

Prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD.
STU v Bratislave, Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

OPONENTSKÝ POSUDOK DIZERTAČNEJ PRÁCE

Doktorand: **Ing. Pavel Tichý**

Téma dizertačnej práce: **Study of Accelerator-Driven Subcritical Setups Determined for Testing of Transmutation Possibilities**

(Studium urychlovačom řízených podkritických sestav určených pro testování možností transmutace)

Študijný program: Aplikace přírodných věd

Študijný odbor: Jaderné inženýrství

Školiteľ: RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

Oponentský posudok som vypracoval na základe písomnej žiadosti dekana ČVUT - FJFI v Prahe, pána prof. Ing. Igora Jexa, DrSc. zo dňa 5. 6. 2020.

Posudzovaná práca je napísaná v angličtine, obsahuje 118 strán textu vrátane abstraktov, obsahu práce, zoznamov skratiek, tabuliek (32), obrázkov (99) a 162 referencií. Priložené sú prílohy (8) na ďalších 36 stranách prevažne s výsledkami experimentov a výpočtových simulácií vo forme tabuliek a obrázkov.

Práca predstavuje v súčasnosti aktuálnu oblasť výskumu transmutačných technológií. Sú to spalačné terče ožarované zväzkami vysokoenergetických protónov a deuterónov s vplyvom okolitého podkritického blanketu (obálky) v rámci medzinárodnej spolupráce na experimentálnych zariadeniach v SÚJV Dubna. Je zameraná na experimentálne získanie dát a nových poznatkov o generovanom neutrónovom, protónovom a deuterónovom poli v rôznych experimentálnych zostavách spalačných zdrojov, pričom je to podporené porovnaním so simuláciami pomocou výpočtovej metódy Monte Carlo. Nové a spresnené vedecké informácie môžu byť v budúcnosti využité pri väčších projektoch zameraných na výskum urychľovačom riadených transmutačných systémov. Z tohto pohľadu je **téma dizertačnej práce určite vysoko aktuálna a z hľadiska poznatkov o možných zostavách v týchto experimentoch veľmi zaujímavá a prospešná.**

K predloženej dizertačnej práci a k postupom a metódam riešenia úloh, ktoré si doktorand zvolil pri dosahovaní cieľov svojej práce a k výsledkom dizertácie mám nasledujúce poznámky:

Práca je rozdelená do 9 kapitol, ktoré zapadajú do **požadovaného členenia dizertačných prác**. Obsahuje v **úvodnej kapitole ciele dizertačnej práce** a stručnú analýzu historického vývoja a aj **súčasného stavu transmutačných technológií** vo svete. Podrobnejšie sa autor venuje doterajšiemu výskumu systémov ADS v SÚJV Dubna. Stručne, ale výstižne opísal jednotlivé doterajšie experimentálne podkritické zostavy (GAMMA-2 a 3, Energy plus Transmutation (E+T), QUINTA a BURAN), ktoré sa tu využili, resp. sa pripravili na ožarovanie zväzkami relativistických protónov a deuterónov.

Ďalej (akoby **v rámci zvolených metód spracovania** dizertačnej práce) sa venoval získavaniu a vyhodnoteniu údajov zo spalačných zostáv a ním vykonaným simuláciám. Na získanie experimentálnych dát z toku neutrónov, deuterónov a protónov využíval **sériu aktivačných detektorov na báze tenkých hliníkových fólií, ktoré boli analyzované metódou polovodičovej gamaspektrometrie** so štandardnými softvérmi Genie 2000 a Maestro-32 a ďalšími špeciálnymi programovými balíkmi. Záver druhej kapitoly je venovaný simulačným postupom a použitému transportnému kódu MCNPX s použitými fyzikálnymi modelmi a konkrétnymi knižnicami dát. Ďalšie dve kapitoly sa **zaoberajú samotnými experimentami s podkritickými zostavami E+T a QUINTA**. Porovnal tu aj svoje **MC simulácie voči experimentálnym hodnotám**. V piatej časti na základe získaných údajov **vypracoval citlivostnú analýzu nepresností popisu geometrie primárneho zväzku na zostave QUINTA a analyzoval presnosť (správnosť) a možnosti využitia a testovania výpočtového nástroja MCNPX 2.7.0** v centrálnych častiach zostavy a ich okolí. Nasledovníkom zostavy **QUINTA je zariadenie BURAN** s 20-tonovým blanketom z ochudobneného uránu, kde sa

v súčasnosti pripravujú experimenty. V tejto časti sú aj **výsledky simulácií chovania tejto novej zostavy** pre neutrónové toky s uránovým, oloveným aj uhlíkovým terčom pri rôznych energiách dopadajúcich protónov a deuterónov. **Výsledky energetických neutrónových spektier** sú obsahom šiestej časti práce. V nasledujúcej kapitole sú **porovnané simulácie neutrónových tokov oboch zostáv** a boli ocenené možnosti realizácie budúcich experimentov. Predposledná kapitola je venovaná experimentu s ožarovaním oloveného spalačného terča pripravovaného pre zostavu BURAN, na ktorom autor uskutočnil **“benchmarkové” testovanie kódu MCNPX 2.7.0**. V poslednej kapitole sú **zhrnuté a zhodnotené rozsiahle výsledky dizertácie**.

Cieľmi dizertácie boli jednotlivé postupné kroky (uvedené vyššie v jednotlivých kapitolách) a získanie nových poznatkov o terčových spalačných zostavách pre systémy ADS, ktoré sú obsahom spomínaných kapitol v dizertačnej práci. **Na základe realizovaných experimentov, simulácií a získaných výsledkov môžem konštatovať, že práca splnila všetky zadané ciele.**

Vedecký prínos doktoranda vidím hlavne v jeho významnom podiele na experimentálnom skúmaní prahových reakcií na rôznych aktivačných vzorkách a príprave úplne nových simulácií s novou verziou MC kódu pre experimenty na spalačnej zostave E+T pri rôznych energiách protónových a deuterónových zväzkov. Z ďalších prínosov sú to Monte Carlo simulácie produkcie rádionuklidov a neutrónových tokov v uránovom spalačnom terči QUINTA ožiarenom 4 a 8 GeV-ovým deuterónovým a taktiež protónovým zväzkom s energiou 660 MeV, kde bol potvrdený aj vplyv presnosti popisu geometrie zväzku iónov. Prínosom je získaná citlivostná analýza výsledkov simulácie pre aktivačné vzorky v závislosti od ich polohy od primárneho zväzku. Z ďalších prínosov je to predikcia charakteristík správania neutrónov pri budúcom ožarovaní spalačnej zostavy BURAN získaná zo simulácií a porovnanie rozdelenia neutrónov a ich úniku zo zostáv QUINTA a BURAN. V neposlednom rade je veľkým prínosom aj informácia o výbornej zhode jeho Monte Carlo simulácií a získaných dát z prípravného experimentu s oloveným spalačným terčom v zostave BURAN.

Podľa predložených výsledkov dizertačnej práce získaných pomocou celého radu experimentov a simulačných metód jadrového inžinierstva možno povedať, že priniesli nové poznatky, ktoré sú dôležité z hľadiska základného aj aplikovaného výskumu a sú prínosom pre rozvoj študijného/vedného odboru Jadrové inžinierstvo.

Formálna úprava dizertačnej práce je na vysokej úrovni, bez chýb a nemám k nej pripomienky.

K dizertačnej práci mám tieto pripomienky a otázky:

- V práci som postrádal dôležité informácie pre transmutáciu o výt'azku neutrónov zo spalačných reakcií na terčoch z U, Pb, resp. C pri rôznych použitých energiách dopadajúcich protónov a deuterónov a ich porovnanie so súvisiacou zmenou neutrónového poľa v okolí jednotlivých spalačných zostáv.
- Existuje nejaká iná možnosť generovania vhodných prierezov nad 1 GeV, ako je model INCL4.2 uvedený na s. 64? Vyhodnotili ste vplyv tejto energetickej oblasti na celkové vlastnosti simulácie?
- Potreba presného popisu geometrie lúča je v práci niekoľkokrát uvedená. Vysvetlite, aké parametre sú rozhodujúce pre každé experimentálne nastavenie? Odhadnite ich vplyv na výsledky simulácie.
- Vysvetlite príčinu tvaru priebehov neutrónového toku na centrálnej osi v uránovej časti zostáv QUINTA a BURAN na s. 94.
- Kde vidíte najväčšiu výhodu systémov ADS v súvislosti s transmutáciou minoritných aktinoidov v porovnaní s rýchlymi reaktorovými systémami? Môžete porovnávať ekonomiku a jednoduchosť systémov ADS vs rýchle reaktory s vhodnými blanketmi (napr. ochudobneným uránom)?
- Ako vidíte perspektívu týchto ADS systémov pre priemyselné využitie transmutačných technológií, resp. stavby prototypu transmutora pre transmutáciu nebezpečných rádionuklidov vo svete?

Záver: Predložená dizertačná práca je kvalitná a pôvodná. (Splnenie kritéria o kontrole originality som nemohol posúdiť, lebo mi protokol nebol doručený). Autor preukázal výbornú teoretickú prípravu, a taktiež výborne zvládol náročné simulačné výpočty a experimenty a aj interpretáciu získaných výsledkov. V databáze WOS, resp. SCOPUS má 13 záznamov, prevažne z impaktovaných (karentovaných) vedeckých časopisov. Dizertant je v 1 článku prvým autorom, podobne v 1 článku v poradí druhým autorom zo širšieho kolektívu. Eviduje aj príspevky v zborníkoch z medzinárodných konferencií. Výsledky jeho práce prispeli k riešeniu dôležitých medzinárodných projektov. **S ohľadom na uvedené skutočnosti odporúčam dizertačnú prácu k obhajobe a po úspešnom absolvovaní obhajoby navrhujem udeliť Ing. Pavlovi Tichému titul doktor filozofie (Ph.D.) v študijnom odbore Jadrové inžinierstvo.**