

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

*Proudění v deskových otopných tělesech se zaměřením
na optimalizaci distančního kroužku*

Ing. Tomáš Legner

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Technika prostředí

Školitel: prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

září 2022

Název anglicky: Flow in panel radiators with a focus on the
optimization of the distance ring

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na
Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Tomáš Legner
Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, 160 00, Česká republika

Školitel: prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.
Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, 160 00, Česká republika

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. B1-819 Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Technika
prostředí.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.
předseda oborové rady oboru Technika prostředí
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1	Současný stav problematiky	1
2	Cíle disertační práce.....	3
3	Metody zpracování.....	4
3.1	Experiment	4
3.2	Matematická simulace.....	5
4	Výsledky.....	7
4.1	Validace výsledků matematické simulace.....	7
4.2	Popis teplotního a rychlostního pole	9
4.3	Natočení a změna geometrie distančního kroužku	11
5	Závěr	16
5.1	Přínos pro praxi	17
5.2	Teoretický přínos.....	17
	Vlastní publikační činnosti související s tématem disertace.....	18
	Seznam použité literatury	19
	Anotace	21
	Summary	22

1 Současný stav problematiky

Desková otopná tělesa patří v dnešní době k nejpoužívanějším otopným tělesům pro vytápění domácností a kanceláří. Je to dáno jejich kompaktními rozměry a velkou rozměrovou a výkonovou řadou k pokrytí tepelné ztráty. Mohou být opatřena různými barevnými nátěry, které nejsou tvořeny metalickými pigmenty, protože ty mohou snižovat tepelný výkon sdílený sáláním až o 10 % [1]. Oproti ostatním otopným tělesům mají nižší typy (10, 11 a 20) vysoký podíl sálavé složky tepelného výkonu [2]. Další jejich výhodou je malý vodní obsah, což umožňuje rychlou reakci na regulační zásah a rovněž mají i nižší hmotnost než např. tělesa článková. [3]

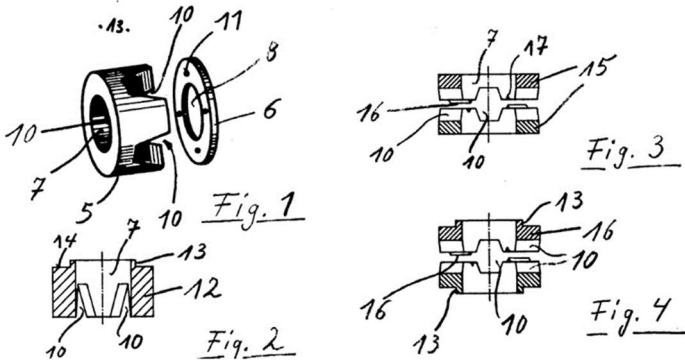
Desková otopná tělesa se nejčastěji umísťují pod ochlazované plochy (okna). Je tedy důležité, aby docházelo k rovnoměrnému vyrovnávání jak sálavého tepelného toku po délce otopného tělesa, tak i rovnoměrně vyrovnávat chladné padající konvektivní proudy od okna. Aby byla sálavá složka výkonu otopného tělesa primárně předávána přední deskou po celém povrchu co nejvíce rovnoměrná a zároveň se vyrovnaly vzhůru stoupající konvekční proudy, je nutné zrovnoměrnit teplotní pole podél tělesa. K tomu je potřeba z hlediska hydrauliky optimalizovat zatékání do jednotlivých kanálků tak, aby bylo otopné těleso po délce stejně prohřáté.

Přístup řešení zrovnoměření teploty je pomocí distančních kroužků, které jsou nedílnou součástí otopných těles.

Nejčastější tvar kanálků v deskovém otopném tělese je kosodélník, který je vytvořen z prolisů dvou ocelových plechů. Tyto plechy jsou k sobě po obvodu a mezi kanálky odporově svařeny. V místě odporového tlakového přivaření přípojovací garnitury (kolínka, T-kusu) je mezi plechy vložen distanční kroužek, aby udržoval vzdálenost (distanci) mezi deskami. Tento distanční kroužek je nedílnou součástí deskových otopných těles z důvodu konstrukčního a technologického, který rozhodujícím způsobem ovlivňuje

proudění vody po celé délce otopného tělesa. Je tedy vhodné využít tento prvek v otopném tělese pro optimalizaci proudění a následně teplotního pole.

Problematikou distančních kroužků se podrobně v rámci výzkumu nikdo nezabýval. Firmy vyrábějící desková otopná tělesa k problematice přistupují spíše intuitivně a pouze technologicky a z hlediska proudění jí nevěnují pozornost. V rámci rozsáhlé kritické literární rešerše byly zmapovány některé patenty distančních kroužků ([4], [5], [6] a [7]). Ty jsou pojaty však pouze s ohledem na zjednodušení technologie výroby, nikoli s ohledem na výše uvedené kritérium.



Obr. 1-1 Návrh sestavení distančního kroužku z roku 1975 [4]

Publikované články ([8], [9], [10]), které jsou detailněji popsány v rešerši disertační práce, se věnují obecně problematice otopných těles, a především pak vytvoření jejich 3D modelu, ale v žádném není uvažován reálný distanční kroužek. Je vždy buď výrazně zjednodušen, nebo úplně zanedbán a proudění v otopném tělese neodpovídá reálnému proudovému poli. Proto je tento výzkum, kde je distanční kroužek v deskovém otopném tělese řešen detailně, jedinečný a přináší nové poznatky o proudění uvnitř otopného tělesa a doporučení stran, tvaru a natočení distančních kroužků.

2 Cíle disertační práce

Tato práce se zabývá zrovnoměněním teplotního pole především po délce deskového otopného tělesa pomocí změny geometrie vstupního distančního kroužku. Tím budou rovnoměrně rozloženy povrchové teploty a bude i rovnoměrně rozložený sálavý tok tepla působící na člověka. Řešení vlivu různých geometrií distančního kroužku je velice obtížné zvládnout experimentálně, proto je problematika řešena rovněž pomocí matematické simulace. Z rešerše vyplynulo, že se problematikou distančních kroužků s ohledem na jejich vliv na zatékání a následné proudění vody v otopném tělese nikdo nezabýval. Ani se nikdo uspokojivě nezabýval detailním popisem vytvoření matematické simulace a nastavení parametrů simulace pro simulování modelů otopných těles na straně vody. Jinými slovy, doposud publikované modely matematické simulace neposkytovaly požadovanou přesnost a nesplňovaly ani experimentálně ověřené předpoklady o podmínkách proudění. V tomto směru bylo tedy třeba prozkoumat a následně ukázat cestu, jak modelovat proudění v otopných tělesech.

Jednotlivé cíle jsou stanoveny následovně:

1. definovat metodu matematického modelování pro komplikovanou geometrii a malé rychlosti proudění v otopném tělese,
2. stanovit trendy proudění v horní rozvodné komoře otopného tělesa se změnou geometrie distančního kroužku,
3. navrhnout optimální tvar distančního kroužku, aby bylo dosaženo maximálně rovnoměrného teplotního pole po délce otopného tělesa.

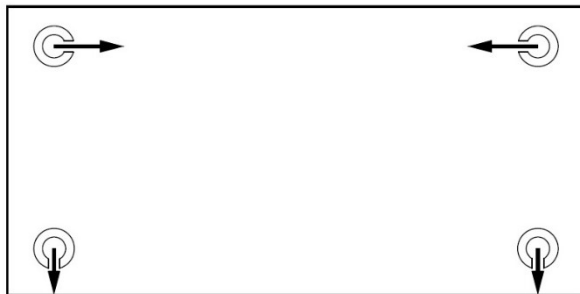
3 Metody zpracování

Matematické simulace se hojně využívají pro modelování různých případů proudění. A vždy je výhodné, když se výsledky z této simulace mohou ověřit na skutečném reálném experimentu. Proto byla nejprve vytvořena experimentální trať s deskovým otopným tělesem.

3.1 Experiment

Experiment je zaměřený na určení stacionárních jevů (např. výkon tělesa) i nestacionárních jevů (přechodových charakteristik) deskového otopného těla typu 10 o rozměrech 1000 x 500 mm pro teplotní spád 75/65 °C jednostranně připojeného shora-dolů. Toto připojení je nejvíce používáno a je normalizováno pro měření jmenovitých parametrů ve zkušebních komorách. Celá práce je zaměřena na jednostranné napojení shora dolů a není cílem mapovat ostatní způsoby napojení. Tím by byla oblast výzkumu neúčelně velice široká. Byl využit mobilní zdroj tepla (vyvinutý na Ústavu techniky prostředí) pro udržení konstantní vstupní teploty do otopného tělesa.

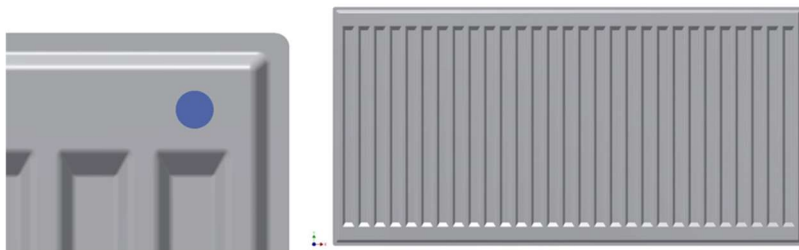
Po nahrání akumulací nádoby na teplotu blížíící se 75 °C se zapne snímání teplotního pole termovizní kamerou FLIR T 460. Během snímání byl kontrolován hmotnostní průtok a případně doregulován na požadovanou hodnotu pro jmenovitý výkon [11]. Po dosažení výstupní teploty z otopného tělesa na hodnotě 65 °C bylo snímání zastaveno. V pěti opakováních v průběhu měření byly odečteny hodnoty teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, vstupní a výstupní teploty z otopného tělesa pro přepočítání skutečného výkonu otopného tělesa a výsledné teploty pro určení střední radiační teploty. Bylo naměřeno teplotní pole otopného tělesa s distančním kroužkem s jedním otvorem nasměřovaným do osy horní rozvodné komory. Nákres nasměrování distančních kroužků je uveden na obr. 3-1.



Obr. 3-1 Natočení distančních kroužků [12]

3.2 Matematická simulace

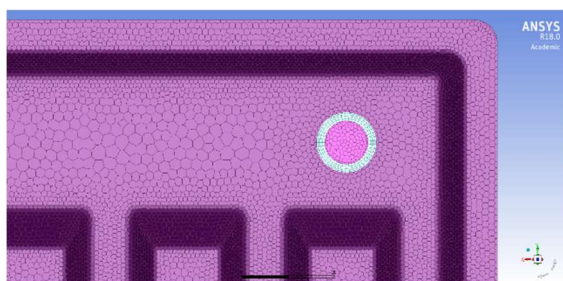
Geometrický model otopného tělesa je vytvořený dle reálných rozměrů deskového otopného tělesa velikosti 1000x500 mm typu 10 a napojení je jednostranné shora dolů.



Obr. 3-2 Detail zaoblení prolisovaných ocelových plechů a pohled na celý model otopného tělesa [12]

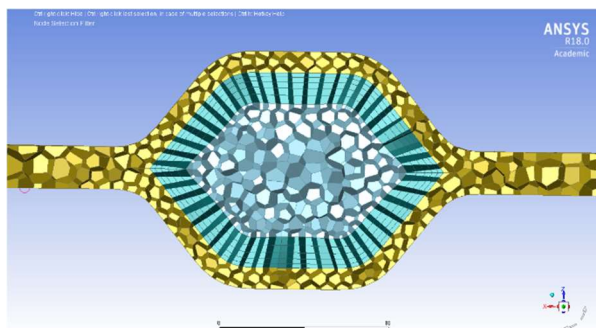
Model otopného tělesa je sestavený z jednotlivých dílů velice přesně. Při samotném procesu importování se nastavují základní parametry velikostí buněk a zasíťování zakřivení pro prvotní vytvoření povrchové sítě. Proces zasíťování ve Fluent Meshing umožňuje nejdříve vytvořit kvalitní povrchovou síť, kterou je možné přes různé funkce optimalizovat a následně je z této povrchové sítě vytvořena objemová síť [13]. Je to odlišný proces od ostatních prostředí pro tvorbu sítě.

Pro vygenerování objemové sítě je nutné nastavit, z jakých typů buněk má být objemová síť vytvořena. V posledních verzích výpočetního programu je možnost vygenerování polyedrických buněk. Tento tvar buňky je pro výpočet výhodný tím, že nevytváří hrany s ostrým úhlem. Další výhodou oproti tetraedrickým buňkám je, že ve stejném objemu při stejné velikosti hrany je těchto buněk méně. Tedy celkový model má menší počet buněk, a tím je snížen nárok na výpočetní výkon.



Obr. 3-3 Pohled na polyedrickou síť v oblasti vstupního distančního kroužku [14]

Dále byl kladen velký důraz modelování oblasti proudění u stěny, tedy modelování mezní vrstvy. K dispozici je funkce, která umožní vytvoření daného počtu vrstev prismatických buněk u stěny. Velikost první buňky musí splňovat maximální velikost dle parametru y^+ dle použité metody výpočtu proudění u stěny [15].



Obr. 3-4 Řez kolmo na osu kanálku s viditelným modelováním u stěny [14]

Takto vytvořená síť obsahuje téměř 9160000 buněk. Byla posouzena i nezávislost řešení, kde byly simulace provedeny pro jemnější zasetíování, tedy větší počty buněk a výsledky rychlostních a teplotních polí byly shodné. Byly nastaveny parametry jednotlivých materiálů v modelu vč. polynomických závislostí hustoty vody na termodynamické teplotě a dynamické viskozity na termodynamické teplotě. Okrajové podmínky byly převzaty z naměřených hodnot z experimentální části. Model turbulence byl zvolen dle nejlepší konvergence úlohy jako dvourovnicový model turbulence Realizable $k-\varepsilon$.

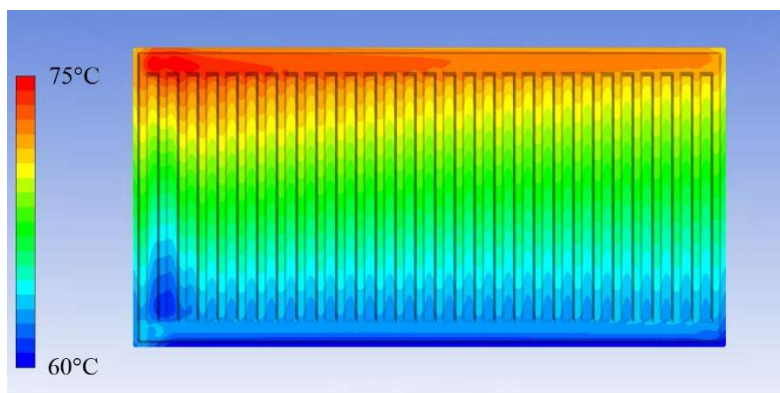
4 Výsledky

Pro využití modelu otopného tělesa v dalších simulacích pro výzkum geometrie distančního kroužku je nejprve nutné porovnat výsledky teplotního pole nasnímaného v experimentální části s výsledky matematické simulace.

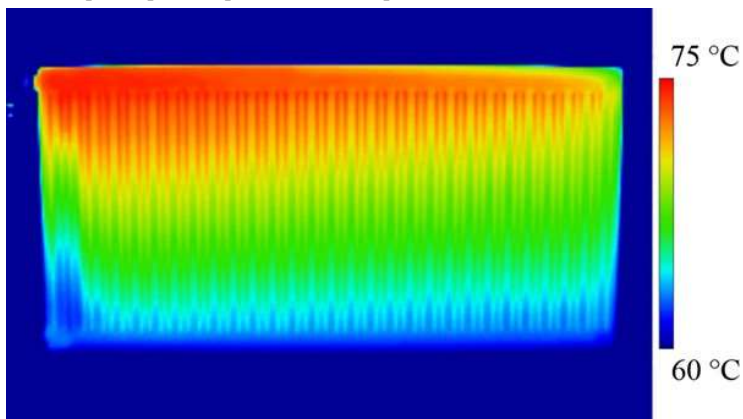
4.1 Validace výsledků matematické simulace

Na obr. 4-1 je zobrazeno teplotní pole na povrchu modelu otopného tělesa z matematické simulace pro výše uvedené parametry. Barevná paleta je volena tak, aby byla dobře viditelná nerovnoměrnost teplotního pole. Pro porovnání je rovněž uvedeno teplotní pole získané z experimentu na obr. 4-2, kde byla paleta barev sjednocena s výsledkem matematické simulace. Na první pohled je zde dobře viditelný snížený průtok druhým kanálkem, což je dáno tím, že na vstupu do druhého kanálku je proudění, které je stočeno směrem k výstupnímu otvoru z distančnímu kroužku, jak je vidět na obr. 4-3. Dále je shodný tvar izoterm v horní části desky po délce tělesa. Je vidět chladnutí přívodní otopné vody po délce tělesa. Celkově se teplotní pole jeví velice shodně. Dá se tedy říci, že teplotní pole modelu odpovídá svým tvarem termogramu naměřeného v experimentu. Porovnání experimentu a matematické simulace lze pouze na základě teplotního pole, protože nejsme schopni v měřeném tělese naměřit například průtoky jednotlivými kanálky nebo rychlosti, protože by došlo

k ovlivnění proudění. Díky velice detailnímu modelu, který odpovídal reálnému tělesu a tím, že jde pouze o simulaci protékaného objemu, který umí dnešní software velice přesně počítat s výpočetním výkonem pro malou velikost buněk, tak lze takový model, nastavení síťování a nastavení matematické simulace, vypočítat celkem přesně. To, že je model takto detailní, je výhodné pro další část výzkumu a jeho využití pro další výpočty s úpravou vstupního distančního kroužku.



Obr. 4-1 Teplotní pole na přední desce otopného tělesa z matematické simulace [14]

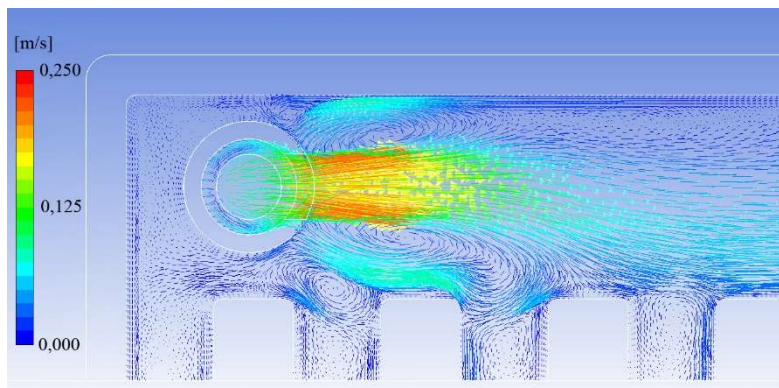


Obr. 4-2 Naměřené teplotní pole z experimentu

4.2 Popis teplotního a rychlostního pole

Výsledky matematické simulace, kterou lze uvažovat z porovnání teplotních polí za validní, umožňují zobrazit teplotní a rychlostní pole v celém otopném tělese. Z pohledu teplotního pole bylo již uvedeno, že dochází k menšímu prohřátí spodní části druhého kanálku z důvodu rychlostního pole na jeho počátku. Dále je viditelné nerovnoměrné prohřátí horní části přední desky. Lze se oprávněně domnívat, že primární proud postupně ztrácí svou kinetickou energii tím, jak zatéká do jednotlivých kanálků. Rovněž dochází k chladnutí přívodní otopné vody. Na obr. 4-7 jsou zobrazeny poměrné průtoky jednotlivými kanálky, které ukázala matematická simulace, v porovnání s hodnotou (čarou) průměrného průtoku v jedné třicetině celkového průtoku (počet kanálků je 30). Je zde patrný nadprůtok prvním kanálkem, který může negativně ovlivňovat teplotu zpátečky a výrazný propad absolutní hodnoty průtoku v oblasti druhého kanálku. Bylo usuzováno, že může v druhé polovině docházet ke ztrátě kinetické energie hlavního proudu horní rozvodnou komorou, proto je viditelné snížení povrchové teploty po délce tělesa. Na základě výsledků v grafu, je naopak v druhé polovině tělesa vyšší průtok jednotlivými kanálky. Takže lze konstatovat, že dochází především ke snižování teploty přívodní otopné vody na základě postupného přestupu tepla.

Při popisu rychlostního pole byla nejdříve sledována oblast vstupního distančního kroužku. Na obr. 4-3 je zobrazeno vektorové rychlostní pole, kde velikost vektorů respektuje rychlost proudění. Zobrazení je voleno tak, aby bylo více zřejmé, jaké jsou rozdíly v rychlosti proudění v určitých částech tělesa. Pokud mají vektory v celém rozsahu stejnou velikost a liší se pouze zabarvením, mohlo by se jevit, že v některých částech, například uprostřed kanálků, dochází k mohutnějšímu proudění. Je třeba si však uvědomit prostorovost proudění a úhel, pod kterým je vektor rychlosti sledován.



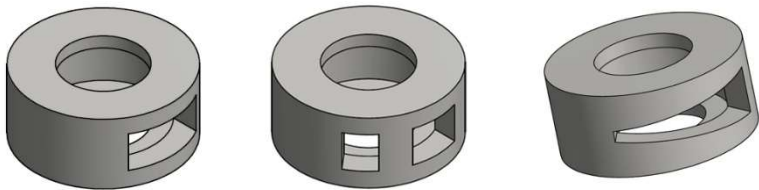
Obr. 4-3 Rychlostní pole u vstupního distančního kroužku s jedním obdélníkovým otvorem natočeným do osy horní rozvodné komory [14]

Na výstupu z distančního kroužku jsou největší vektory rychlostí a dle stupnice zde dochází k proudění s nejvyšší rychlostí. Z otvoru distančního kroužku vychází masivní proud, kde nelze hovořit o stísněném zatopeném proudu a jeho rychlost rychle klesá. V oblasti čtvrtého kanálku je tento proud zatočen směrem k dolní hraně rozvodné komory. Je to nejspíš dáno již ustáleným zatékáním směrem do jednotlivých kanálků. Mimo tento proud jsou viditelné dva sekundární víry, které indukují proud primární. Spodní sekundární vír negativně ovlivňuje proudění ve druhém a třetím kanálku, protože nedovoluje proudění z primárního proudu, a proto dochází ke sníženému průtoku v těchto kanálcích.

Výsledky matematické simulace ukázaly, jaké tvary má rychlostní pole v jednotlivých uvedených částech otopného tělesa a jak rychlostní pole ovlivňuje pole teplotní, které by bylo možné pouhým natočením distančního kroužku měnit. Proto bylo nutné se dále zaměřit na změnu pozice a geometrie vstupního distančního kroužku.

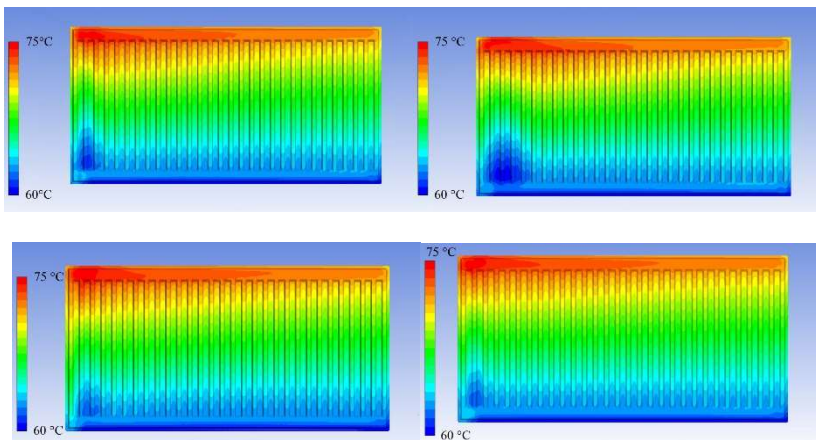
4.3 Natočení a změna geometrie distančního kroužku

Aby bylo možné výsledky porovnávat na základě výsledných numerických hodnot, a nikoliv pouze dle vizuálního tvaru teplotního pole, jak je uvedeno na obr. 4-5, jsou všechny výsledky teplotních polí na přední desce otopného tělesa porovnány na základě průměrné teploty v jednotlivých částech přední desky. Tato plocha je rozdělena na 10 sekcí po délce tělesa po 100 mm, kde do každé sekce připadají tři kanálky, a vždy je vypočítána střední povrchová teplota této sekce z výsledků matematické simulace. To umožní porovnat změnu teploty v jednotlivých úsecích, protože změnou proudění ovlivňujeme teplotu po celé výšce i délce tělesa.



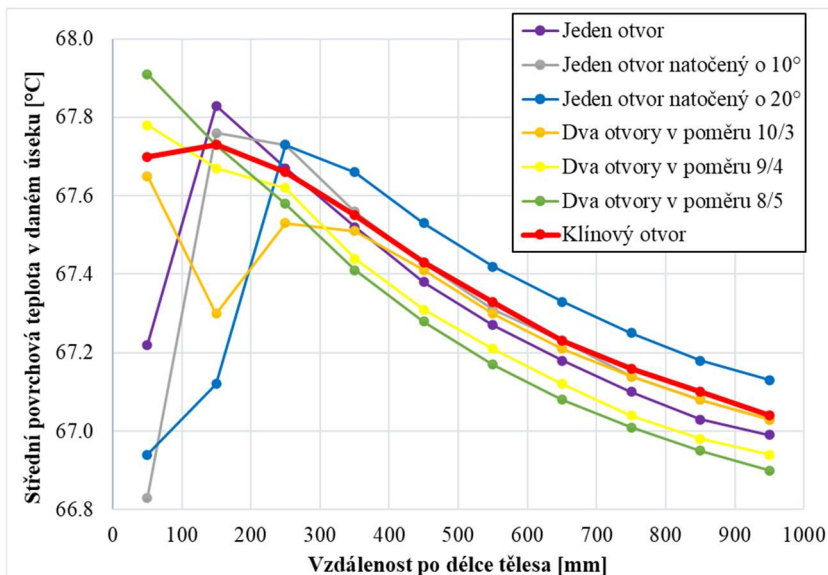
Obr. 4-4 Zleva – distanční kroužek s jedním otvorem, se dvěma otvory v poměru 10/3 a s klínovým otvorem [16]

Na obr. 4-6 je celkové porovnání středních teplot části přední desky pro všechny varianty výše komentované. V ideálním případě se hledá těleso s distančním kroužkem, ve kterém jsou střední povrchové teploty v těchto úsecích po délce tělesa stejné, aby těleso umístěné pod ochlazovanými plochami rovnoměrně eliminovalo vliv studených konvektivních proudů. Samotný standardní distanční kroužek s jedním otvorem vykazuje střední povrchové teploty v prvním a druhém úseku hodně rozdílné, dokonce ve druhém úseku teplotu nejvyšší. Je to dáno přimknutím hlavního proudu ke spodní hraně rozvodné komory ve vzdálenosti od čtvrtého kanálku, a tím zvýšení průtoku v tomto kanálku. V pravé části grafu patří výsledné teploty k těm nižším.



Obr. 4-5 Teplotní pole: horní řada zleva – s distančním kroužkem beze změny a s natočeným distančním kroužkem o 20°, dolní řada zleva – se dvěma otvory v poměru 8/5 a s otvorem ve tvaru klínu [17]

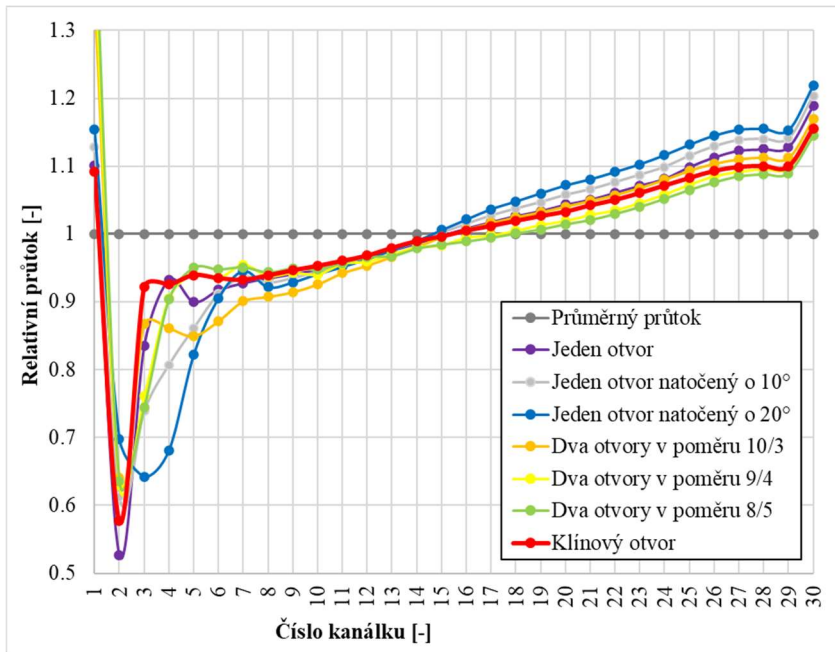
Natáčením distančního kroužku došlo ke snížení povrchových teplot v prvních dvou úsecích oproti standartní variantě natočení distančního kroužku. Je zajímavé, že nejnižší teplota je pro případ s natočením 10° a nikoliv pro natočení 20°, ale je to dáno tím, že se jedná o střední teplotu v šířce tří kanálků, kde natočení ovlivňuje zatékání do každého kanálku jinak. Toto je pozorovatelné na souhrnném grafu průtoků na obr. 4-7. V oblasti od třetího úseku jsou již střední povrchové teploty vyšší. Pro případ natočení o 20° jsou nejvyšší ze všech variant. Tím, že je distanční kroužek natočen celým jedním otvorem o 20° k horní hraně rozvodné komory, je větší dosah tohoto proudění do pravé části tělesa a nedochází k takovému úbytku objemového průtoku do jednotlivých kanálků v levé části tělesa. V souhrnném grafu průtoků je tento jev dobře viditelný. V pravé části tělesa dosahuje případ s natočeným distančním kroužkem o 20° nejvyšších průtoků. Je tedy názorně zobrazeno propojení navýšování, nebo snižování průtoku kanálky se změnou střední povrchové teploty. Pouhým natáčením tedy nelze více zrovnoměnit střední povrchové teploty, než byly ve variantě bez natočení.



Obr. 4-6 Porovnání středních povrchových teplot pro jednotlivé úseky po délce tělesa pro různé typy distančních kroužků [18]

Ke zrovnomnění středních povrchových teplot měly vést další varianty distančních kroužků se dvěma otvory. Předpokladem bylo navýšit proudění v prvních kanálcích menším otvorem naměřeným mezi druhý a třetí kanálek oproti variantě s pouhým natočením jednoho otvoru. A dále částečně zachovat vyšší proudění pravou polovinou otopného tělesa natočením většího otvoru k horní hraně rozvodné komory. První varianta se dvěma otvory v poměru 10/3 přinesla zvýšení průtoku prvním až třetím kanálkem oproti variantě s jedním otvorem, a to se projevilo zvýšením střední povrchové teploty v první sekci. V dalších dvou sekcích došlo naopak k výraznému snížení teploty, protože dle výsledků průtoků jednotlivými kanálky je ve čtvrtém až dvanáctém kanálku průtok menší. Ve druhé polovině tělesa jsou teploty o trochu vyšší než v případě jednoho otvoru. Druhá varianta se dvěma otvory v poměru 9/4 měla zlepšit prohrátí prvních sekcí tím, že byl menší otvor zvětšen. K tomu skutečně

došlo a v prvních třech sekcích se střední povrchová teplota celkem vyrovnala oproti všem předchozím variantám. V dalších sekcích je však tato teplota nižší.



Obr. 4-7 Souhrnný graf průtoků jednotlivými kanálky pro všechny typy distančních kroužků [18]

Ve třetí variantě distančního kroužku se dvěma otvory v poměru 8/5 se předpokládalo ještě lepší zrovnomnění střední povrchové teploty v prvních sekcích. Výsledky průtoků jednotlivými kanálky jsou nepatrně nižší téměř po celé délce tělesa a velice podobné variantě s poměrem 9/4, přesto v první sekci došlo k nárůstu této teploty na nejvyšší hodnotu ze všech variant. Od čtvrté sekce k poslední jsou teploty nejnižší. Celkově je výsledek středních povrchových teplot nejvíce nerovnoměrný. Je tedy potřeba nalézt kombinaci distančního kroužku se dvěma otvory v poměru 9/4, kde je rovnoměrnější teplota v předních sekcích, s distančním kroužkem s jedním otvorem

natočeným k horní hraně rozvodné komory, kde naopak byly vyšší hodnoty středních povrchových teplot v pravé části tělesa.

Na základě těchto zkušeností z vlivu jednotlivých variant distančních kroužků na proudění v otopném tělese byl vytvořen finální tvar distančního kroužku s jedním otvorem ve tvaru klínu. V prvních třech sekcích vykazuje nejvyrovnanější střední povrchové teploty. Je to dáno tím, že v prvním kanálku je nejnižší průtok ze všech variant. To je také výhodné, protože nedochází ke zkratu velkého průtoku přívodní otopné vody rovnou do zpátečky. V pravé části tělesa jsou teploty druhé nejvyšší ze všech variant. Celkově je tedy teplotní pole nejrovnoměrnější a tento tvar distančního kroužku maximálně využívá všech poznatků ze simulací předchozích variant distančních kroužků a splňuje uvedené předpoklady.

5 Závěr

Bylo jednoznačně prokázáno, že změna natočení, nebo geometrie distančního kroužku má výrazný vliv na proudění celým deskovým otopným tělesem, což se projevovalo i změnou povrchové teploty po celé délce tělesa. Pomocí detailního a validovaného simulačního modelu deskového otopného tělesa s různě řešeným rozhodujícím vstupním distančním kroužkem bylo popsáno teplotní pole na povrchu přední desky. Dále bylo popsáno rychlostní pole uvnitř otopného tělesa, kde byly zjištěny nové poznatky ohledně zatékání do jednotlivých kanálků, které bylo ovlivněno nasměrováním a velikostí proudění do horní rozvodné komory z přírodního otvoru distančního kroužku. Pokud byl celý průtok z jednoho otvoru distančního kroužku směřován k horní hraně rozvodné komory, tak měl větší dosah do pravé části tělesa. Tím docházelo ke snižování průtoků kanálky v levé polovině a snižovala se střední povrchová teplota v této části. To mělo negativní vliv na zvyšování nerovnoměrnosti prohřátí celého otopného tělesa.

Vytvořením distančního kroužku se dvěma otvory bylo už možné pozitivně ovlivňovat proudění v obou částech tělesa. Menším otvorem byla směřována část proudění do prvních kanálků a tím zmenšena chladná spodní část druhého a třetího kanálku a větším otvorem byla zbylá část proudění vedena k horní hraně rozvodné komory do druhé poloviny otopného tělesa. Tímto stanovením trendů proudění a změn teplotního pole se změnou geometrie distančního kroužku byl cíl splněn.

Bylo využito poznatků o natačení otvoru distančního kroužku se zachováním větší části proudění k horní hraně rozvodné komory a poznatků ze simulací distančního kroužků se dvěma otvory, kde menším otvorem mířeným mezi druhý a třetí kanálek lze zrovnoměrnit střední povrchovou teplotu v levé části přední desky. Poznatky trendů proudění a teplotních polí u jednotlivých variant distančního kroužku vedly k návrhu distančního kroužku s otvorem ve tvaru

klínu. Tento tvar výtokového otvoru podléhá patentové ochraně v ČR pod číslem patentu 309019 [19].

5.1 Přínos pro praxi

Jednoznačným přínosem je detailní popis rychlostního pole uvnitř otopného tělesa. Doposud nebylo nikde publikováno, k jakým projevům proudění dochází v jednotlivých částech tělesa a také s jakými rychlostmi proudění můžeme uvažovat. Zde se jedná o přínos pro praxi a rovněž o teoretický přínos.

Hlavním přínosem pro praxi je návrh optimálního tvaru distančního kroužku s ohledem na maximální zrovnoměrnění teplotního pole na přední desce otopného tělesa. Jelikož je distanční kroužek nedílnou součástí deskového otopného tělesa z technologického hlediska, tak je výhodné pomocí jeho optimalizace tohoto dosáhnout bez zásahu do tvaru a konstrukce především horní rozvodné komory deskového otopného tělesa. A v tomto výzkumu je uvedeno maximální dosažení zrovnoměrnění teplotního pole pomocí optimalizace vstupního distančního kroužku. Pro větší zrovnoměrnění teplotního pole, než je v tomto výzkumu uvedeno, je nutné zasáhnout do konstrukce otopného tělesa.

5.2 Teoretický přínos

Teoretickým přínosem je na základě tohoto výzkumu jedinečný detailní popis neboli technický manuál, jak úspěšně připravit zasíťování modelu deskového otopného tělesa a jaké použít nastavení jednotlivých okrajových podmínek, parametrů a modelu turbulence pro validované výsledky matematické simulace otopného tělesa. Tento přínos se vskutku vymyká, neboť k matematické simulaci proudění v otopném tělese nelze přistupovat jako k proudění v běžné potrubní síti. Lze rovněž konstatovat, že přístup uvedený jinými autory komentovaný v řešeršní části přes kritické Reynoldsovo číslo, je nepoužitelný spolu s běžným turbulentním a laminárním modelem.

Vlastní publikační činnosti související s tématem disertace

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Proudění na straně vody u deskových otopných těles. In: *Simulace budov a techniky prostředí 2016 - sborník 9. konference IBPSA-CZ*. Brno: IBPSA-CZ, 2016, s. 51-56. ISBN 978-80-270-0772-1.

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Vliv natočení distančních kroužků v deskových otopných tělesech. In: *Konference vytápění Třeboň 2017*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2017, s. 76-88. ISBN 978-80-02-02712-6.

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Vliv natočení a změny geometrie distančního kroužku u deskových otopných těles. In: *Simulace budov a techniky prostředí 2018*. Praha: IBPSA-CZ, 2018, s. 23-28. ISBN 978-80-907423-0-7.

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Influence of rotation and geometry change of distance rings in panel radiators. In: *Konference studentské tvůrčí činnosti*. 2018. ČVUT v Praze, fakulta strojní, 2018. ISBN 978-80-01-06421-4.

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Geometrie distančního kroužku a teplotní pole otopného tělesa. In: *Konference Vytápění Třeboň 2019*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2019, s. 59-63. ISBN 978-80-02-02847-5.

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Optimization of Distance Rings in Panel Radiators. In: *Central Europe towards Sustainable Buildings (CESB19)*. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series. ISSN 1755-1307.

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Importance of Distance Ring in Panel Radiators. *Vytápění, větrání, instalace*. 2019, (286, 320-322. ISSN 1210-1389.

Patentový spis

LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. *Distanční kroužek, zejména do přírodního rohu deskových otopných těles*. Česká republika. Patent CZ 309019. Uděleno 13.10.2021.

Podáno k publikaci

LEGNER, Tomáš, BOHÁČ Jindřich a Jiří BAŠTA. Uniform Temperature Field in Panel Radiators Using Modified Spacer Rings. *Energy & Buildings* 2022

Seznam použité literatury

- [1] PEACH, S. Radiators and other convectors. *J. Inst. Heating Ventil. Eng.* 1972, (392), 239-253.
- [2] BECK, S.M.B, S.C GRINSTED, S.G BLAKEY a K WORDEN. A novel design for panel radiators. *Applied Thermal Engineering*. 2004, **24**(8), 1291-1300. ISSN 1359-4311. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.11.026](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.11.026)
- [3] BAŠTA, Jiří. *Otopné plochy - otopná tělesa*. 2. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05943-2.
- [4] BERG KG. *Abstuetzring, insbesondere fuer flachheizkoerper*. 1975. Německo. DE 2506778 A1. Zapsáno 18.2.1975.
- [5] BERG HANS GMBH & CO KG. *Stuetzring fuer einen flachheizkoerper und verfahren zum herstellen eines stuetzrings*. 1988. Německo. DE 3838245 A1. Zapsáno 11.11.1988.
- [6] FERNA GROUP INTERNATIONAL S.P.A. *Spacer ring for heating radiators*. 1992. Itálie. EP 0553481 A1. Zapsáno 21.12.1992.
- [7] DAIKIN INDUSTRIES, LTD. *Method for manufacturing panel radiator, backup member and panel radiator*. 2014. Japonsko. EP 3006836 A1. Zapsáno 3.6.2014.
- [8] AYDAR, Emir a Ismail EKMEKCI. THERMAL EFFICIENCY ESTIMATION OF THE PANEL TYPE RADIATORS WITH CFD ANALYSIS. *ISI BILIMI VE TEKNIGI DERGISI-JOURNAL OF THERMAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*. Turkey: TURKISH SOC THERMAL SCIENCES TECHNOLOGY, 2012, **32**(2), 63-71. ISSN 1300-3615.
- [9] MENÉNDEZ-DÍAZ, Agustín, Celestino ORDÓÑEZ-GALÁN, José BOUZA-RODRÍGUEZ a Javier FERNÁNDEZ-CALLEJA. Thermal analysis of a stoneware panel covering radiators. *Applied Energy*. 2014, **131**, 248-256. ISSN 03062619. Dostupné z: [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.025](http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.025)
- [10] EMBAYE, M., R.K. AL-DADAH a S. MAHMOUD. Thermal performance of hydronic radiator with flow pulsation – Numerical investigation. *Applied Thermal Engineering*. 2015, **80**, 109-117. ISSN 13594311. Dostupné z: [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.056](http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.056)
- [11] MATUŠKA, Tomáš. *Experimentální metody v technice prostředí*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03291-4.
- [12] LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Proudění na straně vody u deskových otopných těles. In: *Simulace budov a techniky prostředí 2016 - sborník 9. konference IBPSA-CZ*. Brno: IBPSA-CZ, 2016, s. 51-56. ISBN 978-80-270-0772-1.
- [13] *ANSYS Fluent Tutorial Guide v18*. ANSYS, Inc., 2017.

- [14] LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Vliv natočení a změny geometrie distančního kroužku u deskových otopných těles. In: *Simulace budov a techniky prostředí 2018*. Praha: IBPSA-CZ, 2018, s. 23-28. ISBN 978-80-907423-0-7.
- [15] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX* [online]. 1. vydání. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2016-08-02]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [16] LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Geometrie distančního kroužku a teplotní pole otopného tělesa. In: *Konference Vytápění Třeboň 2019*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2019, s. 59-63. ISBN 978-80-02-02847-5.
- [17] LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Optimization of Distance Rings in Panel Radiators. In: *Central Europe towards Sustainable Buildings (CESB19)*. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series. ISSN 1755-1307.
- [18] LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. Importance of Distance Ring in Panel Radiators. *Vytápění, větrání, instalace*. 2019, (286, 320-322. ISSN 1210-1389.
- [19] LEGNER, Tomáš a Jiří BAŠTA. *Distanční kroužek, zejména do přívodního rohu deskových otopných těles*. Česká republika. Patent CZ 309019. Uděleno 13.10.2021.

Anotace

Tato disertační práce se zabývá prouděním v deskových otopných tělesech v závislosti na geometrii vstupního distančního kroužku. Distanční kroužek je nedílnou součástí každého otopného tělesa z technologického hlediska a má výrazný vliv na zatékání otopné vody po celé délce otopného tělesa. Proto je výhodné s jeho pomocí dosáhnout maximálního zrovnoměření teplot po délce tělesa. Nebyly nalezeny žádné publikace zabývající se problematikou distančních kroužků ani detailního modelování proudění v otopném tělese, a tím je tento výzkum jedinečný. Detailní model proudění v otopném tělese byl získán pomocí matematické simulace, která byla validována pomocí dat z experimentu, kde model odpovídá přesné geometrii reálného deskového otopného tělesa. Naměřené hodnoty teplot a průtoku byly použity jako okrajové podmínky do matematické simulace. Nastavení matematické simulace a zasíťování modelu bylo vytvořeno s ohledem na charakter proudění v otopném tělese, kde uvnitř dochází k proudění velice malými rychlostmi. Dále byl vybrán takový dvourovnicový model turbulence, aby úloha dostatečně konvergovala. Tímto je v této práci sepsán manuál, jak nastavit velikost buněk a parametry výpočtu v matematické simulaci pro dostatečně přesné výsledky proudění v otopném tělese pro budoucí využití.

Na základě takto vytvořeného simulačního modelu byla zkoumání podrobena jiná natočení distančního kroužku s jedním otvorem, který je použit v běžném deskovém otopném tělese. Toto natočení nepřineslo požadované zrovnoměření teplotního pole, proto byl výzkum zaměřen na změnu geometrie distančního kroužku. Konkrétně na distanční kroužky se dvěma otvory pro cílené směrování dvou proudů vody do otopného tělesa. Tyto dvouotvorové distanční kroužky také nepřinesly uspokojivé zrovnoměření teplotního pole. Na základě výsledků z natáčení distančního kroužku a úpravy jednoho otvoru do dvou otvorů byl vytvořen model distančního kroužku s otvorem ve tvaru klínu. Tato změna geometrie přinesla dle výsledků z matematické simulace hodnoty teplotního pole, které byly po délce tělesa nejvíce rovnoměrné. Distanční kroužek s otvorem ve tvaru klínu byl patentován pod číslem patentu 309 019. Výsledky z výzkumu ukazují, že pomocí distančního kroužku, který je nedílnou součástí deskového otopného tělesa, už nelze více teplotní pole zrovnoměrnit. Pro větší zrovnoměření by se muselo zasáhnout do konstrukce otopného tělesa, resp. tvaru horní rozvodné komory.

Summary

This dissertation deals with the flow in panel radiators depending on the geometry of the inlet distance ring. The distance ring is an integral part of every radiator from a technological point of view and has a significant effect on the flow of heating water along the entire length of the radiator. Therefore, it is advantageous with its help to achieve maximum temperature uniformity along the length of the body. No publications were found dealing with the issue of spacer rings or detailed modeling of the flow in the radiator, which makes this research unique. A detailed model of the flow in the radiator was obtained by means of a mathematical simulation, which was validated using data from the measured experiment, where the model corresponds to the exact geometry of a real panel radiator. The measured values of temperature and flow were used as boundary conditions in the mathematical simulation. The settings of the mathematical simulation and meshing of the model were created with regard to the nature of the flow in the radiator, where the flow inside at very low speeds. Furthermore, such a two-equation turbulence model was chosen so that the problem converges sufficiently. Thus, a manual was written in this work on how to set the cell size and calculation parameters in the mathematical simulation for sufficiently accurate flow results in the radiator for future use.

Based on the simulation model created in this way, other rotations of a distance ring with one hole, which is used in a conventional panel radiator, were subjected to research. This rotation did not bring the required temperature field uniformity, so the research was focused on changing the geometry of the distance ring. Specifically for distance rings with two holes for targeted directing of two flows into the radiator. These two-hole distance rings also did not provide a satisfactory uniformity of the temperature field. Based on the results from the rotation of the distance ring and the adjustment of one hole into two holes, a model of the distance ring with a wedge-shaped hole was created. According to the results of the mathematical simulation, this change in geometry brought the values of the temperature field, which were the most uniform along the length of the body. This wedge-shaped distance ring has been patented under patent number 309 019. Research results show that with the distance ring, which is an integral part of a panel radiator, it is no longer possible to equalize the temperature field. It would be necessary to adjust the design of the radiator for greater uniformity.

