

Merania na fyzikálnom modeli palivového článku jadrového reaktora

PETER MUŠKÁT, FRANTIŠEK URBAN*, MARIÁN PULMANN

Measurements on the physical model of the nuclear reactor fuel assembly

The experimental apparatus of the nuclear reactor fuel assembly model was constructed and installed in the laboratory of the Institute of the Thermal Power Engineering of the Slovak University of Technology in Bratislava.

Extensive tests, oriented on the velocity and temperature profiles at the fuel assembly outflow were done with aim to receive the data for improving the computational apparatus for the flow modelling. Some examples of the results are included in this paper.

Key words: nuclear reactor fuel assembly model, physical experiments, velocity and temperature profiles, visualization

1. Úvod

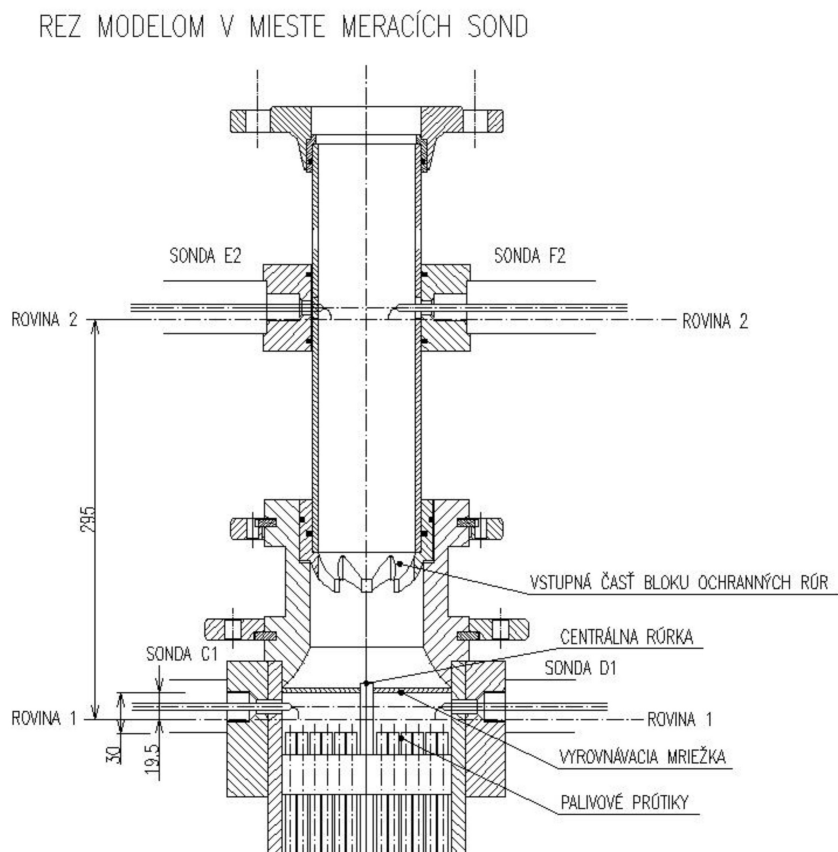
Teplotné pole chladiva na výstupe z palivovej kazety má vplyv na rozloženie tepelného výkonu v jadrovom reaktore, a tým aj na efektívnosť prevádzky zariadenia. V súvislosti s analýzou možnosti zvýšenia zaťaženia palivových kaziet pri prevádzke reaktora treba dôkladne analyzovať teplotné a rýchlostné polia chladiva na výstupe z palivovej kazety a v rovine umiestnenia termočlánku, merajúceho teplotu chladiva ohriateho v palivovej kazete.

V palivovej kazete jadrového reaktora VVER 440 chladivo prúdi zväzkom 126 palivových prútikov (obr. 1). Rozloženie tepelného výkonu v kazete na jednotlivé palivové prútiky, a teda aj teplotné pole chladiva na výstupe zo zväzku palivových prútikov, závisí od typu palivovej kazety, jej polohy v aktívnej zóne, obohatenia a vyhorenia jadrového paliva v palivovom prútiku a od stupňa výkonového zaťaženia počas prevádzky reaktora. Vyrovňavacia mriežka vyrovnáva teplotné pole chladiva. Chladivo ďalej prúdi výstupnou časťou palivovej kazety. V tejto časti sa

Ústav tepelnej energetiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava 1, Slovenská republika

* kontaktný autor, e-mail: frantisek.urban@stuba.sk

mení tvar prietokového prierezu zo šesťuholníkového na kruhový a tiež veľkosť prietokovej plochy. K ďalšiemu vyrovnaniu teplotného poľa chladiva dochádza počas jeho prúdenia vo vstupnej časti bloku ochranných rúr. Teplota chladiva na výstupe z palivovej kazety sa meria termočlánkom, ktorý je umiestnený v osi palivovej kazety vo vzdialenosti asi 300 mm od ukončenia zväzku palivových prútikov (rovina 2, obr. 1). Teplota chladiva na výstupe z palivovej kazety sa meria v jednom bode. Pre bezpečné a efektívne zafažovanie palivových kaziet jadrového reaktora treba kvalitatívne a kvantitatívne analyzovať súvis medzi teplotou chladiva na výstupe z palivovej kazety meranej termočlánkom a strednou teplotou teplotného poľa chladiva v rovine 2.



Obr. 1. Výstupná časť modelu palivovej kazety s umiestnením kombinovaných sond v rovinách 1 a 2.

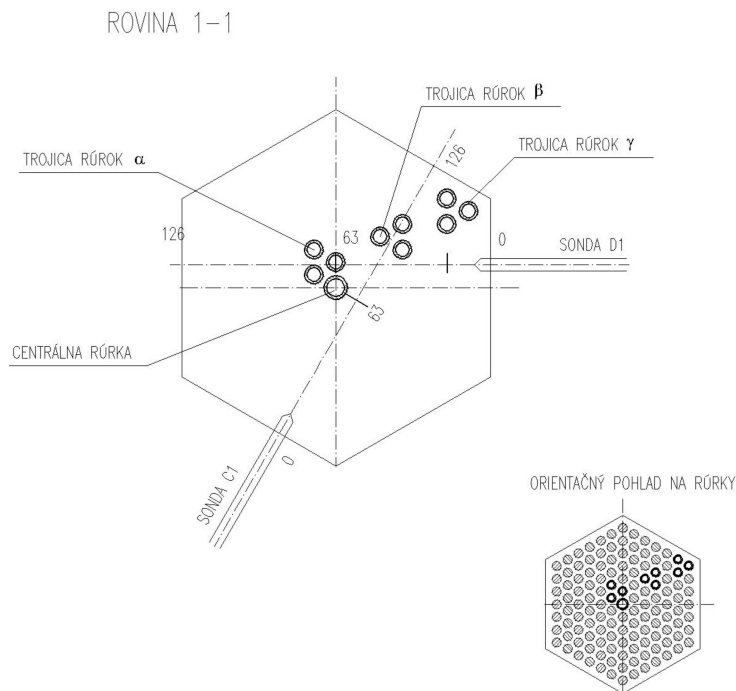
Fig. 1. Outflow section of the fuel assembly model with the combined probes locations in the planes 1 and 2.

Analýzu možno realizovať:

1. Meraniami na fyzikálnom modeli palivovej kazety reaktora jadrovej elektrárne. Vybudovanie zariadenia s modelom palivovej kazety reaktora jadrovej elektrárne a jeho prevádzka sú časovo a finančne náročné. Dodržanie rozmerovej a fyzikálnej podobnosti modelu palivovej kazety a palivovej kazety reaktora je nevyhnutné preto, aby výsledky meraní na modeli boli v súlade s reálnym prúdením chladiva palivovou kazetou pri prevádzkových podmienkach reaktora.

2. Modelovaním prúdenia v kazete pomocou CFD. Výsledky CFD simulácie závisia od spôsobu modelovania turbulencie a od generovania výpočtovej siete (2D, 3D, počet a tvar buniek).

V laboratóriu Ústavu tepelnej energetiky Strojníckej fakulty STU v Bratislave sa realizovalo experimentálne zariadenie s modelom palivovej kazety reaktora jadrovej elektrárne VVER 440. Fyzikálny model palivovej kazety je vyhotovený v mierke 1 : 1,125. Model slúži na modelovanie teplotných a rýchlostných polí



Obr. 2. Umiestnenie kombinovaných sond C1 a D1 v rovine 1 modelu palivovej kazety.
Fig. 2. Location of the combined probes C1 and D1 in the plane 1 of the fuel assembly model.

v jednej rovine na vstupe do modelu palivovej kazety a v dvoch rovinách na výstupe z modelu. Priehľadná časť modelu umožňuje vizualizáciu prúdenia pomocou vstrekovania zafarbenej vody do hlavného prúdu.

Vo fyzikálnom modeli palivovej kazety nemožno simulovať reálne rozloženie tepelného výkonu v kazete jadrového reaktora podľa jednotlivých prútikov. Miešaním ohriatej vody, ktorá prúdi zväzkom palivových prútikov, s chladnou vodou prúdiacou z niektorej trojice rúrok α , β , γ alebo z centrálnej rúrky sa v rovine ukončenia zväzku palivových prútikov modeluje teplotná „diskontinuita“ (obr. 2). Teplotné a rýchlostné profily sa merajú kombinovanými sondami C1 a D1 umiestnenými v rovine 1 v priestore medzi ukončením zväzku palivových prútikov a vyrovnávacou mriežkou. V rovine 2, vzdialenej 295 mm od roviny 1, sa kombinovanými sondami E2 a F2 merajú teplotné a rýchlostné profily vody. Fyzikálny model palivovej kazety slúži na modelovanie prúdenia vo výstupnej časti palivovej kazety jadrového reaktora.

2. Merania na experimentálnom zariadení

Schematický náčrt merania na modeli palivovej kazety (MPK) je znázornený na obr. 3. Voda sa zohrieva na požadovanú modelovú teplotu t pomocou ohrievacieho výmenníka tepla plynovým kondenzačným kotlom KK.

Voda prúdi zo spodnej časti nádoby cez ventil V1 a filter F do vodného čerpadla VČ. Jej statický tlak sa pred čerpadlom meria pomocou deformačného manometra P1 – merajúceho tlak p_1 . Za čerpadlom je umiestnený manometer P2 – merajúci tlak p_2 . Posúvač V2 slúži na zmenu prietoku pri meraní charakteristiky čerpadla a pri zmenách režimu prúdenia.

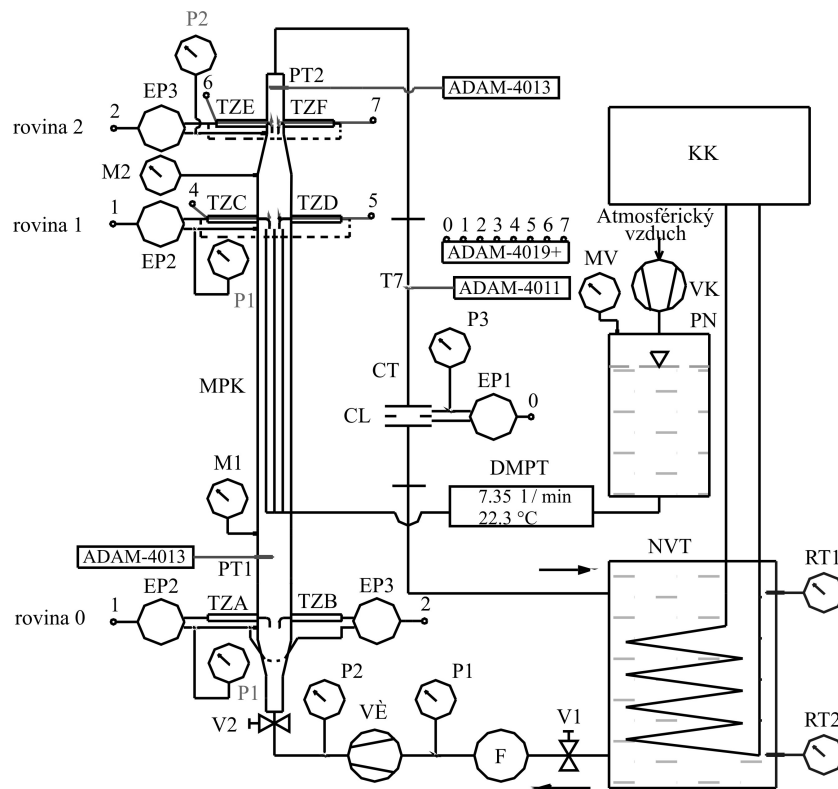
Ďalej voda vstupuje do modelu palivovej kazety MPK. Po vyrovnaní prúdu sa jeho rovnomernosť kontroluje Pitotovými sondami zabudovanými v traverzačných zariadeniach TZA a TZB, umiestnenými v rovine 0 v navzájom kolmých osiach.

Voda prúdi ďalej okolo zväzku modelu palivových prútikov. Vybranými prútkami prúdi „sekundárna“ voda z prídavného okruhu.

V rovine 1 v blízkosti vyústenia prútikov sú zabudované traverzačné zariadenia TZC, TZD, pomocou ktorých sa kontroluje rýchlostný a teplotný profil prúdu vody po zavedení chladnejšej, resp. zafarbenej vody, s cieľom vytvoriť teplotnú „diskontinuitu“, resp. vizualizáciu prúdu.

Kombinované sondy (tlakovo-teplotné) sú svojím tlakovým výstupom pripojené k tlakovému prevodníku EP2, merajúceho dynamický tlak prúdiacej vody. EP2 je zapojený diferenčne medzi celkový tlak, snímaný Pitotovou sondou, a statický tlak, snímaný na stene telesa kazety. Teplota sa meria pomocou termočlánkov.

Voda prúdi ďalej do hornej časti kazety. V rovine 2, kde je v skutočnej palivovej kazete umiestnený termočlánok merajúci teplotu vystupujúcej vody, sú zabudované traverzačné zariadenia TZE a TZF na posuv kombinovaných sond, ktorými sa meria rýchlostný a teplotný profil prúdiacej vody.



Obr. 3. Schéma zariadenia a meracích prístrojov.

Fig. 3. Measuring appliance and instrumentation scheme.

Na výstupe z MPK sa meria ešte platinovým teplomerom PT2 stredná výstupná teplota prúdiacej vody.

Voda prúdi ďalej do clonkovej trate CT, v ktorej je zabudovaná clona CL na meranie prietoku vody. Pred clonou je umiestnený termočlánok T7, merajúci teplotu t_7 vody prúdiacej do clony. Diferenčný tlak na clone Δp sa meria elektronickým prevodníkom tlaku EP1.

Hlavný okruh sa uzatvára opäť v nádobe výmenníka tepla NVT.

V prídavnej nádobe PN je zásoba chladnejšej vody – nie je zohrievaná. Používa sa ako „sekundárna“, a to buď neprifarbovaná, keď sa experiment vyhodnocuje iba podľa nameraných hodnôt teploty, alebo prifarbovaná, keď sa miešanie posudzuje vizuálne. Zo spodnej časti prídavnej nádoby voda prechádza cez digitálny merač tepla DMPT, ktorý slúži na meranie okamžitého prietoku vody a jej teploty. Prietok a teplota vody sú potrebné na nastavenie izokinetičnosti pri výtoku vody zo zväzku rúrok do priestoru medzi palivovými prútkami.

Fyzikálny model palivovej kazety slúži na meranie nasledujúcich veličín:

1. tlakovej straty MPK,
2. rýchlostného profilu v rovine 0 na vstupe do MPK,
3. rýchlostného a teplotného profilu v rovinách 1 a 2 na výstupe z MPK,
4. strednej teploty na vstupe a na výstupe kazety,
5. pri miešaní chladnejšej vody prechádzajúcej vybranými zväzkami rúrok je zaradené ešte meranie prietoku, teploty a tlaku tejto vody – pre nastavenie izokinetičnosti pri zmiešavaní prúdov.

3. Rozsah meraní na experimentálnom zariadení

Experimentálna trať s modelom palivovej kazety slúži na meranie vplyvu hodnoty Reynoldsovho čísla a modelovanej nerovnomernosti teplotného poľa na rýchlostné a teplotné profily v rovinách 1 a 2 na výstupe z modelu palivovej kazety. Hodnoty Reynoldsovho čísla sa menia najmä zmenou prietoku vody kazetou. Modelovanie nerovnomernosti teplotného poľa sa realizuje izokinetickou dodávkou prídavnej vody do modelu palivovej kazety.

Merania na modeli palivovej kazety realizované v laboratóriu Ústavu tepelnej energetiky Strojníckej fakulty STU budú ďalej označené ako:

MR1, 2_X_Y,

Tabuľka 1. Hodnoty X variantov meraní v závislosti od prietoku vody kazetou

Table 1. X values of the measuring variants related to water flow rate

Hodnota X	Prietok vody kazetou	Rozsah prietokov vody kazetou [kg s ⁻¹]
11	blízky maximálnej hodnote	10,97 ÷ 11,07
10	asi 90 % maximálnej hodnoty	9,97 ÷ 10,01
5	blízky minimálnej hodnote	5,03 ÷ 5,10

Tabuľka 2. Hodnoty Y variantov izokinetickej dodávky prídavnej vody do modelu palivovej kazety

Table 2. Y values of the isokinetic water injection in the fuel assembly model

Hodnota Y	Izokinetická dodávka vody do modelu palivovej kazety
0	voda rúrkami neprúdi – všetky rúrky zatvorené
1	centrálnou rúrkou
2	rúrkami α – trojica rúrok najbližšie k osi
3	rúrkami β – trojica rúrok ďalej od osi
4	rúrkami γ – trojica rúrok najďalej od osi
5	centrálnou rúrkou a trojicami rúrok α , β , γ (všetkými rúrkami prídavnej vody)

pričom R1,2 je meranie rýchlostných a teplotných profilov v rovinách 1 a 2, X je prietok vody kazetou meraný clonou, zaokrúhlený na celé číslo [kg s^{-1}], Y je označenie variantu izokinetickej dodávky prídavnej vody do modelu palivovej kazety.

Merania sa uskutočnili pri troch rôznych úrovniach prietokov vody modelom kazety. Hodnoty X sú uvedené v tab. 1. V tab. 2 sú hodnoty Y variantov izokinetickej dodávky vody do modelu palivovej kazety. Spolu sa uskutočnilo 6 meraní v rovine 0 na vstupe do modelu palivovej kazety a 14 meraní v rovinách 1 a 2 na výstupe z kazety.

4. Analýza výsledkov meraní

Pri analýze výsledkov meraní na modeli palivovej kazety sa sústreďíme na určenie vplyvu prietoku a z toho vyplývajúcej hodnoty Reynoldsovho čísla na rýchlostné a teplotné profily v rovinách 1 a 2 na výstupe kazety pri rovnako modelovanej nerovnomernosti teplotného poľa v rovine 1. Realizované merania navzájom porovnáme po skupinách s rovnakým spôsobom izokinetickej dodávky prídavnej vody do modelu palivovej kazety. V príspevku sa budeme zaoberať tromi meraniami: M R1,2_11_2, M R1,2_10_2 a M R1,2_5_2, pri ktorých sekundárna voda prúdila trojicou rúrok α , ktoré sú najbližšie k osi.

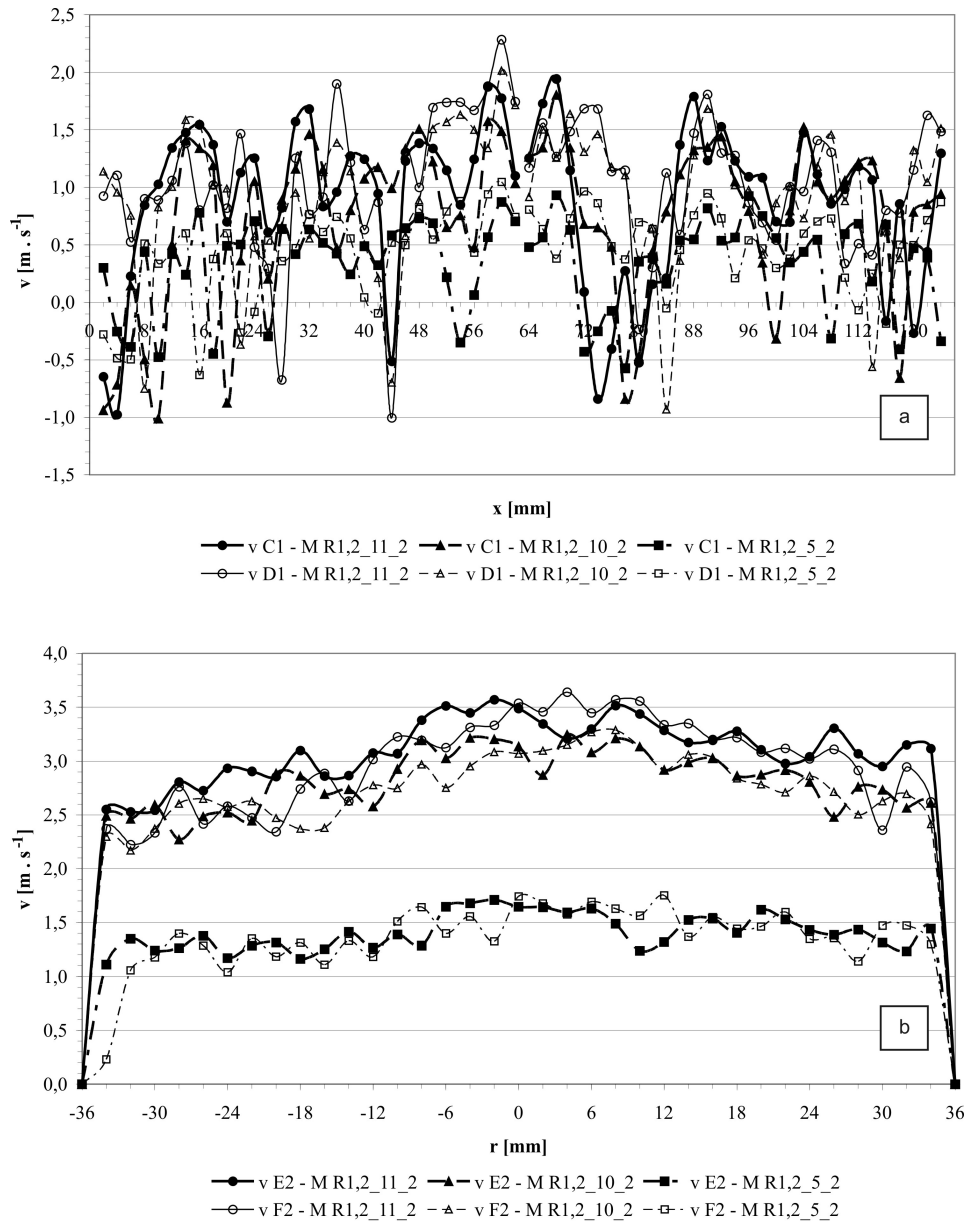
Pre skupinu troch meraní M R1,2_X_2 s rovnakým spôsobom izokinetickej dodávky vody do kazety sú na obr. 4 a 5 graficky znázornené teplotné a rýchlostné profily merané v rovinách 1 a 2.

Prúdenie vody v modeli palivovej kazety v priestore medzi rovinou ukončenia palivových prútikov a vyrovnávacou mriežkou ovplyvňuje predovšetkým tvar a rozmiestnenie otvorov vo vyrovnávacej mriežke. Voda sa v tomto priestore intenzívne premiešava, dochádza k spätnému prúdeniu vody (obr. 4).

Prúdenie vody v rovine 2 na výstupe z kazety možno hodnotiť ako turbulentné, osovo mierne asymetrické. Nižšie rýchlosti prúdenia sa namerali na strane záporných hodnôt polomerov r E2, r F2 (obr. 4). Veľmi dobrá je zhoda medzi prietokmi vody kazetou meranými clonou m_{clona} a určenými v rovine 2 z rýchlostných profilov v E2, v F2 integráciou m_{traverz} . Relatívna odchýlka $(m_{\text{traverz}} - m_{\text{clona}})/m_{\text{clona}}$ pri 14 realizovaných meraniach je od $-1,01\%$ do $1,85\%$, čo je v rozsahu neistoty merania prietoku clonou.

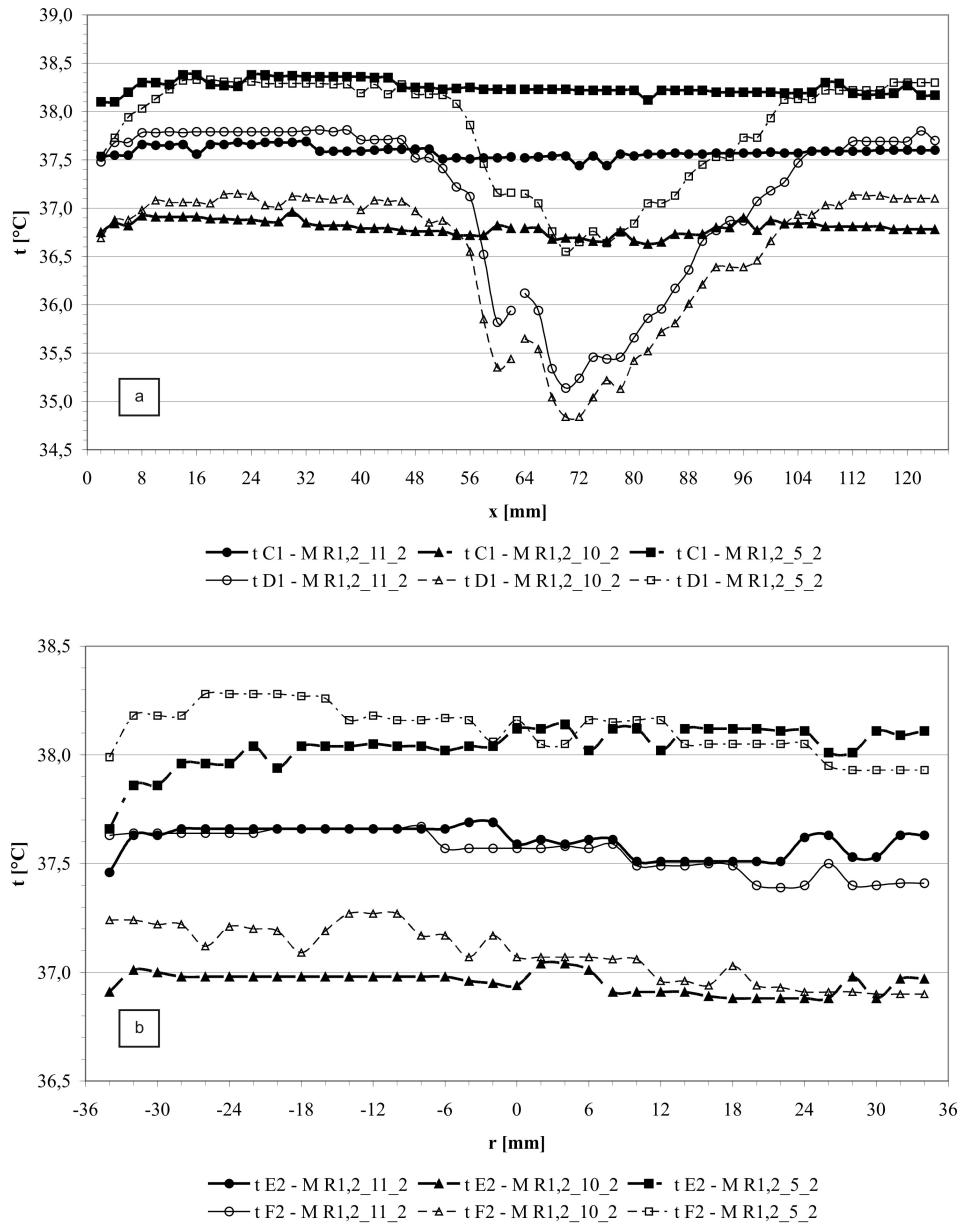
Počas meraní M R1,2_11_2, M R1,2_10_2 a M R1,2_5_2 sa voda pridáva do modelu palivovej kazety trojicou rúrok α , ktoré sú umiestnené najbližšie k osi. Teploty t C1 merané sondou C1 v rovine 1 sú prívodom chladnej vody rúrkami α zanedbateľne ovplyvnené (obr. 5). Teplotné profily t D1 merané sondou D1 v rovine 1 majú analogický priebeh so zreteľným poklesom teploty (najviac o $2,67^\circ\text{C}$) v druhej časti traverzovaného úseku. Relatívne rozsiahlu časť ovplyvnenú prúdením prídavnej vody možno vysvetliť intenzívnym premiešavaním vody za centrálnou rúrkou.

Teplotné profily t E2, t F2 v rovine 2 majú pri troch porovnávaných meraniach priebeh bez výrazných zmien teploty. Merané hodnoty teploty v rovine 2 sa líšia najviac o $0,67^\circ\text{C}$ (obr. 5).



Obr. 4. Merania M R1,2_X_2 – rýchlostné profily v rovinách 1 a 2.

Fig. 4. Measuring M R1,2_X_2 – velocity profiles in the planes 1 and 2.

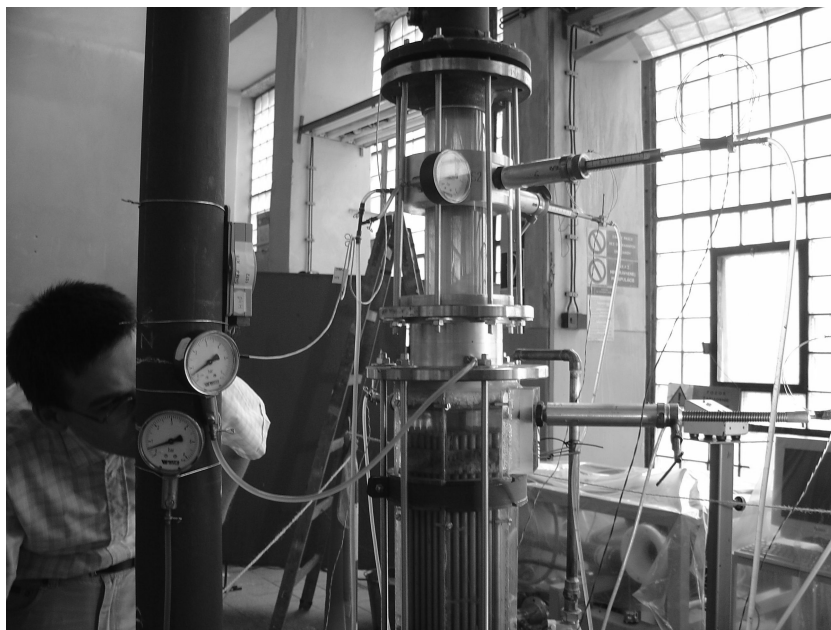


Obr. 5. Merania M R1,2_X_2 – teplotné profily v rovinách 1 a 2.

Fig. 5. Measuring M R1,2_X_2 – temperature profiles in the planes 1 and 2.

5. Zviditeľňovanie prúdenia na výstupe z palivovej kazety

Do prúdu prídavnej vody sa počas zviditeľňovania pridávalo ručnou pumpou asi 0,2 l koncentráту modrého farbiva. Koncentrát prúdiaci centrálnou rúrkou alebo niektorou z trojíc rúrok α , β , γ sa miešal s vodou prúdiacou modelom kazety. Viditeľné farebné efekty v priestore medzi rovinami 1 a 2 modelu palivovej kazety pri jednom meraní trvali asi 10 s (obr. 6).



Obr. 6. Zviditeľňovanie prúdenia vody v priestore medzi rovinami 1 a 2 modelu palivovej kazety.

Fig. 6. Visualization of the water flow between the planes 1 and 2 of the fuel assembly model.

6. Záver

V laboratóriu Ústavu tepelnej energetiky Sjf STU sa navrhlo a realizovalo experimentálne zariadenie na modelovanie teplotných a rýchlostných polí, na vizualizáciu prúdenia vody v modeli palivovej kazety tlakovodného reaktora V 213 jadrovej elektrárne VVER 440. Fyzikálny model palivovej kazety je vyhotovený v mierke 1 : 1,125. Uskutočnilo sa 6 meraní v rovine 0 na vstupe do modelu palivovej kazety a 14 meraní v rovinách 1 a 2 na výstupe z kazety.

Fyzikálny model palivovej kazety slúži na modelovanie prúdenia vo výstupnej časti palivovej kazety jadrového reaktora. Tým, že sa dodržali rozmerová a fyzikálna

podobnosť modelu palivovej kazety a palivovej kazety reaktora, výsledky meraní na modeli sú v súlade s reálnym prúdením chladiva na výstupe z palivovej kazety.

Po realizácii meraní bude zaujímavé porovnať laboratórne merania teplotného a rýchlostného poľa na výstupe z fyzikálneho modelu palivovej kazety s teplotným a rýchlostným poľom vypočítaným pomocou CFD kódu Fluent.

Pre varianty meraní realizované na fyzikálnom modeli treba uskutočniť simuláciu prúdenia vody vo výstupnej časti modelu palivovej kazety pomocou CFD a pre CFD simuláciu vybrať vhodný spôsob modelovania turbulencie a generovania výpočtovej siete (2D, 3D, počet a tvar buniek) vzhľadom na výsledky meraní na fyzikálnom modeli a vizualizácie prúdenia vody. Následne možno merané teplotné a rýchlostné profily v rovine 1 vo výpočtoch CFD nahradiť profilmi vypočítanými pre reálne rozloženie tepelného výkonu jednotlivých palivových prútikov v kazete jadrového reaktora.

Podakovanie

Tento článok bol spracovaný na základe úloh súvisiacich s projektom VEGA 1/4115/07 Možnosti zníženia nárokov na dovoz energetických zdrojov pri zabezpečení trvalo udržateľného rozvoja v Slovenskej republike.

LITERATÚRA

- [1] URBAN, F.—KUČÁK, E.—MUŠKÁT, P.—PULMANN, M.—TIHÁNYI, J.: Zvýšenie presnosti určovania výkonu palivových kaziet a jeho rozloženia v aktívnej zóne reaktora typu VVER 440. Návrh experimentálneho zariadenia, realizácia experimentov, analýza experimentálnych a výpočtových údajov. Realizácia a analýza experimentov na modeli palivovej kazety. [Výskumná správa]. Úloha APVT-99-P02405, etapa č. 5. Bratislava, Strojnícka fakulta STU v Bratislave 2007.
- [2] KLUČÁROVÁ, K.—REMIŠ, J.—FOGEL, M.—ZÁVODSKÝ, M.—PETÉNYI, V.—URBAN, F.—KUČÁK, E.—MUŠKÁT, P.: Zvýšenie presnosti určovania výkonu palivových kaziet a jeho rozloženia v aktívnej zóne reaktora typu VVER 440. Aplikácia výpočtov teplotného profilu na reálne výkonové polia v AZ. Definícia požiadaviek na dokladovanie vlastností nového paliva z hľadiska teplotného profilu chladiva a návrh spôsobu zavedenia korekcií na teplotný profil. [Výskumná správa]. Úloha APVT-99-P02405, etapa č. 6 a 9. Trnava, VÚJE Trnava 2007.

Rukopis dodaný: 11.3.2008

Rukopis upravený: 17.10.2008