

## Simulovanie premiešavania chladiva v reaktore VVER - 440

Mojto Emil · Elektrotechnika, Študentské práce

13.01.2012



Náplňou tejto práce je vytvorenie časti geometrického modelu reaktora VVER - 440, V-213 a simulácia prúdenia a premiešavania chladiva v zmiešavacej komore reaktora. Prvá časť práce bola zameraná na vytvorenie geometrického modelu reaktora, ktorý pozostáva z troch častí a to z tlakovej nádoby reaktora, nosného valca aktívnej zóny a dna

šachty reaktora.

Po vytvorení skutočného modelu sme pomocou jednoduchého príkazu v programe SolidWorks vytvorili jeho negatív a týmto krokom sme dostali skutočný model chladiva nachádzajúceho sa v reaktore. Po vytvorení modelu chladiva sme model preniesli do programu ANSYS CFX, kde sa s modelom ďalej pracovalo. V tomto programe sa robili samotné výpočty premiešavania chladiva. V poslednej časti sú porovnané výsledky jednotlivých stavov, ktoré sme si zvolili.

### 1. Úvod

Základným kritériom pre určovanie bezpečnosti prevádzky jadrových elektrární (JE) je stanovenie tepelno-hydraulických pomerov v aktívnej zóne (AZ). Aj keď sa limitujúce podmienky v AZ nastavujú obvykle pri prechodových a havarijných procesoch, je dôležité pre tieto analýzy poznať podrobne a dostatočne presne počiatkový stav pred prechodným procesom. Pri tepelno-hydraulických výpočtoch alebo pri prevádzkových meraniach v AZ sa obvykle vychádza z predpokladu, že teploty chladiva na vstupe do jednotlivých palivových kaziet (PK) sú rovnaké, čo musí byť dôsledkom buď rovnakých teplôt chladiva na výstupe z prevádzkovaných cirkulačných slučiek alebo dokonalého zmiešavania chladiva v priestore studenej komory reaktora.

Podľa niektorých prevádzkových meraní na JE sa ukazuje, že tento predpoklad nie je presný. Mohutné prúdy chladiva, ktoré vstupujú do reaktora z jednotlivých slučiek, sa len veľmi málo premiešavajú a ponechávajú si v jadre prúdu svoju teplotu až do vstupu do príslušných PK. Toto nerovnomerné rozdelenie teplôt chladiva do jednotlivých PK má vplyv na ich sledované hlavné parametre ako sú teploty paliva a povlaku, ale najmä na rozdiely teplôt chladiva na výstupe z kaziet, ktoré pre rovnaké výkony približne odpovedajú rozdielom vstupných teplôt.

Hlavným cieľom tejto práce je skúmať vplyv rozdielných teplôt na jednotlivých slučkách studených vetiev reaktora na výslednú hodnotu teploty chladiva vstupujúcej

do PK a sledovať premiešavanie chladiva v zmiešavacej komore reaktora. Hlavnou príčinou rozdielov teplôt chladiva na výstupe z jednotlivých parných generátorov (PG) pri prevádzkovaní JE sú rozdielne dĺžky a členitosti parovodov, ktoré spájajú jednotlivé PG s kolektorom sýtej pary. To má za následok, že vplyvom rôznych hydraulických odporov prípadne rôznych prietokov pary sa v bubnoch jednotlivých PG nastavujú vzájomne rozdielne tlaky, ktoré sú určujúce pre prestup tepla pri vare vo veľkom objeme a ovplyvňujú tak parný výkon a teplotu primárneho chladiva. Napr. pre JE Dukovany je rozdiel v teplotách chladiva na výstupe z PG  $0,75^{\circ}\text{C}$  pri práci 6 cirkulačných slučiek a pri rovnomernom zaťažení turbogenerátora.

Tento rozdiel teplôt môže byť výraznejší v prevádzkových situáciách, kedy v jednotlivých cirkulačných slučkách sú rozdielne hmotnostné prietoky chladiva. Pri teoreticky možnom rozdiely v prietokoch 12% v uvedených slučkách vzrastie tento rozdiel teplôt na  $1,7^{\circ}\text{C}$ . Obdobný prípad nastane pri odstavení PG, kedy para vyrobená v zostávajúcich PG sa rozdelí medzi oba turbogenerátory, pričom sa zmenia parné trasy, čo vyvolá rozdiely vo výstupných teplotách podľa kombinácie výpadku jedného čerpadla od  $0,5^{\circ}\text{C}$  do  $0,9^{\circ}\text{C}$ .

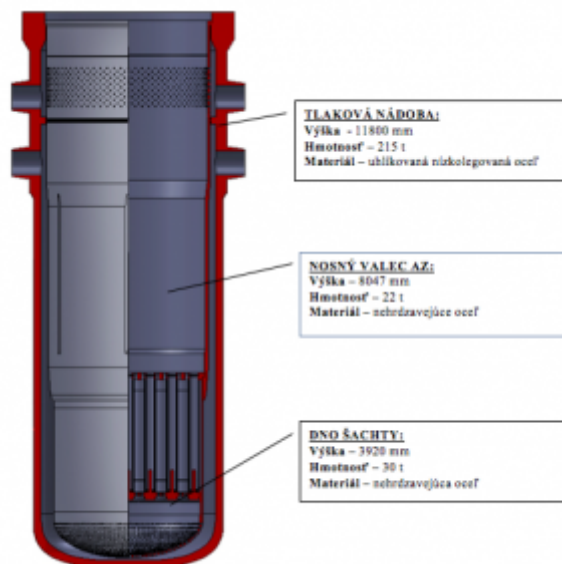
Ďalšie vplyvy na zvýšenie uvedených rozdielov teplôt môžu nastať pri dlhodobej prevádzke, kedy pri poškodení častí U-trubiek v niektorom PG sa po ich zaslepení zmenší jeho prestupná plocha alebo pri nerovnomernom zaťažení prípadne pri dlhšom výpadku niektorého PG nastanú rozdiely v zanesení prestupných plôch. Tieto prípady budú mať vplyv na zmenu prestupu tepla a parný výkon príslušného PG, čo vyvolá zmenu v rozdieloch výstupných teplôt primárneho chladiva.

## 2. Vytváranie modelu geometrie

Celé modelovanie geometrie bolo realizované v systéme SolidWorks, ktorý je štandardom medzi 3D strojárskymi konštrukčnými programami. SolidWorks ponúka modelovanie telies a 2D kreslenie. Geometria celého modelu pozostáva z troch komponentov, ktoré sú vo výslednej fáze spojené do jedného celku. Pre vytvorenie modelu chladiva boli potrebné tieto tri časti reaktora – obrázok 1.

Ako prvá sa modelovala samotná tlaková nádoba reaktora. Teleso TNR má tvar vertikálneho valca s eliptickým dnom. TNR je zvarená zo siedmich častí: z prírubového prstenca, prstenca výstupných nátrubkov, prstenca vstupných nátrubkov, dvoch valcových prstencov, kónického prstenca so sklonom  $1^{\circ}$  a eliptického dna. Ďalšou modelovanou časťou bola šachta (nosný valec) AZ. Patrí medzi vnútorné časti reaktora. Šachta reaktora spolu s TNR a vnútorným nákrúžkom s labyrintovým tesnením oddeluje vstup chladiva od výstupu a usmerňuje prúd chladiva v AZ. V oblasti AZ slúži ako tepelný štít. Vlastné teleso šachty reaktora je valec na oboch koncoch otvorený.

Poslednou časťou je dno šachty(nosného valca) reaktora. Je zavesené v spodnej časti šachty reaktora. Má funkciu nosného elementu, ktorý prenáša hmotnosť zaplneného koša AZ, bloku ochranných rúr a prítlačnej sily na nosný valec reaktora. Slúži k ukludneniu prúdu chladiva, usmerňuje jeho tok smerom nahor, prostredníctvom škrtiacich clôn rozdeľuje chladivo na jednotlivé kazety, zaisťuje vedenie časti regulačných kaziet pri ich pohybe pod úrovňou AZ a zaisťuje tlmenie týchto kaziet.

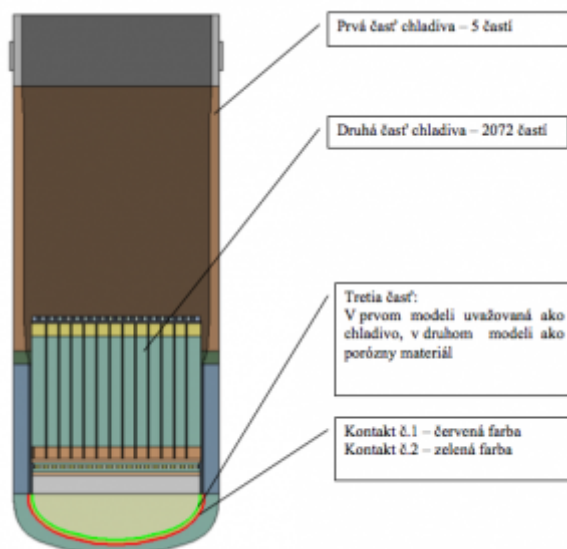


Obrázok 1 model reaktora VVER - 440

### 3. ANSYS Design Modeler

V našom prípade bol ANSYS DesignModeler využitý na úpravu už existujúceho modelu vytvoreného v CAD programe SolidWorks. Jednotlivé úpravy boli robené s cieľom skrátenia doby výpočtu, odľahčenia geometrie a s ohľadom na možnosť vytvorenia kvalitnejšej siete (mesh) v ďalšom kroku. Pre jednotlivé domény sme zvolili variantu fluid, to znamená že teleso sme zadefinovali ako kvapalinu. V ďalšom kroku sa jednotlivé domény rozdeľovali na menšie časti. Pri rozdeľovaní sme museli brať do úvahy možnosti vytvorenia čo najkvalitnejšej siete v ďalšom kroku. Po úpravách sa zvýšil počet častí modelu z pôvodných 3 na 2078. Taktiež sa zvýšil počet kontaktov až o tri rády.

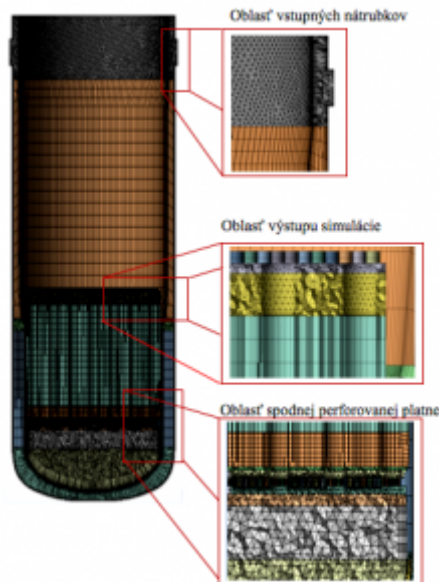
Keďže každý kontakt predlžuje čas výpočtu, počet kontaktov sme opätovne znížili na pôvodný počet a to spojením príslušných častí do samostatných celkov. Napr. - tlaková nádoba bola rozdelená na 5 samostatných častí, lenže medzi týmito časťami nebol kontakt ale boli navzájom spojené a program ich bral ako jeden funkčný celok. Konečný model po úpravách sa teda skladal zo samostatných troch častí, z ktorých dve boli rozdelené na menšie podčasti, čo umožňuje vytvorenie kvalitnejšej siete v ďalšom kroku. Počet kontaktov zostal nezmenený. Prvý kontakt bol vytvorený medzi dnom TN a vonkajšou stranou porózneho materiálu (na obrázku vyznačený červenou farbou) a druhý kontakt medzi vnútornou stranou porózneho materiálu a dnom šachty reaktora (na obrázku vyznačený zelenou farbou).



Obrázok 2 model chladiwa

## 5. Ansys Meshing

Pri vytváraní siete sme využili skutočnosť, že model bol rozdelený na niekoľko podčastí. Toto rozdelenie umožnilo vytvorenie kvalitnejšej siete a tým dosiahnutie lepších výsledkov. Pri vytváraní siete sme používali dva typy prvkov, šesťstenné a štvorstenné prvky. Celý model obsahuje 1716545 uzlov a 4986976 elementov. Pre zachytenie efektu prúdiacej kvapaliny v blízkosti stien sme použili medzné vrstvy – zjemnenie siete v blízkosti steny.

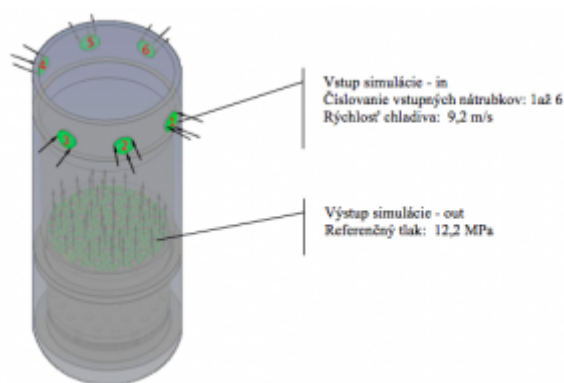


Obrázok 3 model siete

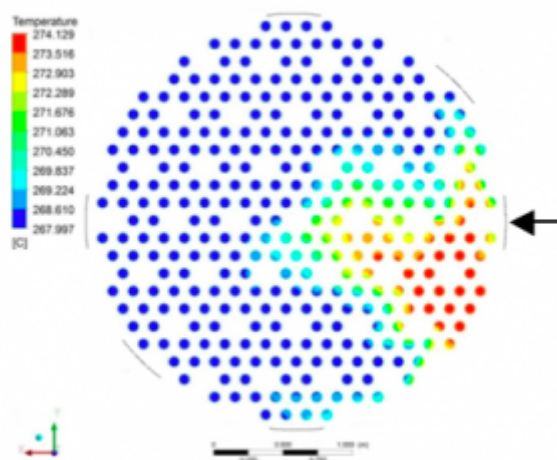
## 6. Okrajové podmienky a výsledky

V prvom kroku sme zvolili okrajové podmienky typické skôr pre nábeh reaktora ako pre ustálenú prevádzku. Pri tomto stave môže byť rozdiel teplôt na jednotlivých slučkách podstatne väčší (10-15°C a viac) ako pri ustálenej prevádzke (max. 1,5°C). Pre náš prípad sme volili teplotu na slučke č.3 275°C a na zvyšných piatich sme zadefinovali teplotu 268°C. Rýchlosť prúdiaceho chladiwa na jednu slučku, 9,2 m/s, sme určili z celkového prietoku chladiwa reaktorom, ktorý je 41985 m<sup>3</sup>/h (Obrázok 4

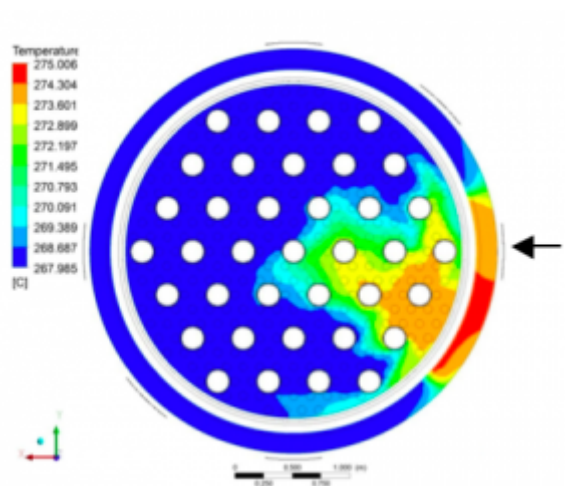
Rozmiestenie nátrubkov).



Obrázok 4 Rozmiestenie nátrubkov

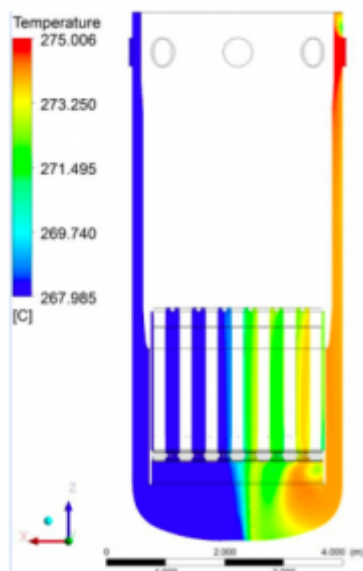


Obrázok 5 Rozloženie teploty na výstupe

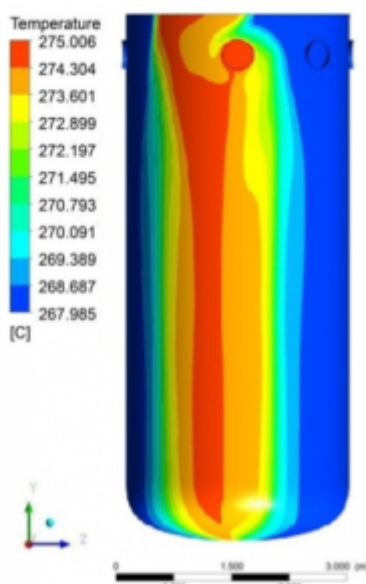


Obrázok 6 Rozloženie teploty v reze (115 mm od out)

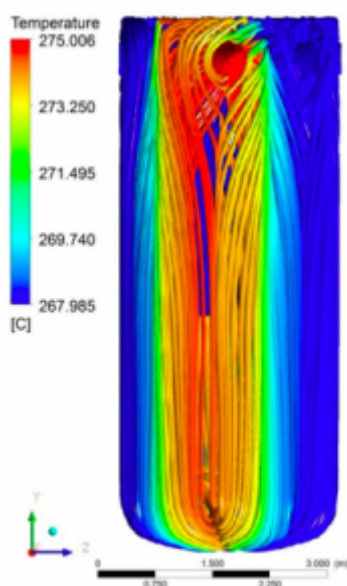
Obrázok 5 znázorňuje rozloženie teploty na výstupe simulácie a veľkosť ovplyvňovanej oblasti. Šípkou je označený nátrubok s rozdielnou teplotou. Na obrázku 6 je znázornená teplota 115 mm pod výstupom simulácie - out (obrázok 4).



Obrázok 7 Rozloženie tep. v reze XZ



Obrázok 8 Celkové rozloženie teploty



Obrázok 9 Prúdnice s namapovanými teplotami

Na obrázku 7 je znázornené rozloženie teploty v rovine XZ, obrázok 8 znázorňuje celkové rozloženie teploty a na obrázku 9 sú znázornené prúdnicie s namapovanými teplotami.

Z výsledkov je jasný vplyv rozdielnej teploty vstupného chladiva na jednotlivé kazety. Keďže vyššia teplota bola zadefinovaná na krajný nátrubok, ovplyvnená je o niečo väčšia časť (vyplýva to z celkovej nesymetrie rozloženia vstupných nátrubkov), ako je to v prípade zadefinovania rozdielnej teploty na stredný nátrubok. Túto skutočnosť chceme dokázať ďalšími výpočtami. Ďalej by sme chceli jeden výpočet nasimulovať na základe reálnych údajov:

*Tab.1. Nameraná teploty na horúcich a studených vetvách reaktora, H – teploty v horúcej vetve, S – teploty v studenej vetve*

	1	2	3	4	5	6
<b>H (°C)</b>	300,84	300,45	300,35	299,99	300,24	300,09
<b>S (°C)</b>	268,73	268,53	267,14	267,4	268,44	237,49

Pre náš prípad sú zaujímavé len teploty na studených slučkách reaktora. Pre výpočet by sme opäť zvolili len dve teploty a to najvyššiu a najnižšiu nameranú teplotu na studených vetvách. Keďže rozmiestnenie nátrubkov nie je celkovo symetrické, chceme zvoliť dve varianty výpočtu. V prvom kroku zadefinovať studenšiu teplotu na nátrubok č.3, v druhom výpočte na nátrubok č.2. Pri týchto výpočtoch chceme pracovať už so skutočnou geometriou spodnej časti eliptického dna, pretože perforácie nachádzajúce sa v tejto časti reaktora výrazne ovplyvňujú celkové prúdenie a premiešavanie chladiva.

### Zoznam použitej literatúry

1. B. Heřmanský: Termomechanika jaderných reaktorů. Academia Praha 1986.
2. Directory of Nuclear Reactors, Vol. X. IAEA, Vienna 1976.
3. Dittus, F. W., Boelter, L. M.: Pub. Eng., 2, 1930, 433.
4. Michejev, A. M., Michejevová, I. M.: Osnovy teplopěreдачи. Moskva, 1977.
5. Jacob, M.: Heat Transfer. 4. Ed. London 1955.
6. Alešin, V. S., Sarkisov, A. A.: Энергетические реакторы. Ленинград, 1961.
7. Katutladze, S. S. aj.: Жидкометаллические теплоносители. Москва 1958.
8. Bonilla, CH.: Nuclear Engineering. New York 1957.
9. Turbulence Model Performance: Normalised stream-wise mean velocity profile at 150% C ( $U_{\infty} = 3 \text{ m/s}$ )
10. ANSYS, <http://www.ansys.com/>
11. Ústřední Informační Středisko Pro Jaderní Program: Jaderné energetické reaktory, 1977
12. Kalousek: Fyzikální a tepelné poměry v aktivních zónách jaderných reaktorů typu VVER z hlediska bezpečnosti provozu, 1980

Spoluautormi článku sú doc. Ing. Vladimír Kutiš, PhD a Ing. Gabriel Farkaš, PhD, Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenská Technická Univerzita Ilkovičova 3, Bratislava 812 19

---

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Aplikovaná mechanika I a získala Cenu dekana, ISBN 978-80-227-3508-7

---