

Posudek na dizertační práci pana ing. Václava Heidlera, s názvem „Numerická simulace proudění chladiva v palivovém souboru reaktoru VVER1000 pomocí lattice Boltzmannovy metody“.

Dizertační práce má 9 základních kapitol na celkem 121 stranách včetně seznamu označení, obrázků, grafů a tabulek.

V úvodu je uveden cíl dizertace, kterým je pomocí metody Large Eddy Simulation aplikované na metodu lattice Boltzmann pro simulaci proudových polí vyřešit hydrodynamické síly, které působí na palivové proutky, jejichž vibrace mohou způsobit poškození pouzdra palivových proutků. K tomuto cíli si dizertant zvolil metodu lattice-Boltzmann, která řečí Boltzmannovu rovnici místo standartních rovnic Navier-Stokesových.

V kapitolách 1 a 2 dizertant popisuje problematiku primárního okruhu JE VVER1000, palivové soubory JE Temelín, netěsnosti palivového proutku a následné vibrace, které mohou vést k poškození palivového souboru. V třetí kapitole je popsána lattice-Boltzmannova metoda, včetně dvou variant řešení kolizního členu a řešení okrajových podmínek. V další, čtvrté kapitole je pak popsáno řešení turbulentního proudění metodou Large Eddy Simulation aplikované na LB metodu. Další kapitoly jsou pak věnovány různým technickým aspektům řešení, jako je postup zjemňování sítě, popis algoritmicizace a paralelizace, validace kódu a jeho testování a nakonec aplikace na proudění uvnitř palivového souboru.

Zhodnocení významu dizertační práce pro obor:

Hodnocení lze provést dvojitým pohledem:

- a) Práce je velmi zajímavá, hlavní těžiště lze spatřit v implementaci lattice – Boltzmannovy metody a vytvoření výpočetního programu a jeho otestování. Z tohoto pohledu je dizertace přínosná zejména pro pracoviště dizertanta. Vznikl zde „in-house“ program, který bude možné dále na domácím pracovišti rozvíjet. Výhodou při řešení bylo, že při vývoji tohoto programu se dizertant vyhnul veškerým problémům, protože implementoval dobře dokumentované a publikované poznatky.
- b) Z pohledu vědního přínosu pro metodu LB přináší práce jen velmi málo. V dnešní době existuje celá řada volně stažitelných kódů s technickou podporou, např. OpenLB (Karlsruhe), Palabos (Ženeva), waLBerla (Erlangen), kód prof. Derksena (Delft/Aberdeen), LUMA (Lattice-Boltzmann University Manchester, fluid structure interaction), málo známé kódy týmu prof. Sommerfelda (Halle, zaměřeni na částice) a další. Všechny tyto kódy mají mnohaletou historii, jsou na vyšší úrovni než kód vyvinutý v rámci této dizertace protože obsahují mnoho „multiphysics“ a navíc za nimi jsou relativně velké týmy vývojářů. Z tohoto pohledu nelze příliš očekávat, že další rozvoj tohoto „in-house“ kódu bude udávat tón ve vývoji LB.

Publikace dizertanta jsou pouze konferenční příspěvky či zasláný článek do Scopusovského časopisu. Schází článek do impaktovaného časopisu. Věřím, že pokud by se podařilo LB program dovyvinout s aplikací na FSI, že by článek mohl být přijat do nějakého impaktovaného časopisu s aplikačním zaměřením.

Co se týče odborných připomínek, uvítal bych porovnání stejných výpočtů proudových polí v palivovém souboru pomocí např. Ansys Fluent či CFX či StarCD s metodou LB. Aby bylo vidět zrychlení výpočtů. Dá se sice odhadnout, že s počtem buněk cca 15 mil. a Re číslem téměř 1000000 budou výpočty pomocí LES extrémně dlouhé, ale kvantifikace výpočetní doby by prospěla při hodnocení LB versus KO.

Jedna z testovacích úloh – zpětný schod – nevykazuje nejlepší shodu s DNS. Jako důvod uvádí dizertant Smagorinského SGS model a stěnovou funkci. Dneska se stále více v rámci LES používá model WALE – doporučoval bych jeho implementaci, už také z toho důvodu, že v palivovém souboru je celá kaskáda obtékaných mřížek s následným odtržením a přesné vyřešení proudového pole a smykových napětí je nutností pro řešení „Fluid structure interaction“ v palivovém souboru.

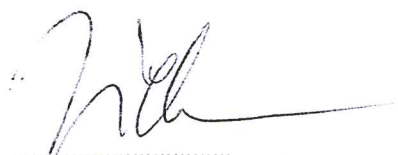
Úplně jsem nepochopil smysl okrajové podmínky zadaného smykového napětí na stěně. Předpokládám, že pro řešení úloh FSI je naopak potřeba smykové napětí na stěně vyřešit a ne zadávat jako okrajovou podmínku.

Práce je velmi přehledná, dobře strukturovaná, s dobrou formální i jazykovou úrovní a s minimem překlepů.

Nicméně, kritika uvedená výše v bodě b), nesnižuje úroveň dizertace. Je v ní obrovský kus práce, je patrné velmi dobré vedení školitelem, postup řešení je zcela správný včetně použitých metod. Domácí pracoviště získalo vlastní kód, který bude možno dále pro své vlastní potřeby rozvíjet. Přínos lze také spatřit v aplikovatelnosti na palivové soubory, a pokud tento kód bude nabídnut vývojářům a výpočtářům v oblasti jaderných reaktorů, může být velmi dobrou alternativou ke standardním CFD softwarům, pracujících na bázi konečných objemů či prvků.

Doporučuji dizertační práci k obhajobě.

V Brně dne 24.9.2018



.....
Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc
Odbor termomechaniky a techniky prostředí
Energetický ústav
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

Oponentní posudek disertační práce

Numerická simulace proudění chladiva v palivovém souboru reaktoru VVER1000 pomocí lattice Boltzmannovy metody

Autor

Ing. Václav Heidler

Obsahem předkládané práce je 3D numerická simulace nestacionárního turbulentního proudění chladiva v palivovém souboru (PS) TVSA-T reaktoru VVER1000 jaderné elektrárny Temelín užitím metody simulace velkých vírů. Konečným cílem práce byla analýza nestacionárního proudového pole chladiva primárního okruhu se zaměřením na stanovení hydrodynamických budičích sil působících na palivové proutky. Pro numerické řešení bylo autorem v jazyce FORTRAN vytvořeno vlastní programové vybavení, založené na implementaci lattice Boltzmannovy metody (LBM).

Hlavní motivací pro autora disertační práce bylo přispět k objasnění jevu zvaného Grid-to-Rod Fretting (GTFR). Z hlediska radiační bezpečnosti se jedná o klíčovou problematiku, kdy proudícím chladivem vybuzené kmitání palivových proutků může mít za následek jejich nadměrné opotřebení či poškození.

Práce je členěna na úvod, devět kapitol a závěr. První kapitola popisuje (účelně a v přiměřeném rozsahu) hlavní komponenty i základní princip fungování jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem typu VVER 1000. Detailnějšímu popisu PS typu TVSA-T je věnována samostatná kapitola, ve které je i stručně nastíněna problematika GTFR. Následující kapitola se již detailně zabývá lattice Boltzmannovou metodou. V úvodu jsou popsány základní předpoklady kinetické teorie plynů, a z nich vycházející tvar Boltzmannovy rovnice. Z ní je odvozeno základní diferenční schéma metody, lattice Boltzmannova rovnice. V závěru kapitoly je stručně popsán základní algoritmus i algoritmy pro implementaci různých typů okrajových podmínek. Ve čtvrté kapitole se autor zabývá metodou řešení turbulentního proudění zvanou Large Eddy Simulation (LES) a její algoritmicizací užitím Smagorinského subgridního modelu. V závěru kapitoly jsou popsány principy implementace této techniky do lattice Boltzmannovy metody a okrajových podmínek na stěnách výpočtové oblasti. Následuje kapitola diskutující numerické schéma řešení s ohledem na stabilitu LBM. Šestá kapitola je věnována dvěma přístupům ke zjemňování výpočtové sítě – hierarchickému zjemňování na síti bloků obsahující stejný počet uzlů ve všech třech směrech a zjemňování použitím neuniformní výpočetní sítě, vhodnému pro výpočetní modely s dominantním rozměrem v axiálním směru. Samostatná kapitola se týká validace vyvinutých algoritmů i celého řešiče, kdy program byl úspěšně otestován na třech úlohách, u nichž je k dispozici experimentální řešení. V poslední kapitole, jsou uvedeny výsledky výpočtu pro geometrické modely části dvou konstrukčně odlišných modifikací PS TVSA-T, z nichž PS TVSA-T.mod.1 jsou aktuálně provozovány na jaderné elektrárně Temelín. V závěru je provedeno stručné shrnutí obsahu předchozích kapitol a jsou zde uvedeny další oblasti využití vyvinutých algoritmů i celého řešiče v oblasti jaderné energetiky.

Hodnocení práce

Předložená disertační práce je kompaktní, logicky členěná do navazujících kapitol, které poskytují dostatečný přehled o řešené problematice. Svým rozsahem, formou i obsahem odpovídá požadavkům kladeným na disertační práci.

Za hlavní přínos předkládané disertační práce pro obor numerické simulace proudění považují algoritmizaci a aplikaci relativně nové metody řešení proudění, která ve většině komerčních CFD programech dosud není implementována. Oceňuji, že autor v práci využil významné přednosti této metody, kterou je paralelizace a možnost optimalizace výpočtového kódu, což umožňuje provádět simulace turbulentního proudění na relativně velkých modelech a pro delší časové intervaly. Autor na testovacích úlohách jednoznačně prokázal správnost vyvinutých algoritmů i celého řešiče.

Praktická využitelnost programu v průmyslové praxi je pak doložena jeho aplikací na modely části dvou modifikací PS typu TVSA-T, provozovaného na jaderné elektrárně Temelín. Model zahrnuje malou oblast jednoho palivového souboru, obsahující buňky v okolí 7 palivových proutků v délce 350 mm a příslušnou část kombinované (modifikace TVSA-T.mod.1), respektive distanční plus mísící mřížky (modifikace TVSA-T.mod.2). Na hranici výpočtové oblasti je v obou případech předepsána Neumannova okrajová podmínka:

$$\frac{\partial \mathbf{u}_t}{\partial \mathbf{n}} = 0$$

kde \mathbf{n} je normálový vektor stěna a \mathbf{u}_t je vektor rychlosti proudění.

Nutno dodat, že PS typu TVSA-T obsahuje celkem 312 palivových proutků délky 3900 mm, a celá aktivní zóna reaktoru typu VVER 100 je sestavena ze 163 palivových souborů. Vytvořené výpočtové modely proto detailně popisují turbulentní proudění pouze v bezprostředním okolí mřížek. V tomto ohledu jsou prezentované výsledky dílčím příspěvkem k problematice GTFR ve smyslu vyloučení, že by turbulentní proudění v oblasti mřížek bylo zdrojem buzení palivových proutků. Vybuzení kmitání palivových proutků a tedy i jev GTFR pravděpodobně souvisí spíše s jejich příčným obtékáním. V této souvislosti by bylo jistě přínosné aplikovat program i na model části PS typu TVSAT vystavený příčnému proudění.

Z hlediska přehlednosti, formálního zpracování a jazykové úrovně je práce na vysoké úrovni. Lze zmínit pouze pár drobných připomínek:

- strany 68 a 69 – správně je „Lagrangeova interpolace (koeficienty)“ namísto „lagrangeova...“
- strany 99 až 104, 112, 113, 115 – správný termín je „výkonová spektrální hustota“ namísto používaného termínu „spektrální výkonová hustota“
- obrázky 61 až 68 – zmatečné jednotky dB/Hz v popisu svislých os grafů

Další věcné připomínky a komentáře mám ke kapitole 2:

- strana 20 – provozovanou náhradou za palivový soubor V-Vantage-6 byl PS typu TVSA-T; palivový soubor TVSA-T.mod.1 byl až následnou modifikací tohoto typu
- strana 21 – lze diskutovat o názoru, že omezení příčných toků mezi palivovými soubory v aktivní zóně patří mezi *nevýhody* výztužných úhelníků PS TVSA-T
- strana 26 – uvolnění palivových proutků nesouvisí s nedodržením výrobních tolerancí palivových proutků a distančních mřížek, neboť tyto musí být vždy dodrženy; uvolnění je paradoxně důsledkem jevu bobtnání palivových tablet, ke kterému dochází během provozu PS v reaktoru

Autor v rámci možností publikoval v letech 2011 až 2017 na konferencích i v odborném časopise dílčí výsledky, bezprostředně se vztahující k tématu disertační práce. Přehled publikací, ve kterých byla práce prezentována odborné veřejnosti tak v dostatečné míře prokazuje i kvalitu předkládané disertační práce.

Závěr

Předloženou práci považuji za velmi kvalitní a prokazující předpoklady autora k další samostatné vědecké práci. Proto disertační práci *Numerická simulace proudění chladiva v palivovém souboru reaktoru VVER1000 pomocí lattice Boltzmannovy metody* bez jakýchkoliv pochybností **doporučuji k obhajobě.**

V Plzni dne 27. února 2018



Ing. Pavel Macák, Ph.D.
ŠKODA JS a.s.
Orlík 266, 316 00 Plzeň

