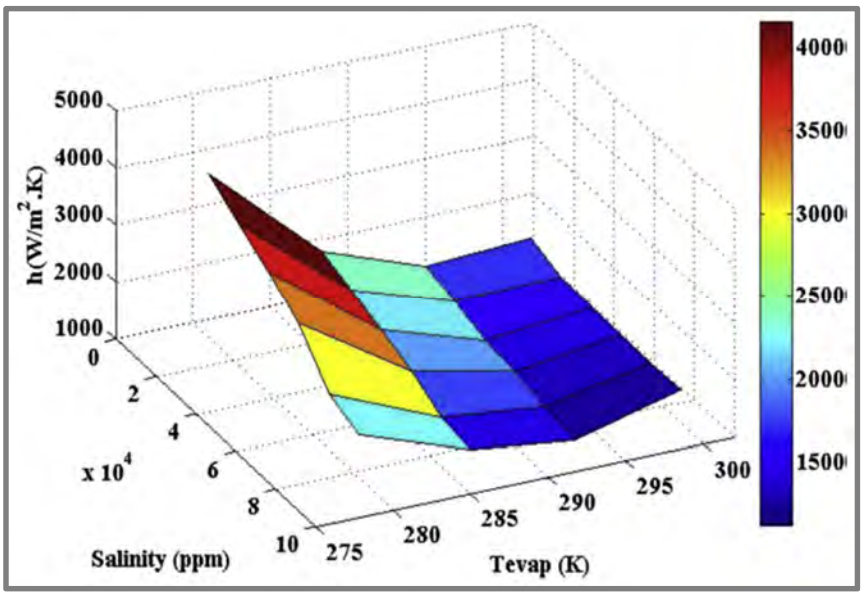
$$F = \frac{A_{wet}}{A_{total}} \quad [-]. \tag{1.56}$$

1.8 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 $(mg \cdot l^{-1})$ **[42]**, **[43]**.

Yang a Shen (2008) **[1]** 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.

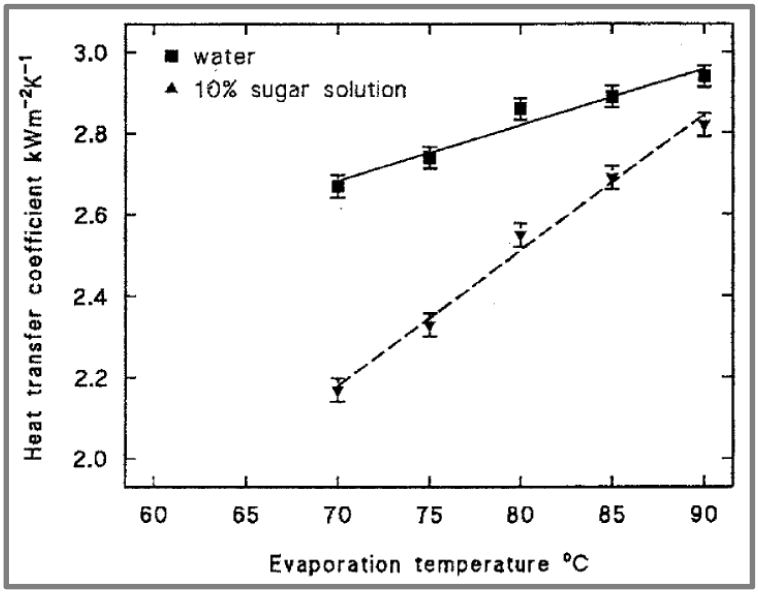
Shen a kol. (2014) **[42]** testovali přestup tepla na hliníkové trubce o průměru 19,0 mm, která byla elektricky vyhřívaná v rozsahu tepelného příkonu 7,75 až 12,3 $kW \cdot m^{-2}$. Při teplotě saturace 60 °C, což pro pitnou vodu odpovídá podle **[23]** tlaku cca 20,0 $kPa(abs)$, porovnávali vliv množství 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 %.



Obr. 14 Vliv množství soli a teploty saturace na součinitel přestupu tepla **[43]**

Na obr. 14 je v trojrozměrném grafu vykreslen vliv množství soli a saturačního tlaku na součinitel přestupu tepla, kde na ose „x“ je vyznačeno množství soli („Salinity“), na svislé ose součinitel přestupu tepla („h“) a na ose „z“ teplota saturace („Tevap“), kterou autoři Shahzad a kol. (2012) **[43]** vyjadřují testovaný tlakový rozsahu 0,93 až 3,60 $kPa(abs)$, kde nejmenší tlaková úroveň odpovídá hrubému vakuu. Z grafu je patrné, že vliv množství soli není významný u horní testované tlakové úrovně, tj. při 3,60 $kPa(abs)$ a se snižujícím se stlakem dochází k poklesu součinitele s narůstajícím množstvím soli. Průběh se zdá být relativně lineární a potvrzuje závěry **[42]**.

Další rozpustnou látkou ve vodě, se kterou bylo experimentováno, je cukr. Chen a Jebson (1997) **[44]** testovali rozdílnost součinitele přestupu tepla v případě čisté vody a směsi čisté vody s 10 % rozpuštěného cukru, což odpovídá 100 $gramům\ v\ litru$ vody.



Obr. 15 Závislost teploty saturace na součinitel přestupu tepla při 10% cukru ve vodě **[44]**

Na obr. 15 je zobrazena rozdílnost součinitele přestupu tepla (na svislé ose) v závislosti na teplotě saturace (na vodorovné ose) čisté vody („water“) a vody s 10 % rozpuštěného cukru („10% sugar solution“). V obou případech je průtok skrápěcí kapaliny $0{,}0167\ kg \cdot s^{-1}$. Nejvyšší publikované hodnoty jsou při 90 °C, kde je u čisté vody součinitel přestupu tepla na úrovni cca $2{,}95\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a součinitel směsi vody s cukrem je o cca $0{,}15\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ menší, přičemž se chybová pásma nepřekrývají. Se snižujícím se saturačním tlakem klesají i součinitele přestupu tepla, ale u směsi vody s cukrem je pokles výraznější oproti součiniteli čisté vody. Při teplotě saturace 70 °C je rozdíl mezi součiniteli čisté vody a směsi vody s cukrem cca $0{,}5\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

2 MĚŘICÍ 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. Jejich společné schéma je na obr. 16. Podle hlavního pracovního tlaku, na který jsou experimentální zařízení navrženy, jsou nazývány. A to „podtlakový stand“ (přibližně horní polovina schématu) a „atmosférický stand“ (přibližně dolní polovina schématu).

2.1 Podtlakový stand

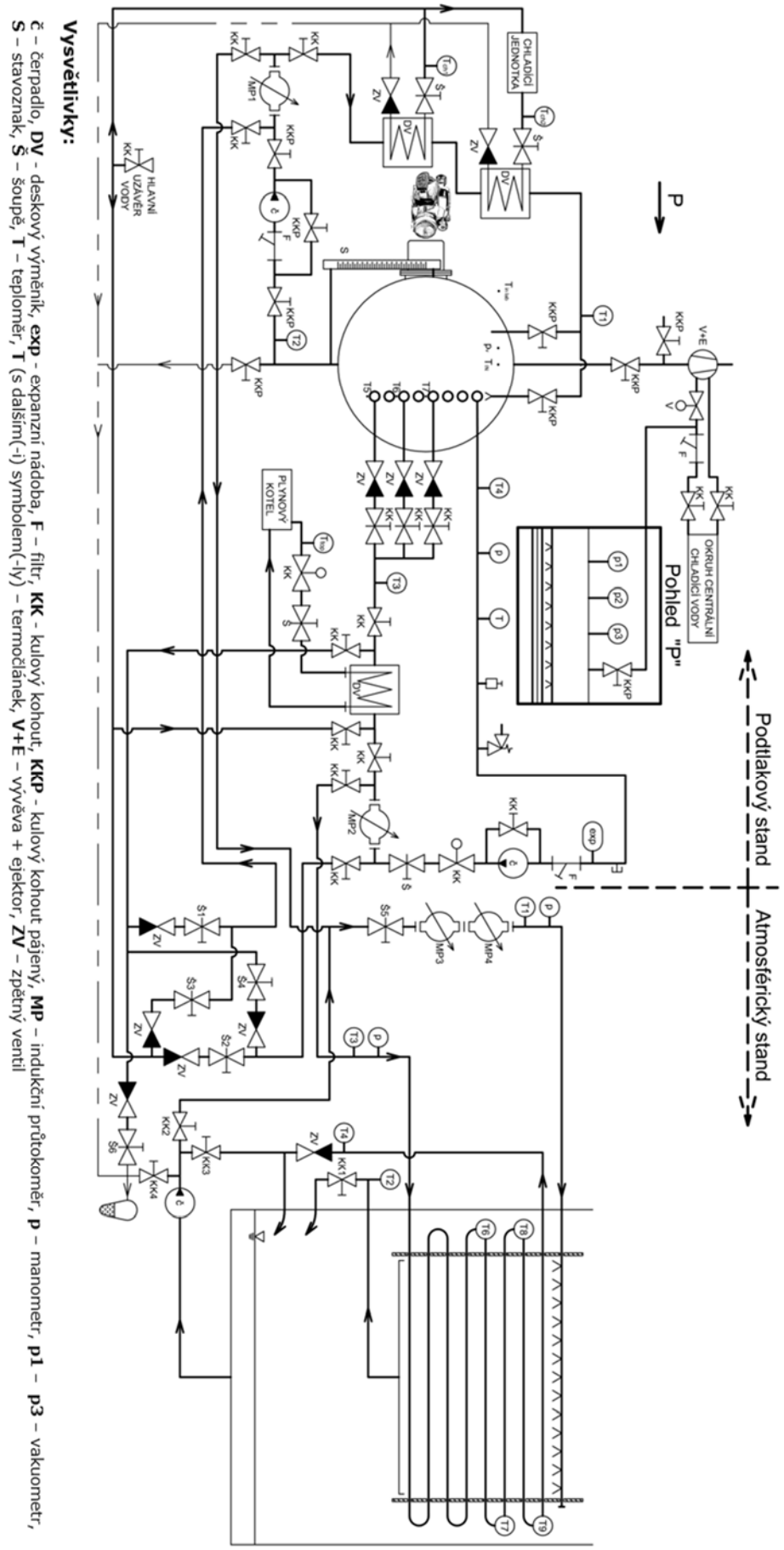
Trubkový svazek, na kterém může být simulován var i kondenzace, je umístěn v nádobě, ve které je vodokružnou vývěvou, skrze ejektor, tvořen podtlak, který může dosahovat vzhledem k teplotám skrápěcí vody až cca 1 kPa(abs). Voda do vodokružné vývěvy je dodávána z centrálního okruhu chladicí vody, který je rozveden po laboratořích Fakulty strojního inženýrství, a poté je do něho vracena zpět. 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. Vzhledem k tomu, že je tato práce zaměřená na ohřev skrápěcí kapaliny, resp. jejího varu na povrchu skrápěného trubkového svazku, bude níže popsáno zapojení zařízení pro tyto experimenty.

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 kotel, ze kterého je dodáváno teplo topné kapalině. 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 chladící 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 měřen je pouze celkový průtok před rozdělením. Teplotní stavy topné kapaliny jsou měřeny termočlánky na vstupu do svazku (T3) a výstupu ze svazku (T4). Pro přiblížení rozvrstvení teplot topné kapaliny jsou umístěny termočlánky mezi první a druhou, druhou a třetí a třetí a čtvrtou trubkou.

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 otápěnými trubkami, tj. v případě zmíněného svazku skládajícího se z osmi trubek je měřena teplota pod čtvrtou (T7), šestou (T6) a pod osmou trubkou (T5).

Napojení smyček (topné a skrápěcí) na trubkový svazek, resp. na distribuční trubku je realizováno na víku zkušební komory prostřednictvím šroubení se zářezným prstencem od společnosti Schwer Fittings.



Obr. 16 Schéma měřicích zařízení

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 měřícími kartami DAQ 56 a zaznamenávány v měřícím 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 – D) po 21 dírách s různou vzdáleností v každém sloupci. V tab. 5 jsou možné rozteče trubek při uvažování deseti trubek ve svazku a vzniklá mezera mezi trubkami.

Tab. 5 Možné rozteče a vzniklé mezery mezi trubkami při deseti trubkách ve svazku

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
Rozteč [mm]	15	30	20	40	25	50	35	70
Mezera mezi trubkami [mm]	3	18	8	28	13	38	23	58

Skrápěcí kapalina o teplotě (T1) a objemovém průtoku (V1 – měřeno indukčním průtokoměrem MP1) vytéká z distribuční trubky, ve které jsou otvory o průměru 1,0 mm po 9,2 mm a která je umístěna nad svazkem. Do poslední (dolní) trubky trubkového svazku vtéká kapalina o teplotě (T3) a o průtoku (V2 – měřeno indukčním průtokoměrem MP2) a vytéká o teplotě (T4) do sběrného žlabu umístěného pod zkoumaným výměníkem. Ve smyčce jsou navíc umístěny čtyři termočlánky (T6 – T9) pro určení průběhu změny teploty ve smyčce. Skrápěcí kapalina je pod výměníkem sbírána do žlábku, který je umístěný těsně za poslední trubkou a ze kterého je odváděna k termočlánku (T2), který měří její teplotu a poté volně odtéká do sběrného žlabu, ze kterého kapalinu odčerpává čerpadlo do odpadu (C). Skrápěcí smyčka je dále osazena vodoměrem (MP3) a plováčkovým průtokoměrem (MP4) pro vizuální kontrolu. Všechny použité termočlánky jsou obalované a neuzemněné typu T.

Tepelných stavů médií (vody) proudících vně a uvnitř výměníku je dosahováno směšováním teplé a studené vody. Studená voda pro směšování 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. Směšovací smyčka může pracovat ve třech režimech a to i bez přísunu tepla:

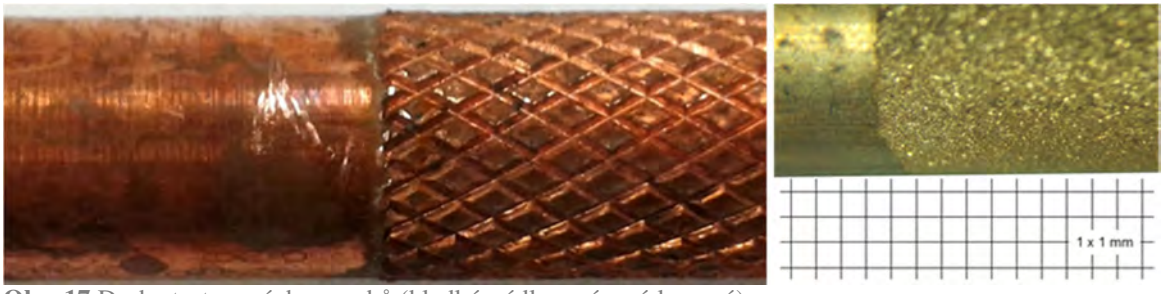
A) Odebírání tepla skrápěcí kapalině
   1) z přívodu (B) teče studená voda skrz šoupě (Š2), které může být přihřívána směšováním s horkou vodou (šoupě Š4)
   2) z přívodu (A) teče horká voda skrz šoupě (Š1), která může být ochlazována směšování se studenou vodou (šoupě Š3)

B) Předávání tepla skrápěcí kapalině
   1) z přívodu (A) teče horká voda skrz šoupě (Š4), která může být ochlazována směšování se studenou vodou (šoupě Š2)
   2) z přívodu (B) teče studená voda skrz šoupě (Š3), které může být ohřívána směšováním s horkou vodou (šoupě Š1)

C) Ostrovní provoz – určeno pro měření režimů skrápění
   1) Šoupata (Š1 – Š4) a kulový kohout (KK4) jsou zavřené
   2) Čerpadlem je dopravována kapalina skrze kulový kohout (KK2) a šoupě (Š5) do distribuční trubky. Při požadovaném malém průtoku skrápěcí kapaliny lze část průtoku za čerpadlem odklonit zpět do žlabu skrze kulový kohout (KK3)

Všechny zkoumané teploty kapaliny (T1 - T9), teplota okolí (nezapouzdřený termočlánek typu T) a průtoky V1 a V2 jsou kontinuálně zaznamenávány skrze převodníky DAQ 56 do počítače v programu LabView.

Mimo vlivů teplot a průtoků proudících médií na zkoumaný součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek byl zkoumán také vliv povrchu trubek. Na obr. 17 vlevo je patrný rozdíl mezi hladkým povrchem a povrchem s rýhami, které na povrchu vytváří plochu s kosočtverci. Tento povrch byl vytvořen objemovým tvářením za studena a to rádlováním (rýhováním). Vnější průměr trubek je v rozmezí $12{,}3 - 12{,}4$ mm. Ve výpočtech je uvažováno se středním průměrem trubek $12{,}0$ mm. Na obr. 17 vpravo je ukázka rozdílu povrchu hladkého a pískovaného, kterého bylo dosaženo otryskáním vysokopecní struskou, čímž byl povrch zdrsněn, ale úběr materiálu nebyl nijak významný, takže na průměr trubky tato technologická úprava měla zanedbatelný vliv.



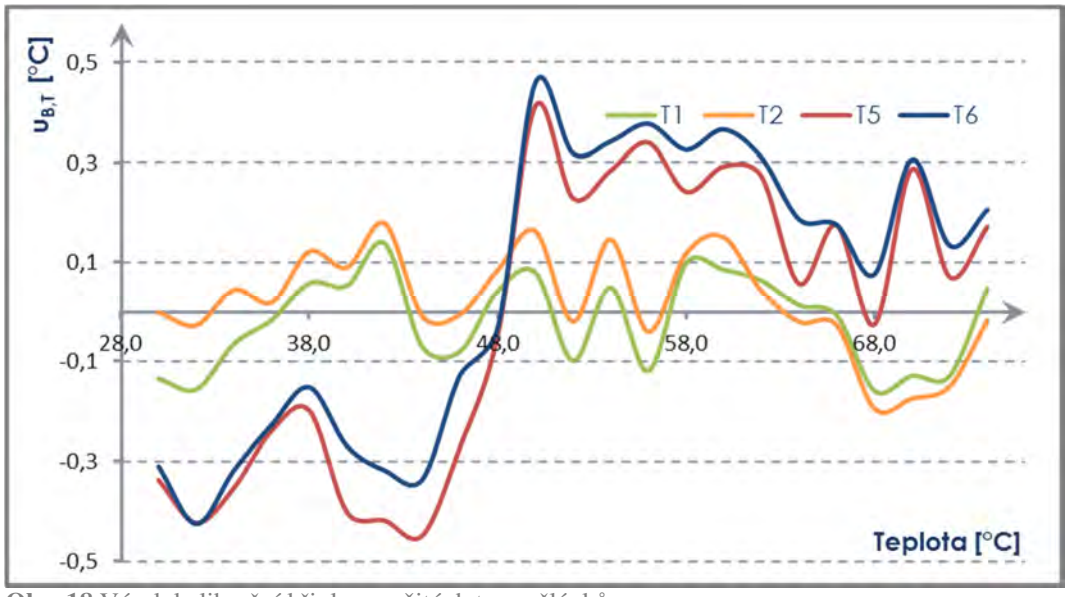
Obr. 17 Druhy testovaných povrchů (hladký, rádlovaný a pískovaný)

2.3 Použité termočlánky

Pro měření teplot ve smyčkách jsou použity zapouzdřené termočlánky typu T s neuzemněným koncem se zvýšenou přesností. Použité termočlánky byly kalibrovány v kalibrační peci CL1000 Series, jež udržuje nastavenou teplotu s přesností 0,15°C. Výsek kalibrační křivky čtyř používaných termočlánků je ukázán na obr. 18.

Vzhledem k průběhu kalibrační křivky bylo rozhodnuto použít jednotnou chybu pro všechny termočlánky, která se skládá z naměřeného maxima resp. minima (kde statistická chyba dosahovala maximálně 0,006°C) a chyby kalibrační pece, takže výsledná chyba termočlánků je stanovena

$$u_{B,T} = \pm 0{,}65 \quad [°C]. \tag{2.1}$$



Obr. 18 Výsek kalibrační křivky použitých termočlánků

2.4 Souhrn nejistot typu B použitých měřících zařízení

Tab. 6 Souhrn nejistot typu B použitých měřících zařízení

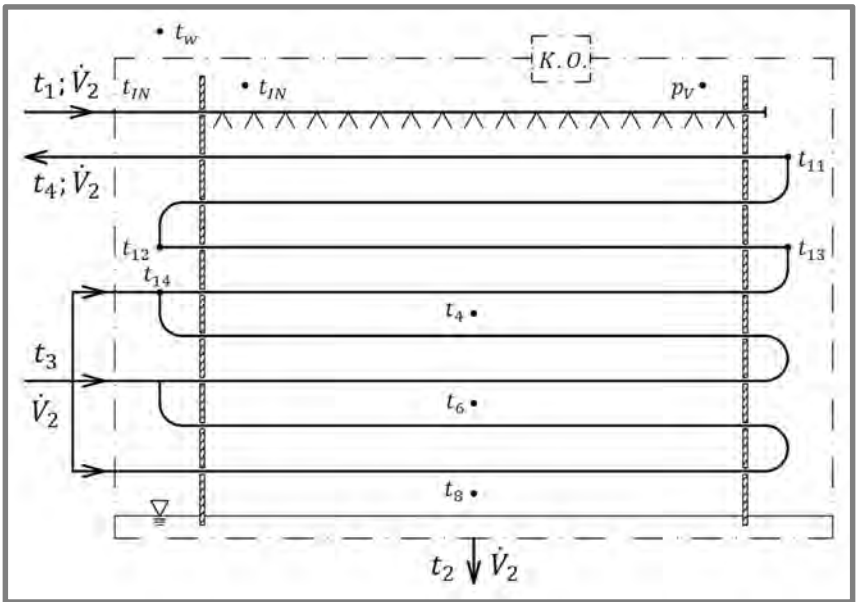
Zařízení	Rozsah měření	Přesnost	Nejistota typu „B“
Termočlánek	$-270 \div 400\ °C$		$\pm\ 0{,}65\ °C$
Vakuometr - Baumer TED6	$0 \div 160\ kPa$	0,5 % rozsahu	$\pm\ 0{,}5\ kPa$
Indukční průtokoměr - FLOMAG 3000	$0{,}007\ 8 \div 0{,}942\ 4\ l \cdot s^{-1}$	0,5 % rozsahu	$\pm\ 0{,}004\ 67\ l \cdot s^{-1}$

3 STANOVENÍ PŘESTUPU TEPLA Z MĚŘENÝCH VELIČIN

Pozn.: Princip stanovení součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek u atmosférického standu je totožný s odvozením u podtlakového standu. Matematický model pro jednofázové proudění je odvozen na základě zdrojů **[45]** a **[46]**. 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. Na schématu na obr. 16 je však tato teplota měřena různými termočlánky, podle využitého experimentálního zařízení a zkoumaných počtů trubek. 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.

3.1 Matematický model nevroucí kapaliny

3.1.1 Tepelná bilance podtlakového standu



Obr. 19 Zjednodušené schéma skrápěného výměníku

Pro kontrolní objem, který je vyznačen čerchovanou čarou na obr. 19 a označuje hranice komory podtlakového standu, platí podle Zákona zachování energie tepelná bilance mezi topnou uzavřenou smyčkou („top“) a podtlakovou skrápěcí smyčkou („V“):

$$\dot{Q}_3 + \dot{Q}_1 = \dot{Q}_4 + \dot{Q}_2 + \Delta\dot{Q}_{12} \quad [W] \tag{3.1}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{top} = \dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 \quad [W], \tag{3.2}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_V = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_1 \quad [W]. \tag{3.3}$$

za předpokladu, že

$$t_3 > t_4 \quad a \quad t_2 > t_1 \quad [°C]. \tag{3.4}$$

Pak teplo předané přes stěnu trubky je

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{top} = \dot{Q}_V + \Delta\dot{Q}_{12} \quad [W], \tag{3.5}$$

resp. teplo dodané do skrápěcí kapaliny

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_{top} - \Delta\dot{Q}_{12} = \dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 - \Delta\dot{Q}_{12} \quad [W]. \tag{3.6}$$

V případě, že je trubkový svazek kompletně pokrytý vodním filmem, přechází teplo z topné kapaliny do skrápěcí kapaliny v plné míře a nedochází k tepelným únikům z pohledu skrápěné

kapaliny. Tj. ztrátový tepelný tok „$\Delta\dot{Q}_{12}$“ je nulový. Výsledná rovnice pro výpočet tepla odebraného topné kapalině je:

$$\left.\begin{aligned}\dot{Q}_S &= \dot{Q}_{top} = \dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 \\ \dot{Q}_{top} &= \dot{V}_2 \cdot \rho\left(p_{top}; \frac{t_3 + t_4}{2}\right) \cdot c_p\left(p_{top}; \frac{t_3 + t_4}{2}\right) \cdot (t_3 - t_4)\end{aligned}\right\} [W]. \qquad (3.7)$$

Účinnost přestupu tepla je

$$\eta_V = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_B} \quad [-]. \qquad (3.8)$$

3.1.2 Odvození rovnice přestupu tepla přes kruhovou stěnu

Teplo prostupující stěnou je složeno z konvekce, vedení a záření. Při nižších teplotách je teplo přenášené zářením zanedbatelné, proto není při dalším výpočtu uvažováno. Výpočet vychází z

1) Newtonova zákona přestupu tepla

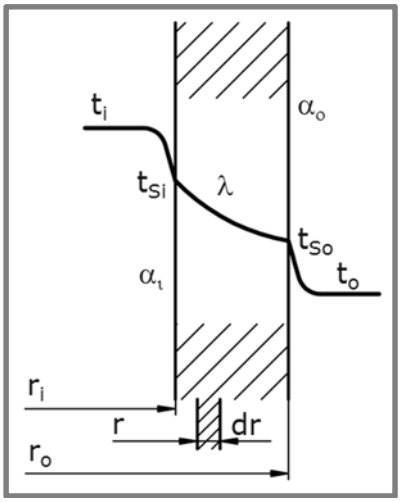
$$d\dot{Q} = dS \cdot \alpha_i \cdot (t_i - t_{Si}) \quad [W], \qquad (3.9)$$

2) Fourierova zákona vedení tepla

$$d\dot{Q} = dS \cdot \lambda_S \cdot \frac{dt}{dr} \quad [W]. \qquad (3.10)$$

Za předpokladu

1) Paralelní uspořádání trubek (jedna řada)
2) Stěny jsou bez vnitřních zdrojů
3) Tepelný tok je v radiálním směru vzhledem k trubce



Obr. 20 Značení teplot a poloměrů pro obecný výpočet přestupu tepla

Dosazením do obecné rovnice (3.9) je stanoven přestup tepla na vnitřní straně trubky a tato rovnice je upravena pro další výpočet

$$d\dot{Q}_S = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \mathrm{r_i} \cdot dx \cdot \alpha_i \cdot (t_i - t_{Si}) \quad [W], \qquad (3.11)$$

$$d\dot{Q}_S \cdot \frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot dx \cdot (t_i - t_{Si}) \quad [W]. \qquad (3.12)$$

Vedení tepla skrze trubku je odvozeno z rovnice (3.10) a výsledný vztah je upraven pro další výpočet

$$d\dot{Q}_S = -\lambda_S \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \mathrm{r} \cdot dx \cdot \frac{dt}{dr} \quad [W], \qquad (3.13)$$

$$\left.\begin{aligned} d\dot{Q}_S \cdot \int_{r_i}^{r_o} \frac{1}{r} \cdot dr &= -\lambda_S \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot dx \cdot \int_{t_{Si}}^{t_{So}} dt \\ d\dot{Q}_S \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) &= \lambda_S \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot dx \cdot (t_{Si} - t_{So}) \end{aligned}\right\}, \tag{3.14}$$

$$d\dot{Q}_S \cdot \frac{1}{\lambda_S} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot dx \cdot (t_{Si} - t_{So}). \tag{3.15}$$

Dosazením do obecné rovnice (3.9) je stanoven přestup tepla na vnější straně trubky a tato rovnice je upravena pro další výpočet

$$d\dot{Q}_S = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \mathrm{r_o} \cdot dx \cdot \alpha_o \cdot (t_{So} - t_o) \quad [W], \tag{3.16}$$

$$d\dot{Q}_S \cdot \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot dx \cdot (t_{So} - t_o). \tag{3.17}$$

Sečtením levých a pravých stran rovnic (3.12), (3.15) a (3.17) je po integraci získán celkový prostup tepla

$$\left.\begin{aligned} &\left[\frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} + \frac{1}{\lambda_S} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o}\right] \cdot \int_0^{\dot{Q}_S} d\dot{Q}_S = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (t_i - t_{Si} + t_{Si} - t_{So} + t_{So} - t_o) \cdot \int_0^{L} dx \end{aligned}\right\}, \tag{3.18}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot L \cdot (t_i - t_o)}{\frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} + \frac{1}{\lambda_S} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o}} \quad [W], \tag{3.19}$$

kde vybrané členy rovnice vyjadřují součinitel prostupu tepla

$$k_S = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} + \frac{1}{\lambda_S} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]. \tag{3.20}$$

U výměníků nebývá rovnoměrný teplotní gradient na vstupu a výstupu. Proto je v rovnici (3.19) nahrazen středním logaritmickým teplotním spádem. Pak výsledný vztah pro prosup tepla kruhovou stěnou v radiálním směru je

$$\dot{Q}_S = k_S \cdot \mathrm{L} \cdot \Delta T_{ln} \quad [W]. \tag{3.21}$$

3.1.3 Výpočet přestupu tepla na vnější straně trubky

Součinitel přestupu tepla na vnější straně trubky je odvozen z rovnice (3.20)

$$\left.\begin{aligned} k_S &= \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot r_i} + \frac{1}{\lambda_S} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{\alpha_o \cdot r_o}} \\ \Leftrightarrow \frac{k_S}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot r_i} &+ \frac{k_S}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_S} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{k_S}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_o \cdot r_o} = 1 \\ \Leftrightarrow \frac{k_S}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_o \cdot r_o} &= 1 - \frac{k_S}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot r_i} - \frac{k_S}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_S} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \end{aligned}\right\}, \tag{3.22}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \alpha_o = \dfrac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot \left[\dfrac{1}{k_S} - \dfrac{1}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot r_i} - \dfrac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_S} \cdot \ln\left(\dfrac{r_o}{r_i}\right)\right]} \\ \alpha_o = [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \end{array} \right\}. \quad (3.23)$$

Pro prostup tepla musí platit rovnost rovnic (3.7) a (3.21) z čehož plyne hodnota součinitele prostupu tepla

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{top} = \dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 = k_S \cdot \mathrm{L} \cdot \Delta T_{ln} \quad [W], \quad (3.24)$$

$$k_S = \frac{\dot{Q}_S}{\mathrm{L} \cdot \Delta T_{ln}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]. \quad (3.25)$$

Mezi větvemi „top“ a „V“ zkoumaného standu je střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\dfrac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{\ln\left(\dfrac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)} \quad [°C]. \quad (3.26)$$

Poslední neznámou v rovnici (3.23) je součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky. Ten lze vypočítat pomocí Nusseltova kritéria, které je definováno jako poměr přenosu tepla konvekcí a vedením **[47, s. 59]**.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \Rightarrow \alpha_i = \frac{\overline{Nu}_D \cdot \lambda}{d_1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]. \quad (3.27)$$

Při výpočtu se předpokládá, že součinitel vedení tepla je konstantní. Nusseltovo číslo je dále definováno ve **[47, s. 138]** pro různé podmínky proudění.
Za předpokladu:

1) Turbulentního plně vyvinuté proudění tzn., že Reynoldsovo číslo je

$$Re = \frac{w_i \cdot d_i}{\nu} \geq 10\,000 \quad [-], \quad (3.28)$$

2) Prandtlovo číslo je v rozmezí

$$0{,}6 \leq \left(Pr = \frac{\nu}{a}\right) \leq 160 \quad [-], \quad (3.29)$$

3) Poměr délky potrubí k jeho průměru

$$\frac{L}{d_i} \geq 10 \quad [-], \quad (3.30)$$

je střední Nusseltovo číslo

$$\overline{Nu}_D = 0{,}023 \cdot Re_D^{0,8} \cdot Pr^n \quad [-], \quad (3.31)$$

kde koeficient „n“ je pro případ ohřívání tekutiny v potrubí roven $0{,}4\,[-]$ a pro případ ochlazování tekutiny v potrubí roven $0{,}3\,[-]$.

Rychlost proudění tekutiny je vypočítána z objemového průtoku

$$\dot{\mathrm{V}}_2 = \mathrm{S_i} \cdot \mathrm{w_i} \Rightarrow \mathrm{w_i} = \frac{4 \cdot \dot{\mathrm{V}}_2}{\pi \cdot d_i} \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (3.32)$$

kinematická viskozita a Prandtlovo číslo jsou funkcí tlaku a střední teploty v uzavřené smyčce

$$Pr = f\left(p_{top}; \frac{t_3 + t_4}{2}\right) \quad [-], \quad (3.33)$$

$$\nu = f\left(p_{top}; \frac{t_3 + t_4}{2}\right) \quad [m^2 \cdot s^{-1}]. \quad (3.34)$$

3.2 Vyhodnocení naměřených dat

3.2.1 Matematický model vyhodnocení nejistoty měření

V praxi nejsou nikdy naměřeny absolutně přesné výsledky. Vždy jsou hodnoty nepřesné vlivem okolního prostředí, zvolené měřící metody či stavem měřícího zařízení. Výsledná hodnota se vždy pohybuje v jistých tolerančních mezích. Základních chyby měření jsou tři **[48]**:

1) systematická chyba – je to stálá chyba co do velikosti i znaménka a je způsobena například špatnou kalibrací měřícího zařízení. Výsledek lze proto jednoduše upravit tím, že k naměřené hodnotě se přičte či odečte korekční součinitel, který je stanoven kalibrací zařízení.
2) náhodná chyba – jedná se o zcela náhodné nepředvídatelné kolísání. Při opakovaném měření za stejných podmínek lze tuto chybu eliminovat. Reprezentativním výsledkem je pak aritmetický průměr naměřených hodnot, kde „n“ [-] označuje počet měření a „x“ [-] měřenou fyzikální veličinu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{3.35}$$

a směrodatná odchylka

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{3.36}$$

3) hrubá chyba – jedná se o zcela nevyzpytatelnou odchylku při měření, kdy naměřená hodnota neobvykle vybočí ze statistického souboru. Omezit tuto chybu lze například dodržováním měřících postupů.

V dnešní době jsou při vyhodnocování měření chyby měření nahrazovány tzv. nejistotami měření, které jsou dvě („A“ a „B“), a mohou se zjednodušeně označovat jako „nejistota typu A“ a „nejistota typu B“ **[48]**.

Nejistota typu A reprezentuje statistické vyhodnocení naměřeného souboru dat aritmetickým průměrem [rovnice (3.35)] a směrodatnou odchylkou [rovnice (3.36)]. Výsledná nejistota typu A pro obecnou fyzikální veličinu je **[49]**

$$□_{A,x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} . \tag{3.37}$$

Nejistota typu B se vyčísluje pomocí údajů měřicího přístroje (např.: jeho přesnosti), kalibračních koeficientů či křivek nebo ze zkušeností získaných z předchozích měření. Pokud není v následujícím textu vyznačeno jinak, tak pro nejistotu typu „B“ platí stejné matematické rovnice. Pak celková nejistota, která je kombinací nejistot „A“ a „B“, je kvadratickým součtem již výše zmíněných nejistot **[49]**

$$u_{C,x} = \sqrt{□_{A,x}^2 + □_{B,x}^2} . \tag{3.38}$$

Při výzkumech je většinou zkoumanou veličinou nepřímo měřená fyzikální veličina. Pak nejistota typu A (případně B, pokud není v textu vyznačeno jinak) této závislé veličiny y = f(x) se vypočítá podle následujícího vztahu **[50]**

$$u_{A,y} = \frac{dy(x)}{dx} \cdot □_{A,x} . \tag{3.39}$$

V případě, že je veličina funkcí dvou proměnných z = f(x, y), pak chyba této veličiny se stanoví jako kvadratický součet parciálních nejistot **[50]**

$$u_{A,z} = \sqrt{\left[\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \cdot u_{A,x}\right]^2 + \left[\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \cdot u_{A,y}\right]^2} . \tag{3.40}$$

3.2.2 Nejistota součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky

Naměřený statistický soubor obsahuje teploty $t_1, t_2, t_3 \; a \; t_4$ $[°C]$, objemové průtoky $\dot{V}_1$ a $\dot{V}_2$ $[l \cdot min^{-1}]$ a tlaky p_{top} a p_v [kPa]. Odvození statistické chyby resp. nejistoty typu „A“ („B“) pro součinitel přestupu tepla na vnější straně trubky musí být totožné s jejím výpočtem naznačeným v kapitole 3.1.3.

1) Nejistota rychlosti proudění tekutiny je odvozena z rovnice (3.32),

$$u_{A,w_i} = \frac{d}{d\dot{V}_2} \cdot w_i(\dot{V}_2) \cdot u_{A,\dot{V}} = \frac{4 \cdot u_{A,\dot{V}_2}}{\pi \cdot d_i} \quad [m \cdot s^{-1}]. \tag{3.41}$$

2) Nejistota Reynoldsova čísla z rovnice (3.28) a Nusseltova čísla z rovnice (3.31)

$$u_{A,Re} = \frac{d}{dw_i} \cdot R(w_i) \cdot u_{A,w_i} = \frac{u_{A,w_i} \cdot d_i}{\nu} \quad [-], \tag{3.42}$$

$$u_{A,\overline{Nu}_D} = \frac{d}{dR} \cdot \overline{Nu}_D(Re) \cdot u_{A,R} = \frac{0{,}023 \cdot 0{,}8 \cdot Pr^n \cdot u_{A,R}}{Re_D^{0,2}} \quad [-]. \tag{3.43}$$

3) Nejistota součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky

$$u_{A,\alpha_i} = \frac{d\alpha_i(\overline{Nu}_D)}{d\overline{Nu}_D} \cdot u_{A,\overline{Nu}_D} = \frac{u_{A,\overline{Nu}_D} \cdot \lambda}{d_i} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]. \tag{3.44}$$

4) Nejistota středního logaritmického teplotního spádu je složena z dílčích nejistot podle naměřených teplot

$$u_{A,\Delta T_{ln}} = \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial t_4} \cdot \Delta t_{ln}(t_4) \cdot u_{A,t_4} \right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial t_1} \cdot \Delta t_{ln}(t_1) \cdot u_{A,t_1} \right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial t_3} \cdot \Delta t_{ln}(t_3) \cdot u_{A,t_3} \right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial t_2} \cdot \Delta t_{ln}(t_2) \cdot u_{A,t_2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{A,\Delta T_{ln}} = \left\{ \left[\frac{\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right) + \left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^{-2} \cdot \frac{t_4 - t_1 - t_3 + t_2}{t_3 - t_2}}{\left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^2} \cdot u_{A,t_6} \right]^2 + \left[\frac{-\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right) - \left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^{-2} \cdot \frac{t_4 - t_1 - t_3 + t_2}{t_3 - t_2}}{\left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^2} \cdot u_{A,t_1} \right]^2 + \left[\frac{-\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right) - \left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^{-2} \cdot \frac{t_4 - t_1 - t_3 + t_2}{(t_3 - t_2)^2 \cdot (t_4 - t_1)^{-1}}}{\left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^2} \cdot u_{A,t_5} \right]^2 + \left[\frac{\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right) + \left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^{-2} \cdot \frac{t_4 - t_1 - t_3 + t_2}{(t_3 - t_2)^2 \cdot (t_4 - t_1)^{-1}}}{\left[\ln\left(\frac{t_4 - t_1}{t_3 - t_2}\right)\right]^2} \cdot u_{A,t_2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} [°C] \tag{3.45}$$

5) Nejistota tepelného toku

$$\left.\begin{aligned} u_{A,\dot{Q}_S} &= \left\{\left[\frac{\partial}{\partial \dot{V}_2}\cdot \dot{Q}_S(\dot{V}_2)\cdot u_{A,\dot{V}_2}\right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial t_3}\cdot \dot{Q}_S(t_3)\cdot u_{A,t_3}\right]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[\frac{\partial}{\partial t_4}\cdot \dot{Q}_S(t_4)\cdot u_{A,t_4}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \\ u_{A,\dot{Q}_S} &= \left\{\left[u_{A,\dot{V}_2}\cdot \rho\cdot c_p\cdot (t_3-t_4)\right]^2 + \left[\dot{V}_2\cdot \rho\cdot c_p\cdot u_{A,t_3}\right]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[\dot{V}_2\cdot \rho\cdot c_p\cdot u_{A,t_4}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad [W] \end{aligned}\right\}. \tag{3.46}$$

6) Nejistota součinitele prostupu tepla

$$\left.\begin{aligned} u_{A,k_S} &= \left\{\left[\frac{\partial}{\partial \dot{Q}_S}\cdot k_S(\dot{Q}_S)\cdot u_{A,\dot{Q}_S}\right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial \Delta T_{ln}}\cdot k_S(\Delta T_{ln})\cdot u_{A,\Delta T_{ln}}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \\ u_{A,k_S} &= \left\{\left[\frac{u_{A,\dot{Q}_S}}{L\cdot n\cdot \Delta T_{ln}}\right]^2 + \left[\frac{-\dot{Q}_S\cdot u_{A,\Delta T_{ln}}}{n\cdot L\cdot \Delta T_{ln}^2}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad [W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}] \end{aligned}\right\}, \tag{3.47}$$

pak nejistota zkoumaného součinitele přestupu tepla na vnější stěně trubky je

$$\left.\begin{aligned} u_{A,\alpha_o} &= \sqrt{\left[\frac{\partial}{\partial \Delta T_{ln}}\cdot \alpha_o(\Delta T_{ln})\cdot u_{A,\Delta T_{ln}}\right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_i}\cdot \alpha_o(\alpha_i)\cdot u_{A,\alpha_i}\right]^2} \\ u_{A,\alpha_o} &= \left\{\left[\frac{\frac{2\cdot\pi\cdot r_o}{k_S^2}\cdot u_{A,k_S}}{2\cdot\pi\cdot r_o\cdot\left[\frac{1}{k_S}-\frac{1}{2\cdot\pi\cdot\alpha_i\cdot r_i}-\frac{1}{2\cdot\pi\cdot\lambda_S}\cdot\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)\right]^2}\right]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[\frac{-\frac{r_o}{\alpha_i^2\cdot r_i}\cdot u_{A,\alpha_i}}{2\cdot\pi\cdot r_o\cdot\left[\frac{1}{k_S}-\frac{1}{2\cdot\pi\cdot\alpha_i\cdot r_i}-\frac{1}{2\cdot\pi\cdot\lambda_S}\cdot\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)\right]^2}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \\ u_{A,\alpha_o} &= [W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}] \end{aligned}\right\}. \tag{3.48}$$

Pro nejistotu typu „B“ platí stejné matematické rovnice. Pak celková chyba součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky je

$$u_{C,\alpha_o} = \sqrt{□_{A,\alpha_o}^2 + □_{B,\alpha_o}^2}\,. \tag{3.49}$$

3.3 Transformace zkoumaných veličin na bezrozměrná kritéria

Pro porovnání výsledků s jinými autory a pro vytváření obecných kriteriálních rovnic jsou nejčastěji využívána bezrozměrná kritéria. Definice, v této práci využitých bezrozměrných kritérií, jsou uvedeny v kapitole 1.1. Pro jejich vyčíslení je potřeba znát základní fyzikální vlastnosti skrápěcí kapaliny, které jsou odečteny v **[23]**, a které jsou vztaženy na střední hodnotu teploty skrápěcí kapaliny při aktuálním tlaku v komoře:

1) Hustota

$$\rho_{12} = f\left(p_V; \frac{t_1 + t_2}{2}\right) \quad [kg \cdot m^{-3}]. \tag{3.50}$$

2) Dynamická viskozita

$$\mu_{12} = f\left(p_V; \frac{t_1 + t_2}{2}\right) \quad [Pa \cdot s^{-1}]. \tag{3.51}$$

3) Kinematická viskozita

$$\vartheta_{12} = \frac{\rho_{12}}{\mu_{12}} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]. \tag{3.52}$$

4) Tepelná vodivost kapalného filmu

$$\lambda_{12} = f\left(p_V; \frac{t_1 + t_2}{2}\right) \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]. \tag{3.53}$$

5) Povrchové napětí kapalného filmu

$$\sigma_{12} = f(p_V) \quad [N \cdot m^{-1}]. \tag{3.54}$$

Z těchto hodnot vychází Prandtlovo číslo a Galileovo číslo [viz rce. (1.5) a (1.7)]

$$\mathrm{Pr} = f\left(p_V; \frac{t_1 + t_2}{2}\right) \quad [-], \tag{3.55}$$

$$Ga = \frac{\rho_{12} \cdot \sigma_{12}^3}{g \cdot \mu_{12}^4} \quad [-]. \tag{3.56}$$

Pro výpočet Reynoldsova čísla [bylo popsáno v rci. (1.4)] je nutné znát hmotnostní průtok vztažený na jednotku délky, kterou je délka skrápěné oblasti vymezená distančními plechy

$$\left.\begin{aligned} &\Gamma_1 = \frac{\dot{V}_1 \cdot \rho_{12}}{2 \cdot L} \quad [kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}], \\ &kde\ \text{„L“}\ pro \quad \begin{cases} atmosférický\ stand & L = 1\,000{,}0\ mm \\ podtlakový\ stand & L = 940{,}0\ mm \end{cases} \end{aligned}\right\}, \tag{3.57}$$

$$Re = \frac{4 \cdot \Gamma_1}{\mu_{12}} \quad [-]. \tag{3.58}$$

A na závěr. Výpočet Nusseltova čísla je definován v rovnici (1.11)

$$Nu = \alpha_o \cdot \sqrt[3]{\frac{\nu_{12}^2}{g \cdot \lambda_{12}^3}} \quad [-], \tag{3.59}$$

kde součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek je vypočítán podle rovnice (3.23) a celkovou nejistotu Nusseltova čísla lze přepočítat z nejistoty součinitele přestupu tepla na povrchu trubek, vypočítaného pomocí rovnice (3.48), resp. (3.49).

$$u_{C,Nu} = u_{C,\alpha_o} \cdot \sqrt[3]{\frac{\nu_{12}^2}{g \cdot \lambda_{12}^3}} \quad [-]. \tag{3.60}$$

Z těchto třech základních podobnostních kritérií (Nu, Pr a Re), která vystihují základní aspekty proudění, lze odvodit obecnou funkci pomocí regresní analýzy.

3.4 Dvoufázové proudění

Podmínkou pro dvoufázové proudění skrápěcí kapaliny na trubkovém svazku je, že výstupní teplota skrápěcí kapaliny za svazkem (t_2) bude alespoň rovna teplotě syté kapaliny (t_{sat}) při aktuálním tlaku v komoře

$$t_2 \geq t_{sat} = f(p_v; x = 0) \quad [°C]. \tag{3.61}$$

Pro plně vyvinuté dvoufázové proudění, tedy že k varu bude docházet za ideálních podmínek na celé ploše skrápěného výměníku, platí, že teplota skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky je rovna nebo vyšší než teplota syté kapaliny při daném tlaku v komoře

$$t_1 \geq t_{sat} = f(p_v; x = 0) \quad [°C]. \tag{3.62}$$

Množství generované páry ($\dot{M}_g$) lze stanovit na základě Zákona zachování hmotnosti, neboť platí, že součet hmotnostního průtoku páry ($\dot{M}_g$) a vody ($\dot{M}_f$) se musí rovnat celkovému hmotnostnímu průtoku skrápěcí kapaliny ($\dot{M}_1$), který je přepočítán z měřeného objemového průtoku ($\dot{V}_1$)

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_f + \dot{M}_g \quad [kg \cdot s^{-1}]. \tag{3.63}$$

Avšak v uvedené rovnici jsou dvě neznámé veličiny. Proto je třeba aplikovat Zákon zachování energie. Platí, že tepelný tok odebraný topné kapalině, který je určen v rovnici (3.7), je roven součtu tepelných toků potřebných na generování páry a ohřátí skrápěcí vody, u které nedochází k varu (odpaření)

$$\dot{Q}_{top} = \dot{Q}_g + \dot{Q}_f = \dot{M}_g \cdot (i_{IN} - i_1) + \dot{M}_f \cdot (i_2' - i_1) \quad [W], \tag{3.64}$$

kde i_{IN} je entalpie páry v komoře stanovena z její teploty měřené v horní části komory a tlaku v komoře

$$i_{IN} = f(p_V; t_{IN}) \quad [J \cdot kg^{-1}]. \tag{3.65}$$

Další veličinou v rovnici (3.64), určenou na základě naměřených dat, je i_1, což je entalpie skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky, která je funkcí teploty t_1 a tlaku v komoře v případě, že tlak sytosti odpovídající teplotě t_1 je menší než tlak v komoře. Za těchto okolností nejprve dochází k ohřevu skrápěcí kapaliny na první / prvních trubkách, dokud není teplota kapaliny stejná nebo vyšší než teplota saturace odpovídající tlaku v komoře. Pokud je teplota t_1 shodná nebo vyšší než teplota saturace odpovídající tlaku v komoře, pak je nutné uvažovat při určení entalpie s teplotou t_1 a suchostí nula, resp. se sytou kapalinou:

$$i_1 = \left\{ \begin{matrix} f(p_V; t_1) & pro\ p_1 = f(t_1; x = 0) < p_V \\ f(t_1; x = 0) & pro\ p_1 = f(t_1; x = 0) \geq p_V \end{matrix} \right\} \quad [J \cdot kg^{-1}]. \tag{3.66}$$

Poslední veličinou v rovnici (3.64), kterou lze stanovit na základě naměřených dat, je i_2', což je entalpie vody za výměníkem, u které nedošlo k odpaření, ale maximálně k ohřátí. Proto je funkcí teploty t_2, která je v případě dvoufázového proudění stejná nebo vyšší než teplota saturace odpovídající aktuálnímu tlaku v komoře, proto je uvažována entalpie syté kapaliny

$$i_2' = f(t_2; x = 0) \quad [J \cdot kg^{-1}]. \tag{3.67}$$

Vyjádřením hmotnostního průtoku vody ($\dot{M}_f$) z rovnice (3.63) a jeho dosazením do rovnice (3.64) lze získat, resp. vyjádřit rovnici pro výpočet hmotnostního průtoku páry ($\dot{M}_g$). Vyjádřením hmotnostního průtoku páry z rovnice (3.63) a jeho dosazením do rovnice (3.64) je získána rovnice pro hmotnostní průtok vody

$$\dot{M}_g = \frac{\dot{Q}_{top} - \dot{M}_1 \cdot (i_2' - i_1)}{(i_{IN} - i_2')} \quad [kg \cdot s^{-1}], \tag{3.68}$$

$$\dot{M}_f = \frac{\dot{Q}_{top} - \dot{M}_1 \cdot (i_{IN} - i_1)}{(i_2' - i_{IN})} \quad [kg \cdot s^{-1}]. \tag{3.69}$$

Z poměru hmotnostního průtoku parní fáze k celkovému hmotnostnímu průtoku je možné určit suchost páry (x)

$$x = \frac{\dot{M}_g}{\dot{M}_f + \dot{M}_g} = \frac{\dot{M}_g \cdot L}{\Gamma_1} \quad [-]. \tag{3.70}$$

Součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěných trubek pro parní fázi ($\alpha_{o,g}$) lze určit na základě Newtonova zákona přestupu tepla definovaného obecně v rovnici (1.10), resp. pro případ vnějšího povrchu stěny trubky je podle obr. 20 tepelný tok při přestupu tepla definován v rovnici (1.17). Tento tepelný tok je zároveň roven tepelnému toku potřebnému k varu vody, resp. k jejímu odpaření

$$\dot{Q}_g = S \cdot \alpha_{o,g} \cdot (t_{So} - t_o) = \dot{M}_g \cdot (i_{IN} - i_1) \quad [W]. \tag{3.71}$$

V této rovnici je uvažováno u teploty t_1 s tím, že je blízko teploty saturace při aktuálním tlaku v komoře, resp. vliv na chybu při určení entalpie i_1 je marginální.

V rovnici (3.71) je při výpočtu uvažováno s teplotou stěny trubky (t_{So}). Vzhledem k tomu, že cílem je stanovit střední hodnotu součinitele přestupu tepla, je uvažováno se střední hodnotou teploty tepla dodaného, resp. je vypočítána průměrná hodnota z teploty topné vody vstupující do výměníku a z teploty vystupující z výměníku:

$$\mathrm{t_{So}} = \frac{t_3 + t_4}{2} \quad [°C]. \tag{3.72}$$

Obdobně je postupováno se střední teplotou kapaliny / páry (t_o), resp. je vypočítána průměrná teplota z teploty vody na výstupu z distribuční trubky a teploty páry měřené nad výměníkem

$$\mathrm{t_o} = \frac{t_{IN} + t_1}{2} \quad [°C]. \tag{3.73}$$

Výsledný vztah pro součinitel přestupu tepla na povrchu trubek pro páru je vyjádřen z rovnice (3.71)

$$\alpha_{o,g} = \frac{\dot{M}_g \cdot (i_{IN} - i_1)}{S \cdot \left(\frac{t_3 + t_4}{2} - \frac{t_{IN} + t_1}{2}\right)} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \tag{3.74}$$

kde S značí povrch skrápěného trubkového svazku, která se vypočítá

$$S = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot n \quad [m^2], \tag{3.75}$$

kde n $[-]$ značí počet trubek ve svazku.

Při přechodných stavech je pro porovnání důležité vědět, kde přibližně na horizontálním svazku začíná vřít kapalina, resp. kde je teplota skrápěcí kapaliny na hranici sytosti. Vzhledem k přibližně lineárnímu průběhu ohřevu skrápěcí kapaliny, který je patrný v kapitole „5.2 Teplotní pole na povrchu skrápěného svazku“ například na obr. 30, je možné použít lineární interpolaci

$$\frac{t_{sat}(p_v) - t_1}{t_2 - t_1} = \frac{n - n_{sat}}{n - 0} \quad [-], \tag{3.76}$$

ze které lze odvodit, na které části trubky je hranice varu (ve směru proudění skrápěcí kapaliny), resp. na kolika procentech svazku dochází k varu (uvažováno proti směru proudění skrápěcí kapaliny a bez mezer mezi trubkami)

$$n_{sat} = n - n \cdot \frac{t_{sat}(p_v) - t_1}{t_2 - t_1} \quad [-], \tag{3.77}$$

$$S_{sat} = \frac{t_{sat}(p_v) - t_1}{t_2 - t_1} \cdot 100 \quad [\%]. \tag{3.78}$$

Vzhledem k tomu, že součinitel přestupu tepla na povrchu svazku je jak pro případ kapalné fáze (α_o), který byl stanoven v rovnici (3.23), tak i pro případ parní fáze ($\alpha_{o,g}$), který byl stanoven rovnicí (3.74), odvozen mimo jiné z celkové tepelné a hmotové bilance svazku, lze na základě principu superpozice tyto dva součinitele sečíst, čímž vznikne celkový součinitel přestupu tepla na povrchu svazku pro dvoufázové proudění, jež je zároveň střední hodnotou dané geometrie a povrchu svazku

$$\alpha_{o,t} = \alpha_o + \alpha_{o,g} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]. \tag{3.79}$$

4 PŘÍPRAVA A NASTAVENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH ZAŘÍZENÍ

Před vlastním měřením byla provedena příprava experimentálního zařízení, které se skládá ze třech základních částí. A to přípravy zdroje tepla (plynového kotle), přípravy zdroje chladu (chladící agregát) a příprava vlastního experimentálního zařízení.

4.1 Postup měření u podtlakového standu

Pro získání experimentálních výsledků bylo nutné dodržet následující postup

1) Byl nastaven požadovaný průtok u topné smyčky pomocí šoupěte na výtlačné straně čerpadla. Průtok bylo možné regulovat také pomocí kulového kohoutu umístěného na obtoku čerpadla.
2) Byl spuštěn plynový kotel a nastaven výkon (1 - 9), podle požadované teploty t_3. Výkon kotle bylo možné také regulovat:
    a. trojcestným ventilem umístěným na základní smyčce kotle a část výkonu kotle mařit v dochlazovacím výměníku, který je zapojen v základním okruhu kotle a který je napojen na centrální rozvod chladící vody),
    b. škrcením přítoku topné vody před výměníkem ohřívané topné smyčky.
3) Byl spuštěn chladící agregát a nastaven výkon podle požadované teploty t_1. Vzhledem k tomu, že se přímo neochlazovala voda cirkulující v podtlakovém standu, ale pitná voda, bylo možné chladící výkon regulovat i průtokem pitné vody proudící do chladícího agregátu.
4) Byl otevřen pájený ventil na potrubí spojující vodokružnou vývěvu (ejektor) s podtlakovou komorou, spuštěna vývěva a otevřen ventil s přívodem vody do vývěvy.
5) Po dosažení požadovaného podtlaku byl zavřen pájený ventil, vypnuta vývěva a uzavřen přívod vody do vývěvy. Při experimentech byla také využívána možnost trvalého odsávání plynného obsahu nádoby. Nižšího relativního podtlaku bylo dosaženo zahlcováním vývěvy (ejektoru) okolním vzduchem skrze ventil, který je napojen na potrubí spojující nádobu a ejektor.
6) Po ustálení regulovaných teplot, tlaku v komoře a průtoků bylo spuštěno zaznamenávání v měřícím program vytvořeném v LabView.

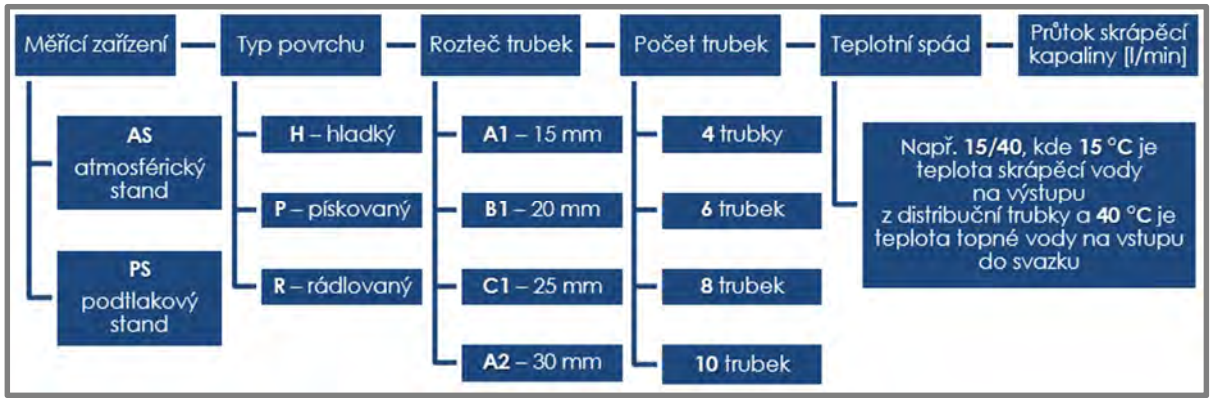
4.2 Příprava a postup měření u atmosférického standu

Pro získání experimentálních výsledků bylo nutné dodržet následující postup:

1) Podle zvolené geometrie byly umístěny trubky do distančních plechů a spojeny pomocí hadic ze silikonové pryže a měděných tvarovek. Při tom byly vhodně umístěny měděné tvarovky s pomocnými měřícími termočlánky ve smyčce.
2) Byl otevřen přívod pitné vody k experimentálním standům a byla otestována těsnost spojů topné smyčky.
3) Byl otevřen přívod a odvod centrální chladící vody.
7) Byl spuštěn plynový kotel a nastaven výkon (1 - 9), podle požadované teploty t_3. Výkon kotle bylo možné také regulovat:
    a. trojcestným ventilem umístěným na základní smyčce kotle a část výkonu kotle mařit v dochlazovacím výměníku, který je zapojen v základním okruhu kotle a který je napojen na centrální rozvod chladící vody),
    b. škrcením přítoku topné vody před výměníkem ohřívané topné smyčky.
4) Směšováním teplé a studené vody byly nastaveny teploty a průtoky skrápěcí kapaliny (t_1 a $\dot{V}_1$) a zároveň topné kapaliny (t_3 a $\dot{V}_2$).
5) Po ustálení regulovaných teplot a průtoků bylo spuštěno zaznamenávání v měřícím program vytvořeném v LabView.

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ U ATMOSFÉRICKÉHO STANDU

Vzhledem k velkému množství provedených experimentů bylo pro tuto práci zvoleno jednotné značení výsledků, uvedených hlavně u obrázků, aby byly jasně identifikovatelné.



Obr. 21 Schéma značení jednotlivý experimentálních výsledků

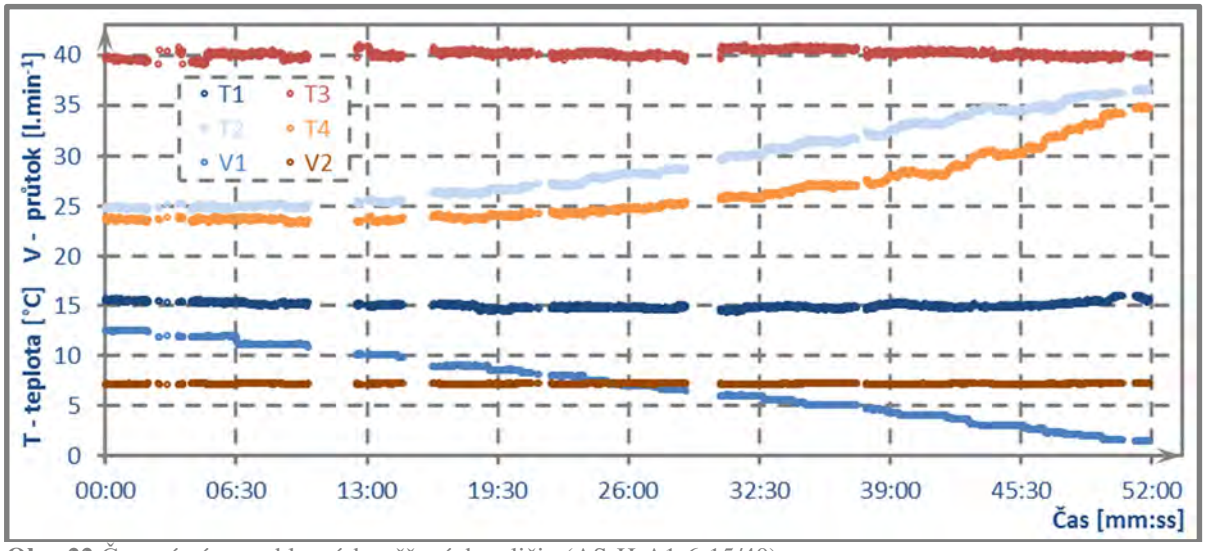
Na obr. 21 je schéma struktury jednotlivých možností značení. Tučně uvedené znaky jsou použity v označení, jako například AS-H-C1-6-15/40-5,0. Na první pozici je název měřícího zařízení, na kterém byl experiment prováděn. Na druhé pozici je typ povrchu svazku, přičemž svazek je po celou dobu uvedeného experimentu složen z trubek o stejném (uvedeném) typu povrchu. Na třetí pozici je uvedena rozteč trubek trubkového svazku a na páté pozici počet trubek ve svazku. Na předposlední pozici je uveden teplotní spád, kde první číslo udává teplotu skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky a druhé číslo udává teplotu topné kapaliny na vstupu do svazku. Na poslední pozici je uveden průtok skrápěcí kapaliny. V případě, že jedna z pozic není uvedena, pak jsou výsledky experimentů uvedeny v rozsahu uvedeném v textu.

Vlastnosti kapalné a parní fáze vody pro výpočet odvozených veličin jsou brány z parních tabulek X-Steam **[23]**, které jsou naprogramovány v prostředí Microsoft Visual Basic for Applications a jsou součástí výpočtového sešitu Microsoft Excel, ve kterém je výpočet prováděn.

5.1 Součinitel přestupu tepla na povrchu svazku

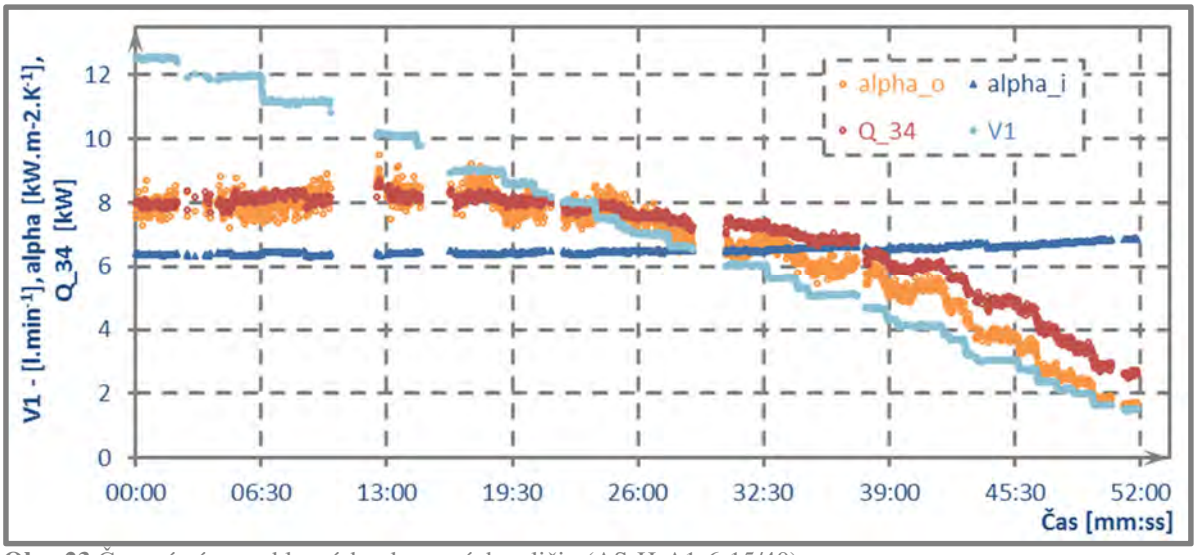
Pro odvození zkoumaného součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěných svazků jsou hlavními měřenými veličinami u experimentů na atmosférickém standu teploty topné vody vstupující (T3) a vystupující (T4) z výměníku, průtok topné vody (V2), teplota skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky (T1), teplota skrápěcí kapaliny za poslední trubkou výměníku (T2) a průtok skrápěcí kapaliny (V1). Přípustný rozsah regulovaných teplot (T1 a T3) po dobu experimentu je $\pm 1{,}0\ °C$ okolo zvolené teploty (15 °C a 40 °C) a přípustný rozsah objemového průtoku kapaliny po dobu experimentu je $\pm 0{,}1\ l \cdot min^{-1}$ pro zvolený stabilní průtok (V2). Pro ukázku postupu měření a následného odvezení zkoumaného součinitele přestupu tepla byl vybrán experiment, který byl prováděn na atmosférickém standu. Trubkový svazek byl složen z šesti hladkých trubek s roztečí trubek $15{,}0\ mm$ (A1). Tj. označení experimentu je AS-H-A1-6-15/40. Experiment trval $52\ minut$ a $56\ sekund$ a obsahuje $1\,891\ hodnot$ každé měřené veličiny. Časový záznam hlavních měřených veličin je uveden na obr. 22. Teplota topné vody na vstupu do výměníku a zároveň její průtok je regulován směšováním teplé vody, které bylo dodáno teplo plynovým kotlem, a studené vody, která byla přímo brána z vodovodního řadu. Průměrná hodnota teploty topné vody vstupující do výměníku po celou dobu experimentu byla $t_3 = 40{,}1 \pm 0{,}3\ °C$ a její průměrný průtok $\dot{V}_2 = 7{,}21 \pm 0{,}05\ l \cdot min^{-1}$. Průměrné teploty skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky a zároveň velikosti jejího průtoku bylo také docíleno směšování teplé a studené vody. Průměrná teplota po dobu experimentu byla $t_1 = 15{,}0 \pm 0{,}3\ °C$. Průtok skrápěcí kapaliny

na začátku experimentu byl $\dot{V}_1 = 12{,}6\ l \cdot min^{-1}$ a byl postupně pomalu snižován s prodlevami u vybraných hodnot průtoků až po nejmenší testovaný průtok $\dot{V}_1 = 1{,}5\ l \cdot min^{-1}$. Mezery u záznamu hodnot mezi vynesenými body na obr. 22 jsou způsobeny vynecháním bodů v čase, kdy jedna z regulovaných veličin nebyla v přípustném rozsahu, který je uveden výše. Jako například teplota topné vody v rozsahu $40{,}0 \pm 1{,}0\ °C$.



Obr. 22 Časový záznam hlavních měřených veličin (AS-H-A1-6-15/40)

Součinitel přestupu tepla na vnější stěně trubky, pro případ, kdy na teplosměnném povrchu nedochází k varu topné ani skrápěcí kapaliny, je odvozen v kapitole 3.1.3 Výpočet přestupu tepla na vnější straně trubky. Nejprve byl podle rovnice (3.27) stanoven střední součinitel přestupu tepla na vnitřní stěně trubky (α_o), který je vztažený ke střední hodnotě vstupní a výstupní teploty topné kapaliny. Poté byl vypočítán odebraný tepelný tok topné kapalině ($\dot{Q}_s = \dot{Q}_{34}$) z rozdílu tepelného toku topné kapaliny vstupující a vystupující ze svazku. Z odebraného tepelného toku a logaritmického teplotního spádu (ΔT_{ln}), který byl vypočítán podle rovnice (3.26), byl stanoven součinitel prostupu tepla (k_s), který byl poslední neznámou odvozovanou veličinou v rovnici (3.23), na základě které byl vypočítán zkoumaný součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného svazku (α_i). Vzhledem k tomu, že v rovnicích byly využívány stavy médií vstupující a vystupující z výměníku, je vypočítaný součinitel střední hodnotou pro danou geometrii svazku.

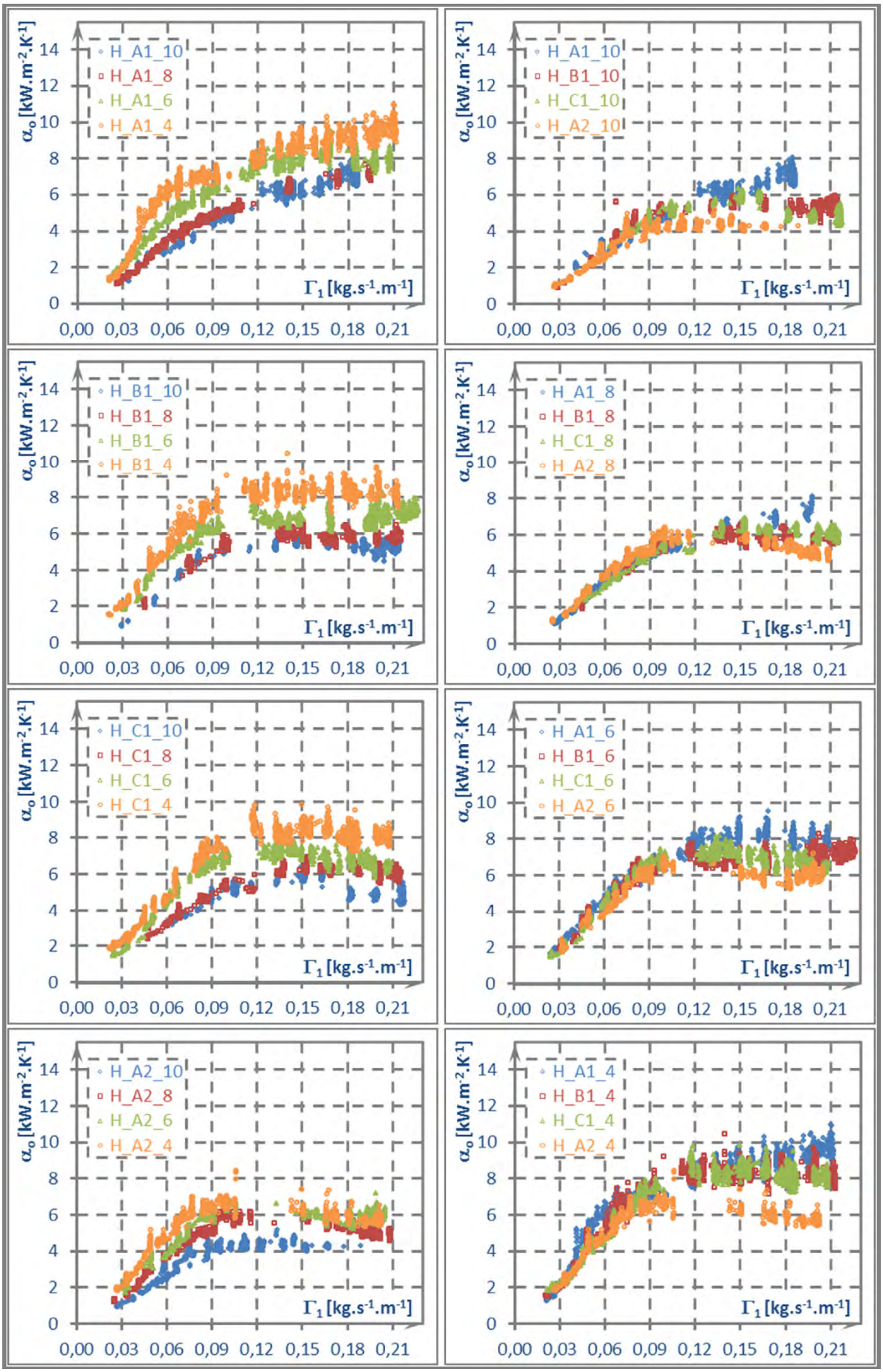


Obr. 23 Časový záznam hlavních odvozených veličin (AS-H-A1-6-15/40)

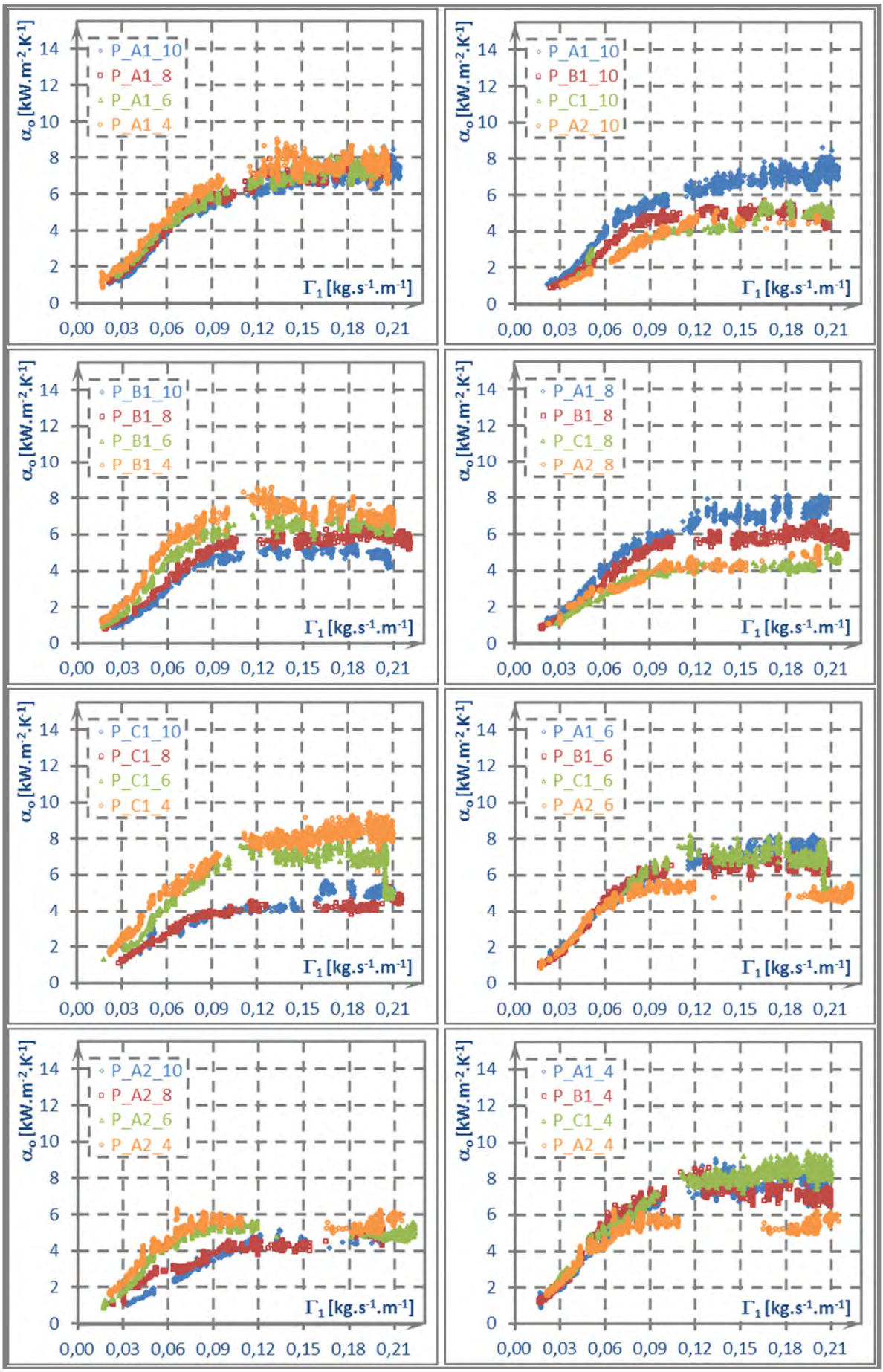
Na obr. 23 jsou vyneseny společně s průtokem skrápěcí kapaliny hlavní odvozené veličiny. Jako první je součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu trubkového svazku (alpha_i), který je na počátku měření, kdy je průtok skrápěcí kapaliny nejvyšší, na úrovni cca $6\,375{,}6 \pm 12{,}1\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. S klesajícím průtokem skrápěcí kapaliny stoupá teplota topné vody na výstupu ze svazku, resp. klesá tepelný tok odebraný topné kapalině, který je v grafu označen červenými body „Q_34“. V závislosti na vzrůstající střední teplotě topné kapaliny relativně mírně s přibližně lineárním charakterem stoupá i součinitel přestupu tepla na vnitřní stěně svazku, který dosahuje při nejnižším měřeném průtoku skrápěcí kapaliny hodnot cca $6\,850{,}5 \pm 18{,}1\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Poslední a hlavní zkoumanou veličinou na obrázku je součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku (alpha_o). Na začátku experimentu, kdy byl průtok skrápěcí kapaliny nejvyšší, byla průměrná hodnota součinitele na úrovni cca $7\,875{,}6 \pm 219{,}1\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Oproti hodnotám součinitele na vnitřní stěně svazku je rozptyl hodnot součinitele na vnějším povrchu při daném průtoku vyšší. Je to důsledkem citlivosti hlavně na měřené teploty skrápěcí kapaliny, které vstupují do výpočtu společně s teplotami topné vody při odvození logaritmického teplotního spádu. Průběh součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku přibližně kopíruje trend tepelného příkonu, resp. tepelného toku odebraného topné kapalině. U tohoto experimentu mimo průběhu kopíruje součinitel i hodnoty, i když mají jinou fyzikální podstatu. Po průtok skrápěcí kapaliny cca $7{,}4\ l \cdot min^{-1}$ má průběh součinitele přibližně lineární charakter a průměrná hodnota je $7\,996{,}1 \pm 360{,}8\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a při další snižování průtoku skrápěcí kapaliny začíná klesat i součinitel přestupu tepla, přičemž směrnice poklesu má vzrůstající charakter s klesajícím průtokem. Při nejnižším průtoku skrápěcí kapaliny je i nejnižší hodnota součinitele a to cca $1\,722{,}5 \pm 105{,}8\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

U jednotlivých bodů součinitele přestupu tepla na povrchu svazku byla vypočítána také jejich nejistota typu B. Postup výpočtu je uveden v kapitole 3.2.2 a je totožný s postupem výpočtu nejistoty typu A, která není v této části řešena. U uvedeného experimentu je průměrná nejistota společně s její směrodatnou odchylkou u součinitele přestupu tepla na vnitřní stěně trubkového svazku $0{,}28 \pm 0{,}01\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, u logaritmického teplotního spádu $6{,}5 \pm 2{,}4\ °C$, přičemž nejvyšších hodnot bylo dosahováno kolem průtoku skrápěcí kapaliny cca $6{,}5\ l \cdot min^{-1}$, kde jsou si rozdíly teplot $(t_4 - t_1)$ a $(t_3 - t_2)$ velmi blízké. Hodnoty nejistoty jsou v těchto místech u několika bodů až cca $14{,}4\ °C$. Průměrná nejistota u tepelného příkonu je $528{,}5 \pm 34{,}9\ W$ a výsledná nejistota součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěného svazku je $89{,}7 \pm 36{,}8\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. U jednotlivých řešených bodů je dopočítána relativní nejistota typu B součinitele přestupu tepla na povrchu svazku vztažením absolutní nejistoty daného bodu k jeho celkové hodnotě součinitele. U daného řešeného souboru hodnot je průměrná relativní nejistota součinitele přestupu tepla na povrchu svazku $(3{,}3 \pm 3{,}1)\%$.

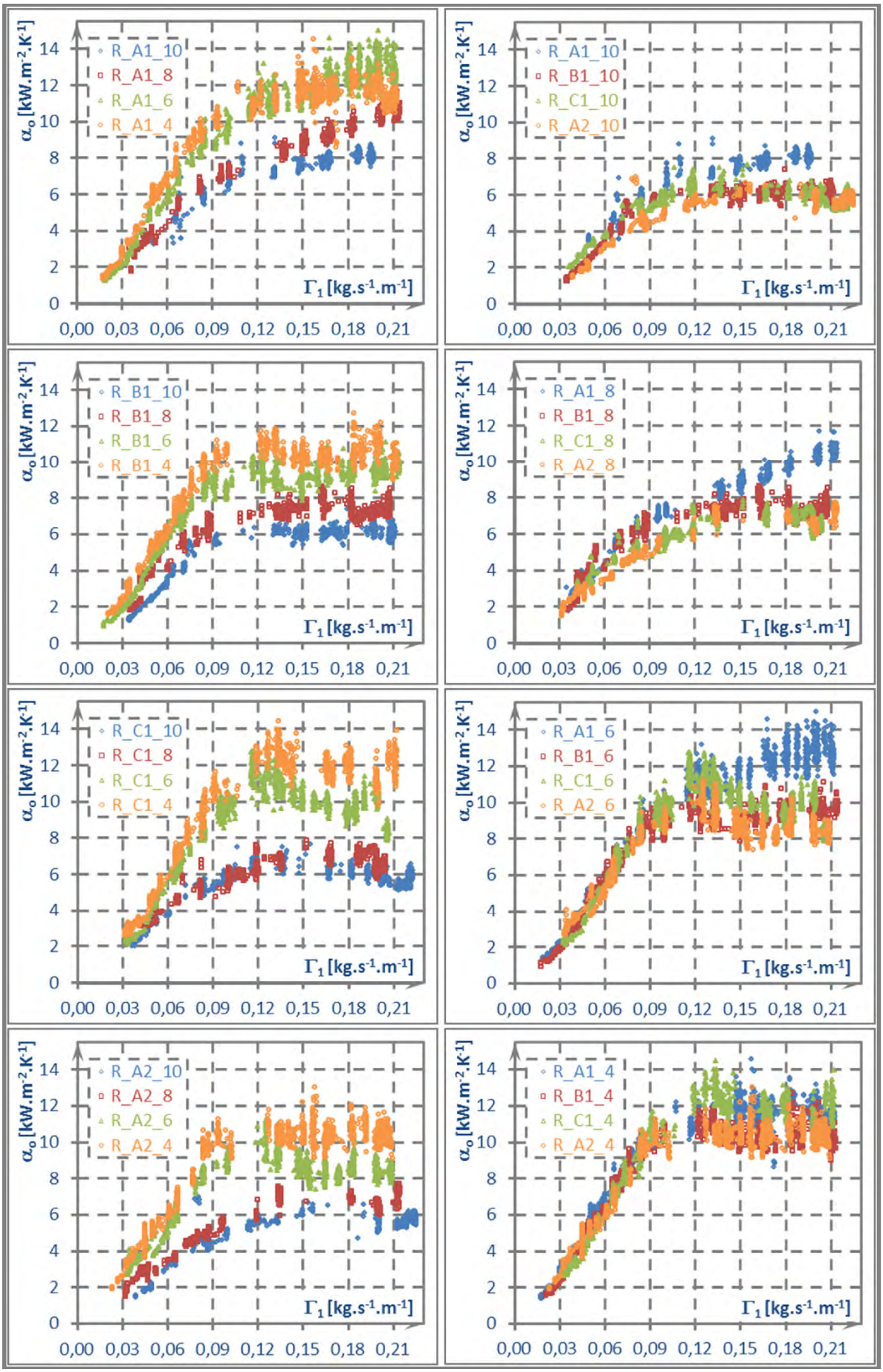
Na obr. 24 až obr. 26 jsou pro jednotlivé typy povrchů vyneseny průběhy součinitele přestupu tepla v závislosti na hmotnostním průtoku skrápěcí kapaliny vztaženého na délku skrápěné zóny, který byl vypočítán podle rovnice (3.57) z objemového průtoku skrápěcí kapaliny a jejich fyzikálních parametrů vztažených ke střední hodnotě teploty skrápěcí kapaliny. V Příloze I v tab. p. 1 jsou shrnuty pro jednotlivé geometrie průměrné hodnoty regulovaných veličin. Na obr. 24 jsou výsledky hladkého trubkového svazku. Výsledky jsou vyneseny do osmi grafů, které jsou ve dvou sloupcích. V levém sloupci jsou hodnoty vyneseny zvlášť pro jednotlivé typy roztečí (čtyři grafy) a v pravém sloupci jsou vyneseny hodnoty podle počtu trubek ve svazku (také čtyři grafy). Na obr. 25 jsou vyneseny výsledky pro pískovaný trubkový svazek a na obr. 26 pro rádlovaný trubkový svazek.



Obr. 24 Součinitel přestupu tepla na hladkém trubkovém svazku (AS-H-15/40)



Obr. 25 Součinitel přestupu tepla na pískovaném trubkovém svazku (AS-P-15/40)

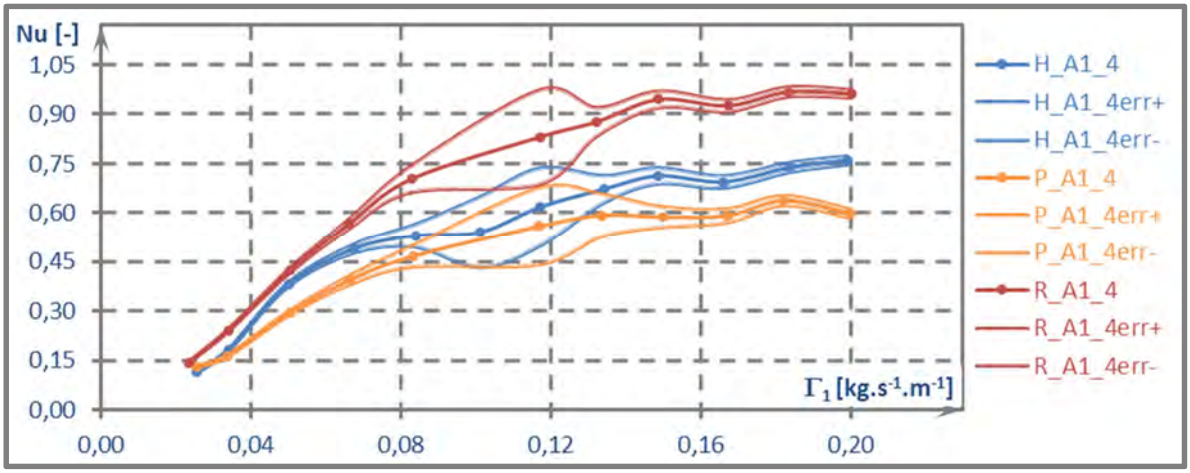


Obr. 26 Součinitel přestupu tepla na rádlovaném trubkovém svazku (AS-R-15/40)

Pozn.: V rámci bakalářské práce „Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku“ **[51]** byly provedeny některé experimenty uvedené v této práci na desetitrubkovém svazku s hladkým, pískovaným a rádlovaným povrchem.

Průměrná relativní nejistota typu B společně s její směrodatnou odchylkou jednotlivých geometrií je uvedena v Příloze III. v tab. p. 11 u Nusseltova čísla, které je odvozeno ze součinitele přestupu tepla a fyzikálních parametrů skrápěcí kapaliny podle rovnice (3.59). Absolutní nejistota Nusseltova čísla je vypočítána stejným způsobem z absolutní nejistoty součinitele přestupu tepla, a proto jsou nejistoty v relativním tvaru totožné u obou dvou uvedených veličin ať již dílčích hodnot nebo průměrné výše.

Pro kvantifikaci rozdílů součinitele přestupu tepla na vnějším povrchu svazku (Nusseltova čísla) mezi různými povrchy a geometriemi trubkového svazku byly vybrány pouze hodnoty součinitele přestupu tepla z dílčích experimentů při průtoku 1,5, 2,0 až 13,0 po 1,0 a 13,5 $l \cdot min^{-1}$. Při dílčích průtocích byly vypočítány průměrné hodnoty Nusseltova čísla. Na obr. 27 jsou vyneseny průměrné hodnoty Nusseltova čísla při zvolených průtocích, které jsou v tomto případě přepočítány na hmotnostní průtok skrápěcí kapaliny vztažený na délku skrápěné zóny. Hodnoty byly stanoveny u čtyřtrubkových svazků s roztečí trubek A1. Průměrné hodnoty hladkého svazku jsou označeny „H_A1_4“, pískovaného svazku „P_A1_4“ a rádlovaného svazku „R_A1_4“.



Obr. 27 Porovnání výsledku Nusseltova čísla u čtyřtrubkového svazku s roztečí A1 (AS-H/P/R-A1-15/40)

Na obr. 27 jsou mimo průměrných hodnot vyznačena také chybová pásma (pásma nejistot), ve kterých se průměrné hodnoty pohybují a která jsou symetrická u každé průměrné hodnoty. Horní pásmo je označeno „err+“ a dolní pásmo „err-“. Vzhledem k tomu, že průměrné hodnoty byly počítány z více dílčích hodnot (u svazků H-A1 je průměrně cca 64 $hodnot$ u jednotlivých zvolených průtoků), byla podle kapitoly 3.2.2 spočítána nejistota typu A a chybové pásmo reprezentuje součet směrodatné odchylky průměrné hodnoty a celkové nejistoty typu C, která byla stanovena podle rovnice (3.38). Z grafu jsou patrné největší odchylky kolem hmotnostního průtoku cca $0{,}11\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$, které jsou způsobeny blízkostí rozdílů teplot $(t_4 - t_1)$ a $(t_3 - t_2)$ v logaritmickém teplotním spádu.

Na obr. 27 je možné, při porovnání jednotlivých průběhů mezi sebou, pozorovat tři stavy. První stav je ten, kdy při stejném průtoku skrápěcí kapaliny neleží průměrná hodnota v chybovém pásmu jiné průměrné hodnoty a zároveň se ani chybová pásma dvou průměrných hodnot nepřekrývají. Druhý stav je ten, kdy se chybová pásma dvou průměrných hodnot překrývají. Třetí stav je ten, kdy leží průměrná hodnota v chybovém pásmu druhé průměrné hodnoty. Pro přehlednost byly vytvořeny porovnávací tabulky, které jsou v Příloze I na stranách 127 až 134. Na prvních čtyřech stranách (v prvních čtyřech tabulkách) jsou porovnány průběhy v závislosti na počtu trubek a v dalších čtyřech tabulkách (na dalších čtyřech stránkách) jsou porovnány průběhy v závislosti na rozteči trubkových svazků. Pro ilustraci principu porovnání

je uvedena následující tab. 7, kde jsou porovnány průměrné hodnoty čtyřtrubkového svazku s roztečí A1, jež jsou také uvedeny na obr. 27. V prvním sloupci tabulky je uveden průměrný průtok skrápěcí kapaliny s jeho směrodatnou odchylkou, který byl vypočítán z dílčích průtoků souboru hodnot uvedených v řádku. U průtoku $0{,}101\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ je známa pouze hodnota u hladkého trubkového svazku. A proto jsou ostatní buňky v řádku prázdné a hodnoty Nusseltova čísla (součinitele přestupu tepla vně svazku) mezi sebou nejsou porovnány. Zbytek tabulky je vertikálně rozdělen na třetiny. V první třetině jsou v jednotlivých řádcích porovnány (poděleny) hodnoty Nusseltova čísla pískovaného (rádlovaného) svazku hodnotami Nusseltova čísla hladkého svazku. Ve druhé třetině tabulky jsou vztažné hodnoty pískovaného svazku a v poslední třetině jsou vztažné hodnoty rádlovaného svazku. Při vynásobení hodnoty stem je vyjádřeno procentuálně, o kolik procent vyšší (nižší) je daná hodnota vůči základní hodnotě, kterou bylo děleno, při daném průtoku skrápěcí kapaliny. V případě vyšší hodnoty je kladné číslo černou barvou a v případě hodnoty nižší je záporná hodnota červenou barvou.

Tab. 7 Porovnání výsledku Nusseltova čísla u čtyřtrubkového svazku s roztečí A1 (AS-H/P/R-A1-15/40)

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		A1				A1				A1		
		H_4	P_4	R_4		H_4	P_4	R_4		H_4	P_4	R_4
0,025 ± 0,0010	H_4	0,000	0,156	0,274	P_4	-0,135	0,000	0,102	R_4	-0,215	-0,093	0,000
0,034 ± 0,0002		0,000	-0,119	0,317		0,135	0,000	0,494		-0,240	-0,331	0,000
0,050 ± 0,0002		0,000	-0,236	0,104		0,309	0,000	0,446		-0,094	-0,308	0,000
0,067 ± 0,0006		0,000	-0,207	0,151		0,261	0,000	0,451		-0,131	-0,311	0,000
0,083 ± 0,0004		0,000	-0,125	0,331		0,143	0,000	0,521		-0,249	-0,342	0,000
0,101 ± 0,0000		0,000										
0,117 ± 0,0002		0,000	-0,102	0,348		0,114	0,000	0,502		-0,258	-0,334	0,000
0,133 ± 0,0008		0,000	-0,120	0,306		0,136	0,000	0,483		-0,234	-0,326	0,000
0,149 ± 0,0006		0,000	-0,167	0,318		0,200	0,000	0,581		-0,241	-0,368	0,000
0,167 ± 0,0005		0,000	-0,136	0,332		0,157	0,000	0,542		-0,249	-0,351	0,000
0,183 ± 0,0006		0,000	-0,120	0,331		0,136	0,000	0,512		-0,249	-0,339	0,000
0,200 ± 0,0005		0,000	-0,202	0,281		0,254	0,000	0,606		-0,219	-0,377	0,000

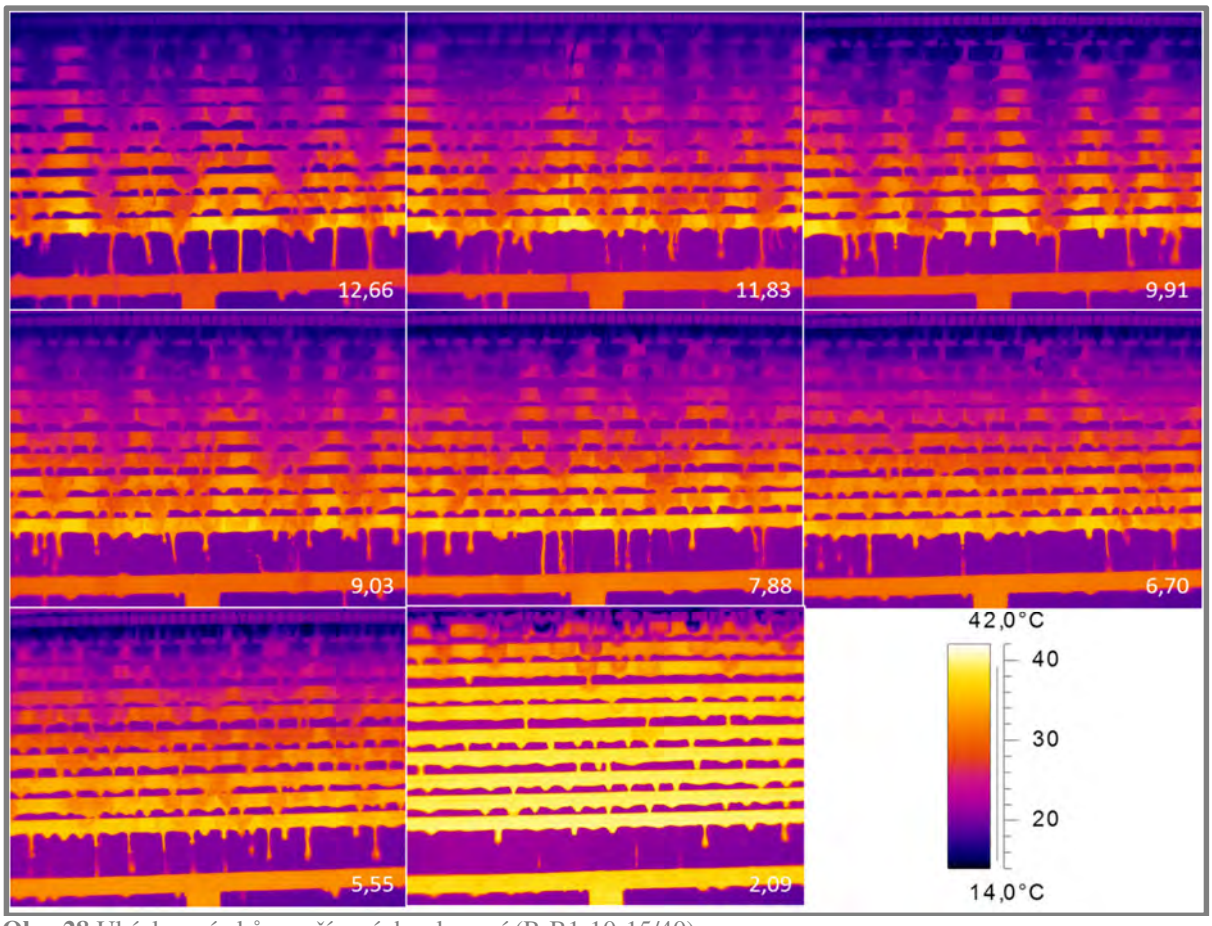
V tabulce jsou také jednotlivé hodnoty podkresleny třemi různými barvami. Zelená barva je využita v případě, kde průměrná hodnota Nusseltova čísla neleží v chybovém pásmu porovnávané průměrné hodnoty a nepřekrývají se ani chybová pásma. Oranžovou barvou jsou vyznačeny případy, kde se překrývají chybová pásma porovnávaných hodnot, a červenou barvou je vyznačen případ, kde jedna (nebo obě) průměrná hodnota leží v chybovém pásmu druhé průměrné hodnoty.

5.2 Teplotní pole na povrchu skrápěného svazku

V průběhu experimentů na atmosférickém standu, jejichž cílem bylo stanovit součinitel přestupu tepla na skrápěném trubkovém svazku, byly pořizovány sekvence snímků infračervenou kamerou. Všechny sekvence byly pořizovány termovizní kamerou FLIR SC 660, na které byl umístěn objektiv se zorným polem $45° \times 34° \,/\, 0{,}2\ m$. Při této konfiguraci má kamera rozlišení $640 \times 480\ pixelů$ s přesností $\pm\ 1{,}0\ °C$ nebo v případě omezení zkoumaného rozsahu $\pm 1{,}0\ \%$ z rozsahu. Což v případě atmosférického standu, kde byl testován teplotní gradient 15/40°C a rozsahu teplot na snímku $14{,}0\ °C$ až $42{,}0\ °C$ odpovídá chybě $\pm\ 0{,}28\ °C$.

Při zvolených ustálených stavech skrápěcí a topné kapaliny byl pořízen záznam (sekvence snímků) při sekvenci snímání $30\ Hz$ po dobu $6\ s$. Tj. daná sekvence obsahuje $181\ snímků$. Kamera daný záznam ukládá buď na svou paměťovou kartu, anebo v případě propojení kamery s počítačem přes sériovou sběrnici FireWire do počítače pomocí programu ThermaCAM Researcher Pro 2.10 ve formátu *.irs. Ve zmíněném softwaru byly všechny sekvence korigovány podle měřené teploty skrápěcí kapaliny a dalších měřených bodů. Dále bylo přiřazeno rozmezí teplot na snímku $14{,}0\ °C$ až $42{,}0\ °C$ a jednotlivé snímky dané sekvence byly uloženy do grafického formátu *.png pro další zpracování.

Na obr. 28 je ukázka snímků, které byly vybrané z jednotlivých sekvencí pořizovaných na trubkovém svazku skládajícího se z deseti rádlovaných trubek s roztečí trubek $20\ mm$ (B1). V dolním rohu každého snímku je bílou barvou vyznačen aktuální objemový průtok skrápěcí kapaliny, který je uveden v litrech za minutu. Všechny snímky mají stejnou barevnou škálu teplot, která je uvedena v dolním pravém rohu obrázku.

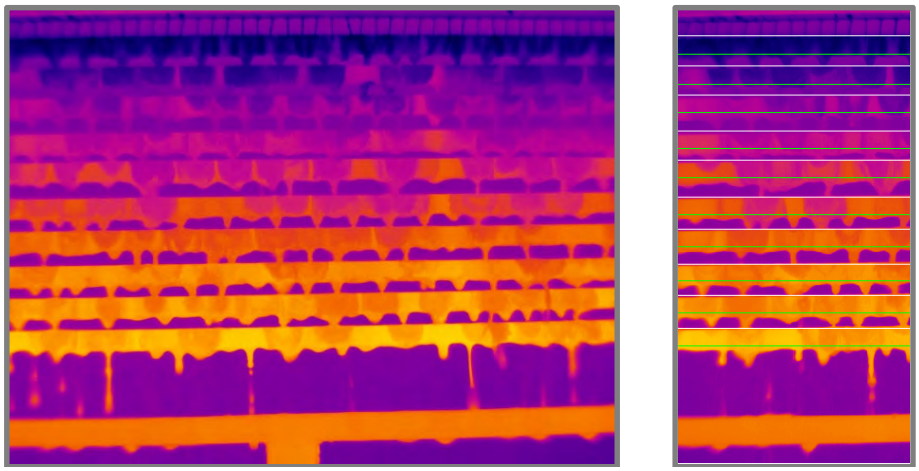


Obr. 28 Ukázky snímků z pořízených sekvencí (R-B1-10-15/40)

U horní hrany každého snímku jsou patrné pramínky skrápěcí kapaliny, která vytéká z distribuční trubky. Na první trubce se skrápěcí kapalina rozlévá a poté stéká ve vlnách plynule dolů na další trubku. V dolní části každého obrázku je vidět sběrný žlábek skrápěcí kapaliny,

který ji odvádí k měřícímu termočlánku. Při pohledu na jednotlivé snímky lze pozorovat chování kapaliny při různých průtocích. Při vysokém průtoku je skrápěcí kapalina sice na první trubce relativně rovnoměrně rozložena, ale na dalších trubkách má kapalina tendence využívat pouze část trubkového svazku a proudí v pramenech, které se na posledních řadách spojují. Díky tomu je v těchto místech kapalný film resp. mezní vrstva vysoká. Přestože kapalina proudí v pramenech, zbylá místa nejsou suchá a je na nich tenký kapalný film. V rozmezí průtoku skrápěcí kapaliny cca 5,0 až 8,0 $l \cdot min^{-1}$ je již kapalina rovnoměrně rozložená po celém povrchu svazku. Při další snižování průtoku skrápěcí kapaliny je z obrázku patrné, že k reálnému ohřevu dochází pouze na třetí až čtvrté řadě a další řady jsou již nadbytečné, resp. kapalina již jen rovnoměrně stéká a nedochází k jejímu ohřevu. Přesto se na svazku při nejnižším průtoku nevyskytla suchá místa.

Aby bylo možné jednotlivé sekvence mezi sebou porovnat, byl vytvořen v rámci bakalářské práce „Termovizní měření“ **[52]** základní algoritmus, který byl dále pro dané účely rozvíjen i posléze. Algoritmus zpracovává jednotlivé snímky v prostředí Matlab R2010b. Základním cílem bylo získat průměrnou hodnotu teploty snímaného povrchu každé trubky dané sekvence a její směrodatnou odchylku, která značí rozptyl teplot, ve kterém se pohybuje průměrná teplota a lze podle ní stanovit stabilitu teplotního pole na povrchu skrápěného trubkového svazku v určitém místě a zároveň reálné teplotní rozložení kapalného filmu. Vzhledem k dynamické povaze děje bylo zjištěno, že pro dosažení průměrné hodnoty a její směrodatné odchylky je dostatečné množství zpracovaných snímku cca 90 a poté se již výsledné hodnoty korigují s dalšími přibývajícími snímky (hodnotami) pouze v rámci maximálně desetin stupně Celsia. Přesto byly u všech sekvencí zpracovány všechny snímky.



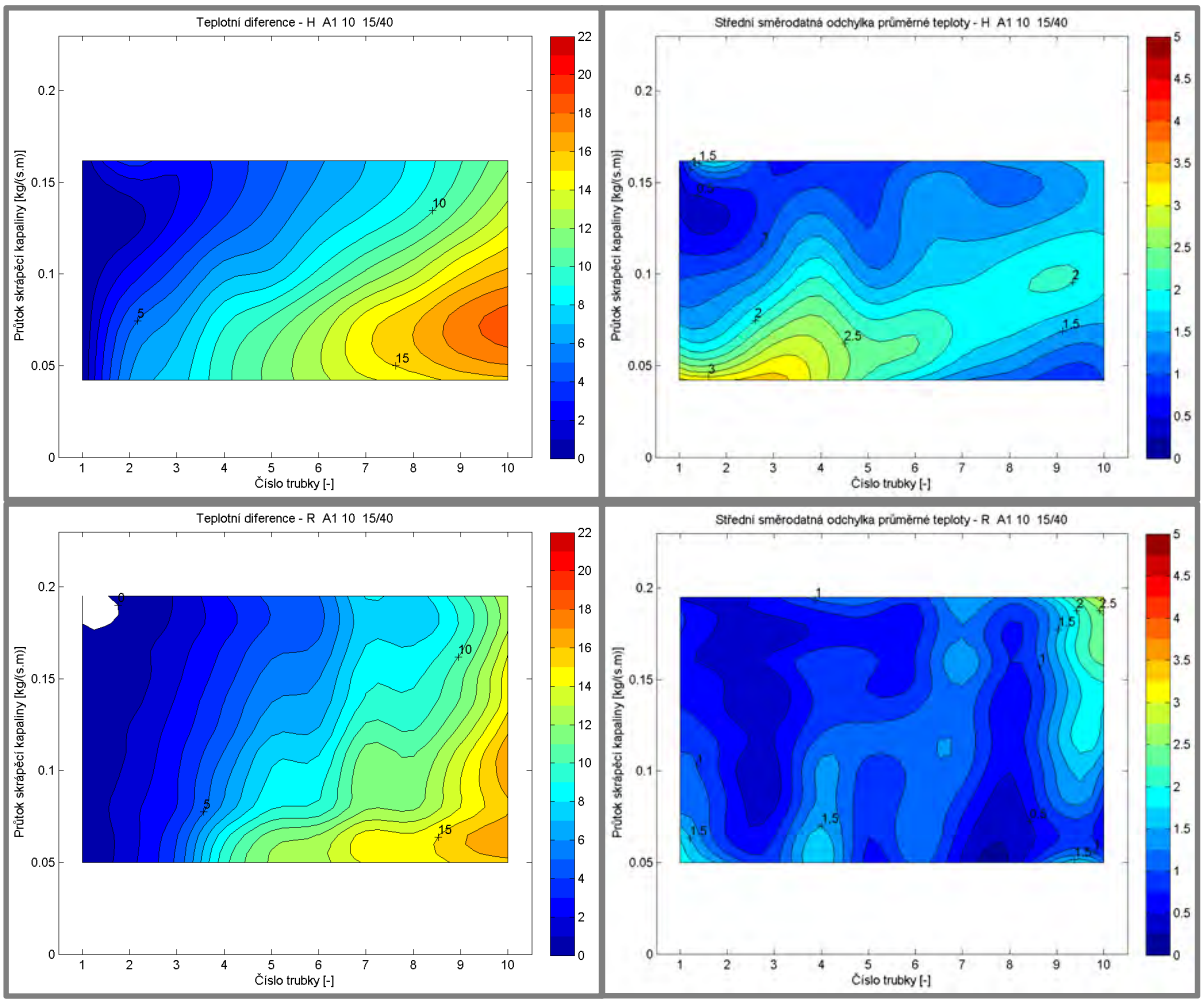
Obr. 29 Analyzovaný snímek sekvence (vlevo). Výřez snímku s vyznačením hranicemi trubek (vpravo)

Na obr. 29 vlevo je ukázka jednoho snímku ze sekvence. Takto byl snímek načten v rámci algoritmu v prostředí Matlab. Na snímku byla vybrána reprezentativní oblast, ve které byly vyznačeny hranice jednotlivých trubek. Takto upravený snímek je ukázán na obr. 29 vpravo. Horní hranice trubky je vyznačena bílou čarou a dolní hranice trubky je vyznačena zelenou čarou. Mezi těmito hranicemi byly na každém snímku u jednotlivých trubek odečteny teploty a uloženy do sešitu aplikace Microsoft Excel, který byl vytvořen pro každou trubku a list daného sešitu obsahuje teploty odečtené z daného snímku sekvence. V každém řezu (listu aplikace MS Excel) se počet hodnot pohyboval podle toho, jaká byla snímána rozteč trubkového svazku a z kolika trubek byl svazek složen, resp. čím větší byla rozteč (počet trubek), tím dále od trubkového svazku byla umístěna termovizní kamera a tím méně bodů bylo odečteno. U desetitrubkového svazku a rozteče trubek A1 se počet hodnot v jednom řezu (na jedné trubce) a na jednom snímku pohyboval kolem 75 $tisíc$, u rozteče B1 cca 40 $tisíc$, u rozteče C1 cca 31 $tisíc$ a u rozteče A2 cca 28 $tisíc$. Celkový počet hodnot z jedné sekvence se ve výsledku

pohyboval v rozmezí cca 51 až 136 *miliónů* hodnot. Z těchto hodnot byly pro každou trubku v dané sekvenci vypočítány průměrná hodnota a její směrodatná odchylka.

V případě již uvedeného desetitrubkového svazku s rádlovanými trubkami a roztečí trubek B1, jehož ukázky snímků při různých průtocích jsou uvedeny na obr. 28, vznikly matice průměrných hodnot a jejich směrodatných odchylek o počtu 2×80 hodnot. Vzhledem k tomu, že není prakticky možné mít stejnou teplotu skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky (toleranční rozsah při měření a později i při zpracování byl $15{,}0 \pm 1{,}0\ °C$), byla v případě průměrných hodnot u každé řešené sekvence vzata průměrná teplota na první trubce a u každé následující trubky byla průměrná hodnota ponížena o tuto první průměrnou hodnotu. Výsledkem je teplotní diference povrchu kapalného filmu, resp. průměrná míra ohřátí skrápěcí kapaliny po výšce trubkového svazku. Rozměr matice zůstal zachován, jen jsou u první trubky nulové hodnoty. Vypočtené hodnoty matic (teplotní diference i její směrodatné odchylky) byly kubicky interpolovány v rozsahu minimálního a maximálního měřeného průtoku skrápěcí kapaliny dané rozteče, povrchu a počtu trubek. Nově vzniklé matice hodnot byly pro přehlednost vyneseny do vrstevnicového grafu v prostředí Matlab R2010b.

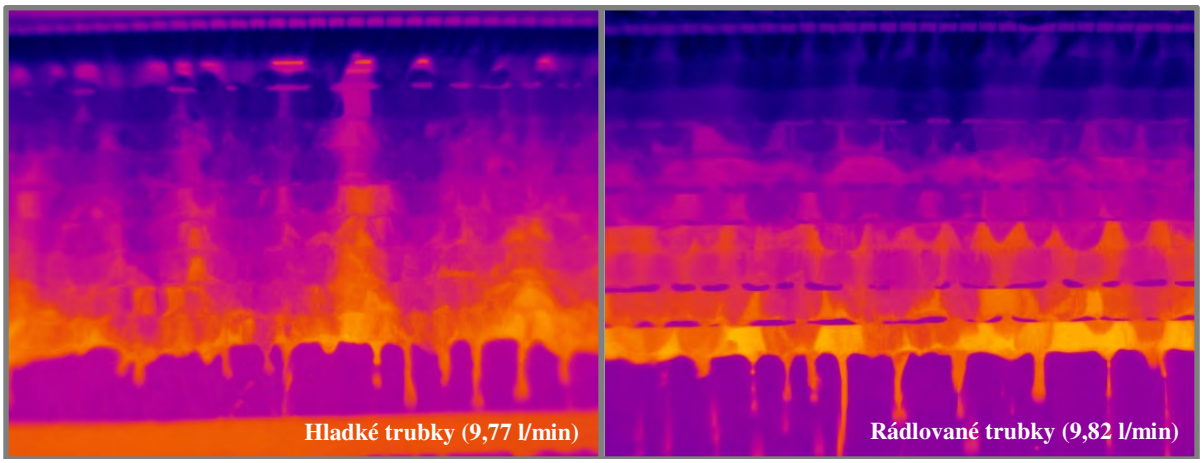
Na obr. 30 vlevo jsou vrstevnicové grafy teplotní diference a vpravo její směrodatná odchylka. Všechny čtyři grafy jsou pro desetitrubkový svazek s roztečí trubek A1. V horní polovině obrázku jsou grafy pro hladké trubky a v dolní polovině obrázku jsou grafy pro rádlované trubky.



Obr. 30 Teplotní pole (vlevo) a směrodatná odchylka (vpravo) (H/R-A1-10-15/40)

Na všech čtyřech obrázcích je na vodorovné ose vyneseno číslo trubky ve svazku, kde číslo jedna odpovídá první trubce, na kterou vytéká skrápěcí kapaliny z distribuční trubky, a na svislé ose je vynesen hmotnostní průtok skrápěcí kapaliny vztažený na délku skrápěné zóny.

Z těchto obrázků lze zhodnotit dílčí rozdíly jak mezi druhy povrchů, tak i mezi jednotlivými roztečemi. Pro názornost jsou zde uvedeny rozdíly při dvou průtocích skrápěcí kapaliny. První příklad je při průtoku cca $9{,}8\ l \cdot min^{-1}$ na obr. 31, což odpovídá hmotnostnímu průtoku vztaženého na délku skrápěné zóny cca $0{,}16\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. Vlevo je snímek trubkového svazku s hladkým povrchem a vpravo je snímek trubkového svazku s rádlovaným povrchem. Z hlediska rozložení kapalného filmu je patrné, že na první trubce je kapalina distribuována relativně rovnoměrně u obou druhů povrchů. U hladkého povrchu má následně kapalina tendence zužovat skutečný reálný prostor, ve kterém protéká a vytváří prameny, což má za následek zvýšení tloušťky filmu, resp. mezních vrstev. Celý svazek je ale pokrytý kapalným filmem a nikde není trubka suchá. Naproti tomu u rádlovaného povrchu dochází k rozložení kapalného filmu rovnoměrně napříč celým svazkem. Ve výsledku je nejen teplotní diference u rádlovaného povrchu vyšší (cca $14{,}6\ °C$ oproti $11{,}7°C$), ale je vyšší i celkový tepelný tok odebraný topné kapalině, který byl v případě rádlovaného svazku cca $9{,}6\ kW$ a v případě hladkého svazku $9{,}2\ kW$.

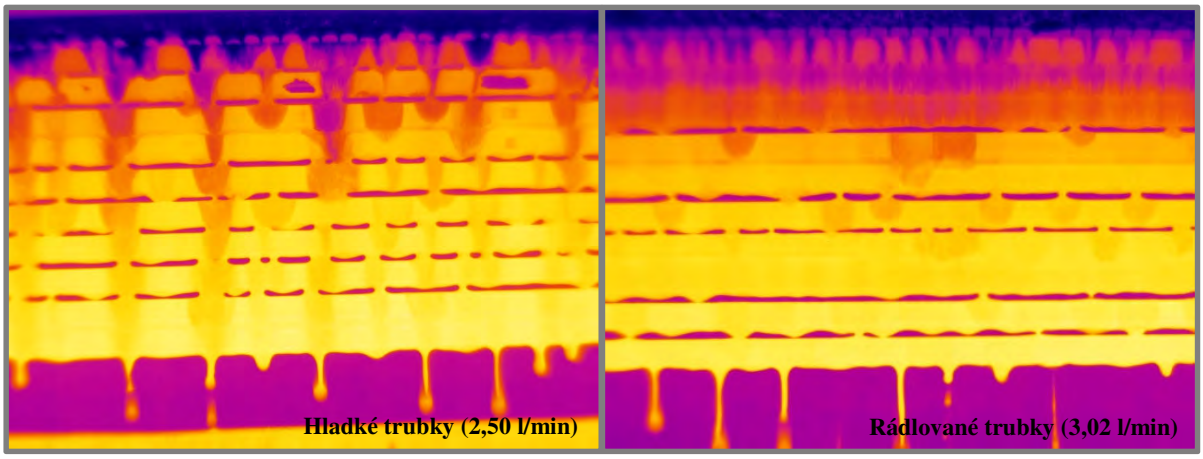


Obr. 31 Porovnání snímků hladkého a rádlovaného desetitrubkového svazku při průtoku cca 9,8 l/min

Z grafu směrodatných odchylek na obr. 30 lze vyčíst u rádlovaného povrchu při popisovaném průtoku vysokou míru stability teplotního pole, která se na prvních šesti trubkách pohybuje v průměrné výši $\pm 0{,}67\ °C$. Na dalších trubkách dochází k relativně vysokému nárůstu až k hodnotě $\pm 2{,}3\ °C$ na desáté trubce. Jedná se o míru využití tepla, resp. na posledních trubkách již není využívána v dostatečné míře teplosměnná plocha, protože dochází k navyšování tloušťky kapalného filmu, resp. stékání kapaliny do pramenů. Tento jev je ještě zřetelnější u vyšších průtoků, kde razantně narůstá tloušťka filmů, tím je vyšší i směrodatná odchylka a menší celkové ohřátí skrápěcí kapaliny. U hladkého povrchu při zmíněném průtoku skrápěcí kapaliny se průměrná směrodatná odchylka na prvních šesti trubkách pohybuje kolem hodnoty $\pm 0{,}93\ °C$ a na zbylých trubkách se pohybuje v průměrné výši $\pm 1{,}44\ °C$, resp. na poslední trubce je $\pm 1{,}76\ °C$. Nárůst oproti rádlovanému povrchu není tak markantní a lze z něho usoudit nejen chování kapaliny, která proudí v pramenech o vysoké tloušťce filmu, ale i to, že aby byla dosažena stejná teplota ohřátí jako v případě rádlovaného povrchu, tak by musel být trubkový svazek větší, resp. přidána další trubka.

Ve druhém případě je uveden rozdíl při malém průtoku skrápěcí kapaliny. Snímky jsou na obr. 32, kde vlevo je snímek hladkého trubkového svazku při průtoku $2{,}5\ l \cdot min^{-1}$ a vpravo je snímek rádlovaného trubkového svazku při průtoku $3{,}0\ l \cdot min^{-1}$. Při tomto průtoku je zřejmé, že větší část svazku je zcela nevyužitá, což je v případě posledních trubek patrné z nízkých hodnot směrodatných odchylek, která se v případě hladkých trubek pohybuje v průměrné výši $\pm 1{,}19\ °C$ na poslední pěti trubkách a u rádlovaných trubek $\pm 0{,}86\ °C$. U prvních trubek rádlovaného trubkového svazku dochází k rovnoměrnému rozložení kapalného filmu po celé ploše a směrodatná odchylka se pohybuje kolem průměrné hodnoty

$\pm 1{,}25\ °C$ přičemž nejvyšší je na první trubce, kde je její hodnota $\pm 1{,}76\ °C$. Oproti tomu u hladkého trubkového svazku dochází k vytváření pramenů a na druhé trubce jsou patrná i suchá místa. Směrodatná odchylka se pohybuje v průměrné výši na prvních třech trubkách $\pm 3{,}31\ °C$ s odchylkou $\pm 0{,}06\ °C$ a na dalších dvou je průměrná hodnota $\pm 2{,}51\ °C$. Průměrná teplota vody na poslední truce je v obou případech shodná, a to ve výši $\pm 38{,}3\ °C$, přičemž v případě hladkého svazku byla vstupní teplota topné vody $40{,}1 \pm 0{,}1\ °C$ a u rádlovaného $40{,}3 \pm 0{,}3\ °C$.



Obr. 32 Porovnání snímků hladkého a rádlovaného desetitrubkového svazku při průtoku cca 2,75 l/min

U všech testovaných trubkových svazků byly pořizovány termovizní kamerou sekvence. Snahou bylo pokrýt celý testovaný rozsah u jednotlivých trubkových svazků. V Příloze II jsou pro jednotlivé trubkové svazky o různých površích a počtech trubek uvedeny souhrnné údaje, při kterých byly pořizovány záznamy. Jako první je uveden počet sekvencí, které byly u dané geometrie svazku pořizovány v rozsahu objemového průtoku skrápěcí kapaliny, který je uveden v předposledním sloupci. Ve zbylých sloupcích tabulky jsou uvedeny průměrná teplota skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky a teplota topné kapaliny na vstupu do trubkového svazku společně s jejím průměrným průtokem. U jednotlivých průměrných hodnot je uvedena i směrodatná odchylka. V tomto případě se jedná o rozptyl průměrných hodnot v čase, při kterých byly pro danou geometrii pořizovány záznamy. Směrodatná odchylka dílčích průměrných teplot, která je vypočítána pouze z doby, kdy byl pořizován záznam, tj. 6 s□k□nd, nepřesáhla $\pm\ 0{,}1\ °C$ a v případě průměrných hodnot průtoku topné kapaliny nepřesáhla směrodatná odchylka $\pm\ 0{,}02\ l \cdot min^{-1}$.

Pro jednotlivé testované geometrie svazku byly vytvořeny vrstevnicové grafy teplotní diference a směrodatné odchylky průměrné teploty podle výše uvedeného postupu při teplotním spádu 15/40 °C. Pro tři druhy povrchů, čtyři rozteče trubkového svazku a čtyři počty trubek svazku se v souhrnu jedná o 2×48 grafů, které jsou uvedeny v Příloze II. Vzhledem k množství údajů je pro celkové porovnání nutné jisté zjednodušení. V případě teplotní diference byly z jednotlivých grafů vybrány maximální a minimální teploty na poslední trubce a vypočítána průměrná teplota společně s její směrodatnou odchylkou v rozsahu měřených průtoků dané geometrie. To vše bylo vyneseno do grafu na obr. 33 v případě trubkového svazku s hladkými trubkami, na obr. 34 v případě svazku s pískovanými trubkami a na obr. 35 v případě trubkového svazku s rádlovanými trubkami. Na vodorovné ose jsou vyznačeny rozteče trubek pro jednotlivé počty trubek. Na svislé ose je vyznačena teplotní diference na poslední trubce. U jednotlivých geometrií je vyznačen rozsah minimální a maximální teplotní diference sloupcem, ve kterém je bílou čarou vyznačena průměrná teplota společně se svojí směrodatnou odchylkou. Pokud je směrodatná odchylka větší (menší) než maximální (minimální) hodnota, tak bílá barva směrodatné odchylky přechází plynule do černé barvy.

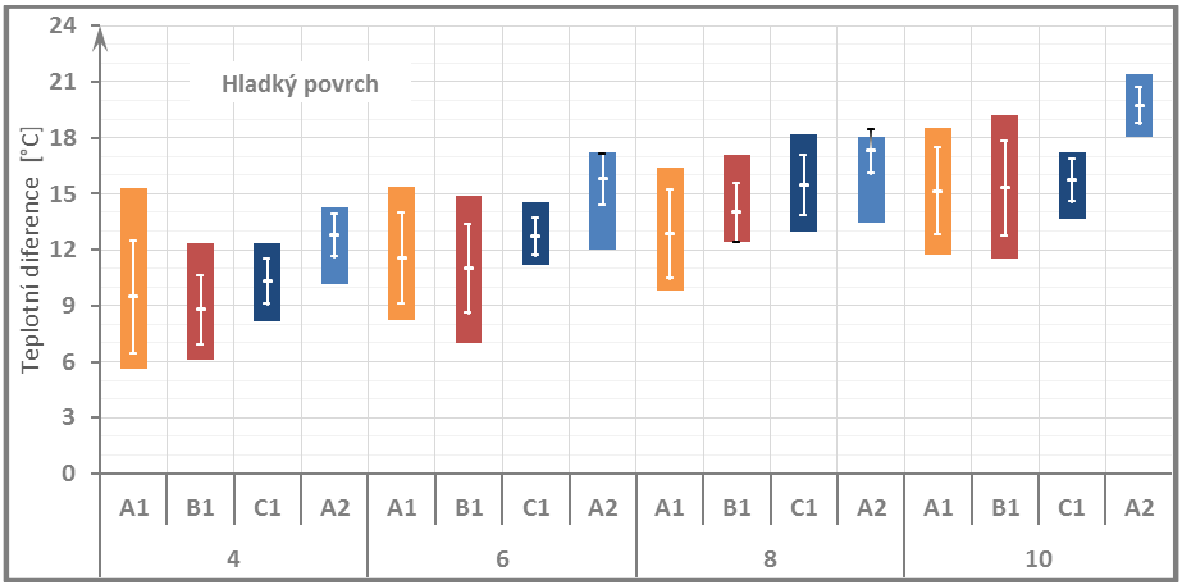
Z grafů směrodatných odchylek uvedených výše na dvou příkladech vyplývají základní dvě oblasti, při kterých lze hodnotit teplotní pole na skrápěném trubkovém svazku. Prvním

oblastí je vysoký průtok a druhou oblastí je nízký průtok. Při malém průtoku je nízká směrodatná odchylka na posledních trubkách, tj. tam, kde již dochází k minimálnímu ohřevu kapaliny a naopak na prvních řadách trubek je vyšší, kde dochází k jejímu ohřevu. Velikostí lze odhadnout i rovnoměrnost rozložení kapaliny na trubkách, resp. její ohřev. U vysokého průtoku skrápěcí kapaliny by mělo v daných podmínkách docházet k ohřevu po celé výšce výměníku. Směrodatná odchylka indikuje nerovnoměrnost proudění kapaliny na svazku například v proudech, resp. k dominantnímu ohřevu filmu dochází jen v určitých částech.

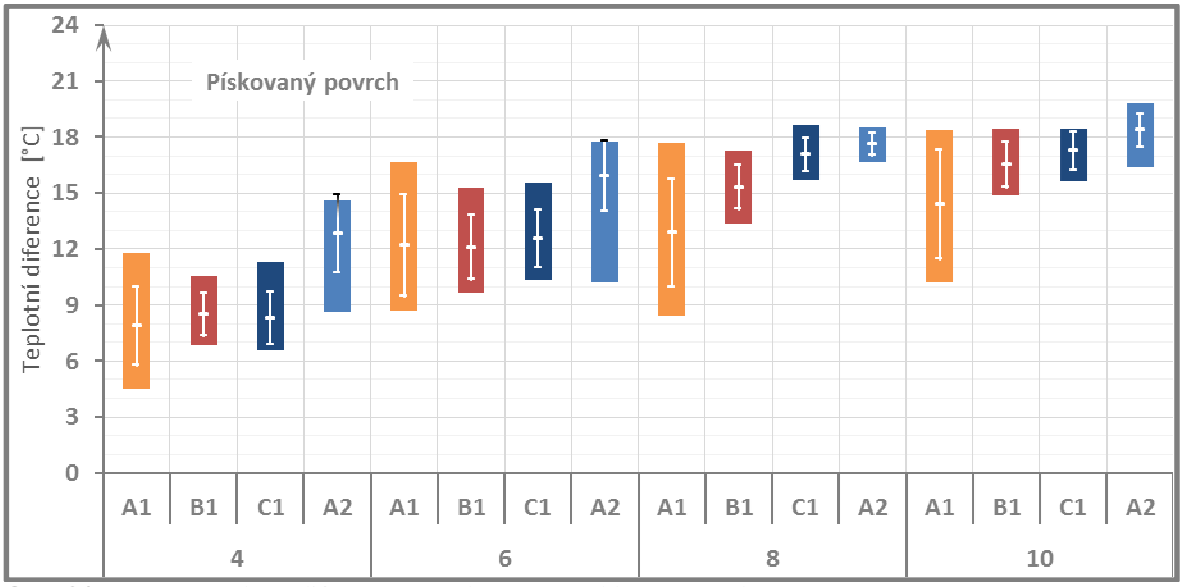
Vzhledem k výše uvedeným důvodům byly z grafů směrodatných odchylek vybrány u jednotlivých geometrií hodnoty při průtoku skrápěcí kapaliny menší než cca $4{,}0\ l \cdot min^{-1}$ a hodnoty při průtoku vyšším než cca $9{,}0\ l \cdot min^{-1}$ z daného měřeného rozsahu. Hodnoty byly vybrány u prvních a posledních trubek. V případě desetitrubkového svazku jsou to hodnoty z prvních a posledních třech trubek, v případě osmi a šesti trubkového svazku jsou to hodnoty z prvních a posledních dvou trubek a v případě čtyřtrubkového svazku jsou to hodnoty pouze z první a poslední trubky. Z těchto hodnot byla vypočítána průměrná hodnota směrodatné odchylky. Na obr. 36 až obr. 38 jsou vyneseny výsledné průměrné hodnoty pro jednotlivé geometrie společně s maximální a minimální směrodatnou odchylkou, které jsou vyznačeny formou sloupce. Na obr. 36 jsou výsledky pro hladký trubkový svazek, na obr. 37 pro pískovaný svazek a na obr. 38 pro rádlovaný trubkový svazek. Na levé polovině jednotlivých obrázků jsou grafy pro nízký průtok a vpravo pro průtok vysoký. Grafy jsou rozděleny na dvě části. V horní části grafu jsou vyneseny hodnoty horní části svazku, které jsou označeny jako „1/4“, a v dolní části grafu jsou vyznačeny hodnoty dolní části svazku, které jsou označeny „4/4“, společně s označením jednotlivých geometrií na vodorovné ose.

U všech testovaných typů povrchů byly dosaženy nejnižší průměrné teplotní diference u čtyřtrubkového svazku. V případě hladkého čtyřtrubkového svazku je průměrná hodnota u roztečí A1 $9{,}2\ °C$, mírně klesá u B1 na $8{,}8\ °C$, ale s dalším navyšováním rozteče trubkového svazku stoupá na $10{,}3\ °C$ u rozteče C1 a na $12{,}8\ °C$ u rozteče A2. U pískovaného svazku jsou průměrné hodnoty ve srovnání se zmíněnými geometriemi hladkého svazku nižší až o $2{,}0\ °C$ (u A2), resp. u A1 o $1{,}6\ °C$. U zbylých dvou geometrií jsou výsledky srovnatelné, ale pásmo průměrné hodnoty je výrazně užší. Naopak u rádlovaného svazku jsou hodnoty u A1 a B1 vyšší o $1{,}9\ °C$ a $1{,}1\ °C$ a u zbylých roztečí jsou přibližně srovnatelné. Avšak průměrné hodnoty mají u roztečí B1 a C1 snižující se tendenci oproti rozteči A1. S navyšováním počtů trubek ve svazku docházelo i k nárůstu teplotní diference při srovnání výsledků mezi stejnými hodnotami roztečí svazku. U pískovaného a rádlovaného svazku lze pozorovat, že není výrazný rozdíl mezi průměrnými hodnotami u osmi a desetitrubkového svazku, ale u rádlovaného svazku jsou rozptyly hodnot užší.

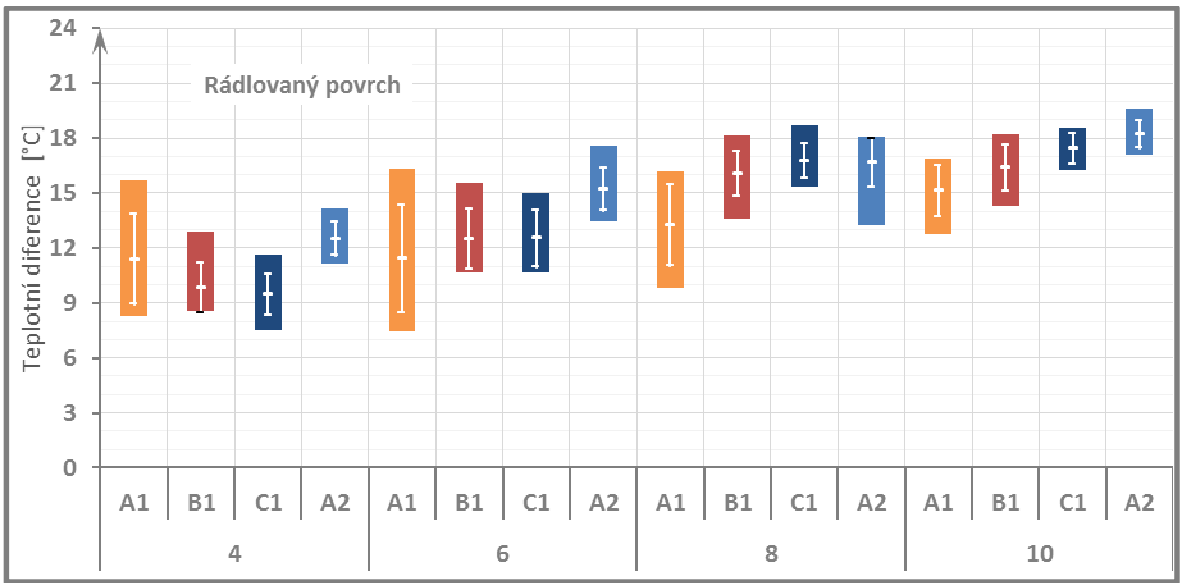
Na grafech směrodatných odchylek lze napříč mezi typy povrchů sledovat při nízkých průtocích zrovnoměrnění kapalného filmu na povrchu skrápěného svazku a s narůstajícím počtem trubek a vzdálenostmi mezi nimi i jasné zúžení rozptylu oproti hladkému trubkovému svazku. U vysokého průtoku skrápěcí kapaliny je směrodatná odchylka relativně vyrovnaná a výstřelky jsou způsobeny v horní části svazku tendencí kapaliny proudit v pramenech, což se promítá i do dolní části svazku. Naproti tomu u rádlovaného svazku jsou hodnoty v horní části svazku relativně nízké a kapalina proudí rovnoměrně, ale v dolní části svazku se postupně vytváří pásy, ve kterých kapalina převážně proudí.



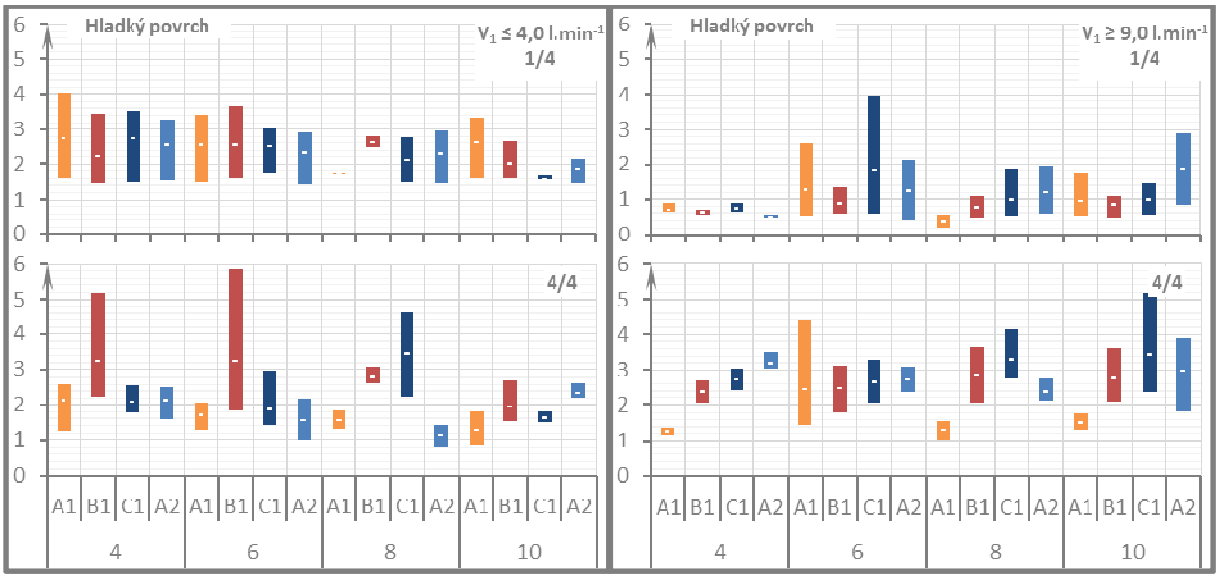
Obr. 33 Dosažené teplotní diference na hladkém trubkovém svazku



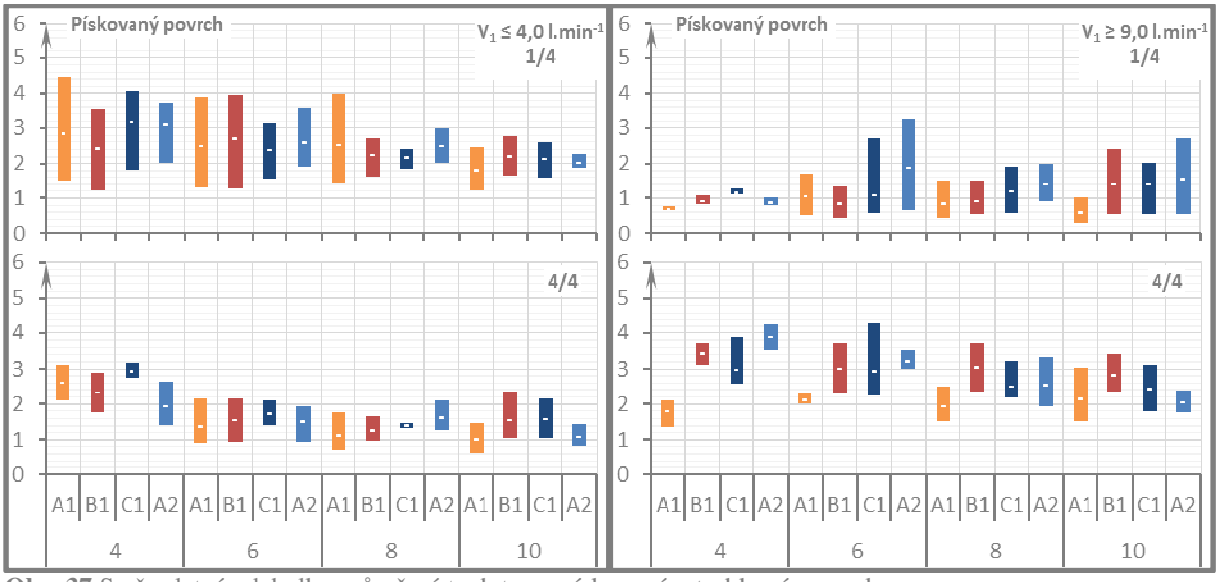
Obr. 34 Dosažené teplotní diference na pískovaném trubkovém svazku



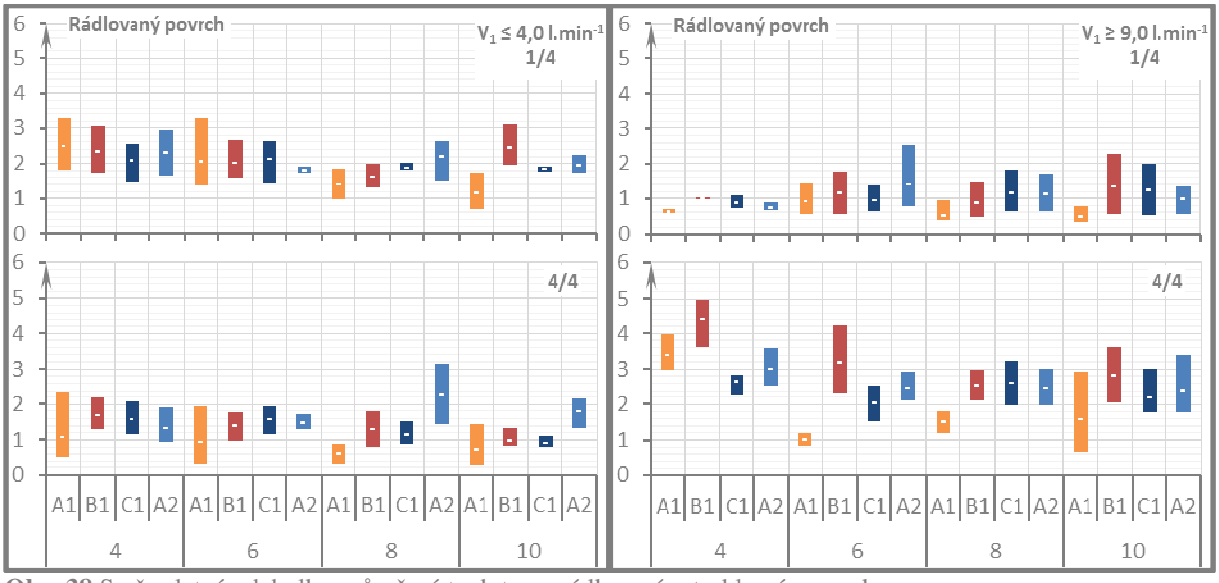
Obr. 35 Dosažené teplotní diference na rádlovaném trubkovém svazku



Obr. 36 Směrodatné odchylky průměrné teploty na hladkém trubkovém svazku



Obr. 37 Směrodatné odchylky průměrné teploty na pískovaném trubkovém svazku



Obr. 38 Směrodatné odchylky průměrné teploty na rádlovaném trubkovém svazku

5.3 Regresní analýza

V kapitole 1.4 Zjednodušený matematický model přestupu tepla je uvedena jedena z nejstarších a zároveň z nejcitovanějších matematických závislostí pro praktické popsání experimentálních výsledků na skrápěných výměnících, kterou navrhl Chun a Seban (1971) **[9]**. Jedná se o mocninnou funkční závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově a Prandtlově čísle uvedenou v rovnici (5.1).

$$Nu = a_0 \cdot Re^{a_1} \cdot Pr^{a_2} \quad [-], \tag{5.1}$$

kde hodnoty a_0 až a_2 jsou empiricky odvozené konstanty. V případě, že dochází k varu skrápěcí kapaliny na svazku, tak doporučují rovnici rozšířit o měrný tepelný příkon.

$$Nu = a_0 \cdot Re^{a_1} \cdot Pr^{a_2} \cdot \dot{q}^{a_3} \quad [-], \tag{5.2}$$

kde hodnoty a_0 až a_3 jsou opět empiricky odvozené konstanty. U obou funkcí lze zlogaritmováním dosáhnout přibližně lineárních závislostí na vysvětlujících proměnných. Celá funkční závislost je uvedena v rovnici (5.3), kde Reynoldsovo i Prandtlovo číslo jsou uvažovány jako nezávislé proměnné na Nusseltově čísle

$$\ln(Nu) = \ln(a_0) + a_1 \cdot \ln(Re) + a_2 \cdot \ln(\mathrm{Pr}) \quad [-]. \tag{5.3}$$

Analýza a zpracování naměřených hodnot, resp. odvození funkční závislosti je provedeno v prostředí Microsoft Excel 2010, kde jsou hledány pomocí regresní analýzy regresní koeficienty. Pro výpočet byla využita maticová funkce „LINREGRESE“, jejímž výsledkem jsou regresní koeficienty a výpočet probíhá zcela automaticky podle počtu požadovaných nezávislých proměnných. Pomocí vytvořené rovnice je vypočítána nová hodnota Nusseltova čísla (Nu_{reg}), která je porovnána s původní hodnotou Nusseltova čísla (Nu). Chyba $(u_{reg,Nu})$ je stanovena podle následující rovnice

$$u_{reg,Nu} = \left(1 - \frac{Nu_{reg}}{Nu}\right) \cdot 100 \quad [\%]. \tag{5.4}$$

Protože chyba obecně může nabývat jak kladných, tak i záporných hodnot, je počítána průměrná hodnota chyby z absolutních hodnot dílčích chyb podle rovnic (3.35) a její průměrná absolutní odchylka (od průměru) podle rovnice (3.36). Stejně tak i minimální a maximální hodnota chyby bude prezentována v absolutní výši, protože pro celkové zhodnocení není důležitý její směr, ale velikost. Poslední důležitým kritériem, kterým bude hodnocena kvalita navržené funkce, je variační koeficient Nusseltova čísla, který udává relativní míru rozptylu reziduí a je stanovena podle následující rovnice **[53]**

$$s_{reg,Nu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(Nu_{reg,i} - Nu_i\right)^2}}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} Nu_i} \cdot 100 \quad [\%]. \tag{5.5}$$

Variační koeficient Nusseltova čísla daleko lépe vystihuje jedním číslem celý testovaný soubor dat, jelikož v případě rovnoměrně rozložené absolutní odchylky dvou sledovaných řad je větší relativní chyba u malých hodnot oproti velkým hodnotám a tím u rostoucí funkce dochází ke zkreslení průměrné chyby společně s její směrodatnou (absolutní) odchylkou.

Pro základní zhodnocení navrhovaných mocninných funkcí byly vybrány hodnoty Nusseltova čísla stanovené u experimentu na atmosférickém standu u rádlovaného šestitrubkového svazku. Testovaný soubor obsahuje 1 456 $hodnot$ a nejistota typu B ($u_{B,Nu}$), tj. nejistota, která vychází z chyby jednotlivých měřících členů, je u tohoto souboru hodnot na průměrné výši $(3{,}3 \pm 3{,}4)\%$.

U zmíněného svazku jsou testovány 4 varianty mocninné funkce, která bude obecně označována jako „A“. První dvě vychází ze závěrů Owense (1978) **[13]**, který uvádí v rovnicích (1.30) a (1.31) mimo členu zohledňujícího rozteč a průměr trubek, které v tuto chvíli nebudou

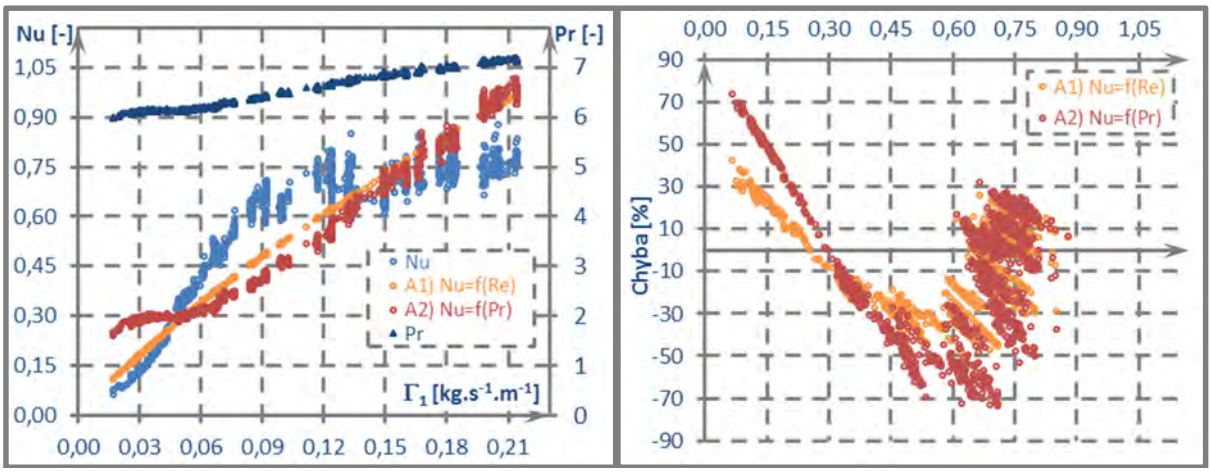
testovány, vliv pouze Reynoldsova čísla při laminárním proudění a u turbulentního proudění vliv pouze Prandtlova čísla. Pro zmíněné dvě rovnice stanovil rovnici (1.32), která udává hranici Reynoldsova čísla mezi režimy a je funkčně závislá pouze na Prandtlově čísle. U výsledků experimentů uvedených v této práci se Prandtlovo číslo pohybuje v rozmezí 5,8 až 7,3 [−] při spádu 15/40°C, čemuž odpovídá rozmezí Reynoldsova čísla, podle zmíněné rovnice, 0,08 až 0,12 [−]. Při nejmenších testovaných průtocích bylo Reynoldsovo číslo cca 74,2 [−]. Přesto u první varianty (A1) bude testováno pouze Reynoldsovo číslo podle rovnice

$$Nu = a_0 \cdot Re^{a_1} \quad [-], \tag{5.6}$$

u druhé varianty (A2) bude testováno pouze Prandtlovo číslo, přičemž je respektováno číslování regresních koeficientů podle rovnice (5.1)

$$Nu = a_0 \cdot Pr^{a_2} \quad [-]. \tag{5.7}$$

Třetí varianta (A3) je rovnice, kde je funkčně závislé na Nusseltově čísle Prandtlovo i Reynoldsovo číslo, tj. výpočet postupuje podle rovnice (5.1) a pro poslední (čtvrtou) variantu (A4) je využita rovnice (5.2), kde je oproti předchozí variantě přidán měrný tepelný příkon.

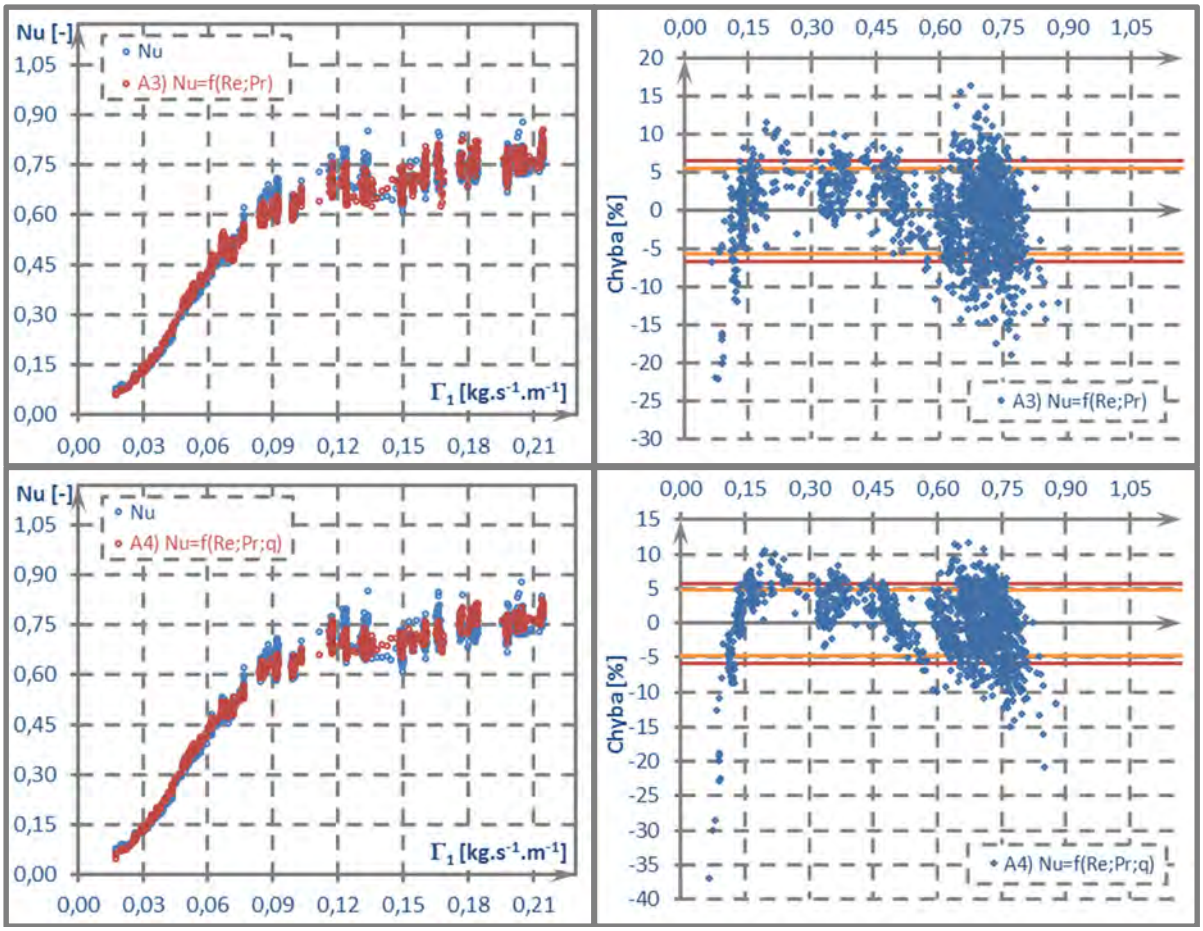


Obr. 39 Porovnání průběhu Nu a závislost chyby na Nu - varianty A1 a A2 (AS-R-B1-6-15/40)

Na obr. 39 vlevo jsou vyneseny výsledky regresní analýzy první a druhé testované varianty, kde světle modré body „Nu“ označují původní vypočítané hodnoty Nusseltova čísla, které byly prezentovány v kapitole 5.1 a pro které je hledána funkční závislost. Hodnoty jsou vyneseny v závislosti na hmotnostním průtoku skrápěcí kapaliny vztaženého na délku skrápěné zóny. V grafu jsou také vyneseny tmavě modrými body hodnoty Prandtlova čísla, která byla stanovena na základě měřených hodnot, tj. z tlaku prostředí kolem skrápěného výměníku a průměrné hodnoty teplot skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky (T1) a teploty skrápěcí vody za skrápěným svazkem (T2) v daném čase a při daném průtoku skrápěcí kapaliny. První testovanou variantou byla mocninná funkce, kde je funkčně nezávislou proměnnou Reynoldsovo číslo, a jejíž dopočítané body jsou označeny červenou barvou. Výsledná funkce má téměř ideální lineární charakter, který vykazuje korelaci 0,996 [−] při proložení průběhu přímkou. Šířka pásu nových hodnot, oproti původním stanoveným hodnotám, je relativně úzká. Druhou testovanou mocninnou funkcí byla závislost pouze na Prandtlově čísle. Nové body jsou v grafu vyznačeny červenou barvou. V tomto případě je nutné hodnocení průběhu rozdělit na dvě části. Rozhraním mezi oběma částmi je hmotnostní průtok skrápěcí kapaliny vztaženy na délku skrápěné zóny cca 0,06 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. U prvního úseku, tj. při nízkém průtoku, se průměrná hodnota Prandtlova čísla pohybuje cca $6{,}12 \pm 0{,}03$ [−] a poté přibližně lineárně stoupá do své maximální hodnoty cca 7,19 [−]. Nově dopočítané hodnoty Nusseltova čísla značně kopírují průběh Prandtlova čísla. Při nízkém průtoku je průběh relativně lineární a při nárůstu Prandtlova čísla narůstá také Nusseltovo číslo a to také přibližně lineárně. Průběhy první a druhé testované funkce se potkávají u průtoku cca 0,12 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. Avšak na rozdíl

od první testované funkce je u druhé funkce parná i šíře pásu nově dopočítaného Nusseltova čísla, která již více vystihuje původní průběh.

Na obr. 39 vpravo jsou vyneseny chyby Nusseltova čísla, stanovené podle rovnice (5.4), v závislosti na původní hodnotě Nusseltova čísla, která je vynesena na vodorovné ose. Chyba se v případě první testované mocninné funkce pohybovala v rozmezí cca -48 % až cca $+43$ %. U druhé testované funkce je výsledný rozsah chyby cca -74 % až cca $+75$ %. Další popisné statistické údaje, jakož i koeficienty a_0 až a_2 jsou uvedeny v souhrnné tab. 8.



Obr. 40 Porovnání průběhu Nu a závislost chyby na Nu scénářů A3 a A4 (AS-R-B1-6-15/40)

Výsledky třetí a čtvrté varianty jsou v grafech na obr. 40. V horní polovině jsou výsledky varianty 3, kde je Nusseltovo číslo funkcí Reynoldsova a Prandtlova čísla a v dolní polovině obrázku jsou výsledky varianty 4, u které je navíc oproti variantě 3 přidán v mocninné funkci měrný tepelný příkon odebraný topné kapalině. V pravé polovině obrázku u vynesených chyb Nusseltova čísla jsou vyneseny i dvě hranice. První je oranžovou čarou vynesen variační koeficient, který je stanoven podle rovnice (5.5). Červenou čarou v grafu chyb je vynesena celková průměrná chyba ($u_{C,Nu}$). Tj. kvadraticky jsou sečteny a poté odmocněny variační koeficient a průměrná nejistota typu „B“ daného testovaného souboru podle zásad a na základě doporučení [**50**]

$$u_{C,Nu} = \sqrt{s_{reg,Nu}^2 + u_{B,Nu}^2} \quad [\%]. \tag{5.8}$$

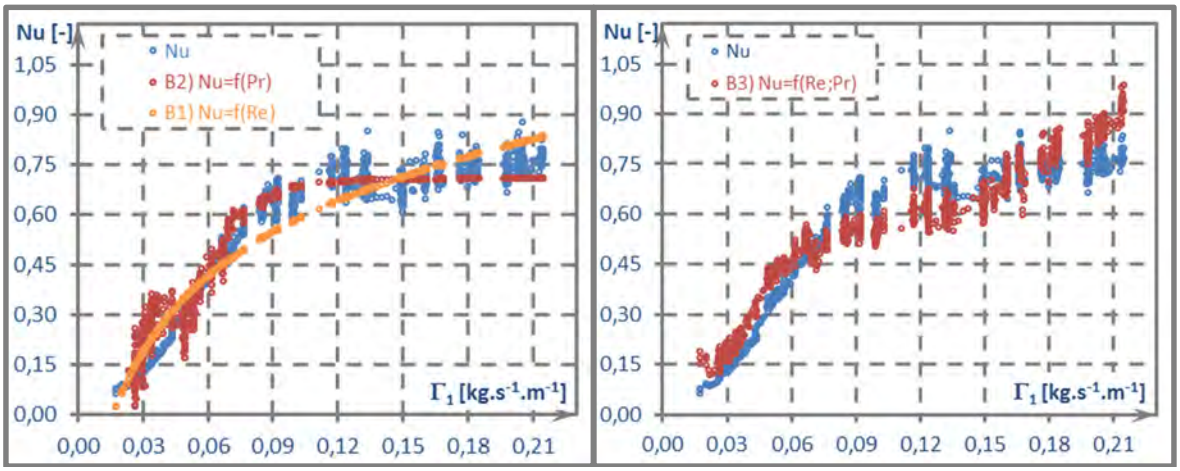
Výsledky u obou variant jsou v relativně dobré shodě s původním souborem hodnot. Koeficient vícenásobné korelace je u třetí varianty $0{,}988$ $[-]$ a u čtvrté varianty $0{,}992$ $[-]$. Přidáním měrného tepelného příkonu se sice mírně zúžil výsledný pás nového Nusseltova čísla oproti původním hodnotám, resp. variantě A3, ale snížila se i průměrná chyba z $(4{,}1 \pm 3{,}4)$ % na $(3{,}6 \pm 3{,}1)$ %. U obou variant ale funkce nepokrývá nejmenší hodnoty průtoku skrápěcí kapaliny, resp. nejnižší hodnoty Nusseltovo čísla, které dosahují chyby

u regresní analýzy až 25,3 % u třetí varianty a u čtvrté varianty až 36,9 %. Celková chyba třetí varianty vychází 6,53 % a čtvrté varianty 5,77 %.

Vzhledem k řešenému tvaru mocninné funkce v regresní analýze bylo pro další testování upuštěno od zlogaritmování, ale byly hledány exponenty jednotlivých proměnných. Obecná lineární kombinace mocninných funkcí je uvedena v rovnici (5.9) a pro další potřeby bude u jednotlivých testovaných variant označena písmenem „B“

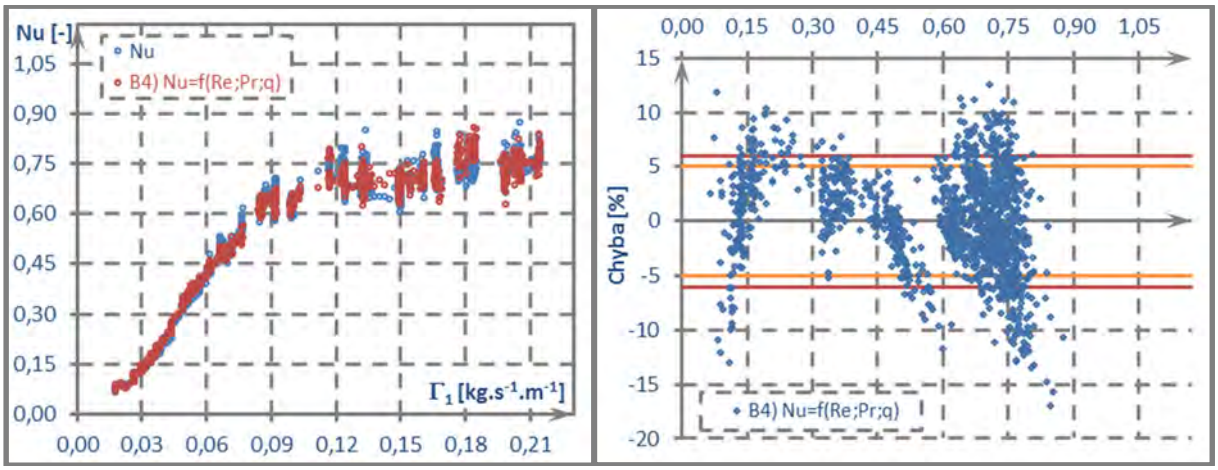
$$Nu = a_0 + a_1 \cdot Re^{b_1} + a_2 \cdot Pr^{b_2} + a_3 \cdot \dot{q}^{b_3} \quad [-], \tag{5.9}$$

kde koeficienty a_0 až a_3 jsou hledány pomocí regresní analýzy, resp. pomocí maticová funkce „LINREGRESE“, a exponenty b_1 až b_3 jsou nejprve manuálně odhadovány a při dosažení relativně dobré shody nových hodnot Nusseltova čísla s původními hodnotami je spuštěn automatický výpočet pro zpřesnění. V aplikaci Microsoft Excel je využit nástroj citlivostní analýzy „ŘEŠITEL“, kde jsou hledány mocnitele b_1 až b_3. Okrajovou podmínkou pro ukončení hledání řešení, je dosažení minimální průměrné chyby regresní analýzy, resp. program sám ukončí výpočet, pokud se tři kroky po sobě hodnota průměrné chyby již nemění. Vzhledem k využití maticové funkce „LINREGRESE“ a funkce „ŘEŠITEL“, jsou zpřesňovány koeficienty a_0 až a_3 a exponenty b_1 až b_3 po dílčích krocích automaticky.



Obr. 41 Porovnání průběhu Nu – varianty B1, B2 a B3 (AS-R-B1-6-15/40)

U funkce lineárních kombinací mocninných funkcí (B) byly testovány čtyři totožné varianty, jako v případě již uvedené mocninné funkce (A). Na obr. 41 jsou uvedeny první tři varianty. V levém grafu je uvedena první varianty, kde je Nusseltovo číslo funkcí pouze Reynoldsova čísla (B1), a druhá varianta, kde je Nusseltovo číslo pouze funkcí Prandtlova čísla. Oproti variantám „A1“ a „A2“ obě dvě funkce daleko lépe vystihují hledanou závislost. Průměrná chyba je u první varianty (B1) $(11{,}3 \pm 11{,}8)$ %, což je o cca 7,6 *procentních bodů* méně oproti variantě (A1). U druhé varianty (B2) je rozdíl průměrných chyb daleko výraznější, a to cca 15,4 *procentních bodů* menší oproti variantě (A2). Maximální chyby analýzy jsou však o řád vyšší a to v obou případech u nejmenších průtoků skrápěcí kapaliny, resp. nejmenšího Nusseltova čísla. Další statistické údaje, jakož i hledané koeficienty a exponenty jsou uvedeny v tab. 8. Na obr. 41 vpravo jsou uvedeny výsledky třetí testované varianty (B3), kde je Nusseltovo číslo závislé na Reynoldsově i Prandtlově čísle. Při testování funkce se ukázalo, že hodnoty Reynoldsova čísla udávala směrnici (tvar výsledné křivky) a hodnoty Prandtlova čísla rozptyl hodnot. V porovnání s předchozími dvěma variantami je ovšem výsledná průměrná chyba mírně vyšší $(13{,}7 \pm 8{,}6)$ %, ale poklesla relativní směrodatná odchylka dané průměrné hodnoty, a oproti variantě A3 je průměrná hodnota vyšší o cca 9,6 *procentních bodů*.



Obr. 42 Porovnání průběhu Nu a závislost chyby na Nu – varianta B4 (AS-R-B1-6-15/40)

Poslední testovanou variantou je funkční závislost Reynoldsova čísla, Prandtlova čísla a měrného tepelného příkonu (B4). Výsledky analýzy jsou uvedeny na obr. 42. Vlevo na obrázku jsou vyneseny body Nusseltova čísla a nové body vypočítané pomocí nalezené funkce a vpravo jsou vyneseny chyby regresní analýzy v závislosti na původní hodnotě Nusseltova čísla. U tohoto výsledného tvaru je již poměrně dobrá shoda s původními hodnotami. Průměrná hodnota chyb je stejná jako v případě varianty A4, ale její směrodatná odchylka je o tři desetiny procentního bodu menší. Proložený pás je o něco užší oproti původním hodnotám, a proto mírně stoupl variační koeficient na 5,0 %, tj. stoupla o cca tři desetiny procentního bodu oproti variantě A4, ale maximální hodnota chyby klesla o více jak polovinu na 17 %. Tento tvar funkce je v dobré shodě i u hodnot Nusseltova čísla při nízkém průtoku skrápěcí kapaliny.

Tab. 8 Souhrnná tabulka regresní analýzy (AS-R-B1-6-15/40)

1) Základní popisné statistické údaje regresní analýzy							
	Průměrná chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	Maximální chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	$s_{reg,Nu}$ [%]	ρ^2 [%]	Počet hodnot s chybou větší než … (z 1 336 hodnot)		
					>5 % [-]	>10 % [-]	>20 % [-]
A1	18,9 ± 10,4	48,1	19,3	80,4	1208	1035	577
A2	28,7 ± 19,9	74,4	26,0	61,5	1183	1031	786
A3	4,1 ± 3,4	25,3	5,6	97,7	426	72	4
A4	**3,6 ± 3,1**	**36,9**	**4,7**	**98,4**	**349**	**34**	**6**
B1	11,3 ± 11,8	199,8	10,5	92,0	970	526	238
B2	13,3 ± 30,9	708,3	12,5	88,7	771	389	213
B3	13,7 ± 8,6	58,8	13,5	86,7	1119	831	282
B4	**3,6 ± 2,7**	**17,0**	**5,0**	**98,2**	**337**	**39**	**0**
2) Koeficienty do rovnic (5.2) a (5.9)							
	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
A1	0,002	0,919	0	0	–	–	–
A2	$2{,}61\cdot10^{-7}$	0	7,694	0	–	–	–
A3	3052,2	1,900	-10,694	0	–	–	–
A4	0,059	1,088	-7,134	0,879	–	–	–
B1	-3,184	2,109	0	0	0,096	0	0
B2	0,708	0	$-1{,}9\cdot10^{38}$	0	0	-49,109	0
B3	6,866	$2{,}78\cdot10^{-3}$	-1,156	0	1,000	1,000	0
B4	0,216	$2{,}02\cdot10^{-4}$	$-2{,}2\cdot10^{-8}$	$7{,}35\cdot10^{-11}$	1,234	8,974	2,180

V tab. 8 jsou shrnuty základní údaje regresní analýzy provedené pro statistický soubor AS-R-B1-6-15/40. V první části jsou uvedeny základní popisné statistické údaje. Tj. průměrná chyba regresní analýzy s její relativní směrodatnou odchylkou, maximální chyba regresní analýzy dané varianty, relativní střední kvadratická odchylka ($s_{reg,Nu}$) a index (koeficient) determinace ρ^2 [%], který je vypočítán z vícenásobné korelace jejím umocněním a vynásobením stem [**53**].

Z analýzy jednoho dílčího souboru dat vyplývá optimální závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově čísle, Prandtlově čísle a měrném tepelném příkonu. Pro univerzálnost vztahů bude analyzován celý statistický soubor jednotlivých typů povrchů trubkových svazku a je cílem navrhnout jednu rovnici zohledňující i rozteč trubek a jejich počet ve svazku. V tab. 9 je pro jednotlivé typy povrchů uveden počet analyzovaných hodnot a jejich rozsah hmotnostního průtoku vztaženého na délku skrápěné zóny a měrný tepelný tok odebraný topné kapalině. Dále jsou v tabulce uvedeny rozsahy základních bezrozměrných kritérií.

Tab. 9 Souhrn rozsahů platností navržených rovnic (AS-H/P/R)

	Trubkový svazek		
	hladký	**pískovaný**	**rádlovaný**
Počet analyzovaných hodnot	18 424	18 774	16 419
Hmotnostní průtok (Γ_1 $[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$)	0,021 - 0,227	0,017 - 0,224	0,017 - 0,225
Měrný tepelný příkon ($\dot{q}_{34}$ $[kW \cdot m^{-2}]$)	7,8 - 50,2	6,5 - 49,0	7,1 - 51,4
Reynoldsovo číslo (Re $[-]$)	91,7 - 917,8	74,2 - 917,2	78,6 - 964,0
Prandtlovo číslo (Pr $[-]$)	5,8 - 7,4	5,8 - 7,3	5,8 - 7,3
Modifikované Galileovo číslo ($Ga^{0,25}$ $[-]$)	361,8 - 445,9	363,7 - 447,5	364,9 - 448,5
Nusseltovo číslo (Nu $[-]$)	0,064 - 0,885	0,057 - 0,749	0,065 - 1,167

Vzhledem k velkému počtu analyzovaných průběhů jednotlivých testovaných povrchů trubkových svazků, již nebudou graficky vykreslovány jednotlivé typy variant, ale budou pro ně uvedeny pouze základní popisné statistické údaje. V tab. 10 jsou uvedeny statistické výsledky regresní analýzy mocninné funkce (A). Její první čtyři varianty (A1 až A4) byly počítány podle rovnice (5.2). Písmeno uvedené za variantou označuje soubor testovaných dat, a to v případě dat získaných u hladkých trubkových svazků písmenem „H“, u pískovaných trubkových svazků písmenem „P“ a u rádlovaných trubkových svazků písmenem „R“. U prvních třech variant nevhodnost rovnice kopírují již popsaný statistický soubor AS-R-B1-6-15/40. Průměrná chyba se pohybuje v rozmezí 17,6 % až 28,4 %. U čtvrté varianty, kde se uvažuje mimo Reynoldsova a Prandtlova čísla i s měrným tepelným příkonem, klesla průměrná chyba na $(7{,}9 \pm 7{,}1)$ % u hladkého svazku, na $(10{,}3 \pm 9{,}4)$ % u pískovaného svazku a u rádlovaného svazku na $(11{,}0 \pm 8{,}0)$ %.

Přestože Reynoldsovo číslo zohledňuje délku skrápěné zóny, neboť je počítáno mimo jiné z hmotnostního průtoku vztaženého na délku skrápěné zóny, a měrný tepelný příkon zohledňuje celkovou teplosměnnou plochu, tj. celkovou délku trubkového svazku, není výsledná funkce dostatečně kvalitní. Proto je ve variantě pět rovnice (5.2) rozšířena o počet trubek (n) ve svazku. Pro testované varianty pět až jedenáct je sestavena celková rovnice

$$\left.\begin{aligned} Nu = a_0 \cdot Re^{a_1} \cdot Pr^{a_2} \cdot \dot{q}^{a_3} \cdot n^{a_4} \cdot \\ \cdot \left(\frac{s}{d_o}\right)^{a_5} \cdot \left(\frac{s-d_o}{d_o}\right)^{a_6} \cdot \left(\frac{s-d_o}{d_o} \cdot \frac{n-1}{n}\right)^{a_7} \quad [-] \end{aligned}\right\}. \tag{5.10}$$

U páté varianty klesla průměrná chyba na $(6{,}1 \pm 4{,}9)$ % u hladkého svazku, u pískovaného svazku na $(7{,}1 \pm 5{,}9)$ %, a u rádlovaného svazku na $(8{,}3 \pm 6{,}9)$ %. Což je průměrný pokles oproti čtvrté variantě cca 26,1 %. Přesto stále rovnice nezohledňují rozteč

trubek ve svazku. Proto je v sedmé variantě přidán člen, ve kterém jsou v poměru rozteč trubek (s) s vnější průměrem trubky (d_o) a v šesté variantě není uvažován počet trubek (n). Owens (1978) **[13]** ve svých rovnicích nezohledňuje přímo rozteč trubek, ale mezeru mezi nimi. Proto je testována devátá varianta, ve které je člen (s/d_o) nahrazen $[(s-d_o)/d_o]$, resp. u osmé varianty není uvažován počet trubek. U jedenácté varianty je člen $[(s-d_o)/d_o]$ rozšířen o poměr počtu mezer mezi trubkami $(n-1)$ s celkovým počtem trubek (n), resp. u desáté varianty není jako samostatný člen uvažován počet trubek.

Tab. 10 Souhrnná tabulka regresní analýzy rovnice A (AS-H/P/R)

	Průměrná chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	Maximální chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	$s_{reg,Nu}$ [%]	ρ^2 [%]	Počet hodnot s chybou větší než >10 % [%]	>15 % [%]	>20 % [%]	>30 % [%]
A1H	23,5 ± 15,8	86,6	27,2	43,8	74,6	64,8	54,5	33,0
A2H	17,6 ± 13,0	86,7	18,3	75,1	65,1	49,8	36,4	17,5
A3H	17,6 ± 12,6	73,9	19,3	72,2	66,6	51,3	38,2	15,8
A4H	7,9 ± 7,1	59,4	11,3	89,9	30,1	13,1	6,6	2,2
A5H	6,1 ± 4,9	75,5	7,5	95,6	19,4	4,6	1,1	0,2
A6H	7,4 ± 6,0	56,4	9,4	93,0	27,4	10,8	4,4	0,3
A7H	5,9 ± 4,7	75,6	7,0	96,2	17,2	3,3	0,9	0,2
A8H	7,4 ± 6,0	58,1	9,5	92,9	27,0	10,8	4,4	0,3
A9H	5,8 ± 4,7	75,6	6,9	96,2	16,8	3,2	0,8	0,2
A10H	7,5 ± 6,1	57,9	9,6	92,7	27,5	11,1	4,6	0,3
A11H	5,8 ± 4,7	75,5	6,9	96,2	16,8	3,1	0,8	0,2
A1P	22,0 ± 13,9	78,1	25,1	57,3	78,0	65,1	51,4	28,9
A2P	20,3 ± 16,6	91,4	21,0	71,0	66,3	52,4	42,5	25,2
A3P	19,3 ± 13,3	62,4	21,1	70,6	69,5	56,8	43,9	24,0
A4P	10,3 ± 9,4	55,8	14,4	85,6	36,7	22,2	17,3	4,7
A5P	7,1 ± 5,9	94,0	8,3	95,3	24,5	9,1	2,4	0,6
A6P	8,4 ± 6,5	44,0	11,3	91,1	33,3	14,0	6,2	0,6
A7P	6,7 ± 5,3	64,7	8,1	95,5	22,2	7,1	1,3	0,4
A8P	8,3 ± 6,4	42,4	11,3	91,1	32,5	15,0	5,9	0,4
A9P	6,6 ± 5,2	63,1	8,0	95,6	22,1	6,6	1,2	0,4
A10P	8,4 ± 6,5	43,1	11,5	90,8	32,9	15,8	6,3	0,5
A11P	6,6 ± 5,2	63,0	8,0	95,6	22,0	6,6	1,2	0,4
A1R	28,4 ± 18,5	97,0	33,5	34,7	80,3	69,9	61,2	44,2
A2R	21,0 ± 16,5	112,1	23,0	70,6	69,4	54,4	41,6	25,4
A3R	21,4 ± 15,4	104,9	23,1	69,3	72,1	58,2	47,0	24,8
A4R	11,0 ± 8,0	78,4	14,2	87,8	48,7	28,1	13,4	2,4
A5R	8,3 ± 6,9	102,6	10,4	93,5	31,4	13,5	5,8	1,2
A6R	9,1 ± 6,6	64,1	11,5	91,9	39,0	19,4	5,9	0,7
A7R	7,6 ± 6,0	88,0	9,7	94,4	29,4	10,8	3,1	0,5
A8R	9,0 ± 6,6	62,4	11,5	92,0	37,9	18,7	5,7	0,7
A9R	7,5 ± 5,9	89,8	9,5	94,5	28,5	10,3	3,0	0,5
A10R	9,2 ± 6,6	62,0	11,6	91,7	39,0	19,3	6,0	0,8
A11R	7,5 ± 6,0	90,3	9,6	94,5	28,6	10,3	3,0	0,5

U variant 6, 8 a 10, které zohledňují pouze rozteč trubek ve svazku, ale v rovnici není uvažován jako samostatný člen počet trubek, sice klesla maximální chyba regresní analýzy

oproti páté variantě, ale jinak došlo ke zvýšení průměrné chyby analýzy společně s její směrodatnou odchylkou u všech třech testovaných množin. U 7, 9 a 11 varianty, které zohledňují jak rozteč trubkového svazku, tak i počet trubek, který v rovnici figuruje jako samostatný člen a je pro něj hledán vlastní regresní koeficient (a_4), je dosahována nejlepší shoda s původními (prokládanými) hodnotami a ve všech třech případech u jednotlivých typů povrchů jsou výsledky přibližně shodné. A to jak v případě variačního koeficientu, tak i v případě indexu determinace.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo u hladkého trubkového svazku s variačním koeficientem 6,9 %, poté následují pískovaný svazek s variačním koeficientem 8,0 % a rádlovaný trubkový svazek s variačním koeficientem 9,5 %. Indexy determinace mají stejné pořadí, jako variační odchylky a jsou 96,2 %, 95,5 % a 94,5 %. V tab. 11 jsou pro jednotlivé varianty uvedeny regresní koeficienty.

Tab. 11 Regresní koeficienty varianty A do rovnice (5.10) (AS-H/P/R)

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
A1H	$8{,}66\cdot10^{-3}$	0,628	0	0	0	0	0	0
A2H	$1{,}52\cdot10^{-6}$	0	6,620	0	0	0	0	0
A3H	$1{,}07\cdot10^{-5}$	0,247	4,785	0	0	0	0	0
A4H	$3{,}89\cdot10^{-5}$	0,422	-3,310	1,262	0	0	0	0
A5H	$1{,}99\cdot10^{-9}$	-0,119	-0,603	1,907	0,803	0	0	0
A6H	$5{,}86\cdot10^{-5}$	0,441	-3,530	1,261	0	-0,185	0	0
A7H	$7{,}81\cdot10^{-9}$	-0,045	-1,030	1,831	0,708	-0,091	0	0
A8H	$4{,}78\cdot10^{-5}$	0,440	-3,473	1,258	0	0	-0,068	0
A9H	$6{,}84\cdot10^{-9}$	-0,047	-0,998	1,832	0,711	0	-0,036	0
A10H	$5{,}40\cdot10^{-5}$	0,449	-3,514	1,247	0	0	0	-0,066
A11H	$6{,}65\cdot10^{-9}$	-0,048	-0,996	1,832	0,719	0	0	-0,036
A1P	$5{,}04\cdot10^{-3}$	0,700	0	0	0	0	0	0
A2P	$3{,}41\cdot10^{-7}$	0	7,374	0	0	0	0	0
A3P	$2{,}87\cdot10^{-5}$	0,429	3,625	0	0	0	0	0
A4P	$5{,}76\cdot10^{-5}$	0,427	-2,556	1,076	0	0	0	0
A5P	$8{,}08\cdot10^{-10}$	-0,165	0,196	1,864	0,852	0	0	0
A6P	$1{,}48\cdot10^{-4}$	0,446	-3,397	1,146	0	-0,335	0	0
A7P	$1{,}73\cdot10^{-8}$	-0,018	-0,852	1,714	0,653	-0,162	0	0
A8P	$1{,}08\cdot10^{-4}$	0,445	-3,349	1,145	0	0	-0,126	0
A9P	$1{,}62\cdot10^{-8}$	-0,014	-0,863	1,710	0,647	0	-0,064	0
A10P	$1{,}40\cdot10^{-4}$	0,463	-3,427	1,121	0	0	0	-0,126
A11P	$1{,}57\cdot10^{-8}$	-0,014	-0,867	1,709	0,660	0	0	-0,064
A1R	$8{,}67\cdot10^{-3}$	0,663	0	0	0	0	0	0
A2R	$1{,}94\cdot10^{-7}$	0	7,891	0	0	0	0	0
A3R	$1{,}67\cdot10^{-6}$	0,263	5,875	0	0	0	0	0
A4R	$9{,}09\cdot10^{-6}$	0,378	-3,157	1,415	0	0	0	0
A5R	$3{,}20\cdot10^{-10}$	-0,145	-0,802	2,139	0,880	0	0	0
A6R	$2{,}15\cdot10^{-5}$	0,413	-4,020	1,484	0	-0,286	0	0
A7R	$5{,}61\cdot10^{-9}$	-0,005	-1,891	2,021	0,682	-0,185	0	0
A8R	$1{,}74\cdot10^{-5}$	0,411	-4,016	1,485	0	0	-0,112	0
A9R	$5{,}15\cdot10^{-9}$	-0,003	-1,914	2,020	0,678	0	-0,075	0
A10R	$2{,}10\cdot10^{-5}$	0,424	-4,066	1,467	0	0	0	-0,110
A11R	$4{,}71\cdot10^{-9}$	-0,006	-1,903	2,023	0,697	0	0	-0,074

Při testování druhé navržené funkce (B), tedy lineární kombinace mocninných funkcí, bylo postupováno stejně, jako v případě mocninné funkce (A). Pomocí regresní analýzy byly hledány koeficienty a_1 až a_7 a odhadovány mocnitele b_1 až b_7, resp. v poslední fázi

zpřesňovány pomocí funkce „ŘEŠITEL“. Obecný tvar rovnice pro všech jedenáct testovaných variant se svým značením navazuje na rovnici (5.9) a její tvar je

$$\left.\begin{aligned} Nu = a_0 + a_1 \cdot Re^{b_1} + a_2 \cdot Pr^{b_2} + a_3 \cdot \dot{q}^{b_3} + a_4 \cdot n^{b_4} + \\ + a_5 \cdot \left(\frac{s}{d_o}\right)^{b_5} + a_6 \cdot \left(\frac{s-d_o}{d_o}\right)^{b_6} + a_7 \cdot \left(\frac{s-d_o}{d_o} \cdot \frac{n-1}{n}\right)^{b_7} \; [-] \end{aligned}\right\}. \qquad (5.11)$$

Tab. 12 Souhrnná tabulka regresní analýzy rovnice B (AS-H/P/R)

	Průměrná chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	Maximální chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	$s_{reg,Nu}$ [%]	ρ^2 [%]	Počet hodnot s chybou větší než >10 % [%]	>15 % [%]	>20 % [%]	>30 % [%]
B1H	20,6 ± 13,2	160,6	24,6	51,8	75,0	62,3	47,4	26,3
B2H	15,3 ± 11,8	129,9	16,6	78,2	62,2	42,6	26,4	9,5
B3H	13,1 ± 9,3	90,0	15,3	81,4	57,3	38,0	22,4	4,3
B4H	10,7 ± 35,7	2146,0	10,5	91,2	31,6	16,0	8,7	2,9
B5H	6,6 ± 6,3	143,6	8,1	94,8	21,2	8,2	2,9	0,8
B6H	12,7 ± 56,3	2723,7	10,1	91,9	33,2	17,2	10,1	3,7
B7H	6,4 ± 7,0	272,7	7,2	95,9	19,1	6,7	2,3	11,0
B8H	12,3 ± 49,2	2907,5	10,4	91,4	36,1	18,3	10,6	4,0
B9H	6,4 ± 7,0	273,3	7,2	95,9	19,1	6,7	2,3	1,0
B10H	16,4 ± 117,9	9046,2	11,1	90,2	37,7	21,9	12,4	2,6
B11H	6,4 ± 6,7	221,8	7,3	95,8	18,9	6,4	2,0	0,9
B1P	19,6 ± 12,4	137,3	23,0	62,5	73,3	58,7	46,0	22,4
B2P	17,4 ± 15,5	109,2	17,9	76,5	61,3	45,7	33,3	15,9
B3P	14,8 ± 10,9	157,4	16,6	80,4	61,8	43,5	27,8	9,1
B4P	10,8 ± 8,6	50,4	13,6	87,0	43,2	28,6	17,7	1,9
B5P	8,9 ± 15,1	978,1	8,8	94,5	28,4	13,4	6,9	3,6
B6P	9,7 ± 8,3	87,6	11,8	90,2	37,7	20,7	11,5	3,5
B7P	8,6 ± 16,0	870,1	8,1	95,4	25,5	12,1	6,5	3,3
B8P	9,7 ± 8,3	89,7	11,8	90,3	37,6	20,6	11,5	3,5
B9P	8,7 ± 17,4	1269,5	8,3	95,2	27,4	12,4	6,2	3,3
B10P	9,9 ± 8,3	99,2	12,1	89,8	39,4	21,3	11,8	3,3
B11P	8,8 ± 13,5	903,6	8,6	94,8	28,9	12,9	6,2	3,4
B1R	25,4 ± 15,3	82,4	30,8	42,0	80,5	69,0	59,9	38,8
B2R	18,8 ± 14,6	103,6	20,1	75,1	68,3	51,7	37,8	18,4
B3R	18,7 ± 13,9	92,1	20,1	75,2	68,9	52,1	38,8	17,5
B4R	11,7 ± 9,0	376,4	14,6	86,9	51,3	30,7	16,0	2,7
B5R	11,4 ± 9,1	115,4	14,1	87,9	49,4	27,6	12,9	3,2
B6R	10,5 ± 8,7	201,2	12,2	90,8	45,2	24,4	10,7	2,5
B7R	9,9 ± 10,3	412,3	11,9	91,3	42,1	20,8	8,7	2,2
B8R	10,4 ± 8,6	350,7	12,1	91,0	44,9	23,2	10,6	2,6
B9R	9,9 ± 9,6	314,0	11,9	91,4	41,8	19,8	8,6	2,2
B10R	10,5 ± 8,7	369,3	12,3	90,8	45,8	23,8	11,0	2,5
B11R	9,9 ± 9,7	322,5	11,9	91,3	41,9	20,1	8,7	2,3

U prvních třech testovaných variant, kde je Nusseltovo číslo funkcí Reynoldsova nebo Prandtlova čísla, jsou průměrné hodnoty chyby analýzy oproti prvním třem variantám mocné

funkce (A) nižší v řádech jednotek procentních bodů, ale maximální chyby analýzy jsou v některých případech téměř až dvojnásobné, jak je patrné z dílčích výsledků v tab. 12.

U čtvrté a dalších variant se již nepotvrdila výhodnost rovnice lineární kombinace mocninných funkcí, resp. u jednotlivých tvarů mocninné funkce bylo dosahováno lepších výsledků. Testování jednotlivých členů, které zohledňují rozteč trubkového svazku, mělo kladný vliv na výslednou průměrnou chybu analýzy společně s její směrodatnou odchylkou, ale u hladkého trubkového svazku byl nejlepší výsledek dosažen u jedenácté varianty, kde je průměrná chyba $(6{,}4 \pm 6{,}7)$ %, což je o cca 10 % více oproti variantě A9H, u pískovaného svazku je nejlepší průměrná chyba $(8{,}6 \pm 16{,}0)$ %, což je oproti variantě A9P o více jak 30 % více a u rádlovaného svazku je nejmenší průměrná hodnota chyby $(9{,}9 \pm 9{,}6)$ %, což je oproti variante A9R o cca 32 % více. V tab. 13 jsou uvedeny regresní koeficienty jednotlivých variant.

Tab. 13 Regresní koeficienty varianty B do rovnice (5.11) (AS-H/P/R)

	a_0	a_1 / b_1	a_2 / b_2	a_3 / b_3	a_4 / b_4	a_5 / b_5	a_6 / b_6	a_7 / b_7
B1H	1,166	-3,951	0	0	0	0	0	0
		-0,278	0	0	0	0	0	0
B2H	1,529	0	-85,846	0	0	0	0	0
		0	-2,319	0	0	0	0	0
B3H	-1,701	-167,698	0,362	0	0	0	0	0
		-1,413	0,951	0	0	0	0	0
B4H	0,313	-64,435	$-9{,}55\cdot10^{-12}$	$2{,}32\cdot10^{-9}$	0	0	0	0
		-1,124	10,614	1,776	0	0	0	0
B5H	0,102	$8{,}61\cdot10^{4}$	$-6{,}60\cdot10^{-16}$	$5{,}36\cdot10^{-5}$	-1,307	0	0	0
		-2,835	16,217	0,932	-0,611	0	0	0
B6H	0,348	-391,277	$7{,}533\cdot10^{-5}$	$4{,}87\cdot10^{-12}$	0	-0,052	0	0
		-1,508	3,823	2,321	0	0,916	0	0
B7H	0,607	2502,172	$-2{,}35\cdot10^{-15}$	0,000	-1,766	20,775	0	0
		-2,032	15,547	0,856	-0,275	-28,975	0	0
B8H	0,312	-288,103	$4{,}40\cdot10^{-5}$	$1{,}76\cdot10^{-13}$	0	0	-0,021	0
		-1,436	4,046	2,626	0	0	2,468	0
B9H	0,603	2 526,252	$-3{,}12\cdot10^{-15}$	0,000	-1,763	0	$2{,}87\cdot10^{-11}$	0
		-2,034	15,408	0,856	-0,276	0	-15,033	0
B10H	0,018	$-1{,}90\cdot10^{5}$	$3{,}271\cdot10^{-15}$	$9{,}63\cdot10^{-5}$	0	0	0	$7{,}05\cdot10^{-6}$
		-2,873	15,669	0,810	0	0	0	-5,227
B11H	0,380	4 677,423	$-3{,}76\cdot10^{-19}$	0,000	-1,547	0	0	$2{,}55\cdot10^{-6}$
		-2,190	19,858	0,846	-0,351	0	0	-5,881
B1P	-1,883	1,294	0	0	0	0	0	0
		0,093	0	0	0	0	0	0
B2P	1,886	0	-34,423	0	0	0	0	0
		0	-1,672	0	0	0	0	0
B3P	-2,204	-5,536	0,776	0	0	0	0	0
		-0,657	0,665	0	0	0	0	0
B4P	-0,310	0,110	$-2{,}52\cdot10^{-57}$	$2{,}68\cdot10^{-7}$	0	0	0	0
		0,238	64,600	1,338	0	0	0	0
B5P	-16,086	219,196	$-2{,}61\cdot10^{-98}$	0,000	14,764	0	0	0
		-1,438	111,867	0,760	0,023	0	0	0
B6P	-0,551	0,005	3,548	$1{,}79\cdot10^{-6}$	0	0,281	0	0
		0,597	-1,163	1,176	0	-5,836	0	0
B7P	-5,536	109,212	$-4{,}27\cdot10^{-155}$	0,001	4,275	22,937	0	0
		-1,305	177,314	0,736	0,069	-29,521	0	0

Tab. 13 Regresní koeficienty varianty B do rovnice (5.11) (AS-H/P/R) **– pokračování**

	a_0	a_1 / b_1	a_2 / b_2	a_3 / b_3	a_4 / b_4	a_5 / b_5	a_6 / b_6	a_7 / b_7
B8P	-0,520	0,006	3,828	$1{,}76\cdot10^{-6}$	0	0	0,010	0
		0,589	-1,254	1,177	0	0	-1,513	0
B9P	-6,093	1 718,353	$-1{,}86\cdot10^{-82}$	$3{,}13\cdot10^{-4}$	5,129	0	$3{,}32\cdot10^{-11}$	0
		-2,016	93,409	0,773	0,049	0	-15,040	0
B10P	0,440	0,005	-0,107	$1{,}35\cdot10^{-6}$	0	0	0	0,019
		0,612	0,928	1,201	0	0	0	-1,005
B11P	-3,179	3 284,310	$-2{,}40\cdot10^{-77}$	0,000	2,268	0	0	0,001
		-2,172	87,536	0,795	0,100	0	0	-2,359
B1R	$-2{,}18\cdot10^{7}$	$2{,}18\cdot10^{7}$	0	0	0	0	0	0
		$1{,}26\cdot10^{-8}$	0	0	0	0	0	0
B2R	-1,678	0	0,090	0	0	0	0	0
		0	1,715	0	0	0	0	0
B3R	$-6{,}87\cdot10^{6}$	$6{,}87\cdot10^{6}$	0,030	0	0	0	0	0
		$4{,}68\cdot10^{-9}$	2,138	0	0	0	0	0
B4R	-0,274	0,070	$-3{,}91\cdot10^{-10}$	$1{,}02\cdot10^{-7}$	0	0	0	0
		0,306	10,150	1,481	0	0	0	0
B5R	-0,260	0,008	$-4{,}54\cdot10^{-54}$	$4{,}21\cdot10^{-08}$	0,042	0	0	0
		0,419	61,315	1,578	0,841	0	0	0
B6R	$-3{,}33\cdot10^{6}$	$3{,}54\cdot10^{6}$	$-1{,}77\cdot10^{-38}$	$1{,}04\cdot10^{-8}$	0	$-2{,}04\cdot10^{5}$	0	0
		0,000	43,265	1,683	0	$7{,}97\cdot10^{-7}$	0	0
B7R	$1{,}75\cdot10^{5}$	0,176	$-2{,}01\cdot10^{-59}$	$1{,}33\cdot10^{-7}$	0,352	$-1{,}75\cdot10^{5}$	0	0
		0,114	67,585	1,474	0,299	$7{,}97\cdot10^{-7}$	0	0
B8R	$-3{,}41\cdot10^{6}$	$3{,}41\cdot10^{6}$	$-7{,}35\cdot10^{-49}$	$2{,}4\cdot10^{-8}$	0	0	-2,095	0
		$3{,}66\cdot10^{-8}$	55,313	1,604	0	0	0,030	0
B9R	0,753	0,171	$-1{,}99\cdot10^{-60}$	$9{,}89\cdot10^{-8}$	0,447	0	-1,809	0
		0,118	68,756	1,500	0,254	0	0,031	0
B10R	$-3{,}53\cdot10^{6}$	$3{,}55\cdot10^{6}$	$-9{,}45\cdot10^{-50}$	$2{,}22\cdot10^{-8}$	0	0	0	$-1{,}45\cdot10^{4}$
		0,000	56,347	1,609	0	0	0	$4{,}22\cdot10^{-6}$
B11R	-0,619	0,157	$-6{,}72\cdot10^{-60}$	$9{,}64\cdot10^{-8}$	0,579	0	0	-0,588
		0,120	68,143	1,503	0,225	0	0	0,098

Ze všech testovaných variant nejlépe u všech třech testovaných povrchů vycházela varianta A9, tedy varianta, u které je Nusseltovo číslo závislé na Reynoldsově čísle, Prandtlově čísle, měrném tepelném příkonu, počtu trubek ve svazku a poměru mezery mezi trubkami ve svazku k vnějšímu průměru trubek. Pro tuto variantu je v Příloze III uvedena tabulka s dílčími statistickými výsledky jednotlivých typů povrchů, roztečí a počtů trubek a jednotlivé průběhy s chybami regresní analýzy jsou vykresleny v grafech za tabulkou.

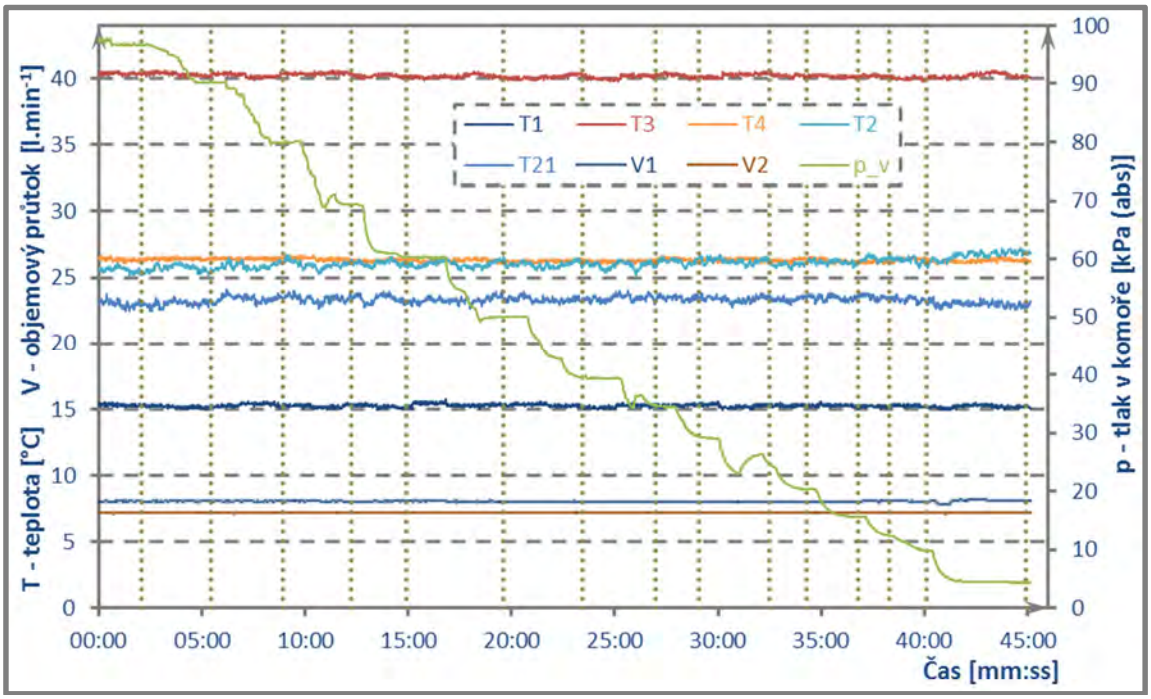
U varianty A9 byla testována i významnost jednotlivých koeficientů, které byly nalezeny pomocí regresní analýzy. V Microsoft Excel byl využit klasický postup výpočtu regresní analýzy, jehož výsledkem je mimo jiné tzv. „P-hodnota“, která vyjadřuje nejvyšší hladinu, na které daný koeficient není zamítnut. Pokud je například 95,0% interval spolehlivosti, tj. daná veličina se bude vyskytovat v intervalu s touto pravděpodobností, pak maximální P-hodnota pro významný člen je $0{,}05\,[-]$ **[53]**. Při testování jednotlivých koeficientů vyšly jednotlivé P-hodnoty ve většině případů nulové (u koeficientu a_0 a u všech koeficientů zohledňujících počet trubek, rozteč trubek a měrný tepelný příkon), nebo blízké nule, jako například cca $3{,}2\cdot10^{-176}\,[-]$, (členy zohledňující Prandtlovo a Reynoldsovo číslo). Nejvyšší P-hodnota byla $0{,}002\,[-]$ a proto jsou všechny použité členy mocninné funkce statisticky významné.

6 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ U PODTLAKOVÉHO STANDU

6.1 Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku při podtlaku

Vzhledem ke komplikovanosti a náročnosti přípravy svazku a jeho uvedení do provozu v podtlakovém standu, byl na základě výsledků na atmosférickém standu vybrán a vyroben svazek s osmi hladkými trubkami, u kterého lze vytápět pouze první čtyři nebo šest trubek. Rozteč trubek byla zvolena ve výši 20,0 mm (B1).

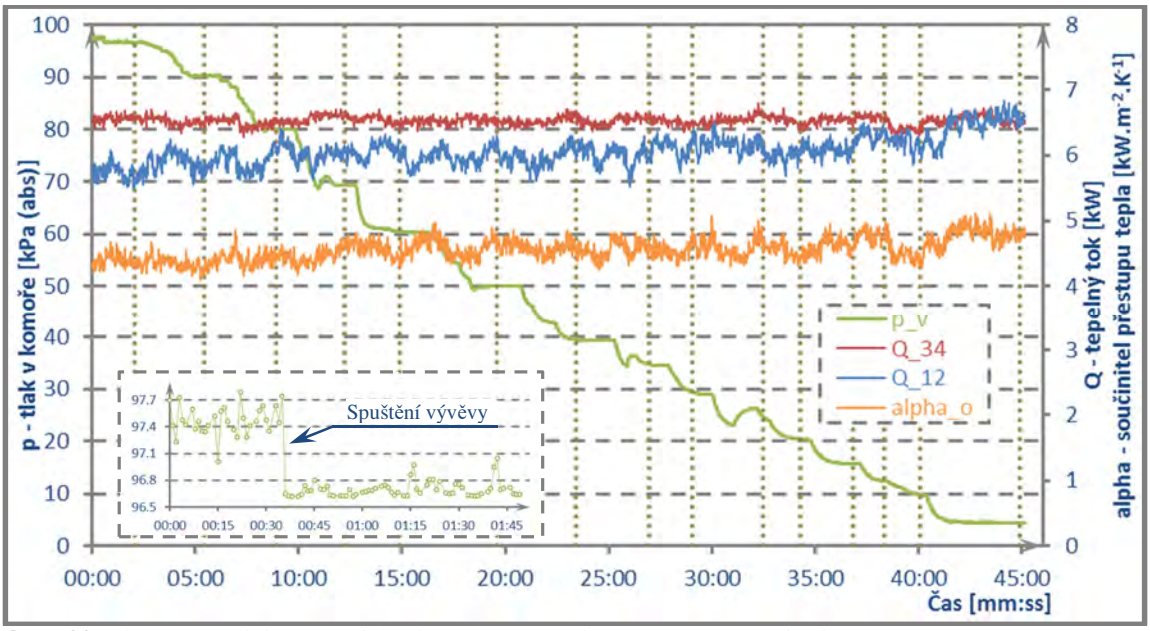
Na obr. 43 je uvedena ukázka záznamu hlavních měřených veličin v závislosti na době trvání experimentu na svazku s šesti trubkami. Průtok skrápěcí kapaliny byl cca $\dot{V}_1 = 8{,}05 \pm 0{,}04\ l \cdot min^{-1}$, který je vynesen modrou dvojitou čarou. Dále jsou na obrázku uvedeny vstupní teplota topné vody $(t_3 = 40{,}2 \pm 0{,}2°C)$, teplota skrápěcí kapaliny měřená v distribuční trubce $(t_1 = 15{,}3 \pm 0{,}1\ °C)$, teplota skrápěcí vody mezi čtvrtou a pátou trubkou $(t_{21} = 23{,}3 \pm 0{,}3\ °C)$ a výstupní teplota skrápěcí vody (za šestou trubkou; $t_2 = 26{,}1 \pm 0{,}4°C$). V průběhu měření byl měněn pouze tlak v komoře (p_v), který je vynesen zelenou čarou, a udržovány hodnoty T1, T3, V1 a V2 na přibližně konstantní úrovni.



Obr. 43 Záznam hlavních měřených veličin v závislosti na době experimentu (PS-H-B1-6-15/40-8)

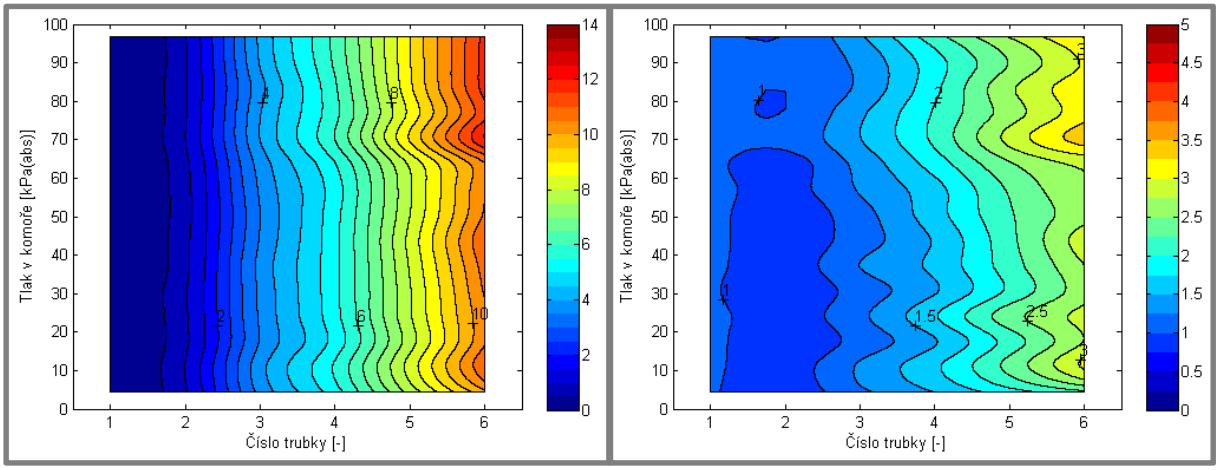
Na obr. 44 jsou mimo tlaku v komoře (p_v) vyneseny odvozené veličiny v závislosti na době trvání experimentu. Jsou jimi tepelný tok odebraný topné kapalině (Q_34), tepelný tok přijatý skrápěcí kapalinou (Q_12) a hlavní zkoumaná veličina, kterou je součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku (alpha_o) stanovená podle rovnice (3.23). Součinitel přestupu tepla na vnitřní (topné) straně trubek (alpha_i) se po celou dobu měření pohyboval na průměrné úrovni $6\,471{,}1 \pm 19{,}5\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Na počátku měření byl v nádobě atmosférický tlak ve výši cca $97{,}5 \pm 0{,}2\ kPa(abs)$ a součinitel přestupu tepla na povrchu svazku se pohyboval na průměrné úrovni cca $4\,356{,}9 \pm 73{,}6\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Po cca 35 sekundě záznamu byla spuštěna vývěva a docházelo k mírnému odsávání plynů v nádobě. Tlak v nádobě poklesl na cca $96{,}8 \pm 0{,}2\ kPa$, tj. o cca $0{,}7\ kPa$ a součinitel vzrostl na cca $4\,415{,}5 \pm 90{,}8\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ tj. o cca $58{,}6\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Zmíněný skok v záznamu tlaku je patrný ve vnořeném grafu na obr. 44. Postupným snižováním tlaku v komoře měl součinitel vzrůstající tendenci. Při konečném zkoumaném tlaku cca $4{,}4 \pm 0{,}1\ kPa$ dosahoval součinitel přestupu tepla na povrchu trubkového svazku průměrné hodnoty cca $4\,800{,}4 \pm 108{,}4\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.



Obr. 44 Odvozené veličiny v závislosti na době experimentu (PS-H-B1-6-15/40-8)

Při experimentu byly pořizovány termovizní kamerou FLIR SC 660 sekvence v místě prostředního nahlížecího hrdla, ve kterém je umístěno FLIR Infrared Inspection Windows. Celkem bylo pořízeno 15 sekvencí. Na obr. 43 a obr. 44 jsou vyznačeny časy, ve kterých docházelo ke snímání, svislou tečkovanou hnědou čarou. Každá sekvence obsahovala 181 $snímků$, které byly pořizovány po dobu 6 $sekund$, tj. při frekvenci 30 Hz. Výsledkem dané sekvence byly průměrná teplota povrchu svazku (skrápěcí vody) na dané trubce a její směrodatná odchylka. Metodika zpracování termogramů je uvedena v kapitole 5.2 Teplotní pole na povrchu skrápěného svazku.



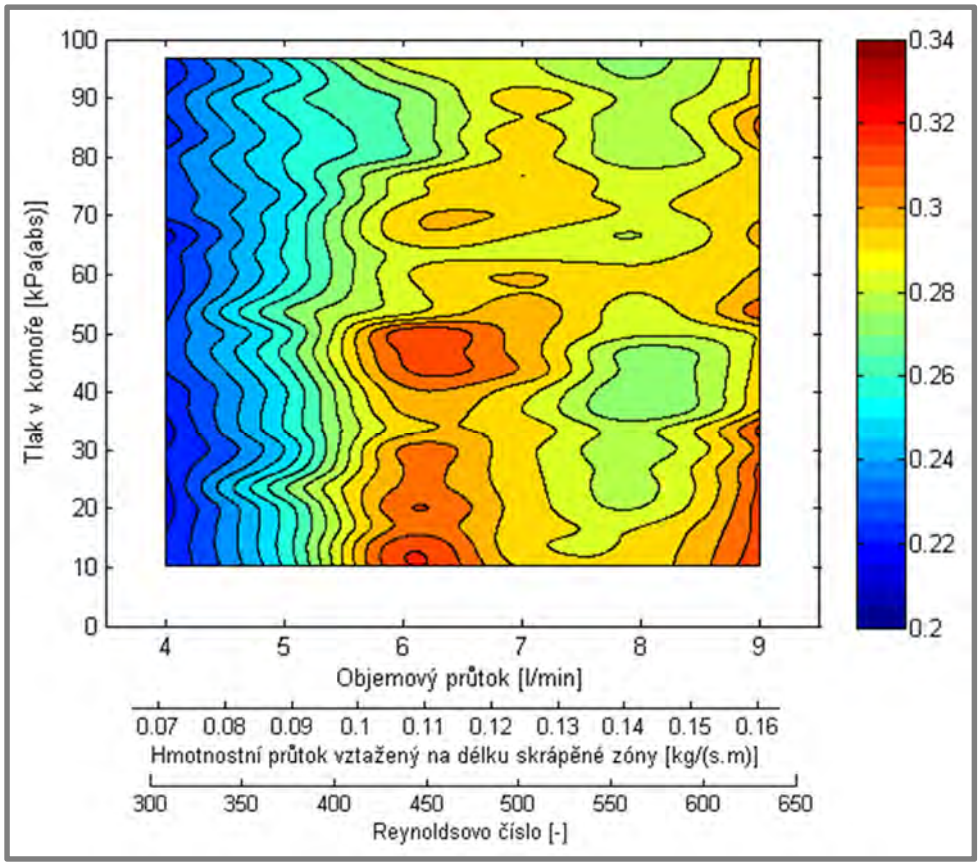
Obr. 45 Teplotní gradient na trubkovém svazku (vlevo), směrodatná odchylka průměrné teploty (vpravo) (PS-H-B1-6-15/40-8)

Na obr. 45 vlevo je vykreslena průměrná teplotní diference vody na trubkovém svazku vůči teplotě na první trubce v daném čase při měřeném tlaku, kde na vodorovné ose je číslo trubky a na svislé ose je vynesen absolutní tlak v komoře. Na obr. 45 vpravo je vykreslena směrodatná odchylka dané teploty, tj. rozmezí teplot, ve kterém se po zkoumanou dobu 6 s pohybovala průměrná hodnota. Vrstevnicové grafy byly vytvořeny v programu Matlab R2010b. Z obou vrstevnicových grafů lze vyčíst, že při snižování tlaku v komoře docházelo ke zmenšení teplotního spádu na trubkovém svazku, ale směrodatná odchylka, která byla do tlaku cca 55 $kPa(abs)$ na šesté (poslední) trubce až 3,5 °C se zmenšovala. Tj. teplotní gradient na svazku sice mírně klesl, ale teplotní pole bylo stabilnější.

Tab. 14 Souhrn základních měřených a odvozených veličin (PS-H-B1-6-15/40)

$\dot{V}_1$ $[l \cdot min^{-1}]$	t_1 [°C]	$\dot{V}_2$ $[l \cdot min^{-1}]$	t_3 [°C]	p_v [kPa]	Γ_1 $[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$	Re [–]	$\dot{q}_{34}$ $[kW \cdot m^{-2}]$
4,02 ± 0,03	15,5 ± 0,2	7,14 ± 0,01	40,3 ± 0,5	3,8 – 96,5	0,071 1 ± 0,000 5	308,4 ± 2,5	22,2 ± 0,1
5,02 ± 0,02	15,5 ± 0,1	7,14 ± 0,01	40,5 ± 0,2	5,4 – 97,0	0,088 8 ± 0,000 4	376,4 ± 2,3	25,4 ± 0,1
6,02 ± 0,02	15,4 ± 0,4	7,17 ± 0,01	40,5 ± 0,3	3,3 – 97,2	0,106 6 ± 0,000 3	444,6 ± 4,9	27,6 ± 0,1
7,02 ± 0,01	15,4 ± 0,1	7,15 ± 0,01	40,4 ± 0,2	4,8 – 97,7	0,124 3 ± 0,000 2	499,7 ± 3,9	29,2 ± 0,1
8,02 ± 0,02	15,3 ± 0,3	7,16 ± 0,01	40,4 ± 0,3	2,7 – 97,6	0,141 9 ± 0,000 3	558,0 ± 12,4	30,0 ± 0,1
9,03 ± 0,01	15,2 ± 0,4	7,16 ± 0,01	40,3 ± 0,2	2,4 – 96,4	0,159 8 ± 0,000 2	630,6 ± 10,0	30,5 ± 0,1

V tab. 14 jsou uvedeny pro zkoumané průtoky skrápěcí kapaliny $(\dot{V}_1)$ průměrné teploty skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky (t_1), průtok topné kapaliny $(\dot{V}_2)$ a její teplota na vstupu do svazku (t_3) a rozsah tlaku v komoře (p_v) při daném experimentu, kde nejvyšší hodnotou je atmosférický tlak v čase začátku experimentu. Dále jsou v tabulce uvedeny hodnoty dopočítaného hmotnostního průtok skrápěcí kapaliny vztaženého na délku výměníku (Γ_1), Reynoldsovo číslo skrápěcí kapaliny (Re) a tepelný příkon topné kapaliny vztažený na vnější teplosměnnou plochu výměníku $(\dot{q}_{34})$.



Obr. 46 Nusseltovo číslo v závislosti na průtoku skrápěcí kapaliny a tlaku v komoře (PS-H-B1-6-15/40)

Z naměřených hodnot byl vypočítán součinitel přestupu tepla podle rovnice (3.23), ze kterého bylo odvozeno Nusseltovo číslo podle rovnice (1.11). Z dílčích souborů dat byly vybrány hodnoty odvozené při atmosférickém tlaku a při tlakových úrovních 95,0 kPa až 10,0 kPa po 5,0 kPa. Pro dílčí tlakové úrovně byla vypočítána průměrná hodnota, kde průměrná hodnota směrodatné odchylky tlaku v komoře je cca 0,4 kPa. Tyto hodnoty byly lineárně interpolovány kubickou metodou v závislosti na tlaku v komoře a objemovém průtoku

skrápěcí kapaliny, resp. v závislosti na hmotnostním průtoku skrápěcí kapaliny vztaženém na délku skrápěcí zóny a Reynoldsově čísle, které jsou taktéž vyneseny jako další vedlejší vodorovné osy na obr. 46. Výsledné hodnoty Nusseltova čísla jsou vynesena v rozmezí $0{,}2\ [-]$ až $0{,}34\ [-]$ a směrodatná odchylka jednotlivých hodnot v matici před interpolací nepřesahuje $0{,}006\ [-]$. Z grafu jsou patrné nejmenší hodnoty Nusseltova čísla při malém průtoku. Při průtoku $4{,}0\ l \cdot min^{-1}$ je průměrná hodnota $0{,}224 \pm 0{,}004\ [-]$, ale při jeho dalším zvyšování hodnota narůstá. Při cca $5{,}0\ l \cdot min^{-1}$ je průměrná hodnota $0{,}257 \pm 0{,}005\ [-]$ a při cca $6{,}0\ l \cdot min^{-1}$ je průměrná hodnota $0{,}295 \pm 0{,}015\ [-]$.

V rozmezí průtoků cca $5{,}0$ až $7{,}5\ l \cdot min^{-1}$ je nejvýznamnější vliv mírného podtlaku v komoře na Nusseltovo číslo, jehož hodnota prudce stoupala do cca $80{,}0\ kPa(abs)$. Tento trend koresponduje s výsledky dosaženými při měření termovizní kamerou, resp. teplotní diference v tomto úseku klesala společně se svojí směrodatnou odchylkou, což vedlo ke zrovnoměrněním teplotního pole na trubkovém svazku.

U nejnižších měřených tlaků v komoře (cca 10 až $15\ kPa$) je nárůst Nusseltova čísla až k hodnotě cca 0,32 [-], což je možný počátek varu na poslední trubce, ale vzhledem k malé ploše, na které se projevuje, nedochází ještě k významnému nárůstu. Proto jsou hodnoty Nusseltova čísla vyneseny pouze do tlaku $10\ kPa(abs)$. Při nižších tlacích a tomto teplotním spádu je nutné pro vyhodnocení použít model pro dvoufázové proudění, který je odvozený v kapitole 3.4, a tyto výsledky jsou uvedeny v kapitole 6.3.

Při jednofázovém proudění byl vliv podtlaku na součinitel přestupu tepla testován v podtlakovém standu na trubkovém svazku při vytápění prvních čtyř, šesti, nebo všech osmi trubek. Byly testovány tři teplotní spády skrápěcí a topné vody. A to 20/40, 15/40 a 20/50, kde prvním číslem je teplota skrápěcí vody v distribuční trubce a druhým číslem je teplota topné vody na vstupu do svazku. Testované teplotní gradienty tedy byly 20, 25 a 30°C. U všech experimentů byl průtok topné vody udržován na úrovni cca 7,2 litrů za minutu. Průtoky skrápěcí kapaliny byly cca $4{,}0$ a $6{,}0\ l \cdot min^{-1}$ a v případě teplotního spádu 15/40 ještě $5{,}0\ l \cdot min^{-1}$. Průtoky byly po dobu každého experimentu udržovány na přibližně konstantní úrovni. Níže je mezi sebou porovnáno celkem 21 experimentů. V tab. 15 jsou uvedeny základní měřené a odvozené parametry.

Pro další vyhodnocení a porovnání byl součinitel přestupu tepla na povrchu trubkového svazku opět převeden na Nusseltovo číslo. U každého experimentu byly z naměřených dat vybrány hodnoty v rozmezí tlaku $10{,}0$ až $95{,}0\ kPa$ po $5{,}0\ kPa$ a hodnoty při atmosférickém tlaku. Pro každou tlakovou úroveň byla vypočítána jedna průměrná hodnota. Takto vznikly matice o stejné velikosti pro jednotlivé délky svazku, které byly v prostředí Matlab R2010b kubicky interpolovány a vykresleny ve třech vrstevnicových grafech na obr. 47. Nusseltovo číslo je na nich vykresleno v závislosti na tlaku v komoře (svislá osa) a odebraném měrném tepelném toku topné vodě (vodorovná osa), který je v rozmezí 15 až $45\ kW \cdot m^{-2}$, kde uvažovanou plochou je vnější skrápěný povrch trubkového svazku. Rozmezí Nusseltova čísla je u všech třech grafů totožné, tj. $0{,}25$ až $0{,}45\ [-]$, aby bylo možné porovnat jednotlivé průběhy mezi sebou. Takto velké rozmezí ovšem vedlo k tomu, že nejsou zcela patrné mírné nárůsty se snižujícím se tlakem v rámci dílčích měřených tepelných toků.

Vliv velikosti teplosměnné plochy na přenášený měrný tepelný výkon je patrný nejen při pohledu na začátek a konec u jednotlivých trubkových svazků, kde u osmitrubkového svazku je rozmezí $16{,}3$ až $29{,}7\ kW \cdot m^{-2}$, u šesti trubkového svazku $19{,}9$ až $35{,}6\ kW \cdot m^{-2}$ a u čtyřtrubkového svazku $26{,}0$ až $46{,}1\ kW \cdot m^{-2}$, ale především v nárůstu intervalu, ve kterém byly prováděny experimenty při přibližně stejných základních vstupních podmínkách. U osmitrubkového svazku je tento interval nejmenší, a to $13{,}4\ kW \cdot m^{-2}$, u šestitrubkového svazku $15{,}7\ kW \cdot m^{-2}$ a u čtyřtrubkového svazku $20{,}1\ kW \cdot m^{-2}$.

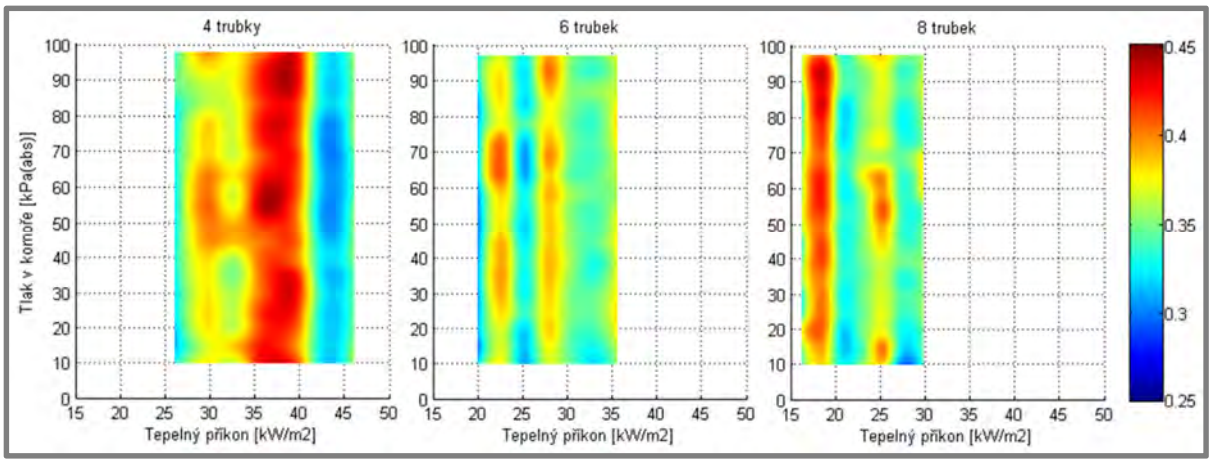
Tab. 15 Souhrn základních měřených a odvozených veličin (PS-H-B1-4/6/8)

Počet trubek	t_1 [°C]	t_2 [°C]	$\dot{V}_1$ [l · min^{-1}]	Re [−]	t_3 [°C]	t_4 [°C]	$\dot{V}_2$ [l · min^{-1}]	q_{34} [kW · m^{-2}]
4	19,7 ± 0,1	32,1 ± 0,1	4,03 ± 0,03	326,0 ± 2,5	40,1 ± 0,1	32,7 ± 0,1	7,20 ± 0,01	26,0 ± 0,4
	20,2 ± 0,1	29,5 ± 0,2	6,03 ± 0,01	477,3 ± 1,9	40,3 ± 0,3	31,7 ± 0,2	7,19 ± 0,01	30,3 ± 0,7
	15,4 ± 0,2	30,1 ± 0,3	4,03 ± 0,01	304,3 ± 1,5	40,2 ± 0,3	30,9 ± 0,2	7,16 ± 0,02	32,7 ± 0,3
	15,7 ± 0,1	28,5 ± 0,3	5,02 ± 0,02	373,4 ± 1,4	39,9 ± 0,4	29,9 ± 0,2	7,19 ± 0,02	35,0 ± 0,8
	15,5 ± 0,2	27,3 ± 0,2	6,02 ± 0,03	440,4 ± 3,2	40,6 ± 0,1	29,8 ± 0,1	7,15 ± 0,01	37,6 ± 0,4
	19,8 ± 0,1	38,4 ± 0,3	4,01 ± 0,03	348,6 ± 2,3	50,2 ± 0,1	38,8 ± 0,1	7,15 ± 0,01	39,8 ± 0,4
	20,1 ± 0,2	33,6 ± 0,2	6,03 ± 0,01	499,2 ± 1,4	50,2 ± 0,2	37,1 ± 0,1	7,20 ± 0,01	46,1 ± 0,5
6	20,2 ± 0,1	35,6 ± 0,2	4,02 ± 0,01	340,0 ± 1,5	40,6 ± 0,1	32,1 ± 0,1	7,25 ± 0,01	19,9 ± 0,2
	19,6 ± 0,2	32,0 ± 0,2	6,02 ± 0,02	487,2 ± 3,0	39,7 ± 0,2	29,6 ± 0,3	7,23 ± 0,01	23,8 ± 0,3
	15,2 ± 0,2	34,0 ± 0,2	4,01 ± 0,02	316,0 ± 1,9	40,2 ± 0,2	29,9 ± 0,2	7,23 ± 0,03	24,3 ± 0,4
	15,5 ± 0,2	32,3 ± 0,2	5,02 ± 0,01	389,2 ± 1,7	40,2 ± 0,3	28,2 ± 0,2	7,20 ± 0,02	26,8 ± 0,3
	15,5 ± 0,3	30,1 ± 0,2	6,01 ± 0,01	454,0 ± 1,8	40,3 ± 0,2	28,1 ± 0,1	7,21 ± 0,01	28,5 ± 0,4
	20,3 ± 0,2	41,1 ± 0,3	5,01 ± 0,03	450,0 ± 4,2	50,4 ± 0,3	36,0 ± 0,2	7,25 ± 0,02	34,1 ± 0,3
	20,0 ± 0,1	38,7 ± 0,1	6,02 ± 0,02	525,3 ± 2,6	49,5 ± 0,1	34,2 ± 0,1	7,16 ± 0,01	35,6 ± 0,3
8	20,3 ± 0,1	37,3 ± 0,1	4,02 ± 0,03	347,0 ± 2,5	40,3 ± 0,2	31,1 ± 0,1	7,24 ± 0,01	16,3 ± 0,3
	20,2 ± 0,1	34,7 ± 0,1	6,02 ± 0,02	505,4 ± 2,1	40,3 ± 0,1	28,9 ± 0,1	7,15 ± 0,01	19,9 ± 0,1
	15,2 ± 0,2	36,4 ± 0,1	4,02 ± 0,02	325,1 ± 2,0	40,2 ± 0,1	28,7 ± 0,2	7,24 ± 0,01	19,1 ± 0,2
	15,6 ± 0,3	34,2 ± 0,4	5,02 ± 0,02	397,6 ± 2,1	39,9 ± 0,4	27,2 ± 0,3	7,19 ± 0,05	21,2 ± 0,5
	15,3 ± 0,5	32,8 ± 0,6	6,02 ± 0,03	467,7 ± 6,4	39,7 ± 0,3	26,1 ± 0,5	7,20 ± 0,01	22,7 ± 0,5
	19,9 ± 0,1	46,2 ± 0,3	4,02 ± 0,01	379,1 ± 1,7	50,4 ± 0,2	36,2 ± 0,1	7,25 ± 0,01	25,1 ± 0,3
	20,2 ± 0,1	41,4 ± 0,3	6,03 ± 0,01	543,1 ± 1,8	50,0 ± 0,2	33,0 ± 0,2	7,19 ± 0,01	29,8 ± 0,2

Důvodem, proč byly prováděny experimenty pouze v rozsahu průtoku skrápěcí kapaliny 4,0 až 6,0 $l \cdot min^{-1}$ je, že při zkoumaných teplotních gradientech na sebe jednotlivé svislé úseky navazují. Proto jsou na obrázcích vidět tři svislá lokální minima Nusseltova čísla a zároveň tři svislá lokální maxima, které se střídají. Prvním a nejmenší gradientem byl 20 °C, tj. teplotní spád 20/40, druhý navazující gradient je 25 °C a třetím navazujícím gradientem je 30 °C, který byl testován při teplotním spádu 20/50. Pro potvrzení hypotézy a testování nevybočení z lokálních oblastí byl proveden ještě experiment při průtoku skrápěcí kapaliny 5,0 $l \cdot min^{-1}$ u teplotního spádu 15/40. Jediné místo, kde dochází k překryvu oblastí je u osmitrubkového svazku. Tam se překrývají průtoky 6,0 $l \cdot min^{-1}$ při spádu 20/40 a 4,0 $l \cdot min^{-1}$ při spádu 15/40, kde je v prvním případě průměrný měrný tepelný příkon 19,9 $kW \cdot m^{-2}$ a ve druhém případě 19,1 $kW \cdot m^{-2}$, což odpovídá rozdílu průměrných tepelných příkonů cca 230 W. Proto byl při grafickém zpracování měrný tepelný příkon korigován. V prvním případě byl snížen o hodnotu 0,5 $kW \cdot m^{-2}$ a ve druhém případě o tuto hodnotu navýšen.

Nejvyšší hodnoty Nusseltova čísla jsou u čtyřtrubkového svazku, kde dosahují až 0,44 [−] při teplotním spádu 15/40 a průtocích 5,0 a 6,0 $l \cdot min^{-1}$. Těchto hodnot je dosahováno při snižujícím se tlaku v komoře do cca 50 $kPa(abs)$. Průměrné hodnoty se pohybují v celém rozsahu na cca 0,42 [−]. Při nejmenším testovaném průtoku 4,0 $l \cdot min^{-1}$ je

průměrná hodnota Nusseltova čísla 0,37 [−]. Směrodatné odchylky Nusseltova čísla se pohybují v průměrné výši kolem hodnoty ± 2,4 %. Při navyšování počtu trubek klesají jak dosahované maximální hodnoty Nusseltova čísla tak i průměrné hodnoty. U tohoto teplotního spádu byla v případě šestitrubkového svazku dosahováno hodnot až cca 0,403 [−] a v případě čtyřtrubkového svazku až cca 0,409 [−], ale maximální průměrné hodnoty se v případě šestitrubkového svazku pohybovaly kolem hodnot 0,385 [−] a v případě osmitrubkového svazku 0,378 [−].



Obr. 47 Nusseltovo číslo v závislosti na měrném tepelném příkonu a tlaku v komoře (PS-H-B1-4/6/8)

Při menší teplotním spádu (20/40 °C) bylo naopak dosahováno maximálních hodnot Nusseltova čísla u osmitrubkového svazku, kde je v případě vyššího průtoku skrápěcí kapaliny průměrná hodnota 0,41 [−] a maxima byla až cca 0,435 [−]. U šesti i čtyřtrubkového svazku je průměrná hodnota u vyššího průtoku shodně cca 0,38 [−] a maxima dosahovala až cca 0,408 [−]. U nejvyššího testovaného teplotního spádu (20/50 °C) bylo maximální průměrné hodnoty dosaženo u šestitrubkového svazku, ale rozdíl není významný, resp. při vyšším průtoku bylo v tomto případě dosaženo průměrné hodnoty cca 0,374 [−], u čtyřtrubkového svazku 0,353 [−] a u osmitrubkového svazku 0,358 [−]. Průměrná hodnota směrodatné odchylky se u všech 21 experimentů pohyboval v průměrné výši (2,7 ± 0,7) %.

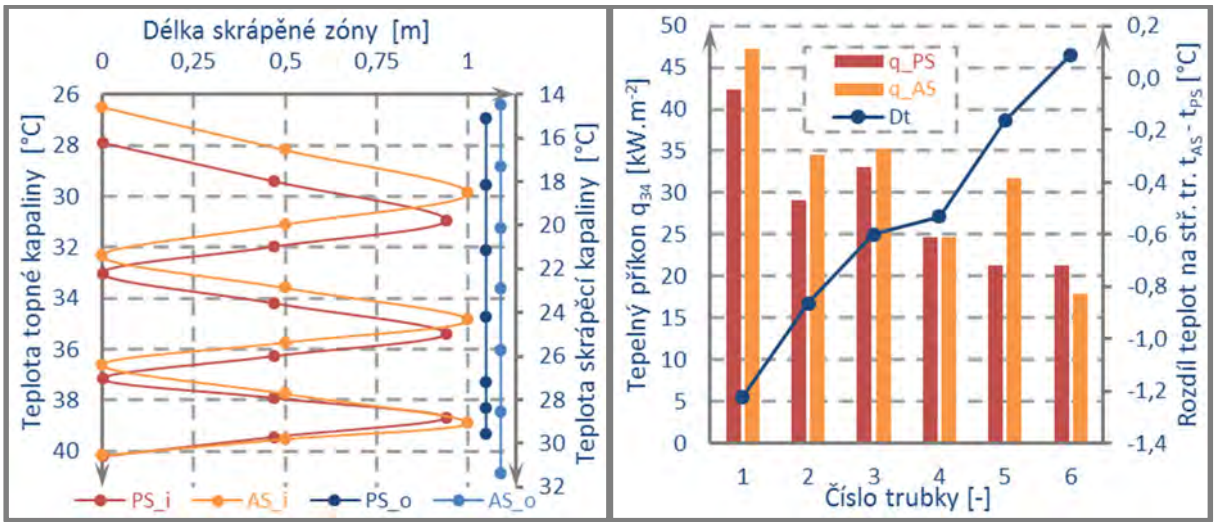
6.2 Porovnání výsledků naměřených na AS a PS

Experimenty publikované v této práci byly realizovány na dvou experimentálních zařízeních, které jsou popsány v kapitole 2 Měřicí zařízení. U atmosférického standu bylo základním cílem určit optimální počet trubek ve svazku, jejich rozteč a povrch svazku při jednom zvoleném teplotním spádu (15/40). U podtlakového standu bylo na tyto výsledky navázáno a vzhledem ke komplikovanosti a náročnosti přípravy trubkového svazku a zařízení jako takového, byl vybrán trubkový svazek s osmi trubkami a roztečí 20 mm (B1). Vzhledem k dispozici podtlakové nádoby musela být zkrácena délka skrápěné zóny z 1 000 mm na 940 mm. Skrápěnou zónu vymezují dva distanční plechy, ve kterých jsou vyvrtány díry. Do těchto děr jsou ustaveny skrápěné trubky společně s distribuční trubkou, která je nad nimi. V distribučních trubkách obou zařízení jsou vyvrtány otvory o průměru 1,0 mm po cca 9,2 mm. První otvor, resp. poslední otvor je vyvrtán ve vzdálenosti cca 10,0 mm od distančního plechu. V případě podtlakového standu je 100 otvorů a v případě atmosférického standu jich je 107, ze kterých vytéká skrápěcí kapalina.

Pro porovnání byly vybrány dva experimenty, které byly realizovány při teplotním spádu 15/40 a průtoku skrápěcí kapaliny 5,0 $l \cdot min^{-1}$. V případě podtlakového standu byla průměrná teplota skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky $t_1 = 15{,}1 \pm 0{,}1\ °C$ o průměrném průtoku $\dot{V}_1 = 5{,}02 \pm 0{,}01\ l \cdot min^{-1}$. U atmosférického standu byla průměrná teplota skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky $t_1 = 14{,}5 \pm 0{,}1\ °C$ o průměrném průtoku $\dot{V}_1 = 4{,}99 \pm 0{,}02\ l \cdot min^{-1}$. Průměrná teplota topné vody vstupující do trubkového svazku u podtlakového standu byla $t_3 = 40{,}2 \pm 0{,}1\ °C$ o průměrném průtoku $\dot{V}_2 = 7{,}15 \pm 0{,}01\ l \cdot min^{-1}$ a u atmosférického standu byla průměrná teplota $t_3 = 40{,}2 \pm 0{,}4\ °C$ a její průměrný průtok byl $\dot{V}_2 = 7{,}16 \pm 0{,}06\ l \cdot min^{-1}$.

Na obr. 48 vlevo je vykreslen průběh teploty topné vody proudící uvnitř svazku (u podtlakového standu je označen „PS_i“ a u atmosférického standu je označen „AS_i“) v závislosti na délce skrápěné zóny, vedle které je vynesen průběh teploty skrápěcí kapaliny, který je označen v případě podtlakového standu „PS_o“ a v případě atmosférického standu „AS_o“. Průběh topné vody je složen z přímek a je vykreslen tak, jak reálně proudí uvnitř trubkového svazku. Tj. ze spodní poslední trubky, kde vstupuje, směrem nahoru. U atmosférického standu mimo vstupní a výstupní teploty byly měřeny také teploty na výstupu z jednotlivých trubek, resp. na vstupu do další trubky. Střední teplota topné vody (teplota uprostřed trubky) byla vypočítána jako průměrná hodnota vstupní a výstupní teploty dané trubky. U podtlakového standu nebyla mezi předposlední (pátou) trubkou a poslední (šestou) trubkou měřena teplota. Proto byla dopočítána pomocí lineární interpolace, resp. jedná se o střední hodnotu teploty topné vody vstupující do svazku a teploty topné vody vystupující z páté trubky (vstupující do čtvrté trubky). Střední teploty těchto dvou trubek byly počítány pomocí této dopočítané teploty.

Průběh teplot v jednotlivých trubkách lze popsat směrnicí přímky. Tj. rozdíl teploty topné vody vstupující do trubky a teploty topné vody z trubky vystupující, který je podělený délkou trubky. U atmosférického standu směrnice přímky stoupá od poslední trubky k první ze 1,3 $°C \cdot m^{-1}$ na 3,4 $°C \cdot m^{-1}$ s mírnou prodlevou u druhé a čtvrté trubky. U podtlakového standu je průběh obdobný. Na posledních dvou trubkách je směrnice stejná, tj. 1,6 $°C \cdot m^{-1}$, což je způsobeno rozdělením stejného teplotního spádu lineární interpolací na tyto dvě trubky. Jinak je průběh relativně obdobný. Na první trubce je směrnice 3,2 $°C \cdot m^{-1}$ smírnou prodlevou na druhé trubce. Rozdíl směrnic není významný, ale při porovnání rozdílů středních teplot (průměrná teplota vztažená na střed dané trubky) na jednotlivých svazcích dochází k nárůstu teploty u atmosférického standu na první trubce až na hodnotu 1,22 $°C$. Průběh rozdílu středních teplot (Dt) v závislosti na čísle trubky je vynesen na obr. 48 vpravo.



Obr. 48 Vliv délky skrápěné zóny na průběh teploty topné kapaliny ve smyčce (vlevo) a na odebraný měrný tepelný tok (vpravo) (AS / PS-H-B1-6-15/40-5)

Na obr. 48 vpravo jsou vyneseny také dopočítané měrné tepelné toky odebrané topné kapalině na jednotlivých trubkách. Na šesté trubce jako jediné je převaha odebraného tepelného toku u podtlakového standu. I v tomto případě zřejmě hraje roli rovnoměrné rozdělení střední teploty. V ostatních případech je větší odebraný tepelný tok u atmosférického standu mimo čtvrté trubky, kde jsou odebrané tepelné toky vyrovnané. V grafu jsou také patrné prodlevy u tepelných toků, které jsou zmíněné výše u směrnice přímek průběhů teploty.

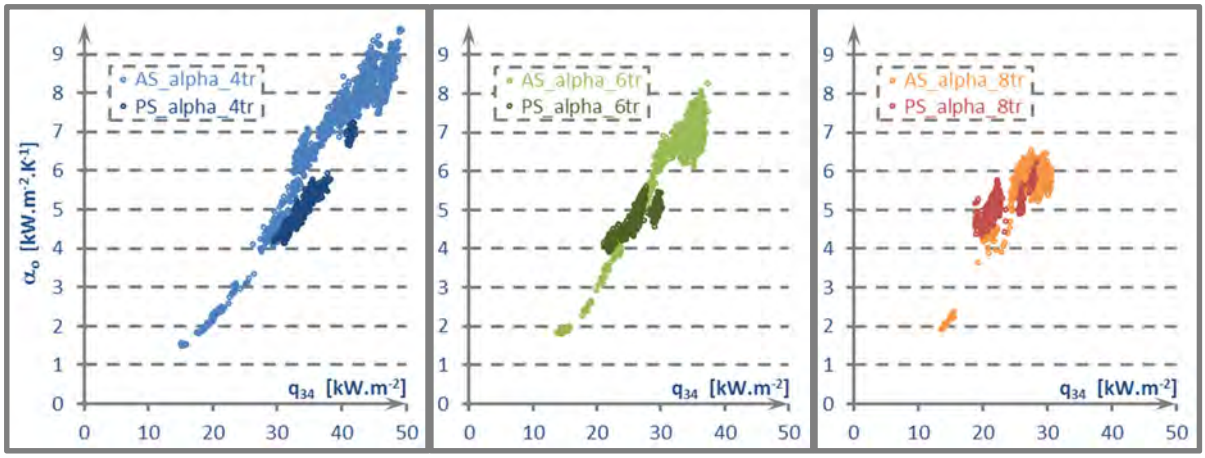
Vliv délky skrápěné zóny u čtyř, šesti a osmitrubkového svazku při různých průtocích skrápěcí kapaliny je porovnán na obr. 49 a obr. 50. Základní údaje o prezentovaných bodech jsou uvedeny v tab. 16. Rozsah průtoků skrápěcí kapaliny se u atmosférického standu pohybuje v rozmezí 1,3 až 13,6 $l \cdot min^{-1}$, čemuž odpovídá rozmezí hmotnostního průtoku vztaženého na délku skrápěné zóny (Γ) 0,021 až 0,227 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. V případě výsledků podtlakového standu je rozsah průtoku skrápěcí kapaliny pouze 3,4 až 8,1 $l \cdot min^{-1}$, resp. hmotnostní průtok vztažený na délku skrápěné zóny je 0,060 až 0,144 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$.

Tab. 16 Souhrn základních měřených a odvozených veličin (AS / PS-H-B1-4/6/8)

Počet trubek	t_1 [°C]	t_2 [°C]	$\dot{V}_1$ [$l \cdot min^{-1}$]	Re [–]	t_3 [°C]	t_4 [°C]	$\dot{V}_2$ [$l \cdot min^{-1}$]
Atmosférický stand							
4	14,8 ± 0,4	27,1 ± 3,5	1,3 – 12,8	91,7 – 819,3	40,2 ± 0,4	28,3 ± 2,3	7,22 ± 0,05
6	14,7 ± 0,5	27,3 ± 3,5	1,9 – 13,6	138,4 – 910,6	39,8 ± 0,4	25,1 ± 2,2	7,20 ± 0,05
8	14,7 ± 0,5	29,0 ± 2,5	2,7 – 12,9	199,4 – 868,6	40,4 ± 0,5	23,9 ± 1,8	7,20 ± 0,06
Podtlakový stand							
4	15,3 ± 0,4	28,7 ± 1,5	3,4 – 8,0	262,0 – 574,4	40,1 ± 0,4	30,3 ± 0,9	7,18 ± 0,02
6	15,1 ± 0,5	29,8 ± 1,1	3,5 – 7,0	275,3 – 519,0	40,1 ± 0,4	29,0 ± 0,8	7,15 ± 0,01
8	15,2 ± 0,5	34,3 ± 2,4	3,6 – 8,1	285,0 – 614,4	40,3 ± 0,4	27,4 ± 1,3	7,16 ± 0,03

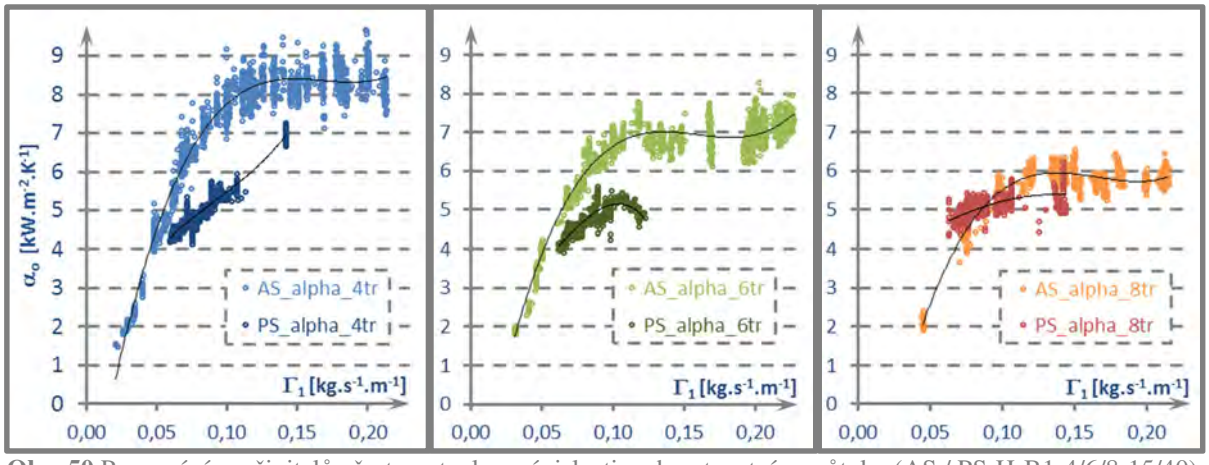
Na obr. 49 jsou na jednotlivých grafech porovnány součinitele přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku v závislosti na měrném tepelném příkonu odebraném topné kapalině. Vlevo jsou porovnány průběhy čtyřtrubkového svazku, kde tmavší modrou barvou jsou vyneseny body odvozené pro experimenty podtlakový stand, uprostřed jsou porovnány hodnoty šestitrubkového svazku (tentokrát jsou vyneseny zelenou barvou) a vpravo jsou vyneseny hodnoty osmitrubkového svazku, kde červené jsou hodnoty stanovené u podtlakového standu a oranžovou barvou jsou vyneseny hodnoty atmosférického standu.

Ve všech třech porovnávaných případech jsou trendy přibližně lineární a hodnoty stanovené u podtlakového standu kopírují průběh hodnot stanovených u atmosférického standu.



Obr. 49 Porovnání součinitelů přestupu tepla v závislosti tepelném příkonu (AS / PS-H-B1-4/6/8-15/40)

Na obr. 50 jsou tytéž hodnoty součinitele přestupu tepla vyneseny tentokrát v závislosti na hmotnostním průtoku skrápěcí kapaliny vztaženém na délku skrápěné zóny. Opět jsou vyneseny do třech grafů a stejnou barvou, jako v případě obr. 49. Pro větší názornost byly jednotlivé průběhy proloženy křivkou, která vystihuje daný trend. Všechny křivky jsou černou barvou. U čtyřtrubkového svazku je rozdíl nejvýraznější. Při nejmenším porovnávaném průtoku skrápěcí kapaliny je rozdíl u součinitele cca 10 % a s rostoucím průtokem rozdíl narůstá na cca 32 % při průtoku cca 6,0 $l \cdot min^{-1}$. Poslední a nejvyšší hodnoty u podtlakového standu jsou stanoveny při průtoku cca 8,0 $l \cdot min^{-1}$ a rozdíl součinitelů je cca 16 %. U šestitrubkového svazku průběh hodnot u podtlakového standu kopíruje průběh hodnot atmosférického standu i s mírným poklesem součinitele (i když pokles je mírně posunutý v rámci průtoku skrápěcí kapaliny). Vlastní rozdíly součinitele přestupu tepla se pohybovali v rozmezí cca 15 až 32 %. U osmitrubkového svazku nejsou výsledky stanovené u obou zařízení zcela jednoznačné. U průtoků cca 3,6 $l \cdot min^{-1}$ jsou hodnoty u podtlakového standu vyšší o cca 27 % (bráno oproti proložené křivce u AS). Při průtoku cca 4,7 $l \cdot min^{-1}$ se jednotlivé průběhy protínají a při nejvyšším měřeném průtoku je rozdíl hodnot cca 12 %.

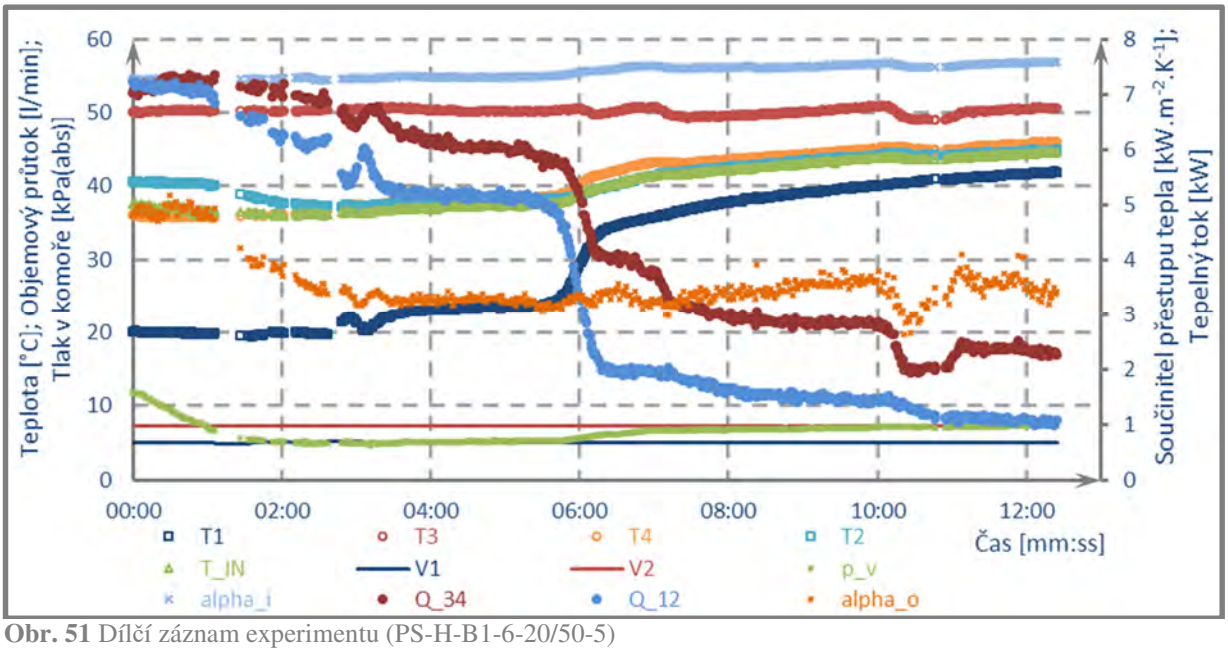


Obr. 50 Porovnání součinitelů přestupu tepla v závislosti na hmotnostním průtoku (AS / PS-H-B1-4/6/8-15/40)

6.3 Var na skrápěném trubkovém svazku

Výzkum varu na skrápěném trubkovém svazku plynule navazuje na experimenty zaměřené na přestup tepla při podtlaku, kde nedocházelo k varu, ale pouze k ohřevu skrápěcí kapaliny. Při experimentech zaměřených na var byla počáteční teplota skrápěcí kapaliny na úrovni cca 15 °C, nebo 20 °C při různých testovaných průtocích v rozsahu 4,0 až 9,0 litrů za minutu. Topná voda vtékající do svazku byla udržována po celou dobu experimentů na průměrné teplotě cca 40°C, nebo 50°C s maximální odchylkou do jednoho stupně Celsia a při průměrném průtoku cca 7,2 litrů za minutu s maximální odchylkou do 0,1 litru za minutu. Testované spády na výměníku byly 15/40°C, 20/40°C a 20/50°C.

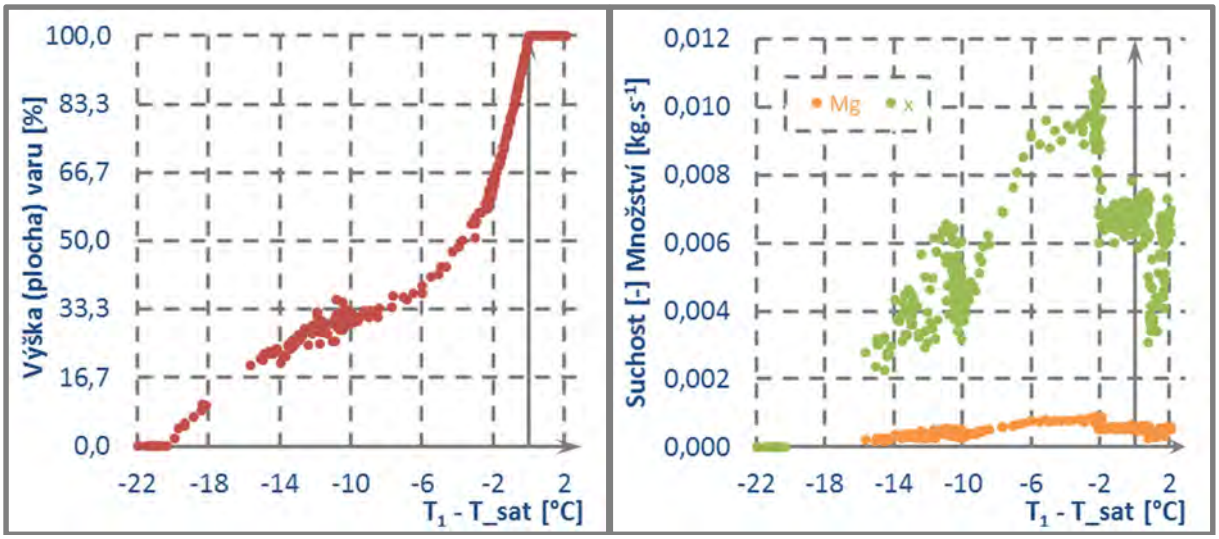
Na obr. 51 je ukázka dílčího záznamu experimentu, který byl prováděn na svazku skládajícího se z šesti trubek při teplotním spádu 20/50 °C. Na začátku experimentu byl v nádobě podtlak ve výši cca $p_v = 11{,}9\ kPa(abs)$ a postupně bylo dosaženo maximálního možného podtlaku v daném čase při daných podmínkách. V tom případě bylo dosaženo minimálního tlaku v čase cca 02:00 ve výši cca $5{,}0\ kPa$. Teplota topné vody na vstupu byla udržována po celou dobu experimentu na hodnotě $t_3 = 50{,}3 \pm 0{,}4\ °C$ a její průtok byl $\dot{V}_2 = 7{,}24 \pm 0{,}02\ l \cdot min^{-1}$. Skrápěcí kapalina proudila po celou dobu experimentu o průměrném průtoku $\dot{V}_1 = 5{,}02 \pm 0{,}04\ l \cdot min^{-1}$ a počáteční (do času 2:37) průměrné teplotě měřené v distribuční trubce $t_1 = 19{,}9 \pm 0{,}1\ °C$, na kterou byla skrápěcí kapalina dochlazována. Teplota parovzdušné směsi je měřena nad výměníkem a byla na počátku experimentu $t_{IN} = 37{,}6\ °C$. Ze základních měřených veličin jsou v grafu vyneseny teplota skrápěcí vody za výměníkem (t_2) a teplota topné vody na výstupu z výměníku (t_4). Z odvozených veličin jsou v grafu vyneseny tepelný tok odebraný na straně topné kapaliny ($\dot{Q}_{34}$), tepelný tok přijatý na straně skrápěcí kapaliny ($\dot{Q}_{12}$), součinitel přestupu tepla na vnitřní stěně trubky (α_i) a součinitel přestupu tepla na povrchu trubkového svazku (α_o), který byl vypočítán na základě matematického modelu nevroucí kapaliny, resp. podle rovnice (3.23) v kapitole 3.1.3.



Obr. 51 Dílčí záznam experimentu (PS-H-B1-6-20/50-5)

Při experimentu byla jedinou cíleně měněnou veličinou teplota skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky, která již od času cca 6:22 nebyla ochlazována. Zbylé vstupní hodnoty bylo snahou udržet na přibližně konstantní úrovni. Při vzrůstající teplotě skrápěcí vody se navyšovalo generované množství páry, resp. zvyšovala se teplota parovzdušné směsi, čímž se snižovala hltnost vývěvy a mírně stoupal tlak v nádobě. Od cca 07:45 se tlak v nádobě ustálil na hodnotě cca $6{,}9\ kPa$. V čase 0:58 je teplota skrápěcí vody za výměníkem (t_2) na bodu

sytosti. Se zvyšující se teplotou skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky se posouvá hranice sytosti na výměníku směrem vzhůru až po čas cca 08:24, kdy dosáhla teplota skrápěcí vody na výstupu z distribuční trubky bodu sytosti. Na základě lineární interpolace teplot před a za svazkem a teploty saturace odpovídající aktuálnímu tlaku v komoře lze podle rovnice (3.78) vyjádřit hranici, na které je teplota skrápěcí kapaliny na bodu varu, resp. na kolika procentech výšky může docházet k varu.

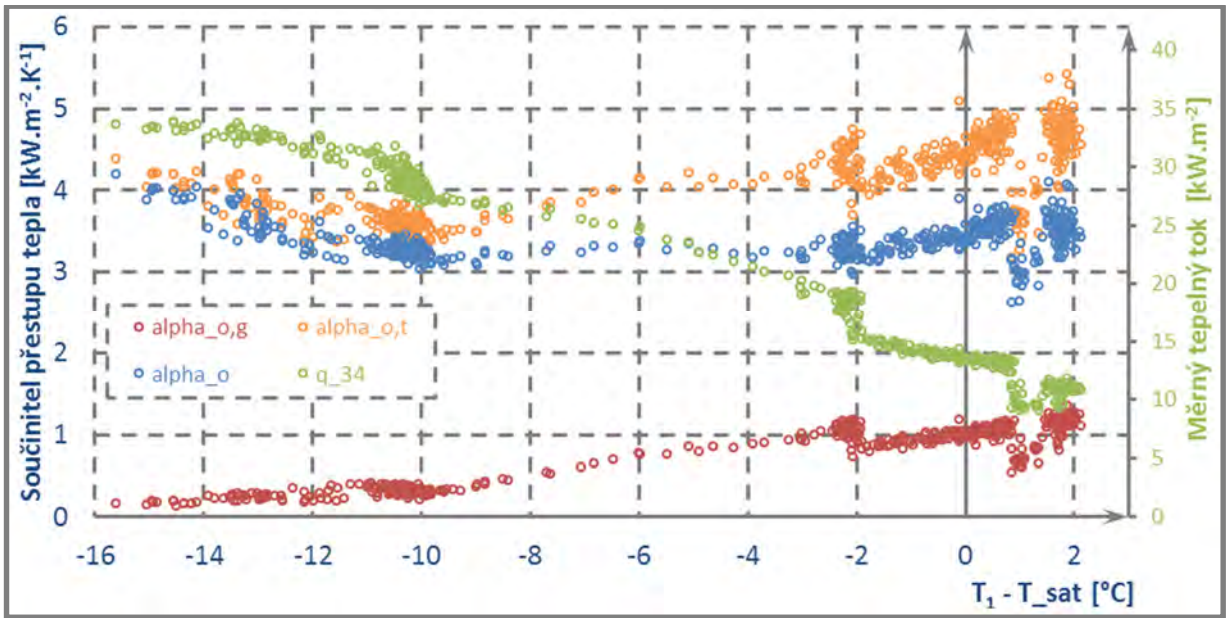


Obr. 52 Hranice sytosti skrápěcí kapaliny (vlevo), množství páry a její suchost (vpravo) (PS-H-B1-6-20/50-5)

Na obr. 52 je zmíněná výška vynesena v závislosti na teplotě (t_1), od které je odečtena teplota saturace odpovídající aktuálnímu tlaku v komoře. Výsledná hodnota $16,\overline{6}$ % odpovídá v tomto případě (svazek se skládá z 6 trubek) hranici varu mezi pátou a šestou (poslední) trubkou, resp. hodnota $33,\overline{3}$ % odpovídá hranici sytosti mezi čtvrtou a pátou trubkou atd.

Množství generované páry, resp. její poměr k celkovému množství (sytost) jsou stanoveny na základě rovnice (3.68) a (3.70) a vyneseny na obr. 52 vpravo opět v závislosti na teplotě (t_1) ponížené o teplotu saturace při aktuálním tlaku v komoře. Při pohledu na oba grafy na obr. 52 je patrné, že přestože v rozmezí teplot $-20{,}3\ °C$ až $-15{,}6\ °C$ je na poslední trubce teplota skrápěcí kapaliny nad teplotou saturace, nedochází k vývinu páry, resp. dochází k mírnému poklesu součinitele přestupu tepla kapalné fáze. Důvodem může být tvorba tenkého parního filmu mezi stěnou trubky a kapalným filmem, který trubku obtéká, což způsobuje zhoršení přestupu tepla do kapalné fáze. Při teplotě $-15{,}6\ °C$ dochází ke skokovému projevu vývinu páry, resp. varu na svazku a se vzrůstající teplotou rozstřikované skrápěcí kapaliny narůstá i suchost páry až se mezi teplotami cca $-6{,}0\ °C$ až $-2{,}0\ °C$ ustálí na hodnotě cca 0,9 %. Poté dochází k prvnímu skokovému snížení na průměrnou hodnotu cca 0,65 %. Důvodem byl pokles teploty topné vody (t_3) z přibližně $50{,}4\ °C$ na cca $49{,}7\ °C$ způsobený regulačním zásahem. Ke druhému skokovému snížení došlo v rozmezí teplot přibližně $1{,}0\ °C$ až $1{,}3\ °C$. Opět bylo způsobeno regulačním zásahem, který byl ale v tomto případě vyrovnán a průměrná suchost se vrátila na průměrnou hodnotu cca 0,65 %.

Na obr. 51 je v závislosti na čase vynesen součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného svazku. V počátečním úsek ještě na svazku nedochází k varu a součinitel je na úrovni cca $4\,889{,}4 \pm 98{,}3\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Je závislý především na regulovaných teplotách (t_1), (t_3) a objemovém průtoku topné kapaliny. S projevem varu na svazku součinitel poklesne a drží se na průměrné hodnotě $3\,382{,}0 \pm 202{,}7\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Pokles je ve výši cca 30,8 % a k veličinám, které ovlivňují součinitel, se přidává tlak, který zásadním způsobem ovlivňuje rozptyl, ve kterém se součinitel pohybuje.



Obr. 53 Součinitel přestupu tepla a měrný tepelný příkon (PS-H-B1-6-20/50-5)

Na obr. 53 jsou vyneseny zkoumané součinitele a měrný tepelný tok v závislosti na teplotě skrápěcí vody vytékající z distribuční trubky ponížené o teplotu saturace při aktuálním tlaku v komoře. Byl vybrán pouze úsek, při kterém se projevil var na skrápěném trubkovém svazku. V grafu je vynesen již zmíněný součinitel pro kapalnou fázi (α_o). Dále je zde vynesen součinitel přestupu tepla parní fáze ($\alpha_{o,g}$), který postupně narůstá do teploty cca $-3{,}0$ °C a poté se drží na průměrné hodnotě $1\,035{,}5 \pm 135{,}5\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ se dvěma poklesy popsanými výše. Na základě rovnice (3.79) byl vypočítán celkový součinitel přestupu tepla ($\alpha_{o,t}$), který je uvažován pro danou geometrii svazku jako střední hodnota, která je v průměrné výši $4\,458 \pm 343{,}9\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Při experimentech byla zvyšována teplota skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky. Z toho důvodu bylo potřeba snižovat tepelný příkon při zachování přibližně konstantní teploty topné kapaliny vstupující do svazku a jejího průtoku. Na obr. 53 je vynesen měrný tepelný tok, ze kterého je patrné, že i přes ustálení součinitele při teplotě cca $-3{,}0\ °C$ nemá další klesající tepelný tok přímý vliv na součinitel přestupu tepla. Jako zásadní vliv se projevila teplota topné kapaliny na vstupu do svazku a tlak v nádobě.

Tab. 17 Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 20/50°C

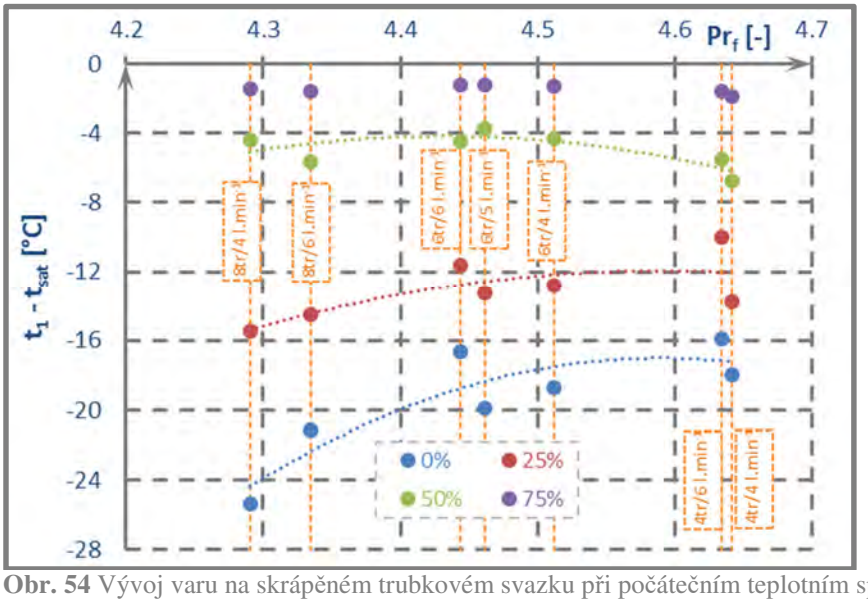
počet trubek	4		6			8	
počet bodů	395	420	355	300	264	304	334
t_3 [°C]	50,3 ± 0,3	50,1 ± 0,3	50,2 ± 0,4	50,1 ± 0,5	50,4 ± 0,2	50,2 ± 0,3	50,3 ± 0,3
$\dot{V}_2$ [l · min^{-1}]	7,20 ± 0,01	7,25 ± 0,01	7,24 ± 0,01	7,21 ± 0,02	7,22 ± 0,01	7,25 ± 0,01	7,22 ± 0,01
$\dot{V}_1$ [l · min^{-1}]	4,03 ± 0,01	6,03 ± 0,02	4,03 ± 0,03	5,01 ± 0,02	6,05 ± 0,01	4,04 ± 0,04	6,02 ± 0,02
$\Gamma_1 \left[\frac{kg}{s \cdot m}\right]$	0,070 8 ± 0,000 3	0,106 2 ± 0,000 5	0,071 0 ± 0,000 6	0,088 2 ± 0,000 4	0,106 4 ± 0,000 2	0,071 0 ± 0,000 7	0,105 8 ± 0,000 3
Re_f [−]	405,6 ± 1,4	610,5 ± 2,5	416,0 ± 2,9	523,0 ± 1,5	633,9 ± 1,4	436,0 ± 4,2	645,9 ± 1,6
Pr_f [−]	4,64	4,63	4,51	4,46	4,44	4,29	4,33
p_v [kPa(abs)]	6,2 ± 0,4	6,2 ± 0,5	6,7 ± 0,5	6,9 ± 0,4	7,0 ± 0,6	7,6 ± 0,3	7,4 ± 0,5
t_{IN} [°C]	41,7 ± 1,4	40,9 ± 1,8	42,4 ± 1,5	42,8 ± 1,4	42,3 ± 1,6	44,0 ± 0,9	43,6 ± 1,3
$t_1 - t_{sat}$ [°C]	(-2,7) → (3,5)	(-3,1) → (2,2)	(-2,1) → (2,4)	(-2,5) → (2,1)	(-2,6) → (1,7)	(-3,8) → (0,7)	(-3,1) → (1,6)

Tab. 17 Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 20/50°C – pokračování

počet trubek	4		6			8	
$\dot{q}''_{34}$ [kW · m^{-2}]	8,0 ± 1,6	7,3 ± 1,4	6,7 ± 1,6	6,5 ± 1,4	7,3 ± 1,6	4,4 ± 0,8	4,2 ± 0,8
$\dot{q}_{34}$ [kW · m^{-2}]	18,2 ± 3,8	19,8 ± 4,5	12,4 ± 2,7	13,4 ± 2,6	15,2 ± 3,3	9,8 ± 1,8	10,7 ± 2,3
x [%]	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,9 ± 0,2	0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1
$\dot{M}_g$ [g · s^{-1}]	0,47 ± 0,09	0,43 ± 0,08	0,59 ± 0,14	0,57 ± 0,12	0,64 ± 0,14	0,52 ± 0,09	0,49 ± 0,09
$\alpha_{o,g}$ [kW / (m^2 · K)]	988,0 ± 107,9	913,6 ± 83,3	937,4 ± 78,5	1036,2 ± 136,4	1089,4 ± 78,5	795,8 ± 107,0	777,6 ± 86,7
$\alpha_{o,t}$ [kW / (m^2 · K)]	4 823,8 ± 283,1	5 437,1 ± 298,7	3 427,2 ± 205	4 461,6 ± 345,4	4 903,8 ± 264,4	3 579,7 ± 256,6	4 257,2 ± 269,6

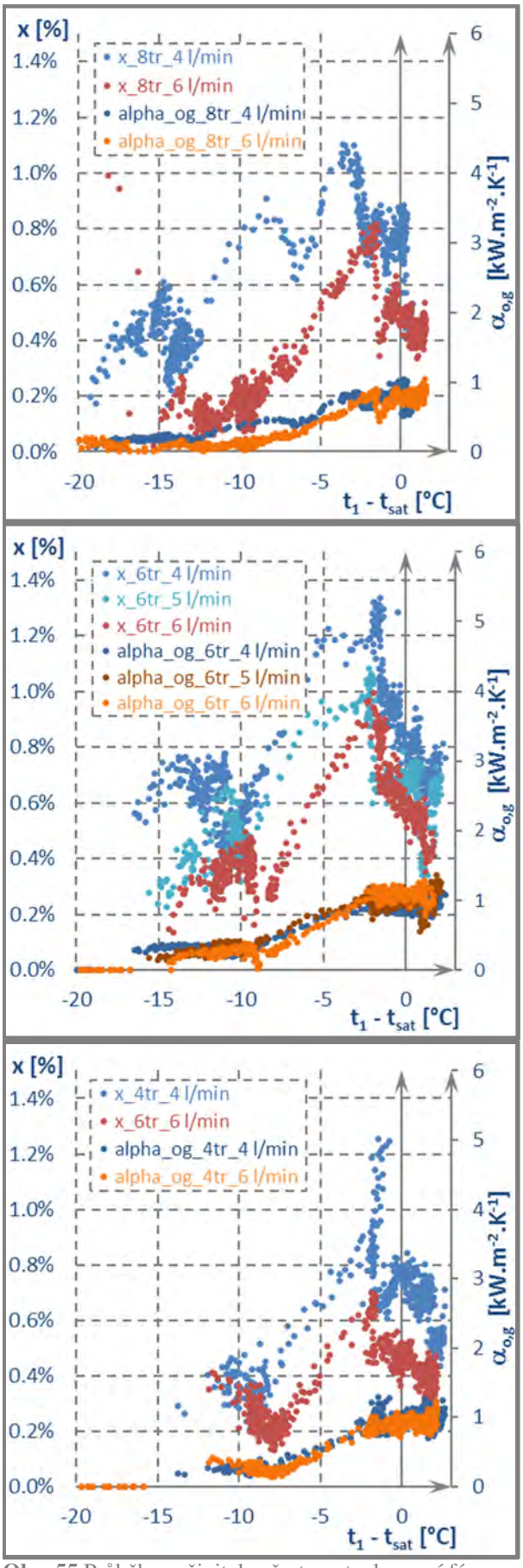
Vysvětlivky k tab. 17: $\mathbf{t_3}$ [°C] je teplota topné kapaliny na vstupu do výměníku, $\dot{\mathbf{V}}_2$ [l · min^{-1}] je objemový průtok topné kapaliny, $\dot{\mathbf{V}}_1$ [l · min^{-1}] je objemový průtok skrápěcí kapaliny, $\boldsymbol{\Gamma}_1$ [kg · s^{-1} · m^{-1}] je hmotnostní průtok skrápěcí kapaliny vztažený na délku skrápěné zóny, $\mathbf{Re_f}$ [–] je Reynoldsovo číslo kapalné fáze skrápěcí kapaliny, $\mathbf{Pr_f}$ [–] je Prandtlovo číslo kapalné fáze skrápěcí kapaliny, $\mathbf{p_v}$ [kPa(abs)] je tlak v komoře, $\mathbf{t_{IN}}$ [°C] teplota páry v komoře, $\mathbf{t_1 - t_{sat}}$ [°C] je rozsah teploty skrápěcí kapaliny na výtoku z distribuční trubky ponížená o teplotu saturace při aktuálním tlaku v komoře, $\dot{\mathbf{q}}''_{34}$ [kW · m^{-2}] měrné teplo odebrané topné kapalině pro var skrápěcí kapaliny, $\dot{\mathbf{q}}_{34}$ [kW · m^{-2}] celkové měrné teplo odebrané topné kapalině, $\mathbf{x}$ [%] je suchost páry, $\dot{\mathbf{M}}_g$ [g · s^{-1}] je množství generované páry, $\boldsymbol{\alpha}_{o,g}$ [kW · m^{-2} · K^{-1}] součinitel přestupu tepla na povrchu trubkového svazku parní fáze, $\boldsymbol{\alpha}_{o,t}$ [kW · m^{-2} · K^{-1}] celkový součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku

U všech testovaných trubkových svazků (4, 6 i 8 trubek) byl testován var při průtoku skrápěcí kapaliny cca 4,0 a 6,0 $l \cdot min^{-1}$. U trubkového svazku s šesti trubkami navíc ještě při cca 5,0 $l \cdot min^{-1}$. Teplota topné kapaliny byla udržována na průměrné hodnotě cca 50,0 °C při průměrném průtoku topné kapaliny cca 7,2 $l \cdot min^{-1}$. Další základní naměřené údaje jsou společně s odvozenými veličinami v tab. 17. Tyto výsledky jsou níže postupně podrobněji zhodnoceny.



Obr. 54 Vývoj varu na skrápěném trubkovém svazku při počátečním teplotním spádu 20/50°C

Vývoj varu při zvyšování teploty skrápěcí kapaliny je možné sledovat na obr. 54, kde byly u jednotlivých měření vybrány pouze hranice přechodu 0 %, 25 %, 50 % a 75 %, které byly vypočítány stejným způsobem jako v případě již zmíněného obr. 52. 0 % označuje hranici, při které dosáhla skrápěcí kapalina sytost za poslední trubkou, 25 % označuje hranici, při které dosáhla skrápěcí kapalina sytost mezi šestou a sedmou trubkou v případě osmitrubkového



Obr. 55 Průběh součinitele přestupu tepla parní fáze a suchost při vývoji varu na svazku

svazku atd. Hranice jsou vyneseny v závislosti na teplotě skrápěcí kapaliny ponížené o teplotu saturace při aktuálním tlaku v komoře a Prandtlově čísle kapalné fáze. Nejvyšší ohřátí skrápěcí kapaliny bylo dosaženo na osmitrubkovém svazku a proto je i Prandtlovo číslo nejnižší. Naopak nejméně byla skrápěcí kapalina ohřáta na čtyřtrubkovém svazku, proto je i Prandtlovo číslo nejvyšší.

Stav sytosti kapaliny za svazkem byl nejdříve dosažen u osmitrubkového svazku, kde je hranice při $-25{,}4\ °C$ a $-21{,}2\ °C$. Se snižujícím se počtem trubek stoupá i tato hranice, ale rozdílnost mezi svazkem s šesti trubkami a čtyřmi trubkami není významný, resp. průměrná hodnota je $-17{,}8 \pm 1{,}4\ °C$. Při varu na 25 % plochy je situace obdobná, i když rozdíl mezi osmi a šesti, resp. čtyřtrubkovým svazkem není tak velký. Ale při 50 % je trend průběhu opačný. Průměrná hodnota osmi a šestitrubkového svazku je $-4{,}5 \pm 0{,}6\ °C$ a u svazku se čtyřmi trubkami je $-6{,}1 \pm 0{,}6\ °C$. Rozdíl hodnot u hranice 75 % již není velká, resp. průměrná hodnota je $-1{,}4 \pm 0{,}2\ °C$.

Na obr. 55 jsou ve třech grafech pod sebou vyneseny průběhy součinitele přestupu tepla parní fáze ($\alpha_{o,g}$) a suchost při vývoji varu na svazku v závislosti na teplotě skrápěcí kapaliny ponížené o teplotu saturace při aktuálním tlaku v komoře, kde jsou hodnoty vyneseny od teploty $-20\ °C$. První graf je pro osmitrubkový svazek, druhý pro šestitrubkový svazek a třetí pro čtyřtrubkový svazek. Z jednotlivých průběhů je patrný počátek varu na svazku vzhledem k jeho velikosti. U osmitrubkového svazku začíná stabilní var (generování páry) v dolní části svazku při cca $-18{,}9\ °C$, u šestitrubkového svazku při cca $-16{,}3\ °C$ a u čtyřtrubkového svazku při cca $-11{,}9\ °C$.

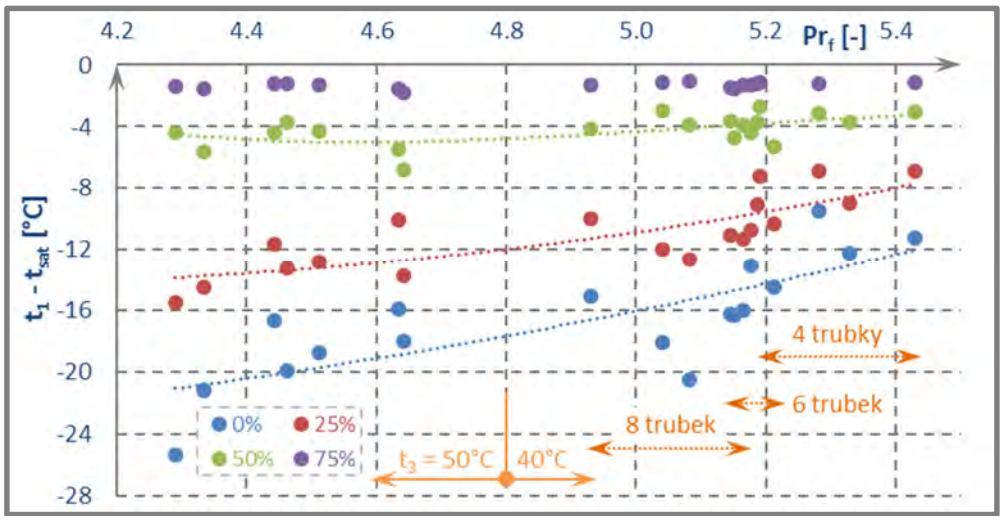
Při dalším zvyšování teploty skrápěcí kapaliny je patrný vzrůstající trend, který se zastaví u osmitrubkového svazku při teplotě cca $-3{,}3\ °C$ u průtoku $4{,}0\ l \cdot min^{-1}$ a u průtoku $6{,}0\ l \cdot min^{-1}$ při teplotě cca $-1{,}9\ °C$. U šesti a čtyřtrubkového svazku již takový rozdíl u průtoků není, resp. růst se

zastaví na průměrné hodnotě cca $-1{,}8\ °C$. Suchost páry (její množství) s dalším zvyšování teploty klesá, ale součinitel přestupu tepla parní fáze se již drží na přibližně konstantní úrovni, ale s relativně velkým rozptylem hodnot, který se pohybuje v rozmezí 7,2 % až 33,5 % na průměrné výši $(17{,}9 \pm 7{,}6)$ %. V tab. 17 je uveden rozsah teplot $t_1 - t_{sat}$ [°C], ve kterém z hodnot ostatních uvedených veličin byl vypočítán průměr a jeho směrodatná odchylka. V tomto rozsahu se pohybuje průměrná hodnota součinitele přestupu tepla parní fáze u čtyřtrubkového svazku ve výši cca $949{,}7\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, u šestitrubkového svazku cca $1\,013{,}3\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (tj. o cca 7 % více) a u osmitrubkového svazku cca $786{,}3\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (tj. o cca 17 % méně oproti čtyřtrubkovému svazku a o cca 22 % méně oproti šestitrubkovému svazku).

Var a jeho vývoj byl testován na stejných svazcích také při průměrné vstupní teplotě topné vody cca $40{,}4 \pm 0{,}2$ °C a průměrném průtoku cca $7{,}22 \pm 0{,}03\ l \cdot min^{-1}$. Na jednotlivých svazcích byly testovány průtoky a teplotní spády:

- u 4 trubek: 20/40°C (4 a $6\ l \cdot min^{-1}$), 15/40°C (4 a $6\ l \cdot min^{-1}$)
- u 6 trubek: 20/40°C (4 a $6\ l \cdot min^{-1}$), 15/40°C (4 a $5\ l \cdot min^{-1}$)
- u 8 trubek: 20/40°C ($4\ l \cdot min^{-1}$), 15/40°C (4, 5, 6 a $8\ l \cdot min^{-1}$)

Dílčí hranice vývoje hranice varu jsou zobrazeny na obr. 56 společně s body pro počáteční teplotní spád 20/50°C v závislosti na Prandtlově čísle a teplotě skrápěcí kapaliny ponížené o teplotu saturace aktuálního tlaku v komoře.

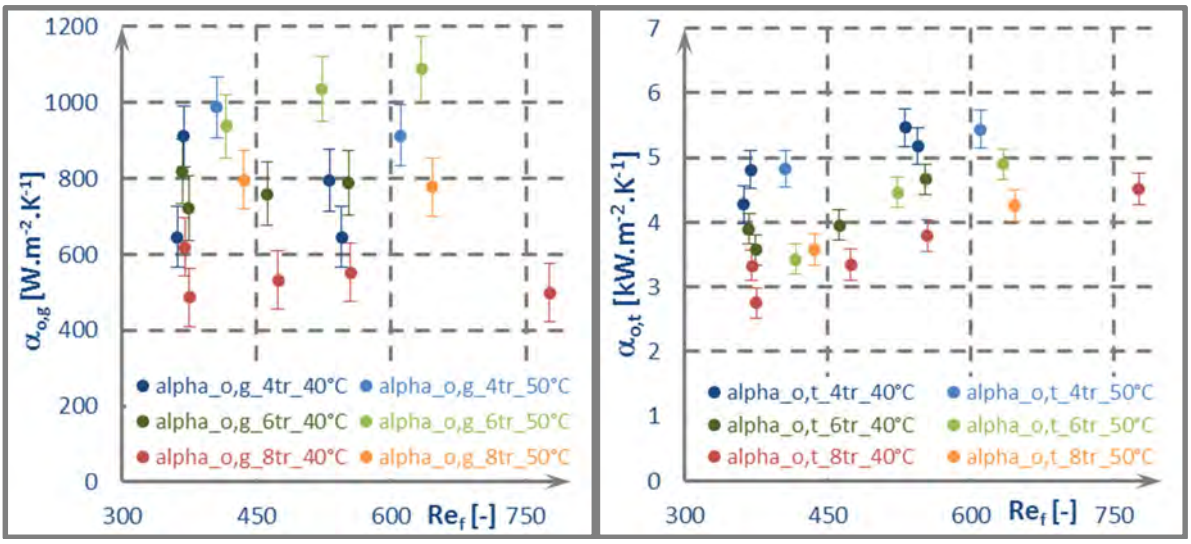


Obr. 56 Vývoj varu na skrápěném trubkovém svazku při počátečním teplotním spádu 15 a 20/40°C

Graf je pomyslně rozdělen na dvě poloviny. Do Prandtlova čísla $4{,}8\ [-]$ jsou body stanovené pro teplotu topné kapaliny $50\ °C$ a nad tuto hodnotu jsou pro teplotu topné kapaliny $40\ °C$. Vzhledem k maximální možné dosažitelné teplotě skrápěcí kapaliny (cca $40\ °C$) je i Prandtlovo číslo vyšší. Body pro čtyřtrubkový svazek začínají při hodnotě $5{,}19\ [-]$, čímž plynule navazují na osmitrubkový svazek, u kterého body končí na hodnotě $5{,}18\ [-]$. Hodnoty Prandtlova čísla šestitrubkového svazku tento přechod překrývají, resp. jsou v rozsahu $5{,}15$ až $5{,}21\ [-]$. Hranice varu 75 % výšky svazku se ve všech případech pohybuje přibližně na shodné úrovni $(-1{,}3 \pm 0{,}2)$ %. Body zbylých hranic jsou pro názornost proloženy vhodně zvolenou křivkou, ze které je jasný vzrůstající trend v řádu jednotek stupňů Celsia při narůstajícím Prandtlově čísle.

U jednotlivých měření varu při počátečních teplotních spádech 15 a 20/40 °C byl opět vybrán rozsah teplot skrápěcí kapaliny ponížené o teplotu saturace při aktuálním tlaku v komoře, při kterém byl součinitel přestupu tepla parní fáze již na přibližně konstantní úrovni. Z hodnot dalších fyzikálních veličin, ať již naměřených anebo odvozených, v tomto rozsahu byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka. Tyto průměrné hodnoty pro jednotlivé experimenty jsou v Příloze IV, tab. p. 12.

Na obr. 57 vlevo jsou v grafu vyneseny body součinitele přestupu tepla parní fáze ($\alpha_{o,g}$) a tomtéž obrázku vpravo jsou v grafu vyneseny body celkového součinitele přestupu tepla ($\alpha_{o,t}$), který byl stanoven na základě rovnice (3.79). Body jsou vyneseny v závislosti na Reynoldsově čísle kapalné fáze a byly vypočítány jako průměrná hodnota pro již ustálený průběh, který je patrný na obr. 55 u experimentů, kdy byla teplota topné vody na vstupu do svazku cca $50\,°C$. Relativní ustálení součinitele přestupu tepla nastalo v době, kdy byla teplota sytosti skrápěcí kapaliny alespoň na 75 % výšky trubkového svazku. U jednotlivých bodů je také vyznačena směrodatná odchylka průměrné hodnoty, která byla vypočítána také ze všech odvozených hodnot daného experimentu, kdy již byl průběh relativně ustálený.



Obr. 57 Porovnání součinitele přestupu tepla parní fáze (vlevo) a celkového součinitele (vpravo)

Nejvyšších hodnot součinitele přestupu tepla parní fáze bylo dosahováno u šestitrubkového svazku při teplotě topné vody vstupující do svazku $50\,°C$. Zároveň má součinitel rostoucí tendenci v závislosti na rostoucím průtoku skrápěcí kapaliny. Tento trend koresponduje s grafem vývoje varu na trubkovém svazku uvedeným na obr. 54. Hodnoty součinitele parní fáze osmitrubkového svazku při teplotě topné vody $50\,°C$ jsou na přibližně shodné úrovni se součiniteli šestitrubkového svazku při teplotě topné vody $40\,°C$. Nejnižších hodnot je dosahováno u osmitrubkového svazku při teplotě topné vody $40\,°C$, přičemž trend bodů v závislosti na velikosti průtoku skrápěcí kapaliny je relativně lineární. U hodnot čtyřtrubkového svazku nelze jednoznačně určit závislost ani trend, neboť hodnoty oscilují v rozmezí nejvyššího a nejnižšího popsaného trendu.

U celkových součinitelů přestupu tepla, které zahrnují výsledky kapalné i parní fáze, o totožné geometrii a teplotách topné vody 40 a $50\,°C$ lze najít společnou relativně lineární závislost. U všech třech geometrií mají hodnoty stoupající trend v závislosti na rostoucím průtoku skrápěcí kapaliny. Nejvyšších hodnot je dosahováno u čtyřtrubkového svazku a nejnižších hodnot u osmitrubkového svazku, přičemž dominantní složkou jednotlivých součinitelů je součinitel kapalné fáze. Při nejnižších testovaných průtocích jsou výsledky šestitrubkového svazku na přibližně shodné úrovni s osmitrubkovým, ale při rostoucím průtoku jsou nakonec hodnoty vyšší až o cca 13 % a horní toleranční pole bodů je na přibližně shodné úrovni s dolním tolerančním polem hodnot čtyřtrubkového svazku.

7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S JINÝMI STUDIEMI

7.1 Porovnání součinitele přestupu tepla nevroucí kapaliny

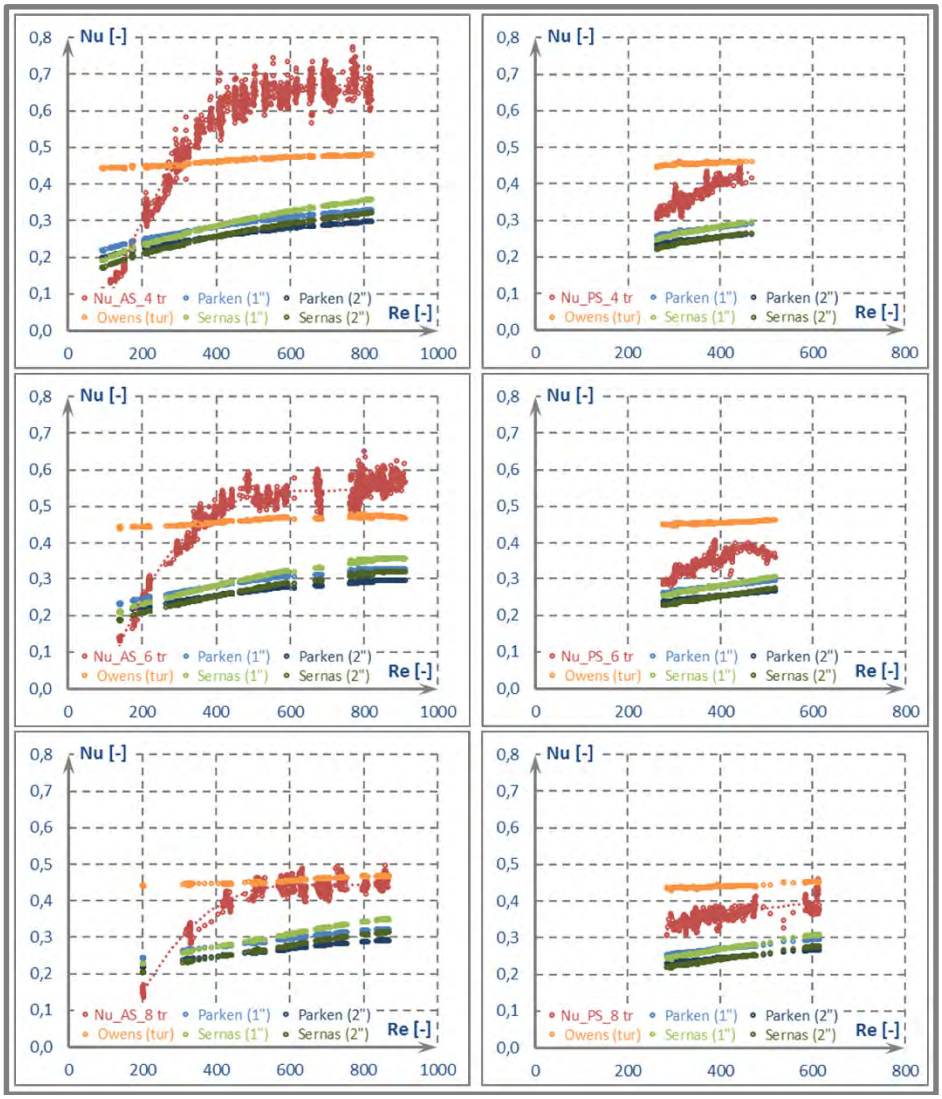
V této kapitole bude navázáno na kapitolu 6.2, ve které byly porovnány výsledky součinitele přestupu tepla, které byly stanoveny na základě experimentů u atmosférického standu a podtlakového standu při atmosférickém tlaku. Ve zmíněné kapitole byly vybrány experimenty, které byly prováděny na hladkém trubkovém svazku, který byl složen ze čtyř, šesti, nebo osmi trubek. V tab. 16 na straně 90 je uveden souhrn základních měřených veličin.

V kapitole 1.4 byly popsány tři základní matematické modely, které 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. Jednotlivé matematické modely byly mezi sebou porovnány na obr. 11 při teplotních stavech $45{,}0$ a $80{,}0\ °C$ a atmosférickém tlaku. První uvedený model publikoval Parkena a kol. (1990) **[28]**, který odvodili na základě experimentů na jedné elektricky vyhřívané mosazné trubce. Experimenty prováděli v rozsahu teplot skrápěcí kapaliny (vody) $45{,}0$ až $127{,}0\ °C$ a rozsahu hmotnostního průtoku $0{,}135$ až $0{,}366\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. Třetí model uvedený v kapitole 1.4 byl od Sernase a kol. (1979) **[29]**. Ten také prováděl experimenty na jedné elektricky vyhřívané mosazné trubce v rozsahu teplot skrápěcí kapaliny (vody) $44{,}9$ až $117{,}0\ °C$ a rozsahu hmotnostního průtoku $0{,}133$ až $0{,}292\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. V obou dvou případech byly experimenty prováděny na jedno a dvou coulové trubce a pro každý průměr vyjádřili Nusseltovo číslo v závislosti na Reynoldsově a Prandtlově čísle. V případě Parkena byla rovnice (1.26) určena pro průměr trubky 1" a (1.27) pro průměr trubky 2". V případě Sernase byla rovnice (1.34) uvedena pro průměr trubky 1" a (1.35) pro průměr trubky 2". Přestože u obou studií je uvedeno, že neshledali významnou závislost na Reynoldsově čísle, je nutné uvést, že výsledky u atmosférického a podtlakového standu byly stanoveny v rozsahu hmotnostního průtoku skrápěcí kapaliny $0{,}021$ až $0{,}227\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ a $0{,}060$ až $0{,}144\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. Z tohoto pohledu jsou rovnice platné pro přibližně druhou polovinu provedených (porovnávaných) experimentů. U porovnávaných výsledků experimentů na atmosférickém a podtlakovém standu byly střední teploty skrápěcí kapaliny závislé na velikosti jejího průtoku a v rozmezí cca $18{,}2$ až $25{,}2\ °C$. Což je pod dolní hranicí matematických modelů, se kterými jsou data porovnána. Výsledkem je o něco vyšší Prandtlovo číslo dosazované do kriteriálních rovnic pro stanovení Nusseltova čísla.

Druhým (prostředním) matematickým modelem uvedeným v kapitole 1.4 je autorem Owens (1978) **[13]**. Ten prováděl experimenty na jedné elektricky vyhřívané ocelové hladké trubce, u které testoval i vzdálenost distribuční trubky. Proto v kriteriálních rovnicích využívá člen zohledňující poměr rozdílu rozteče a průměru trubek k průměru trubky. Mimo to kriteriální rovnice rozdělil podle režimu proudění (laminární a turbulentní). U laminárního proudění je mimo členu zohledňujícího rozteč a průměr trubky ještě funkcí Reynoldsova čísla. Rovnice je uvedena pod číslem (1.30). Pro turbulentní proudění je uvedena rovnice (1.31) a mimo členu zohledňujícího rozteč a průměr trubky je funkcí ještě Prandtlova čísla. Hranice Reynoldsova čísla pouze mezi uvedenými rovnicemi je definována na základě Prandtlova čísla v rovnici (1.32) a v případě experimentů provedený na AS a PS je ve výši cca $0{,}08$ až $0{,}12\ [-]$. Proto při porovnání nebude uvažována Sernasova rovnice Nusseltova čísla pro laminární proudění. Rozsah Reynoldsových čísel, pro které jsou uvedené rovnice platné, je 120 až $10\ 000\ [-]$, tedy pro celý porovnávaný rozsah.

Na obr. 58 jsou porovnány výsledky Nusseltova čísla na základě provedených experimentů se zmíněnými matematickými modely. Hodnoty odvozené z experimentů na AS a PS jsou vyznačeny červenými body. V levé polovině obrázku jsou výsledky z atmosférického standu a v pravé polovině jsou výsledky z podtlakového standu. V první třetině obrázku jsou výsledky ze čtyřtrubkového svazku, ve druhé třetině z šestitrubkového svazku a v poslední

třetině z osmitrubkového svazku. Tyto body jsou také proloženy červenou tečkovanou čarou o vhodně zvolené funkci, která reprezentuje průběh střední hodnoty.



Obr. 58 Porovnání výsledků Nusseltova čísla s dalšími studiemi (AS/PS-H-B1-4/6/8)

Ostatní body na jednotlivých grafech na obr. 58 byly stanoveny na základě kriteriálních rovnic uvedených výše a jednotlivé průběhy z bodů jsou pojmenovány podle hlavních autorů jednotlivých studií. V závorce u jména je rozlišeno, zda byla kriteriální rovnice odvozena pro jedno, nebo dvou coulovou trubku. Do kriteriálních rovnic byly dosazovány hodnoty Reynoldsova a Prandtlova čísla, která byla odvozena na základě získaných údajů z jednotlivých měření u dané prezentované geometrie. V případě rovnice (1.31) stanovené Owensem pro turbulentní režim byla dosazena rozteč B1 (20,0 mm) a průměr trubky 12,0 mm. Tj. podle geometrie, na které byly prováděny experimenty na atmosférickém i podtlakovém standu.

Grafy u atmosférického standu mají rozmezí Reynoldsova čísla nula až tisíc, vzhledem k širokému rozsahu testovaného průtoku skrápěcí kapaliny, jehož minimální a maximální meze dosahovali až 1,3 a 13,6 $l \cdot min^{-1}$ oproti hodnotám u podtlakového standu, kde dosahovali pouze výše 3,4 a 8,1 $l \cdot min^{-1}$. Proto jsou i průběhy více vypovídající. Nejlepší shody bylo dosaženo v případě osmitrubkového svazku u atmosférického standu s průběhem stanoveným podle Owense (turbulentní režim). Rozdíl mezi středními hodnotami byl cca 4,7 % při Reynoldsově čísle vyšším jak cca 510 $[-]$. U šestitrubkového svazku klesla hranice Reynoldsova čísla, za kterou lze pokládat průběh Nusseltova čísla relativně nezávislý na průtoku skrápěcí kapaliny na úroveň cca 420 $[-]$ a u čtyřtrubkového svazku je tato hranice

na úrovni cca 480 [−]. U šesti a čtyřtrubkového svazku zůstal průběh Nusseltova čísla stanoveného podle Owense na přibližně shodné úrovni (rozdíl je v řádu setiny Nusseltova čísla), ale průběhy Nusseltova čísla odvozené na základě experimentů při zvyšování měrného zatížení tento průběh přeskočili a rozdíl středních hodnot je v případě šestitrubkového svazku vyšší o cca 11 % a v případě čtyřtrubkového svazku je vyšší o cca 25 %.

Při podkročení zmíněných hranic Reynoldsových číslech, které byly zmíněny u jednotlivých geometrií v předchozím odstavci, došlo k rychlému poklesu Nusseltova čísla stanoveného na základě experimentů a průběhy se při svém propadu pomyslně protínají se zbylými porovnávanými průběhy, které byly stanoveny podle studií Parkena a Sernase. Ve všech šesti grafech se průběhy stanovené podle Parkena a Sernase pohybují na přibližně shodné úrovni. Rozptyl průměrné hodnoty stanovené z jednotlivých hodnot (Parken 1", Parken 2", Sernas 1" a Sernas 2") vypočítaných při shodném průtok se pohybuje při vyšších Reynoldsových číslech v případě výsledků u atmosférického standu na úrovni cca 5,2 % a se snižujícím se průtokem rozptyl stoupá. U nejnižšího testovaného průtoku v případě čtyřtrubkového svazku rozptyl dosahuje až k 8,6 %, ale maximální absolutní směrodatná odchylka průměrné hodnoty daného průtoku je ve výši cca 0,02 [−]. V případě výsledků dosažených u podtlakového standu se pohybují v minimální výši na shodné úrovni s výsledky na AS, ale maximální hodnoty se vzhledem k testovanému rozsahu průtoku skrápěcí kapaliny ve všech třech případech pohybují na úrovni pouze cca 5,6 %.

Prudký pokles Nusseltova čísla při malých průtocích skrápěcí kapaliny, které nastali při podkročení zmíněných hranic Reynoldsova čísla u experimentů atmosférického standu může být způsoben příliš tenkým kapalným filmem a relativně malými odběry tepelných toků topné kapalině. Tento stav Ganic (1980) **[19]** nazývá jako „dryout“, přestože na svazku ještě suchá místa fyzicky přítomna nejsou a proto ho například Ribatski (2007) **[38]** označuje jako „non-dryout“. Tato problematika byla nastíněna v kapitole 1.7. Uvedené experimenty byly ukončeny nejpozději v době, kdy se na svazku objevilo první suché místo, které bylo dobře detekovatelné termovizní kamerou, tedy nejpozději při nejmenším uvedeném Reynoldsově čísle. Ve všech třech případech se při nejnižším testovaném průtoku cca 2,0 $l \cdot min^{-1}$skrápěcí kapaliny pohyboval měrný tepelný tok odebraný topné kapalině na průměrné úrovni cca 14,1 $kW \cdot m^{-2}$.

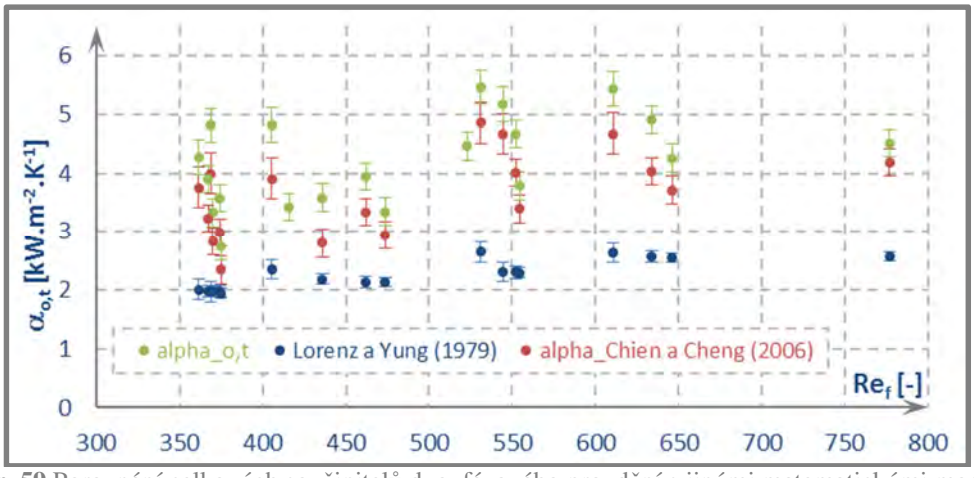
Výsledky experimentů podtlakového standu na obr. 58 se pohybovaly mezi průběhy stanovenými Owensem, u kterého bylo dosahováno vyšších hodnot v celém porovnávaném rozsahu, a naopak průběhy stanovené podle Perkena a Sernase dosahovali v celém porovnávaném rozpětí nižších hodnot. Rozpětí Reynoldsova čísla na vodorovné ose bylo proti grafům AS zúženo na 800 [−] vzhledem k maximální výši testovaného průtoku skrápěcí kapaliny, který byl cca 8,0 $l \cdot min^{-1}$, protože hlavním cílem experimentů u podtlakového standu bylo testování vlivu oblasti průtoku skrápěcí kapaliny ve zlomu „non-dryout“, při kterém začíná prudce klesat součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného svazku, na var (vývoj varu) na skrápěném trubkovém svazku. Z tohoto pohledu se nejvíce přibližovaly hodnoty Nusseltova čísla u čtyř a osmitrubkového svazku při nejvyšším testovaném průtoku k průběhu stanoveného podle Owense. U čtyřtrubkového svazku byla střední hodnota získaná na základě experimentů menší o cca 8,0 % a u osmitrubkového svazku byla střední hodnota menší o cca 10,0 %, přičemž několik hodnot je na úrovni tohoto porovnávaného průběhu.

7.2 Porovnání součinitele přestupu tepla vroucí kapaliny

V této kapitole bude navázáno na výsledky uvedené na závěr kapitoly 6.3, kde byly uvedeny hodnoty celkového součinitele přestupu tepla při dvoufázovém proudění na obr. 57 vpravo a tyto výsledky budou v této kapitole porovnány se dvěma matematickými modely. Prvním z nich je uveden v kapitole 1.5 Matematický model přestupu tepla vroucí kapaliny a je určen na základě jedné vertikální poloviny jedné horizontální trubky, která při rozvinutí představuje vertikální stěnu, na které stéká kapalina. Celkový součinitel přestupu tepla na této stěně lze určit na základě rovnice (1.37), kterou stanovili Lorenz a Yung (1979) **[30]**, a která je složena ze součtu tří členů. Prvním členem je součinitel přestupu tepla na hranici varu, který je základní hodnotou pro celou stěnu, u které se předpokládá, že na ní vstupuje kapalina na mezi sytosti. Druhým členem je součinitel přestupu tepla rozvíjející se oblasti a třetím členem je součinitel přestupu tepla plně vyvinuté oblasti. Druhý a třetí člen je korigován poměrem velikosti úseku vertikální stěny, na kterém působí, k celkové výšce vertikální stěny. S tímto matematickým modelem byla srovnávána řada výzkumů a to hlavně v oblasti chladiv. Proto byly i rovnice stanovující jednotlivé členy zpřesňovány a v kapitole 1.5 jsou uvedeny tvary, které doporučují další uvedení autoři, a které byly pro následující porovnání použity.

Druhý matematický model, se kterým budou celkové součinitele přestupu tepla porovnány, je uveden v kapitole 1.6 Matematický model pro dvoufázové proudění. Chien a Cheng (2006) **[15]** uvádí, že model Chuna a Sebana (1971) **[9]**, na základě kterého byl počítán součinitel plně vyvinuté oblasti v předchozím matematickém modelu, není v dobré shodě s prakticky naměřenými výsledky pro různá chladiva, a proto doporučují využít model pro vodorovnou trubku, u kterého je zahrnut i vliv vzniku bublin. Základní rovnice matematického modelu pro dvoufázové proudění v kapitole 1.6 má označení (1.50) a byla stanovena Chenem (1966) **[36]** pro výpočet celkového součinitele přestupu tepla dvoufázového proudění. Rovnice vychází z principu superpozice a první složka reprezentuje součinitel přestupu tepla na hranici vzniku varu, jehož výpočet je uveden v kapitole 1.5.1 a je korigován faktorem potlačení S [−]. Druhá složka reprezentuje součinitel konvektivního přestupu tepla, který je roven součinu dvoufázového posilového faktoru E [−] a součiniteli přestupu tepla pro jednofázové kapalné proudění. Pro faktor potlačení a dvoufázový posilový faktor doporučují Chien a Cheng (2006) rovnice (1.51) a (1.52).

Na obr. 59 jsou uvedeny všechny celkové součinitele přestupu tepla, které byly odvozeny na základě provedených experimentů a uvedeny na obr. 57, jednotně zelenými body a označeny „alpha_o,t“. Modré body označují hodnoty stanovené podle matematického modelu Lorenze a Yunga (1979) **[30]** a červené body označují hodnoty stanovené podle matematického modelu Chiena a Chenga (2006) **[15]**. Celkové součinitele přestupu tepla jsou vyneseny v závislosti na Reynoldsově čísle kapalné fáze.



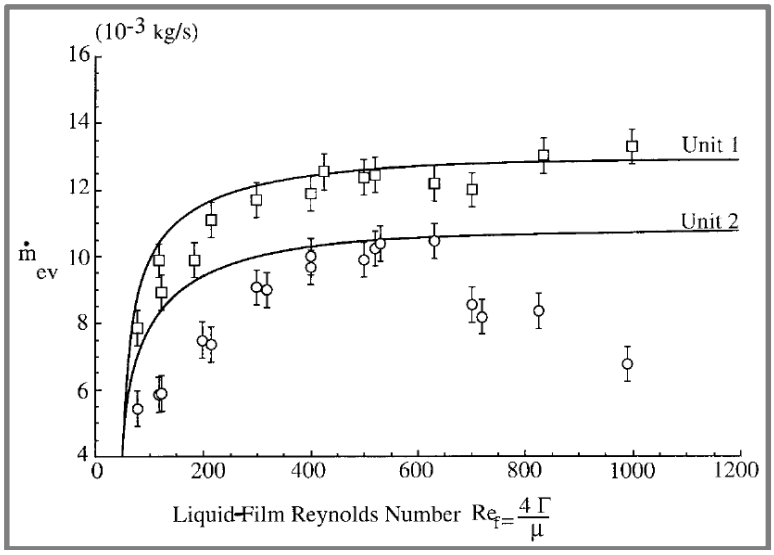
Obr. 59 Porovnání celkových součinitelů dvoufázového proudění s jinými matematickými modely

Jednotlivé body reprezentují průměrné hodnoty a byly vypočítány u jednotlivých geometrií a teplot topné vody (40 a 50 °C) z hodnot naměřených při experimentech v časech, kdy byl již relativně ustálen součinitel přestupu tepla parní fáze. Z dílčích výsledných součinitelů byla stejně jako průměrná hodnota vypočítána také její směrodatná odchylka.

Při výpočtu celkového součinitele přestupu tepla dvoufázového proudění nestanovují Chien a Cheng (2006) **[15]** rovnici pro výpočet součinitele přestupu tepla jednofázového kapalného proudění, a proto byl využit součinitel přestupu tepla stanovený podle rovnice (3.23). Pro stanovení faktoru potlačení a dvoufázového posilového faktoru využívají Martinelliho parametr (X_{tt} [−]), díky kterému lze rovnici využít pro výpočet součinitele přestupu tepla dvoufázového proudění jakéhokoliv média. Martinelliho parametr je funkcí, podle rovnice (1.53), suchosti páry, kterou lze vypočítat podle rovnice (3.70), hodnot dynamické viskozity syté kapaliny a syté páry a hustoty syté kapaliny a syté páry. Tyto stavy byly určeny na základě aktuálního tlaku v komoře určovaného bodu.

Nejlepší shody celkových součinitelů přestupu tepla při dvoufázovém proudění bylo s druhým uvedeným matematickým modelem, kde průměrné hodnoty stanovené podle Chien a Cheng (2006) **[15]** byly průměrně menší o $(13{,}6 \pm 2{,}9)\%$, přičemž nejvyšší rozdíl byl 17,9 %. Celkové součinitele přestupu tepla stanovené podle Lorenze a Yunga (1979) **[30]** jsou v průměrné výši cca $2{,}25 \pm 0{,}25\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a v celém porovnávaném rozsahu Reynoldsova čísla jsou menší oproti hodnotám vycházejícím z provedených experimentů. Nejblíže shody jsou u osmitrubkového svazku, kde jsou průměrné hodnoty menší v rozpětí 29,5 % až 43,2 %. U šestitrubkového svazku jsou průměrné hodnoty menší v rozsahu 44,8 % až 43,2 %a čtyřtrubkového svazku 51,2 % až 59,1 %.

Bourouni a kol. (1999 a, b) publikovali v **[54]** a **[55]** analytický model a pilotní měření u dvou odsolovacích jednotek, které využívají vodu z geotermálních pramenů v teplotním rozsahu 60 °C až 90 °C. Prezentované jednotky jsou umístěny ve Francii a na jihu Tuniska. Válcová nádoba tuniského výparníku má průměr 1,4 m a délku 2,5 m, ve které je umístěno na 2 000 $trubek$, které jsou z polypropylenu o světlosti 20,0 mm, vnějším průměru 25,6 mm a rozteči trubek 30,7 mm. Trubkové svazky jsou v několika vystřídaných řadách, mezi kterými je horizontální rozteč 33,3 mm. **[55]**

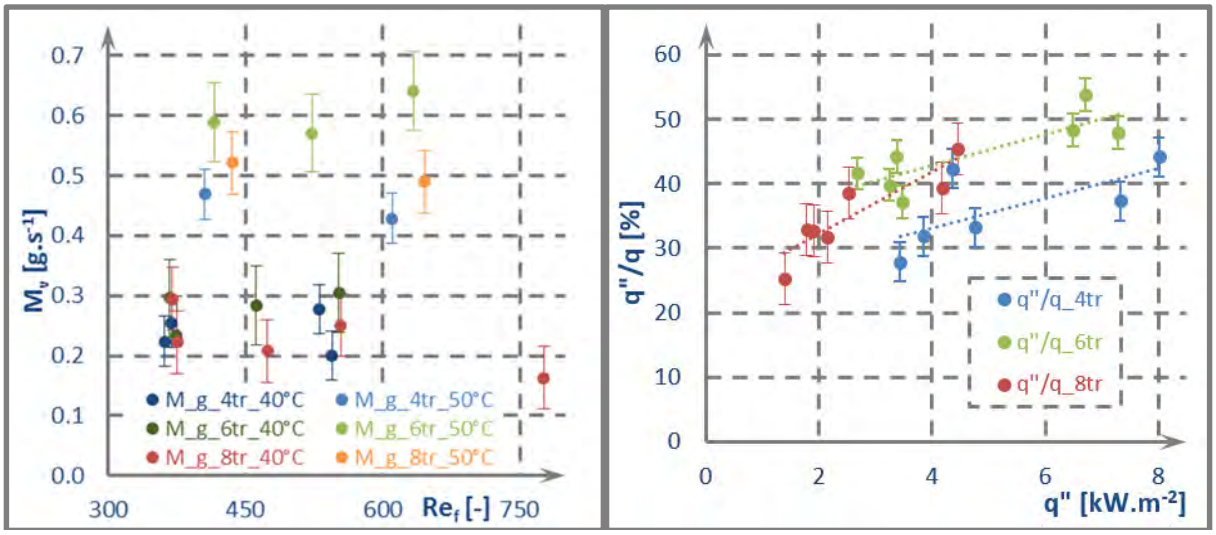


Obr. 60 Množství generované páry v odsolovacích jednotkách **[55]**

Na obr. 60 jsou porovnány výsledky analytického modelu **[54]** a pilotních měření **[55]** obou zmíněných jednotek, kde je na vodorovné ose vyneseno Reynoldsovo číslo kapalného filmu a na svislé ose hmotnostní průtok generované páry v gramech za sekundu. Predikce na základě matematického modelu jsou vyneseny čarou u obou jednotek, které jsou označeny „Unit 1“ a „Unit 2“. U obou jednotek byla teplota topné vody na vstupu do výměníku 62 °C a

teplota skrápěcí kapaliny 34 °C. Body stanovené na základě experimentů mají tvar v případě první jednotky čtverce a v případě druhé jednotky mají tvar kruhu. Při nárůstu průtoku skrápěcí kapaliny došlo k ustálení hmotnostního průtoku generované páry v případě první jednotky na úrovni cca 12 $g \cdot s^{-1}$ a v případě výsledků druhé jednotky k ustálení nedošlo, ale bylo dosaženo pouze maxima generované páry v rozmezí Reynoldsova čísla cca 400 až 650 [−] na úrovni cca 10 $g \cdot s^{-1}$.

Množství generované páry stanovená na základě experimentů u podtlakového standu je na obr. 61 vlevo. Generované množství páry je vyneseno na svislé ose v gramech za sekundu v závislosti na Reynoldsově čísle kapalné fáze skrápěcí kapaliny (vodorovná osa).



Obr. 61 Porovnání množství generované páry (vlevo) a poměr tepelných toků (vpravo)

Generované množství bylo stanoveno na základě rovnice (3.68) a průměrné hodnoty společně s jejich směrodatnou odchylkou byly vypočítány v časech jednotlivých experimentů, kdy došlo k relativnímu ustálení součinitele přestupu tepla parní fáze. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u šestitrubkového svazku, kde byla teplota topné vody na vstupu do výměníku 50 °C. Výsledné množství se pohybuje na průměrné úrovni cca 0,60 ± 0,03 $g \cdot s^{-1}$, což je cca 5,0 % množství generované páry u odsolovacího zařízení „Unit 1“, jehož výsledky jsou na obr. 60. Avšak šestitrubkový svazek testovaný v podtlakovém standu má celkovou délku měděných trubek 5,64 m a teplota topné vody byla o cca 12,0 °C nižší.

Množství generované páry u čtyřtrubkového svazku při teplotě topné vody 50 °C je na průměrné úrovni cca 0,45 ± 0,02 $g \cdot s^{-1}$ a u osmitrubkového svazku při teplotě topné vody 50 °C je množství generované páry 0,51 ± 0,02 $g \cdot s^{-1}$, přičemž pole směrodatných odchylek se překrývá s poli bodů šesti i osmitrubkového svazku při stejných teplotách topné vody. Výsledky při teplotě topné vody 40 °C jsou u všech testovaných geometrií na přibližně shodné průměrné úrovni cca 0,25 ± 0,04 $g \cdot s^{-1}$.

Na obr. 61 vpravo je vynesen procentuální podíl množství měrného tepelného toku využitého pro var kapaliny na skrápěném trubkovém svazku k celkovému měrnému tepelnému toku odebraného topné kapalině v závislosti na měrném tepelném toku spotřebovaném pro var kapaliny. Průměrné body byly opět stanoveny v časech jednotlivých experimentů, kdy byl již relativně ustálený součinitel přestupu tepla parní fáze. Poměr tepelných toků vychází z energetické a hmotové bilance uvedené v kapitole 3.4. Průběhy jednotlivých geometrií byly proloženy přímkou a je z nich patrné, že průběh osmitrubkového svazku na úrovni 50 °C topné vody se překrývá s průběhem šestitrubkového svazku v oblasti 40 °C topné vody a dále pokračuje v předchozím trendu. Průběh čtyřtrubkového svazku má stejný trend jako je v případě šestitrubkového svazku, avšak je o cca 20 % posunut níže mimo jednoho bodu.

ZÁVĚR

Horizontální trubkové svazky, po kterých stéká tenký kapalný film, nejsou novou technologií. Jsou využívány především ve výparnících 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 trubku, 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 [A1] a pro testování skrápěných výměníků v podtlaku bylo postaveno experimentální zařízení podtlakový stand [A2]. Hlavním cílem pokusů 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.

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 $7{,}2\ l \cdot min^{-1}$ s přípustným rozsahem $\pm\ 0{,}1\ l \cdot min^{-1}$. 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 $11{,}1 \pm 0{,}9\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a $10{,}2 \pm 1{,}6\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. 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 $0{,}12\ kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$, u roztečí

B1 a C1 se zlom pohybuje na úrovni cca 0,10 až 0,11 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ a při nejvyšší rozteči, tj. A2 zlom klesne až k hodnotě cca 0,09 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. Při klesajícím trendu součinitele se u čtyř a šestitrubkového svazku pohybují hodnoty na přibližně shodné úrovni. V tabulkách v Příloze I 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 $8{,}5 \pm 0{,}4\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ při neuvažování průběhu s roztečí A2, u kterého došlo k ustálení o cca $2{,}4\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ 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 $7{,}0 \pm 0{,}7\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ 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 $5{,}4 \pm 1{,}0\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Ustálení u rozteče A2 dochází při průtoku cca 0,08 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ a se zmenšující se roztečí se tato hranice navyšuje, kde u roztečí B1 a C1 je na úrovni 0,10 až 0,11 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. 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 výsledky součinitele přestupu tepla v případě rozteče trubek A1, kde jsou průběhy na srovnatelné úrovni, resp. průměrná hodnota je $7{,}3 \pm 0{,}5\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. U dalších geometrií jsou hodnoty na maximálně srovnatelné úrovni. Při srovná 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 této 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 zrovnoměrňoval 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. Mocninná 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 kapalině. 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 této práce.

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 otápět 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 $l \cdot min^{-1}$ 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 $55\ kPa(abs)$ 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 $l \cdot min^{-1}$. 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 $l \cdot min^{-1}$ 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 $15{,}0\ °C$ a $20{,}0\ °C$, tak teploty topné kapaliny vstupující do svazku, kde bylo testováno $40{,}0\ °C$ a $50{,}0\ °C$. Tolerované odchylky testovaných teplot byly $\pm 1{,}0\ °C$. Testovány byly teplotní spády 20/40, 15/40 a 20/50 °C v rozmezí průtoků skrápěcí kapaliny 4,0 až 6,0 $l \cdot min^{-1}$. 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 °C) po nejvyšší (20/50 °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 °C.

Výsledky experimentů provedených při atmosférickém tlaku u podtlakového standu byly porovnány s výsledky dosaženými u atmosférického standu. Jako jeden z důležitých faktorů ovlivňujících součinitel přestupu tepla se ukázal vliv délky skrápěné zóny, která je v případě podtlakového standu kratší o cca $60{,}0\ mm$. V uvedených grafech průběhu teplot topné vody je patrné, že průběh teploty v každé trubce je relativně lineární a směrnice těchto přímek jsou na přibližně shodné úrovni. Ve výsledku byl odebraný tepelný tok topné kapalině při totožném průtoku skrápěcí kapaliny u podtlakového standu menší společně se součinitelem přestupu tepla.

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) **[28]** a Sernase a kol. (1979) **[29]** byly z mosazi a v případě Owens (1978) **[13]** z nerezi. V případě prvních dvou matematický modelů autoři vytvořili kriteriální rovnice pro každý testovaný průměr mosazné trubky zvlášť a v případě kriteriální rovnice stanovené Owensem obsahovala člen zohledňující vzdálenost distribuční trubky od otápěné skrápěné trubky podělený průměrem skrápěné trubky. Owens také odvodil dvě kriteriální rovnice, ale rozdělil je podle typu proudění na laminární a turbulentní. 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.

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 °C v rozmezí průtoků skrápěcí kapaliny $4{,}0$ až $6{,}0\ l \cdot min^{-1}$. 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 vyliv 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 výtoku 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 $-1{,}5\ °C$ 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 $50{,}0\ °C$ 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 kapalné 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 $0{,}25 \pm 0{,}04\ g \cdot s^{-1}$. 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 $0{,}60 \pm 0{,}03\ g \cdot s^{-1}$, u čtyřtrubkového svazku byla průměrná hodnota množství cca $0{,}45 \pm 0{,}02\ g \cdot s^{-1}$ a průměrná hodnota u osmitrubkového svazku byla ve výši $0{,}51 \pm 0{,}02\ g \cdot s^{-1}$, 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.

Výsledky celkových součinitelů tepla při dvoufázovém proudění byly porovnány se dvěma matematickými modely. První matematický model, jehož hlavní strukturu stanovili Lorenze a Yunga (1979) **[30]**, 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 $2{,}25 \pm 0{,}25\ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a byly menší v rozmezí $29{,}5\ \%$ až $59{,}1\ \%$ oproti hodnotám stanoveným podle kapitoly 3.4.

Druhý matematický model pro dvoufázové proudění definoval Chien a Cheng (2006) **[15]**. 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 stanoveného v kapitole 3.1.3.

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 kapalné fáze a množství generované páry.

Dílčí výsledky práce byly průběžně publikovány po celou dobu doktorského studia v příspěvcích na řadě tuzemských a zahraničních konferencích a v odborných vědeckých časopisech, viz [B5] – [B22] anebo k jejich publikování dojde v roce 2016 [B1] – [B4].

ZAPOJENÍ AUTORA VE VAV PROJEKTECH A DALŠÍ AKTIVITY

Dílčí výsledky práce byly součástí řešených projektů, na nichž se autor dizertační práce podílel během svého doktorského studia. Byly jimi projekt základního výzkumu financovaný Grantovou agenturou České republiky GAP101/10/1669 *Přenos tepla na skrápěných trubkových svazcích v hlubokém podtlaku* a projekty výzkumu interní grantové agentury VUT v Brně FSI-S-11-7 *Vybrané komponenty trigeneračních procesů* a FSI-S-14-2403 *Komplexní výzkum spalovacích zařízení a využití tepla*. Získané dílčí výsledky byly rovněž součástí řešení projektů výzkumné infrastruktury OP VaVpI ED0002/01/01 *NETME Centre* a navazujícího projektu LO1202 NETME Centre PLUS s finanční podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci Národního programu udržitelnosti I.

Během doktorského studia se autor zapojil i do řešení dalších výzkumných úkolů, které byly řešeny v rámci projektů FCH/FSI-J-14-2364 *Kontaminace produktů spalování a zplyňování biomasy a odpadů organickými polutanty* a FR-TI4/353 *Intenzifikace a optimalizace zplyňovacích jednotek a dopalovacích komor pro velmi vlhkou odpadní biomasu*.

Autor se rovněž podílel na spolupráci s průmyslovými partnery. A to s G-Team, a.s., pro které byl vytvářen algoritmus informativního výpočtu TR a detailní výpočet lopatkování 3st. TR, s firmou Doosan Škoda Power s.r.o., pro které se podílel na tvorbě metodiky návrhu vzduchem chlazeného kondenzátoru a s firmou TC MACH, s.r.o, pro které se podílel na návrhu jednostupňové turbíny, u které bylo expanzním médiem chladivo.

Autor se také podílel na zvyšování kvality výuky a výukových prostředků na Energetickém ústavu Fakulty strojního inženýrství v rámci projektů CZ.1.07/2.2.00/15.0165 *Absolvent-energetik připraven pro trh práce* a CZ.1.07/2.2.00/28.0256 *Středoevropský energetický institut* Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost. A to především v oblasti vedených cvičení v předmětech Lopatkové stroje, které vedl u prvních ročníků navazujících magisterských studijních programů Energetické inženýrství, Technika prostředí a Fluidní inženýrství, v předmětu Tepelné turbíny I, který vedl u prvního ročníku navazujícího magisterského studijního programu Energetické inženýrství, v předmětu Základy energetiky II, který vedl u třetího ročníku bakalářského studijního programu Energetika, procesy a ekologie, a v oblasti návrhu a přípravy experimentálních úloh. Pod autorovým vedením bylo úspěšně obhájeno 14 bakalářských prací a na 14 bakalářských a 8 diplomových prací autor vypracoval oponentní posudky.

V neposlední řadě se autor podílel na pořádání mezinárodní konference ERIN 2014 (Education, Research and INnovation), jejímž hlavním pořadatelem v roce 2014 byl Odbor energetického inženýrství VUT v Brně. V předchozích letech tuto konferenci pořádali například Slovenská technická univerzita v Bratislave a České vysoké učení technické v Praze. V roce 2015 byla hlavním pořadatelem Technische universität Wien. Dále se autor podílel na pořádání odborné vědecké konference se zahraničními účastníky Energie z biomasy, kterou každoročně pořádá Odbor energetického inženýrství.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] 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

[2] SHARMA, R. a S. MITRA. Performance Model for a Horizontal Tube Falling Film Evaporator. *International Journal of Green Energy*. 2005, roč. 2, č. 1, s. 109-127. doi: 10.1081/GE-200051315. ISSN 1543-5075.

[3] DE LA CALLE, A., BONILLA, J., ROCA, L. a P. PALENZUELA. Dynamic Modeling and Performance of the First Cell of a Multi-Effect Distillation Plant. *Applied Thermal Engineering*. 2014, roč. 70, č. 1, s. 410-420. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.035. ISSN 1359-4311.

[4] KOUHIKAMALI, R., NOORI RAHIM ABADI, S.M.A. a M. HASSANI Numerical Investigation of Falling Film Evaporation of Multi-Effect Desalination Plant. *Applied Thermal Engineering*. 2014, roč. 70 č. 1, s. 477-485. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.039. ISSN 1359-4311.

[5] 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 >

[6] HEROLD, K., RADERMACHER R. a S. KLEIN. *Absorption chillers and heat pumps*. Boca Raton: CRC Press, 1996, 329 s. ISBN 08-493-9427-9.

[7] POSPÍŠIL, J. a J. FIEDLER. Využití společné výroby elektrické energie, tepla a chladu. In: *Sborní prednášoik z 18. medzinárodnej konferencie VYKUROVANIE 2010*. Bratislava: SSTP Bratislava, 2010, s. 4. ISBN 978-80-89216-32-1.

[8] 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.

[9] 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 00221481.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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 00221481.

[20] LIENHARD, J. a P. WONG, The Dominant Unstable Wavelength and Minimum Heat Flux During Film Boiling on a Horizontal Cylinder. *Journal of Heat Transfer*. 1964, roč. 86, č. 2, s. 220-225. doi: 10.1115/1.3687103. ISSN 0022-1481.

[21] 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.

[22] 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.

[23] HOLMGREN, M. *X Steam: IAPWS IF97 Excel Steam Tables* [počítačový soubor .xls - freeware]. Ver. 2.6. [cit. 30.11.2010].

[24] 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.

[25] WANG, X. a A. JACOBI. A Thermodynamic Basis for Predicting Falling-Film Mode Transitions. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. 2012, č. 1315, s. 1-10.

[26] 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.

[27] WILKE, W. Wärmeübergang an Rieselfilme. *VDI-Forschungsheft*. 1962, č. 490, s. 36.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] ROHSENOW, W. Discussion: “On the Rohsenow Pool-Boiling Correlation” (Frost, C. W., and Li, K. W., 1971, ASME J. Heat Transfer, 93, pp. 232–234). *Journal of Heat Transfer*. 1972, roč. 94, č. 2, s. 255-256. DOI: 10.1115/1.3449920. ISSN 0022-1481.

Použitá literatura

[32] THOME, J. WOLVERINE TUBE, INC. *Engineering Data Book III* [online]. 2004-2010 [cit. 2013-07-25]. Dostupné z: <http://www.wlv.com/products/databook/db3/DataBookIII.pdf>

[33] COOPER, M. Saturation nucleate pool boiling: a simple correlation. *1st UK National Conference on Heat Transfer*. 1984, č. 86, s. 785-793.

[34] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: ČSNI, 1999.

[35] LUKE, A. Preparation and Analysis of Different Roughness Structures for Evaporator Tubes. *Heat and Mass Transfer*. 2009, roč. 45, č. 7, s. 909-917. doi: 10.1007/s00231-009-0481-1. ISSN 0947-7411.

[36] 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.

[37] 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.

[38] 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.

[39] 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.

[40] 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.

[41] FUJITA, Y. a M. TSUTSUI. Experimental Investigation of Falling Film Evaporation on Horizontal Tubes. *Heat Transfer - Japanese Research*. 1998, roč. 27, č. 8, s. 609-618. ISSN 1099-2871.

[42] 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.

[43] 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.

[44] 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.

[45] PAVELEK, M. *Termomechanika*. 3. přepracované vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. ISBN 80-214-2409-5.

[46] 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.

Použitá literatura

[47] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.

[48] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F. a M. HALAJ Nejistoty v měření I - vyjadřování nejistot. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2002, roč. 8, č. 4, s. 50-54. ISSN 1210-9592.

[49] VDOLEČEK, F., PALENČÁR, R. a M. HALAJ. Nejistoty v měření II - nejistoty přímých měření. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2002, roč. 8, č. 4, s. 52-56. ISSN 1210-9592.

[50] VDOLEČEK, F., PALENČÁR, R. a M. HALAJ. Nejistoty v měření III - nejistoty nepřímých měření. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2002, roč. 8, č. 4, s. 28-33. ISSN 1210-9592.

[51] COPEK, T.. *Přestup tepla na skrápěném trubkovém svazku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 38 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Petr Kracík.

[52] ZACHAR, M. *Termovizní měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014, 42 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Petr Kracík.

[53] KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 3. dopl. vyd. Brno: CERM, 2007, 170 s. ISBN 978-80-214-3380-9.

[54] BOUROUNI, K. MARTIN, R. a L. TADRIST. Analysis of Heat Transfer and Evaporation in Geothermal Desalination Units. *Desalination*. 1999, roč. 122, č. 2-3, s. 301-313. doi: 10.1016/S0011-9164(99)00050-8. ISSN 0011-9164.

[55] BOUROUNI, K. MARTIN, R. TADRIST L. a M.T. CHAIBI. Heat Transfer and Evaporation in Geothermal Desalination Units. *Applied Energy*. 1999, roč. 64, č. 1-4, s. 129-147. doi: 10.1016/S0306-2619(99)00071-9. ISSN 0306-2619

SEZNAM AUTORSKÝCH DĚL

1) Tvůrčí činnost

[A1] KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Atmosférický stand; Experimentální zařízení pro hodnocení skrápěných trubkových svazků. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Budova C3/314, místnost 2.2 URL: http://www.oei.fme.vutbr.cz/vysledky-vyzkumu. aspx. (funkční vzorek)

[A2] POSPÍŠIL, J., KRACÍK, P. a L. ŠNAJDÁREK. Podtlakový stend: Podtlaková zkušební komora pro hodnocení přestupu tepla na skrápěných trubkových svazcích v hlubokém podtlaku. Fakulta strojního inženýrství VUT, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Budova C3/213, místnost 2. 2. URL: http://www.oei.fme.vutbr.cz/vysledky-vyzkumu. aspx. (funkční vzorek)

2) Vlastní publikace vztahující se k tématu dizertační práce

[B1] KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. The Size Effect of Heat Transfer Surfaces on Boiling. *Materials and Technology.* 2016, roč.50, č. 6. ISSN 1580-2949.

[B2] KRACÍK, P., ŠNAJDÁREK, L., LISÝ, M., BALÁŠ, M. a J. POSPÍŠIL. Correlation of Heat Transfer Coefficient at Sprinkled Tube Bundle. *Materials and Technology.* 2016, roč. 50, č. 4. ISSN 1580-2949.

[B3] KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Influence of Underpressure on Heat Transfer and Temperature Field at Sprinkled Tube Bundle. *Applied Mechanics and Materials*. 2016, roč. 832, s. 200-207. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.832.200

[B4] KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Development Boiling to Sprinkled Tube Bundle. *EPJ Web of Conferences*, 2016. ISSN: 2100- 014X.

[B5] KRACÍK, P., COPEK, T., ZACHAR, M. a J. POSPÍŠIL. Evaluation of the Effect of Tube Pitch and Surface Alterations on Temperature Field at Sprinkled Tube Bundle. *EPJ Web of Conferences*, 2015, roč. 92, č. 02039, s. 297-304. ISSN: 2100- 014X.

[B6] KRACÍK, P., ŠPILÁČEK, M., BALÁŠ, M. a J. POSPÍŠIL. Boiling On Sprinkled Tube Bundle. In *Proceedings of the 2nd International Conference on POWER and ENERGY SYSTEMS (POES '15)*. Sliema, Malta: WSEAS Press, 2015. s. 23-29. ISBN: 978-1-61804-329- 0.

[B7] KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Effect of Tube Pitch on Heat Transfer in Sprinkled Tube Bundle. *Acta Polytechnica,* 2015, roč. 55, č. 5, s. 329-334. ISSN: 1210- 2709.

[B8] KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Vliv délky skrápěné zóny na přestup tepla u skrápěného trubkového svazku. In *Seminář Středoevropského energetického institutu, CENERGI II.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015. s. 21-30. ISBN: 978-80-214-5288- 6.

[B9] KRACÍK, P., ZACHAR, M., COPEK, T. a J. POSPÍŠIL. Teplotní pole na skrápěném trubkovém svazku. In *Sborník přednášek z konference Energie z biomasy XV.* Lednice: VUT v Brně, 2014. s. 75-81. ISBN: 978-80-214-5016- 5.

[B10] KRACÍK, P., ŠNAJDÁREK, L., LISÝ, M., BALÁŠ, M. a J. POSPÍŠIL. Correlation of Heat Transfer Coefficient at Sprinkled Tube Bundle. *Program and Book of Abstracts*. Ljubljana, Slovenia: Institute of Metals and Technology, 2014. s. 127-127. ISBN: 978-961-92518-7- 4.

[B11] ŠNAJDÁREK, L., KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Influence of the Surface Treatment of Tubes on the Heat Transfer in Low Pressure Atmosphere. *Key Engineering Materials,* 2014, č. 592-593, s. 225-228. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.525 ISSN: 1013- 9826.

[B12] KRACÍK, P., COPEK, T. a J. POSPÍŠIL. Effect of Tube Pitch on Heat Transfer in Sprinkled Tube Bundle. *Proceedings of Abstracts*. Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 48-48. ISBN: 978-80-214-4931- 2.

[B13] KRACÍK, P., ŠNAJDÁREK, L. a J. POSPÍŠIL. Long - Term Liquid Transfer Measurements of Falling Film Heat at Horizontal Tube Bundle. *The Holistic Approach to Environment.* 2014, roč. 4, č. 4, s. 181-186. ISSN: 1848- 0071.

[B14] KRACÍK, P., ŠNAJDÁREK, L. a J. POSPÍŠIL. Teorie varu na skrápěném horizontálním trubkovém svazku. In *Energie z biomasy XIV: Sborník přednášek z konference Energie z biomasy XIV*. Brno: VUT v Brně, 2013. s. 29-34. ISBN: 978-80-214-4775- 2.

[B15] KRACÍK, P., ŠNAJDÁREK, L. a J. POSPÍŠIL. Study of Temperature Fields at Sprinkled Smooth and Sandblasted Tube Bundle. In *Proceedings of the International conference Experimental Fluid Mechanics 2013. EPJ Web of Conferences.* Liberec: Technical University of Liberec, 2013. s. 382-389. ISBN: 978-80-260-5375- 0. ISSN: 2100- 014X.

[B16] ŠNAJDÁREK, L., KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Sprinkled Heat Exchangers Operating at Atmospheric Pressure. *Engineering Mechanics,* 2013, roč. 20, č. 3/ 4, s. 263-270. ISSN: 1802- 1484.

[B17] ŠNAJDÁREK, L., KRACÍK, P., LISÝ, M. a J. POSPÍŠIL. The Falling Liquid Film Heat Transfer Outside Horizontal Tubes. In *Advances in Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer.* Istanbul, Turkey: 2012. s. 237-240. ISBN: 978-1-61804-114- 2.

[B18] KRACÍK, P., POSPÍŠIL, J. a L. ŠNAJDÁREK. Heat Exchangers for Condensation and Evaporation Applications Operating in a Low Pressure Atmosphere. *Acta Polytechnica,* 2012, roč. 52, č. 3, s. 48-53. ISSN: 1210- 2709.

[B19] KRACÍK, P., ŠNAJDÁREK, L., POSPÍŠIL, J. Sprinkled Heat Exchangers in Condensation and Evaporation Mode. In *Sborník příspěvků 31. mezinárodní konference Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 125-128. ISBN: 978-80-214-4529- 1.

[B20] KRACÍK, P. Současné trendy v kogeneraci. *Kotle a energetická zařízení,* 2012, roč. 21, č. 1, s. 1-10. ISSN: 1804- 6673.

[B21] KRACÍK, P., ŠNAJDÁREK, L. a J. POSPÍŠIL. Sprinkled Heat Exchangers in Evaporation Mode. In *Proceedings of the International conference Experimental Fluid Mechanics 2012. EPJ Web of Conferences.* Liberec: Technical University of Liberec, 2012. s. 361-366. ISBN: 978-80-7372-912- 7. ISSN: 2100- 014X.

[B22] KRACÍK, P., POSPÍŠIL, J. a L. ŠNAJDÁREK. Absorpční cykly. In *Energie z biomasy XII: Sborník příspěvků ze semináře.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. s. 69-75. ISBN: 978-80-214-4403- 4.

Pozn.: Články [B1] až [B4] byly jednotlivými redakcemi přijaty a publikovány budou v průběhu roku 2016.

3) Ostatní vlastní publikace

[C1] BRÁZDIL, M., ŠNAJDÁREK, L., KRACÍK, P. a J. POSPÍŠIL. Automatic biomass boiler with an external thermoelectric generator. *Acta Polytechnica,* 2014, roč. 54, č. 1, s. 6-9. ISSN: 1210- 2709.

[C2] KRACÍK P. a J. FIEDLER. *Detailní výpočet lopatkování 3st. TR*. Souhrnná výzkumná zpráva pro G-Team a.s. – odštěpný závod Turbomachinery (HS13300001). Brno: VUT v Brně, 2013.

Seznam autorských děl

[C3] KRACÍK P. a J. FIEDLER. *Informativní výpočet TR*. Souhrnná výzkumná zpráva pro G-Team a.s. – odštěpný závod Turbomachinery (HS13300001). Brno: VUT v Brně, 2013.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a\ [m^2 \cdot s^{-1}]$	teplotní vodivost
$c\ [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
$c_p\ [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
$C_{sf}\ [-]$	konstanta charakterizující interakci povrchu s kapalinou (tab. 4)
$d, D\ [m]$	průměr
$g\ [m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
$Ga\ [-]$	Galileovo číslo
$Gr\ [-]$	Grashofovo číslo
$i\ [J \cdot kg^{-1}]$	entalpie
$Ka\ [-]$	Kapitzovo číslo
$k_S\ [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
$L\ [m]$	délka
$l_v\ [J \cdot kg^{-1}]$	měrné skupenské teplo varu
$\dot{m}, \dot{M}\ [kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní průtok
$M\ [kg \cdot kmol^{-1}]$	molární hmotnost
$n\ [-]$	počet řad trubek, počet hodnot
$Nu\ [-]$	Nusseltovo číslo
$p\ [Pa]$	tlak
$Pe\ [-]$	Pécltovo kritérium
$Pr\ [-]$	Prandtlovo číslo
$\dot{Q}\ [W]$	tepelný tok
$\dot{q}\ [W \cdot m^{-2}]$	hustota tepelného toku
$Ra\ [-]$	Rayleighovo číslo
$Re\ [-]$	Reynoldsovo číslo
$s\ [m]$	rozteč trubek
$S\ [m^2]$	plocha
$t\ [°C]$	teplota
$\mathrm{v}\ [\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{kg}^{-1}]$	měrný objem
$\mathrm{V}\ [\mathrm{m}^3]$	objem
$\dot{\mathrm{V}}\ [\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}]$	objemový tok
$\mathrm{w}\ [\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}]$	rychlost
W□ [−]	Weberovo číslo
W□$_F$ [−]	Modifikované Weberovo číslo
$\mathrm{x}\ [-]$	suchost páry
$\mathrm{X_{tt}}\ [-]$	Martinelliho parametr
$\alpha\ [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
$\beta\ [°C^{-1}]$	součinitel objemové roztažnosti
$\Gamma\ [kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$	hmotnostní průtok vztažený na délku trubky
$\Delta T_{ln}\ [°C]$	střední teplotní logaritmický spád
$\eta\ [-]$	účinnost
$\lambda\ [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná vodivost
$\lambda^*\ [-]$	bezrozměrná vlnová délka
$\mu\ [Pa \cdot s]$	dynamická viskozita
$\nu\ [m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematická viskozita
$\rho\ [kg \cdot m^{-3}]$	hustota
$\tau\ [s]$	čas

Dolní indexy

1	stav skrápěcí kapaliny v distribuční trubce
2	stav skrápěcí kapaliny za výměníkem
3	stav topné kapaliny na vstupu do výměníku
4	stav topné kapaliny na výstupu z výměníku
D	určeno pro průměr, jako charakteristický rozměr
exp	experiment
f	kapalná fáze kapaliny
g	plynná fáze kapaliny
i	stav uvnitř trubky
lam	laminární
N	nádoba
o	stav vně trubky
plam	pseudo laminární
sat	saturace = stav nasycení, resp. stav syté kapaliny / páry
top	topná smyčka
tr	přechod
tur	turbulentní
V	podtlaková větev

SEZNAM OBÁZKŮ

Obr. 1 Schéma kompresorového chladícího zařízení (A) a absorpčního cyklu (B) 13
Obr. 2 Režimy skrápění 18
Obr. 3 Sekvence oddělení kapky z kapalného filmu 19
Obr. 4 Závislost frekvence kapek a bezrozměrné vlnové délky na Reynoldsově čísle 20
Obr. 5 Numerický model rozložení tekoucí vody 21
Obr. 6 Hranice režimů skrápění při stoupajícím a klesajícím průtoku podle Hu a Jacobi 22
Obr. 7 Vliv průměr válce na frekvenci kapiček a bezrozměrnou vlnovou délku 22
Obr. 8 Hranice režimů skrápění podle Hu a Jacobi 24
Obr. 9 Porovnání hranic režimů skrápění stanovených různými autory 25
Obr. 10 Závislost Reynoldsova čísla a tloušťky filmu na absolutním tlaku 26
Obr. 11 Porovnání jednotlivých modelů 29
Obr. 12 Zjednodušená geometrie pro matematický model 31
Obr. 13 Vliv tepelného příkonu na rozložení kapalného filmu na skrápěném trubkovém svazku 35
Obr. 14 Vliv množství soli a teploty saturace na součinitel přestupu tepla 37
Obr. 15 Závislost teploty saturace na součinitel přestupu tepla při 10% cukru ve vodě 38
Obr. 16 Schéma měřicích zařízení 40
Obr. 17 Druhy testovaných povrchů (hladký, rádlovaný a pískovaný) 42
Obr. 18 Výsek kalibrační křivky použitých termočlánků 43
Obr. 19 Zjednodušené schéma skrápěného výměníku 44
Obr. 20 Značení teplot a poloměrů pro obecný výpočet přestupu tepla 45
Obr. 21 Schéma značení jednotlivý experimentálních výsledků 56
Obr. 22 Časový záznam hlavních měřených veličin 57
Obr. 23 Časový záznam hlavních odvozených veličin 57
Obr. 24 Součinitel přestupu tepla na hladkém trubkovém svazku 59
Obr. 25 Součinitel přestupu tepla na pískovaném trubkovém svazku 60
Obr. 26 Součinitel přestupu tepla na rádlovaném trubkovém svazku 61
Obr. 27 Porovnání výsledku Nusseltova čísla u čtyřtrubkového svazku s roztečí A1 62
Obr. 28 Ukázky snímků z pořízených sekvencí 64
Obr. 29 Analyzovaný snímek sekvence (vlevo). Výřez snímku s vyznačením hranicemi trubek (vpravo) 65
Obr. 30 Teplotní pole (vlevo) a směrodatná odchylka (vpravo) 66
Obr. 31 Porovnání snímků hladkého a rádlovaného desetitrubkového svazku při průtoku cca 9,8 l/min 67
Obr. 32 Porovnání snímků hladkého a rádlovaného desetitrubkového svazku při průtoku cca 2,75 l/min 68
Obr. 33 Dosažené teplotní diference na hladkém trubkovém svazku 70
Obr. 34 Dosažené teplotní diference na pískovaném trubkovém svazku 70
Obr. 35 Dosažené teplotní diference na rádlovaném trubkovém svazku 70
Obr. 36 Směrodatné odchylky průměrné teploty na hladkém trubkovém svazku 71
Obr. 37 Směrodatné odchylky průměrné teploty na pískovaném trubkovém svazku 71
Obr. 38 Směrodatné odchylky průměrné teploty na rádlovaném trubkovém svazku 71
Obr. 39 Porovnání průběhu Nu a závislost chyby na Nu - varianty A1 a A2 73
Obr. 40 Porovnání průběhu Nu a závislost chyby na Nu scénářů A3 a A4 74
Obr. 41 Porovnání průběhu Nu – varianty B1, B2 a B3 75
Obr. 42 Porovnání průběhu Nu a závislost chyby na Nu – varianta B4 76
Obr. 43 Záznam hlavních měřených veličin v závislosti na době experimentu 83
Obr. 44 Odvozené veličiny v závislosti na době experimentu 84

Seznam obrázků

Obr. 45 Teplotní gradient na trubkovém svazku (vlevo), směrodatná odchylka průměrné teploty (vpravo) 84
Obr. 46 Nusseltovo číslo v závislosti na průtoku skrápěcí kapaliny a tlaku v komoře 85
Obr. 47 Nusseltovo číslo v závislosti na měrném tepelném příkonu a tlaku v komoře 88
Obr. 48 Vliv délky skrápěné zóny na průběh teploty topné kapaliny ve smyčce (vlevo) a na odebraný měrný tepelný tok (vpravo) 90
Obr. 49 Porovnání součinitelů přestupu tepla v závislosti tepelném příkonu 91
Obr. 50 Porovnání součinitelů přestupu tepla v závislosti na hmotnostním průtoku 91
Obr. 51 Dílčí záznam experimentu 92
Obr. 52 Hranice sytosti skrápěcí kapaliny (vlevo), množství páry a její suchost (vpravo) 93
Obr. 53 Součinitel přestupu tepla a měrný tepelný příkon 94
Obr. 54 Vývoj varu na skrápěném trubkovém svazku při počátečním teplotním spádu 20/50°C 95
Obr. 55 Průběh součinitele přestupu tepla parní fáze a suchost při vývoji varu na svazku 96
Obr. 56 Vývoj varu na skrápěném trubkovém svazku při počátečním teplotním spádu 15 a 20/40°C 97
Obr. 57 Porovnání součinitele přestupu tepla parní fáze (vlevo) a celkového součinitele (vpravo) 98
Obr. 58 Porovnání výsledků Nusseltova čísla s dalšími studiemi 100
Obr. 59 Porovnání celkových součinitelů dvoufázového proudění s jinými matematickými modely 102
Obr. 60 Množství generované páry v odsolovacích jednotkách 103
Obr. 61 Porovnání množství generované páry (vlevo) a poměr tepelných toků (vpravo) 104

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Koeficienty do rovnice (1.17) pro stanovení režimu proudění podle Hu a Jacobi 21
Tab. 2 Reynoldsova čísla pro různé rozteče trubek podle Wang a kol. 23
Tab. 3 Porovnání koeficientů v rci. (1.17) vymezujících oblast skrápění určených různými autory 25
Tab. 4 Parametr C_{sf} pro rovnici (1.38) (Rohsenowu korelaci) 32
Tab. 5 Možné rozteče a vzniklé mezery mezi trubkami při deseti trubkách ve svazku 41
Tab. 6 Souhrn nejistot typu B použitých měřících zařízení 43
Tab. 7 Porovnání výsledku Nusseltova čísla u čtyřtrubkového svazku s roztečí A1 63
Tab. 8 Souhrnná tabulka regresní analýzy 76
Tab. 9 Souhrn rozsahů platností navržených rovnic 77
Tab. 10 Souhrnná tabulka regresní analýzy rovnice A 78
Tab. 11 Regresní koeficienty varianty A do rovnice (5.10) 79
Tab. 12 Souhrnná tabulka regresní analýzy rovnice B 80
Tab. 13 Regresní koeficienty varianty B do rovnice (5.11) 81
Tab. 13 Regresní koeficienty varianty B do rovnice (5.11) 82
Tab. 14 Souhrn základních měřených a odvozených veličin 85
Tab. 15 Souhrn základních měřených a odvozených veličin 87
Tab. 16 Souhrn základních měřených a odvozených veličin 90
Tab. 17 Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 20/50°C 94

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I Souhrn a porovnání experimentů u atmosférického standu.....125
Tab. P. 1 Naměřené a odvozené hodnoty při experimentech na AS u počátečního teplotního spádu 15/40°C 125
Tab. P. 2 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného čtyřtrubkového svazku.....127
Tab. P. 3 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného šestitrubkového svazku.....128
Tab. P. 4 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného osmitrubkového svazku 129
Tab. P. 5 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného desetitrubkového svazku.....130
Tab. P. 6 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek A1.....131
Tab. P. 7 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek B1.....132
Tab. P. 8 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek C1.....133
Tab. P. 9 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek A2.....134
Příloha II Identifikace teplotních polí.....135
Tab. P. 10 Souhrn základních údajů z identifikace teplotního pole 135
Obr. P. 1 Teplotní diference na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1.....137
Obr. P. 2 Teplotní diference na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2.....138
Obr. P. 3 Teplotní diference na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1 139
Obr. P. 4 Teplotní diference na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2 140
Obr. P. 5 Teplotní diference na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1 141
Obr. P. 6 Teplotní diference na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2 142
Obr. P. 7 Směrodatná odchylka průměrné teploty na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1 143
Obr. P. 8 Směrodatná odchylka průměrné teploty na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2 144
Obr. P. 9 Směrodatná odchylka průměrné teploty na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1 145
Obr. P. 10 Směrodatná odchylka průměrné teploty na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2 146
Obr. P. 11 Směrodatná odchylka průměrné teploty na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1 147
Obr. P. 12 Směrodatná odchylka průměrné teploty na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2 148
Příloha III Dílčí výsledky regresní analýza – varianta A9_H/P/R 149
Tab. P. 11 Souhrnná tabulka statistických výsledků regresního modelu varianty A9 149
Obr. P. 13 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek A1 151
Obr. P. 14 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek B1 152
Obr. P. 15 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek C1 153
Obr. P. 16 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek A2 154
Obr. P. 17 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek A1 155
Obr. P. 18 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek B1.....156
Obr. P. 19 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek C1.....157
Obr. P. 20 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek A2 158
Obr. P. 21 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek A1 159
Obr. P. 22 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek B1 160
Obr. P. 23 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek C1 161
Obr. P. 24 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek A2 162
Příloha IV Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 15 a 20/40°C 163
Tab. P. 12 Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 15 a 20/40°C.....163

Příloha I Souhrn a porovnání experimentů u atmosférického standu

Vysvětlivky: **Rozteč** – značí rozteč trubek trubkového svazku, **Počet trubek** – označuje množství trubek v trubkovém svazku, **Počet hodnot** je množství zaznamenaných hodnot po dobu experimentu u dané geometrie, přičemž všechny dílčí regulované veličiny byly v přípustném rozsahu, $\mathbf{t_1}$ [°C] je teplota skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky, $\dot{\mathbf{V}}_\mathbf{1}$ [$\mathbf{l \cdot min^{-1}}$] je rozsah objemového průtoku skrápěcí kapaliny, $\dot{\Gamma}_\mathbf{1}$ [$\mathbf{kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}}$] rozsah hmotnostního průtoku skrápěcí kapaliny vypočítaný podle rce. (3.57), $\mathbf{t_3}$ [°C] je teplota topné kapaliny na vstupu do výměníku, $\dot{\mathbf{V}}_\mathbf{2}$ [$\mathbf{l \cdot min^{-1}}$] je objemový průtok topné kapaliny.

Tab. P. 1 Naměřené a odvozené hodnoty při experimentech na AS u počátečního teplotního spádu 15/40°C

	Rozteč	Počet trubek	Počet hodnot	t_1 [°C]	$\dot{V}_1$ [$l \cdot min^{-1}$]	$\dot{\Gamma}_1$ [$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$]	t_3 [°C]	$\dot{V}_2$ [$l \cdot min^{-1}$]
Hladký trubkový svazek	A1	4	1 694	14,7 ± 0,3	1,3 - 12,7	0,022 - 0,212	40,1 ± 0,4	7,22 ± 0,05
		6	1 891	15,0 ± 0,3	1,5 - 12,6	0,025 - 0,209	40,1 ± 0,3	7,21 ± 0,05
		8	1 115	14,6 ± 0,2	1,6 - 11,9	0,026 - 0,198	40,2 ± 0,5	7,20 ± 0,05
		10	1 106	15,0 ± 0,4	2,1 - 11,2	0,035 - 0,187	40,1 ± 0,5	7,22 ± 0,05
	B1	4	1 406	14,8 ± 0,4	1,3 - 12,8	0,021 - 0,213	40,2 ± 0,4	7,22 ± 0,05
		6	1 366	14,7 ± 0,5	1,9 - 13,6	0,031 - 0,227	39,8 ± 0,4	7,21 ± 0,05
		8	813	14,6 ± 0,4	2,7 - 12,9	0,045 - 0,215	40,4 ± 0,5	7,20 ± 0,06
		10	1 072	14,9 ± 0,5	1,8 - 12,9	0,029 - 0,215	40,1 ± 0,6	7,21 ± 0,05
	C1	4	1 310	14,9 ± 0,4	1,3 - 12,6	0,022 - 0,209	40,2 ± 0,5	7,21 ± 0,06
		6	1 361	14,6 ± 0,2	1,5 - 12,6	0,024 - 0,209	40,0 ± 0,3	7,23 ± 0,05
		8	865	14,8 ± 0,4	2,9 - 13,0	0,047 - 0,215	40,5 ± 0,3	7,21 ± 0,05
		10	777	15,2 ± 0,4	3,8 - 13,1	0,064 - 0,218	40,1 ± 0,7	7,21 ± 0,04
	A2	4	932	14,7 ± 0,2	1,6 - 12,2	0,027 - 0,203	39,9 ± 0,6	7,21 ± 0,05
		6	835	14,6 ± 0,3	1,9 - 12,3	0,032 - 0,205	39,8 ± 0,3	7,24 ± 0,05
		8	994	15,1 ± 0,6	1,5 - 12,6	0,025 - 0,209	39,9 ± 0,4	7,23 ± 0,05
		10	887	15,3 ± 0,4	1,6 - 12,0	0,027 - 0,200	40,3 ± 0,5	7,22 ± 0,06
Pískovaný trubkový svazek	A1	4	1 153	15,0 ± 0,5	1,0 - 12,5	0,017 - 0,208	40,2 ± 0,4	7,23 ± 0,05
		6	1 504	14,9 ± 0,2	1,4 - 12,1	0,024 - 0,201	40,1 ± 0,5	7,22 ± 0,05
		8	1 358	14,7 ± 0,2	1,3 - 12,5	0,022 - 0,208	40,4 ± 0,5	7,23 ± 0,05
		10	1 965	14,8 ± 0,4	1,3 - 12,9	0,022 - 0,215	40,2 ± 0,4	7,21 ± 0,04
	B1	4	1 141	14,7 ± 0,2	1,0 - 12,6	0,017 - 0,210	40,3 ± 0,4	7,21 ± 0,05
		6	1 163	14,8 ± 0,3	1,0 - 12,5	0,017 - 0,208	40,1 ± 0,4	7,23 ± 0,05
		8	1 188	15,2 ± 0,4	1,1 - 13,3	0,018 - 0,221	40,2 ± 0,4	7,20 ± 0,05
		10	1 059	15,0 ± 0,3	1,4 - 12,5	0,024 - 0,208	40,4 ± 0,3	7,20 ± 0,05
	C1	4	1 513	15,6 ± 0,2	1,3 - 12,7	0,022 - 0,211	40,3 ± 0,3	7,21 ± 0,05
		6	1 451	15,1 ± 0,5	1,1 - 12,6	0,018 - 0,210	40,4 ± 0,4	7,22 ± 0,05
		8	685	15,1 ± 0,5	1,7 - 13,0	0,028 - 0,216	40,3 ± 0,3	7,21 ± 0,06
		10	834	15,3 ± 0,4	2,6 - 12,7	0,043 - 0,211	40,3 ± 0,4	7,23 ± 0,05
	A2	4	1 070	15,1 ± 0,3	1,3 - 12,9	0,022 - 0,215	40,2 ± 0,5	7,23 ± 0,05
		6	1 096	14,7 ± 0,2	1,1 - 13,5	0,018 - 0,224	40,1 ± 0,4	7,20 ± 0,05
		8	806	15,0 ± 0,4	1,4 - 12,2	0,023 - 0,203	40,3 ± 0,4	7,19 ± 0,05
		10	788	15,2 ± 0,3	1,9 - 12,2	0,032 - 0,202	39,9 ± 0,5	7,21 ± 0,06

Tab. P. 1 Naměřené a odvozené hodnoty při experimentech na AS u počátečního teplotního spádu 15/40°C **– pokračování**

	Rozteč	Počet trubek	Počet hodnot	t_1 [°C]	$\dot{V}_1$ [l · min^{-1}]	$\dot{\Gamma}_1$ [kg · s^{-1} · m^{-1}]	t_3 [°C]	$\dot{V}_2$ [l · min^{-1}]
Rádlovaný trubkový svazek	A1	4	1 030	14,7 ± 0,4	1,1 - 12,8	0,018 - 0,213	40,0 ± 0,3	7,25 ± 0,04
		6	1 220	15,1 ± 0,5	1,1 - 12,7	0,019 - 0,212	40,2 ± 0,3	7,23 ± 0,05
		8	920	15,3 ± 0,6	2,1 - 12,9	0,035 - 0,214	40,3 ± 0,4	7,22 ± 0,05
		10	848	15,0 ± 0,5	3,0 - 11,8	0,049 - 0,197	40,1 ± 0,6	7,21 ± 0,06
	B1	4	1 043	14,7 ± 0,4	1,3 - 12,8	0,021 - 0,213	40,1 ± 0,4	7,22 ± 0,05
		6	1 336	14,7 ± 0,3	1,1 - 12,9	0,017 - 0,215	40,0 ± 0,3	7,23 ± 0,05
		8	771	15,2 ± 0,4	2,1 - 12,5	0,035 - 0,208	40,3 ± 0,5	7,19 ± 0,06
		10	669	15,3 ± 0,6	2,1 - 12,7	0,034 - 0,212	40,2 ± 0,5	7,22 ± 0,05
	C1	4	951	15,0 ± 0,3	1,9 - 12,8	0,031 - 0,212	40,1 ± 0,4	7,23 ± 0,05
		6	1 583	15,0 ± 0,4	2,0 - 12,4	0,033 - 0,207	40,3 ± 0,3	7,21 ± 0,05
		8	654	15,1 ± 0,6	2,5 - 12,3	0,042 - 0,205	40,2 ± 0,4	7,20 ± 0,06
		10	1 004	15,1 ± 0,4	2,2 - 13,4	0,036 - 0,223	40,6 ± 0,4	7,23 ± 0,05
	A2	4	1 230	14,8 ± 0,5	1,4 - 12,6	0,023 - 0,209	40,0 ± 0,4	7,23 ± 0,05
		6	1 305	14,7 ± 0,5	2,0 - 12,6	0,033 - 0,210	40,2 ± 0,5	7,22 ± 0,05
		8	811	15,1 ± 0,5	1,9 - 12,9	0,032 - 0,215	40,3 ± 0,4	7,22 ± 0,05
		10	1 044	15,1 ± 0,4	2,3 - 13,6	0,039 - 0,225	40,0 ± 0,5	7,21 ± 0,04

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 2 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného čtyřtrubkového svazku

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		A1			B1			C1			A2		
		H_4	P_4	R_4	H_4	P_4	R_4	H_4	P_4	R_4	H_4	P_4	R_4
0,025 ± 0,0010	H_4	0,000	0,156	0,274	0,165	0,103	0,140	0,317	0,149		0,236	0,174	0,372
0,034 ± 0,0005		0,000	-0,119	0,317	-0,063	-0,065	0,194	-0,022	0,023	0,172	-0,022	-0,008	0,314
0,050 ± 0,0008		0,000	-0,236	0,104	-0,164	-0,161	0,004	-0,174	-0,125	-0,130	-0,154	-0,184	-0,014
0,067 ± 0,0006		0,000	-0,207	0,151	-0,050	-0,095	0,109	-0,143	-0,200	0,071	-0,190	-0,241	0,040
0,084 ± 0,0005		0,000	-0,125	0,331	0,005	-0,047	0,380	0,005	-0,108	0,329	-0,101	-0,197	0,381
0,100 ± 0,0009		0,000				0,008	0,500	0,024		0,516	-0,058	-0,207	0,419
0,117 ± 0,0006		0,000	-0,102	0,348	0,032	0,000		0,107	-0,013	0,584			
0,133 ± 0,0006		0,000	-0,120	0,306	-0,036	-0,128	0,298	-0,033	-0,074	0,507			0,218
0,150 ± 0,0008		0,000	-0,167	0,318	-0,103	-0,187	0,140	-0,051	-0,132		-0,302		0,156
0,167 ± 0,0008		0,000	-0,136	0,332	-0,041	-0,181	0,172	-0,019	-0,050	0,354	-0,292	-0,391	0,164
0,183 ± 0,0009		0,000	-0,120	0,331	-0,102	-0,158	0,157	-0,116	-0,081	0,320	-0,348	-0,439	0,161
0,200 ± 0,0006		0,000	-0,202	0,281	-0,077	-0,278	0,160	-0,142	-0,111	0,176	-0,390	-0,425	0,087
0,025 ± 0,0010	P_4	-0,135	0,000	0,102	0,008	-0,045	-0,014	0,139	-0,006		0,070	0,016	0,187
0,034 ± 0,0005		0,135	0,000	0,494	0,063	0,061	0,355	0,110	0,162	0,330	0,110	0,126	0,491
0,050 ± 0,0008		0,309	0,000	0,446	0,095	0,099	0,314	0,081	0,145	0,139	0,107	0,068	0,292
0,067 ± 0,0006		0,261	0,000	0,451	0,198	0,141	0,398	0,080	0,009	0,351	0,021	-0,043	0,312
0,084 ± 0,0005		0,143	0,000	0,521	0,149	0,089	0,577	0,148	0,020	0,518	0,027	-0,083	0,578
0,100 ± 0,0009													
0,117 ± 0,0006		0,114	0,000	0,502	0,149	0,114		0,234	0,100	0,764			
0,133 ± 0,0006		0,136	0,000	0,483	0,095	-0,010	0,474	0,099	0,051	0,711			0,384
0,150 ± 0,0008		0,200	0,000	0,581	0,077	-0,025	0,368	0,139	0,042		-0,162		0,387
0,167 ± 0,0008		0,157	0,000	0,542	0,110	-0,052	0,357	0,136	0,099	0,567	-0,180	-0,296	0,347
0,183 ± 0,0009		0,136	0,000	0,512	0,020	-0,043	0,315	0,004	0,044	0,500	-0,259	-0,363	0,318
0,200 ± 0,0006		0,254	0,000	0,606	0,158	-0,094	0,455	0,075	0,115	0,475	-0,235	-0,279	0,363
0,025 ± 0,0010	R_4	-0,215	-0,093	0,000	-0,086	-0,134	-0,105	0,034	-0,098		-0,029	-0,078	0,077
0,034 ± 0,0005		-0,240	-0,331	0,000	-0,289	-0,290	-0,093	-0,257	-0,223	-0,110	-0,257	-0,246	-0,002
0,050 ± 0,0008		-0,094	-0,308	0,000	-0,243	-0,240	-0,091	-0,252	-0,208	-0,212	-0,234	-0,261	-0,107
0,067 ± 0,0006		-0,131	-0,311	0,000	-0,174	-0,214	-0,037	-0,256	-0,305	-0,069	-0,297	-0,340	-0,096
0,084 ± 0,0005		-0,249	-0,342	0,000	-0,245	-0,284	0,037	-0,245	-0,330	-0,002	-0,324	-0,397	0,038
0,100 ± 0,0009													
0,117 ± 0,0006		-0,258	-0,334	0,000	-0,235	-0,259		-0,179	-0,268	0,174			
0,133 ± 0,0006		-0,234	-0,326	0,000	-0,262	-0,332	-0,006	-0,259	-0,291	0,154			-0,067
0,150 ± 0,0008		-0,241	-0,368	0,000	-0,319	-0,383	-0,135	-0,280	-0,341		-0,470		-0,123
0,167 ± 0,0008		-0,249	-0,351	0,000	-0,280	-0,385	-0,120	-0,263	-0,287	0,017	-0,468	-0,543	-0,126
0,183 ± 0,0009		-0,249	-0,339	0,000	-0,325	-0,367	-0,131	-0,336	-0,309	-0,008	-0,510	-0,579	-0,128
0,200 ± 0,0006		-0,219	-0,377	0,000	-0,279	-0,436	-0,094	-0,331	-0,306	-0,082	-0,523	-0,551	-0,151

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 3 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného šestitrubkového svazku

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		A1			B1			C1			A2		
		H_6	P_6	R_6	H_6	P_6	R_6	H_6	P_6	R_6	H_6	P_6	R_6
0,025 ± 0,0008	H_6	0,000	-0,067	0,026		-0,227	-0,077	-0,084				-0,239	
0,033 ± 0,0008		0,000	-0,147	0,069	-0,221	-0,259	-0,106	-0,169	-0,187	-0,028	-0,155	-0,171	0,236
0,050 ± 0,0007		0,000	-0,097	0,282	0,029	-0,103	0,231	-0,079	-0,113	0,154	-0,032	-0,033	0,266
0,067 ± 0,0008		0,000	-0,115	0,301	-0,001	-0,060	0,305	-0,024	-0,110	0,264	-0,113	-0,127	0,168
0,084 ± 0,0005		0,000	-0,075	0,454	0,071	0,006	0,423	0,060	-0,014	0,452	0,011	-0,128	0,389
0,100 ± 0,0005		0,000	-0,029	0,518		-0,032	0,325	0,083	0,050	0,557	0,033	-0,158	0,396
0,117 ± 0,0007		0,000	-0,102	0,443	-0,010	-0,061	0,294		0,001	0,579		-0,281	
0,133 ± 0,0008		0,000	-0,138	0,499	-0,112	-0,137	0,210	-0,045	-0,074	0,453			0,264
0,149 ± 0,0009		0,000	-0,162	0,381	-0,181	-0,197	0,042	-0,143	-0,148	0,228	-0,265		0,049
0,167 ± 0,0009		0,000	-0,107	0,543	-0,146	-0,183	0,160	-0,177	-0,122	0,171	-0,309		0,004
0,183 ± 0,0010		0,000	-0,122	0,622		-0,178	0,209	-0,144	-0,100	0,227	-0,286	-0,387	0,107
0,199 ± 0,0007		0,000	-0,046	0,664	-0,103	-0,181	0,188	-0,179	-0,129	0,308	-0,219	-0,374	0,079
0,025 ± 0,0008	P_6	0,072	0,000	0,100		-0,171	-0,010	-0,018				-0,185	
0,033 ± 0,0008		0,172	0,000	0,252	-0,087	-0,132	0,048	-0,026	-0,048	0,139	-0,010	-0,029	0,448
0,050 ± 0,0007		0,108	0,000	0,420	0,140	-0,006	0,364	0,020	-0,018	0,278	0,073	0,071	0,402
0,067 ± 0,0008		0,130	0,000	0,471	0,129	0,062	0,475	0,103	0,006	0,429	0,002	-0,014	0,320
0,084 ± 0,0005		0,081	0,000	0,572	0,158	0,088	0,538	0,145	0,066	0,569	0,093	-0,057	0,501
0,100 ± 0,0005		0,030	0,000	0,563		-0,003	0,364	0,115	0,081	0,603	0,063	-0,134	0,438
0,117 ± 0,0007		0,114	0,000	0,608	0,103	0,047	0,441		0,115	0,759		-0,199	
0,133 ± 0,0008		0,160	0,000	0,738	0,030	0,001	0,403	0,107	0,073	0,684			0,466
0,149 ± 0,0009		0,194	0,000	0,649	-0,022	-0,041	0,244	0,023	0,017	0,465	-0,123		0,252
0,167 ± 0,0009		0,120	0,000	0,728	-0,044	-0,085	0,299	-0,078	-0,016	0,312	-0,226		0,124
0,183 ± 0,0010		0,139	0,000	0,847		-0,064	0,376	-0,025	0,025	0,397	-0,187	-0,303	0,260
0,199 ± 0,0007		0,049	0,000	0,745	-0,059	-0,142	0,246	-0,139	-0,087	0,371	-0,181	-0,344	0,131
0,025 ± 0,0008	R_6	-0,025	-0,091	0,000		-0,246	-0,100	-0,107				-0,258	
0,033 ± 0,0008		-0,064	-0,201	0,000	-0,271	-0,307	-0,163	-0,222	-0,239	-0,091	-0,209	-0,224	0,156
0,050 ± 0,0007		-0,220	-0,296	0,000	-0,198	-0,300	-0,040	-0,282	-0,309	-0,100	-0,245	-0,246	-0,013
0,067 ± 0,0008		-0,231	-0,320	0,000	-0,232	-0,278	0,003	-0,250	-0,316	-0,028	-0,319	-0,329	-0,102
0,084 ± 0,0005		-0,312	-0,364	0,000	-0,263	-0,308	-0,021	-0,271	-0,322	-0,002	-0,305	-0,400	-0,045
0,100 ± 0,0005		-0,341	-0,360	0,000		-0,362	-0,127	-0,286	-0,308	0,026	-0,320	-0,446	-0,080
0,117 ± 0,0007		-0,307	-0,378	0,000	-0,314	-0,349	-0,104		-0,307	0,094		-0,502	
0,133 ± 0,0008		-0,333	-0,425	0,000	-0,407	-0,424	-0,192	-0,363	-0,382	-0,031			-0,156
0,149 ± 0,0009		-0,276	-0,393	0,000	-0,407	-0,418	-0,245	-0,380	-0,383	-0,111	-0,468		-0,240
0,167 ± 0,0009		-0,352	-0,421	0,000	-0,447	-0,470	-0,248	-0,466	-0,431	-0,241	-0,552		-0,349
0,183 ± 0,0010		-0,384	-0,459	0,000		-0,493	-0,255	-0,472	-0,445	-0,244	-0,560	-0,622	-0,318
0,199 ± 0,0007		-0,399	-0,427	0,000	-0,461	-0,508	-0,286	-0,506	-0,476	-0,214	-0,530	-0,624	-0,351

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 4 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného osmitrubkového svazku

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		A1			B1			C1			A2		
		H_8	P_8	R_8	H_8	P_8	R_8	H_8	P_8	R_8	H_8	P_8	R_8
0,025 ± 0,0012	H_8	0,000	0,167			0,033					0,145	-0,053	
0,033 ± 0,0013		0,000	0,174			-0,112	0,165		-0,129		0,023	-0,168	0,152
0,05 ± 0,00080		0,000	0,195	0,499		0,012	0,514	0,119	-0,148	0,388	0,129	0,065	0,152
0,067 ± 0,0011		0,000	0,247	0,441		0,052		0,027	-0,202	0,221	0,107	-0,208	-0,011
0,083 ± 0,0008		0,000	0,185	0,397	-0,023	0,047	0,326	0,005	-0,183	0,165	0,097	-0,229	0,056
0,100 ± 0,0011		0,000	0,141	0,406	0,075	0,072		0,053	-0,248	0,126	0,177	-0,182	0,100
0,117 ± 0,0010													
0,134 ± 0,0007													
0,150 ± 0,0009													
0,167 ± 0,0011													
0,183 ± 0,0007													
0,200 ± 0,0012		0,000	-0,057	0,346	-0,267	-0,197	-0,060	-0,221	-0,454	-0,170	-0,352	-0,356	-0,176
0,025 ± 0,0012	P_8	-0,143	0,000			-0,115					-0,019	-0,189	
0,033 ± 0,0013		-0,148	0,000			-0,243	-0,007		-0,258		-0,128	-0,291	-0,018
0,050 ± 0,0008		-0,163	0,000	0,254		-0,153	0,267	-0,063	-0,287	0,162	-0,055	-0,109	-0,036
0,067 ± 0,0011		-0,198	0,000	0,156		-0,156		-0,176	-0,360	-0,020	-0,112	-0,365	-0,207
0,083 ± 0,0008		-0,156	0,000	0,179	-0,176	-0,116	0,119	-0,152	-0,310	-0,017	-0,074	-0,350	-0,108
0,100 ± 0,0011		-0,123	0,000	0,232	-0,058	-0,060		-0,077	-0,340	-0,013	0,032	-0,282	-0,036
0,117 ± 0,0010			0,000				0,095	-0,191	-0,339	0,000	-0,082	-0,322	
0,134 ± 0,0007			0,000	0,209	-0,173	-0,203	0,012	-0,161		-0,063		-0,410	-0,032
0,150 ± 0,0009			0,000	0,228	-0,157	-0,204	0,032	-0,102				-0,404	
0,167 ± 0,0011			0,000	0,356	-0,170	-0,165	0,110	-0,099	-0,401	0,013	-0,196		
0,183 ± 0,0007			0,000	0,287	-0,224	-0,213	0,004		-0,451		-0,295	-0,369	-0,085
0,200 ± 0,0012		0,061	0,000	0,428	-0,222	-0,148	-0,003	-0,173	-0,420	-0,120	-0,312	-0,317	-0,126
0,025 ± 0,0012	R_8												
0,033 ± 0,0013													
0,050 ± 0,0008		-0,333	-0,203	0,000		-0,324	0,010	-0,253	-0,432	-0,074	-0,247	-0,289	-0,231
0,067 ± 0,0011		-0,306	-0,135	0,000		-0,270		-0,287	-0,446	-0,153	-0,232	-0,450	-0,314
0,083 ± 0,0008		-0,284	-0,152	0,000	-0,301	-0,250	-0,051	-0,280	-0,415	-0,166	-0,215	-0,448	-0,244
0,100 ± 0,0011		-0,289	-0,189	0,000	-0,235	-0,237		-0,251	-0,465	-0,199	-0,163	-0,418	-0,218
0,117 ± 0,0010													
0,134 ± 0,0007			-0,173	0,000	-0,316	-0,341	-0,163	-0,306		-0,225		-0,512	-0,199
0,150 ± 0,0009			-0,186	0,000	-0,314	-0,352	-0,160	-0,269				-0,514	
0,167 ± 0,0011			-0,262	0,000	-0,387	-0,384	-0,181	-0,335	-0,558	-0,253	-0,407		
0,183 ± 0,0007			-0,223	0,000	-0,397	-0,388	-0,220		-0,573		-0,452	-0,509	-0,289
0,200 ± 0,0012		-0,257	-0,300	0,000	-0,455	-0,404	-0,302	-0,421	-0,594	-0,384	-0,518	-0,522	-0,388

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 5 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu skrápěného desetitrubkového svazku

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		A1			B1			C1			A2		
		H_10	P_10	R_10	H_10	P_10	R_10	H_10	P_10	R_10	H_10	P_10	R_10
0,026 ± 0,0011	H_10												
0,034 ± 0,0007		0,000	0,260		-0,038	0,023	0,068				-0,040	-0,141	
0,050 ± 0,0009		0,000	0,084	0,267	-0,196	-0,217	-0,109		-0,049	0,189	-0,268	-0,354	-0,246
0,067 ± 0,0013		0,000	0,411	0,459	0,162	0,066	0,270	0,003			-0,075	-0,219	0,011
0,084 ± 0,0011													
0,099 ± 0,0009		0,000	0,168	0,392	0,059	-0,029		0,088	-0,214	0,211		-0,177	0,014
0,116 ± 0,0009													
0,133 ± 0,0008		0,000	0,062	0,168	-0,139	-0,209	-0,003	-0,110	-0,342	0,025	-0,205	-0,241	-0,084
0,150 ± 0,0010		0,000	0,087	0,198		-0,203	-0,043	-0,069		0,073	-0,331	-0,278	-0,031
0,166 ± 0,0012		0,000	0,031	0,172	-0,185	-0,235	-0,093	-0,114	-0,203	-0,091	-0,380		
0,183 ± 0,0008		0,000	0,003	0,138	-0,265	-0,273		-0,316	-0,292	-0,131	-0,443	-0,382	
0,200 ± 0,0009													
0,026 ± 0,0011	P_10		0,000			-0,221					-0,216		
0,034 ± 0,0007		-0,206	0,000		-0,237	-0,189	-0,153				-0,239	-0,318	
0,050 ± 0,0009		-0,078	0,000	0,168	-0,258	-0,278	-0,178		-0,123	0,096	-0,325	-0,404	-0,305
0,067 ± 0,0013		-0,291	0,000	0,034	-0,177	-0,244	-0,100	-0,289			-0,345	-0,446	-0,284
0,084 ± 0,0011			0,000	0,116	-0,108	-0,146		-0,188	-0,324	0,021		-0,355	-0,085
0,099 ± 0,0009		-0,144	0,000	0,191	-0,094	-0,169		-0,069	-0,327	0,037		-0,296	-0,132
0,116 ± 0,0009			0,000		-0,181		-0,035	-0,152	-0,336	0,057		-0,288	-0,139
0,133 ± 0,0008		-0,059	0,000	0,100	-0,189	-0,256	-0,061	-0,162	-0,381	-0,035	-0,252	-0,286	-0,138
0,150 ± 0,0010		-0,080	0,000	0,102		-0,267	-0,119	-0,143		-0,013	-0,385	-0,336	-0,109
0,166 ± 0,0012		-0,030	0,000	0,137	-0,209	-0,258	-0,120	-0,141	-0,227	-0,118	-0,398		
0,183 ± 0,0008		-0,003	0,000	0,135	-0,267	-0,276		-0,318	-0,294	-0,134	-0,444	-0,384	
0,200 ± 0,0009			0,000		-0,254	-0,292	-0,104	-0,301	-0,273	-0,157	-0,375	-0,320	-0,189
0,026 ± 0,0011	R_10												
0,034 ± 0,0007													
0,050 ± 0,0009		-0,210	-0,144	0,000	-0,365	-0,382	-0,296		-0,249	-0,062	-0,422	-0,490	-0,405
0,067 ± 0,0013		-0,315	-0,033	0,000	-0,204	-0,269	-0,130	-0,313			-0,366	-0,465	-0,307
0,084 ± 0,0011			-0,104	0,000	-0,201	-0,235		-0,272	-0,394	-0,086		-0,422	-0,181
0,099 ± 0,0009		-0,281	-0,161	0,000	-0,239	-0,303		-0,218	-0,435	-0,130		-0,409	-0,272
0,116 ± 0,0009													
0,133 ± 0,0008		-0,144	-0,091	0,000	-0,263	-0,323	-0,146	-0,238	-0,437	-0,123	-0,320	-0,351	-0,216
0,150 ± 0,0010		-0,165	-0,093	0,000		-0,334	-0,201	-0,222		-0,104	-0,442	-0,398	-0,191
0,166 ± 0,0012		-0,147	-0,120	0,000	-0,305	-0,347	-0,226	-0,244	-0,320	-0,224	-0,471		
0,183 ± 0,0008		-0,121	-0,119	0,000	-0,354	-0,361		-0,399	-0,378	-0,237	-0,510	-0,457	
0,200 ± 0,0009													

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 6 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek A1

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		A1											
		H_4	P_4	R_4	H_6	P_6	R_6	H_8	P_8	R_8	H_10	P_10	R_10
0,025 ± 0,0011	H_4	0,000	0,156	0,274	0,109	0,035	0,138	-0,299	-0,182			-0,222	
0,034 ± 0,0005		0,000	-0,119	0,317	-0,046	-0,186	0,019	-0,375	-0,267		-0,514	-0,387	
0,050 ± 0,0007		0,000	-0,236	0,104	-0,271	-0,342	-0,066	-0,495	-0,397	-0,243	-0,477	-0,433	-0,338
0,067 ± 0,0010		0,000	-0,207	0,151	-0,205	-0,297	0,035	-0,435	-0,296	-0,186	-0,509	-0,307	-0,283
0,083 ± 0,0008		0,000	-0,125	0,331	-0,153	-0,216	0,232	-0,349	-0,228	-0,090		-0,256	-0,169
0,100 ± 0,0009		0,000			-0,102	-0,128	0,363	-0,273	-0,171	0,022	-0,314	-0,198	-0,045
0,117 ± 0,0007		0,000	-0,102	0,348	-0,069	-0,165	0,343		-0,191			-0,213	
0,133 ± 0,0010		0,000	-0,120	0,306	-0,110	-0,233	0,333		-0,163	0,012	-0,275	-0,230	-0,153
0,149 ± 0,0007		0,000	-0,167	0,318	-0,082	-0,231	0,268		-0,208	-0,027	-0,307	-0,247	-0,170
0,167 ± 0,0009		0,000	-0,136	0,332	-0,046	-0,148	0,471		-0,210	0,071	-0,228	-0,204	-0,095
0,183 ± 0,0011		0,000	-0,120	0,331	-0,141	-0,245	0,394		-0,175	0,062	-0,223	-0,221	-0,116
0,199 ± 0,0009		0,000	-0,202	0,281	-0,167	-0,206	0,386	-0,179	-0,226	0,106		-0,267	
0,025 ± 0,0011	P_4	-0,135	0,000	0,102	-0,040	-0,105	-0,015	-0,393	-0,292			-0,327	
0,034 ± 0,0005		0,135	0,000	0,494	0,083	-0,076	0,157	-0,291	-0,168		-0,448	-0,305	
0,050 ± 0,0007		0,309	0,000	0,446	-0,046	-0,139	0,223	-0,339	-0,210	-0,009	-0,315	-0,258	-0,133
0,067 ± 0,0010		0,261	0,000	0,451	0,002	-0,113	0,304	-0,288	-0,112	0,026	-0,381	-0,126	-0,096
0,083 ± 0,0008		0,143	0,000	0,521	-0,032	-0,104	0,408	-0,256	-0,118	0,039		-0,150	-0,051
0,100 ± 0,0009													
0,117 ± 0,0007		0,114	0,000	0,502	0,037	-0,069	0,496		-0,099			-0,123	
0,133 ± 0,0010		0,136	0,000	0,483	0,011	-0,128	0,514		-0,049	0,150	-0,177	-0,125	-0,038
0,149 ± 0,0007		0,200	0,000	0,581	0,101	-0,077	0,521		-0,050	0,167	-0,169	-0,096	-0,004
0,167 ± 0,0009		0,157	0,000	0,542	0,104	-0,014	0,703		-0,086	0,239	-0,106	-0,079	0,048
0,183 ± 0,0011		0,136	0,000	0,512	-0,024	-0,143	0,584		-0,062	0,207	-0,117	-0,115	0,005
0,199 ± 0,0009		0,254	0,000	0,606	0,044	-0,004	0,738	0,030	-0,029	0,387		-0,080	
0,025 ± 0,0011	R_4	-0,215	-0,093	0,000	-0,129	-0,188	-0,107	-0,450	-0,357			-0,389	
0,034 ± 0,0005		-0,240	-0,331	0,000	-0,275	-0,382	-0,226	-0,525	-0,443		-0,631	-0,535	
0,050 ± 0,0007		-0,094	-0,308	0,000	-0,340	-0,404	-0,154	-0,543	-0,454	-0,315	-0,526	-0,486	-0,400
0,067 ± 0,0010		-0,131	-0,311	0,000	-0,309	-0,389	-0,101	-0,509	-0,388	-0,293	-0,573	-0,398	-0,377
0,083 ± 0,0008		-0,249	-0,342	0,000	-0,363	-0,411	-0,074	-0,511	-0,420	-0,317		-0,441	-0,376
0,100 ± 0,0009													
0,117 ± 0,0007		-0,258	-0,334	0,000	-0,310	-0,380	-0,004		-0,400			-0,416	
0,133 ± 0,0010		-0,234	-0,326	0,000	-0,319	-0,413	0,021		-0,359	-0,225	-0,445	-0,410	-0,352
0,149 ± 0,0007		-0,241	-0,368	0,000	-0,303	-0,416	-0,038		-0,399	-0,262	-0,474	-0,428	-0,370
0,167 ± 0,0009		-0,249	-0,351	0,000	-0,284	-0,361	0,105		-0,407	-0,196	-0,420	-0,402	-0,320
0,183 ± 0,0011		-0,249	-0,339	0,000	-0,354	-0,433	0,047		-0,380	-0,202	-0,416	-0,415	-0,336
0,199 ± 0,0009		-0,219	-0,377	0,000	-0,350	-0,380	0,082	-0,359	-0,396	-0,137		-0,427	

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 7 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek B1

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		B1											
		H_4	P_4	R_4	H_6	P_6	R_6	H_8	P_8	R_8	H_10	P_10	R_10
0,025 ± 0,0008	H_4	0,000	-0,053	-0,021		-0,264	-0,121		-0,378			-0,480	
0,033 ± 0,0012		0,000	-0,002	0,275	-0,206	-0,245	-0,089		-0,407	-0,223	-0,501	-0,469	-0,446
0,050 ± 0,0007		0,000	0,004	0,201	-0,103	-0,218	0,073		-0,389	-0,086	-0,497	-0,510	-0,443
0,067 ± 0,0011		0,000	-0,047	0,167	-0,164	-0,214	0,092		-0,374		-0,400	-0,449	-0,344
0,083 ± 0,0010		0,000	-0,052	0,373	-0,097	-0,152	0,200	-0,367	-0,322	-0,141	-0,340	-0,367	
0,099 ± 0,0008													
0,117 ± 0,0010		0,000	-0,031		-0,107	-0,152	0,167			-0,141	-0,375		-0,264
0,133 ± 0,0008		0,000	-0,096	0,346	-0,181	-0,203	0,117	-0,282	-0,308	-0,122	-0,353	-0,406	-0,250
0,150 ± 0,0008		0,000	-0,094	0,271	-0,162	-0,178	0,066	-0,256	-0,297	-0,089		-0,384	-0,261
0,167 ± 0,0011		0,000	-0,146	0,222	-0,151	-0,187	0,153	-0,316	-0,312	-0,086	-0,344	-0,384	-0,270
0,183 ± 0,0008		0,000	-0,062	0,289		-0,214	0,157	-0,287	-0,276	-0,077	-0,364	-0,371	
0,199 ± 0,0007		0,000	-0,218	0,257	-0,191	-0,262	0,072	-0,348	-0,286	-0,164	-0,407	-0,437	-0,289
0,025 ± 0,0008	P_4	0,056	0,000	0,033		-0,223	-0,072		-0,344			-0,451	
0,033 ± 0,0012		0,002	0,000	0,277	-0,205	-0,244	-0,088		-0,406	-0,221	-0,500	-0,468	-0,445
0,050 ± 0,0007		-0,004	0,000	0,196	-0,107	-0,221	0,069		-0,391	-0,089	-0,499	-0,512	-0,445
0,067 ± 0,0011		0,050	0,000	0,225	-0,122	-0,175	0,146		-0,343		-0,370	-0,421	-0,311
0,083 ± 0,0010		0,055	0,000	0,448	-0,047	-0,105	0,266	-0,333	-0,285	-0,094	-0,304	-0,333	
0,099 ± 0,0008			0,000	0,488		-0,138	0,181	-0,225	-0,227		-0,279	-0,339	
0,117 ± 0,0010		0,032	0,000		-0,078	-0,125	0,205			-0,114	-0,355		-0,240
0,133 ± 0,0008		0,106	0,000	0,489	-0,094	-0,119	0,235	-0,206	-0,235	-0,029	-0,284	-0,343	-0,171
0,150 ± 0,0008		0,104	0,000	0,403	-0,074	-0,092	0,177	-0,179	-0,224	0,006		-0,320	-0,184
0,167 ± 0,0011		0,171	0,000	0,431	-0,006	-0,049	0,350	-0,199	-0,195	0,070	-0,232	-0,279	-0,145
0,183 ± 0,0008		0,066	0,000	0,374		-0,162	0,233	-0,240	-0,228	-0,016	-0,322	-0,330	
0,199 ± 0,0007		0,278	0,000	0,607	0,035	-0,056	0,370	-0,166	-0,087	0,069	-0,243	-0,281	-0,090
0,025 ± 0,0008	R_4	0,022	-0,032	0,000		-0,247	-0,102		-0,365			-0,468	
0,033 ± 0,0012		-0,216	-0,217	0,000	-0,377	-0,408	-0,286		-0,535	-0,390	-0,608	-0,584	-0,565
0,050 ± 0,0007		-0,167	-0,164	0,000	-0,253	-0,349	-0,106		-0,491	-0,238	-0,581	-0,592	-0,536
0,067 ± 0,0011		-0,143	-0,184	0,000	-0,284	-0,326	-0,064		-0,464		-0,485	-0,528	-0,437
0,083 ± 0,0010		-0,272	-0,309	0,000	-0,342	-0,382	-0,126	-0,539	-0,506	-0,374	-0,519	-0,539	
0,099 ± 0,0008			-0,328	0,000		-0,421	-0,207	-0,479	-0,481		-0,516	-0,556	
0,117 ± 0,0010													
0,133 ± 0,0008		-0,257	-0,328	0,000	-0,391	-0,408	-0,170	-0,467	-0,486	-0,348	-0,519	-0,558	-0,443
0,150 ± 0,0008		-0,213	-0,287	0,000	-0,340	-0,353	-0,161	-0,415	-0,447	-0,283		-0,515	-0,418
0,167 ± 0,0011		-0,182	-0,301	0,000	-0,305	-0,335	-0,056	-0,440	-0,437	-0,252	-0,463	-0,496	-0,403
0,183 ± 0,0008		-0,224	-0,272	0,000		-0,390	-0,102	-0,447	-0,438	-0,284	-0,506	-0,512	
0,199 ± 0,0007		-0,204	-0,378	0,000	-0,356	-0,412	-0,147	-0,481	-0,432	-0,335	-0,529	-0,552	-0,434

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 8 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek C1

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		C1											
		H_4	P_4	R_4	H_6	P_6	R_6	H_8	P_8	R_8	H_10	P_10	R_10
0,025 ± 0,0007	H_4	0,000	-0,127		-0,228								
0,033 ± 0,0004		0,000	0,047	0,198	-0,189	-0,207	-0,052		-0,444				
0,050 ± 0,0010		0,000	0,059	0,054	-0,187	-0,218	0,018	-0,316	-0,479	-0,151		-0,398	-0,248
0,067 ± 0,0010		0,000	-0,066	0,251	-0,094	-0,174	0,173	-0,323	-0,474	-0,195	-0,425		
0,084 ± 0,0006		0,000	-0,112	0,322	-0,106	-0,168	0,225	-0,348	-0,470	-0,245	-0,398	-0,499	-0,244
0,10 ± 0,00070		0,000		0,480	-0,050	-0,079	0,366	-0,253	-0,466	-0,201	-0,271	-0,473	-0,188
0,117 ± 0,0008		0,000	-0,109	0,430		-0,159	0,327	-0,409	-0,517	-0,270	-0,397	-0,528	-0,249
0,134 ± 0,0005		0,000	-0,043	0,558	-0,121	-0,148	0,336	-0,274		-0,189	-0,333	-0,507	-0,232
0,15 ± 0,00090		0,000	-0,085		-0,172	-0,176	0,187	-0,251			-0,320		-0,217
0,167 ± 0,0010		0,000	-0,032	0,379	-0,200	-0,146	0,139	-0,275	-0,518	-0,185	-0,303	-0,373	-0,284
0,183 ± 0,0008		0,000	0,040	0,493	-0,168	-0,125	0,193		-0,488		-0,399	-0,378	-0,237
0,200 ± 0,0010		0,000	0,037	0,372	-0,202	-0,154	0,270	-0,254	-0,477	-0,206	-0,402	-0,378	-0,279
0,025 ± 0,0007	P_4	0,146	0,000		-0,116								
0,033 ± 0,0004		-0,045	0,000	0,145	-0,225	-0,242	-0,094		-0,468				
0,050 ± 0,0010		-0,056	0,000	-0,005	-0,233	-0,261	-0,039	-0,354	-0,508	-0,199		-0,432	-0,290
0,067 ± 0,0010		0,070	0,000	0,339	-0,030	-0,115	0,256	-0,275	-0,437	-0,138	-0,385		
0,084 ± 0,0006		0,126	0,000	0,489	0,007	-0,063	0,379	-0,266	-0,404	-0,149	-0,322	-0,436	-0,149
0,100 ± 0,0007													
0,117 ± 0,0008		0,122	0,000	0,604		-0,057	0,489	-0,337	-0,458	-0,181	-0,323	-0,470	-0,157
0,134 ± 0,0005		0,045	0,000	0,628	-0,082	-0,110	0,396	-0,242		-0,153	-0,303	-0,485	-0,198
0,150 ± 0,0009		0,093	0,000		-0,094	-0,099	0,298	-0,181			-0,257		-0,144
0,167 ± 0,0010		0,033	0,000	0,425	-0,173	-0,118	0,176	-0,251	-0,502	-0,158	-0,280	-0,352	-0,261
0,183 ± 0,0008		-0,038	0,000	0,436	-0,200	-0,159	0,147		-0,507		-0,422	-0,401	-0,266
0,200 ± 0,0010		-0,035	0,000	0,323	-0,230	-0,184	0,225	-0,280	-0,495	-0,234	-0,423	-0,400	-0,304
0,025 ± 0,0007	R_4												
0,033 ± 0,0004		-0,165	-0,127	0,000	-0,323	-0,338	-0,209		-0,536				
0,050 ± 0,0010		-0,051	0,005	0,000	-0,229	-0,258	-0,034	-0,351	-0,506	-0,194		-0,429	-0,286
0,067 ± 0,0010		-0,200	-0,253	0,000	-0,276	-0,339	-0,062	-0,459	-0,579	-0,356	-0,540		
0,084 ± 0,0006		-0,244	-0,328	0,000	-0,324	-0,371	-0,074	-0,507	-0,599	-0,429	-0,545	-0,621	-0,428
0,100 ± 0,0007		-0,324		0,000	-0,358	-0,378	-0,077	-0,495	-0,639	-0,460	-0,507	-0,644	-0,451
0,117 ± 0,0008		-0,301	-0,377	0,000		-0,412	-0,072	-0,587	-0,662	-0,489	-0,578	-0,670	-0,475
0,134 ± 0,0005		-0,358	-0,386	0,000	-0,436	-0,453	-0,142	-0,534		-0,480	-0,572	-0,683	-0,507
0,150 ± 0,0009													
0,167 ± 0,0010		-0,275	-0,298	0,000	-0,420	-0,381	-0,175	-0,474	-0,650	-0,409	-0,495	-0,545	-0,481
0,183 ± 0,0008		-0,330	-0,304	0,000	-0,443	-0,414	-0,201		-0,657		-0,598	-0,583	-0,489
0,200 ± 0,0010		-0,271	-0,244	0,000	-0,418	-0,383	-0,074	-0,456	-0,619	-0,421	-0,564	-0,547	-0,474

Pozn.: Princip porovnání je uveden na stranách 62 – 63.

Tab. P. 9 Porovnání součinitelů přestupu tepla na povrchu trubkového svazku s roztečí trubek A2

Γ_1 [kg · s^{-1} · m^{-1}]		A2											
		H_4	P_4	R_4	H_6	P_6	R_6	H_8	P_8	R_8	H_10	P_10	R_10
0,025 ± 0,0014	H_4	0,000	-0,050	0,109		-0,318		-0,350	-0,463		-0,506		
0,033 ± 0,0009		0,000	0,015	0,343	-0,176	-0,192	0,205	-0,346	-0,469	-0,264	-0,523	-0,573	
0,050 ± 0,0008		0,000	-0,036	0,166	-0,166	-0,167	0,091	-0,326	-0,364	-0,312	-0,548	-0,600	-0,534
0,067 ± 0,0008		0,000	-0,062	0,285	-0,129	-0,143	0,147	-0,228	-0,447	-0,310	-0,439	-0,526	-0,387
0,084 ± 0,0004		0,000	-0,107	0,536	-0,047	-0,178	0,309	-0,205	-0,442	-0,235		-0,466	-0,243
0,100 ± 0,0009		0,000	-0,158	0,507	-0,015	-0,198	0,331	-0,092	-0,368	-0,151		-0,401	-0,261
0,116 ± 0,0007													
0,134 ± 0,0007													
0,150 ± 0,0010		0,000		0,656	-0,034		0,379		-0,324		-0,336	-0,284	-0,039
0,166 ± 0,0008		0,000	-0,141	0,643	-0,069		0,351	-0,103			-0,324		
0,183 ± 0,0009		0,000	-0,140	0,780	-0,059	-0,193	0,458	-0,107	-0,201	0,158	-0,336	-0,264	
0,200 ± 0,0008		0,000	-0,057	0,781	0,066	-0,146	0,472	-0,128	-0,134	0,109	-0,250	-0,183	-0,026
0,025 ± 0,0014	P_4	0,053	0,000	0,168		-0,281		-0,316	-0,434		-0,480		
0,033 ± 0,0009		-0,014	0,000	0,324	-0,188	-0,203	0,188	-0,356	-0,476	-0,275	-0,530	-0,579	
0,050 ± 0,0008		0,037	0,000	0,209	-0,135	-0,136	0,131	-0,301	-0,341	-0,287	-0,531	-0,586	-0,517
0,067 ± 0,0008		0,066	0,000	0,370	-0,072	-0,087	0,223	-0,177	-0,411	-0,265	-0,402	-0,495	-0,346
0,084 ± 0,0004		0,120	0,000	0,721	0,068	-0,079	0,466	-0,110	-0,375	-0,143		-0,402	-0,152
0,100 ± 0,0009		0,188	0,000	0,790	0,170	-0,047	0,582	0,079	-0,250	0,008		-0,288	-0,122
0,116 ± 0,0007													
0,134 ± 0,0007													
0,150 ± 0,0010													
0,166 ± 0,0008		0,164	0,000	0,912	0,084		0,573	0,044			-0,213		
0,183 ± 0,0009		0,163	0,000	1,069	0,094	-0,062	0,695	0,038	-0,071	0,346	-0,228	-0,144	
0,200 ± 0,0008		0,061	0,000	0,890	0,131	-0,094	0,562	-0,074	-0,081	0,177	-0,204	-0,133	0,033
0,025 ± 0,0014	R_4	-0,099	-0,144	0,000		-0,385		-0,414	-0,516		-0,555		
0,033 ± 0,0009		-0,255	-0,245	0,000	-0,387	-0,398	-0,103	-0,513	-0,604	-0,452	-0,645	-0,682	
0,050 ± 0,0008		-0,143	-0,173	0,000	-0,285	-0,286	-0,065	-0,422	-0,455	-0,410	-0,612	-0,657	-0,600
0,067 ± 0,0008		-0,222	-0,270	0,000	-0,323	-0,333	-0,107	-0,399	-0,570	-0,463	-0,563	-0,631	-0,523
0,084 ± 0,0004		-0,349	-0,419	0,000	-0,380	-0,465	-0,148	-0,483	-0,637	-0,502		-0,652	-0,507
0,100 ± 0,0009		-0,336	-0,441	0,000	-0,347	-0,467	-0,116	-0,397	-0,581	-0,437		-0,602	-0,510
0,116 ± 0,0007													
0,134 ± 0,0007				0,000			-0,077		-0,595	-0,335	-0,527	-0,549	-0,455
0,150 ± 0,0010		-0,396		0,000	-0,416		-0,167		-0,592		-0,599	-0,567	-0,419
0,166 ± 0,0008		-0,391	-0,477	0,000	-0,433		-0,177	-0,454			-0,588		
0,183 ± 0,0009		-0,438	-0,517	0,000	-0,471	-0,546	-0,181	-0,498	-0,551	-0,349	-0,627	-0,586	
0,200 ± 0,0008		-0,439	-0,471	0,000	-0,402	-0,521	-0,174	-0,510	-0,514	-0,377	-0,579	-0,541	-0,453

Příloha II Identifikace teplotních polí

Tab. P. 10 Souhrn základních údajů z identifikace teplotního pole

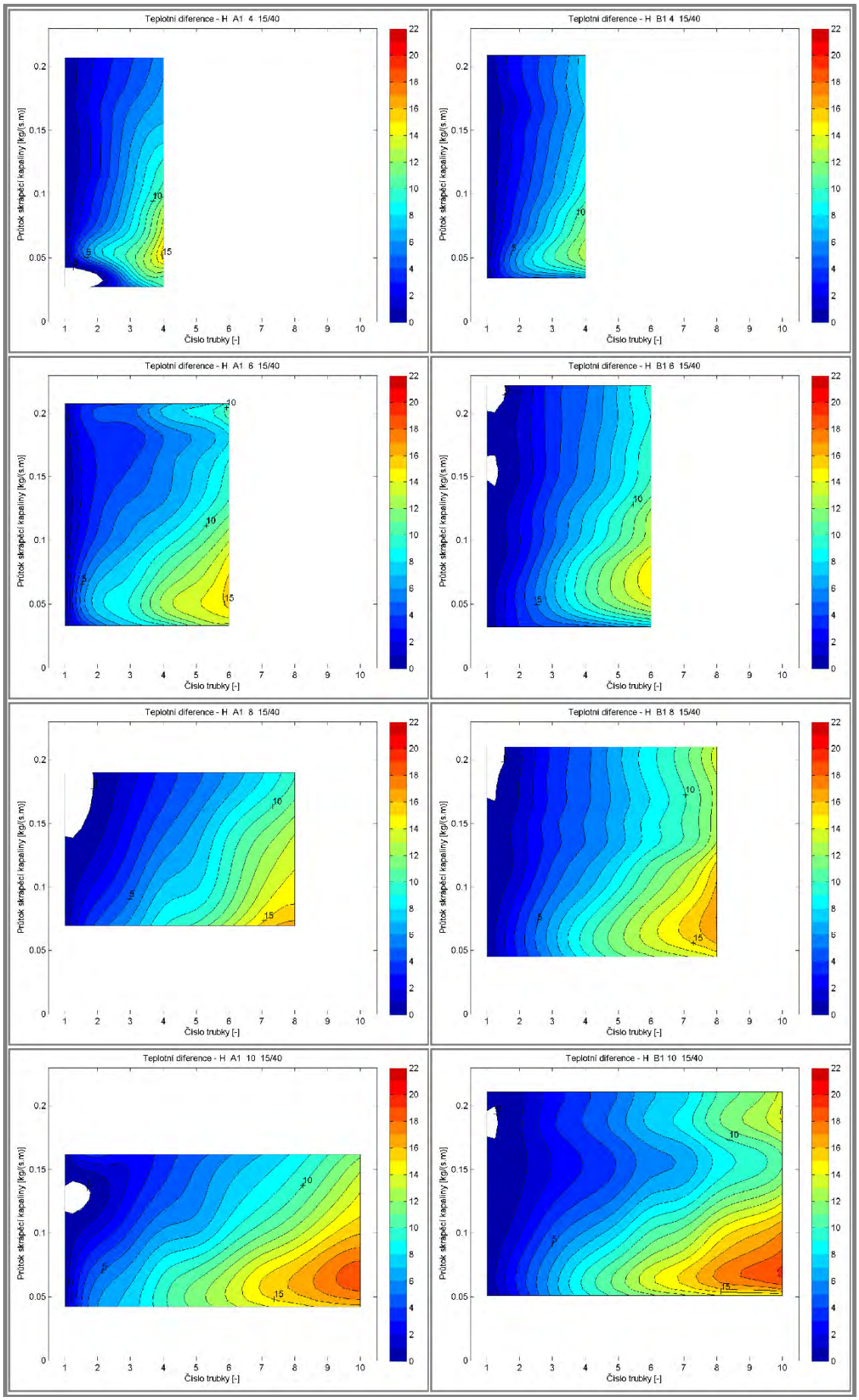
Rozteč	Počet trubek	Počet sekvencí	t_1 [°C]	t_3 [°C]	$\dot{V}_1$ [l · min^{-1}]	$\dot{V}_2$ [l · min^{-1}]
Hladký trubkový svazek						
A1	4	13	14,8 ± 0,3	40,1 ± 0,3	1,6 – 12,6	7,21 ± 0,04
	6	12	15,1 ± 0,3	40,1 ± 0,3	2,0 – 12,5	7,19 ± 0,05
	8	5	14,7 ± 0,2	40,0 ± 0,6	4,2 – 11,7	7,20 ± 0,05
	10	5	14,9 ± 0,4	39,7 ± 0,5	2,5 – 9,8	7,20 ± 0,06
B1	4	12	14,9 ± 0,3	40,2 ± 0,3	2,1 – 12,7	7,21 ± 0,04
	6	13	14,6 ± 0,5	39,9 ± 0,4	1,9 – 13,6	7,20 ± 0,03
	8	10	14,7 ± 0,4	40,3 ± 0,5	2,7 – 12,8	7,19 ± 0,05
	10	8	14,7 ± 0,4	40,2 ± 0,5	3,1 – 12,8	7,20 ± 0,04
C1	4	13	15,1 ± 0,3	40,1 ± 0,4	1,5 – 12,0	7,21 ± 0,05
	6	10	14,6 ± 0,2	39,9 ± 0,3	2,1 – 11,9	7,22 ± 0,04
	8	11	14,8 ± 0,4	40,5 ± 0,2	2,9 – 12,8	7,21 ± 0,04
	10	10	15,2 ± 0,5	40,0 ± 0,6	4,4 – 13,0	7,20 ± 0,04
A2	4	13	14,6 ± 0,2	40,0 ± 0,4	2,0 – 12,1	7,21 ± 0,05
	6	12	14,6 ± 0,2	39,8 ± 0,3	2,0 – 12,3	7,23 ± 0,05
	8	12	15,2 ± 0,5	39,9 ± 0,4	2,1 – 12,5	7,25 ± 0,03
	10	7	15,2 ± 0,5	39,9 ± 0,4	3,5 – 12,1	7,21 ± 0,04
Pískovaný trubkový svazek						
A1	4	13	14,9 ± 0,4	40,2 ± 0,4	1,1 – 12,5	7,21 ± 0,04
	6	12	15,0 ± 0,2	40,3 ± 0,4	1,4 – 12,0	7,22 ± 0,04
	8	13	14,7 ± 0,2	40,3 ± 0,4	1,4 – 12,5	7,21 ± 0,04
	10	13	14,7 ± 0,3	40,3 ± 0,4	2,1 – 12,7	7,21 ± 0,04
B1	4	13	14,7 ± 0,2	40,4 ± 0,3	1,0 – 12,6	7,21 ± 0,05
	6	13	14,8 ± 0,3	40,1 ± 0,4	1,1 – 12,4	7,23 ± 0,05
	8	11	15,3 ± 0,3	40,2 ± 0,3	3,1 – 13,0	7,17 ± 0,05
	10	10	15,1 ± 0,4	40,3 ± 0,3	2,5 – 12,0	7,2 ± 0,03
C1	4	15	15,6 ± 0,2	40,3 ± 0,2	1,4 – 12,6	7,21 ± 0,04
	6	13	15,2 ± 0,5	40,3 ± 0,3	2,0 – 12,5	7,23 ± 0,05
	8	10	15,2 ± 0,5	40,4 ± 0,2	3,0 – 13,0	7,21 ± 0,04
	10	10	15,4 ± 0,4	40,2 ± 0,3	3,0 – 12,6	7,21 ± 0,03
A2	4	14	15,1 ± 0,2	40,2 ± 0,5	1,3 – 12,6	7,23 ± 0,04
	6	16	14,7 ± 0,2	40,2 ± 0,4	1,1 – 13,4	7,19 ± 0,06
	8	10	15,3 ± 0,5	40,4 ± 0,3	3,1 – 12,1	7,19 ± 0,04
	10	10	15,4 ± 0,1	39,7 ± 0,4	3,0 – 11,8	7,23 ± 0,05

Tab. P. 10 Souhrn základních údajů z identifikace teplotního pole **– pokračování**

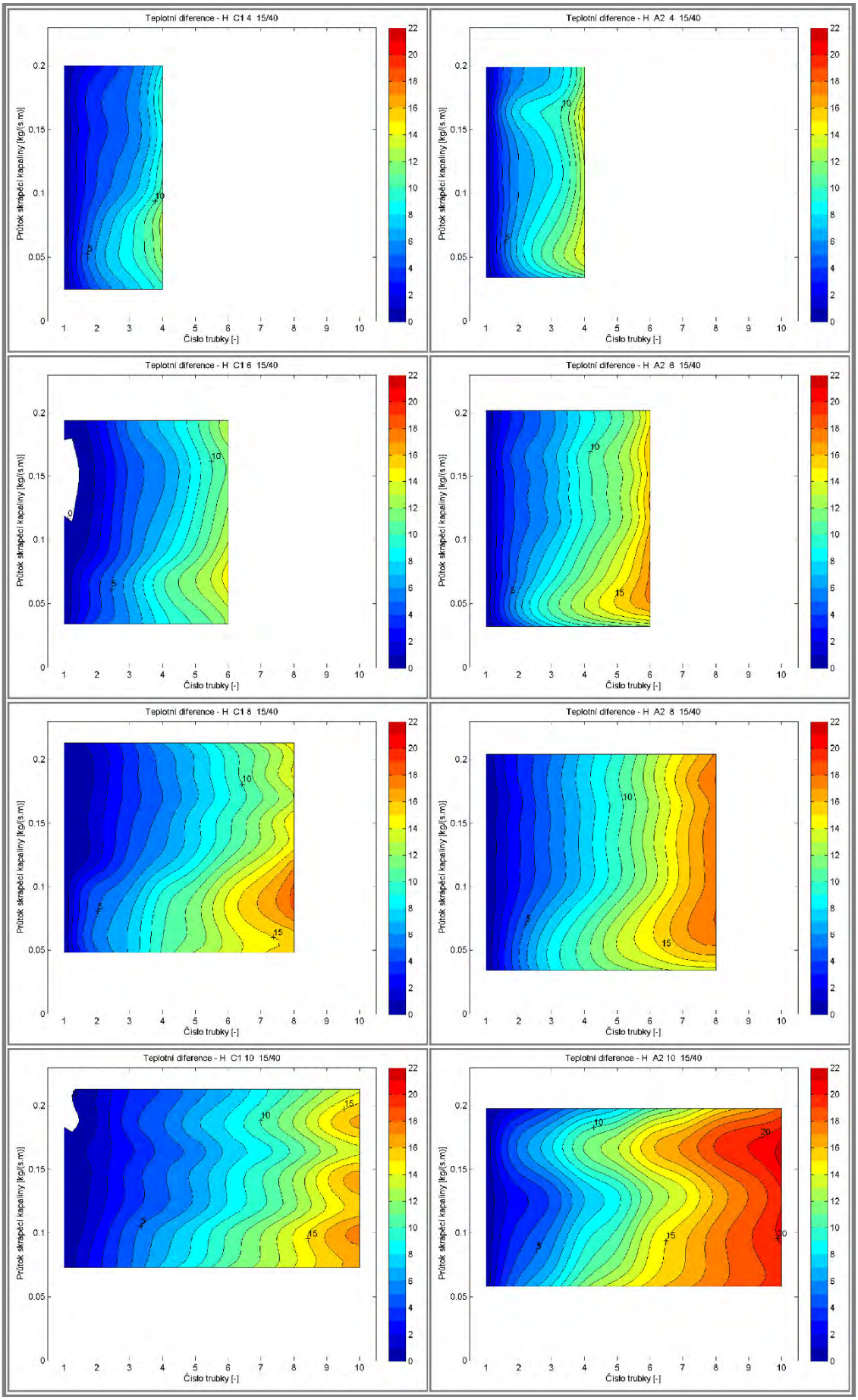
Rozteč	Počet trubek	Počet sekvencí	t_1 [°C]	t_3 [°C]	$\dot{V}_1$ [l · min^{-1}]	$\dot{V}_2$ [l · min^{-1}]
Rádlovaný trubkový svazek						
A1	4	13	14,7 ± 0,3	40,0 ± 0,3	1,1 – 12,7	7,25 ± 0,03
	6	13	15,0 ± 0,5	40,2 ± 0,3	1,1 – 12,7	7,21 ± 0,05
	8	12	15,2 ± 0,5	40,2 ± 0,3	3,0 – 12,8	7,22 ± 0,04
	10	12	15,1 ± 0,5	40,1 ± 0,6	3,0 – 11,8	7,19 ± 0,06
B1	4	15	14,7 ± 0,3	40,1 ± 0,4	1,4 – 12,8	7,20 ± 0,03
	6	12	14,6 ± 0,3	40,0 ± 0,3	2,1 – 12,9	7,22 ± 0,04
	8	9	15,2 ± 0,3	40,3 ± 0,5	3,0 – 12,5	7,19 ± 0,05
	10	8	15,0 ± 0,6	40,2 ± 0,6	2,1 – 12,7	7,24 ± 0,04
C1	4	14	15,0 ± 0,2	40,3 ± 0,4	2,0 – 12,7	7,23 ± 0,05
	6	11	15,1 ± 0,3	40,3 ± 0,3	2,0 – 12,0	7,21 ± 0,05
	8	10	15,1 ± 0,7	40,1 ± 0,3	3,2 – 11,9	7,16 ± 0,02
	10	9	15,2 ± 0,3	40,4 ± 0,4	3,2 – 13,2	7,21 ± 0,04
A2	4	13	14,9 ± 0,5	39,9 ± 0,3	2,0 – 12,5	7,22 ± 0,05
	6	12	14,7 ± 0,3	40,2 ± 0,3	3,1 – 12,5	7,23 ± 0,04
	8	10	15,4 ± 0,5	40,3 ± 0,5	2,0 – 12,8	7,24 ± 0,06
	10	12	15,1 ± 0,5	40,1 ± 0,4	3,0 – 13,5	7,21 ± 0,04

Vysvětlivky: **Rozteč** – značí rozteč trubek trubkového svazku, **Počet trubek** – označuje množství trubek v trubkovém svazku, **Počet sekvencí** je množství sekvencí snímaných termovizní kamerou u dané geometrie svazku v uvedeném rozsahu průtoku skrápěcí kapaliny, $\mathbf{t_1}$ **[°C]** je teplota skrápěcí kapaliny na výstupu z distribuční trubky, $\dot{\mathbf{V}}_\mathbf{1}$ **[l · min^{-1}]** je rozsah objemového průtoku skrápěcí kapaliny při kterém byly pořizovány sekvence, $\mathbf{t_3}$ **[°C]** je teplota topné kapaliny na vstupu do výměníku, $\dot{\mathbf{V}}_\mathbf{2}$ **[l · min^{-1}]** je objemový průtok topné kapaliny.

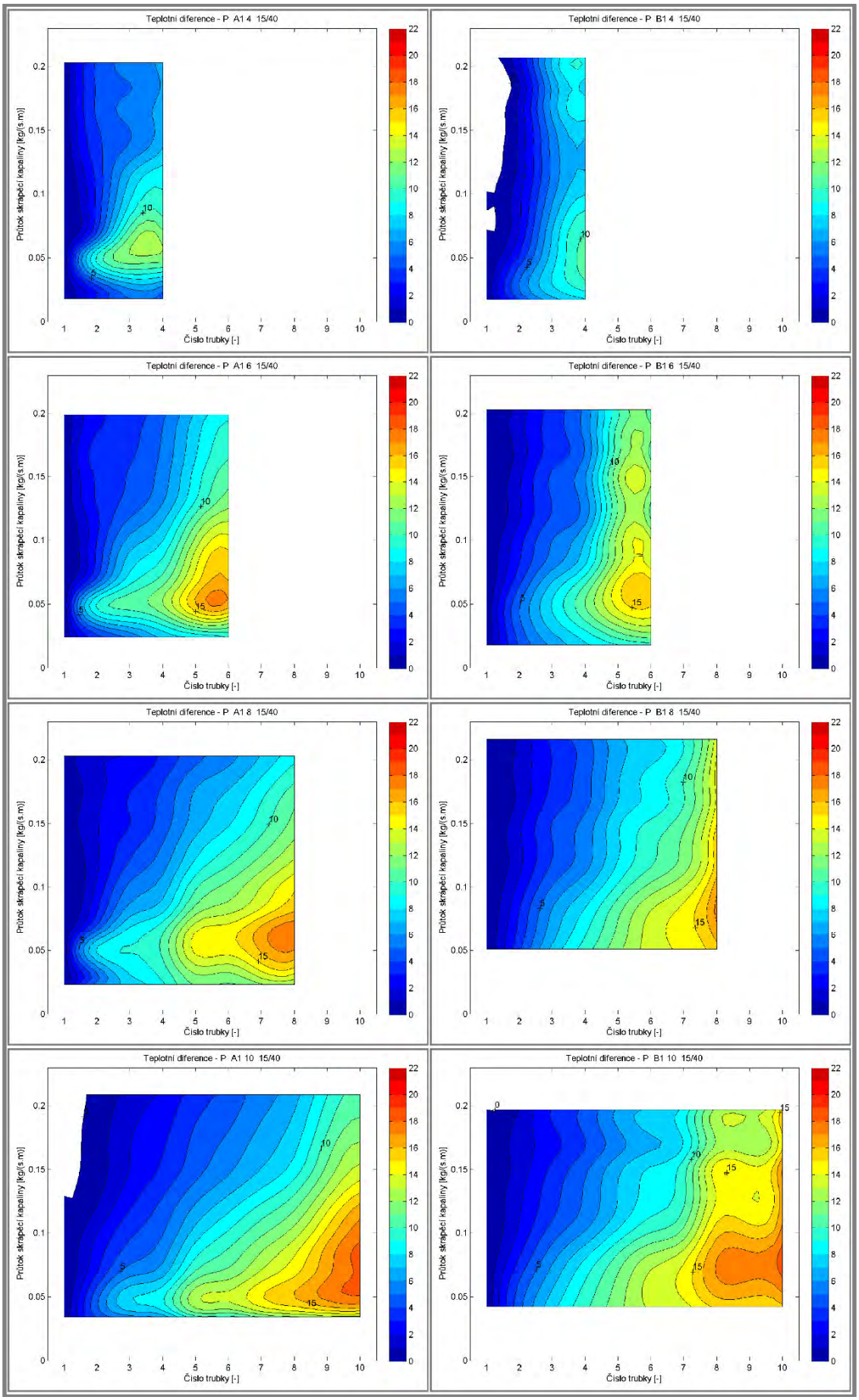
Pozn.: Uvedené teploty a průtok topné kapaliny jsou průměrnými hodnotami společně s jejich směrodatnou odchylkou, které byly vypočítané pouze v rozsahu uvedeného průtoku skrápěcí kapaliny a z hodnot, které byly zaznamenány při snímání sekvencí termovizní kamerou u dané geometrie svazku. Směrodatná odchylka dílčích průměrných teplot jednotlivých sekvencí nepřesáhla $\pm 0{,}1\,°C$ a v případě průměrných hodnot průtoku topné kapaliny $\pm 0{,}02\,l \cdot min^{-1}$.



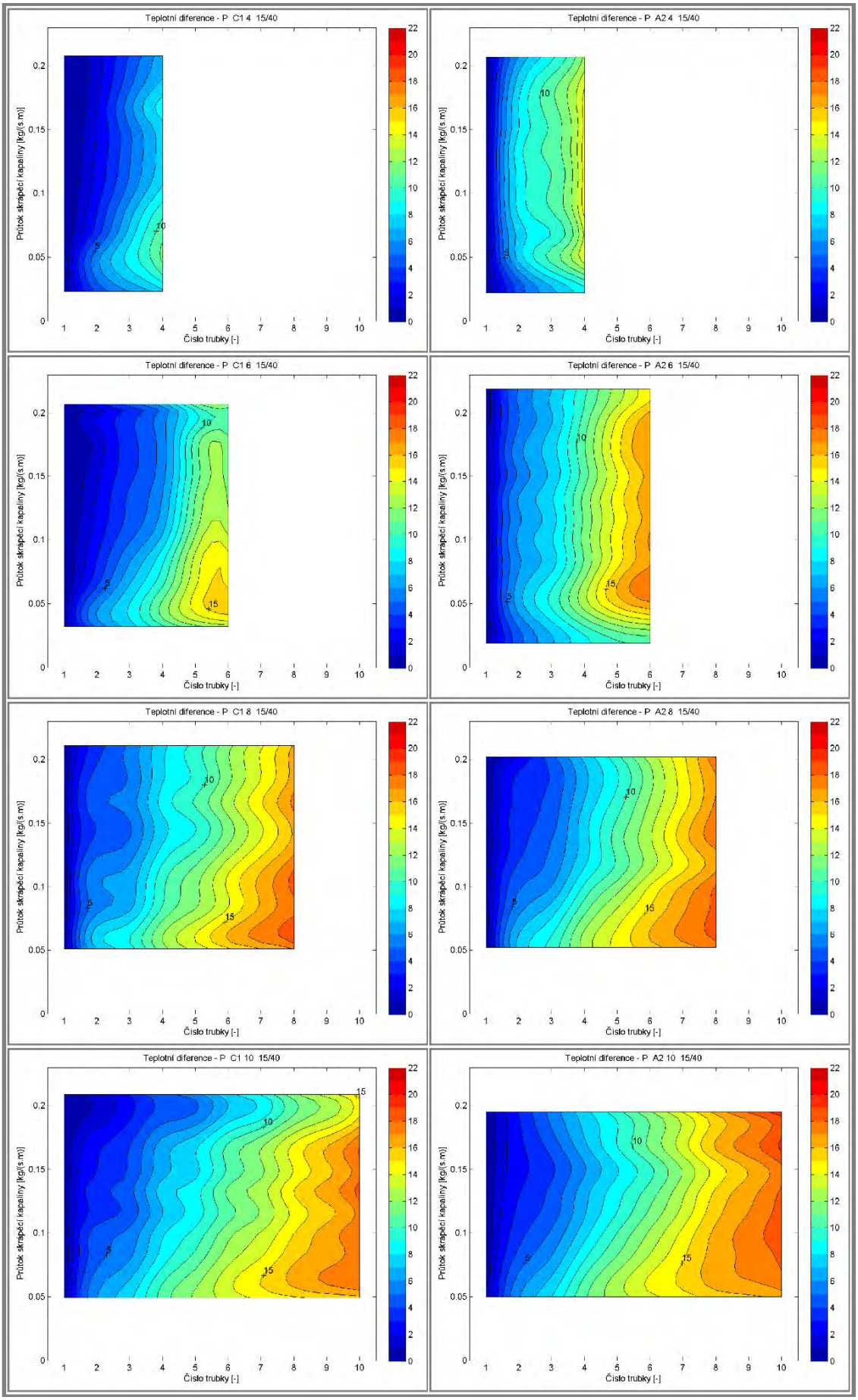
Obr. P. 1 Teplotní diference na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1



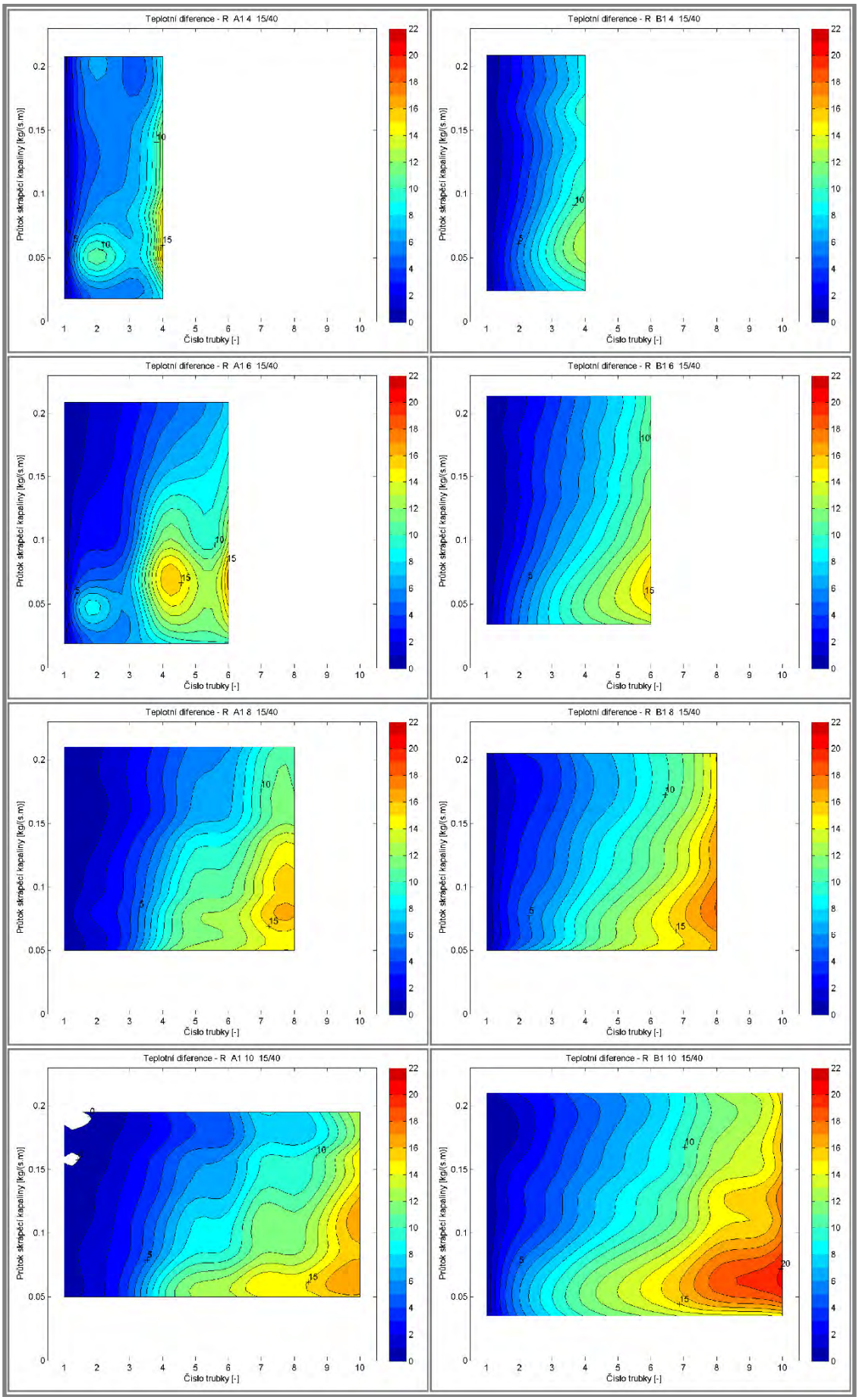
Obr. P. 2 Teplotní diference na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2



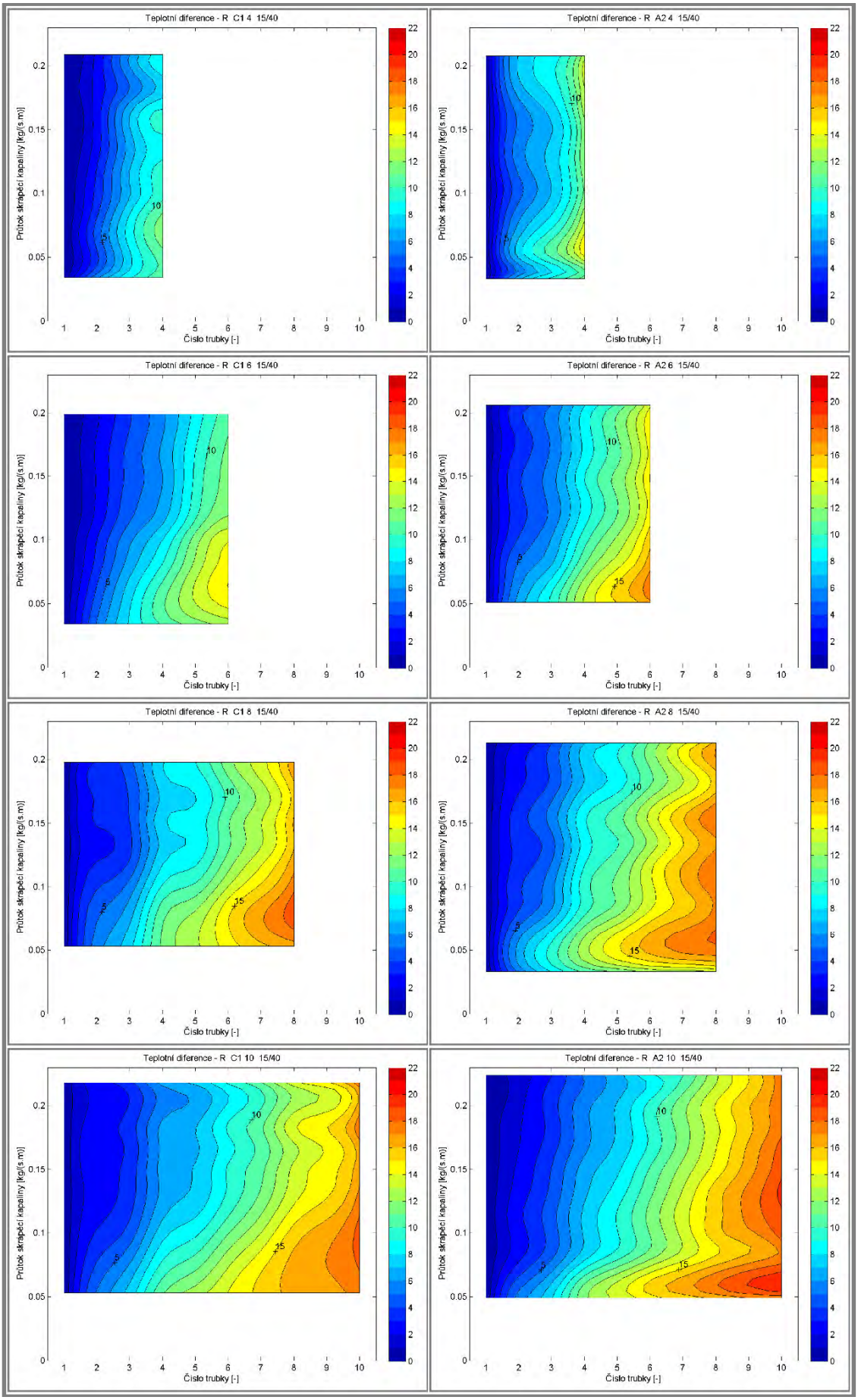
Obr. P. 3 Teplotní diference na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1



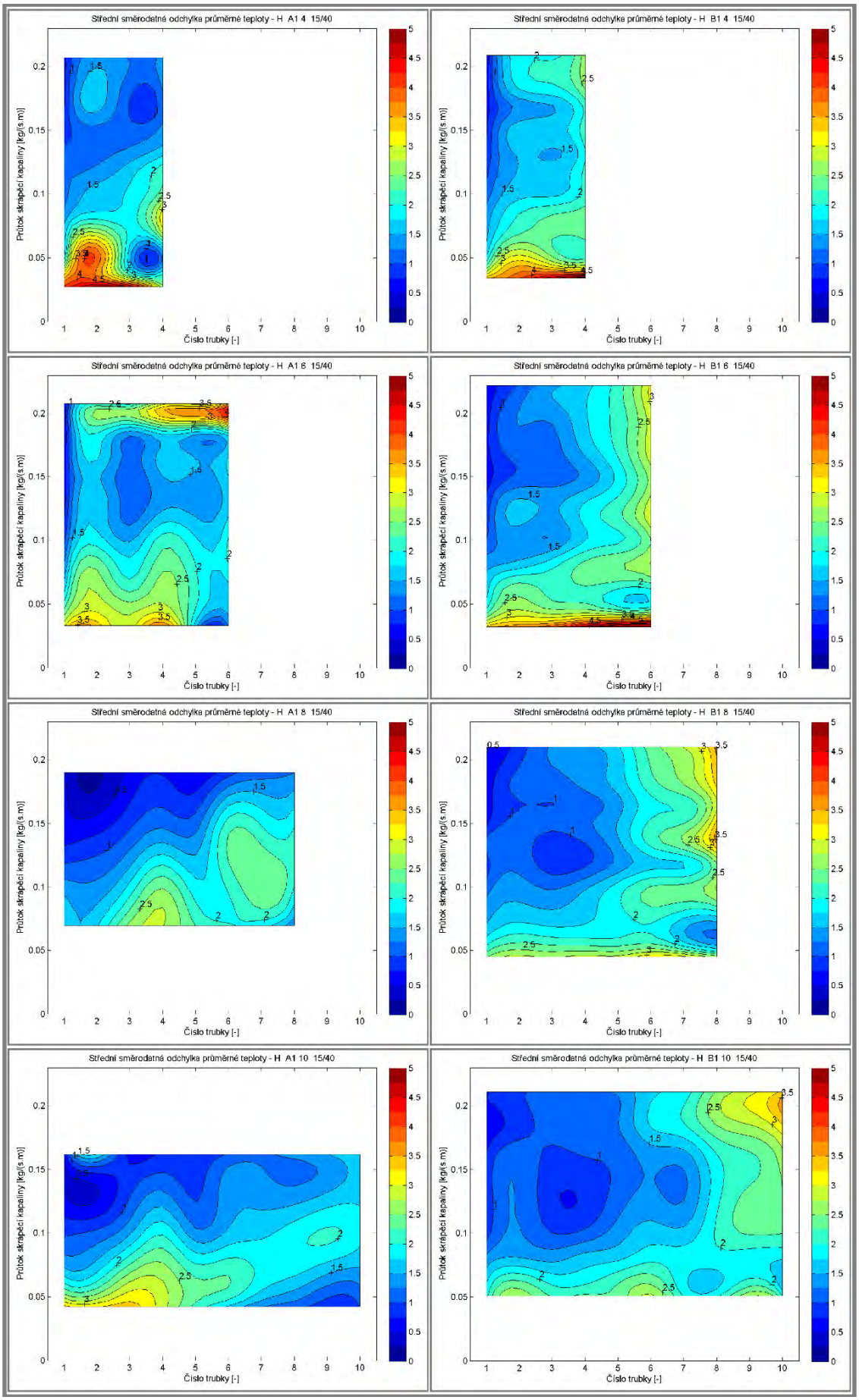
Obr. P. 4 Teplotní diference na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2



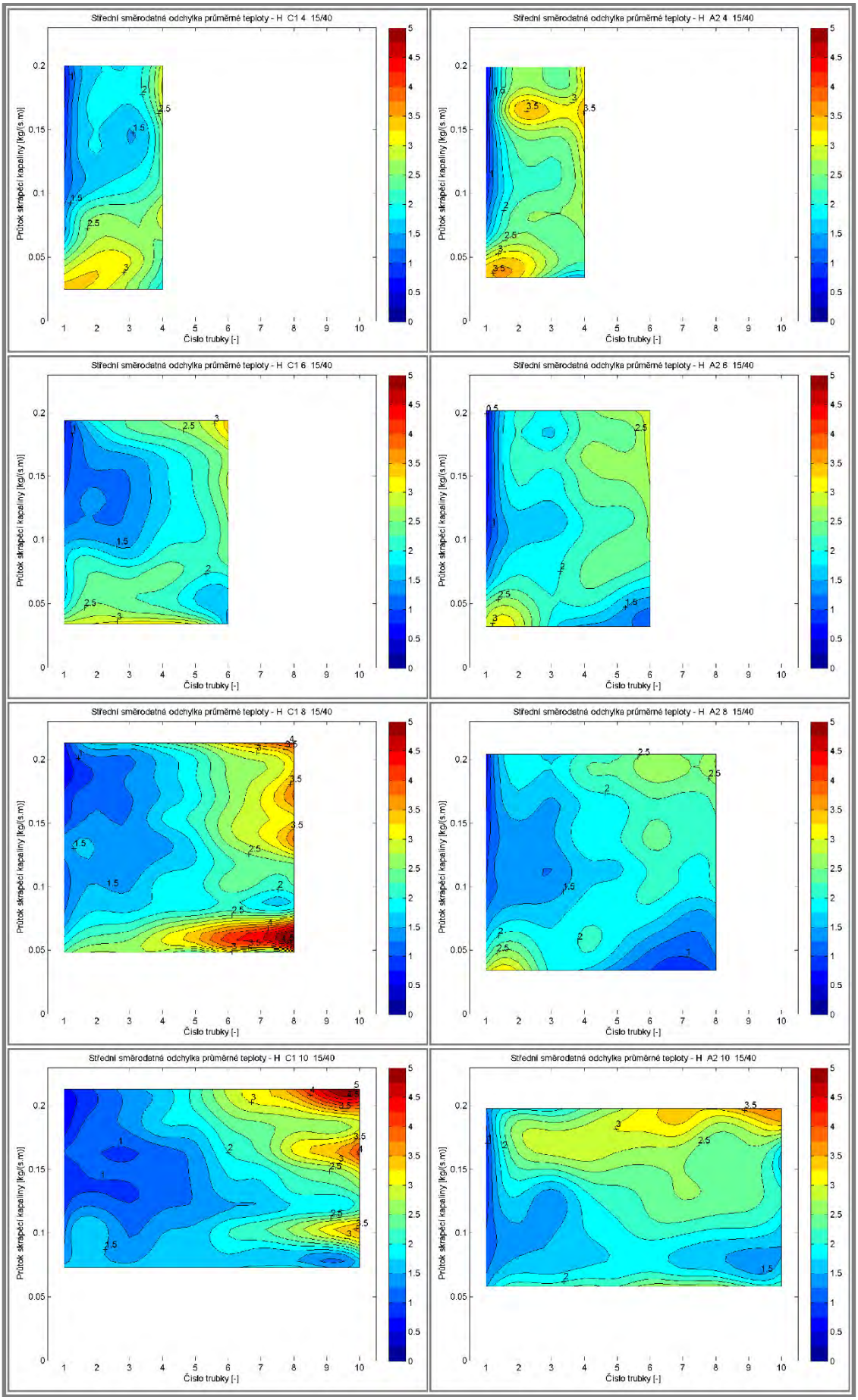
Obr. P. 5 Teplotní diference na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1



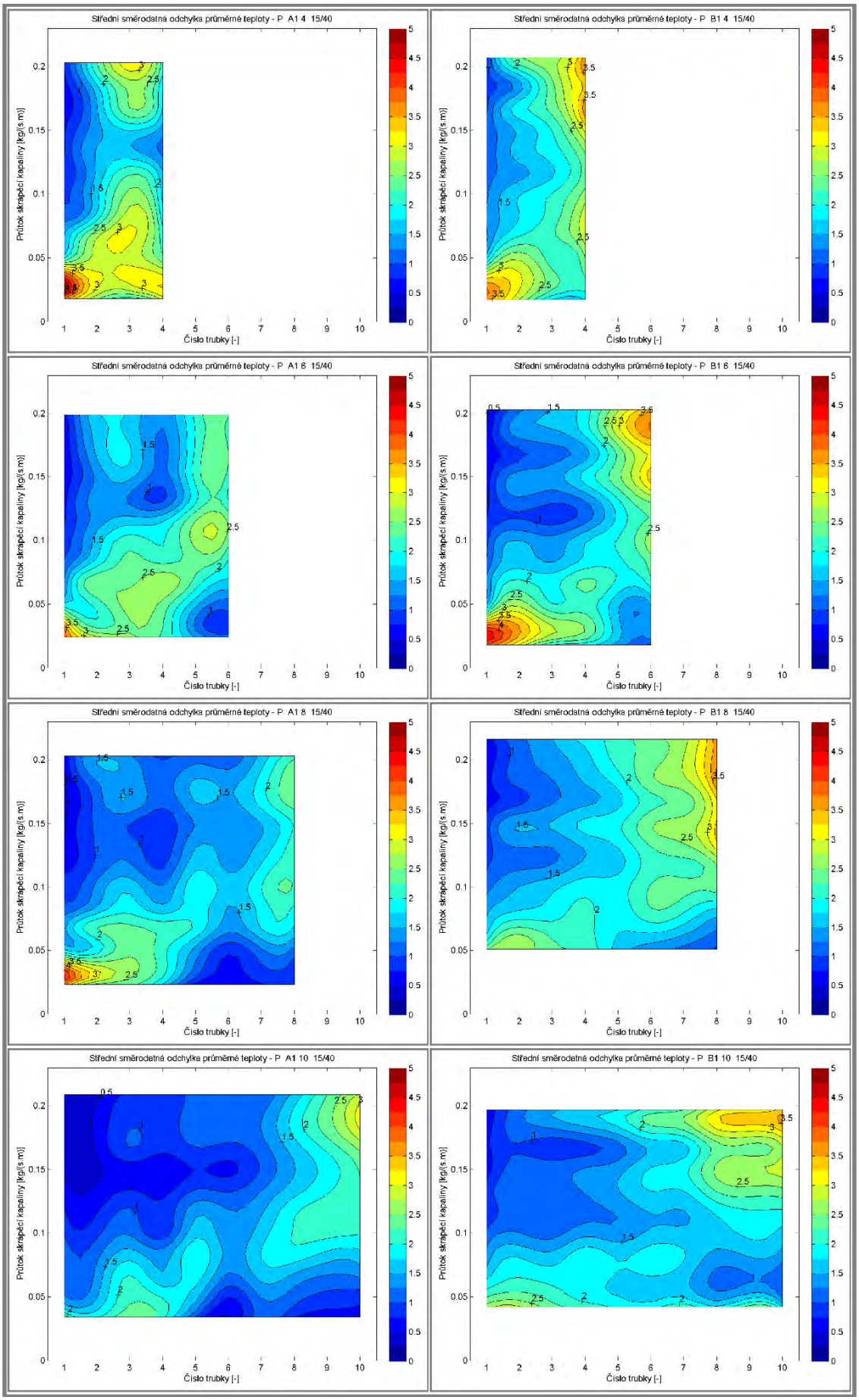
Obr. P. 6 Teplotní diference na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2



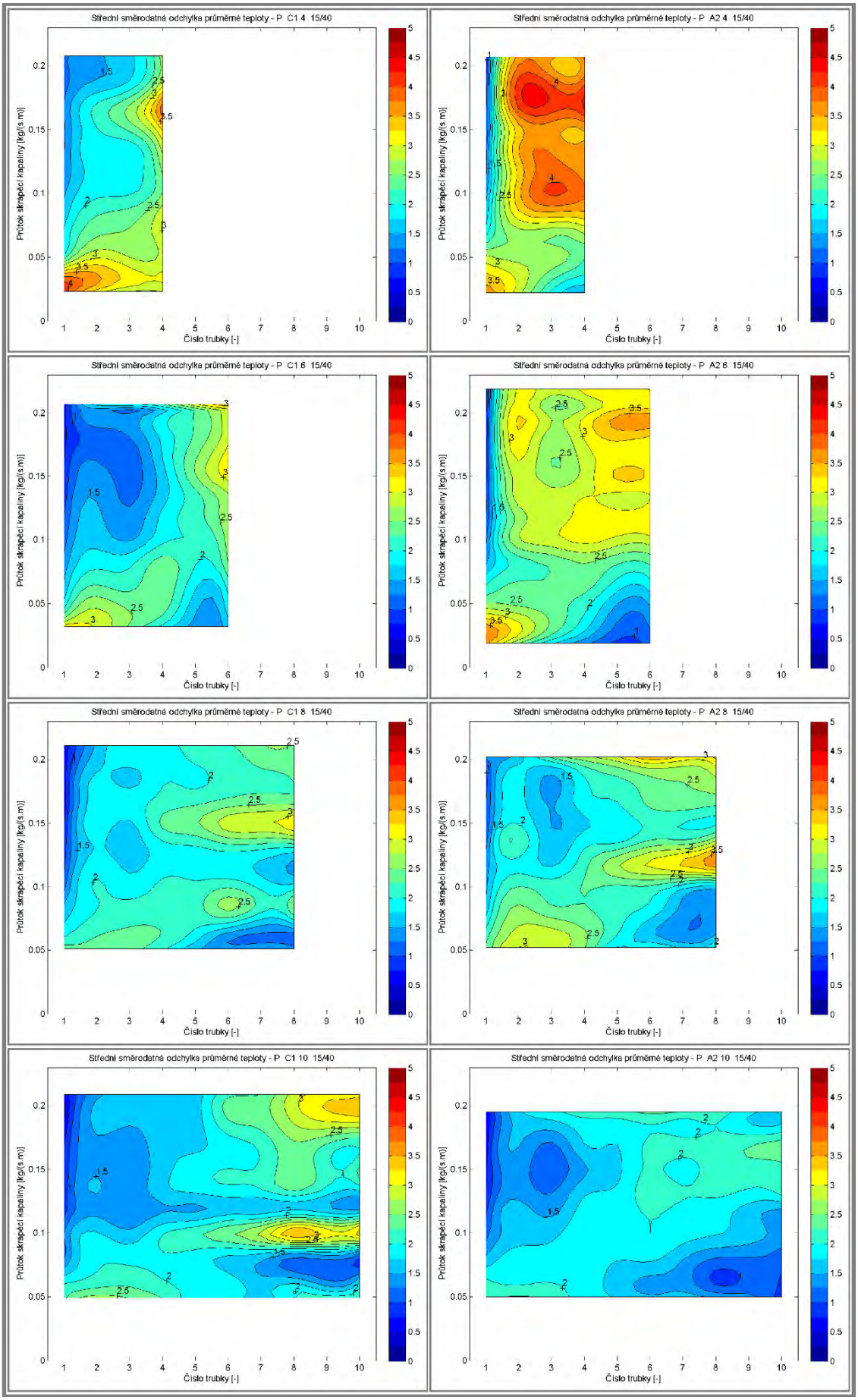
Obr. P. 7 Směrodatná odchylka průměrné teploty na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1



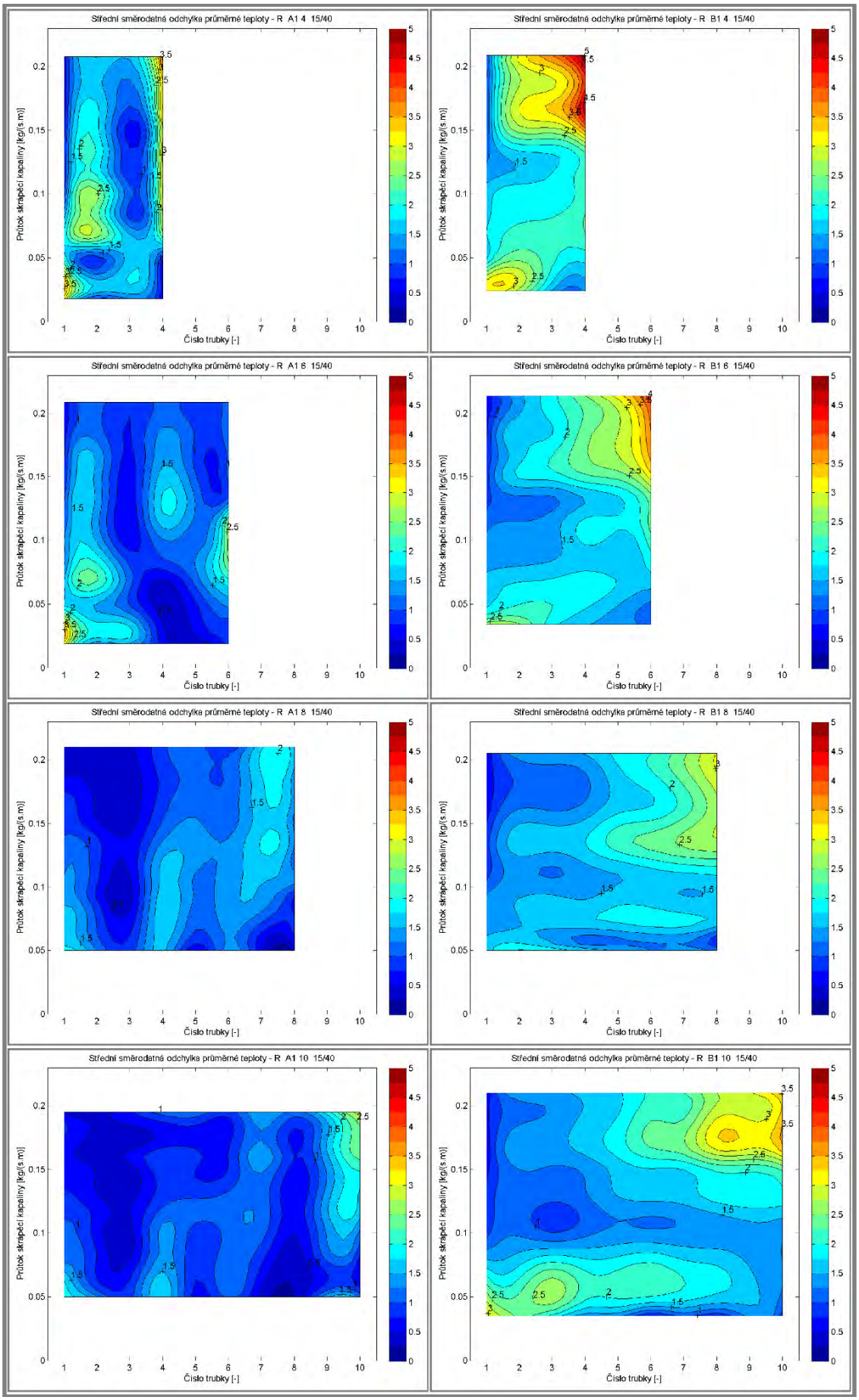
Obr. P. 8 Směrodatná odchylka průměrné teploty na hladkém trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2



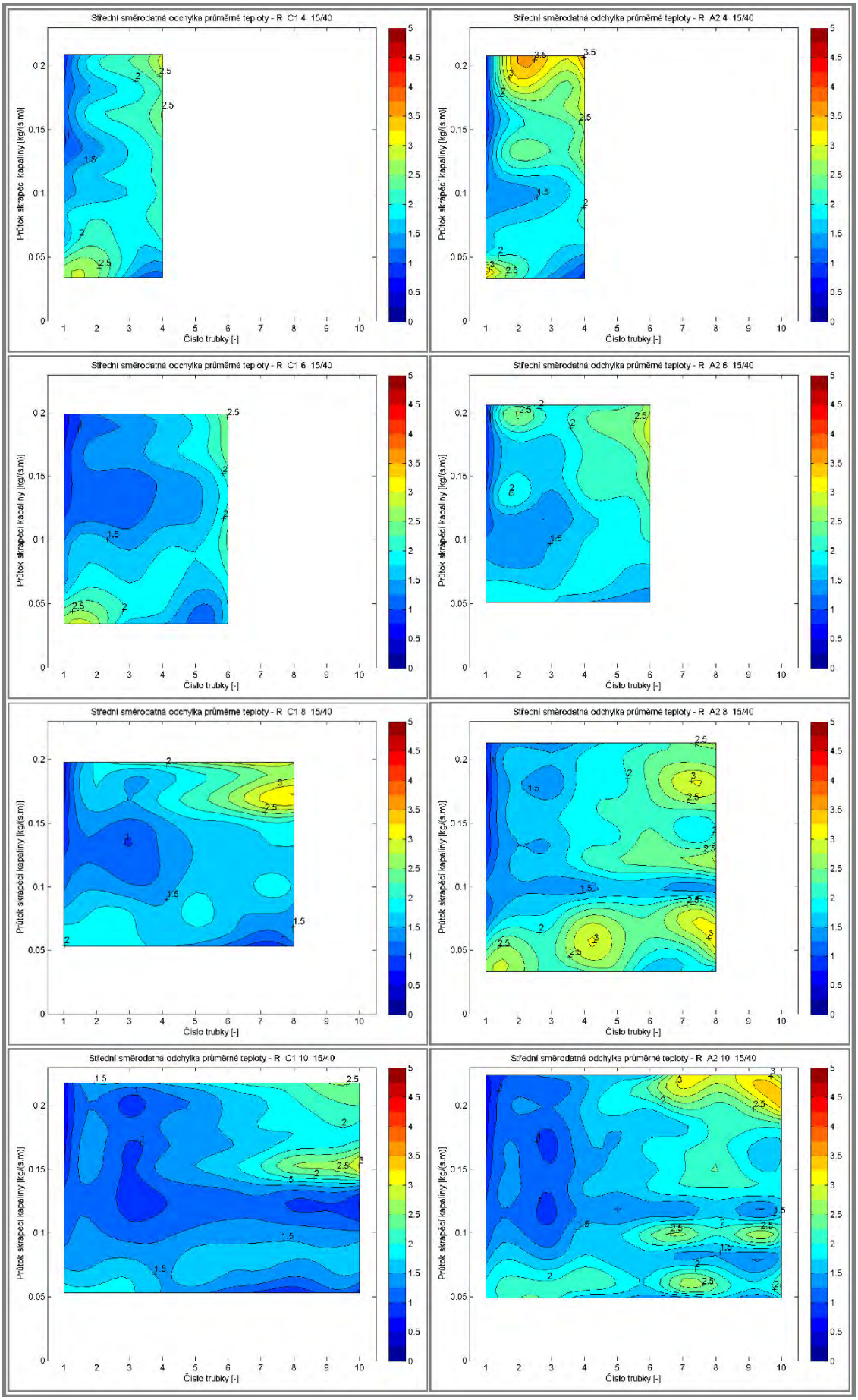
Obr. P. 9 Směrodatná odchylka průměrné teploty na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1



Obr. P. 10 Směrodatná odchylka průměrné teploty na pískovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2



Obr. P. 11 Směrodatná odchylka průměrné teploty na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek A1 a B1



Obr. P. 12 Směrodatná odchylka průměrné teploty na rádlovaném trubkovém svazku s roztečí trubek C1 a A2

Příloha III Dílčí výsledky regresní analýza – varianta A9_H/P/R

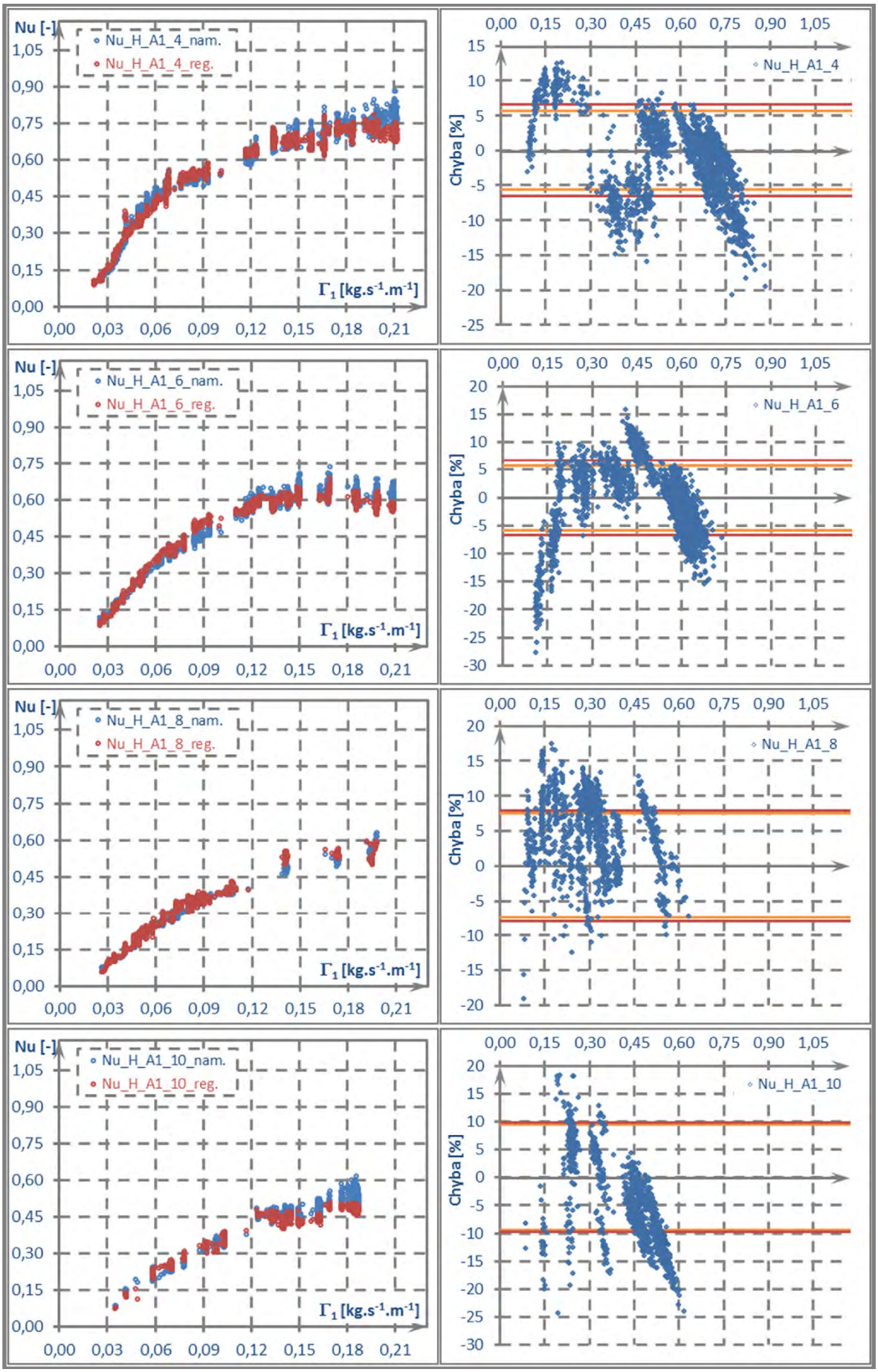
Vysvětlivky: **Rozteč** – značí rozteč trubek trubkového svazku, **Počet trubek** – označuje množství trubek v trubkovém svazku, **Počet hodnot** je množství hodnot dané geometrie vstupujících do regresní analýzy, $u_{B,Nu}$ [%] je průměrná nejistota typu B Nusseltova čísla vyjádřená z experimentálních dat dané geometrie, **Průměrná chyba** $u_{reg,Nu}$ [%] vyjadřuje průměrný rozdíl mezi původní hodnotou a hodnotou vypočtenou pomocí navrženého regresního modelu, **Maximální chyba** $u_{reg,Nu}$ [%] je maximální rozdíl mezi původní hodnotou a hodnotou vypočtenou pomocí navrženého regresního modelu, $s_{reg,Nu}$ [%] je variační koeficient, ρ^2 [%] je index (koeficient) determinace, **Celková chyba** $u_{C,Nu}$ [%] vyjadřuje celkovou chybu při výpočtu Nusseltova čísla podle navrženého regresního modelu, která zahrnuje i vliv chyby měřících přístrojů, **Počet error >** $u_{C,Nu}$ [%] je procentuálně vyjádřený počet hodnot dané geometrie, které mají celkovou chybu vyšší, něž je průměrná chyba $u_{C,Nu}$.

Tab. P. 11 Souhrnná tabulka statistických výsledků regresního modelu varianty A9

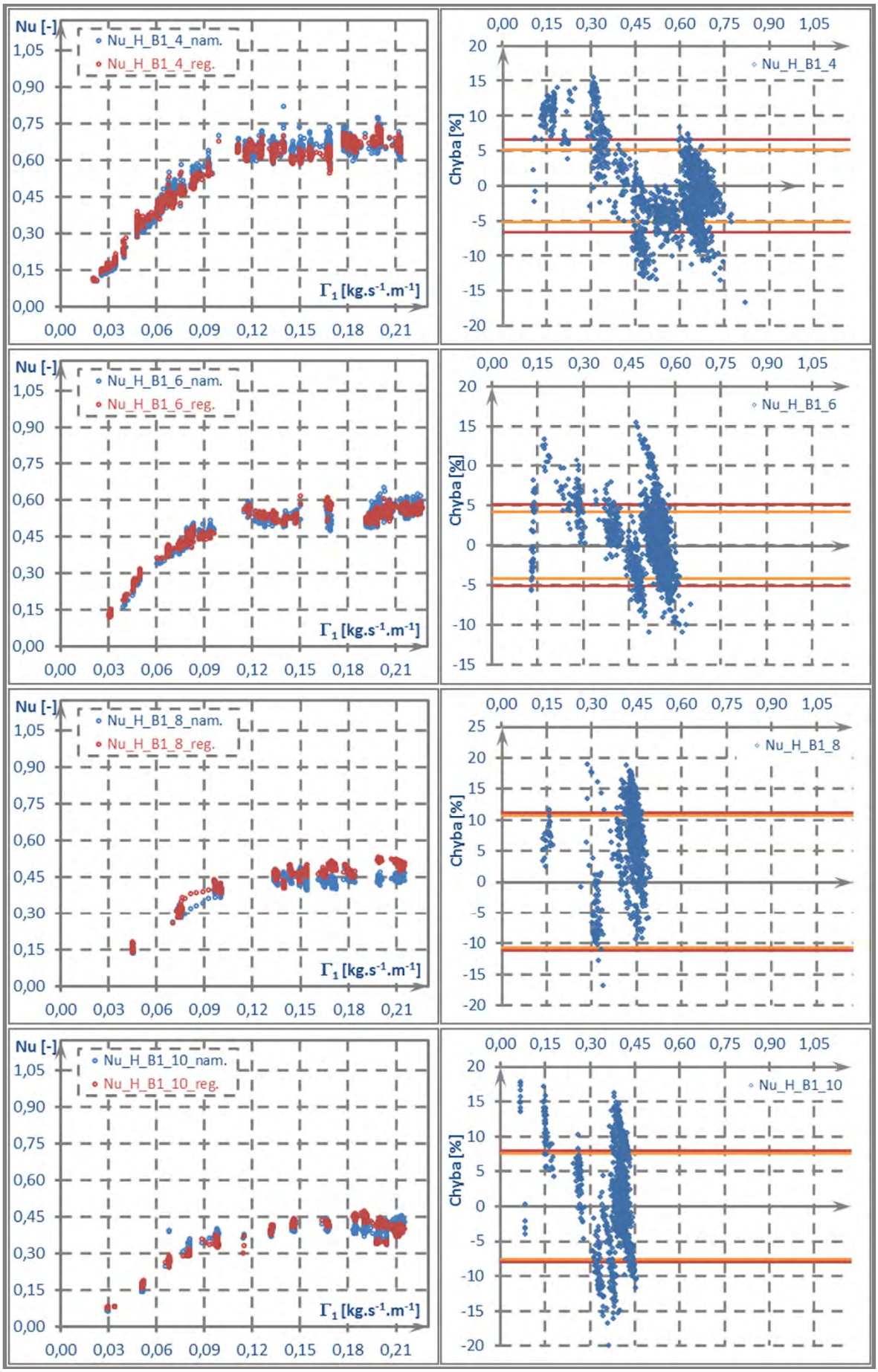
Rozteč	Počet trubek	Počet hodnot	$u_{B,Nu}$ [%]	Průměrná chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	Maximální chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	$s_{reg,Nu}$ [%]	ρ^2 [%]	Celková chyba $u_{C,Nu}$ [%]	Počet error > $u_{C,Nu}$ [%]
Hladký trubkový svazek									
A1	4	1 694	3,4 ± 3,3	4,6 ± 3,7	20,7	5,6	97,6	6,55	29,2
	6	1 891	3,3 ± 3,1	5,1 ± 4,1	27,8	5,8	97,3	6,65	29,7
	8	1 115	2,7 ± 2,6	6,1 ± 4,2	34,2	7,4	97,9	7,93	33,8
	10	1 106	2,5 ± 1,8	8,2 ± 5,0	64,0	9,4	95,7	9,75	37,0
B1	4	1 406	4,2 ± 3,9	5,0 ± 3,5	16,8	5,2	97,3	6,65	29,0
	6	1 366	3,0 ± 3,1	3,2 ± 2,6	15,4	4,2	96,1	5,15	19,6
	8	813	3,3 ± 2,3	8,2 ± 4,5	18,9	10,6	85,8	11,15	29,8
	10	1 072	2,6 ± 2,8	6,1 ± 4,7	62,3	7,6	86,9	8,00	33,1
C1	4	1 310	4,2 ± 3,1	6,5 ± 3,5	25,0	7,4	97,2	8,50	31,8
	6	1 361	4,1 ± 3,3	3,9 ± 3,0	27,8	4,6	97,3	6,16	18,7
	8	865	3,3 ± 2,7	5,0 ± 3,4	18,4	6,4	94,4	7,19	26,6
	10	777	5,5 ± 3,4	5,3 ± 4,3	22,7	6,3	73,7	8,34	22,1
A2	4	932	6,4 ± 4,7	7,5 ± 4,2	22,5	9,8	91,1	11,73	21,8
	6	835	5,2 ± 3,9	4,9 ± 4,5	35,0	6,0	94,6	7,92	20,4
	8	994	6,1 ± 4,1	8,4 ± 5,2	28,3	9,7	89,5	11,42	29,1
	10	887	4,1 ± 3,9	8,6 ± 9,2	75,6	11,4	87,3	12,12	21,3
Σ		**18 424**	**3,9 ± 3,5**	**5,8 ± 4,7**	**75,6**	**6,9**	**96,2**	**7,93**	**28,1**
Pískovaný trubkový svazek									
A1	4	1 153	4,2 ± 3,3	7,3 ± 6,1	63,1	7,3	97,1	8,43	30,9
	6	1 504	2,8 ± 3,1	5,3 ± 3,5	18,1	6,1	96,6	6,74	32,6
	8	1 358	3,3 ± 3,9	5,6 ± 5,1	38,5	6,8	96,4	7,57	26,0
	10	1 965	2,5 ± 3,0	9,3 ± 5,9	52,9	10,7	98,1	10,94	35,1
B1	4	1 141	3,9 ± 3,3	3,2 ± 2,5	16,2	4,0	98,8	5,61	17,9
	6	1 163	2,7 ± 2,6	4,4 ± 3,3	17,7	4,9	98,2	5,60	26,3
	8	1 188	3,0 ± 2,8	4,8 ± 3,7	18,8	5,4	96,1	6,15	30,9
	10	1 059	3,3 ± 2,9	7,5 ± 4,8	21,0	9,2	94,1	9,80	33,1
C1	4	1 513	3,5 ± 3,0	9,5 ± 4,5	24,4	10,8	99,0	11,33	36,0
	6	1 451	3,2 ± 2,6	7,1 ± 4,8	29,9	8,4	92,3	9,00	27,6
	8	685	8,0 ± 5,5	10,9 ± 4,5	21,3	14,3	96,3	16,39	10,7
	10	834	4,9 ± 4,2	6,5 ± 6,8	37,2	6,6	93,0	8,21	25,5

Tab. P. 11 Souhrnná tabulka statistických výsledků regresního modelu varianty A9

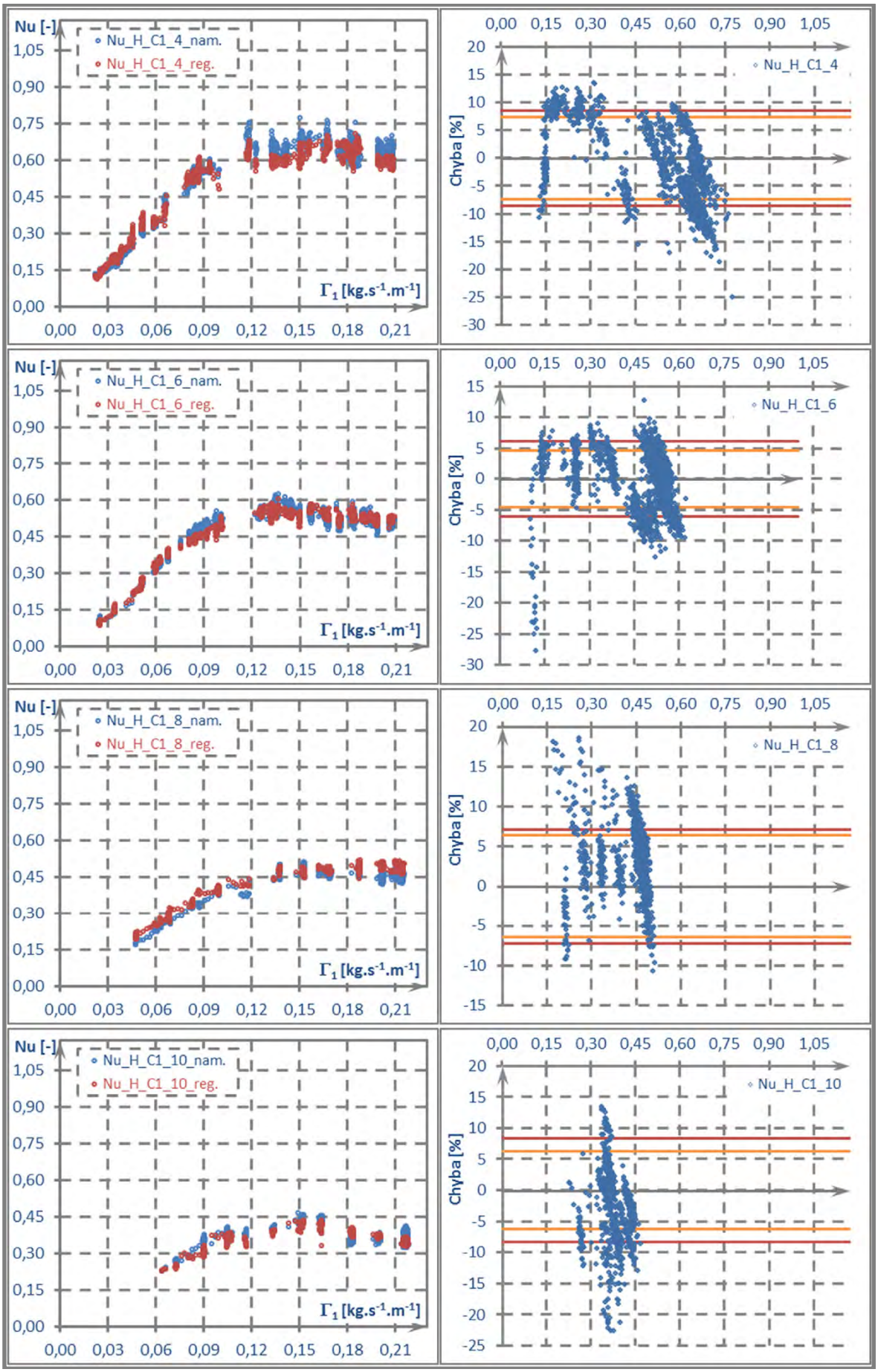
Rozteč	Počet trubek	Počet hodnot	$u_{B,Nu}$ [%]	Průměrná chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	Maximální chyba $u_{reg,Nu}$ [%]	$s_{reg,Nu}$ [%]	ρ^2 [%]	Celková chyba $u_{C,Nu}$ [%]	Počet error > $u_{C,Nu}$ [%]
Pískovaný trubkový svazek – pokračování									
A2	4	1 070	6,5 ± 5,1	4,5 ± 3,5	19,4	5,0	97,6	8,20	13,1
	6	1 096	5,5 ± 4,0	6,1 ± 4,4	38,4	7,0	95,8	8,89	22,1
	8	806	5,6 ± 4,7	6,4 ± 6,4	51,5	6,9	94,8	8,87	17,4
	10	788	4,2 ± 3,5	6,0 ± 5,0	28,7	7,9	95,1	8,97	22,1
Σ		**18 774**	**3,9 ± 3,8**	**6,6 ± 5,2**	**63,1**	**8,0**	**95,6**	**8,90**	**27,4**
Rádlovaný trubkový svazek									
A1	4	1 030	3,2 ± 3,5	8,0 ± 5,2	22,9	8,6	97,6	9,18	39,2
	6	1 220	2,6 ± 3,5	10,6 ± 6,3	35,8	12,2	96,1	12,49	36,6
	8	920	2,3 ± 1,5	6,9 ± 6,8	84,5	9,0	92,8	9,26	25,3
	10	848	1,9 ± 1,6	6,0 ± 5,5	46,2	6,3	94,7	6,54	33,8
B1	4	1 043	3,8 ± 3,5	6,7 ± 4,2	20,7	7,9	96,9	8,75	31,1
	6	1 336	3,3 ± 3,4	4,4 ± 4,4	89,8	5,6	97,8	6,48	22,1
	8	771	2,9 ± 3,0	9,3 ± 8,8	54,0	9,9	92,4	10,35	28,3
	10	669	2,9 ± 3,3	9,2 ± 4,8	29,2	11,8	93,6	12,12	25,7
C1	4	951	3,8 ± 3,2	10,8 ± 5,6	29,4	12,0	94,5	12,60	39,4
	6	1 583	3,6 ± 3,7	7,2 ± 5,9	33,1	10,3	96,3	10,90	20,2
	8	654	6,3 ± 4,8	8,2 ± 6,5	59,5	9,4	83,6	11,34	24,8
	10	1 004	5,7 ± 4,1	9,2 ± 5,1	41,9	11,2	66,8	12,55	26,2
A2	4	1 230	5,1 ± 4,3	6,0 ± 4,6	26,9	6,9	95,3	8,55	20,6
	6	1 305	4,6 ± 3,3	6,5 ± 6,3	71,9	7,8	91,1	9,04	27,2
	8	811	5,0 ± 4,2	6,9 ± 4,7	32,1	7,7	95,9	9,18	30,2
	10	1 044	4,9 ± 4,0	7,1 ± 5,5	63,4	8,3	91,0	9,63	28,6
Σ		**16 419**	**3,9 ± 3,7**	**7,5 ± 5,9**	**89,8**	**9,5**	**94,5**	**10,29**	**27,1**



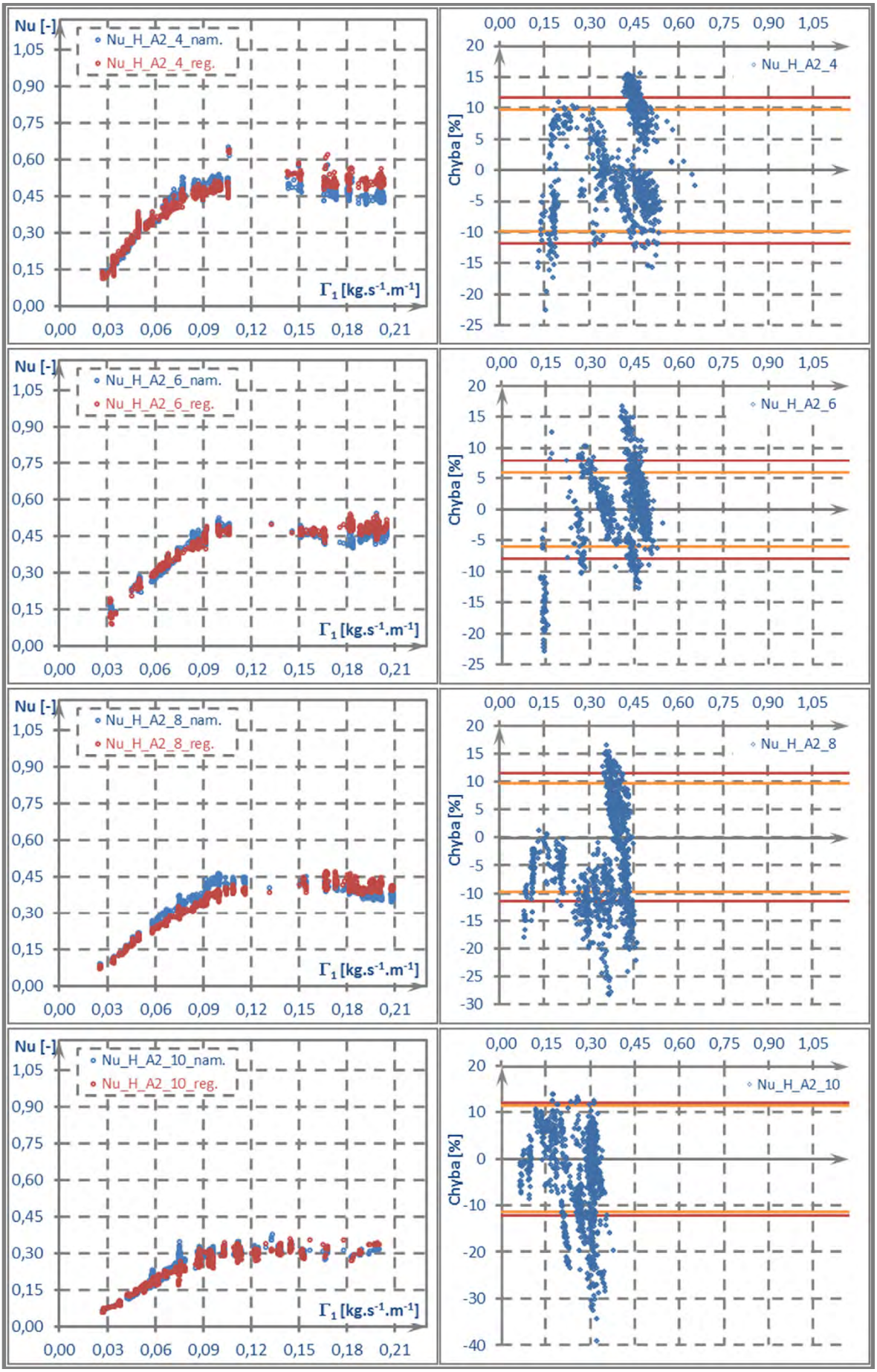
Obr. P. 13 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek A1



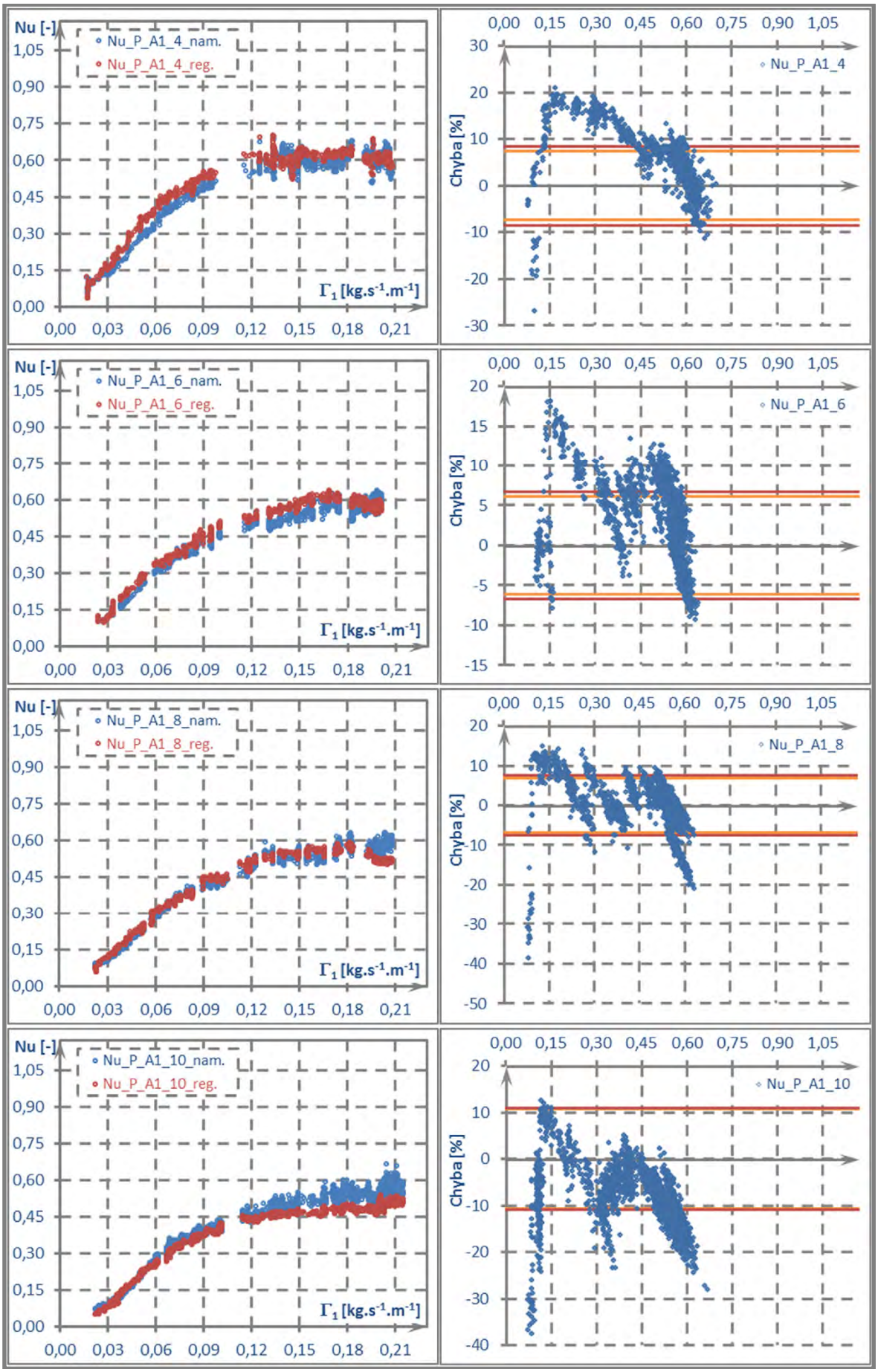
Obr. P. 14 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek B1



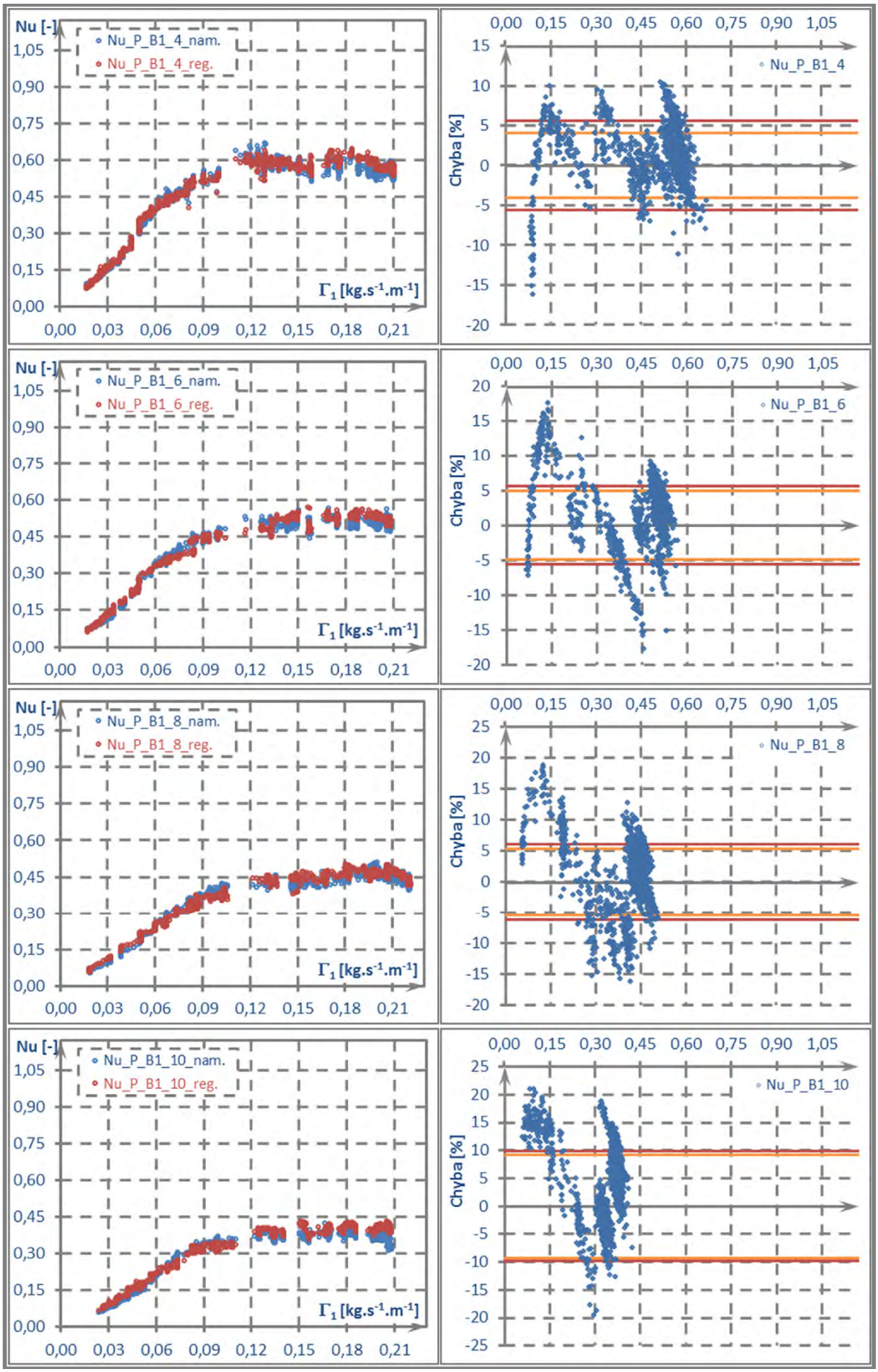
Obr. P. 15 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek C1



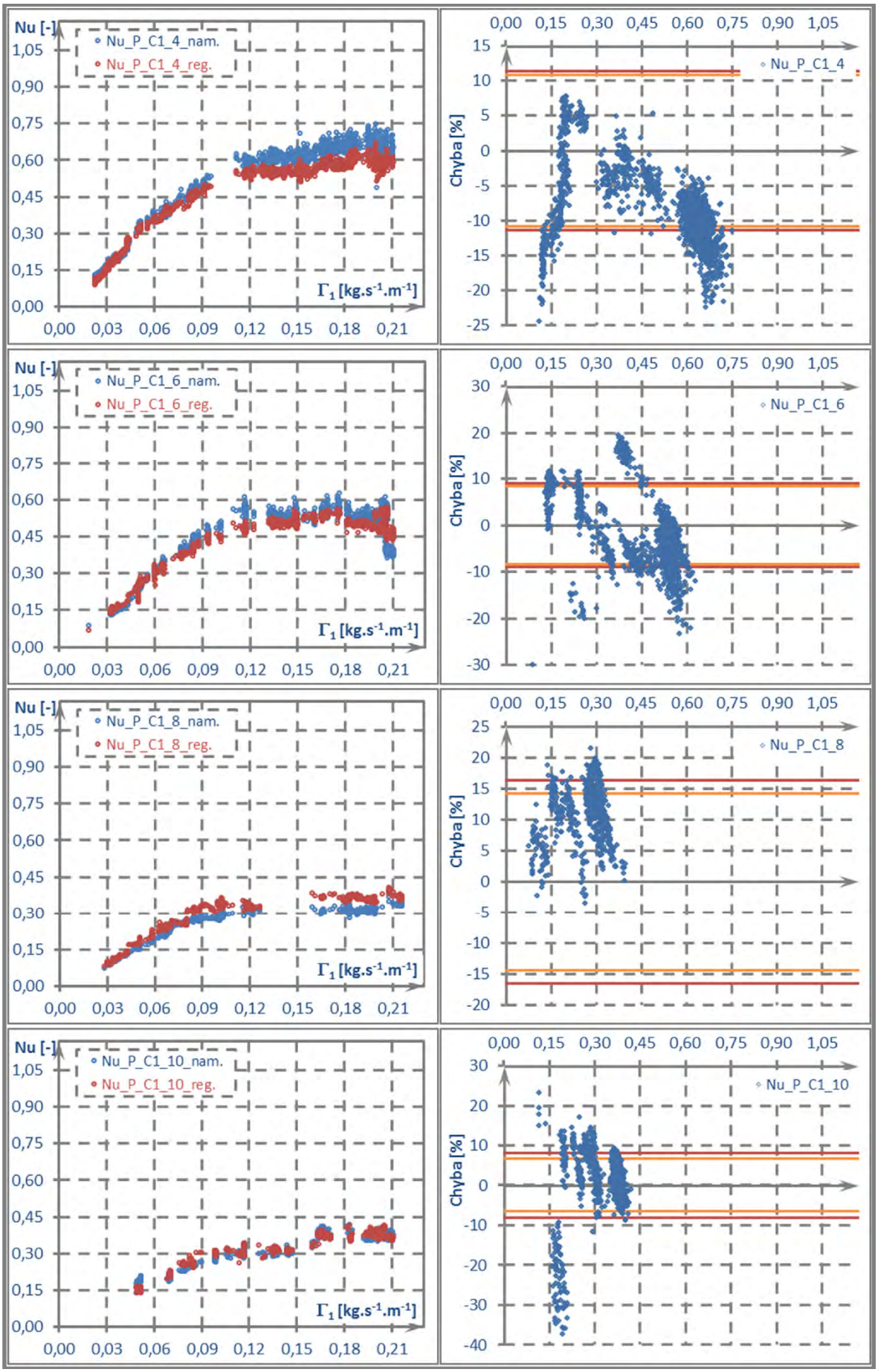
Obr. P. 16 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u hladkého svazku s roztečí trubek A2



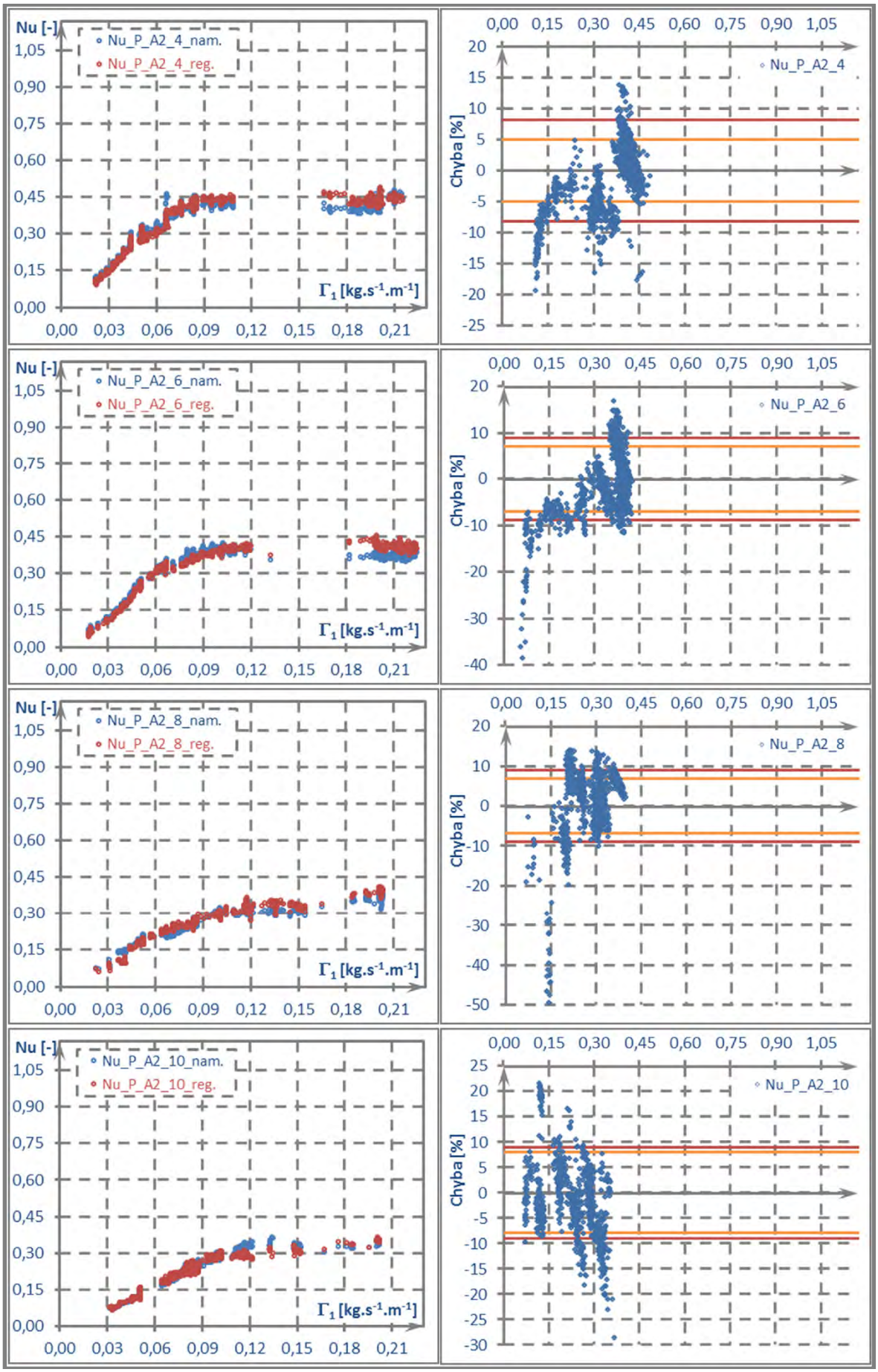
Obr. P. 17 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek A1



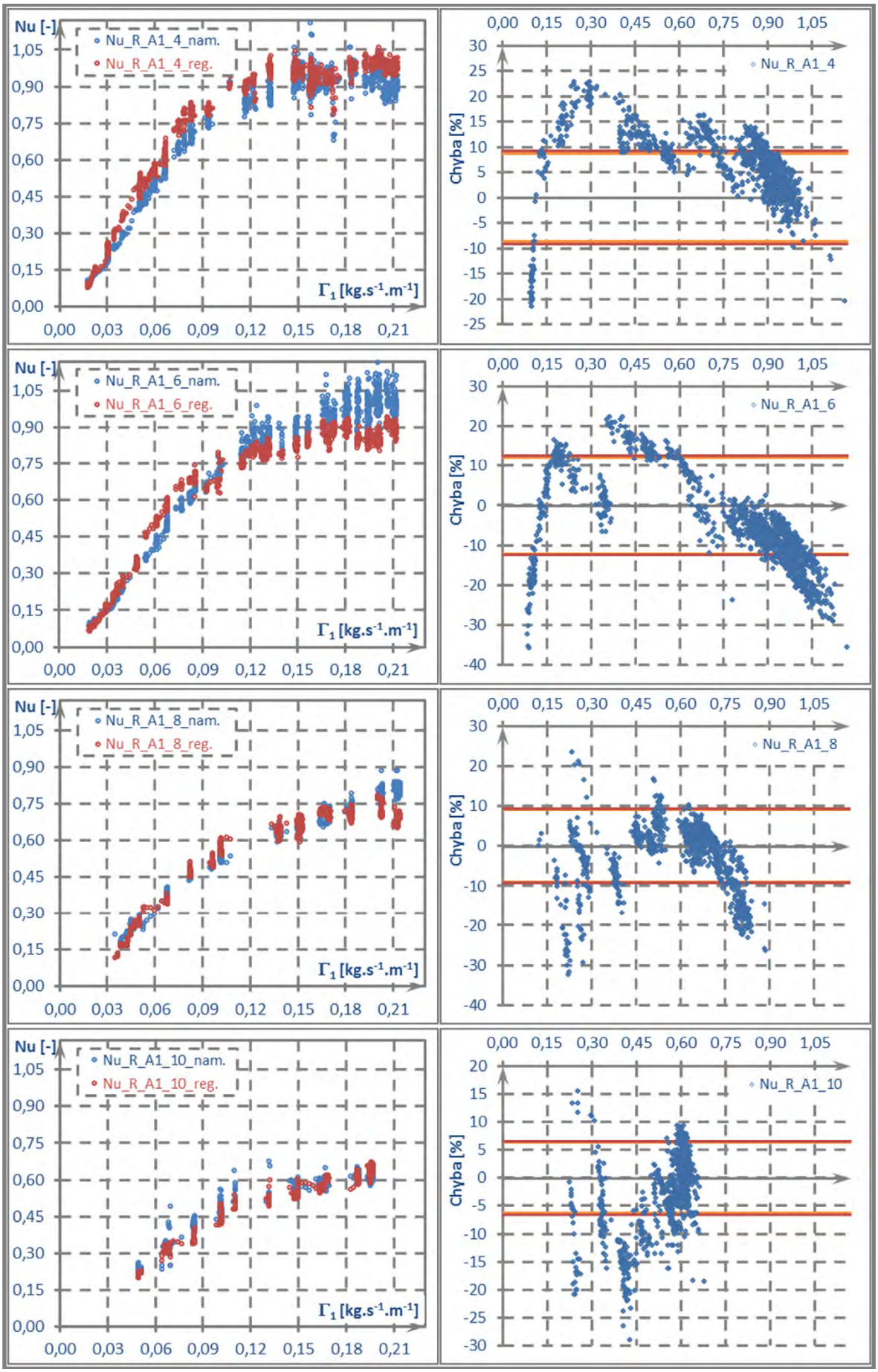
Obr. P. 18 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek B1



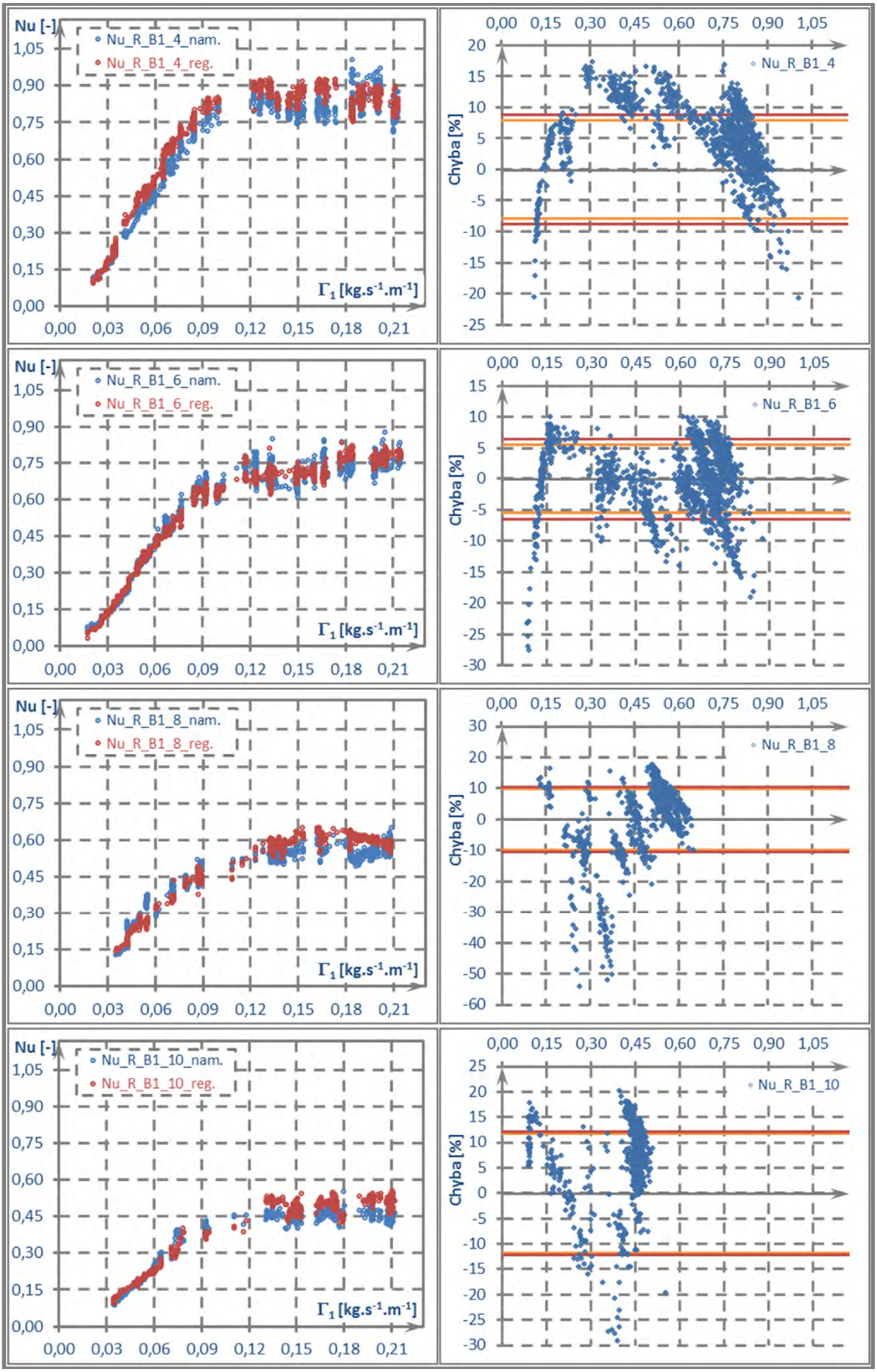
Obr. P. 19 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek C1



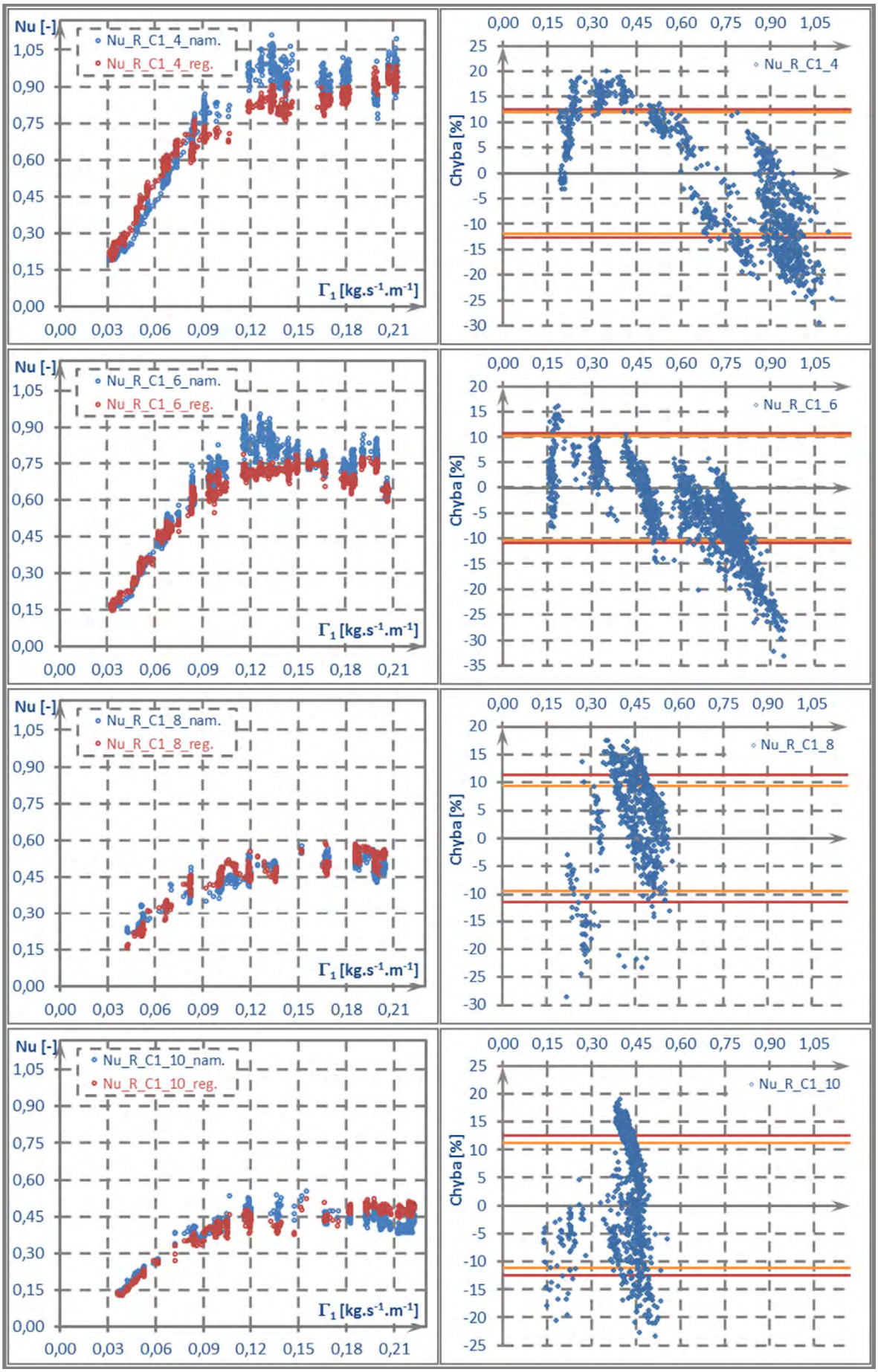
Obr. P. 20 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u pískovaného svazku s roztečí trubek A2



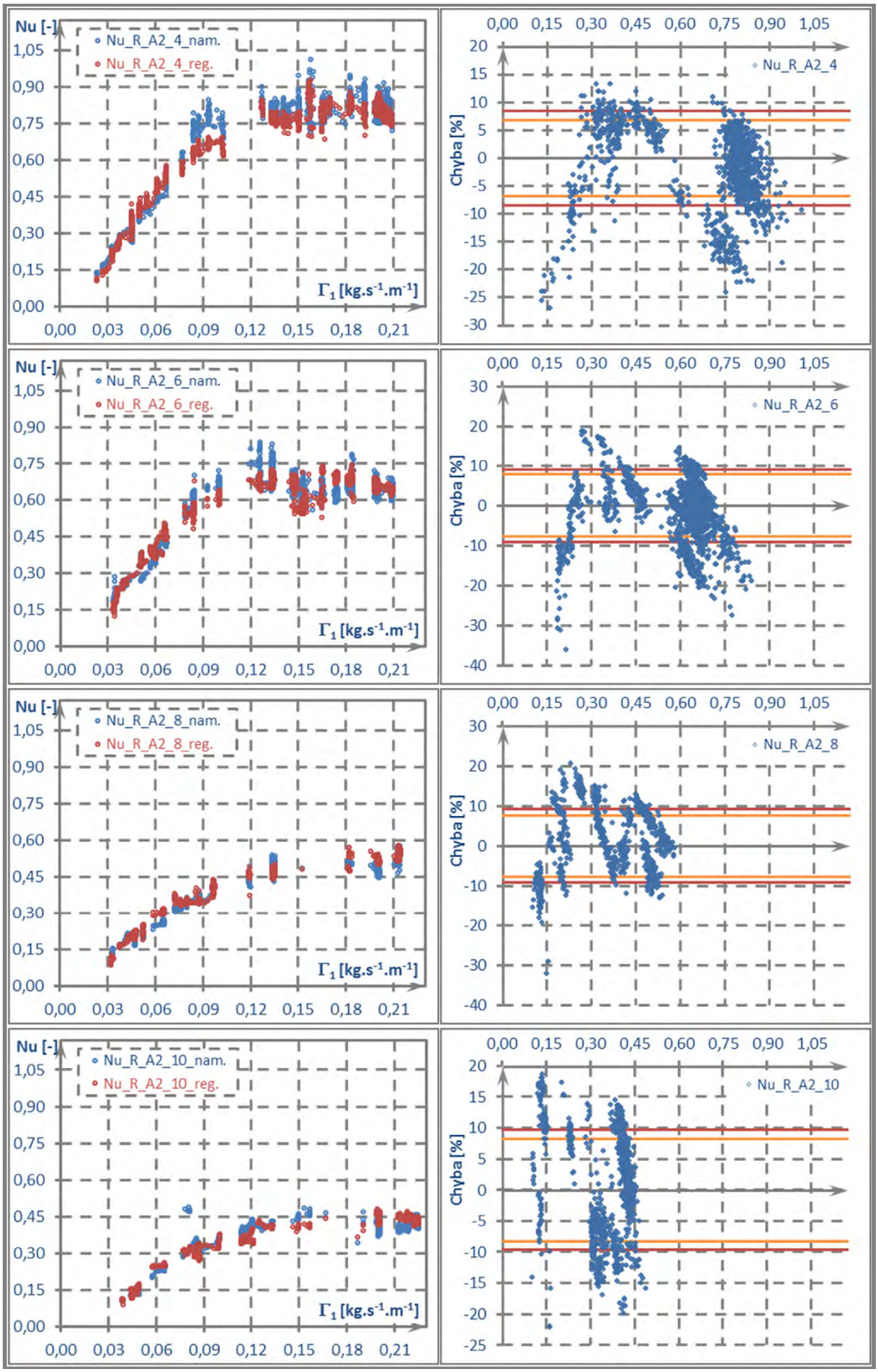
Obr. P. 21 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek A1



Obr. P. 22 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek B1



Obr. P. 23 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek C1



Obr. P. 24 Porovnání regresních modelů var. „A9“ u rádlovaného svazku s roztečí trubek A2

Příloha IV Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 15 a 20/40°C

Vysvětlivky: $\mathbf{t_3}$ [°C] je teplota topné kapaliny na vstupu do výměníku, $\dot{\mathbf{V}}_\mathbf{2}$ [$\mathbf{l \cdot min^{-1}}$] je objemový průtok topné kapaliny, $\dot{\mathbf{V}}_\mathbf{1}$ [$\mathbf{l \cdot min^{-1}}$] je objemový průtok skrápěcí kapaliny, $\boldsymbol{\Gamma}_\mathbf{1}$ [$\mathbf{kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}}$] je hmotnostní průtok skrápěcí kapaliny vztažený na délku skrápěné zóny, $\mathbf{Re_f}$ [−] je Reynoldsovo číslo kapalné fáze skrápěcí kapaliny, $\mathbf{Pr_f}$ [−] je Prandtlovo číslo kapalné fáze skrápěcí kapaliny, $\mathbf{p_v}$ [kPa(abs)] je tlak v komoře, $\mathbf{t_{IN}}$ [°C] teplota páry v komoře, $\mathbf{t_1 - t_{sat}}$ [°C] je rozsah teploty skrápěcí kapaliny na výtoku z distribuční trubky ponížená o teplotu saturace při aktuálním tlaku v komoře, $\dot{\mathbf{q}}''_{\mathbf{34}}$ [$\mathbf{kW \cdot m^{-2}}$] měrné teplo odebrané topné kapalině pro var skrápěcí kapaliny, $\dot{\mathbf{q}}_{\mathbf{34}}$ [$\mathbf{kW \cdot m^{-2}}$] celkové měrné teplo odebrané topné kapalině, $\mathbf{x}$ [%] je suchost páry, $\dot{\mathbf{M}}_\mathbf{g}$ [$\mathbf{g \cdot s^{-1}}$] je množství generované páry, $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{o,g}}$ [$\mathbf{kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$] součinitel přestupu tepla na povrchu trubkového svazku parní fáze, $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{o,t}}$ [$\mathbf{kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$] celkový součinitel přestupu tepla na povrchu skrápěného trubkového svazku

Tab. P. 12 Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 15 a 20/40°C

počet trubek	4				6		
počet bodů	195	477	411	313	399	372	824
počáteční spád [°C]	20/40	20/40	15/40	15/40	20/40	20/40	15/40
t_3 [°C]	40,4 ± 0,3	40,4 ± 0,3	40,3 ± 0,4	40,4 ± 0,2	40,6 ± 0,2	40,5 ± 0,2	40,3 ± 0,3
$\dot{V}_2$ [$l \cdot min^{-1}$]	7,2 ± 0,01	7,19 ± 0,01	7,21 ± 0,01	7,2 ± 0,01	7,25 ± 0,01	7,25 ± 0,01	7,16 ± 0,01
$\dot{V}_1$ [$l \cdot min^{-1}$]	4,04 ± 0,03	6,03 ± 0,01	4,03 ± 0,01	6,03 ± 0,01	4,03 ± 0,02	6,02 ± 0,02	4,06 ± 0,01
Γ_1 $\left[\frac{kg}{s \cdot m}\right]$	0,071 3 ± 0,000 5	0,106 3 ± 0,000 3	0,071 0 ± 0,000 1	0,106 3 ± 0,000 2	0,071 0 ± 0,000 3	0,106 2 ± 0,000 3	0,071 5 ± 0,000 1
Re_f [−]	361,8 ± 2,2	544,5 ± 1,4	369 ± 0,4	531 ± 0,9	367,3 ± 1,4	552,1 ± 1,7	374,4 ± 0,7
Pr_f [−]	5,33	5,28	5,19	5,43	5,21	5,19	5,15
p_v [kPa(abs)]	4,4 ± 0,1	4,5 ± 0,2	4,7 ± 0,3	4,2 ± 0,2	4,7 ± 0,1	4,7 ± 0,2	4,8 ± 0,2
t_{IN} [°C]	34,4 ± 0,9	34,4 ± 1,3	35,2 ± 1,0	33,5 ± 1,5	36,1 ± 0,6	35,2 ± 1,3	36 ± 1,0
$t_1 - t_{sat}$ [°C]	(-3,3) → (2)	(-2,8) → (3,2)	(-3,1) → (2,1)	(-3) → (3,5)	(-0,9) → (3,8)	(-3,3) → (3,1)	(-3,3) → (3,6)
$\dot{q}''_{34}$ [$kW \cdot m^{-2}$]	3,8 ± 0,9	3,4 ± 1,0	4,4 ± 0,9	4,8 ± 1,2	3,4 ± 0,6	3,5 ± 1,1	2,7 ± 0,5
$\dot{q}_{34}$ [$kW \cdot m^{-2}$]	12,1 ± 2,5	12,4 ± 3,5	10,4 ± 2,0	14,5 ± 3,8	7,6 ± 1,1	9,4 ± 2,7	6,8 ± 1,9
x [%]	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1
$\dot{M}_g$ [$g \cdot s^{-1}$]	0,22 ± 0,05	0,20 ± 0,06	0,25 ± 0,05	0,28 ± 0,07	0,30 ± 0,05	0,30 ± 0,09	0,23 ± 0,04
$\alpha_{o,g}$ $\left[\frac{kW}{m^2 \cdot K}\right]$	646,1 ± 103,2	646,0 ± 147,4	912 ± 186,3	795,5 ± 135,4	818,6 ± 110,5	787,8 ± 129,2	722,1 ± 213,1
$\alpha_{o,t}$ $\left[\frac{kW}{m^2 \cdot K}\right]$	4 274,4 ± 327,3	5 174,4 ± 620,1	4 816,9 ± 576,0	5 463,2 ± 515,7	3 900,2 ± 347,4	4 664,8 ± 434,1	3 574,6 ± 517,0

Tab. P. 12 Naměřené a odvozené hodnoty při varu u počátečního teplotního spádu 15 a 20/40°C **- pokračování**

počet trubek	6	8				
počet bodů	478	271	227	447	318	718
počáteční spád [°C]	15/40	20/40	15/40	15/40	15/40	15/40
t_3 [°C]	40,5 ± 0,3	40,5 ± 0,2	39,9 ± 0,7	40,2 ± 0,5	40,4 ± 0,2	40,4 ± 0,5
$\dot{V}_2$ [l · min^{-1}]	7,22 ± 0,02	7,24 ± 0,01	7,26 ± 0,01	7,19 ± 0,01	7,24 ± 0,01	7,23 ± 0,01
$\dot{V}_1$ [l · min^{-1}]	5,02 ± 0,01	4,02 ± 0,01	4,02 ± 0,04	5,04 ± 0,01	6,03 ± 0,02	8,08 ± 0,01
$\Gamma_1 \left[\frac{kg}{s \cdot m}\right]$	0,088 5 ± 0,000 3	0,070 8 ± 0,000 1	0,070 8 ± 0,000 7	0,088 7 ± 0,000 1	0,106 3 ± 0,000 3	0,142 3 ± 0,000 1
Re_f [−]	462,0 ± 1,3	370,2 ± 0,7	375,2 ± 3,6	473,8 ± 0,7	554,4 ± 1,7	776,5 ± 0,5
Pr_f [−]	5,17	5,15	5,08	5,04	5,18	4,93
p_v [kPa(abs)]	4,8 ± 0,2	4,8 ± 0,2	5,0 ± 0,2	5,1 ± 0,2	4,7 ± 0,2	5,4 ± 0,2
t_{IN} [°C]	35,6 ± 1,0	36,1 ± 0,7	36 ± 0,9	36,2 ± 1,1	35,6 ± 1,4	36,7 ± 0,8
$t_1 - t_{sat}$ [°C]	(-3,0) → (2,6)	(-3,2) → (2,7)	(-3,0) → (2,5)	(-3,3) → (3,0)	(-3,1) → (4,0)	(-1,6) → (2,9)
$\dot{q}''_{34}$ [kW · m^{-2}]	3,2 ± 0,8	2,5 ± 0,7	1,9 ± 1,0	1,8 ± 0,8	2,1 ± 0,8	1,4 ± 0,6
$\dot{q}_{34}$ [kW · m^{-2}]	8,3 ± 2,5	6,6 ± 1,7	5,5 ± 2,1	5,3 ± 1,9	6,8 ± 2,4	5,4 ± 1,8
x [%]	0,3 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,1 ± 0,1
$\dot{M}_g$ [g · s^{-1}]	0,28 ± 0,07	0,29 ± 0,08	0,22 ± 0,11	0,21 ± 0,10	0,25 ± 0,10	0,16 ± 0,07
$\alpha_{o,g} \left[\frac{kW}{m^2 \cdot K}\right]$	759,9 ± 138,8	618,3 ± 105,7	487,3 ± 163,4	531,2 ± 141,8	552,5 ± 109,8	498,3 ± 163,5
$\alpha_{o,t} \left[\frac{kW}{m^2 \cdot K}\right]$	3 952,5 ± 451,5	3 332,8 ± 303,0	2 751,1 ± 403,4	3 344,8 ± 392,0	3 791,8 ± 403,8	4 516,4 ± 586,2