

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Šimon Majer



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**ANALÝZA TEPLOTNÍHO POLE PODKRITICKÉHO
JADERNÉHO REAKTORU ŘÍZENÉHO URYCHLOVAČEM**

THE TEMPERATURE FIELD ANALYSIS OF THE SUBCRITICAL ACCELERATOR-DRIVEN REACTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Majer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Svoboda

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Šimon Majer

ID: 173691

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Analýza teplotního pole podkritického jaderného reaktoru řízeného urychlovačem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše problematiky podkritických jaderných reaktorů
2. Možnosti měření teploty ve spalačném terči, přesnost měření, diskuse nad minimalizací rozměrů měřicí sondy
3. Simulace spalačného terče QUINTA v programu Inventor
4. Výpočet přestupu tepla při simulovaném ozařování terče protony o energii 660 MeV

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 5.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Josef Svoboda

Konzultant: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cieľom bakalárskej práce je diskutovať problematiku podkritických jadrových reaktorov, popísať možnosti merania teploty, vytvoriť model spalačného terča QUINTA v programe Inventor a uskutočniť výpočet pomocou programu Ansys. Teoretická časť je zameraná na jadrovú energetiku a jej možnosti do budúcnosti a plynule prechádza do problematiky urýchľovačom riadených systémov (ADS), kde diskutuje o možnosti využitia daného systému. Práca je spracovaná z pohľadu elektroenergetiky, so zameraním na problematiku generovania a možnosti monitorovania tepla. Sú tu diskutované možnosti merania teploty za účelom výpočtu a simulácie prestupu tepla. Praktická časť bakalárskej práce je spracovaná s pomocou Spojeného ústavu jadrového výskumu v Dubne, kde prebieha výskum zameraný na ADS. Vstupné dáta a veľkosť geometrie boli poskytnuté výskumným tímom z SÚJV a boli použité pre simuláciu prestupu tepla pomocou programu Ansys. Výsledky zo simulácie sú graficky spracované v poslednej kapitole bakalárskej práce.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

transmutácia, spalačný zdroj, spalačná reakcia, ADS, QUINTA, Ansys, prestup tepla

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to discuss the problems of accelerator driven system, to describe the possibilities of temperature measurement, to create model of the spallation target QUINTA target in the program Inventor and to perform the simulation by using the Ansys software. The theoretical part is focused on nuclear energy and its potential for the future and continues smoothly to the issue of accelerator driven system (ADS), where it discusses the possibilities of using mentioned system. The thesis is processed from the point of view of electrical energy, focusing on generation issues and the possibility of heat monitoring. The possibilities of temperature measurement are discussed here for calculation and simulation of heat transfer. The practical part of the bachelor's thesis is processed with the help of the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, where the ADS research is in process. The input data and the size of the geometry were provided by the JINR research team and were used to simulate heat transfer by using the Ansys program. The results of the simulation are processed graphically in the last chapter of the bachelor thesis.

KEYWORDS

transmutation, spallation source, spallation reaction, ADS, QUINTA, Ansys, heat transfer

MAJER, Šimon *Analýza tepelného poľa podkritického jadrového reaktoru riadeného urýchľovačom*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, Ústav elektroenergetiky, 2017. 52 s. Vedúci práce Ing. Josef Svoboda

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Analýza tepelného poľa podkritického jadrového reaktoru riadeného urýchľovačom“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce páňovi Ing. Josefovi Svobodovi, za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| Zoznam skratiek | 9 |
| Úvod | 11 |
| 1 Analýza problematiky podkritických jadrových reaktorov | 12 |
| 1.1 Jadrová energia | 12 |
| 1.1.1 Jadrová elektráreň | 13 |
| 1.1.2 Použité jadrové palivo | 16 |
| 1.1.3 Rozdelenie jadrových reaktorov | 18 |
| 1.2 Urýchľovačom riadený systém | 21 |
| 1.2.1 Výhody a nevýhody systému ADS | 22 |
| 1.2.2 Aktuálna situácia v ADS | 23 |
| 1.2.3 SÚJV a jadrový výskum v Dubne | 25 |
| 2 Možnosti merania teploty v spalačnom terči | 28 |
| 2.1 Prestup tepla | 28 |
| 2.2 Možnosti merania teploty | 30 |
| 2.3 Termočlánky | 33 |
| 2.3.1 Výhody a nevýhody termočlánkov | 33 |
| 2.3.2 Typy termočlánkov | 34 |
| 2.3.3 Popis merania v SÚJV | 36 |
| 3 Simulácia spalačného terča | 38 |
| 3.1 Vytvorenie geometrie v programe Inventor | 38 |
| 3.2 Vstupné dáta tepeného výkonu | 40 |
| 3.2.1 Vstupné hodnoty z MCNPX | 40 |
| 3.3 Výpočet tepelného poľa pomocou programu Ansys | 41 |
| 3.3.1 Ansys Workbench | 41 |
| 3.3.2 Spracovanie modelu QUINTA | 42 |
| 3.4 Analýza tepelného poľa | 45 |
| 3.4.1 Zhodnotenie výsledkov | 48 |
| 4 Záver | 49 |
| Literatúra | 50 |

ZOZNAM OBRÁZKOV

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Predpokladaný a skutočný inštalovaný výkon v JE, prepracované z [1] | 13 |
| 1.2 | Jadrová elektráreň Temelín, prebrané z [7] | 14 |
| 1.3 | Štiepenie jadra uránu z uvedením uvoľňovaných energií, prebrané z [1] | 15 |
| 1.4 | Schéma hlbinného úložiska v Yucca Mountains USA, prebrané z [8] | 17 |
| 1.5 | Generácie jadrových reaktorov, prepracované z [28] | 19 |
| 1.6 | Schéma urýchľovačom riadeného transmutoru, prepracované z [4] | 21 |
| 1.7 | Návrh komplexu NICA, prebrané z [1] | 26 |
| 1.8 | QUINTA, prebrané z [29] | 27 |
| 2.1 | Termočlánok | 33 |
| 2.2 | Meranie na spalačnom terči QUINTA, prebrané z [29] | 37 |
| 3.1 | Uránový valec | 38 |
| 3.2 | Sekcia 1 (vľavo), Sekcia 2–5 (vpravo) | 39 |
| 3.3 | Terč QUINTA bez tienenia (vľavo), s tienením (vpravo) | 39 |
| 3.4 | Graf tepelných výkonov v jednotlivých sekciách | 41 |
| 3.5 | 3-D Graf energie v 2. sekcii | 42 |
| 3.6 | Vytvorenie siete na sekcii 2. | 43 |
| 3.7 | Zobrazenie rozloženia koeficientov prestupu tepla | 44 |
| 3.8 | Rozloženie teplotného poľa 1. sekcii (vľavo) a 2. sekcii (vpravo) | 45 |
| 3.9 | Rozloženie teplotného poľa 3. sekcii (vľavo) a 4. sekcii (vpravo) | 45 |
| 3.10 | Rozloženie teplotného poľa piatej sekcie | 46 |
| 3.11 | Graf závislosti teploty na čase v stredných valcoch sekcií 2.-5. | 46 |
| 3.12 | Graf závislosti teploty na čase v jednotlivých sekciách | 47 |
| 3.13 | Rozdelenie teplôt prednej a zadnej steny sekcií 2.-5. | 47 |
| 3.14 | Graf oteplenia prednej a zadnej hliníkovej steny sekcii 2. | 48 |

ZOZNAM SKRATIEK

| | |
|--------|--|
| ABWR | Advanced Boiling Water Reactor/ Pokročilý reaktor s vriacou vodou |
| ADS | Accelerator Driven System/ Urýchlovačom riadený systém |
| ADTT | Accelerator Driven Transmutation Technology/ Urýchlovačom riadená transmutačná technológia |
| ATW | Accelerator Transmutation of Waste/ Urýchlovačom riadená transmutácia odpadu |
| CANDU | CANada Deuterium-Uranium/ Kanadský ťažkovodný reaktor |
| C- ADS | China- Accelerator Driven System/ Čína- Urýchlovačom riadený systém |
| EPR | European Pressurize Reactor/ Európsky tlakovodný reaktor |
| ESS | European Spallation Source/ Európsky trieštivý zdroj |
| EU | Európska Únia |
| FNR | Fast Neutron Reactor/ Rýchly neutrónový reaktor |
| GIF | Generation IV International Forum/ Medzinárodné fórum pre IV generáciu |
| IAEA | International Atomic Energy Agency/ Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu |
| IREN | Intense Resonance Neutron Source/ Intenzívny rezonančný neutrónový zdroj |
| J-PARC | Japan Proton Accelerator Research Complex/ Japonský výskumný komplex s protónovým urýchľovačom |
| JE | Jadrová Energetika |
| JINR | Joint Institute for Nuclear Research/ Spojený ústav jadrového výskumu |
| LWR | Light Water Reactor/ Lahkovodný reaktor |
| MCNPX | Monte Carlo N-Particle code eXtended |

| | |
|--------|--|
| MYRRHA | Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-Tech Applications/ Viacúčelový hybridný výzkuný reaktor pre high-tech aplikácie |
| E+T | Energy+Transmutation / Energia+Transmutácia |
| NICA | Nuclotron-Based Ion Collider Facility/ Iontový kolider založený na Nuklotrone |
| OMEGA | Options Making Extra Gain from Actinides/ Rozhodovanie pre maximálny výťažok z aktinoidov |
| PIP-II | Proton Improvement Plan – II/ Vylepšený protónový plán– II |
| PRIS | The Power Reactor Information System/ Informačný systém výkonov reaktorov |
| PWR | Pressurized Water Reactor/ Tlakovodný reaktor |
| RACE | Reactor Accelerator Coupling Experiments/ Experiment spojenia reaktoru s urýchľovačom |
| RAO | RádioAktívny Odpad |
| RBMK | Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj/ Kanálový reaktor veľkého výkonu |
| RIA | Reactivity Initiated Accident/ Reaktivitou zapríčinená havária |
| SAD | Subcritical Assembly in Dubna/ Podkritický reaktor v Dubne |
| SÚJV | Spojený Ústav Jadrových Výskumov |
| VVER | Vodo-vodní Energetický Reaktor |
| ZSSR | Zväz Sovietskych Socialistických republík |

ÚVOD

Vývoj civilizácie a vedecký pokrok zapríčinili, že v súčasnosti je svet závislý na jednej neodmysliteľnej komodite. Touto komoditou je elektrická energia. Každodenne využívame elektrickú energiu na rôzne účely. Stala sa pre nás neodmysliteľnou súčasťou každého dňa. Dopyt po elektrickej energii však neustále narastá. Tento nárast je predovšetkým zapríčinený zvyšujúcou sa životnou úrovňou v zaostalých krajinách a taktiež prudkým nárastom obyvateľstva.

Procesov na výrobu elektrickej energie je celý rad. Jednou z možných alternatív je energia získavaná zo štiepnej jadrovej reakcie. Tento spôsob nám je známy od druhej polovice minulého storočia a je založený na štiepení ťažkých atómových jadier na jadrá ľahšie. Po určitej dobe palivo nemá dostatok energie na výrobu tepla a stáva sa z neho použité jadrové palivo. Možnosti ako naložiť s použitým jadrovým palivom sú tri. Prvá možnosť je uloženie paliva do hlbinného úložiska. Druhá varianta spočíva v jeho prepracovaní. Poslednou možnosťou ako naložiť s použitým jadrovým palivom je jeho transmutácia. Urýchľovačom riadené systémy (ADS), ktorým sa venuje táto práca, sú založené na transmutácii.

Bakalárska práca je zameraná na analýzu tepelného poľa podkritického jadrového reaktora riadeného urýchľovačom. Skladá sa z troch častí. Prvá časť je zameraná na priblíženie problematiky použitého jadrového paliva a princíp samotného fungovania podkritického jadrového reaktora, ako aj popísanie jednotlivých projektov. Druhá časť sa venuje možnostiam merania teploty, prestupu tepla a na záver experimentálnemu meraniu na spalačnom terči QUINTA v SÚJV. Posledná časť je zameraná na vytvorenie spalačného terča QUINTA v programe Inventor, ktorý je použitý na praktický výpočet prestupu tepla v programe Ansys.

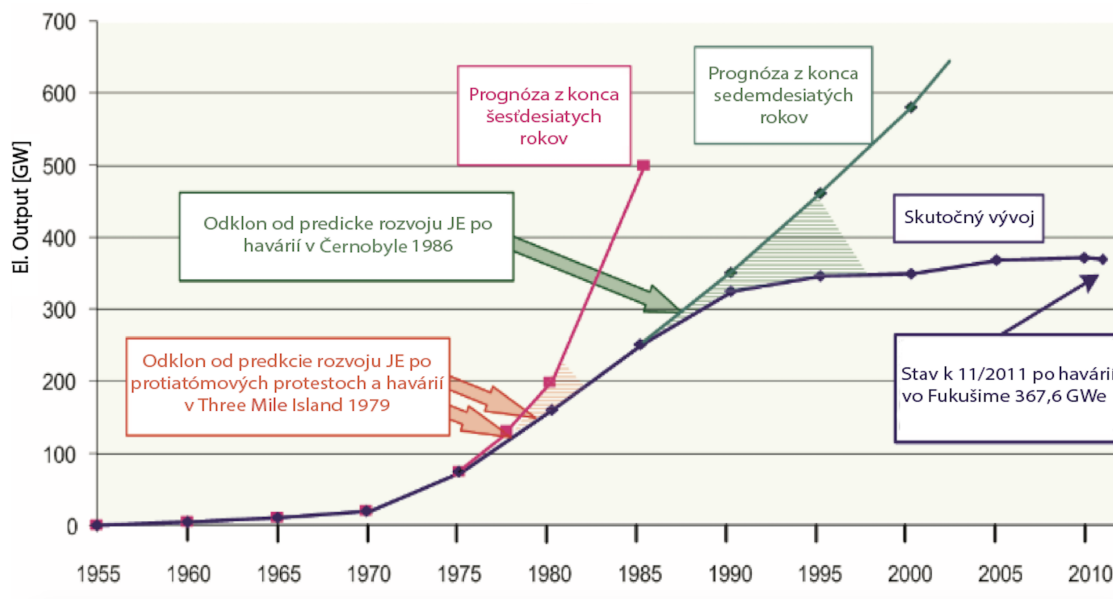
1 ANALÝZA PROBLEMATIKY PODKRITICKÝCH JADROVÝCH REAKTOROV

Už v minulom storočí sa predpokladalo, že s rastom obyvateľstva a taktiež so zvyšujúcou sa životnou úrovňou bude narastať aj spotreba elektrickej energie. Tento rast bol predpokladaný predovšetkým v Ázii a Južnej Amerike. Táto situácia viedla k otázke, ako by bolo možné zabezpečiť dostatočnú výrobu elektrickej energie. V súčasnosti sa zdroje elektrickej energie rozdeľujú na obnoviteľné, neobnoviteľné a alternatívne [1]. Medzi obnoviteľné zdroje energie patrí vodná energia, veterná energia, slnečná energia, geotermálna energia a ďalšie. Medzi neobnoviteľné zdroje patrí energia získavaná z fosílnych palív. Do poslednej skupiny patrí predovšetkým jadrová energia. [2]. Jadrová energia patrí relatívne k novým formám získavania energie. Prvý jadrový reaktor bol skonštruovaný v Chicagu 2. decembra 1942 [3] pod vedením talianskeho fyzika Enrica Fermiho, ktorý otvoril dvere do nového neprebádaného odvetvia fyziky. Bol to skúšobný reaktor, ktorý mal overiť, či je možné vôbec uskutočniť štiepnu reťazovú reakciu. Prvá jadrová elektrárňa pripojená k sieti, bola skonštruovaná v roku 1954 v Obnisku bývalom ZSSR [2].

1.1 Jadrová energia

Tento spôsob získavania energie bol príslubom možného riešenia problémov s neustále rastúcimi nárokmi na výrobu elektrickej energie. Počiatočný rozvoj a priaznivé prognózy sľubovali jadrovej energetike priaznivú budúcnosť. Avšak v osemdesiatych rokoch nastal útlm v rozvoji JE. Spočiatku v USA a neskôr aj v Európe. Je viacero dôvodov, prečo sa tomu tak stalo. Predovšetkým to zapríčinila reakcia verejnosti na havárie v Three Mile Island v USA roku 1979 a v Černobyle v roku 1986. Ďalším problémom je fakt, že štiepne produkty môžu byť zneužitú na vojenské účely [2].

V zásade najdôležitejšia otázka, ktorá vzniká pri využívaní jadrových elektrární je, ako uskladniť vyhorené palivo. Z dôvodu, že vyhorené palivo je rádioaktívne, musí byť špeciálne uložené v tzv. hlbinných úložiskách. Tieto úložiská sú budované vo veľkej hĺbke (300-1000 m), aby boli bezpečne izolované od životného prostredia, pokiaľ je palivo rádioaktívne. Tieto úložiská sú však nedostačujúcim riešením problému s rádioaktívnym odpadom. Predovšetkým z toho dôvodu záujem o jadrovú energetiku klesá a vyspelé krajiny sa upínajú skôr k obnoviteľným zdrojom [1],[2].



Obr. 1.1: Predpokladaný a skutočný inštalovaný výkon v JE, prepracované z [1]

1.1.1 Jadrová elektrárne

Podľa informačného systému sledujúceho výkon a počet inštalovaných reaktorov vo svete The Power Reactor Information System (PRIS), je ku dňu 23. 10. 2016 v prevádzke 450 jadrových reaktorov o celkovom výkone 392 GWe a ďalších 60 reaktorov je vo výstavbe[4].

V súčasnosti sa v ČR nachádzajú dve jadrové elektrárne Temelín a Dukovany. V roku 2015 spoločne vyprodukovali približne 25 TWh čo je 32,53 % [4] z celkovej produkcie elektrickej energie v ČR. Jadrová elektrárne Dukovany má štyri tlakovodné reaktory typu VVER-440 o celkovom výkone 2000 MW [4]. Jadrová elektrárne Temelín má dva tlakovodné reaktory typu VVER-1000. Obidve jadrové elektrárne používajú palivo dodávané od ruskej spoločnosti TVEL [3] ,[4],[5].

Jadrová elektrárne funguje na princípe premeny tepelnej energii na energiu elektrickú. Tepelná energia v jadrových elektrárňach je získavaná pomocou štiepnej jadrovej reakcie. Koncentrácia energie v palive je v jadrových elektrárňach násobne vyššia. Pre príklad, z 1 kg hnedého uhlia vyrobí tepelná elektrárne približne 1 kWh elektrickej energie. Jadrová elektrárne z rovnakého množstva paliva vyprodukuje približne 1 GWh. Pri riadenej štiepnej reakcii však vznikajú rádioaktívne izotopy, ktoré majú rôzne dlhý polčas rozpadu, a preto musia byť niekoľko desiatok až miliónov rokov zabezpečené proti úniku rádioaktívnych látok do životného prostredia alebo možného zneužitia[1].



Obr. 1.2: Jadrová elektrárň Temelín, prebrané z [7]

Ďalší problém jadrového reaktoru je, že napriek zastaveniu reaktoru nie je možné ukončiť tvorbu tepla v reaktore, pretože aj po odstavení reaktoru dochádza v aktívnej zóne k uvoľňovaniu tepla z rozpadu štiepnych produktov. Tým sa vytvára ďalšia tepelná energia, ktorú je potrebné bezpečne odvieť tak, aby sa z dôsledku prehrievania neporušila ochrana aktívnej zóny, ktorá by spôsobila únik radiácie. Ďalším problémom je pomerne technicky, technologicky aj ekonomicky náročný palivový cyklus [1],[2].

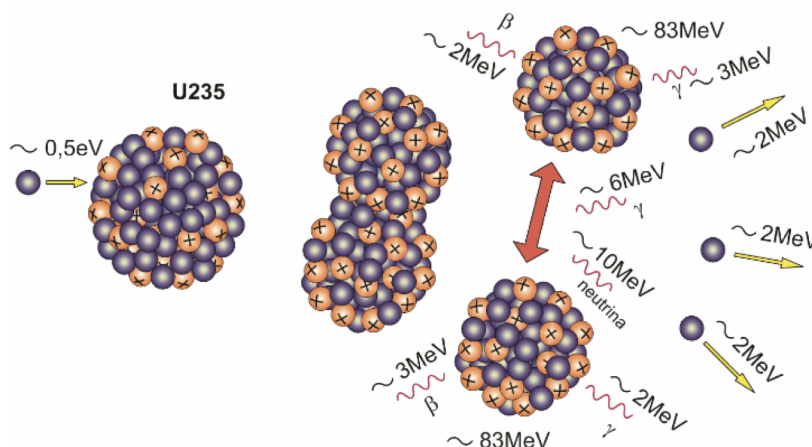
Napriek spomenutým negatívam sú jadrové elektrárne zdrojom čistej energie, ktorá je ekonomicky výhodná. Z dôvodu uzavretého palivového cyklu nevznikajú spaliny a tým je záťaž na životné prostredie minimálna. Do ovzdušia sa dostáva čistá vodná para. Z ekonomického hľadiska je elektrická energia vyrobená v jadrových elektrárňach najlacnejšia v porovnaní so všetkými ostatnými zdrojmi. Ďalšou výhodou je dlhodobá životnosť a nízke prevádzkové náklady. Výroba energie v moderných reaktoroch je dobre regulovateľná a udržuje stabilitu siete[2].

Štiepna jadrová reakcia

Štiepna jadrová reakcia je premena atómového jadra vonkajším pôsobením elementárnych častíc alebo iných jadier. Takouto časticou môžu byť fotóny, protóny, alfa častice, deutróny, ale predovšetkým neutróny. K vyvolaniu jadrovej reakcie pomocou protónov je potrebné prekonať veľmi silné Coulombove sily. Prekonanie týchto síl by bolo možné len pri zvýšení teploty okolia na niekoľko miliónov stupňov. Pre vyvolanie jadrovej reakcie za pomoci neutrónu je potrebné vyvinúť podstatne nižšiu teplotu, a preto sú v dnešnej dobe neutrónové jadrové reakcie najdôležitejšie [1].

Na jadrovú reakciu sa používajú tepelné neutróny a to z dôvodu, že účinný prierez jadra je tým väčší, čím menšia je kinetická energia neutrónov. Tepelné neutróny alebo tiež nazývané pomalé neutróny sú neutróny s malou kinetickou energiou 0,5 eV a vysokou teplotou do 6000 K. Je väčšia pravdepodobnosť, že takýto neutrón je schopný pri reakcii s izotopom ^{235}U vyvolať štiepnu reakciu [1].

Izotop ^{235}U sa štiepi na dva ľahšie rádioaktívne prvky. Okrem dvoch odštepok vznikajú aj dva až tri rýchle neutróny s energiou približne 2 MeV. Aby reťazová reakcia pokračovala je nutné, aby rýchle neutróny boli spomalené. Je potrebné znížiť kinetickú energiu na 0,5 eV. Aby došlo k požadovanému spomaleniu, je potrebné aby neutróny interagovali s jadrami moderátora a tým odovzdali časť kinetickej energie. Nedeštruktívnu reakciu neutrónov s jadrom nazývame rozptyl. Rozptyl je druh reakcie, pri ktorom sa neutróny dopadajúce na atómové jadrá moderátora priamo odrazia alebo ich jadro moderátora zachytí a uvoľní iný neutrón. Moderátor je zložený z ľahkých atómových jadier, ako je napríklad ľahká voda alebo grafit. Ďalšou reakciou sa tento proces opakuje. Celý tento cyklus sa nazýva štiepna reťazová reakcia [1],[3] .



Obr. 1.3: Štiepenie jadra uránu z uvedením uvoľňovaných energií, prebrané z [1]

Napriek tomu, že sa niektoré elektróny zachytia na konštrukcii reaktoru alebo z neho uniknú, po každej reakcii ostane viac než jeden reakcie schopný neutrón, aby sa zachovala kritičnosť reaktora. K tomu, aby štiepna reakcia bola dobre regulovateľná sa využívajú absorbátory. Sú to látky, ktoré majú schopnosť silne pohlcovať neutróny. Spravidla sú to tyče tvorené z kadmia, bóru alebo hafnia [3] .

Súčasťou jadrového reaktoru je palivo, moderátor, regulačné a bezpečnostné tyče a látky, ktoré odvádzajú teplo z aktívnej zóny [1].

1.1.2 Použité jadrové palivo

Vyhorené jadrové palivo je vedľajším produktom štiepnej jadrovej reakcie a patrí k najväčším problémom pred ktorým stojí budúcnosť jadrovej energetiky. Napriek tomu, že vývoj jadrových reaktorov napreduje, otázka čo s jadrovým odpadom stále nebola dostatočne vyriešená, pretože použité jadrové palivo má ešte energetický potenciál, ktorý v dnešnej dobe nie sme schopní využiť. Použité jadrové palivo obsahuje rádioaktívne látky, ktoré majú polčas rozpadu veľmi dlhý (milión až desať miliónov rokov). Tieto rádioaktívne látky musia byť dlhodobo bezpečne uložené.

Vyhorené jadrové palivo tvorí menej než 1 % objemu všetkých jadrových odpadov vo svete, avšak obsahuje viac než 90 % všetkej radioaktivity [5]. Pre príklad reaktor VVER 1000 (ako je napríklad v Temelíne) ročne vyprodukuje zhruba 30 ton vyhoreného jadrového paliva. Zodpovedá to zhruba $1,5 \text{ m}^3$ a to z dôvodu vysokej hustoty. Palivo vyňaté z jadrového reaktora má stále ešte 95 % nevyužitého uránu, z toho 1 % štiepneho uránu ^{235}U a 1 % štiepneho izotopu plutónia ^{239}Pu , zvyšných 5 % štiepneho produktu v dnešnej dobe pokladáme za odpad.

Rádioaktívny odpad sa podľa IAEA (International Atomic Energy Agency) delí podľa veľkosti radioaktivity do troch skupín [4]:

- nízko aktívny odpad,
- stredne aktívny odpad,
- vysoko aktívny odpad.

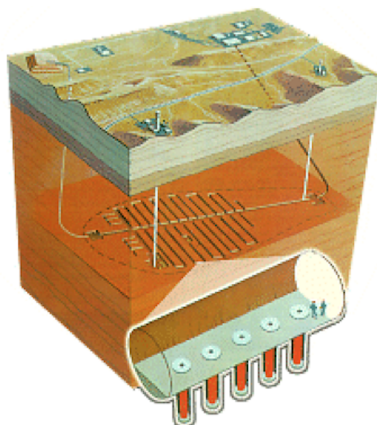
Vyhorené jadrové palivo je potrebné bezpečne uložiť. Jeho veľkosť je však obrovská (zhruba 400 000 ton vo svete) a je predpokladateľné, že objem paliva bude naďalej narastať. V súčasnej dobe sú ekologicky a ekonomicky prijateľné nasledujúce varianty nakladania s použitým palivom podľa [7]:

- trvalé úložiská,
- prepracovanie paliva,
- transmutácia.

Trvalé úložiská

Trvalé úložiská slúžia na uloženie stredne a vysoko aktívneho odpadu s dlhým polčasom rozpadu, ktoré v súčasnej dobe nie sme schopný využiť. Budujú sa vo veľkej hĺbke, aby boli izolované od okolitého prostredia a boli schopné bezpečne uschovať jadrový odpad na niekoľko tisícročí [7]. Trvalé úložiská však nie sú ekonomicky najvhodnejšie. Ich konštrukcia je pomerne zložitá. Umiestnenie musí byť v oblastiach bez

seizmickej aktivity a musia byť umiestnené mimo obytné časti. Taktiež veľká časť z vyhoreného paliva sa dá opätovne upraviť a použiť. Z týchto dôvodov sa v poslednej dobe výstavba dlhodobých úložísk odkladá na dobu, kedy bude zrejme ako sa bude s vyhoreným odpadom nakladať a akú časť budeme schopní opätovne využiť. V budúcnosti bude výstavba ďalších úložísk nevyhnutná [7],[8],[9].



Obr. 1.4: Schéma hlbinného úložiska v Yucca Mountains USA, prebrané z [8]

Prepracovanie vyhoreného jadrového paliva

Možnosť prepracovania paliva je známa od 40. rokov minulého storočia. Pre jeho technologickú a ekonomickú náročnosť je však stále využívaný len v niektorých krajinách. Cena vyťaženej uránovej rudy je stále ekonomicky výhodnejšia ako prepracovanie paliva. Využívanie prepracovania je preto skôr kvôli ekologickým dôvodom ako ekonomickým. Ide o uzavretý cyklus, pri ktorom z použitého paliva úpravou získame palivo, ktoré je opätovne použiteľné. Významný pokrok v možnosti opätovného využívania paliva je vo vývoji urýchľovačov a ich využitia. Vďaka tomu by bol možný ďalší spôsob úpravy paliva ktorým je transmutácia [8].

Transmutácia

Transmutácia je jadrová premena, pri ktorej dochádza k zmene atómového jadra. Z tohoto dôvodu pri správnom druhu transmutácii by bolo možné skrátiť dobu odkladu o mnoho rokov. Taktiež by bolo možné lepšie využiť palivo. Síce aj pri tomto spôsobe bude nutné využívať dlhodobé úložiská, ale mohol by sa zredukovať objem vyhoreného paliva, a taktiež doba, po ktorú musí byť uložené. Systémy, ktoré sa venujú separácii a transmutácii majú dve základné varianty, a to reaktory využívajúce rýchle neutróny (FNR) a urýchľovačom riadené systémy ADS (Accelerator Driven System/ Urýchľovačom riadený systém) [8].

1.1.3 Rozdelenie jadrových reaktorov

Podľa toho ako je jadrový reaktor skonštruovaný, delíme jadrové reaktory na:

- homogénny reaktor,
- heterogénny reaktor.

Homogénny reaktor

Reaktor, v ktorom je palivo rozptýlené v moderátore. Hlavnou výhodou je jednoduchá výmena aj počas chodu reaktora[1].

Heterogénny reaktor

V reaktoroch tohoto typu je palivo oddelené od moderátoru a je uložené v palivových elementoch. Dôvodom je, že v heterogénnych reaktoroch býva chladivo zároveň moderátorom. Takéto reaktory sú najpoužívanejšie[1].

Ďalej sa jadrové reaktory delia z fyzikálneho hľadiska, a to podľa energie neutrónov na[1]:

- tepelný reaktor,
- rýchly reaktor.

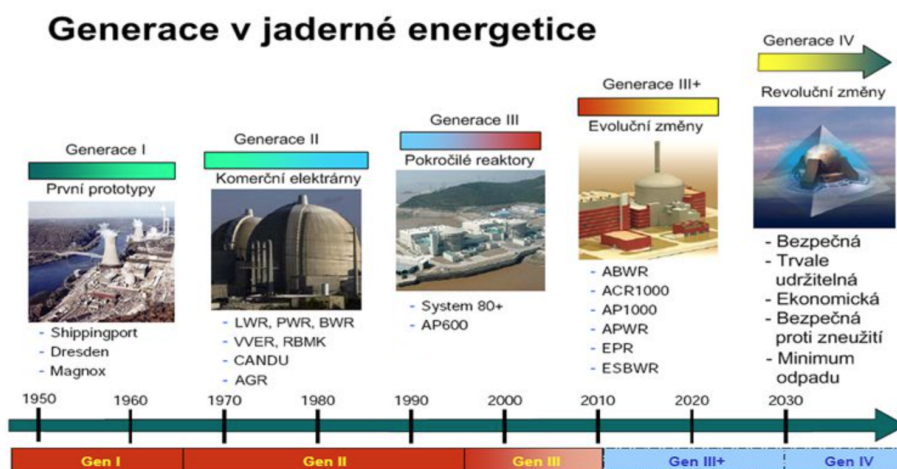
Tepelný reaktor

Tepelný reaktor je založený na princípe, že štiepna reakcia prebieha prevažne tepelnými neutrónmi. To sú, neutróny s energiou približne 0,5 eV. Vzhľadom k pomerne veľkej pravdepodobnosti zachytenia tepelného neutrónu nie je potrebný veľký počet izotopu uránu ^{235}U . V tepelných reaktoroch býva najčastejšie moderátorom voda alebo v minulosti používaný grafit[9],[2].

Rýchly reaktor

Rýchly reaktor využíva k štiepeniu rýchle neutróny o energii väčšej ako 0,1 MeV. Z tohoto dôvodu sa znižuje pravdepodobnosť záchytu neutrónov. Na dosiahnutie kritického stavu je potrebné zvýšiť koncentráciu neutrónov a počet štiepných jadier uránu ^{235}U v palive. Výhodou rýchleho reaktoru je efektívnosť štiepenia paliva. Pretože sú schopné lepšie transmutovať izotop plutónia ^{239}Pu , ktorý je prepracovaním znovu použiteľný ako palivo. Týmto spôsobom by sa dalo efektívnejšie hospodáriť s palivom [1],[9].

Najčastejšie reaktory rozdeľujeme na reaktory generácie I. až IV [1],[9].



Obr. 1.5: Generácie jadrových reaktorov, prepracované z [28]

Jadrové reaktory I. generácie sú reaktory vyrobené v päťdesiatych a šesťdesiatych rokoch minulého storočia. Tieto reaktory boli vytvorené prevažne ako prototypy a slúžili hlavne na zistenie vhodných komponentov pre chod jadrovej elektrárne. Vďaka stavbe týchto reaktorov sa vyskúšali rôzne typy moderátorov, konštrukčná stavba, spôsob chladenia alebo tiež vhodné zloženie paliva. V dnešnej dobe sa žiadny z nich nevyužíva. Jadrové reaktory II. generácie sa dajú pokladať za priamych nástupcov prvej generácie. Tieto elektrárne sa už v podstate vyrábali sériovo. Patrí sem väčšina reaktorov prevádzkovaných pre komerčnú výrobu elektrickej energie v súčasnosti. Ich konštrukcia sa opiera o osvedčené prototypy prvej generácie [2],[9].

Pod generáciu III. spadajú zdokonalené reaktory druhej generácie. Vylepšenia zahŕňajú odolnejší kontejment, vylepšené prvky aktívnej zóny a nové systémy pasívnej bezpečnosti. generácie, ale so zvýšenou úrovňou bezpečnosti a efektivity reaktorov. Majú podstatne dlhšiu životnosť a efektívnejšie spaľovanie paliva. Najnovšie jadrové reaktory, ktoré sa dnes stavajú, by mali patriť práve do tejto generácie. Štvrtá generácia jadrových reaktorov je založená na nových konceptoch, ktoré boli predstavené na medzinárodnom fóre GIF. Tieto koncepty boli zvolené vďaka ich bezpečnosti, finančnej efektivite a účinnosti využitia prírodných zdrojov [2],[9].

Stav jadrového reaktora

Predpoklad pre udržanie štiepnej reťazovej reakcie sa vyjadruje multiplikačným činiteľom. Označujeme ho písmenom k (koeficient násobenia neutrónov). Tento koeficient udáva počet voľných neutrónov jednej generácie k počtu voľných elektrónov predchádzajúcej generácie. Veľkosť tohto koeficientu nám udáva tri možné stavy jadrovej reakcie[1]:

- $k = 1$ - kritický stav,
- $k > 1$ - nadkritický stav,
- $k < 1$ - podkritický stav.

Kritický stav nastáva, keď koeficient $k = 1$. V tomto prípade je počet neutrónov v aktívnej zóne konštantný. To znamená, počet neutrónov vyprodukovaných v predchádzajúcej generácii sa rovná počtu neutrónov nasledujúcej generácie. Tento stav je v energetike žiadaný a jeho stálosť zabezpečujú regulačné tyče. Nadkritický stav nastáva v prípade, keď koeficient k je väčší ako jedna a počet neutrónov exponenciálne rastie s každou ďalšou generáciou. Klasickým príkladom takejto štiepnej reakcie je jadrová bomba alebo prípad výbuchu v Černobyle v roku 1986 [1],[3].

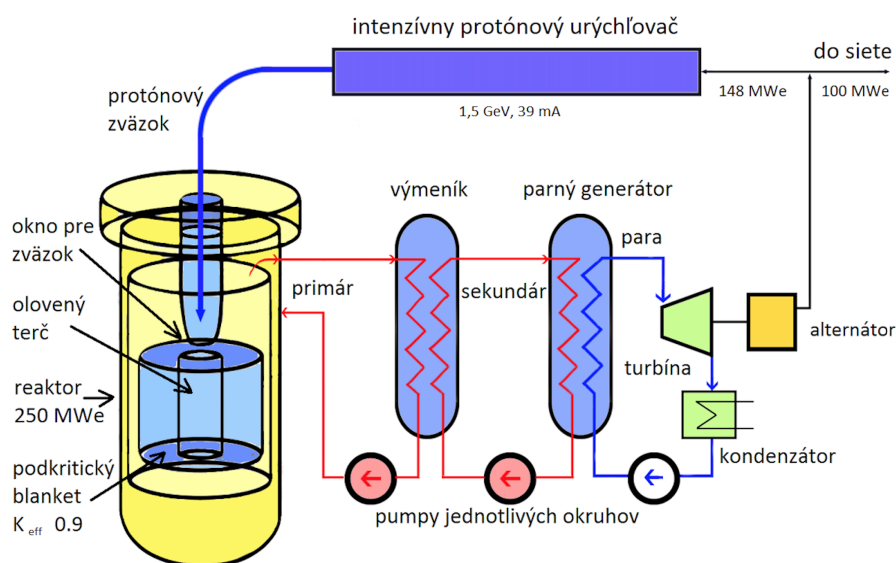
Podkritický stav vzniká v prípade, keď je koeficient $k < 1$. Pri podkritickom stave je počet neutrónov nasledujúcej generácie menší ako počet neutrónov v predchádzajúcej generácii. V takomto prípade je potrebné externe dodávať neutróny pre pokračovanie štiepnej reakcie. Jednou z možností je využiť protónový urýchľovač. Urýchľovač dodáva potrebnú energiu, aby sa koeficient k blížil k jednej. Systém, ktorý funguje na tomto princípe je popísaný v nasledujúcom odstavci [1],[3].

1.2 Urýchľovačom riadený systém

Anglicky označovaný ADS (Accelerator Driven System). Prvýkrát sa úvahám o využívaní urýchľovačom riadeného transmutoru venoval C. Bowman v Los Alamos (USA) [10].

Takýto urýchľovačom riadený transmutačný systém, ďalej označovaný len ADS, má tri základné časti:

- urýchľovač častíc,
- terč,
- reaktor.



Obr. 1.6: Schéma urýchľovačom riadeného transmutoru, prepracované z [4]

Urychľovač častíc

Ako urýchľovač častíc sa v ADS využíva prevažne protónový urýchľovač. Ďalším možným prvkom pre využitie sú napríklad deutерóny, zvyšujú sa však nároky na výstavbu urýchľovača [10]. Projektily s väčším nábojom nie sú vhodné, pretože pri zväčšovaní náboja sa stále viac energie premieňa v teplo a nevytvárajú sa žiadne ďalšie voľné neutróny. Vhodný urýchľovač je taký, ktorý dá protónom kinetickú energiu okolo 1 GeV, pri prekročení tejto energie efektívnosť klesá [10]. Veľkým problémom urýchľovača je, že protóny, ktoré vyžaruje, sa pohybujú v zhlukoch a vznikajú následne medzery. V systéme ADS by bolo potrebné tieto zhluky rovnomerne rozdeliť, aby tak dosahovali rovnomernú produkciu neutrónov. Túto možnosť nám vedľa

zabezpečiť skôr urýchlovače lineárne než kruhové. Lineárny urýchlovač pre tento účel by sa mal v budúcnosti nachádzať aj v EU vďaka projektu ESS (European Spallation Source). V pôvodnom projekte sa predpokladalo vybudovanie lineárneho urýchlovača, ktorý by produkoval protóny s energiou 1,334 GeV, čo by mohlo byť dostatočné pre riešenie danej problematiky [10],[11].

Terč

Spalačný terč musí byť tvorený z vhodného ťažkého kovu, ktorý pri ostreľovaní ľahkými časticami uvoľní čo najväčšie množstvo neutrónov. Problém, ktorý vzniká pri tomto ostreľovaní je riešenie odvodu tepla pri zrážke. Táto teplota sa rádovo pohybuje v desiatkach megawattov. Tento problém by mohlo vyriešiť tekuté zloženie terča. Látka, ktorá by terč mohla tvoriť, môže byť tekuté olovo alebo zmes tekutého olova a bizmutu [10],[11].

Reaktor

Poslednou časťou ADS je reaktor, podkritická zóna. Tento reaktor bude musieť obklopuvať terč tak, aby bol schopný uvoľnené neutróny využiť na štiepnu reakciu. Z dôvodu, že v ADTT je reakcia len málo závislá na neutrónoch vzniknutých po štiepnej reakcii, a preto je málo citlivá na zloženie paliva a odpadu [10], [11].

1.2.1 Výhody a nevýhody systému ADS

Jednou zo základných výhod ADS je jeho bezpečnosť, ktorá fyzikálne znemožňuje reaktivitou zapríčinenú haváriu (RIA), pretože v prípade odstránenia externého zdroja neutrónov proces štiepenia zanikne. Využívanie urýchlovača podstatne znižuje účinnosť reaktoru a zároveň zvyšuje náklady na výstavbu, čím z ekonomického hľadiska podstatne zaostáva za klasickými jadrovými reaktormi. Ďalšou veľkou výhodou ADS je, že takýto reaktor je schopný ďalej transmutovať tórium na ^{233}U a okamžite tento urán spotrebovať bez úprav ako palivo [8], [10], [11].

Najvýznamnejšia výhoda ADS sa javí v možnosti premeny dlhodobých rádioaktívnych prvkov na prvky s podstatne kratším polčasom rozpadu. Táto výhoda by mohla v budúcnosti znamenať riešenie otázky čo s použitým jadrovým palivom a z tohto dôvodu môže ADS v budúcnosti pomôcť k zlepšeniu využitia jadrovej energie. Skôr ako však tento systém bude plne schopný fungovať, musí byť schopný sa vysporiadať s viacerými problémami. Jeden zo zásadných problémov je, chladenie terča. Ďalším problémom je oddelenie stabilných a krátkodobých produktov štiepnej reakcie od produktov, ktoré musia naďalej ostať v reaktore. Problém, ktorý

bol už spomínaný skôr, je jeho malá účinnosť a taktiež prechod protónov z vákua, ktoré sa nachádza v urýchľovači, do aktívnej časti reaktora [8],[11].

1.2.2 Aktuálna situácia v ADS

Vývojom prichádzajú nové možnosti, ktoré by mohli priniesť riešenia čo s vyho- reným jadrovým palivom. Dôraz sa predovšetkým kladie na reaktory s rýchlymi ne- utrónmi a na urýchľovačom riadené systémy(ADS). Tieto dva koncepty by v budú- nosti mohli priaznivo ovplyvniť vývoj jadrovej energetiky, a tým následne aj problém s dopytom po elektrickej energii.

Prvý zo spomenutých princípov, rýchly reaktor, nemá žiadny moderátor. Už z názvu vyplýva, že štiepna reakcia prebieha za pomoci rýchlych neutrónov. Ako chladivo sa využíva plyn (prevažne He), kvapalné olovo, kvapalný sodík alebo su- perkritická voda (voda o tlaku 25 MPa a s teplotou 510-550 °C)[8].

Druhá možnosť, na ktorú sa táto práca zameriava, je použitie ADS. Systém urýchľovačom riadeného systému je známy od polovici minulého storočia a v budú- nosti by mohla zohrať dôležitú rolu. Veľkou výhodou ADS oproti reaktorom s rých- lyimi neutrónmi je, že ako už bolo spomenuté, ADS funguje pod úrovňou kritickosti, a to je z hľadiska bezpečnosti veľká výhoda[7],[8],[11].

História a budúcnosť urýchľovačom riadených transmutorov

Prvý projekt, ktorý sa zaoberal problematikou bol pod názvom Urýchľovačom riadená transmutácia odpadu (Accelerator Transmutation of Waste – ATW). Tento program bol vedení C. D. Browmanom v Los Alamos v USA. Výskum bol zameraný hlavne na možnosť skrátenia polčasu rozpadu pri niektorých produktoch štiepnej reakcie s veľkým polčasom rozpadu. Súčasťou tohoto projektu bol aj urýchľovač častíc s energiou 1,6 GeV a prúdom 250 mA [10],[7].

Druhý projekt pod vedením C. Rubbia bol uskutočnený vo Švajčiarskom CERN- e. Tento projekt bol zameraný na produkciu energie. Tento výskum bol zameraný na možnosti štiepenia thoria a uránu v podkritických reaktoroch. Vďaka tomuto výskumu sa zistilo, že pred tým ako bude možné využívať tento systém, je potrebné previesť ešte mnoho výskumov a experimentov [7],[8].

Ďalší výskum sa týkal urýchľovačom riadeného systému, ktorý by bol schopný premeniť plutónium. Tento výskum bol vedený hlavne na zníženie zásob plutónia, a to hlavne z dôvodu možného zneužitia na vojenské účely[8].

Ukončené a prebiehajúce projekty s využitím ADS

Medzi ukončené výskumy zaradujeme[8]:

- YALINA,
- Project X,
- RACE,
- SAD.

Yalina začal v roku 1997 v Bieloruskom meste Minsk. Projekt bol založený na podkritickom reaktore s nulovým výkonom a bol riadený neutrónovým zdrojom. Ako zdroj bol použitý nízko energetický urýchlovač na deuteróny. Projekt bol navrhnutý na vyšetrenie statických a dynamických neutrónových vlastností urýchlovačom riadených podkritických reaktorov. Taktiež sa venoval lepšiemu pochopeniu používania systémov ADS. Projekt skončil v roku 2008 [7],[8].

Project X je urýchlovačom riadený systém, ktorý mal byť vystavaný v USA neďaleko Chicaga. Tento projekt mal byť založený na využívaní protónového urýchlovača a mal slúžiť ako na vedecké účely, tak aj na energetické. Program sa mal venovať vzniku vesmíru. Projekt bol však definitívne zrušený v roku 2014. [8].

RACE (Reactor Accelerator Coupling Experiments) je projekt, ktorý bol iniciovaný a realizovaný na Univerzite v Idaho v centre na vývoj urýchlovačov. Pri tomto výskume sa využíval elektrónový urýchlovač, ktorého zväzky s výkonom 1 kW narážali do kovového terča čím spôsobili generovanie fotónov, ktoré následne vyrážali z terča neutróny. Projekt RACE bol dôležitým krokom v rámci vývoja ADS [8].

SAD (Subcritical Assembly in Dubna) výskum prebiehal v SÚJV (Spojený ústav jadrových výskumov) v meste Dubna v Rusku. Tento výskum bol jeden z plánovaných projektov v tomto ústave. Tento projekt mal využívať Fázotron s energiou 660 MeV a mal mať terč, ktorý by bolo možné vymieňať. Plány na realizáciu boli kompletne zhotovené. Napriek tomu k realizácii nedošlo a to z dôvodu požiaru na Fázotrone. V súčasnej dobe sa jeho uskutočnenie neplánuje [7].

Projekty, ktoré sú vo výstavbe alebo sú plánované v budúcnosti[7],[8]:

- ESS (European Spallation Source),
- IREN (Intense Resonance Neutron Source),
- J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex),
- MYRRHA (Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications),
- OMEGA (Options Making Extra Gain from Actinides),
- PIP-II (Proton Improvement Plan-II),
- NICA (Nuclotron-Based Ion Collider Facility),
- C-ADS (Chinese Accelerator Driven System).

1.2.3 SÚJV a jadrový výskum v Dubne

Spojený ústav jadrového výskumu (SÚJV), anglicky Joint Institute for Nuclear Research (JINR), sa nachádza v ruskom meste Dubna. Po skončení druhej svetovej vojny bolo rozhodnuté, že v severnej časti Moskovského kraja sa vybuduje civilné výskumné centrum. V roku 1946 sa sovietska vláda rozhodla vystavať protónový urýchľovač Synchrocyclotron a v roku 1956 bol spustený druhý urýchľovač Synchrofázotron. V tom istom roku 26. marca bol oficiálne založený spojený ústav jadrového výskumu (SÚJV). Bol založený ako výskumný ústav pre vtedajšie krajiny východného bloku a spriatelene krajiny. Na konci 70. rokov a začiatku 80. rokov bol prestavaný urýchľovač Fázotron a v 90. rokoch bol postavený Nuclotron. V súčasnej dobe je v ústave zamestnaných 1 200 vedcov z osemnástich štátov[7],[8],[12].

Urýchľovacie systémy v Dubne

Synchrofázotron ako prvý urýchľovač na svete urýchlil v roku 1970 deutrony na realistické energie. Na usmernenie zväzkov vyžarujúcich z urýchľovača boli potrebné obrovské magnety, ktorých hmotnosť bola 36 000 ton. V roku 2000 bol vyradený z používania, kvôli veľkým nákladom na jeho využívanie. V 90. rokoch nahradil Synchrofázotron Nuclotron. Nuclotron slúži na účely jadrovej a medicínskej fyziky. V tejto dobe je Nuclotron v rekonštrukcii[7],[12].

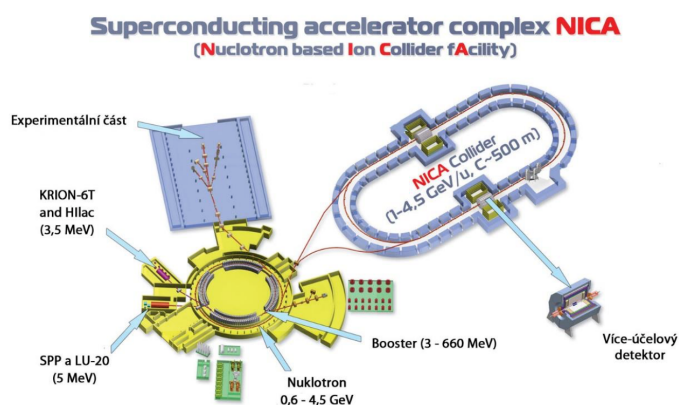
Ďalším významným systémom, ktorý sa v Dubne nachádza je Fázotron. Fázotron bol prestavaný z urýchľovača Synchrocyclotron. V minulosti patril medzi najväčšie urýchľovače na svete. V roku 2005 tu prebehol veľký požiar. Napriek tomu na ňom stále pokračujú výskumy, ktoré sú zamerané na onkologické choroby a slúži aj na ožarovanie spalačného terča[7].

IREN

Projekt IREN je vedecko-výskumný projekt v Dubne, ktorý sa plánuje už od roku 1994. Využíva sa v oblasti rezonančných energií neutrónov, rýchlych a tepelných neutrónov. Tento systém obsahuje lineárny urýchľovač LUE-200, ktorý má výkon zväzku približne 10 kW. Terč v tejto sústave sa skladá zo zliatiny wolfrámu. Výstavba IREN začala v roku 2008 [7],[8].

NICA

(Nuclotron-based Ion Collider fAcility) je výskum v Laboratóriu vysokých energií. Projekt je založený na prestavbe už spomínaného Nuclotronu. Výskum za pomoci NICA by mal slúžiť na skúmanie vlastností rôznych materiálov, riešenie problémov transmutácie vyhoreného jadrového paliva, výrobu elektriny a pokrok v časticovej fyzike. Projekt začal v roku 2010 a plánované dokončenie je na rok 2019 [7],[8],[12].



Obr. 1.7: Návrh komplexu NICA, prebrané z [1]

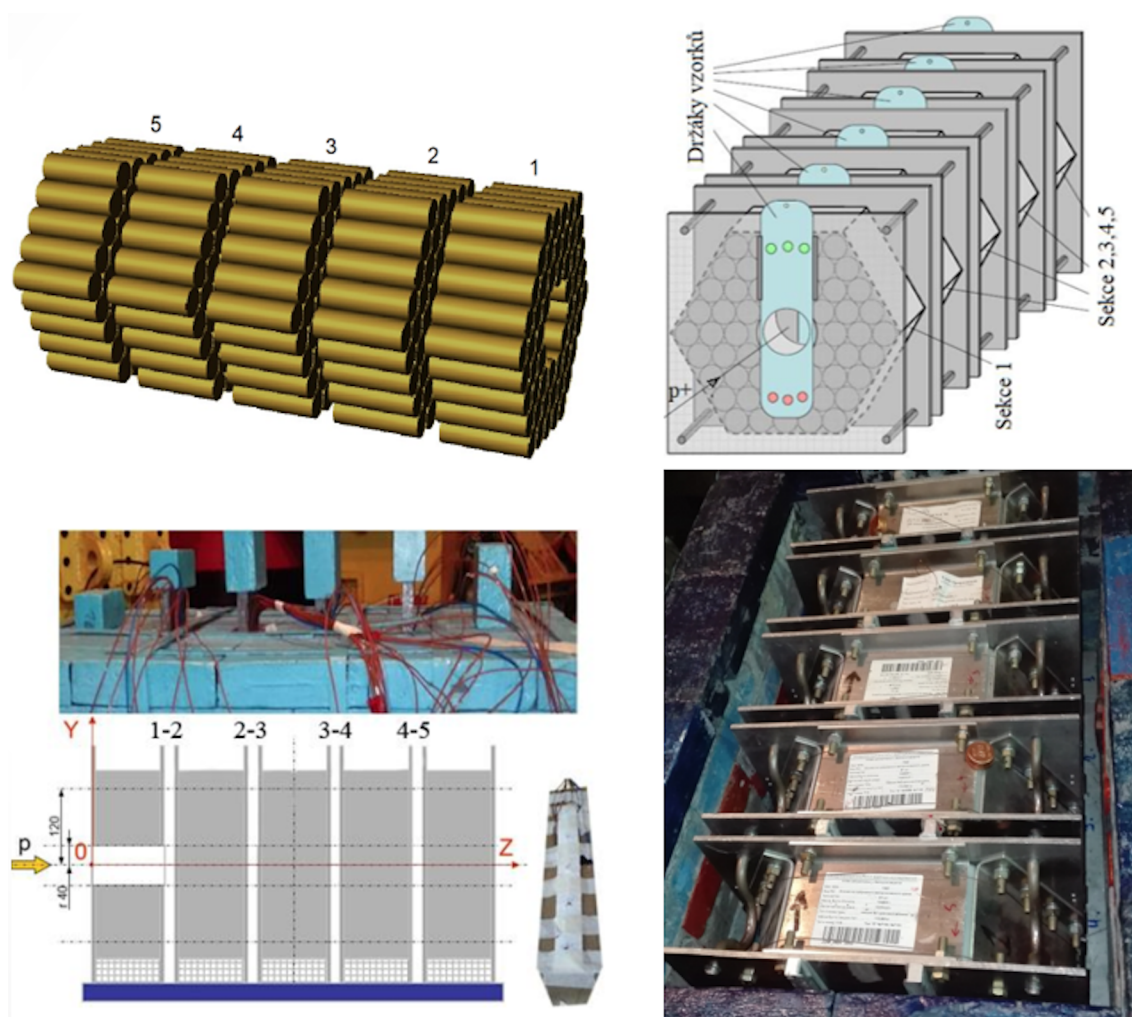
Vývoj spalačných terčov

Od deväťdesiatych rokov do dnes boli v SÚJV skúmané štyri spalačné terče s názvami s názvami GAMMA-2, GAMMA-3, Energia+Transmutacia a QUINTA. V budúcnosti by mal byť inštalovaný spalačný terč BURAN.

GAMMA-2 bol projekt, ktorý sa sústredil na sekundárne častice produkované na olovenom terči. Výskum sa prebiehal na urýchľovači Nuclotron. Táto sústava patrila k prvým využívajúcim sa v SÚJV a v súčasnosti sa už nevyužíva. Sústava GAMMA-3 bol projekt, ktorý sa sústredil na transmutáciu rádioaktívnych izotopov v poli moderovaných neutrónov, tento projekt sa naposledy použil v roku 2012 [7],[12].

QUINTA

Táto zostava sa začala využívať v roku 2010 [12]. Terč obsahuje prírodný urán. Modul terčblanket je zložený z piatich sekcií, z ktorých každá časť je dlhá 114 mm. Každá medzera medzi sekciami má 17 mm a do týchto medzier sú umiestňované sledované vzorky, ktoré sú upevnené na hliníkových doskách. Hmotnosť terč-blanket je 540 kg, z čoho hmotnosť samotného uránu je 512 kg. Tieto sekcie sú uzavreté v hexagonálnom usporiadaní hliníkových plechov s hrúbkou 5 mm. Prednú a zadnú časť tvoria hliníkové dosky s rovnakou hrúbkou. V zostave je urán opláštený v hliníkovom plechom s hrúbkou 1 mm. V prvej časti sa nachádza 54 valcov a zvyšné štyri majú každá 61 valcov. Veľkosť celej sústavy je $700 \times 350 \times 350 \text{ m}^3$. Terč je zo všetkých strán obklopený 10 cm silným oloveným tienením. V prvej časti je otvor pre prechod zväzku[7],[12].



Obr. 1.8: QUINTA, prebrané z [29]

2 MOŽNOSTI MERANIA TEPLoty V SPA- LAČNOM TERČI

Na začiatku tejto kapitoly je potrebné zadefinovať rozdiel medzi teplom a teplotou. Rozdiel medzi danými veličinami patrí k základom termodynamiky. Teplota je termodynamická veličina, ktorá vyjadruje zmenu vnútornej energie medzi systémom a okolím, s ktorým je v kontakte. Výmena tepla môže prebiehať len v prípade, že systém a okolie majú rozdielnú teplotu. Z toho vyplýva, že teplota je fyzikálna veličina, ktorá definuje stav hmoty. Teplota je definovaná pomocou priemernej pohybovej energie častíc, z ktorých sa objekt skladá. Z tejto definície vyplýva, že čím je teplota vyššia, tým je väčšia pohybová energia častíc[18].

2.1 Prestup tepla

Prenos tepla, alebo taktiež zdieľanie tepla, je zložitý fyzikálny dej a je realizovaný za pomoci nosičov energie. Týmito nosičmi sú častice, ktoré sa v danom prostredí vyskytujú alebo sú do sústavy privádzané z okolia. Častice s vyššou teplotou predávajú energiu časticám s nižšou teplotou v snahe dosiahnuť rovnovážny stav. Rovnovážny stav je stav sústavy, kedy už nedochádza k výmene vnútornej energie. Rýchlosť, druh a spôsob pohybu častíc sa však odlišuje podľa prostredia v ktorom sa daná častica nachádza. Nosičmi energie pritom môžu byť elementárne častice ako napríklad elektróny, ale taktiež môžu energiu prenášať elektromagnetické vlny, ktoré prenos uskutočňujú pomocou fotónov[18],[19].

Existujú dva základné spôsoby premiestňovania častíc z hľadiska koncentrácií látky v konkrétnom prostredí. Prvým spôsobom interagujú častice, ktoré sú vysoko koncentrované v prostredí. Tento spôsob je typický pre kvapalné alebo pevné skupenstvo, kde sú častice v neustálom styku a energia je prenášaná prostredníctvom vzájomných zrážok medzi časticami. Tento typ interakcie sa nazýva difúzia. Druhý spôsob prenosu energie je špecifický pre prostredia s malou koncentráciou častíc, kedy prenos prebieha pomocou žiarenia. Vďaka týmto princípom môžeme prenos tepla prostredím rozdeliť na tri základné spôsoby prenosu tepla [19]:

- kondukcia,
- konvekcia,
- radiácia.

Kondukcia

Kondukcia, prenos tepla vedením, je základný spôsob prestupu tepla. Tento mechanizmus je založený na výmene energie medzi časticami, ktoré sú v bezprostrednej blízkosti. Energia je prenášaná vzájomnými zrážkami častíc, ktoré sa však nepremiestňujú, ale kmitajú okolo svojej rovnovážnej polohy. Tento proces je typický pre častice v pevnom skupenstve. Teplo sa môže šíriť vedením aj v tekutinách. Pri kvapalinách a plynoch popri kondukcii prebieha spravidla aj konvekcia, a preto nemôžeme hovoriť len o prenose tepla vedením. Vedenie tepla matematicky popisuje Fourierov zákon [20], [21].

Zo vzťahu vyplýva, že ak tyč s dĺžkou l a prierezom S má na oboch koncoch rozdielnu teplotu, tak po čase t sa sústava dostane do rovnovážneho stavu a teplo sa mení pozdĺž tyče lineárne. Pri výpočte musíme zohľadniť aj typ materiálu z ktorého sa daná látka skladá a preto potrebujeme poznať súčiniteľ tepelnej vodivosti λ , ktorý je charakteristický pre daný materiál [20], [21].

Konvekcia

Konvekcia, prenos tepla prúdením, je prestup tepla, pri ktorom dochádza popri výmene energie aj k výmene hmoty. Tento druh výmeny vnútornej energie je typický pre kvapalnú a plynnú skupenstvo. Konvekcia môže spravidla nastať dvoma spôsobmi. Prvý spôsob vzniká ak pohyb kvapaliny alebo plynu nastane len vďaka rozdielom teplôt látky. Tento jav nazývame prirodzená alebo voľná konvekcia. Druhý spôsob je založený na umelom vyvolaní prúdenia. Zdrojom tohoto prúdenia môže byť napríklad čerpadlo alebo ventilátor. V tomto prípade hovoríme o nútenej konvekcii. Ak má tekutina teplotu T_1 a povrch steny má teplotu T_2 s plochou S , potom množstvo tepla za čas t vypočítame pomocou Newtonovho vzťahu [19], [21].

Súčiniteľ prestupu tepla α vyjadruje tepelný tok, ktorý prestupuje zo steny do kvapaliny alebo z kvapaliny do steny pri ploche 1 m^2 , rozdiel teplôt 1 K a za čas 1 s . Tento súčiniteľ sa nedá jednoducho početne vyjadriť a jeho hodnota sa často odhaduje [19], [21].

Radiácia

Radiácia, alebo žiarenie, sa líši od vedenia a prúdenia iným mechanizmom prenosu energie. Zatiaľ čo vedenie a prúdenie pre prenos vyžívali častice, ktoré boli v bezprostrednej blízkosti, žiarenie prebieha pomocou elektromagnetických vln. Teleso, ktoré má istú nenulovú teplotu, vyžaruje elektromagnetické žiarenie a zároveň

okolité žiarenie pohlcuje. Pokiaľ dopadá elektromagnetické žiarenie na teleso, tak časť tohoto žiarenia je pohltaná, časť odrazená a časť prejde skrz teleso. Žiarenie, ktoré je pohltané zvyšuje vnútornú energiu telesa. Žiarenie, ktoré je odrazené, dopadá na iné teleso a časť, ktorá telesom prejde pokračuje na ďalšie teleso. Tok energie, ktorý dopadá na teleso môžeme rozdeliť na tri časti [19],[21]:

- A – pohltaný tok (absorbpcia),
- B – odrazený tok (reflexia),
- C – prestupujúci tok.

Súčet týchto častí sa musí vždy rovnať jednej. Pričom môžeme zadefinovať extrémne prípady jednotlivých častí. Ak je pohltaný tok rovný jednej, hovoríme o absolútne čiernom telese a celá energia je pohltaná. Pokiaľ je odrazený tok rovný jednej, dochádza k absolútnemu odrazu a ak je prestupujúci tok rovný jednej, tak je prostredie absolútne priehľadné [19].

2.2 Možnosti merania teploty

Ako už bolo v predchádzajúcom odstavci zmienené, teplota popisuje konkrétny stav telesa a jej hodnota závisí od pohybovej energie častíc. Matematický vzťah medzi teplotou a pohybovou energiou je popisovaný Boltzmannovou teóriou[23]:

Teplota je základnou jednotkou SI sústavy, označuje sa písmenom T a jej jednotkou je Kelvin. Kelvinova tepelná stupnica, ktorá sa nazýva tiež ako termodynamická teplotná stupnica, má dva základné body. Jej počiatok sa nachádza v absolútnej nule a druhý základný bod je teplota trojného bodu vody, ktorý má hodnotu 273,16 K. Ďalšou významnou stupnicou je Celziová stupnica. Základnou jednotkou Celziovej stupnice je stupeň Celzia a označuje sa $^{\circ}\text{C}$. Táto stupnica má taktiež dva základné teplotné body a to bod mrazu vody, ktorý má hodnotu 0°C a bod varu, ktorý má hodnotu 100°C . Prepočet medzi Celziovou stupnicou a Kelvinovou stupnicou je daný vzťahom[23]:

Zariadenie, ktoré slúži na meranie teploty sa nazýva teplomer. Teplomer má dve základné časti. Prvá časť je teplotný snímač, ktorý reaguje na zmenu teploty a druhá časť transformuje túto zmenu na hodnotu. Podľa toho, na akom princípe teplomer funguje, rozdeľujeme teplomery na tri základné typy[22],[23]:

- dilatačné teplomery,
- elektrické teplomery,
- bezdotykové teplomery.

Dilatačné teplomery

Dilatačné teplomery sú založené na princípe teplotnej rozťažnosti pevných, kvapalných a plynných látok. Podľa toho aké skupenstvo daný snímač využíva, rozoznávame snímače pevnou, kvapalnou alebo plynnou látkou. Snímač s pevnou látkou využíva dĺžkovú rozťažnosť materiálu[23].

Medzi teplomery s pevným snímačom patria tyčové (monometické) dilatačné teplomery a dvojkovové (bimetalové) teplomery. Monometické teplomery pozostávajú z dvoch častí. Prvá časť je trubica z kovu s veľkou dĺžkovou rozťažnosťou, ako je napríklad meď alebo mosadz. Druhú časť tvorí tyč, ktorá je vsunutá do trubice. Táto tyč je tvorená z materiálu s malou teplotnou rozťažnosťou z materiálu ako je napríklad kremenné sklo alebo keramika. Zmenou teploty trubica diletuje a zmena sa prenáša na ukazovateľ. Ako už z názvu vyplýva, základom dvojkovového snímača je bimetal. Tento bimetal je vytvorený z dvoch pevne spojených vrstiev kovov s rôznymi súčiniteľmi dĺžkovej rozťažnosti. Vplyvom teploty dochádza k ohybu bimetalu a deformácia je prenesená na ukazovateľ[23].

Kvapalné snímače sú založené na zmene objemu vplyvom zmeny teploty. Pri kvapalných teplomeroch rozlišujeme dva typy, sklenené snímače a kvapalinové tlakové snímače. Sklenené snímače sa vyznačujú spoľahlivosťou, presnosťou a nízkou cenou. Základom je kvapalina v sklenenej banke. Pri tomto meraní sledujeme priamo zmenu objemu tekutiny. Systém tlakových kvapalinových teplomerov je zložený z teplomerovej nádoby, kapiláry a tlakomernej pružiny. Celý tento systém je vyplnený kvapalinou. Zmenou teploty v uzavretom systéme narastá tlak a tieto zmeny sú pomocou kovovej kapiláry prenášané na tlakomernú pružinu. Na pružine dochádza k deformácii a pomocou tejto deformácie sa zaznamenáva teplotný rozdiel[23].

Tlakové plynové teplomery sú snímače založené na zmene tlaku pozorovanej látky. Teplomery obsahujú stlačiteľný plyn. Najčastejšie hélium, dusík alebo vzduch, ktorý zmenou teploty mení svoj objem. Táto zmena je pomocou prevodníka prevedená na ukazovateľ teplomera. Tieto teplomery sa najčastejšie využívajú energetike, potravinárstve a v chemickom priemysle[23].

Elektrické teplomery

Tieto typy teplomerov sa zakladajú na zmene elektrických vlastností daného materiálu. Medzi elektrické teplomery zaradujeme odporové, polovodičové odporové snímače a termoelektrické snímače. Vďaka rozmerom, presnosti a jednoduosti výstupu patria elektrické teplomery medzi najrozšírenejšie snímače teploty[22],[24].

Princíp odporových snímačov je založený na závislosti odporu kovu a teploty. Ako odporový materiál sa používajú čisté kovy, ktorých elektrický odpor so zvyšovaním teploty rastie. Najčastejšie používané materiály na odporové teplomery sú platina, meď a nikel. Platinové snímače sa vyznačujú vysokou presnosťou, chemickou stálosťou a taktiež veľkým teplotným rozsahom, čo sa však odráža na ich cene. Niklové snímače majú vysokú citlivosť za pomerne nízku cenu, avšak majú obmedzený teplotný rozsah. Medené odporové snímače majú dostačujúci teplotný rozsah. V súčasnosti sa veľmi nevyužívajú z dôvodu oxidácie medi. Polovodičové snímače, alebo taktiež polovodičové odporové snímače, sú založené na zmene odporu, ktorá je spôsobená teplotnou závislosťou koncentrácie nosičov náboja[24].

Termoelektrické teplomery sú teplomery, ktoré sú založené na termoelektrickom jave. Tento jav v roku 1821 popísal nemecký fyzik Thomas Johann Seebeck. Jeho výskum dokázal, že keď dva kovové drôty spojíme v dvoch bodoch a každý z týchto spojov sa bude nachádzať v prostredí s rozdielnou teplotou, vznikne termoelektrické napätie, ktorého veľkosť závisí na teplotách daných prostredí. Základom termoelektrického teplomeru je termoelektrický snímač teploty, vedenie a prístroj na meranie napätia[24].

Bezdotykové teplomery

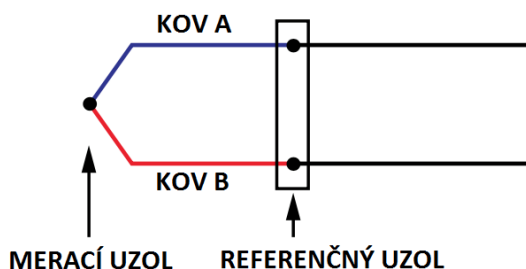
Sú teplomery založené na monochromatickom alebo celkovom žiarení telesa. Najčastejšie typy bezdotykových teplomerov sú širokopásmový pyrometer, monokryštalický pyrometer a termovízne kamery. Tieto teplomery sú založené na princípe merania tepelného žiarenia, ktoré vyžaruje každá forma hmoty, ktorá má teplotu vyššiu ako je absolútna nula. Intenzita vyžarovaná hmotou odpovedá danej hodnote teploty[22].

Problém pri meraní teploty v spalačnom terči spočíva v tom, že väčšina meracích zariadení nieje vhodná na meranie v spalačnom terči z dôvodu vysokej radiácie a silného neutrónového toku. Konkrétne z dôvodu radiácie je nutné dodržať aj bezpečnú vzdialenosť od spalačného terča (približne 23 m), aby nedošlo ku kontaminácii a zníženiu citlivosti elektroniky meracieho zariadenia gama radiáciou a neutrónovým tokom. Tieto faktory prakticky znemožňujú meranie v okolí spalačného terča. Ďalším zásadným problémom je obmedzený priestor medzi jednotlivými sekciami QUINTY (2.3.3). Tento fakt zabraňuje používaniu meracích sond väčších rozmerov.

2.3 Termočlánky

Meranie za pomoci termočlánkov je jednoduchý, široko využívaný spôsob merania teploty. Termočlánok je zložený z dvoch rôznych kovov spojených do jedného uzlu, nazývaného tiež ako horúci uzol. Druhý koniec, kde drôty nie sú spojené, je pripojený k riadiacemu obvodu, ktorý slúži na úpravu signálu. Druhý spoj je na koncoch kovových častí a slúži ako referenčný uzol, nazývanie tiež ako studený uzol [16].

Napätie, ktoré je produkované na referenčnom spojení závisí na teplotách nameraných na oboch uzloch. Vzhľadom k tomu, že termočlánok je diferenciálne zariadenie, skôr ako zistíme teplotu meraného prostredia, je nutné zobrať do úvahy teplotu referenčného uzlu. Tento proces sa tiež nazýva ako kompenzácia referenčného spoja.[16]



Obr. 2.1: Termočlánok

Termočlánky sa stali štandardnou metódou na meranie teploty, a to hlavne pre široké využitie a taktiež širokú škálu teplôt, ktoré sú schopné merať s dostatočne vysokou presnosťou. Využívajú sa v rôznych odvetviach až do teploty 2500 °C [16].

2.3.1 Výhody a nevýhody termočlánkov

Výhody termočlánkov

Hlavnou výhodou termočlánkov je tepelný rozsah. Majú najširšiu škálu využitia, od nízkoteplných objektov po meranie teplôt tryskových motorov, ktoré môžu byť použité s využitím termoelektrických článkov. V závislosti od použitých kovových článkov môžu merať v rozmedzí od -200 °C do +2500 °C.

Mechanická odolnosť je jednou z veľkých výhod. Vďaka jednoduchosti a mechanickej pevnosti sú termočlánky odolné voči nárazom a rôznym typom vibrácií a sú vhodné k používaniu v rôznych nebezpečných priestoroch.

Vzhľadom k tomu, že sú malé a majú nízku tepelnú kapacitu, termočlánky reagujú na zmenu teploty veľmi rýchlo. Termočlánky sú schopné reagovať do niekoľkých stoviek milisekúnd. A vzhľadom k tomu, že termočlánky nepotrebujú žiadnu budiacu silu, nedochádza k samovoľnému zahrievaniu [16],[17].

Nevýhody termočlánkov

Funkcia termočlánku je založená na prijatí informácii o teplote v podobe napätia. Je nutné aby táto hodnota bola následne prepočítaná na požadovanú jednotku. Pri tomto prepočte však môže nastať chyba, a preto sa neustále pracuje na zdokonaľovaní týchto prepočtov, aby nedochádzalo k znižovaniu presnosti.

V súlade so samotným princípom fungovania termočlánku je nevyhnutné správne určenie teploty referenčného uzlu. Pri nesprávnom určení teploty referenčného uzlu môže dôjsť k zásadným chybám merania a tým k znehodnoteniu celého merania.

Z hľadiska toho, že meracie časti prístroja sú z kovových materiálov, môže dochádzať ku korózií v niektorých prostrediach merania. Tým dochádza k degradácii materiálu a tým aj k zhoršovaniu presnosti merania. Z tohoto dôvodu je nutné termočlánkom v takýchto podmienkach poskytnúť dostatočnú izoláciu a taktiež ich pravidelne kontrolovať.

Náchylnosť k šumu je jeden z problémov, ktorý vzniká pri meraní nízkonapäťových úrovní signálu. Zmeny magnetického poľa môžu vytvoriť chyby merania. Z tohoto dôvodu je potrebné poskytnúť signálu filtrovanie, buď hardvérové alebo softvérové, aby bol šum eliminovaný a nedochádzalo k skreslovaniu signálu [16],[17].

2.3.2 Typy termočlánkov

Termočlánky sú široko využívané merací prístroj, a preto existuje mnoho typov. Termočlánky sú k dispozícii v rôznych kombináciách kovov, či rôznych kalibrácií. Medzi najpoužívanejšie kalibračné skupiny patria J, K, T a E. Každý typ kalibrácie má rôzny tepelný rozsah a taktiež je vhodný pre iné druhy merania a iné typy prostredia. Z dôvodu, že existuje mnoho variácií termočlánkov je nutné vybrať ten, ktorý splňuje vhodné parametre. Pre výber termočlánku sa zohľadňujú nasledujúce kritériá tepelný rozsah. Chemická odolnosť termočlánku alebo plášťa sondy, odolnosť proti vibráciám a taktiež požiadavky na inštaláciu. Termočlánky je možné deliť na tri základné typy [17].

Drôtené termočlánky so zvarom bez zapúzdrenia

Tento termočlánok je zložený z dvoch termočlánkových drôtov, ktoré sú na svojom jednom konci zvarené. Z dôvodu, že takýto termočlánok je nechránený a nie je nijak izolovaný je jeho využitie značne obmedzené. V kvapalnom prostredí môže dôjsť k rýchlemu znehodnoteniu kovových častí, čo by viedlo k nepresnosti merania. Z tohoto dôvodu sú obvykle vhodné hlavne k meraniu teploty plynu a ich veľkou výhodou je rýchla odozva [17].

Sondy na meranie teploty povrchu

Meranie teploty povrchu je v zásade veľmi zložitý pre všetky snímače určené na meranie teploty. Aby sa zaistilo presné meranie, musí byť meracia časť v neustálom kontakte s povrchom meraného objektu. Vďaka tomu, že sú termočlánky vytvorené z mäkkého kovu, môže byť plocha na meranie vytvorená ako plochý plech, ktorý má dostatočne veľkú dotykovú plochu. Niektoré termočlánky tohoto typu môžu byť umiestnené aj na rotujúcom mechanizme[17].

Termočlánkové sondy

Termočlánková sonda je zložená z termočlánkového drôtu a kovovej trubky, do ktorej je drôt vložený. Stena kovovej trubky sa nazýva plášť sondy a slúži ako izolátor pred vonkajším prostredím. K najpoužívanejšiemu materiálu patrí nerezová oceľ. Pre veľmi vysoké teploty sa využívajú aj iné materiály. Meracie konce sa používajú v troch rôznych prevedeniach, a to ako uzemnené, neuzemnené a nechránené. Pri uzemnenom type je koniec termočlánku zvarený s plášťom sondy. Pri neuzemnenom type je drôt oddelený od plášťa izoláciou. Nechránené termočlánkové sondy majú spoj vysunutý z plášťa [15],[17].

Zvolený druh termočlánku závisí hlavne na požiadavkách, ktoré sú kladené prevádzkovými okolnosťami. Medzi základné požiadavky patrí hlavne teplotný rozsah a presnosť merania jednotlivých typov. Ďalšími faktorom môže byť prostredie, v ktorom meranie prebieha, alebo odolnosť voči chemickým vplyvom. Existuje niekoľko typov termočlánkov, ktoré majú definované vlastnosti [15].

Najčastejšie používané sú termočlánky z ušľachtilých a bežných kovov. Medzi termočlánky z ušľachtilých kovov patria typy B, R a S. Tieto termočlánky sú tvorené z platiny a z rhodia. Ich výhodou je, že sú schopné merať veľmi vysoké teploty

(do 1700 °C). Používanéjšie sú však snímače z bežných kovov. Medzi tieto termočlánky patria typy J, K, E a T. Materiály z ktorých sú vyrábané sú najčastejšie meď, železo, nikel a chróm [25].

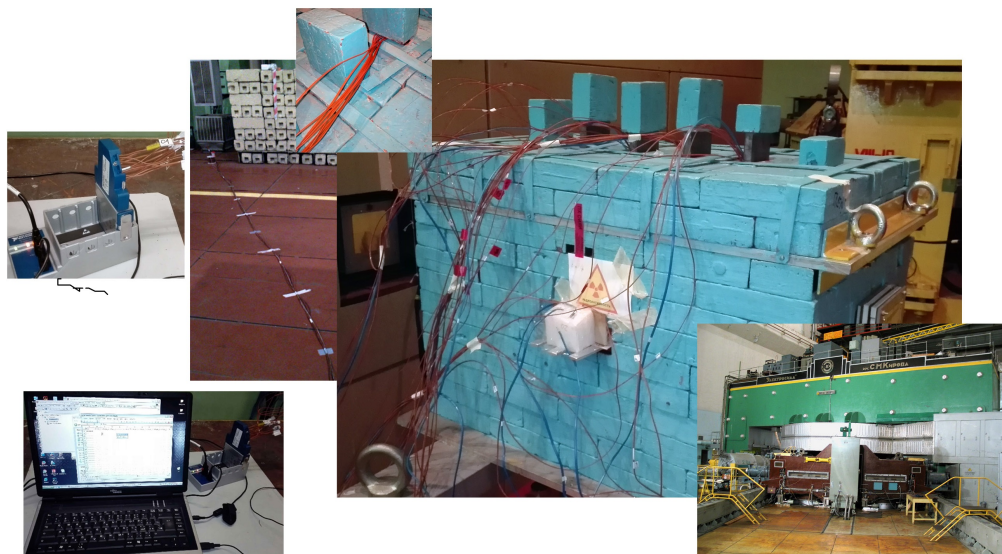
Termočlánky typu J sú tvorené zo železa a konštantánu (zliatina medi a niklu) a sú vhodné pre oblasti nízkych a stredných teplôt. Jedna vetva je tvorená železom a druhá konštantánom. Výhodou je dobrá chemická odolnosť do 600 °C, po prekročení tejto hodnoty na dlhšiu dobu dochádza k degradácii vlastností. Využívajú sa aj pri vyšších teplotách, kde sa však volia drôty hrubšieho prierezu. Čo sa týka presnosti, tak pri triede presnosti 1 je maximálna odchýlka 1,5 °C [26],[27].

Typ termočlánku K je tvorený z chromelu a alumelu (NiCr-NiAl). Je vhodný na meranie v rozmedzí od -200 °C do 1250 °C. Jeho výhodou je rýchlosť merania. Od teploty 500°C môže dochádzať ku korodovaniu oxidmi síry. Z tohoto dôvodu sa pokrýva niklová vetva hliníkom. Presnosť je približne rovnaká ako pri predchádzajúcom type. Termočlánky typu E sú zhotovené z nikelchrómu a konštantánu (NiCr-CuNi). Tieto merače fungujú v rozsahu od - 200 °C do 900 °C. Presnosť pre prvú triedu presnosti je s odchýlkou 1,5 °C [26],[27].

Posledným typom je termočlánok T a je tvorený z medi a konštantánu. Horná hranica využiteľnosti je 350 °C, po prekročení tejto hranice dochádza k znižovaniu odolnosti voči hrdzaveniu. Je vhodný k využívaniu aj v záporných hodnotách do -200 °C. Veľkou výhodou je presnosť tohoto typu, pretože z uvedených meradiel je najpresnejší. Presnosť sa pohybuje s odchýlkou 0,5 °C [26],[27].

2.3.3 Popis merania v SÚJV

Hlavnou úlohou pri experimentálnom meraní v SÚJV v Dubne je meranie tepelného pola pomocou určovania rozdielov od ustáleného stavu. Druhou časťou merania je určenie hustoty neutrónového toku. Presné meranie absolútnej teploty v spalačnom terči pomocou termočlánkov je nevhodné. Ich výhodou je však pasívne meranie a veľmi presné meranie rozdielov teplôt. Z tohoto dôvodu sa pre experimentálne využitie používajú termočlánky typu T. Pre meranie rozdielov teplôt je dôležité zaistiť čo najlepší kontakt medzi meraným povrchom a meracím termočlánkom. Z dôvodu zapúzdrenia uránových valcov, z ktorých je QUINTA zložená, nie je prakticky možné priame meranie zmeny teploty na uránových častiach. Z tohoto dôvodu sú rozdiely teplôt merané na povrchu hliníkových krytov týchto valcov.



Obr. 2.2: Meranie na spalačnom terči QUINTA, prebrané z [29]

Komplexné meranie rozdielov teplôt bolo prevedené skupinou zaoberajúcou sa ADS v SÚJV v májovom experimente 2016. Zmerané dáta boli poskytnuté pre túto prácu pre výpočet a tvorbu modelu. Praktická časť tejto práce je zameraná na simuláciu tohoto experimentu a je spracovaná v kapitole 3.2. Hlavným obmedzujúcim faktorom je nutnosť minimalizácie sondy z dôvodu obmedzeného priestoru medzi jednotlivými sekciami QUINTY. Bolo nutné zvoliť čo najmenšie objemy meracích sond, aby hustota neutrónového a protónového toku a na nej závislé reakcie neboli vložnými sondami a tepelnou izoláciou zmenené. Všetky experimenty zamerané na popísaný výskum sú merané termočlánkami typu T model TT-T-24-SLE-1000 od firmy OMEGA.

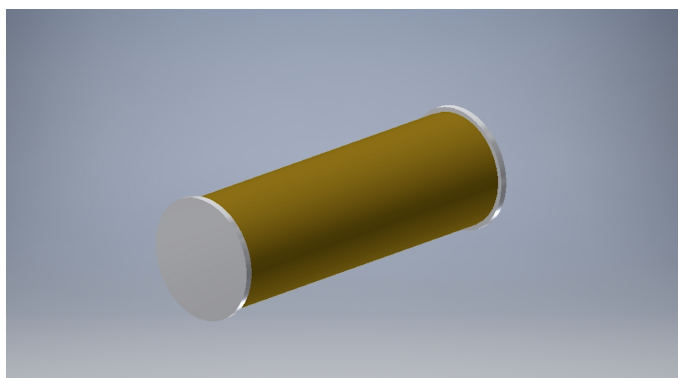
3 SIMULÁCIA SPALAČNÉHO TERČA

Táto kapitola sa zameriava na simuláciu spalačného terča QUINTA (viz. 1.2.3). Pomocou programu Inventor bol vytvorený model reálnej geometrie na základe hodnôt získaných z SÚJV. Tento model slúži na demonštráciu a výpočet prestupu tepla v programe Ansys. Model QUINTA vytvorený v programe Inventor je zložený z valcov z prírodného uránu, ktoré sú umiestnené v hexagonálnom usporiadaní pomocou hliníkových plechov. Celá zostava z piatich sekcií je umiestnená do oloveného tienenia. Tento model bol importovaný do výpočtového programu Ansys, kde bola prevedená simulácia prestupu tepla. Vstupné dáta generovaného tepla vychádzajú z výpočtu v kóde MCNPX.

3.1 Vytvorenie geometrie v programe Inventor

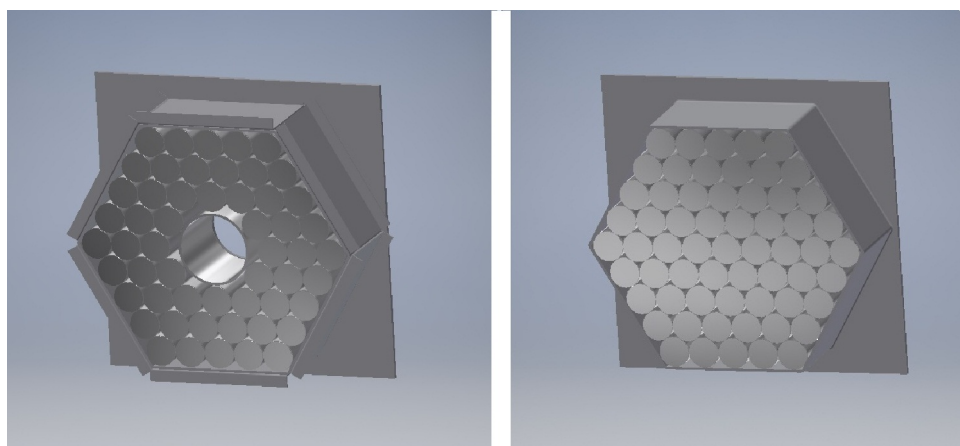
Autodesk Inventor je modelačný program od firmy Autodesk slúžiaci na modelovanie 2D a 3D sústav. Inventor je navrhnutý na operačný systém Windows a je najpredávanejším CAD programom v strojárstve. Program Inventor zahŕňa mnoho možností ako je napríklad tvorba 2D návrhov, 3D návrhov, dokumentácia, animácie a testovanie funkčnosti daných objektov. V tejto práci je využívané predovšetkým 3D modelovanie, pretože poskytuje vhodné podmienky pre prácu v modelovaní sústavy, ktorá sa skladá z niekoľkých častí [13], [14].

Základnou časťou spalačného terča, ktorý je súčasťou koncepcie QUINTA je prírodný obohatený uránový prášok, ktorý je hermeticky uzavretý v hliníkovom valci, ktorého odstavka má priemer 36 mm a hrúbku 2 mm. Bočná stena je dlhá 104 mm a jej hrúbka je 1,291 mm. Hmotnosť jedného valca spolu s hliníkovým plášťom je 1,72 kg.



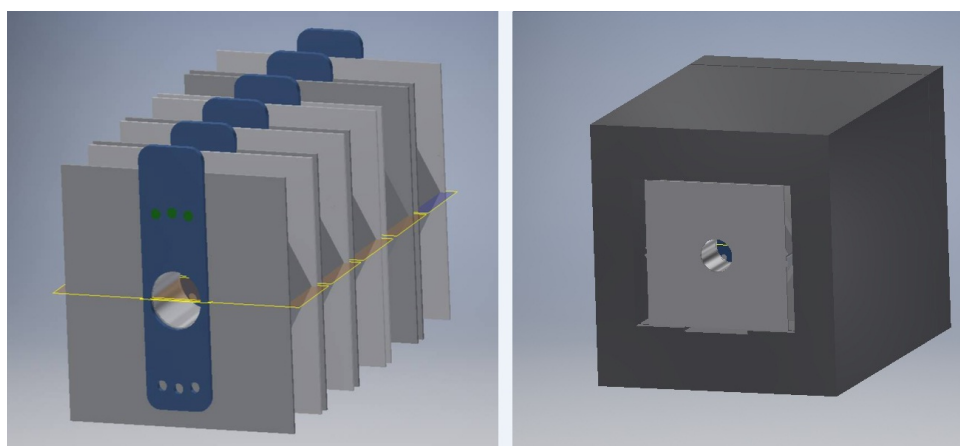
Obr. 3.1: Uránový valec

QUINTA celkovo obsahuje 298 takýchto valcov, ktoré sú rovnomerne umiestnené v piatich hexagonálnych sekciách. Prvá sekcia obsahuje stredový výrez, ktorý má priemer 80 mm, a preto počet valcov v tejto sekcii je 54. V sekciách dva až päť sa nachádza 61 valcov. Každá hexagonálna sekcia je pokrytá z prednej aj zadnej strany hliníkovým plechom v tvare štvorca so stranou 350 mm a hrúbkou 5 mm. Samotný šesťuholník má hrúbku steny 3 mm. Vonkajšia dĺžka steny šesťuholníka je 168,59 mm a vnútorná dĺžka je 165,12 mm.



Obr. 3.2: Sekcia 1 (vľavo), Sekcia 2–5 (vpravo)

Na prednej stene každej sekcie je hliníkový plech s výrezmi pre vzorky na sledovanie. Jednotlivé sekcie sú od seba vzdialené 17 mm a sú vložené do oloveného tienenia s hrúbkou 100 mm. Na prednej strane tienenia je výrez v tvare štvorca s veľkosťou jednej strany 150 mm.



Obr. 3.3: Terč QUINTA bez tienenia (vľavo), s tienením (vpravo)

3.2 Vstupné dáta tepeného výkonu

Pre simuláciu bol zvolený experiment ožarovania v SÚJV z dňa 30.5.2016. Experiment prebiehal pri ožarovaní protónmi s energiou 660 MeV po dobu 336 min s celkovým počtom dopadajúcich protónov $4,88(31) \cdot 10^{15}$. Ako vstupné hodnoty energií boli použité hodnoty získané simuláciou v kóde MCNPX¹. Po úprave a prepočítaní hodnôt tepelného výkonu boli hodnoty dosadené do pripraveného modelu, ktorý je popísaný v predchádzajúcej kapitole. Následne prebiehal výpočet pomocou programu Ansys Workbench.

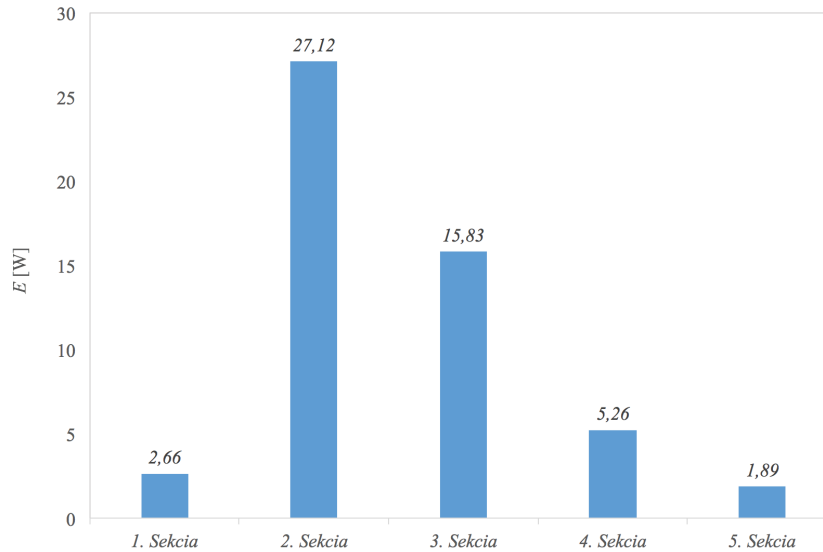
3.2.1 Vstupné hodnoty z MCNPX

Vstupné hodnoty boli získané pomocou programu MCNPX. Program MCNPX (Monte Carlo N-Particle Code eXtended) je univerzálny kód určený pre simuláciu fotónov, elektrónov, neutrónov a ďalších typov častíc. Simulácia v programe je vhodná pre trojrozmerné prostredie a tento kód je schopný pracovať v širokom spektre energií. Metóda Monte Carlo sa využíva pre modelovanie a simuláciu s vysokou presnosťou.

Výstupom výpočtu MCNPX boli hodnoty energií, ktoré pôsobili na jednotlivé uránové valce. Pre každý valec boli získané dve hodnoty, pretože teplo bolo produkované zvlášť protónmi a zvlášť neutrónmi. Energia získaná protónmi vznikla interakciou s jednotlivými atómami materiálmi. Neutróny predávajú teplo rôznymi druhmi reakcií, prevažne však štiepením uránových jadier. V terči prebiehajú aj ďalšie typy reakcií, ale majoritný význam pre vznik tepla majú hlavne reakcie protónov s materiálom a štiepenie uránu pomocou neutrónov.

Z predchádzajúceho odstavca vyplýva, že celkovo bolo získaných na 298 valcoch 596 hodnôt. Pre každý valec sa hodnoty tepla z protónov a neutrónov sčítali následne prepočítané na požadovanú jednotku. Základnou jednotkou zo simulácie MCNPX boli MeV/g za sekundu a pre simuláciu bolo potrebné hodnoty prepočítať na W. Z tohoto dôvodu je nutné hodnoty vynásobiť hmotnosťou jedného valca, ktorá je 1680,5 g, následne vynásobiť počtom častíc a prepočítať MeV na J. Získané hodnoty boli následne využité pre simuláciu prestupu tepla.

¹Ďakujem Ing. R. Vespalcovi z SÚJV za poskytnutie tepelných výsledkov zo simulácie v kóde MCNPX.



Obr. 3.4: Graf tepelných výkonov v jednotlivých sekciách

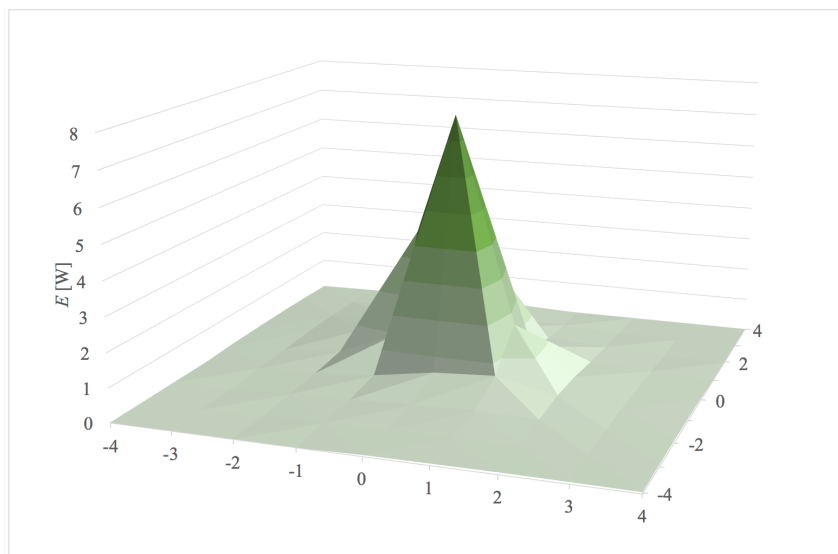
Z predchádzajúceho grafu vyplýva, že najviac energie je uvoľnené v druhej sekcii a to z dôvodu stredového výrezu v prvej sekcii. Tento výrez spôsobuje, že protónový zväzok dopadá priamo na centrálnu časť druhej sekcie bez spomalenia. V každej nasledujúcej časti sa veľkosť energie znižuje. Po sčítaní výkonov v jednotlivých sekciách je získaný celkový tepelný výkon, ktorý je rovný 52,76 W. Rozloženie energie v sekcii je znázornené na nasledujúcom grafe, kde centrálna časť sekcie je v bode [0,0] a v tomto bode má graf aj svoje maximum. Maximálna hodnota získaná v tejto sekcii na jeden valec je 7,74 W, ktorá je aj globálnym maximom celého terča.

3.3 Výpočet tepelného pola pomocou programu Ansys

Ansys je simulačný softvérový balík k výpočtom využívajúci numerickú metódu nazývanú metóda konečných prvkov. V súčasnosti sa považuje za jednu z najlepších variant na riešenie zložitých úloh. Metóda zabezpečuje získanie pomerne presného výsledku riešenia úloh. Úloha sa rozdelí na množstvo malých častí s konečným počtom, podľa ktorých sa zostavia rovnice a následne sa systémy parciálnych diferenciálnych rovníc pretransformujú na systémy algebrických rovníc.

3.3.1 Ansys Workbench

Balík umožňuje riešiť množstvo úloh z mechaniky, elektrodynamiky, dynamiky



Obr. 3.5: 3-D Graf energie v 2. sekcii

tekutín, akustiky, termodynamiky a množstva ďalších. Taktiež môže spolupracovať aj s inými inžinierskymi prostrediami, napr. formou importu alebo exportu geometrie a výsledkov. Postup pri riešení úloh pomocou metódy konečných prvkov môžeme rozdeliť do troch hlavných bodov:

- definovanie – vytvorenie geometrie, vlastnosti materiálov a vytvorenie siete prvkov,
- spravovanie – program urobí výpočet,
- vyhodnotenie – grafické alebo tabuľkové.

Podporované je jedno-dimenzionálne, dvoj-dimenzionálne a troj-dimenzionálne definovanie geometrie. V tejto práci bol vytvorený troj-dimenzionálny model s využitím súboru funkcií s označením „Transient Thermal“. Po vložení geometrie z programu Inventor sa pristúpilo k vytvoreniu siete konečného počtu prvkov. Daná geometria sa rozložila na sieť z miniatúrnych útvarov, ktoré slúžia na zostavenie rovníc. Tvar a počet týchto útvarov je určený typom a kvalitou siete.

3.3.2 Spracovanie modelu QUINTA

Po úprave geometrie boli použité hodnoty získané z kódu MCNPX, ktoré boli následne vložené do im prislúchajúcim valcom. Tieto hodnoty slúžili ako zdroj tepla pre celý model. Následne bolo potrebné určiť vlastnosti jednotlivých materiálov.

Z prostredia databázy materiálových údajov Ansys „Engineering Data“ boli vybrané materiály potrebné pre simuláciu:

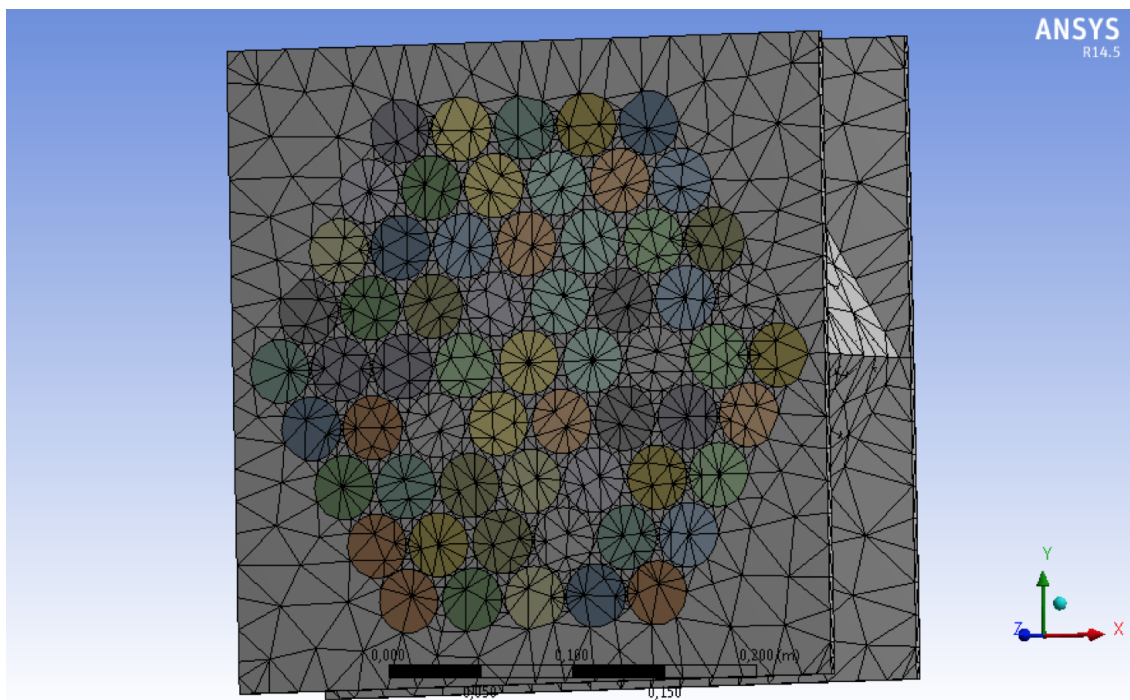
Aluminum Alloy:

- objemová hmotnosť: 2770 kgm^{-3} ,
- merná tepelná kapacita: $875 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivosť: (zadaná tabuľkou v závislosti od teploty).

Uranium:

- objemová hmotnosť: 19050 kgm^{-3} ,
- merná tepelná kapacita: $108 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivosť: $27,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

V prostredí „Transient-Thermal Mechanical“ sa priradili jednotlivým elementom materiálové vlastnosti (urán alebo hliník). Voľba siete bola ponechaná na optimálne zvolenie typu siete („Mesh“) pre predmetný tepelný typ úlohy.



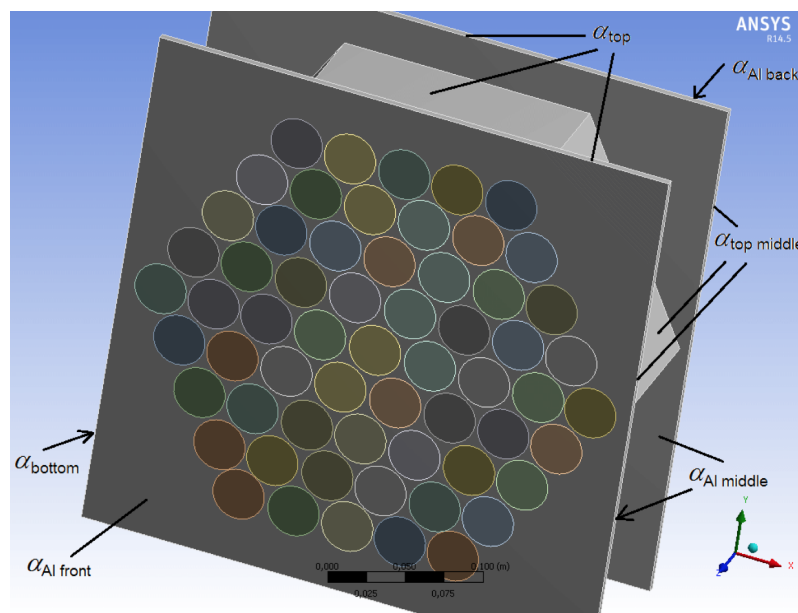
Obr. 3.6: Vytvorenie siete na sekcii 2.

V záložke „Transient Thermal“ sa zadali okrajové a hraničné podmienky nevyhnutné pre simuláciu. Inicializačná teplota okolia, ako aj samotného modelu QUINTA, bola nastavená na 21,6 °C. Na jednotlivé kruhové plochy bola nastavená záťažová okrajová podmienka, t.j. tepelný výkon podľa získaných vstupných údajov. Zároveň bolo potrebné zadať na jednotlivé okrajové plochy voľnú konvekciu, t.j. prestup tepla z telesa QUINTA do okolia, ktoré bolo udržiavané pri stálej teplote, pričom koeficienty prestupu tepla boli zvolené nasledovne:

- $\alpha_{top} = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$,
- $\alpha_{middle} = 6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$,
- $\alpha_{bottom} = 3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Podobným spôsobom boli zvolené hodnoty koeficientu prestupu tepla do okolia z hliníkových bočných plechov:

- $\alpha_{front} = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (pričom na prvej sekcii bola zvolená hodnota $7 \text{ W}^{-2}\text{K}^{-1}$),
- $\alpha_{middle} = 6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$,
- $\alpha_{back} = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (pričom na poslednej, piatej sekcii bola zvolená hodnota $7 \text{ W}^{-2}\text{K}^{-1}$).

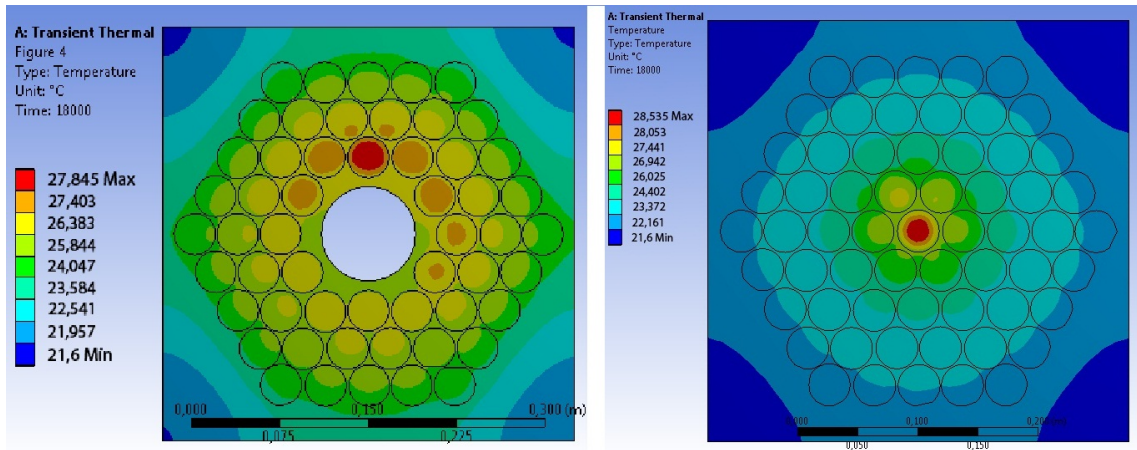


Obr. 3.7: Zobrazenie rozloženia koeficientov prestupu tepla

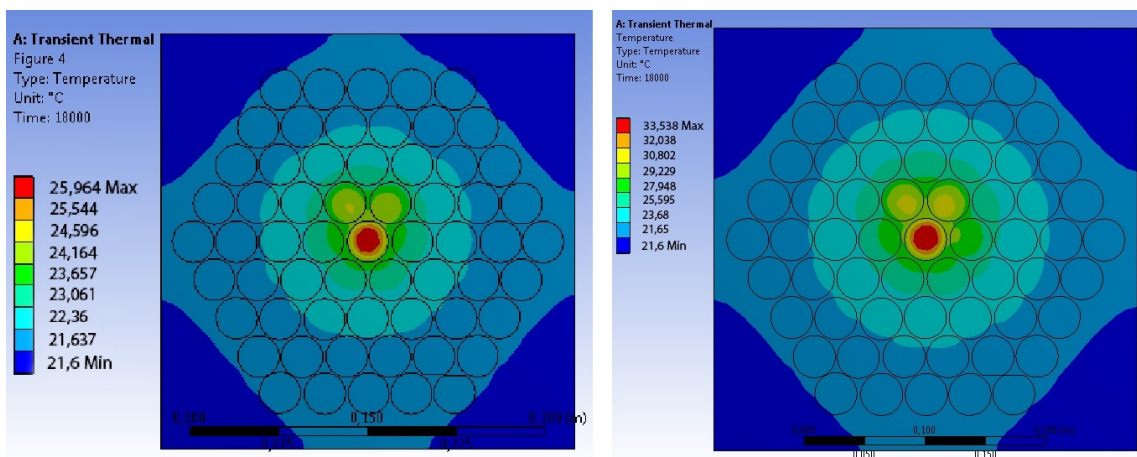
3.4 Analýza tepelného poľa

V prípravnej fáze sa na jednotlivé plochy uránových valcov umiestnili snímače teplôt, ako aj na predný a zadný krycí hliníkový plech. Nastavil sa minimálny časový výpočtový úsek ($t = 1$ s) a čas výpočtu ($t = 18000$ s). Zvolilo sa kontrolovanie času výpočtu tak, aby Ansys mohol v prípade určitých linearít výpočtu (teplota rastie lineárne) zjednodušiť výpočet a prípadne minimálny časový úsek predĺžiť.

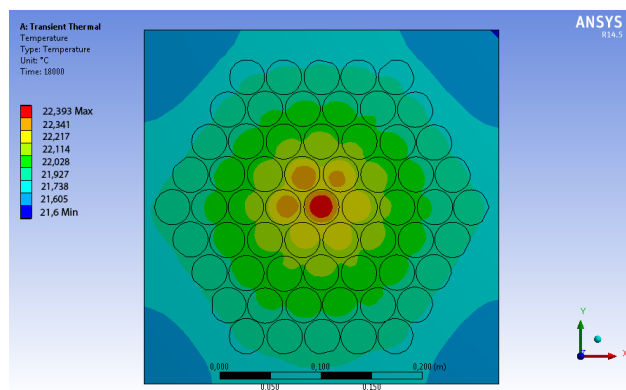
Riešenie úlohy sa realizovalo na zariadení Intel Xeon X5690, 96 GB RAM. V prípravnej fáze bolo možné zobraziť výsledky rozloženia teplotného poľa v ľubovoľnom elemente telesa, v príslušnom čase. Pre prehľadnosť boli uvedené výsledky rozloženia teploty v jednotlivých sekciách QUINTY (konečná teplota v čase 18000 s).



Obr. 3.8: Rozloženie teplotného poľa 1. sekcii (vľavo) a 2. sekcii (vpravo)

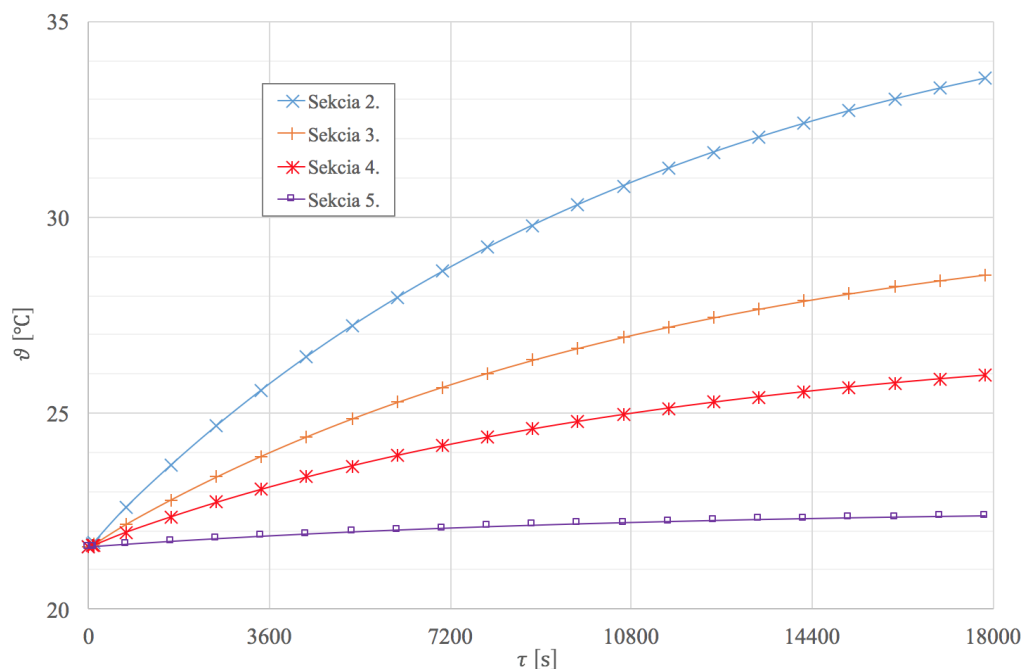


Obr. 3.9: Rozloženie teplotného poľa 3. sekcii (vľavo) a 4. sekcii (vpravo)

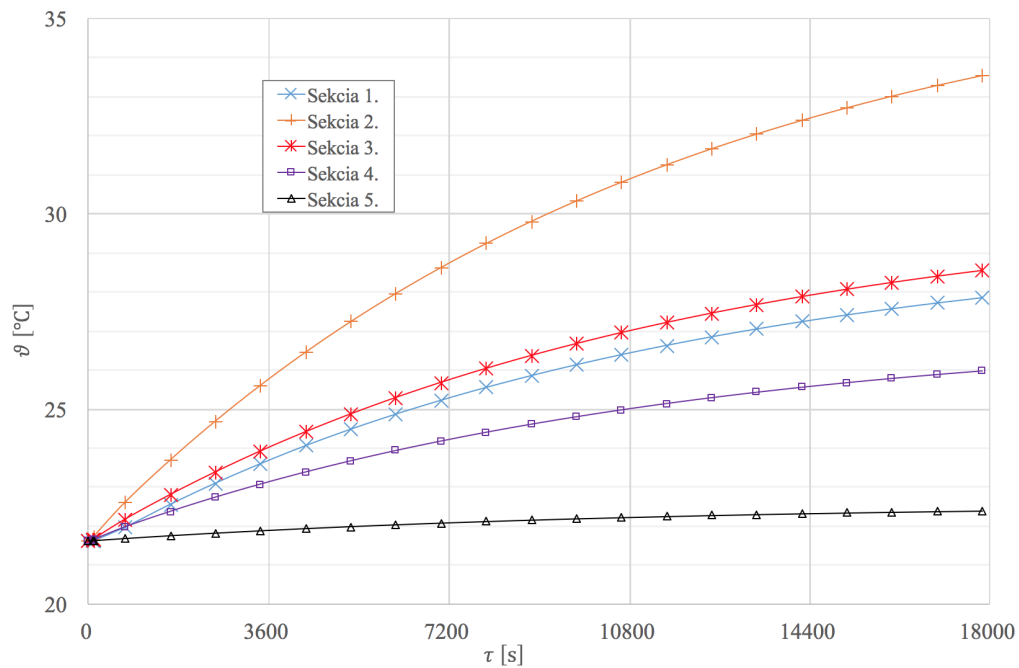


Obr. 3.10: Rozloženie teplotného poľa piatej sekcie

Na obrázku 3.11 sú znázornené priebehy zmeny teploty v čase. Sledovaný časový úsek bol 18 000 sekúnd, čo odpovedá 5 hodinám. Na grafe sú znázornené priebehy v centrálnej časti terča QUINTA. Z dôvodu kruhového výrezu v prvej sekcii sa v grafe nenachádza jej časový priebeh. Z grafu je zreteľné, že najväčší teplotný nárast vznikol v druhej sekcii. Teplota v tomto bode, v čase 18 000 sekúnd, narástla na hodnotu 33,538 °C. Tento nárast je zapríčinený dopadom neutrónového zväzku priamo na túto sekcii. Z uvedeného dôvodu je očividné, že každá nasledujúca sekcia bude mať zmenu teploty nižšiu.

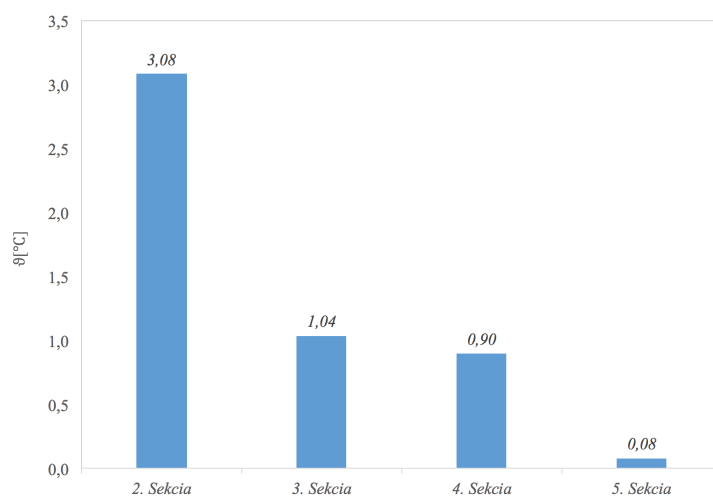


Obr. 3.11: Graf závislosti teploty na čase v stredných valcoch sekcií 2.-5.



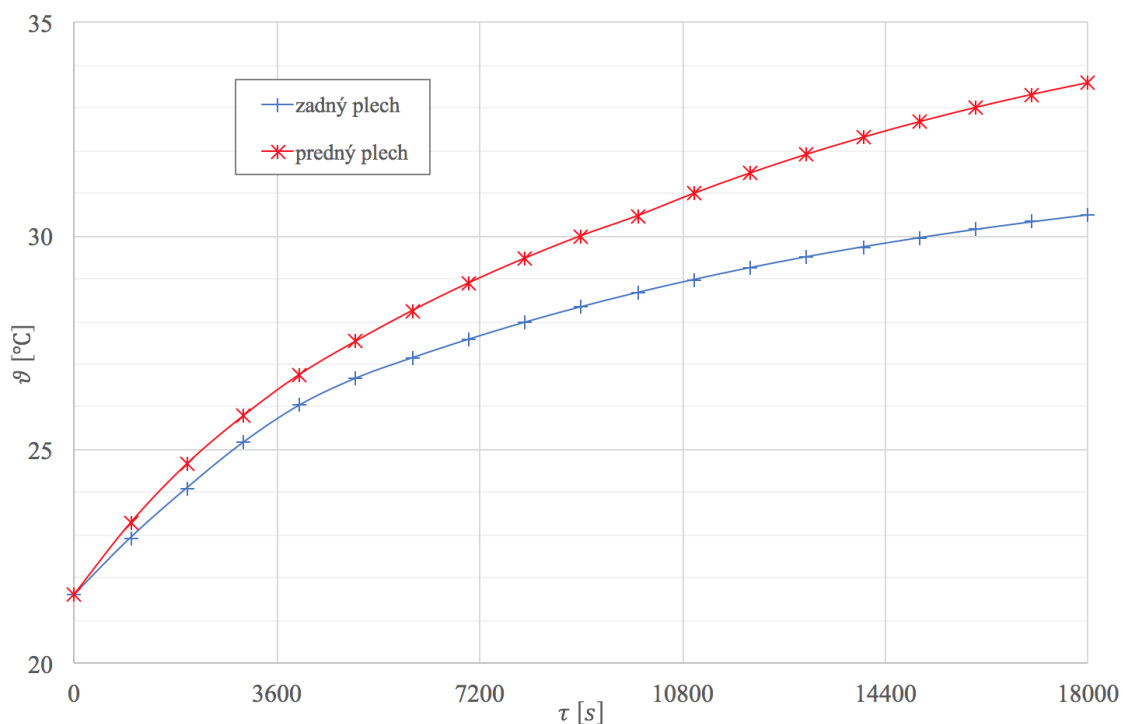
Obr. 3.12: Graf závislosti teploty na čase v jednotlivých sekciách

Na obrázku 3.12 sú uvedené priebehy oteplenia všetkých sekcií v bode vzdialenom od stredu 62,34 mm. Tento bod bol zvolený z dôvodu potreby znázornenia oteplenia 1. sekcie. Na obrázku je viditeľné, že teplota v prvej sekcii vzrástla na hodnotu 27,8 °C, pričom protónový zväzok na túto sekciu nedopadal. Oteplenie preto môžeme prisúdiť prestupu tepla pomocou sálania z druhej sekcie. Tento jav zapríčinil, že zmena teploty v druhej sekcii bola vyššia ako v sekciách štyri a päť.



Obr. 3.13: Rozdelenie teplôt prednej a zadnej steny sekcii 2.-5.

Na predchádzajúcom obrázku 3.13 sú uvedené rozdiely teplôt prednej a zadnej steny sekcií dva až päť v čase 18 000 sekúnd. Z grafu vyplýva že rozdiel teplôt na prednej a zadnej hliníkovej stene je najvýraznejší v druhej sekcii. Z tohoto dôvodu je uvedený nasledujúci obrázok 3.14 , ktorý znázorňuje priebeh oteplenia prednej a zadnej hliníkovej steny počas celej doby výpočtu.



Obr. 3.14: Graf oteplenia prednej a zadnej hliníkovej steny sekcie 2.

3.4.1 Zhodnotenie výsledkov

Z prevedených výpočtov v bakalárskej práci je možné prehlásiť, že pri ožarovaní terča QUINTA energiou 660 MeV dochádza k logaritmickému rastu teploty v jednotlivých sekciách. Z uvedených obrázkov a grafických znázornení je zrejmé, že najväčšia zmena teploty nastane na druhej sekcii v centrálnej časti. Tento rast je zapríčinený dopadom protónového zväzku priamo na túto oblasť. Teplota jednotlivých uránových častí klesá so vzdialenosťou od stredu sekcie. Pri zvyšných sekciách dochádza k výrazne menšej zmene teploty. Najvýraznejší rozdiel je medzi druhou a piatou sekciou. Tento rozdiel je spôsobený rozdielom energie získanej z protónov, ktoré interagovali v predchádzajúcich sekciách.

4 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo diskutovať problematiku vyhoreného jadrového paliva, definovať funkciu podkritického jadrového reaktora, popísať metódu merania teploty v terči, zostrojiť samotný terč QUINTA v programe Inventor a vytvoriť výpočet prestupu tepla.

Prvá kapitola práce je zameraná na vytvorenie prehľadu o podkritických jadrových reaktoroch. V tejto časti je popísaná a vysvetlená problematika vyhoreného jadrového paliva a obsahuje aj zhodnotenie možností nakladania s ním. Ďalej sa táto kapitola zameriava na samotný systém ADS a venuje sa jeho funkcii a využiteľnosti v praxi. V druhej kapitole je práca zameraná na prestup tepla. Definuje a popisuje základné princípy prestupu tepla. Následne sa venuje možnostiam merania teploty a bližšie popisuje termočlánky ich funkciu a rozdelenie. V závere popisuje experimentálne meranie na terči QUINTA v SÚJV. Tretia kapitola je zameraná na terč QUINTA a jeho model v programe Inventor. Tento model bol skonštruovaný podľa reálnych parametrov získaných z dokumentácii, ktoré boli pre spracovanie bakalárskej práce sprístupnené zo Spojeného ústavu jadrového výskumu v Dubne. Na záver bol uskutočnený výpočet pomocou programu Ansys Workbench. V rámci výpočtu bolo potrebné urobiť prepočty vstupných hodnôt energií získaných z programom MCNPX. Po úprave hodnôt bol vložený model spalačného terča QUINTA do programu Ansys. Zo získaných hodnôt po výpočte boli vynesené grafické závislosti.

Výstupom práce bola analýza tepelného poľa spalačného terča QUINTA. Zo získaných hodnôt bolo možné detailnejšie posúdiť teplotu v jednotlivých častiach terča a uviesť jednotlivé sekcie terča QUINTA do vzájomného pomeru a tým vytvoriť obraz o rozložení tepelného poľa. Uvedený model a výpočet slúžia k demonštrácii zmeny teploty pôsobením lineárneho urýchľovača častíc s energiou 660 MeV.

Z prevedených výpočtov je zjavné, že teplota pri ožarovaní narastá logaritmicky, pričom najväčšia zmena teploty nastala v centrálnej časti na druhej sekcii. Tento rast je zapríčinený dopadom protónového zväzku priamo na túto oblasť. Teplota na jednotlivých sekciách klesá so vzdialenosťou od centrálnej oblasti. Pri porovnaní jednotlivých sekcií je najväčší rozdiel teplôt medzi druhou a piatou sekciou. Simulácia prebehla za ideálnych podmienok s konštantným ožarovaním počas celej doby výpočtu. Do budúcnosti by bolo vhodné prispôbiť simuláciu experimentálnym podmienkam a zohľadniť aj zmenu tepelného výkonu v čase. Výsledky získané zo simulácie tepelného poľa by bolo vhodné v budúcnosti porovnať s nameranými hodnotami, ktoré boli získané pri reálnych experimentoch na spalačnom terči QUINTA.

LITERATÚRA

- [1] DOLEŽAL, Jaroslav, Jíří ŠŤASTNÝ a Stanislav BOUČEK. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vydání první. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [2] LIBRA, Martin, Jan MLYNÁŘ a Vladislav POULEK. *Jaderná energia*. 1. vydání. ILSA: Příbramská tiskárna, s.r.o., Nádražní 190, 261 01 Příbram IV, 2012. ISBN 978-80-904311-6-4.
- [3] HERALTOVÁ, Lenka. *Jaderné reaktory a jak to vlastně vše funguje* [online]. In: . Katedra jaderných reaktorů: Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze.
- [4] *International Atomic Energy Agency* [online]. 2015 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- [5] Jaderná elektrárna Temelín dosáhne rekordního výkonu. *Atominfo.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2015/08/jaderna-elektrarna-temelin-dosahne-rekordniho-vykonu/>
- [6] Vyhořelé jaderné palivo. In: *Cez.cz* [online]. 1999 [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/vyhor_palivo.html
- [7] ZEMAN, Miroslav. *Experimentální výzkum urychlovačem řízených jaderných reaktorů pro thoriovou jadernou energetiku*. 2015.
- [8] JARCHOVSKÝ, Petr. *Výpočetní simulace urychlovačem řízeného jaderného reaktoru pro transmutaci vyhořelého jaderného paliva*. 2015.
- [9] Reaktory III. generace. *Osel.cz* [online]. 2008 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/3531-reaktory-iii-generace.html>
- [10] WAGNER, Vladimír. Co to jsou urychlovačem řízené transmutory a budeme je někdy využívat? In: *Osol.cz* [online]. [cit. 2008-07-06]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/3743-co-to-jsou-urychlovacem-rizene-transmutory-a-budeme-je-nekdy-vyuzivat.html>
- [11] Urychlovačem řízený reaktor. *Cez.cz* [online]. [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/urychlovac8.html>

- [12] Recent results of the study of ADS with 500 kg natural uranium target assembly QUINTA irradiated by deuterons with energies from 1 to 8 GeV at JINR NUCLOTRON. *Proceeding of Science* [online]. 2012 [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: http://pos.sissa.it/archive/conferences/173/086/Baldin%20ISHEPP%20XXI_086.pdf
- [13] Autodesk Inventor 2017. *Cadstudio* [online]. 2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.cadstudio.cz/inventor>
- [14] Inventor. *Autodesk* [online]. 2016 [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.autodesk.com/products/inventor/overview>
- [15] SVOBODA, Josef a KOLEKTIV. *Determination of the neutron flux by the temperature differences at the massive spallation uranium target QUINTA* [online]. 2016, (ISBN: 978-1-5090-0907- 7) [cit. 2016-12-16].
- [16] DUFF, Matthew a Joseph TOWEY. Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility. In: *analog.com* [online]. 2010 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/measuring-temp-using-thermocouples.html>
- [17] Úvod do termočláneků. *OMEGA Engineering* [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- [18] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 8021418680.
- [19] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049389.
- [20] KUPILÍK, V. *Stavební konstrukce z požárního hlediska* [online]. Praha: Grada Publishing, 2006. ISBN 80-247-1329-2.
- [21] VOLF, Ivo, Miroslava JAREŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. *Prenos tepla*. Praha, 2005. M
- [22] KLÍMA, Jakub. *Automatické vyhodnocování termovizních snímků fotovoltaických panelů*. 2015.
- [23] DROZDA, František a Renata KNOROVÁ. *průručka pre meranie teploty*. Bratislava.
- [24] *Odporové snímače*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojíního inženýrství.
- [25] Prezbruchý, M. *Měření teplot na elektrických strojích*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 52s.

- [26] SUČÍK, Gabriel a Ľuboš POPOVIČ. *Meranie, riadenie a regulácia* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/hfkk/Keramika/MAR/MaR_{Ing}kripta.pdf>
- [27] Třídy přesnosti pro termočláňkové snímače teploty. *Günther.eu* [online]. 2016 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/d713b8f0-54e7-2c04-e4d1-179b215fcc36?Edition=cz>
- [28] WAGNER, Vladimír. *Reaktory IV generace aneb jak by mohla jaderná energetika vypadat zhruba za dvacet až čtyřicet let* [online]. Praha, 2008 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/wagner/popclan/transmutace/generaceIV.html>
- [29] SVOBODA, Josef a KOLEKTIV. *Neutron Flux Determination By High Accuracy Temperature Measurement. Proceeding of Science* . (2017 - in press). Adelaide, SA, Australia