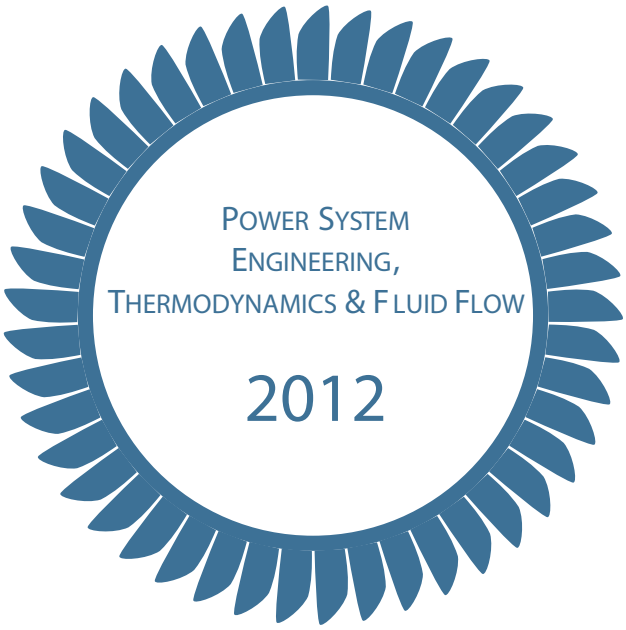
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI



JEDNOTLIVÝ PŘÍSPĚVEK ZE SBORNÍKU

evropský sociální fond v ČR
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vyšetření proudového a teplotního pole na modelu palivové tyče v oblasti distanční mřížky pomocí CFD simulace

Lávička David

This paper looks into detailed investigation of thermal-hydraulic characteristics of the flow field in a fuel rod model, especially near the spacer. The area investigate represents a source of information on the velocity flow field, vortex, and on the amount of heat transfer into the coolant all of which are critical for the design and improvement of the fuel rod in nuclear power plants. The flow field investigation uses commercial CFD software ANSYS/FLUENT.

Klíčová slova: model palivové tyče, přestup tepla, distanční mřížka, ANSYS/FLUENT.

Úvod

Palivový článek je součástí složitého systému, který představuje reaktor jako celek. Při návrhu jaderného reaktoru je vždy zaměřena největší pozornost na palivový článek, protože patří k nejexponovanějším a technicky nejvýznamnějším částem jaderného reaktoru. Distanční mřížky jsou jednou z důležitých komponent používaných na svazku palivových tyčí. Úkolem distančních mřížek je držení palivových tyčí a vytváření mezery pro chladící médium v aktivní zóně jaderného reaktoru. Dalším z důležitých úkolů distanční mřížky je plnit funkci turbulizátoru. V místě distanční mřížky dochází k jejímu obtékání, rozdělení a zavíření proudu podle jejího tvaru. Velikost a intenzita zavířené oblasti přímo ovlivňuje přestup tepla ve směru proudění mezi palivovou tyčí a chladícím médiem v aktivní zóně. K vyšetření budou použity vypočtené výsledky z CFD simulací z komerčního softwaru ANSYS/FLUENT.

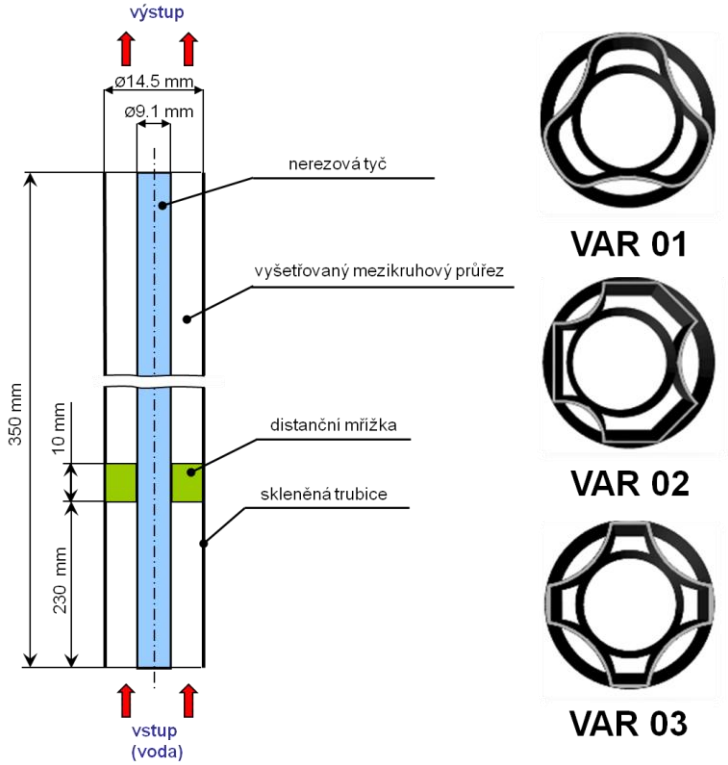
2. Výpočetní model

Výpočetní geometrie modelu palivové tyče vychází z rozměrů skutečného palivového proutku použitého v jaderném reaktoru VVER 1000. Experimentální zařízení pro studium přestupu tepla při dvoufázovém proudění obsahuje jednu palivovou tyč, která je tvořena nerezovou trubkou o vnějším průměru 9.1mm. Nerezová trubka je umístěna do skleněné trubice o vnitřní průměru 14.5mm. Vzniklý mezikruhový kanál představuje shodný prostor pro proudící chladící médium s prostorem tvořený svazkem palivových tyčí umístěných v reaktoru. Popis výpočetního modelu s umístěním distanční mřížky a základní rozměry průtočného kanálu s nerezovou trubkou je uvedeny na obr. 1.

V softwaru GAMBIT byla vytvořena výpočetní síť pro 3 rozdílné tvary distančních mřížek zobrazené na obr. 1. Základem modelu je plocha s tvarem distanční mřížky promítnutá kolmo na vstupní plochu. Na této ploše je vytvořena plošná síť pomocí quad elementů. Počet povrchových elementů se pohybuje okolo 25000. Následně byly tyto povrchové elementy vytaženy pomocí funkce „cooper“ (obdoba funkce sweep) v softwaru GAMBIT do objemové sítě. Počet elementů na výšku je rozdělen nerovnoměrně s větším zahuštěním buněk v místě distanční mřížky a jejím bezprostředním okolím. Objemová síť je tvořena cca 1,3 miliónem buněk.

3. Okrajové podmínky a nastavení řešiče

Okrajové podmínky pro numerickou simulaci jsou zobrazeny na obr. 1 a vycházejí z nastavení popsané v odborném článku [1] a [3]. V dolní části průtočného kanálu je definována vstupní okrajová podmínka mass-flow-inlet pro zadání hmotnostního průtoku. Hmotnostní průtok byl nastaven pro 3 hodnoty: 0.00035kg/s, 0.0007kg/s a 0.0014kg/s (to odpovídá objemovému průtoku cca 1.25l/hod., 2,5l/hod. a 5l/hod.). Nízké hodnoty průtoku chladícího média se používají pro zaplavování palivových proutků v havarijních stavech např., pokud dojde k úbytku chladící kapaliny-vody v reaktoru v primárním okruhu. Na výstupní ploše byla nastavena okrajová podmínka pressure-outlet. Zdroj tepla byl nastaven na stěny nerezové trubky a distanční mřížky ve velikosti 5000 W/m^2. Na rozhraní okolí a skleněné trubice byl nastaven koeficient přestupu tepla 10W/m^{2}K a teplota okolí 300K.



Obr. 1: Model palivové tyče a příklad použitých tvarů distančních mřížek v CFD simulacích

Numerická simulace byla prováděna s nastaveným modelem turbulence „RSM – Low-Reynolds Stress-Omega“ a v nestacionárním režimu v druhém řádu přesnosti o 4000 časových krocích s časovým krokem 0.05s a 0.1s. Vyhodnocování získaného proudového a teplotního pole probíhalo po posledních 500-ti časových krocích s aktivovanou funkcí data-sampling. V každém časovém kroku probíhalo 20 iterací, které stačily pro ustálení konvergenčních kritérií.

Výpočet a vyhodnocení tepelně-hydraulických charakteristik pro jednotlivé distanční mřížky byl prováděn v komerčním softwaru ANSYS FLUENT 14.0.

4. Výsledky

Z výsledků pocházející z numerických simulací byly vyhodnoceny další veličiny pro hodnocení distančních mřížek. Zpracované výsledky jsou uvedeny v Tab. 1, kde je důležitý údaj o tlakové ztrátě distanční mřížky, která byla zjišťována odečtením tlaku před mřížkou a za mřížkou.

Dalším výsledkem je ustředěná průměrná teplota na ploše uvnitř mezikruhové kanálu v oblasti s distanční mřížkou a rychlost v_y* byla odečtena z výsledků napočtených pomocí numerické simulace na rovině y=0.150mm. V tabulce Tab. 1 je z uvedených hodnot vypočten součinitel místní ztráty ξ [-] pro jednotlivé typy distančních mřížek pro hmotnostní průtok 0.0007kg/s. Hodnota součinitele místní ztráty byla vypočtena podle vztahu (1) a Reynoldsovo číslo Re [-] na vstupu do kanálu podle vztahu (2).

$$p_\xi = \xi \frac{\rho.w^2}{2} \tag{1}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho.w.D_H}{\mu} \tag{2}$$

Další vztah (3) definuje výpočet hydraulického průměru, D_H, který je použit pro výpočet Reynoldsova čísla. Hydraulický průměr je definován vztahem (3) jako poměrem čtyřnásobku vnitřního průřezu daného profilu potrubí „*A*“ a jeho omočeného obvodu „*P*“.

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{4\pi\left(\frac{D^2 - d^2}{4}\right)}{\pi(D+d)} = D - d \tag{3}$$

, kde D je vnitřní průměr vnější skleněné (plexisklové) trubice a d je vnější průměr nerezové tyče uvnitř modelu palivové článku.

	VAR 01	VAR 02	VAR 03
Tlaková ztráta [Pa]	0.58	0.64	0.65
Rychlost v_y* [m/s]	0.00738	0.00756	0.00747
Teplota [K]	313.2	316.5	313.2
Součinitel hydraulické ztráty (místního odporu) ξ* [-]	21.3	22.4	23.3
Reynoldsovo číslo Re [-]	45	45	45

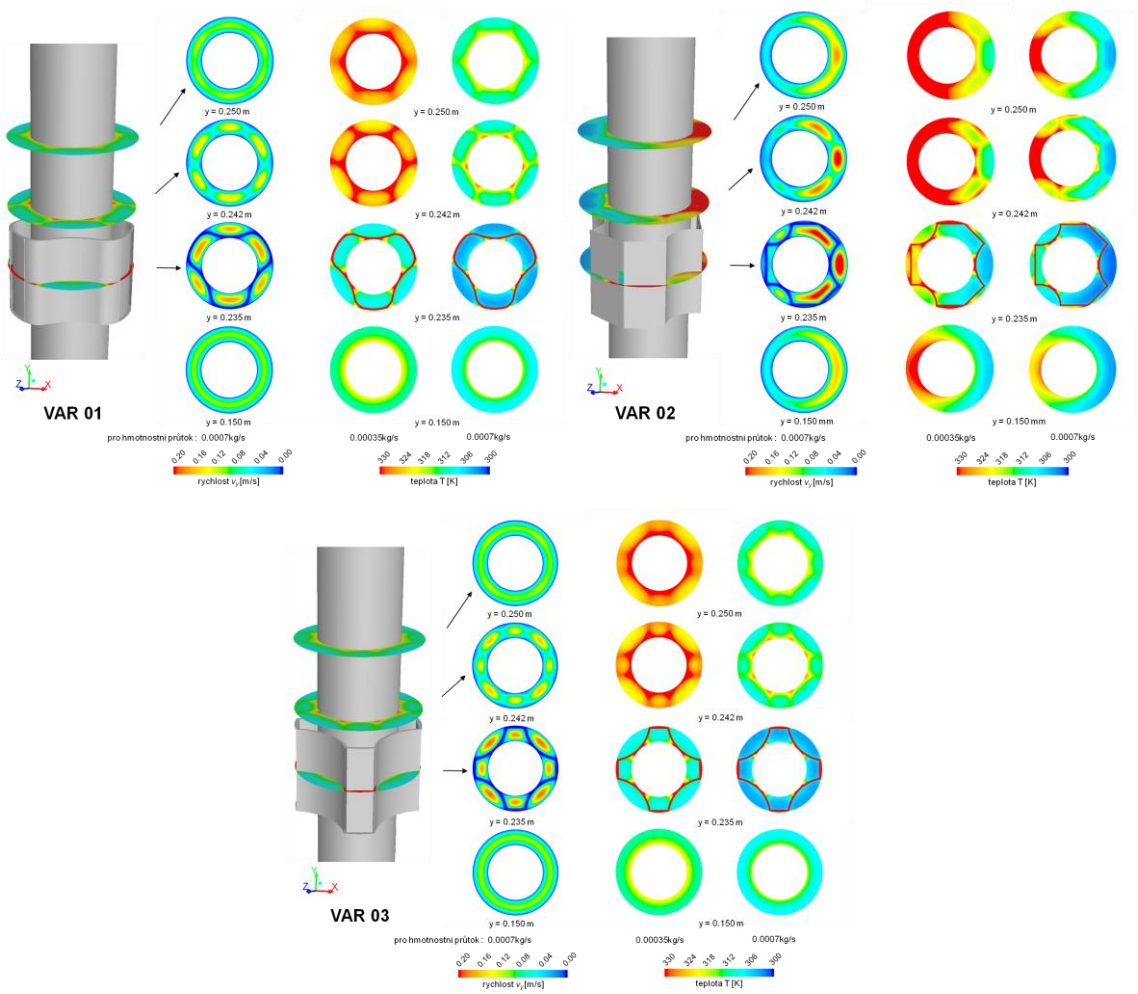
Tab. 1. Charakteristické údaje a výsledky distančních mřížek pro hmotnostní průtok 0.0007kg/s [1], [3]

Z uvedených výsledků v Tab. 1 pro hmotnostní průtok 0.0007kg/s lze usuzovat, že nejmenší odpor vykazuje distanční mřížka označená jako VAR 01 a naopak distanční mřížka VAR 03 má největší odpor. Nejvyšší tlaková ztráta u této mřížky je způsobena největším dělením proudu chladicí kapaliny na menší proudy. Geometrická varianta VAR 02 má velmi podobnou ztrátu jako varianta VAR 03, ale zde je odpor distanční mřížky způsoben excentrickým uložením nerezové tyče vůči skleněné trubici. Tato charakteristika je detailněji zachycena na obr. 2 ukazující rychlostní pole v jednotlivých řezech pro jednotlivé geometrické tvary distančních mřížek pro hmotnostní průtok 0.0007kg/s.

Mřížka VAR 02 vykazuje největší prohřátí chladicí kapaliny na průřezu mezikruhového kanálu a teplota chladícího média je o cca 3K vyšší než u ostatních variant. Vyšší teplota chladící kapaliny v mezikruhovém kanále je způsobena excentrickým (nesouosým) uložením nerezové tyče vůči skleněné trubici. Tato poloha způsobuje přehřátí chladicí kapaliny v levé části mezikruhového kanálu na obr. 2 u varianty VAR 02. Ostatní varianty mají shodnou průměrnou teplotu na řezu mezikruhovým kanálem.

Další porovnávanou veličinou v tabulce Tab. 1 je rychlost v_y^*. Geometrická varianta VAR 02 má vyšší rychlost než varianta VAR 01 a VAR 03. Varianta VAR 02 se vyznačuje

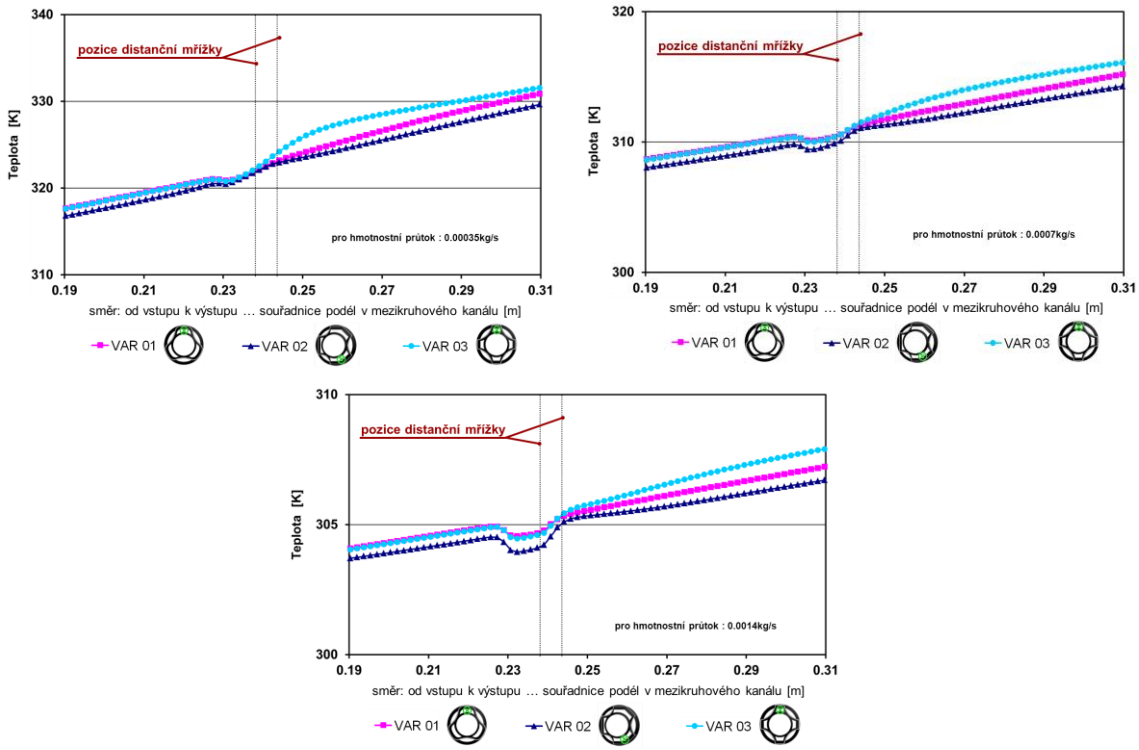
excentrickým mezikruhovým kanálem. Tato excentricita způsobuje vyšší odpor distanční mřížky, ale také vyšší průměrnou rychlost v ose y na řezu mezikruhovým kanálem.



Obr. 2: Rychlostní a teplotní pole podél mezikruhového kanálu pro použité tvary distančních mřížek

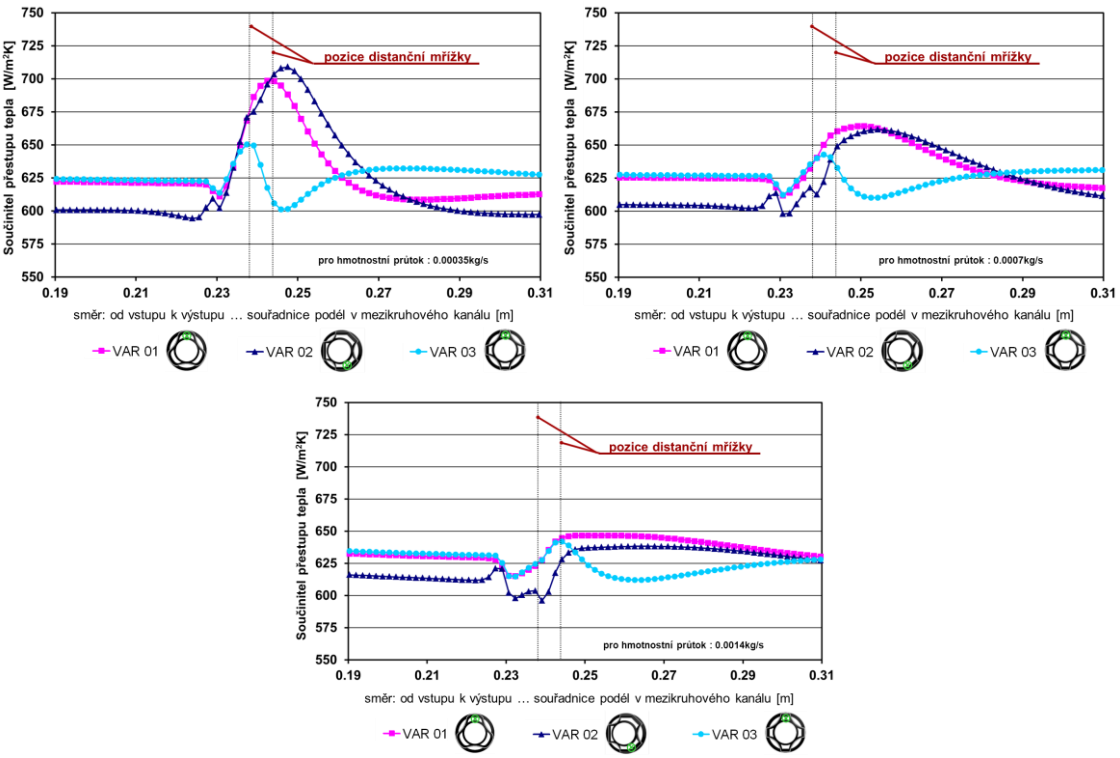
Obr. 2 zobrazuje obarvené kontury podle teploty v rovinách na pozici y=0.150mm, y=0.235mm, y=0.242mm, y=0.250mm pro průtoky 0.00035kg/s a 0.0007kg/s. Teplotní pole pro 2 průtoky umožňuje snadno porovnat ohřev chladící kapaliny v mezikruhovém kanále mezi s sebou. K výrazné změně teploty chladící kapaliny dochází za distanční mřížkou, distanční mřížka se nachází v oblasti y=0.230mm až y=0.240mm, která při menším průtoku 0.00035kg/s výrazně vzrostla. Na obr. 2 u varianty VAR 02 lze pozorovat nejrozdílnější teplotu na řezu mezikruhovým kanálem. Teplota chladící kapaliny u průtoku 0.00035kg/s se pohybuje v rozmezí 312 až 330K oproti ostatním variantám, kde je interval teplot jen 322 až 330K. Vyšší nerovnoměrné rozložení teplot ovlivňuje již zmiňované nesouosé uložení nerezové trubky a skleněné trubice. Tato skutečnost způsobuje i nerovnoměrné rozložení rychlost proudu chladící kapaliny u všech rovin. Na pravé straně mezikruhového kanálu, kde dochází k výraznému urychlení proudu. Poslední variantou je VAR 03 zobrazenou na obr. 2 a tento tvar distanční mřížky vykazuje velmi podobný charakter chování chladicí kapaliny v mezikruhovém kanále jako varianta VAR 01.

Na uvedených grafech na obr. 3 je vidět pokles teploty chladicí kapaliny v závislosti na hmotnostním průtoku po celé délce mezikruhové kanálu. Rozdíl teploty chladicí kapaliny mezi nejmenším a největším průtokem činí zhruba 20K.



Obr. 3: Průběh teploty podél kanálu pro použité distanční mřížky a různý hmotnostní průtok

Grafy na obr. 4 ukazují a porovnávají průběhy součinitele přestupu tepla podél nerezové trubky pro jednotlivě vyšetřované průtoky. Zobrazené průběhy součinitele přestupu tepla byly získány jako podíl definovaného zdroje tepla a rozdílu teplot v jednotlivých bodech na povrchu stěny nerezové trubky a v mezikruhovém kanále v proudu chladicí kapaliny. Všechny uvedené



Obr. 4: Průběh součinitele přestupu tepla pro použité distanční mřížky a různý hmotnostní průtok

výsledky na obr. 4 byly napočteny se zdrojem tepla 5000W/m^2 při hmotnostním průtoku 0.00035 kg/s, 0.0007kg/s a 0.0014kg/s.

Distanční mřížky VAR 01 a VAR 02 vykazují shodné hodnoty a průběhy součinitele přestupu tepla podél mezikruhového kanálu pro hmotnostní průtoky 0.00035kg/s a 0.0007kg/s, jak je patrné z obr. 4. U varianty VAR 02 v konfiguraci s nejvyšším průtokem dochází ke zhoršení přestupu tepla v místě distanční mřížky. Varianta VAR 03 má ve všech hmotnostních průtocích téměř shodnou maximální hodnotu přestupu tepla v místě distanční mřížky a tato mřížka se vyznačuje imunním chování vzhledem k průtočnému množství chladící kapaliny. Při průtoku 0.00035kg/s u varianty VAR 01 a VAR 03 je součinitel přestupu tepla menší o cca 9% pro hodnoty v oblasti distanční mřížky. Varianta VAR 03 se vyznačuje nejvyšším součinitelem přestupu tepla za distanční mřížkou.Velmi příznivé výsledky součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku lze pozorovat na obr. 4 u varianty VAR 01.

Závěr

Na základě získaných výsledků z numerických simulací lze provádět optimalizace tvaru distančních mřížek, které povedou k lepšímu rozložení teplotního profilu po mezikruhové ploše kanálu a ke zlepšení přestupu tepla mezi palivovou tyčí a chladícím médiem. Nejlepší výsledky vykazuje varianta VAR 01, která má nejnižší tlakovou ztrátu než ostatní varianty. Tato varianta se také vyznačuje nejvhodnějším průběhem součinitele přestupu tepla v mezikruhovém kanále podél nerezové trubky. Takto získané výsledky lze validovat a porovnávat s měřením z experimentálního zařízení pro studium dvoufázového proudění.

Literatura

[1] Lávička D.: „CFD simulation the thermal-hydraulic characteristic within fuel rod bundle near grid", „International Conference on Computational Fluid Dynamics 2011", WASET - World academy of science, engineering and technology, Issue 0079: 2011, Paris, France, 2011, pp. 168-173.

[2] ANSYS, Inc., 2011. „ANSYS FLUENT Theory Guide", Release 13.0, Nov. 2010.

[3] Lávička, D.: "CFD simulace teplotně-hydraulické charakteristiky na modelu palivové tyče v oblasti distanční mřížky. In Sborník konference ANSYS 2011. Praha : TechSoft Engineering, spol. s r.o., 2011, s.1-6. ISBN:978-80-905040-0-4.

[4] Incopera, DeWitt, Bergman, Lavine: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th edition, October 2006, USA. ISBN 978-0-471-45728-2.

[5] Kolev N.I.: Multiphase Flow Dynamics – 4 Nuclear Thermal Hydraulics.1ST edition, Springer. ISBN 978-3-540-92917-8.

Poděkování

Tato práce vznikla za finančního přispění Grantové agentury ČR v rámci postdoktorského projektu GAČR 101/09/P056 a specifického výzkumu SGS-2012-072: "Zvyšování účinnosti, spolehlivosti a životnosti energetických strojů a zařízení 2".

Ing., Ph.D. Lávička David, Západočeská univerzita v Plzni, výzkumné centrum NTC,
Univerzitní 8, 306 14, Plzeň, +420 377 634 712, dlavicka@ntc.zcu.cz.