



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Nerijus Makselė**

**300 MW torio – urano ciklo reaktoriaus fizikinių neutroninių  
charakteristikų tyrimas**

Baigiamasis bakalauro projektas

**Vadovas**  
Dr. Linas Paukštaitis

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**  
**ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA**

TVIRTINU  
Katedros vedėjas  
Doc. dr. Egidijus Puida

**300 MW torio – urano ciklo reaktoriaus fizikinių neutroninių  
charakteristikų tyrimas**

Baigiamasis bakalauro projektas  
**Branduolinė energetika (kodas 612E32001) B**

**Vadovas**  
Dr. Linas Paukštaitis

**Recenzentas**  
Dr. Rolandas Jonynas

**Projektą atliko**  
Nerijus Makselė

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:**

Šilumos ir atomo energetikos  
katedros vedėjas

(parašas, data)  
**Doc. E. Puida**  
(vardas, pavardė)

**PAGRINDINIŲ UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS  
Studijų programa BRANDUOLINĖ ENERGETIKA**

Universitetinių pagrindinių studijų, kurias baigus įgyjamas bakalauro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra taikomojo arba tiriamojo pobūdžio projektas. Jam atlikti ir apginti skiriama 12 kreditų. Šiuo projektu studentas parodo, kad yra sukaupęs pakankamai žinių, turi pakankamai gebėjimų ir nemažą pasirinktos studijų krypties analitinio ar projektavimo darbo patirtį. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, išmano socialinės ir komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinės galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir jų analizės, projektavimo ir inžinerinės analizės, informacinių technologijų naudojimo ir rašytinio bendravimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, giliai suvokia nagrinėjamą temą, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema **300 MW torio – urano ciklo reaktoriaus fizikinių neutroninių charakteristikų tyrimas**.....

Patvirtinta 201\_ ... m. .... mėn. .... d. dekanų įsakymu Nr. ....

2. Darbo tikslas **Suskaičiuoti pasirinkto reaktoriaus fizikines neutronines charakteristikas**.....

3. Darbo struktūra **Išvadas**

**1. Tyrimo tikslas**.....

**2. Literatūros analizė**.....

**3. Reaktoriaus skaičiavimas**.....

**Išvados. Literatūros sąrašas. Priedai**.....

4. Reikalavimai ir sąlygos .....

**Darbas turi atitikti bakalauro darbo metodinių nurodymų reikalavimus**.....

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 201... m. .... mėn. .... d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui **Nerijus Makselė**.....

Užduotį gavau **Nerijus Makselė**.....

(studento vardas, pavardė)

(parašas)

(data)

Vadovas **Dr. L. Paukštaitis**.....

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas)

(data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

(Fakultetas)

**Nerijus Makselė**

(Studento vardas, pavardė)

**Branduolinė energetika (612E32001)**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

300 MW torio – urano ciklo reaktoriaus fizikinių neutroninių charakteristikų tyrimas

**AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 \_\_\_\_\_  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Nerijaus Makselės** baigiamasis projektas tema „300 MW torio – urano ciklo reaktoriaus fizikinių neutroninių charakteristikų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

## SUMMARY

In this work thorium fuel and fuel cycle usage in current generation and future reactors is analyzed. Analysis includes thorium fuel and fuel cycle characteristics, advantages and disadvantages. Also implementation scenarios are presented. Thorium fuel usage principles in all types of current reactors are reviewed. Analysis was based on experience of past thorium fuel experimental and research reactors and in-pile performance of many tested fuel forms.

This topic is relevant because of rapidly depleting uranium resources, growing CO<sub>2</sub> emissions and their restrictions, increasing worldwide demand of electricity and rising safety requirements in nuclear energy sphere. Nowadays safety requirements are complemented by non-proliferation laws. Also one of the public concerns is growth of long-lived high-level radioactive waste levels. Thorium based nuclear fuel not only create less long-lived radioactive waste but also it can be more efficient, safer and cheaper in the future. It is also worth mentioning that thorium is 3 to 4 times more abundant in nature than uranium so thorium resources would last much longer. Even though this element is easily exploitable in many countries, it was not commercially exploited because of newly discovered uranium sources and estimated long fuel sufficiency for nuclear energy.

In this project the task is to examine thorium fuel suitability for currently operating and future reactors and verify its utilization in many reactor types. Main objective is to analyze operation principles of already designed 300 MW nuclear reactor which is scheduled to be built in India by 2016. It is the first commercial thorium fuelled reactor project in the world.

Aim is reached by calculating particular neutron-physical characteristics of this reactor project. Reactor operating capability is checked by calculations, verifying chain reaction sustainability in the reactor core.

This work is important because of rising number of nuclear reactors in the world, bigger nuclear fuel demand for reactors and new uses of abundant elements by supplementing depleting ones. New thorium fuel could supplement present uranium resources and ensure long-term nuclear energy sustainability in the world.

At present more countries became interested in potential and usage possibilities of this element. According to World Nuclear Association, thorium resources are estimated to be around 6355000 tons.

Literary sources in Lithuania could not be found while number of foreign sources is limited. This situation shows relevance and novelty of this work.

## TURINYS

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ĮVADAS .....                                                                       | 7  |
| 1. TYRIMO TIKSLAS.....                                                             | 8  |
| 2. LITERATŪROS ANALIZĖ .....                                                       | 9  |
| 2.1 Torio kuro reaktoriai .....                                                    | 9  |
| 2.2 Torio kuro ciklas .....                                                        | 16 |
| 2.3 Torio kuro ciklo įgyvendinimo scenarijai.....                                  | 20 |
| 3. REAKTORIAUS SKAIČIAVIMAS .....                                                  | 24 |
| 3.1 Skaičiavimo planas .....                                                       | 24 |
| 3.2 300 MW torio – urano ciklo reaktoriaus fizikinis neutroninis skaičiavimas..... | 29 |
| IŠVADOS.....                                                                       | 46 |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS.....                                                           | 47 |
| A. PRIEDAS. Torio skilimo grandinė .....                                           | 49 |
| B. PRIEDAS. Homogenizuotas blokas.....                                             | 50 |
| C. PRIEDAS. Momentinių neutronų skaičius vienam absorbuotam neutronui.....         | 51 |

## IVADAS

Susidomėjimas branduoline energija padidėjo patobulinus šiuolaikinių reaktorių valdymą. Liberalizuotose elektros rinkose elektra, pagaminta branduolinės energijos pagrindu tapo konkurencinga. 2014 metų pabaigoje pasaulyje veikė 435 reaktoriai, kurių instaliuota elektrinė galia siekė 370 GW. Tai atitinka apie 16 % viso pasaulio pagaminamos elektros energijos. Metinis vidutinis atominės energijos galios augimas siekia 0,9% iki 2025 metų, kuomet viso pasaulio instaliuotos branduolinės elektros energijos galia siektų 450 GW.

Dauguma šiuo metu pasaulyje veikiančių reaktorių yra suslėgto gamtinio vandens tipo (273), kurie sudaro 63 % visų pasaulyje veikiančių energetinių reaktorių. Toliau seka verdančiojo vandens (81), suslėgto sunkiojo vandens „CANDU“ (48), dujomis aušinami (15), gamtinio vandens ir grafito (15), greitųjų neutronų skysto metalo (2) reaktoriai.

Daugumoje reaktorių kuras yra urano oksidas ( $\text{UO}_2$ ), kuris dažniausiai yra įsodrinamas. Įsodrintu kuru paremti gamtinio vandens reaktoriai. Kai kurie branduoliniai reaktoriai gali veikti naudodami plutonio ir urano mišinį (MOX kurą). Procesas, kuriame urano rūda iškasama, perdirbama, jis įsodrinamas, panaudojamas reaktoriuose, galimai perdirbamas ir panaudotas perduodamas saugojimui atliekų pavidalu vadinamas branduolinio kuro ciklu.

Komer ciniai BWR ir PWR tipo reaktoriai naudoja apie 4 % įsodrintą  $^{235}\text{U}$ , o kai kurie reaktoriai su aukšta neutronų ekonomija gali naudoti gamtinį, nesodrintą uraną. TATENA duomenimis pasaulyje yra apie 100 tyrimų reaktorių, naudojančių ginklų lygio uraną, įsodrintą iki 90 %.

Senai buvo žinoma, kad  $^{232}\text{Th}$  yra „naši“ radioaktyvi medžiaga, kurią paveikus neutronais galima naudoti energijai gaminti branduoliniuose reaktoriuose. Ši energija vėliau paverčiama elektros energija. Torio kuro cikle  $^{232}\text{Th}$  izotopas absorbuoja neutroną šiluminių arba greitųjų neutronų reaktoriuje. Tuomet  $^{232}\text{Th}$  beta skilimu virsta į  $^{233}\text{Pa}$  ir vėliau į  $^{233}\text{U}$ , kuris panaudojamas kaip kuras. Kaip ir kitoms našiosioms medžiagoms, toriui reikalingas neutronų šaltinis virtimui daliają medžiaga. Neutronų šaltiniu gali būti daliosios medžiagos  $^{235}\text{U}$  arba  $^{239}\text{Pu}$  arba išorinis šaltinis, pvz., medžiagos skilimo neutronai. Gamtoje toris randamas grynas, todėl nereikalauja sodrinimo panaudojimui branduoliniuose reaktoriuose. Jam reikalingas tik palyginti pigus cheminis atskyrimas nuo rūdos priemaišų.

$^{232}\text{Th}$  –  $^{233}\text{U}$  ciklas puikiai tinka daugumai reaktorių tipų. Į juos įeina skystų fluorida druskų projektai, sunkiojo vandens „CANDU“ konfigūracijos ir heliu aušinamos „TRISO“ sistemos. Taip pat buvo pasiūlytas papildomas prototipas, kuriame neutronai sukuriama energijos stiprintuvu. Šiuo atveju nereikia radioaktyvaus elemento dalijimosi reakcijos.

## **1. TYRIMO TIKSLAS**

Darbo tikslas suskaičiuoti pasirinkto reaktoriaus fizikines neutronines charakteristikas. Taip patikrinti ar bus pasiektas kritiškumas naudojant torio, urano ir plutonio oksidų mišinių kūrą. Skaičiavimo metu patikrinamos kuro galimybės dirbti tokio tipo reaktoriuje pagal lėtiklio lėtinimo gebą ir neutronų išsiskyrimą reakcijų metu. Skaičiuojant išsiaiškinama koks kiekis papildomų daliųjų izotopų reikalingas bendrajame oksidų mišinio kure, kad išsiskirtų pakankamai neutronų grandininei reakcijai palaikyti.

## 2. LITERATŪROS ANALIZĖ

### 2.1 Torio kuro reaktoriai

Toris yra plačiai paplitęs gamtoje ir yra lengvai eksploatuojamas resursas daugelyje valstybių. Kitaip nei gamtinis uranas, kurio tik 0,7 % sudaro branduolinėje energetikoje panaudojamas dalus  $^{235}\text{U}$  izotopas, gamtinis toris praktiškai 100 % sudarytas iš „našaus“  $^{232}\text{Th}$  izotopo. Našusis  $^{232}\text{Th}$  konvertuojamas į dalių  $^{233}\text{U}$  ir toriu paremtas kuras – metalas, oksidas arba karbidas, buvo utilizuotas jį suderinant su daliuoju  $^{235}\text{U}$  arba  $^{239}\text{Pu}$  branduoliniams tyrimams ir komerciniams energetiniams reaktoriams, vertimui į dalių  $^{233}\text{U}$ , taip padidinant daliųjų izotopų resursus. Laikotarpiu nuo 1950 iki 1970, kai branduolinė energetika tik pradėjo vystytis, visame pasaulyje buvo susidomėta torio kuro ir kuro ciklo vystymu tam, kad būtų papildyti urano rezervai. Torio kuras ir kuro ciklas yra tinkamas šalims, kurios turi palyginti didelius torio išteklius, bet labai ribotus urano rezervus, ilgaamžei branduolinio kuro programai. Torio, kaip branduolinio kuro, tinkamumas buvo pademonstruotas aukštos temperatūros dujomis aušinamuose reaktoriuose (HTGR), gamtinio vandens reaktoriuose (LWR), suslėgto sunkiojo vandens reaktoriuose (PHWR), skystu metalu aušinamuose dauginimo reaktoriuose (LMFBR), ir išlydytos druskos dauginimo reaktoriuose (MSBR). Šie projektai buvo apžvelgti ir aprašyti keliuose plačiose apžvalgose ir konferencinėse veiklose, parengtose JAV Atominės Energijos Komisijos (US Atomic Energy Commission), JAV energijos departamento (US Department of Energy), KfA, Vokietijos ir IAEA (International Atomic Energy Agency). Neseniai IAEA surengtuose susitikimuose tema „Torio kuro utilizacija: galimybės ir tendencijos“ apibendrina koordinuotus IAEA tyrimų projektus ir torio ciklo pasirinkimo statusą bendradarbiaujančiose šalyse. Pirminis entuziazmas torio kuro ir kuro ciklu išblėso kai buvo atrasta naujų urano šaltinių ir padidėjo šio kuro prieinamumas. Tačiau pastaruoju metu, kai skiriamas vis didesnis dėmesys branduolinių ginklų neplatinimo susitarimams, reikalaujama pasiekti ilgesnius branduolinio kuro ciklus ir pratęsti kuro naudojimo laiką, pagerinti atliekų charakteristikos ir sumažinti plutonio išgavą, pastebimas padidėjęs susidomėjimas toriu paremtu branduolinio kuro ciklu iš keleto išsivysčiusių šalių pusės. Dar viena iš susidomėjimo priežasčių – padidintas požeminio daliųjų izotopų išgavos išplovimo metodo efektyvumas. Du pagrindiniai tarptautiniai projektai – Inovatyvių Branduolinių Reaktorių ir Kuro Ciklų Programa (INPRO) vykdoma IAEA ir JAV vystomų IV kartos reaktorių tarptautinis forumas (US-led Generation IV International Forum) irgi domisi torio kuro ir kuro ciklu [7].

Torio branduolinio kuro ir kuro ciklo privalumai ir trūkumai:

#### **Privalumai:**

- Toris yra apie 3–4 kartus labiau paplitęs žemės plutoje elementas nei pagrindinis šiuolaikinių reaktorių kurui naudojamas elementas uranas. Plačiai paplitęs gamtoje ir kol kas

komerciškai nebuvo išgaunamas. Torio kuras galėtų papildyti branduolinio kuro atsargas ir užtikrinti ilgalaikį branduolinės energijos tvarumą.

- Torio branduolinio kuro ciklo metu susidaro mažesni kiekiai ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų, lyginant su urano branduolinio kuro ciklu.
- Torio šiluminių neutronų absorbcijos skerspjūvis yra beveik 3 kartus didesnis  $^{232}\text{Th}$  (7,4 barno) negu urano  $^{238}\text{U}$  (2,7 barno). Taigi  $^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{U}$  branduolinės reakcijos efektyvumas veikiant medžiagą šiluminiais neutronais yra didesnis nei  $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{Pu}$  branduolinės reakcijos. Dėl šios priežasties, toris tinkamesnė „našioji“ medžiaga negu  $^{238}\text{U}$  šiluminių neutronų reaktoriuose, bet nusileidžia nuskurdintam uranui kaip „naši“ medžiaga greitųjų neutronų reaktoriuose.
- Daliajam branduoliui  $^{233}\text{U}$  atpalaiduotų neutronų skaičius absorbuojant neutroną yra didesnis už 2,0 plačiame šiluminių neutronų spektro diapazone, skirtingai nuo  $^{235}\text{U}$  ir  $^{239}\text{Pu}$ . Taigi, priešingai nei  $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$  ciklas, kuriame dauginimas įmanomas tik greitaisiais neutronais,  $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$  kuro ciklas gali funkcionuoti greitųjų, vidutinės energijos arba šiluminių neutronų spektre.
- Torio dioksidas chemiškai stabilesnis ir atsparesnis radiaciniam poveikiui nei urano dioksidas. Branduolinis kuras, pagamintas  $\text{ThO}_2$  pagrindu, sukuria mažiau dalijimosi produktų negu  $\text{UO}_2$  pagrindu paremtas kuras.  $\text{ThO}_2$  taip pat pasižymi geresnėmis termofizikinėmis savybėmis dėl geresnio terminio laidumo ir mažesnio terminio plėtimosi koeficiento lyginant su  $\text{UO}_2$ . Vadinasi,  $\text{ThO}_2$  branduolinis kuras darbo charakteristikomis pranašesnis už  $\text{UO}_2$  kurą.
- $\text{ThO}_2$  yra palyginti inertiškas ir pasižymi mažesne oksidacijos reakcijos sparta nei  $\text{UO}_2$ , kuris lengvai oksiduojasi į  $\text{U}_3\text{O}_8$  ir  $\text{UO}_3$ . Taigi, ilgalaikis atliekų saugojimas ir patalpinimas į atliekų saugyklas dėl geresnių antioksidacinių savybių yra paprastesnis  $\text{ThO}_2$  branduoliniam kurui.
- $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$  kuro cikle sukurama daug mažiau ilgaamžių aktinoidų (neptūnio, americio, kiurio) lyginant su  $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$  kuro ciklu, todėl sumažinamas panaudoto kuro aktyvumas. Tačiau,  $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$  ciklo pabaigoje susidaro kitų radionuklidų:  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{229}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{U}$ , kurie gali turėti ilgalaikį radiologinį poveikį.

#### Trūkumai:

- $\text{ThO}_2$  lydymosi temperatūra yra  $3350^\circ\text{C}$  - didesnė nei  $\text{UO}_2$  ( $2800^\circ\text{C}$ ). Dėl to reikalinga daug didesnė sukepinimo temperatūra ( $>2000^\circ\text{C}$ ) pagaminti didesnio tankio  $\text{ThO}_2$  ir  $\text{ThO}_2$  pagrindu sukurtus oksidų mišinius. Pasiiekti reikiamą tabletės tankį žemesnėje temperatūroje reikalingos sukepinimo priemonės ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  ir kt.).

- $\text{ThO}_2$  ir  $\text{ThO}_2$  oksidų mišiniai yra palyginti inertiški ir, skirtingai nuo  $\text{UO}_2$  ir  $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$  kuro, netirpsta koncentruotoje azoto rūgštyje. Būtinai HF priedas koncentruotoje  $\text{HNO}_3$  rūgštyje, o tai sukelia korozijos problemų nerūdijančio plieno įrangoje ir vamzdžiuose perdirbimo įmonėse. Korozijos problema sumažinama įterpiant aliuminio nitratus. Perdirbtam  $\text{ThO}_2$  pagrindo kurui reikalingas verdantis THOREX mišinys (virimo temperatūra 393K), kartu su ilgu tirpinimo procesu.
- Panaudotas toris arba torio pagrindo kuras sudėtyje turi didelį kiekį  $^{232}\text{U}$ , kurio pusėjimo trukmė tik 73,6 metų ir yra asocijuojamas su stipriai gama spinduliuojančiais dukteriniais produktais, tokiais kaip  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ , kurių pusėjimo trukmė labai trumpa. Dėl šios priežasties panaudotame torio branduoliniame kure arba atskirtame  $^{233}\text{U}$  susikaupia didelis radiacijos kiekis, todėl reikalingas perdirbimas gerai apsaugotose kamerose ir padidėja išlaidos perdirbant panaudotą branduolinį kurą.
- $^{232}\text{Th}$  vertimo į  $^{233}\text{U}$  grandinėje susiformuoja  $^{233}\text{Pa}$ , kuris turi sąlyginai ilgą pusamžį (27 paros) lyginant su  $^{239}\text{Np}$  (2,35 paros), kuris susidaro urano kuro cikle. Dėl šios priežasties reikalingas daug ilgesnis nusistovėjimo procesas, užtrunkantis bent vienerius metus, tam, kad didžioji dalis  $^{233}\text{Pa}$  virstų  $^{233}\text{U}$ . Paprastai Pa nukreipiamas kaip skilimo atliekų produktas THOREX procese, kuris gali turėti ilgalaikį radiologinį poveikį. Būtina  $^{233}\text{Pa}$  atskirti nuo panaudoto kuro prieš tirpiklio pašalinimo procesą, siekiant išskirti  $^{233}\text{U}$  ir torį.
- Urano, plutonio ir torio separavimo procesas iš panaudoto  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  kuro, nors ir įgyvendinamas, bet proceso efektyvumas nepatenkinamas.
- Torio kuro ir kuro ciklo eksploatavimo patirtis labai ribota lyginant su  $\text{UO}_2$  ir  $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$  kuro eksploatavimo patirtimi.

3.1 lentelė apibendrina eksperimentinius ir pramoninius reaktorių, kuriuose buvo panaudotas keraminis torio kuras apvilktų kuro dalelių (mikrosferų) forma grafito matricoje, HTGR reaktoriuose, arba kaip cirkalojaus/nerūdijančio plieno apvilktose kuro strypelių rinklėse, kuriuose buvo didelio tankio kuro tabletės arba apvilktos kuro dalelės. Praeityje, dviejuose helio aušinamuose Vokietijos biraus sluoksnio (Pebble Bed) HTGR reaktoriuose: AVR 15MW(e) ir THTR 300 MW(e), buvo naudojamos apvilktos kuro dalelės, susidedančios iš stipriai įsodrinto urano ir torio (HEU)-Th, maišytų oksidų ir maišytų dikarbidų, patalpintos grafitinėje matricoje ir įstatytos į sferinius 60 mm skersmens kuro elementus. Vėliau, pagal tarptautinius branduolinių ginklų neplatavimo reikalavimus, stipriai sodrintas uranas HEU buvo pakeistas į silpnai sodrintą (LEU <20 %  $^{235}\text{U}$ ). Apvilktos kuro dalelės, susidedančios iš urano ir torio oksidų ir dikarbidų, patalpintos grafito matricoje, buvo naudojamos prizminių blokų forma helio aušinamame amerikiečių HTGR reaktoriuose (Peach Bottom 40 MW(e) ir Fort St. Vrain 330

MW(e)). Jungtinėje Karalystėje taip pat veikė HTGR tipo reaktorius (Dragon Reactor), kuris taip pat naudojo torio urano oksidų apvilktas kuro daleles, patalpintas grafito matricoje [7].

3.1 lentelė. Eksperimentinių ir energetinių torio kuro reaktorių sąrašas [7]

| Pavadinimas                  | Šalis                                                          | Tipas                                              | Galia               | Kuras                                                                                | Veikimo periodas |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| AVR                          | Vokietija                                                      | HTGR, eksperimentinis (birus slukšnio reaktorius)  | 15 MW(e)            | Th+ <sup>235</sup> U varantysis kuras, apvilktos kuro dalelės, oksidas ir dikarbidai | 1967–1988        |
| THTR-300                     | Vokietija                                                      | HTGR, energetinis (birus slukšnio tipo)            | 300 MW(e)           | Th+ <sup>235</sup> U varantysis kuras, apvilktos kuro dalelės, oksidas ir dikarbidai | 1985–1989        |
| Lingen                       | Vokietija                                                      | BWR radiacijos poveikio tyrimų                     | 60 MW(e)            | Bandomasis kuras (Th,Pu)O <sub>2</sub> tabletės                                      | 1968-1973        |
| Dragon (OECD-Euratom)        | Didžioji Britanija (taip pat Švedija, Norvegija ir Šveicarija) | HTGR, eksperimentinis (kuro strypų bloko dizainas) | 20 MWt              | Th+ <sup>235</sup> U varantysis kuras, apvilktos kuro dalelės, oksidas ir dikarbidai | 1966–1973        |
| Peach Bottom                 | JAV                                                            | HTGR, eksperimentinis (prizminis blokas)           | 40 MW(e)            | Th+ <sup>235</sup> U varantysis kuras, apvilktos kuro dalelės, oksidas ir dikarbidai | 1966–1972        |
| Fort St Vrain                | JAV                                                            | HTGR, energetinis (prizminis blokas)               | 330 MW(e)           | Th+ <sup>235</sup> U varantysis kuras, apvilktos kuro dalelės, dikarbidas            | 1976–1989        |
| MSRE ORNL                    | JAV                                                            | MSBR                                               | 7.5 MWt             | <sup>233</sup> U išlydytas fluoriduose                                               | 1964–1969        |
| BORAX-IV & Elk River Station | JAV                                                            | BWR (kuro strypų rinklės)                          | 2.4 MW(e); 24 MW(e) | Th+ <sup>235</sup> U varantysis kuras, oksido tabletės                               | 1963 - 1968      |

|                                      |          |                                                    |                                                |                                                                                                      |                                                    |
|--------------------------------------|----------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Shippingport                         | JAV      | LWBR PWR, (kuro strypų rinklės)                    | 100 MW(e)                                      | Th+ $^{233}\text{U}$ varantysis kuras, oksido tabletės                                               | 1977–1982                                          |
| Indian Point 1                       | JAV      | LWBR PWR, (kuro strypų rinklės)                    | 285 MW(e)                                      | Th+ $^{233}\text{U}$ varantysis kuras, oksido tabletės                                               | 1962–1980                                          |
| SUSPOP/KSTR KEMA                     | Olandija | Skysta homogeninė suspensija (kuro strypų rinklės) | 1 MWt                                          | Th+HEU, oksido tabletės                                                                              | 1974–1977                                          |
| NRX & NRU                            | Kanada   | MTR (kuro strypų rinklės)                          | 20MW; 200MW                                    | Th+ $^{235}\text{U}$ , bandomasis kuras                                                              | 1947 (NRX) + 1957 (NRU); radiaciniai kuro bandymai |
| CIRUS; DHRUVA; & KAMINI              | Indija   | MTR Šiluminis                                      | 40 MWt; 100 MWt; 30 kWt (žemos galios, tyrimų) | Al+ $^{233}\text{U}$ varantysis kuras, „J“ strypas Th ir $\text{ThO}_2$ , „J“ strypas $\text{ThO}_2$ | 1960-2010 (CIRUS); kiti toliau veikiantys          |
| KAPS 1 & 2; KGS 1 & 2; RAPS 2, 3 & 4 | Indija   | PHWR, (kuro strypų rinklės)                        | 220 MW(e)                                      | $\text{ThO}_2$ tabletės (neutronų srauto išlyginimui pradžioje po paleidimo)                         | 1980 (RAPS 2) +; tęsiama naujuose PHWR modeliuose  |
| FBTR                                 | Indija   | LMFBR, (kuro strypų rinklės)                       | 40 MWt                                         | $\text{ThO}_2$                                                                                       | 1985; šiuo metu veikiantis                         |

Praeityje, vandeniui aušinamuose reaktoriuose, toris buvo naudojamas sukepintų kuro tablečių forma cirkalojaus apvalkale, susidedančių iš  $\text{ThO}_2$  ir  $(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$  ir kartais  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$ . Amerikiečių verdančio gamtinio vandens reaktoriai BORAX IV (20 MWt/2,4 MW(e)) ir Elk River (64 MWt/22 MW(e)), dirbę 1963-1968 metais, naudojo didelio tankio  $(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$  kuro tabletes, sudėtyje turinčias 4-7%  $\text{UO}_2$ . Pirmajame Indian Point reaktoriaus bloke (270 MW(e)), suspausto vandens reaktoriuje, buvo naudojamos didelio tankio  $(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$  kuro tabletes, sudėtyje turinčias 9,1%  $\text{UO}_2$  (stipriai sodrintas 93%  $^{235}\text{U}$ ). Amerikiečių 60 MW elektrinės galios Shipping Port gamtinio vandens dauginimo reaktorius (LWBR) buvo pagrindinis torio kuro reaktorius pasaulyje, demonstruojantis šiluminį dauginimą (dauginimo koeficientas  $>1$ ). Šis reaktorius naudojo modulius, sudarytus iš cirkalojaus-4 apvilkto didelio tankio  $(\text{Th}, ^{233}\text{U})\text{O}_2$  ir  $\text{ThO}_2$  kuro tablečių rinklių. Reaktorius veikė beveik 5 metus iki 1982 ir kuras pasiekė maksimalų kuro išdegimo laipsnį 60 000 MW parų/t be jokių kuro avarių.

Indijoje visada buvo stipri iniciatyva tobulinti torio kūrą ir kuro ciklą dėl didelių torio išteklių lyginant su mažais urano rezervais. Aliuminiu apvilktos torio oksido tabletės nuolatos veikiamos spinduliuotės CIRUS ir DHRUVA tyrimų reaktoriuose BARC (Bhabha Atomic Research Centre) tyrimų centre. Po to spinduliuotės paveiktas toris perdirbimas THOREX procesu ir išgaunamas  $^{233}\text{U}$  panaudojamas 30 kWt tyrimų reaktoriuje KAMINI aliuminio apvilktų Al - 20 %  $^{233}\text{U}$  kuro plokščių pavidalu. Dideli kiekiai didelio tankio sukepinto  $\text{ThO}_2$  tablečių buvo gaminamos Branduolinio Kuro Komplekse (Nuclear Fuel Complex) ir yra naudojamos greitųjų neutronų dauginančiuose tyrimų reaktoriuose (FBTR). Keletas tyrimų yra atliekama su  $(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$  ir  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  kuro sudėtyje turinčiu mažiau negu 5 % urano arba plutonio panaudojimui gamtiniu vandeniu aušinamuose reaktoriuose. Taip pat tiriamas  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  kuras sudėtyje turintis 20–30 %  $\text{PuO}_2$  ir 70–80 %  $\text{PuO}_2$  panaudojimui skystu metalu aušinamuose greitųjų neutronų dauginimo (LMFBR) dideliuose ir mažuose reaktoriuose. Keletas cirkalojumi apvilktų  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  kuro strypų buvo sėkmingai paveikti spinduliuotės pasiekiant kuro išdegimo laipsnį tarp 15 000–18 000 MW parų/t suspausto vandens kilpoje, CIRUS reaktoriuje. Pradėti dizaino ir vystymo darbai konstruojant 300MW(e) pažangųjį sunkiojo vandens reaktorių AHWR300 su  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  ir  $(\text{Th}, ^{233}\text{U})\text{O}_2$  varančiuoju kuru. Šiuo metu vykdomas AHWR 300 tyrimas IAEA, kurio tikslas patvirtinti INPRO metodiką. GIF (IV kartos reaktorių tarptautinis forumas) nustatė labai aukštos temperatūros reaktorių (VHTR), kuris galėtų būti pastatytas iki 2020 metų, kaip vieną iš kandidatų aukštos temperatūros procesams, pirmiausiai termocheminei vandenilio gamybai, anglių dujofikacijai ir kitų procesų, kaip priedų elektros gamybai. Šiam atvejui rekomenduojamas 600 MW šiluminės galios heliu aušinamas, prizminių blokų kuro, dujų turbinos ciklo reaktorius (GT–MHR) arba biraus kuro modulinis reaktorius (PBMR). Šio reaktoriaus kurui stiprus kandidatas yra torio pagrindu sudarytos kuro dalelės, padengtos cirkonio karbidu, TRISO oksidu, maišytų oksidų, dikarbidų arba maišytų dikarbidų grafito matricoje. Torio ciklus galima panaudoti visuose šiuo metu veikiančiuose šiluminių ir greitųjų neutronų reaktoriuose, pvz., gamtinio vandens (LWR), suslėgto sunkiojo vandens (PHWR), aukštos temperatūros dujomis aušinamuose (HTGR), skystos druskos dauginančiuose reaktoriuose (MSBR) ir skystu metalu aušinamuose dauginimo reaktoriuose (LMFBR), taip pat subkritiniuose reaktoriuose (ADS). Netolimoje ateityje turėtų būti galima įtraukti torio kuro ciklą kai kuriuose aukščiau minėtuose reaktoriuose be didelių inžinerinių sistemų pakeitimų, reaktoriaus kontrolės ir reaktyvumo įrenginių. Tačiau pažangiems reaktoriams ir kuro ciklams reikėtų daug fizikinių tyrimų ir technologinio vystymo tam, kad juos būtų galima įdiegti. Kasmetinės Indijos atominės energijos visuomenės konferencijos „Energija iš torio: statusas, strategijos ir nuorodos“ veikla, kuri vyko 2000 metų birželio mėnesį Mumbajuje, ir EURATOM ataskaita „Toris kaip atliekų tvarkymo galimybė“ pateikė plačią apžvalgą visais torio kuro ir kuro ciklo aspektais. Visi torio kuro ciklo aspektai, įskaitant pasaulinius išteklius, reaktorių

valdymo/eksploatavimo patirtį, kuro savybes ir eksploataciją, kuro ciklo galimybes, standartinius ir pažangius kuro gamybos metodus, panaudoto kuro priežiūrą ir tarpinį saugojimą, perdirbimą ir atliekų tvarkymą buvo apžvelgti šiuose posėdžiuose. Ekspertai iš dalyvaujančių šalių pateikė savo apžvalgas ir apibendrino savo šalies specialistų darbus. Dabartinė techninė dokumentacija daugiausiai apima šių ekspertų ir specialistų ataskaitas ir pristatymo medžiagą. Tikslas papildyti informaciją ir pateikti apžvalgą tema „Torio kuro ciklas: potencialūs privalumai ir iššūkiai“, paremta technologijos vystymosi nuo 2000 metų, dėmesį sutelkiant į būsimus toriu paremtus reaktorius, dabartinę informacijos bazę, įtraukiant torio kuro gamybą ir perdirbimą ir ekonominius klausimus. Baigiamasis skyrius apibendrina ateities perspektyvas ir rekomendacijas, susijusias su torio kuru ir kuro ciklu [7].

## 2.2 Torio kuro ciklas

Trys pirmi branduoliniai reaktoriai buvo suprojektuoti Rusijos Federacijoje, Jungtinėje Karalystėje ir Jungtinėse Amerikos Valstijose 1950–1980 metais. Branduolinė energetika suklestėjo kaip subrendusi pramoninė technologija Šiaurės Amerikoje, Europoje ir keliose Azijos šalyse su profesine patirtimi ir gera perspektyva ateičiai. Deja, branduolinės energetikos augimas dramatiškai sulėtėjo JAV ir Europoje po Černobylio katastrofos, įvykusios 1986 metais, kuri iššaukė prieštarinę nuomonę apie atominę energetiką. Atominės energetikos gebėjimas konkuruoti rinkoje buvo susilpnintas dėl staigaus kainos šuolio užtikrinant ir įtikinamai pademonstruojant branduolinių reaktorių saugumą. Tačiau nuo 1990 branduolinė energetika pradėjo tobulėti ir reikšmingiausias rodiklis buvo šios srities naudingumo koeficientas. Pastarieji susirūpinimai globaliniu atšilimu ir CO<sub>2</sub> išmetimo į aplinką ribojimas parodė, jog ateities energijos poreikiai negali būti patenkinti tikrai iškastiniu kuru, todėl atominė energetika yra svarbus šaltinis. Buvo parengti du dideli tarptautiniai projektai: TATENA inicijuotas INPRO, ir JAV vadovaujamas GIF, kurie ieško inovacijų branduolinių reaktorių srityje ir branduolinio kuro cikle tam, kad būtų patenkinti pasauliniai energijos poreikiai 21 amžiuje ir vėliau. Be to, Europos Sąjunga taip pat inicijavo MICANET programą su panašiomis užduotimis. Kai kurios bendros INPRO ir GIF užduotys yra branduolinės energijos ilgaamžis tvarumas ir ekonominis palankumas, viešas bendradarbiavimas saugumo klausimais, branduolinių atliekų saugojimas, tvarkymas ir aplinkos apsauga, aktinoidų tvarkymas ir branduolinių medžiagų platinimo atsparumas branduolinio kuro cikluose. INPRO ir GIF misija taip pat siekia vystyti branduolinės energijos kombinuotas sistemas, tiekiančias elektrą ir technologijos proceso šilumą. Priklausomai nuo reaktoriaus tipo šiluma techniniams poreikiams gali būti tiekama aukštos (per 700°C) temperatūros garo gamybai, termocheminei vandenilio gamybai arba naudojant žemesnę temperatūrą vandens gėlinimo procesuose, rajonų šildyme ir kita. Tuomet vandenilio pagrindo energijos sistema gali pakeisti anglies pagrindo kurą transporto sektoriuje, sumažinti CO<sub>2</sub> ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų išsiskyrimą [7].

Uranas ir toris yra du sunkiausi gamtoje randami elementai. Jie yra baziniai branduolinio dalijimosi energijos gamybai. Gamtinis uranas savo sudėtyje turi apie 0,7% dalį izotopo <sup>235</sup>U (99,3% „našaus“ <sup>238</sup>U izotopo). Toris savo sudėtyje daliųjų medžiagų neturi ir visas yra sudarytas tik iš „našaus“ <sup>232</sup>Th izotopo. Tikimasi, kad metiniai pasauliniai urano poreikiai išaugs nuo dabartinių 66 000 tonų iki apie 82 000 tonų iki 2025 metų. 2002 metų pabaigoje pasaulinė urano produkcija siekė 36 042 tonas ir aprūpino apie 54 % pasaulio reaktorių poreikių (66 815 tonų), kai likusi dalis buvo gauta iš antrinių šaltinių, tokiu kaip civilinių ir karinių rezervų, urano perdirbimo ir nuskurdinto urano pakartotinio sodrinimo. Tačiau antrinių išteklių svarba žymiai sumažės ir iki 2025 metų jų panaudojimas sieks tik apie 4–6 % viso poreikio. Susiklosčius tokioms aplinkybėms

torio kuro ciklo įdiegimas atliktų papildančiąją rolę ir užtikrintų lengvą priėjimą prie pagrindinių branduolinės dalijimosi reakcijos medžiagų. Branduolinės energijos programoje panaudojant torį reikalingas papildomas žingsnis: „našaus“  $^{232}\text{Th}$  izotopo pavertimas į dalių  $^{233}\text{U}$  izotopą.  $^{233}\text{U}$  yra bene pats tinkamiausias dalusis izotopas veikiant šiluminiais neutronais ir gali būti panaudotas daliųjų izotopų gamybai tiek šiluminių, tiek greitųjų neutronų reaktoriuose. Taigi, tarp 1950 ir 1970, pasaulyje dideliu mastu buvo susidomėta torio branduolinio kuro ir kuro ciklo plėtra siekiant papildyti daliojo  $^{235}\text{U}$  rezervą  $^{233}\text{U}$  izotopu. Dėl naujų urano išteklių radimo ir pagerinto prieinamumo pirminis entuziazmas kylančiose šalyse išblėso. Tačiau vėliau susidomėjimas torio kuru atsinaujino kelyse išsivysčiusiose šalyse dėl branduolinių medžiagų neplatinimo reikalavimų, ilgesnių kuro ciklų, didesnio išdegimo laipsnio ir palankesnių atliekų savybių. Torio kuro pagrindimas skiriasi kiekvienoje šalyje ir yra paremtas šiais faktais:

### **Torio paplitimas gamtoje ir lengvos kasybos operacijos**

Toris plačiai paplitęs elementas. Žemės plutoje torio koncentracija vidutiniškai siekia 10 milijoninių dalių daugumoje fosfatų, silikatų, karbonatų ir oksidų mineralų. Kol kas komerciškai nebuvo eksploatuotas. Paprastai toris randamas bendrai su uranu ir retai randamais elementais įvairiuose akmenų tipuose: torituose, torianituose, uranotorituose ir kaip monazitas granituose, sienituose, pegmatituose ir kitose rūgštinėse intruzijose. Monazitas taip pat randamas kvarco konglomerato smėlio akmenyse ir upių, paplūdimių sąnašose. Monazitas – mišrus torio retųjų žemių urano fosfatas yra populiariausias torio šaltinis, kuris yra lengvai prieinamas daugumoje valstybių upių ir paplūdimių smėliuose kartu su sunkių mineralų ilmenitu, rutilu, cirkonu, silimanitu ir granatu. Šiuo metu beveik visas toris išgaunamas, kaip šalutinis produktas, retųjų elementų gamyboje iš monazito smėlio. Torio kasyba ir išgavimas iš monazito yra palyginus nesudėtingas procesas ir ženkliai skiriasi nuo urano gavybos iš jo rūdų. Atliekų kiekis kasybos procese yra ženkliai mažesnis lyginant su urano gavyba ir bendra radioaktyvių atliekų produkcija kasybos procese yra 2 eilėmis mažesnė lyginant su urano kasyba. Radono įtaka šiuose procesuose taip pat ženkliai mažesnė dėl mažo torono ( $^{220}\text{Rn}$ ) pusamžio lyginant su radonu urano gamyboje ir dėl to atliekų priežiūra tampa daug paprastesnė išvengiant ilgalaikių visuomenės gautų spinduliuotės dozių. Šiuo atveju nereikalinga ventiliacijos kontrolė profesinės spinduliuotės dozių ribojimui dėl  $^{220}\text{Rn}$  patekimo į plaučius, kadangi monozitas išgaunamas atviroje kasykloje [7].

Indijoje vyravo ilgalaikis susidomėjimas torio kuru ir kuro ciklu dėl didelių torio išteklių (518 000 tonų) monazito forma, paplūdimių smėliuose, palyginti su labai kukliais urano rezervais (92 000 tonų). Ilgalaikis vietinis branduolinės energijos tvarumas Indijoje priklauso nuo didelio masto milžiniškų torio resursų panaudojimo  $^{233}\text{U}$  gamybai ir perdirbimui iš uždaro  $^{232}\text{Th}$  -  $^{233}\text{U}$  kuro ciklo šiluminiuose dauginimo reaktoriuose.

## **Geresnės $^{232}\text{Th}$ ir $^{233}\text{U}$ branduolinės charakteristikos**

Šiluminiuose reaktoriuose  $^{232}\text{Th}$  yra geresnė „našioji“ medžiaga už  $^{238}\text{U}$  dėl tris kartus didesnio šiluminių neutronų absorbcijos skerspjūvio.  $^{232}\text{Th}$  šis dydis yra 7,4 barno, kai  $^{238}\text{U}$  siekia 2,4 barno. Taigi,  $^{232}\text{Th}$  vertimas į  $^{233}\text{U}$  yra efektyvesnis negu  $^{238}\text{U}$  vertimas į  $^{239}\text{Pu}$  šiluminių neutronų spektre nors ir  $^{232}\text{Th}$  rezonansinis integralas yra 1/3  $^{238}\text{U}$  integralo vertės.

Skirtingai nuo  $^{235}\text{U}$  ir  $^{239}\text{Pu}$ , daliajam  $^{233}\text{U}$  nuklidui atpalaiduotų neutronų skaičius vienam absorbuotam neutronui yra didesnis už 2,0 plačiame šiluminių neutronų energijų intervale. Taigi,  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$  kuro ciklas yra mažiau jautrus reaktoriaus tipui – šiluminių ar greitųjų neutronų. Neutrono pagavimo skerspjūvis  $^{233}\text{U}$  yra daug mažesnis (46 barnai) negu  $^{235}\text{U}$  (101 barnas) ir  $^{239}\text{Pu}$  (271 barnas) šiluminiais neutronais, kai dalijimosi skerspjūvis visiems trimis daliesiems izotopams yra 525, 577 ir 742 barnai  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ir  $^{239}\text{Pu}$  atitinkamai. Taigi, mažiau tikėtina nedalioji absorbcija gaunant izotopus ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  ir  $^{240}\text{Pu}$ ), kurie turi didesnius absorbcijos skerspjūvius. Reaktyvumo požiūriu tai palengvina  $^{233}\text{U}$  perdirbimą lyginant su torio sistemose panaudotu plutoniu [7].

## **Geresnis cheminis ir radiacinis $\text{ThO}_2$ stabilumas**

Torio dioksidas yra chemiškai stabilesnis ir atsparesnis radiacijai už urano dioksidą.  $\text{ThO}_2$  pagrindo kuro skilimo metu susidaro daug mažiau skilimo produktų negu  $\text{UO}_2$  kuro.  $\text{ThO}_2$ , lyginant su  $\text{UO}_2$ , pasižymi geresnėmis termofizikinėmis savybėmis dėl aukštesnio šilumos laidumo koeficiento ir mažesnio šiluminio plėtimosi koeficiento. Manoma, kad  $\text{ThO}_2$  pagrindo kuras turės geresnes eksploatacijos savybes reaktoriuje lyginant su  $\text{UO}_2$  ir  $\text{UO}_2$  pagrindo oksidų mišiniais [7].

## **Puikios eksploatacinės $\text{ThO}_2$ , $(\text{Th,U})\text{O}_2$ , $\text{ThC}_2$ ir $(\text{Th,U})\text{C}_2$ savybės praeityje, HTGR reaktoriuose**

Praeityje, apvilktos torio, torio – urano mišinio, torio dikarbido ir torio – urano dikarbido kuro dalelės pademonstravo puikias eksploatacines savybes aukštos temperatūros dujomis aušinamuose reaktoriuose (HTGR) Vokietijoje, JAV ir Jungtinėje Karalystėje. Šiuo pagrindu pakanka iniciatyvos ir išdėstymo apsvarstyti torio pagrindo oksidų mišinių ir dikarbidų mišinių kuro kandidatūrą 600 MW šiluminės galios heliu aušinamiems, labai aukštos temperatūros reaktoriams (VHTR), kurių aušalo darbinė temperatūra siekia 1000 °C ir kurie pagal Ketvirtosios kartos tarptautinio forumo standartą (GIF) yra tinkamiausias reaktoriaus modelis vandeniliui gaminti. Juos tikimasi eksploatuoti iki 2020 metų. Torio pagrindo apvilktos kuro dalelės yra patrauklus variantas 600 MW šiluminės galios VHTR reaktoriams tiek prizminių blokų kurui dujų turbinos – moduliniais helio reaktoriams (GT–MHR), tiek biraus sluoksnio kurui biraus sluoksnio moduliniais reaktoriams (PBMR) [7].

## **Esminiai $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$ ciklo branduolinių medžiagų neplatinimo klausimai ir plutonio deginimas vienkartinio kuro ciklo, greitųjų neutronų reaktoriuose**

Galimybė platinti branduolinio ginklo medžiagas, susidarančias kaip branduolinio kuro ciklo šalutinis produktas, kelia rimtą susirūpinimą ir gali būti viena iš pagrindinių kliūčių pasaulinei branduolinės energijos plėtrai. Visuomenės susirūpinimas susijęs su branduolinio ginklo platinimo galimybe civilinėje atominės energijos pramonėje privedė prie panaudoto kuro perdirbimo plano atsisakymo Jungtinėse Amerikos Valstijose, nepaisant galimybės pagerinti dabartinių kuro ciklų resursų panaudojimą. Todėl, norint branduolinę energetiką įtraukti į pirminius energijos gamybos šaltinius, reikia sukurti kuro ciklą, kuris užkirstų kelią branduolinių medžiagų platinimui. Branduolinio kuro cikle branduolinių ginklų medžiagoms neplatinti turi būti užtikrinta ne tik administracinė kontrolė ir apsauga, bet kartu išvengiama kariniams tikslams pakankamų šių medžiagų kiekių susidarymo. Taigi visiškai atskirti branduolinės energetikos vystymą ir plėtrą nuo galimos branduolinių ginklų gamybos grėsmės būtina sukurti vieningą tarptautinę kontrolės sistemą. Vien šios apsaugos nepakanka ir turi būti atsižvelgta į kuro ciklo savybes, kurios savaime padėtų užtikrinti šią apsaugą. Toriu paremtas kuras ir kuro ciklas turi fundamentalią branduolinių medžiagų neplatinimo apsaugą dėl  $^{232}\text{U}$  nuklido susidarymo ( $n,2n$ ) reakcijose su  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Pa}$  ir  $^{233}\text{U}$ . Nuklido  $^{232}\text{U}$  skilimo pusamžis yra tik 73,6 metų. Taip pat jo dukteriniai produktai turi labai trumpus pusamžius ir tokie kaip  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  spinduliuoja didelės energijos gama spinduliuotę, 0,7–1,8 MeV ir 2,6 MeV atitinkamai. Taigi  $^{232}\text{U}$  gali būti panaudotas kaip savaiminis branduolinių medžiagų neplatinimo barjeras sustabdant stipriai įsodrinto urano (HEU) ir ginklams naudojamą plutonio (W-Pu) gamybą netaikiems tikslams. Ginklams naudojamą plutonio ir reaktorių plutonio deginimo tikslams panaudojant vienkartinį ciklą geriau naudoti  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  kurą, o ne  $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$  kurą. Torio matricoje plutonis nedauginamas, tačiau panaudotame kure susidaro  $^{232}\text{U}$ , kuris užtikrina branduolinių medžiagų neplatinimą dėl aukštos gama spinduliuotės susijusios su dukteriniais produktais. Be to, šis kuras iš karto gali būti perleistas ilgalaikėms saugykloms atsižvelgiant į aukštą  $\text{ThO}_2$  cheminį stabilumą ir inertiškumą [7].

## **Puiki panaudojimo galimybė CANDU-PHWR, ACR ir AHWR reaktoriuose**

Vieno karto torio (Once-Through Thorium) ciklai mišriųjų kanalų ir mišrių kuro paketų schemose yra studijuojami dabartiniuose CANDU reaktoriuose ir pažangiuosiuose CANDU reaktoriuose (ACR) Kanadoje, siekiant sumažinti plutonio gamybą ir pasinaudoti geresnėmis termofizikinėmis savybėmis ir cheminiu  $\text{ThO}_2$  stabilumu, taip pagerinant kuro išdegimą ir atliekų formos stabilumą. CANFLEX paketui, susidedančiam iš 43 kuro elementų, siūloma 8 vidinius

elementus sudaryti iš gryno  $\text{ThO}_2$ , kai likusieji 35 elementai būtų sudaryti iš sąlyginai mažai sodrinto urano (SEU) oksido, sudėtyje turinčio 2,2–3 %  $^{235}\text{U}$  [7].

Indijoje siekiama išstbulinti uždarą, savarankišką  $^{232}\text{Th}$  -  $^{233}\text{U}$  kuro ciklą dėl galimybės panaudoti milžiniškus torio resursus. Šiam tikslui buvo suprojektuotas 300 MW elektrinės galios pažangusis sunkiuoju vandeniu valdomas, verdančio vandens reaktorius (AHWR 300). Šis reaktorius yra vertikalios slėgio vamzdžio tipo, su pasyviomis saugumo sistemomis, kuro perkrovimu reaktoriaus darbo metu ir kaip varantįjį kurą naudoja  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  ir  $(\text{Th}, ^{233}\text{U})\text{O}_2$  oksidų mišinius [7].

### **Privalumai toriu varomose ADS sistemose**

Greitintuvu varoma subkritinė rinklių sistema (ADS) kartu su energijos stiprintuvu (EA) ir toriu kaip dauginimo kuru turi svarbių pranašumų torio kuro cikle. Akivaizdžiausias privalumas yra mažesnio aktyvumo branduolinių atliekų susidarymas, kuris kartu padeda pasiekti branduolinių medžiagų neplatinimo reikalavimų kriterijus panaudotam branduoliam kurui.  $^{233}\text{U}$  gali būti denatūruotas papildant  $^{238}\text{U}$  ir perdirbamas. ADS sistemoje 1 GeV protonai priverčiami susidurti su sunkiu taikiniu (dažniausiai Pb arba Pb–Bi lydinis) sukuriant 20 MeV energijos skilimo neutronus. Stiprintuvas susideda iš subkritinės  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  rinklės su  $k_{\text{ef}} \approx 0,95$  reikšme, tokia, kad būtų tikimasi vėlesnio neutronų padaugėjimo  $1/(1-k_{\text{ef}})=20$ . Priklausomai nuo naudojamo lėtiklio/aušalo šie neutronai energijos stiprintuve (EA) gali būti sulėtinti iki šiluminių grafito lėtiklių, dalinai sulėtinti suspaustu vandeniu arba likti greitaisiais. Atliekos, susidariusios šiuose toriu varomuose energijos stiprintuvuose, yra apytiksliai 30 kartų mažiau toksiškos lyginant su urano kuru per pirmuosius 30 000 laidojimo metų [7].

### **Mažiau problemų tvarkant transuranines (TRU) atliekas**

Visuomenės susirūpinimai dėl branduolinių atliekų iš komercinių atominių elektrinių yra dažniausiai susiję su ilgalaikiu panaudoto branduolinio kuro toksiškumu. Dabartiniame vieno karto cikle dominuoja plutonis ir kiti aktinoidai. Aktinoidai vaidina dominuojančią rolę tiek bendrajai spinduliuotei, tiek potencialiai visuomenės dozei.  $^{232}\text{Th}$  -  $^{233}\text{U}$  kuro cikle susidaro mažiau plutonio ir ilgaamžių aktinoidų (Np, Am ir Cm) lyginant su  $^{238}\text{U}$  -  $^{239}\text{Pu}$  kuro ciklu, taigi sumažėja toksiškumas ir likutinės šilumos problemos. Taip pat  $\text{ThO}_2$  stabilumas gali padėti pavėlinti aktinoidų migraciją saugykloje [7].

### **2.3 Torio kuro ciklo įgyvendinimo scenarijai**

Torio branduolinės energijos panaudojimas dideliu mastu įmanomas tik pirmiausiai įdiegiant „našaus“  $^{232}\text{Th}$  izotopo pavertimą į dalųjį  $^{233}\text{U}$ . Tolimesnis  $^{233}\text{U}$  panaudojimas galimas šiais būdais:

- Atviras kuro ciklas -  $^{232}\text{Th}$  paverčiant į  $^{233}\text{U}$  ir pastarąjį dalijant pačiame reaktoriuje be  $^{233}\text{U}$  cheminės separacijos.
- Uždaras kuro ciklas – torio ir torio kuro cheminis perdirbimas išgaunant  $^{233}\text{U}$ , jį panaudojant kurui gaminti ir kurą vėl perdirbant.

### Atviras kuro ciklas

Taikant atvirąjį kuro ciklą išvengiama inžinerinių procesų ir kitų sudėtingumų susijusių su radiotoksiško  $^{233}\text{U}$  kuro perdirbimu. Torio vieno karto metodo panaudojimo pavyzdys yra Radkovskio idėja gamtinio vandens reaktoriui, kuri taip pat galioja Rusiškam VVER – T (torio) reaktoriaus koncepcijai. Šio metodo esmė kuro rinklės centrą pagaminti iš daliosios medžiagos (vidutiniškai sodrinto urano, plutonio), o aplink ją išdėlioti torį. Rinklės centro komponentai keičiami dažniau lyginant su kuro rinklėmis per kuro perkrovimą. Kuro rinklės centro ir torio perskyrimas, lėtiklio (gamtinio vandens) santykio su kuru optimizavimas ir labai ilgas kuro dirbimo laikas (900 ir 2620 pilnos galios darbo kuro rinklės, centrui ir toriui atitinkamai) leidžia šiai sistemai pagaminti iki 40 % energijos iš  $^{233}\text{U}$  dalijimosi reakcijų. Panaudojant torį tokia atviro kuro ciklo idėja labai patraukli žiūrint iš  $^{233}\text{U}$  panaudojimo reaktoriaus viduje pusės, išvengiant sudėtingo  $^{233}\text{U}$  tvarkymo už reaktoriaus ribų [7].

Dar viena paskata panaudoti torį vieno karto cikle yra galimybė sunaudoti ginklams naudojamą plutonį maišant kartu su toriu gamtinio vandens reaktoriuose VVER-1000. Šiam tikslui kaip varantysis kuras gali būti panaudotas torio plutonio oksidų mišinys (apie 5 %  $\text{PuO}_2$ ). Urano neįtraukimas į kuro kompoziciją stipriai padidina plutonio deginimą lyginant su standartiniu urano ir plutonio oksidų mišinio (MOX) kuru. Pasiiekęs standartinį išdegimą (< 40 MW parų/kg sunkiojo metalo), LWR reaktoriuose panaudotas torio ir plutonio oksidų kuras yra ne tik išdegęs plutonio prasme, bet kartu tampa atsparus branduolinių medžiagų platinimui dėl  $^{232}\text{U}$  susidarymo ( $n,2n$ ) reakcijoje su  $^{232}\text{Th}$ , kurio dukteriniai produktai turi labai auštą gama spinduliuotę [7].

Taip pat reaktorių plutonio ištekliai gali būti ženkliai sumažinami panaudojant tą pačią kombinaciją su toriu VVER-1000 tipo reaktoriuose. Mažai sodrinto urano oksido kuro tiesioginis pakaitalas galėtų būti torio ir plutonio oksidų mišinys. Šiuo atveju nereikalingos didesnės reaktoriaus aktyviosios zonos ar veikimo modifikacijos. Tokiame reaktoriuje nereikia naudoti, įdiegti į kurą, išdegančio neutronų sugėriklio gadolinio pavidalu. Reaktorių plutonyje yra pakankami kiekiai  $^{240}\text{Pu}$  izotopo, kuris tarnauja kaip išdegantis neutronų sugėriklis. Svarstomi du planai visiškai pakrauti VVER-1000 reaktoriaus aktyviąją zoną torio ir plutonio kuro mišiniu. Standartinėje aktyviojoje zonoje visos šviežio kuro rinklės patalpintos periferijoje, o modifikuotame variante tik 12 kuro rinklių iš 54 būtų patalpintos periferijos eilėje. Tipiška VVER-1000 aktyvioji zona, visiškai užpildyta torio plutonio oksidu, sunaudotų 1694 kilogramus reaktorių plutonio. Iš šių

reaktorių iškrautas plutonis turėtų apie 28 %  $^{239}\text{Pu}$ , kuris galėtų būti panaudotas tik greitųjų neutronų reaktoriuose. Panaudotame kure būtų pagaminta apie 300 kg  $^{233}\text{U}$ , kuris sudėtyje turėtų 3500  $^{232}\text{U}$  milijoninių dalių. Vienas iš pagrindinių torio plutonio oksidų mišinių kuro pranašumų VVER reaktoriuose yra neutronų srauto sumažėjimas reaktoriaus korpuse. Gamtinio vandens reaktoriai naudodami plutonio ir torio oksidų mišinį iš tikrųjų turi geresnes saugumo charakteristikas lyginant su naudojančiais įsodintą urano oksidą. Priklausomai nuo branduolinės energijos plėtos strategijos, panaudotas torio ir plutonio oksidų mišinio kuras iš VVER reaktorių gali būti saugomas ilgalaikėje saugykloje iki kol  $^{233}\text{U}$  perdirbimas ir atskyrimas taps ekonomiškai patrauklus [7].

Tiek ginklams naudojamas plutonis, tiek reaktorių plutonis gali būti efektyviai panaudotas kombinacijoje su toriu kaip torio plutonio oksidų mišinio kuras (sudėtyje 20–30 %  $\text{PuO}_2$ ) komerciniuose skystu metalu aušinamuose greitųjų neutronų (LMFBR) reaktoriuose. Mažuose LMFBR reaktoriuose, tokiuose kaip greitųjų neutronų dauginimo tyrimų reaktorius (FBRT) Indijoje,  $\text{PuO}_2$  turinys  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  kure gali būti daug didesnis ir siekti 70–80 % [7].

### **Uždaras kuro ciklas**

Radioaktyvaus torio kuro perdirbimas ir  $^{233}\text{U}$  atskyrimas yra būtini uždaro kuro ciklo žingsniai. Šiuo atveju gamtinio vandens reaktoriai, tokie kaip VVER–1000, kurie naudoja torio plutonio oksidų mišinio kurą, gali būti laikomi  $^{233}\text{U}$  transmutatoriais. Gamtinio vandens reaktoriuose (tokiuose kaip VVER–1000) susiformavusio  $^{233}\text{U}$  perdirbimui svarbus faktorius yra  $^{232}\text{U}$  kiekis jo sudėtyje. Standartiniam kuro išdegimui apie 40 MW parą/kg kieto metalo VVER–1000 kurui  $^{232}\text{U}$  kiekis sudėtyje siektų apie 3000 milijoninių dalių. Galimi du perdirbimo variantai:

- $(^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U})\text{O}_2$  kuro panaudojimas.
- (nuskurdinto  $\text{U} - ^{233}\text{U})\text{O}_2$  arba (perdirbto  $\text{U}$  iš VVER –  $^{233}\text{U})\text{O}_2$  panaudojimas.

Pirmuoju variantu  $^{233}\text{U}$  sudėtyje vėlesniuose cikluose kaupsis  $^{232}\text{U}$ , o panaudojant perdirbtą uraną abu „nešvarūs“ urano izotopai būtų utilizuoti toje pačioje technologijoje. Variantas su nuskurdintu uranu leidžia sklandžiai pereiti prie torio kuro ciklo su minimaliomis reaktoriaus dizaino ir panaudoto kuro tvarkymo technologijų modifikacijomis. Tačiau nuskurdinto ar perdirbto urano kombinacija su  $^{233}\text{U}$  nėra visiškai grynas torio ciklas, nes taip pat kartu su  $\text{U}^{233}$  panaudojamas  $^{235}\text{U}$  ir dėl  $^{238}\text{U}$  transformacijos kaupiasi  $^{239}\text{Pu}$ . Be to  $^{233}\text{U}$  perdirbimas su  $^{232}\text{U}$  neišnaudoja pagrindinių torio kuro ciklo pranašumų, tokių kaip viso torio energijos potencialo išnaudojimas, aktinoidų ir plutonio nesikaupimas ir atliekų radiotoksiškumo sumažinimas. VVER-1000 reaktoriaus kure pakeitus  $^{235}\text{U}$  izotopą  $^{233}\text{U}$  izotopu temperatūrinis reaktyvumo koeficientas virsta teigiamu. Antra vertus, pakeitus  $^{235}\text{U}$  į plutonį, temperatūrinis reaktyvumo koeficientas virsta neigiamu. Taigi, kure tiksliai sukombinavus plutonį ir  $^{233}\text{U}$  galima gauti temperatūrinį reaktyvumo

koeficientą atitinkantį saugumo reikalavimus. Papildymas plutoniu kompensuoja  $^{233}\text{U}$  pavertimo trūkumą. Lyginant su maišytu paskirstymu, atskiras  $^{233}\text{U}$  ir plutonio paskirstymas yra naudingesnis lengvesniam reaktoriaus valdymui, mažesniai neutronų srautui reaktoriaus korpuse, paprastesnei šviežio kuro gamybai ir panaudoto kuro perdirbimui. Perėjimas prie mažesnių tarpų tarp kuro elementų, VVER-1000 reaktoriuje, padidina  $^{232}\text{Th}$  –  $^{233}\text{U}$  konversijos santyki, tačiau negali paversti reaktoriaus į šiluminį dauginimo reaktorių kaip Shipping Port gamtinio vandens dauginimo reaktorius [7].

Rusų ekspertų skaičiavimai pademonstravo galimybę pasiekti savarankiškumą  $^{232}\text{Th}$  –  $^{233}\text{U}$  kuro cikle BN-800 tipo natriu aušinamame LMFBR reaktoriuje su dauginimo koeficientu  $\geq 1$ . Panašūs rezultatai taip pat buvo užfiksuoti Prancūzijoje. Kitų tipo reaktoriuose, daugiausia aukštos temperatūros dujose aušinamuose arba sunkiojo vandens reaktoriuose, skaičiavimai parodė galimybę pasiekti dauginimo santykį 1. Indijoje, dideli torio resursai yra utilizuojami pasitelkiant trijų žingsnių branduolinės energijos programą, sujungiant suspausto sunkiojo vandens, skystais metalais aušinamų ir savarankiškų,  $^{232}\text{Th}$  –  $^{233}\text{U}$  pagrindo, pažangiųjų šiluminių reaktorių uždarus kuro ciklus. Visuose trijuose žingsniuose įdiegiamas  $\text{ThO}_2$ . Pirmame žingsnyje, PHWR reaktoriuose, cirkalojumi apvilktos  $\text{ThO}_2$  kuro rinklės naudojamos neutronų srauto išlyginimui. Iš PHWR reaktoriuose panaudoto perdirbto  $\text{ThO}_2$  kuro gautame  $^{233}\text{U}$  yra apie 500 milijoninių dalių  $^{232}\text{U}$ . Antrame žingsnyje, skystu metalu aušinamuose dauginimo reaktoriuose, naudojamos nerūdijančiuoju plienu 316 apvilktos  $\text{ThO}_2$  kuro rinklės greitųjų neutronų eksperimentiniame (FBTR) reaktoriuje. Dalis torio greitųjų neutronų reaktoriuose bus transformuota į  $^{233}\text{U}$ , kurio sudėtyje bus apie 100 milijoninių dalių  $^{232}\text{U}$  priemaišų, identiška rezultatams, gautiems BN-800 reaktoriuje. Panaudotos  $\text{ThO}_2$  kuro rinklės iš pirmo ir antro žingsnių bus perdirbtos  $^{233}\text{U}$  išgavimui, kuris bus panaudotas trečiame žingsnyje, savarankiškame  $(^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U})\text{O}_2$  cikle, pažangiuosiuose vandeniui aušinamuose reaktoriuose. Pažangusis 300 MW elektrinės galios AHWR 300 reaktorius, sukurtas BARC, peržiūrimas INPRO ir IAEA komandų yra pirmas didelis uždaro torio kuro ciklo utilizavimo dideliu mastu žingsnis. Šis reaktorius naudos cirkalojumi apvilktą 54 kuro strypų rinkles iš  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  ir  $(\text{Th}, ^{233}\text{U})\text{O}_2$  kaip varantįjį kurą. Per pastaruosius tris dešimtmečius, Indijoje, dauguma torio kuro ciklo savybių buvo patikrinti laboratorijose. Į eksperimentus laboratorijose įtraukiami aliuminio apvalkalas „J“ strypai su  $\text{ThO}_2$  kuro tabletėmis. Šie „J“ kuro strypai buvo patalpinami į CIRUS tyrimų reaktorių BARC laboratorijoje ir paveikiami radiacijos. Toliau šie panaudoti „J“ strypai buvo perdirbami THOREX separacijos procesu išskiriant  $^{233}\text{U}$  ir gaminant aliuminiu apvilktas (20 % Al)  $^{233}\text{U}$  plokščių pavidalo kuro rinkles kaip varomąjį kurą 30 kW šiluminės galios tyrimų reaktoriui KAMINI. Papildomai cirkalojumi apvilkti tiriamieji kuro stypai su  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  tabletėmis (sudėtyje 4–7 %  $\text{PuO}_2$ ) buvo sėkmingai panaudojami CIRUS reaktoriuje pasiekiant 18 000 MW parų/ t kuro išdegimą be jokių gedimų [7].

### 3. REAKTORIAUS SKAIČIAVIMAS

#### 3.1 Skaičiavimo planas

Reaktoriaus fizikinių neutroninių charakteristikų skaičiavimo žingsniai:

Prieš pradėdant reaktoriaus skaičiavimą, būtina žinoti arba parinkti šiluminių elementų (ŠIEL'ų) konstrukciją bei matmenis, taip pat jų skaičių kanale arba kasetėje. Taip pat turime žinoti šilumnešio tipą, jo parametrus įeinant į reaktorių ir iš jo išeinant. Jei šilumnešis kartu neatlieka lėtiklio vaidmens, tai būtina žinoti ir lėtiklio parametrus.

#### 1. Surandame reaktoriaus aktyviosios zonos geometrines charakteristikas:

Pirmasis žingsnis skaičiuojant branduolinį reaktorių yra surasti arba panaudoti jau veikiančių reaktorių geometrinius parametrus. Nežinant reaktoriaus aukščio ir pločio šiuos parametrus galima rasti iš reaktoriaus elektrinės galios, žinant reaktoriaus naudingumo koeficientą. Šiuo atveju skaičiuojama žinant pagrindinius geometrinius parametrus.

Aktyviosios zonos tūris:

$$V_{a.z.} = \pi r^2 h, m^3 \quad (3.1)$$

Aktyviosios zonos plotas:

$$S_{a.z.} = \frac{\pi \cdot D_{a.z.}^2}{4}, m^2 \quad (3.2)$$

Aktyviosios zonos spindulys:

$$R_{a.z.} = D_{a.z.} \cdot 0,5, m \quad (3.3)$$

#### 2. Surandame ekvivalentinės kuro rinklės geometrinius parametrus:

Branduolinį reaktorių homogenizuojame (schema pateikta B priede, 3.1 pav.). Šiuo žingsniu supaprastiname skaičiavimus neskaičiuodami kiekvienos kuro rinklės atskirai, o apskaičiuojame tik vieną ir nevertiname jų įtakos viena kitai. Tai leidžia vartoti supaprastintą neutronų pernešimo lygtį, rasti difuzijos koeficientus ir apskaičiuoti neutronų daugėjimo koeficientą.

Plotas:

$$S_{\substack{kuro \\ rinklės}} = \pi r^2, mm^2 \quad (3.4)$$

Šiluminių elementų plotas, užimamas kuro rinklėje:

$$S_{\text{šil.elem}} = \pi r_2^2 \cdot 54, mm^2 \quad (3.5)$$

Kuro užimamas plotas:

$$S_{kuro} = \pi r_1^2 \cdot 54, mm^2 \quad (3.6)$$

Metalo užimamas plotas (cirkalojaus-2):

$$S_{\substack{metalo \\ cirkal.}} = S_{\text{apv.}} + S_{\text{centr.met}}, mm^2 \quad (3.7)$$

#### 3. Apskaičiuojame kiekvieno elemento užimamą tūrį ir masę ekvivalentinėje kuro rinklėje:

$$V = S_{ekv.} \cdot H, m^3 \quad (3.8)$$

$$m = V \cdot \rho, kg \quad (3.9)$$

Apskaičiavus kiekvienos medžiagos tūrius galime rasti kiekvienos medžiagos skerspjūvio plotus. Toliau pagal šiuos duomenis randame medžiagų ekvivalentinius spindulius. Turint visų medžiagų ekvivalentinius spindulius gauname ekvivalentinę kuro rinklę, kuria padaliname į dvi zonas: branduolinio kuro ir kitų elementų. Pirmąją zoną sudaro branduolinis kuras – toris, uranas ir plutonis. Antrąją zoną sudaro likusios medžiagos – šilumnešis (gamtinis vanduo), lėtiklis (sunkusis vanduo) ir metalai.

4. Apskaičiuojame medžiagų plotus, tenkančius vienam šiluminiam elementui:

$$S_{medž.} = \frac{S_{medž.}}{54}, m^2 \quad (3.10)$$

5. Apskaičiuojame medžiagų ekvivalentinius spindulius:

$$R = R_{ekv.medž.} = \sqrt{\frac{S_{medž.}}{\pi}}, mm \quad (3.11)$$

6. Kuro rinklę padaliname į 2 zonas:

- 1) Branduolinio kuro;
- 2) Šilumnešio, lėtiklio ir metalų.

7. Apskaičiuojame ekvivalentinius tūrius:

Atskirai pirmajai ir antrajai zonai apskaičiuojame ekvivalentinius tūrius ir užimamas tūrio dalis. Pirmosios zonos tūris lygus branduolinio kuro tūriui, o antrosios zonos tūris randamas iš visos ekvivalentinės rinklės tūrio atimant pirmosios zonos tūrį.

$$V_1 = \pi \cdot R_2^2 \cdot h, mm^3 \quad (3.12)$$

$$V_2 = (\pi \cdot R_2^2 - \pi \cdot R_1^2) \cdot h, mm^3 \quad (3.13)$$

8. Skaičiuojame elementų branduolines koncentracijas pagal elementų tankius ir atominius masės skaičius:

Fizikinio skaičiavimo pradžioje visada surandamos medžiagų branduolinės koncentracijos reaktoriaus aktyviojoje zonoje. Paprastai kiekvieno elemento branduolių tankis atskirai apskaičiuojamas, nepriklausomai nuo to, ar tie elementai yra savarankiški, ar jie įeina į cheminio junginio, lydinio, tirpalo ir pan. sudėtį.

$$\rho_{elem.} = \frac{\gamma_{elem.} \cdot N_A}{A_{elem.}}, brand./cm^3 \quad (3.14)$$

9. Skaičiuojame vidutines elementų branduolių koncentracijas, tenkančias 1 cm<sup>3</sup> homogenizuotos aktyviosios zonos:

$$\rho_{elem.} = \frac{V_{elem.}}{V_i} \cdot \rho_{elem., brand.} / cm^3 \quad (3.15)$$

10. Randame zonų tūrio dalis:

$$\varepsilon_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (3.16)$$

11. Apskaičiuojame makroskopinius pjūvius:

$$\Sigma(kT_0) = \bar{\Sigma}(0,025) \cdot \sqrt{\frac{297}{T_0}}, cm^{-1} \quad (3.17)$$

12. Apskaičiuojame neutroninių dujų temperatūrą:

Žinodami šią temperatūrą galime rasti vidutinės sąveikos skerspjūvių reikšmes. Priimame, kad kiekvienai homogenizuotos kuro rinklės zonai ši temperatūra yra vienoda.

Neutroninių dujų temperatūra yra lygi:

$$T_{neut.dujų} = T_0 \left( 1 + 1,4 \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s} \right), K \quad (3.18)$$

13. Apskaičiuojame vidutinius mikroskopinius pjūvius:

$$\bar{\sigma}_{a,f} = \bar{\sigma}_{a,f} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_{a,f}(T_{n.d.}), barnai \quad (3.19)$$

14. Apskaičiuojame vidutinius makroskopinius pjūvius:

$$\bar{\Sigma}_{a1} = \sigma_a \cdot \rho, cm^{-1} \quad (3.20)$$

$$\bar{\Sigma}_{f1} = \sigma_f \cdot \rho, cm^{-1} \quad (3.21)$$

15. Randame difuzijos koeficientų reikšmes:

$$D(1) = \frac{1}{3 \bar{\Sigma}_{tr1}}, cm \quad (3.22)$$

$$L^2(1) = \frac{D(1)}{\bar{\Sigma}_{a1}}, cm^2 \quad (3.23)$$

$$\alpha(1) = \frac{1}{\sqrt{L^2(1)}}, cm^{-1} \quad (3.24)$$

16. Skaičiuojame neutronų srautų koeficientą:

$$d = \frac{1}{2} \alpha_1 R_1 \frac{I_0(\alpha_1 R_1)}{I_1(\alpha_1 R_1)} + \frac{1}{2} (\alpha_1 R_1)^2 \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{\Psi^2}{\Psi^2 - 1} \cdot \left[ \frac{\Psi^2}{\Psi^2 - 1} \cdot \ln \Psi - \frac{3}{4} + \frac{1}{4 \Psi^2} \right] \quad (3.25)$$

17. Begalinės terpės neutronų daugėjimo koeficiento skaičiavimas:

Šis dydis parodo ar reaktorius turi galimybę palaikyti grandininę reakciją. Šiuo atveju laikoma, kad branduolinis reaktorius yra begalinių matmenų. Tokia prielaida leidžia nevertinti neutronų nutekėjimo iš branduolinio reaktoriaus aktyviosios zonos. Begalinės terpės neutronų daugėjimo koeficientas susideda iš keturių dauginamųjų: šiluminių neutronų panaudojimo  $\theta$ , neutronų atsiradimo dėl šiluminių neutronų įtakos  $\eta$ , tikimybės išvengti rezonansinio pagavimo  $\varphi$  ir neutronų atsiradimo dėl greitųjų neutronų įtakos  $\varepsilon$ .

18. Randame šiluminio panaudojimo koeficientą:

Šiluminio panaudojimo koeficientas, tai  $^{233}\text{U}$  ar  $^{239}\text{Pu}$  pagautų šiluminių neutronų dalies santykis su visais absorbuotais šiluminiais neutronais.

$$\theta = \frac{1}{1 + d \cdot \frac{\bar{\Sigma}_a(2)}{\bar{\Sigma}_a(1)} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \quad (3.26)$$

19. Apskaičiuojame neutronų padaugėjimą dėl šiluminių neutronų įtakos:

Dydį  $\eta$  lemia branduolinio kuro savybės, o kita vertus; – neutronų, sukeliančių dalijimąsi, spektras.

$$\eta = \frac{\nu \bar{\Sigma}_f(1)}{\bar{\Sigma}_a(1)} \quad (3.27)$$

20. Neutronų padaugėjimo dėl greitųjų neutronų įtakos koeficientas:

Neutronų padaugėjimas dėl greitųjų neutronų įtakos vyksta dėl  $^{232}\text{Th}$  dalijimosi.

$$\varepsilon = 1 + \frac{\Sigma_f^{232}(\nu_f^{232} - 1)}{\Sigma_a + \Sigma_f^{232}(1 - 0,13 \cdot \nu_f^{232})} \quad (3.28)$$

21. Įvertiname tikimybę išvengti rezonansinio pagavimo:

$$\varphi = e^{-\frac{\Sigma_i I_c^i \cdot \bar{\rho}}{\xi \Sigma_s}} \quad (3.29)$$

22. Randame begalinės terpės neutronų daugėjimo koeficientą:

$$k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta \quad (3.30)$$

23. Efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas:

Efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas parodo vidutinį vieno skilimo metu atsiradusių neutronų skaičių, kurie sukelia kitus dalijimusis. Likę neutronai arba absorbuojami nesidalijant, arba palieka sistemos ribas neabsorbuoti.  $K_{ef}$  reikšmė parodo grandininės reakcijos eigą:

- $k_{ef} < 1$ , sistema grandininės reakcijos palaikyti negali ir bet kokia grandininės reakcijos pradžia sustoja po tam tikro laiko.
- $k_{ef} = 1$ , kiekvienas dalijimasis vidutiniškai sukelia po vieną dalijimąsi palaikant vienodą reaktoriaus galią.
- $k_{ef} > 1$ , kiekvienas dalijimasis vidutiniškai sukelia daugiau negu vieną dalijimąsi, todėl šis režimas naudojamas reaktoriaus galiai didinti.

Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$k_{ef} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 \cdot B^2} \quad (3.31)$$

### 3.2 300 MW torio – urano ciklo reaktoriaus fizikinis neutroninis skaičiavimas

#### Duomenys:

Reaktoriaus tipas: AHWR (pažangusis sunkiojo vandens reaktorius);

Kuro rinklės forma: apvali;

Branduolinis kuras:  $(\text{Th}, {}^{233}\text{U})\text{O}_2$  ir  $(\text{Th}, {}^{239}\text{Pu})\text{O}_2$ ;

Šilumnešis:  $\text{H}_2\text{O}$  (gamtinis vanduo);

Lėtiklis:  $\text{D}_2\text{O}$  (sunkusis vanduo);

Branduolinio kuro sodrinimas:

1 žiedas:  $(\text{Th}, {}^{233}\text{U})\text{O}_2$  (3,0%  ${}^{233}\text{U}$ ) - 12 elementų;

2 žiedas:  $(\text{Th}, {}^{233}\text{U})\text{O}_2$  (3,75%  ${}^{233}\text{U}$ ) - 18 elementų;

3 žiedas:  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$  (3,25%  ${}^{239}\text{Pu}$ ) - 24 elementai.

Šiluminio elemento apvalkalo metalas: cirkalojus-2;

Šiluminio elemento apvalkalo storis:  $s_w = 0,6 \text{ mm}$ ;

Šiluminio elemento išorinis skersmuo:  $s = 11,2 \text{ mm}$ .

Reaktoriaus elektrinė galia  $N = 300 \text{ MW}$ ;

Reaktoriaus šiluminė galia:  $N_{\text{šil.}} = 920 \text{ MW}$ ;

Atominės elektrinės naudingumo koeficientas  $\eta = 0,309$ .

#### Rasti:

Begalinės terpės neutronų daugėjimo koeficientą  $k_\infty$

Efektyvųjį neutronų daugėjimo koeficientą  $k_{\text{ef}}$ .

#### Aktyviosios zonos geometriniai parametrai:

Aktyviosios zonos tūris pagal (3.1) formulę:

$$V_{a.z.} = \pi r^2 h = 3,14 \cdot 1,45^2 \cdot 3,5 = 23,106 \text{ m}^3.$$

Aktyviosios zonos skersmuo:

$$D_{a.z.} = 2,9 \text{ m}.$$

Aktyviosios zonos plotas pagal (3.2) formulę:

$$S_{a.z.} = \frac{\pi \cdot D_{a.z.}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,9^2}{4} = 6,6 \text{ m}^2.$$

Aktyviosios zonos aukštis:

$$H_{a.z.} = 3,5 \text{ m}.$$

Aktyviosios zonos spindulys pagal (3.3) formulę:

$$R_{a.z.} = D_{a.z.} \cdot 0,5 = 1,45 \text{ m}.$$

### Geometriniai kuro rinklės parametrai:

Kuro rinklės forma: apvali, 54 šiluminiai elementai.

Vidurinio vamzdelio parametrai:

Išorinis skersmuo: 36 mm;

Spindulys:  $r_c = 18 \text{ mm}$ ;

Apvalkalas: 2 mm storio cirkalojaus-2 sluoksnis, (vidinis skersmuo 32 mm).

### Vieno šiluminio elemento parametrai:

Vidinis metalo (kuro) r:

$$r_1 = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm}.$$

Išorinis metalo r (su apvalkalu):

$$r_2 = r_1 + s_w = 5 + 0,6 = 5,6 \text{ mm}.$$

Šiluminio elemento skersmuo:

$$D_{\text{sil.elem}} = 11,2 \text{ mm}.$$

Kuro rinklės ilgis:

$$a = \frac{3,5}{7} = 0,5 \text{ m} = 500 \text{ mm}.$$

Kuro rinklės skersmuo:

$$d = 118 \text{ mm}.$$

Kuro rinklės plotas pagal (3.4) formulę:

$$S_{\text{kuro}}^{\text{rinklės}} = \pi r^2 = 3,14 \cdot 59^2 = 10930,34 \text{ mm}^2.$$

Šiluminių elementų plotas, užimamas kuro rinklėje pagal (3.5) formulę:

$$S_{\text{sil.elem}} = \pi r_2^2 \cdot 54 = 3,14 \cdot 5,6^2 \cdot 54 = 5317,4 \text{ mm}^2.$$

Kuro užimamas plotas pagal (3.6) formulę:

$$S_{\text{kuro}} = \pi r_1^2 \cdot 54 = 3,14 \cdot 5^2 \cdot 54 = 4239 \text{ mm}^2.$$

Kurą sudaro torio ( $^{232}\text{Th}$ ), urano ( $^{233}\text{U}$ ) ir plutonio ( $^{239}\text{Pu}$ ) oksidai, kiekvieno jų užimamas plotas:

$$\begin{aligned} S_{\text{ThO}_2} &= 3,14 \cdot 5^2 \cdot 12 \cdot 0,97 + 3,14 \cdot 5^2 \cdot 18 \cdot 0,9625 + 3,14 \cdot 5^2 \cdot 24 \cdot 0,967 = \\ &= 4096,52 \text{ mm}^2; \end{aligned}$$

$$S_{\text{UO}_2} = 3,14 \cdot 5^2 \cdot 12 \cdot 0,03 + 3,14 \cdot 5^2 \cdot 18 \cdot 0,0375 = 81,25 \text{ mm}^2;$$

$$S_{\text{PuO}_2} = 3,14 \cdot 5^2 \cdot 24 \cdot 0,0325 = 61,23 \text{ mm}^2.$$

Centrinio vamzdelio užimamas plotas:

$$S_{\text{centr.vamzd}} = \pi r_c^2 = 3,14 \cdot 18^2 = 1017,36 \text{ mm}^2.$$

Gamtinio vandens užimamas plotas centriniame vamzdelyje:

$$S_{\text{centr.H}_2\text{O}} = \pi r_{\text{c.ID}}^2 - \pi r_{\text{rod}}^2 = 3,14 \cdot 16^2 - 3,14 \cdot 8^2 = 602,88 \text{ mm}^2.$$

Apvalkalo ir metalo užimamas plotas centriniame vamzdelyje:

$$S_{centr.met} = S_{centr.vamzd} - S_{centr.H_2O} = 1017,36 - 602,88 = 414,48 \text{ mm}^2.$$

Gamtinio vandens užimamas plotas kuro rinklėje:

$$\begin{aligned} S_{H_2O} &= S_{kuro \text{ rinklės}} - S_{šil.elem} - S_{centr.met} = 10930,34 - 5317,4 - 414,48 = \\ &= 5198,46 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

Apvalkalo užimamas plotas:

$$S_{apv.} = (\pi \cdot r_2^2 - \pi \cdot r_1^2) \cdot 54 = (3,14 \cdot 5,6^2 - 3,14 \cdot 5^2) \cdot 54 = 1078,4 \text{ mm}^2.$$

Metalo užimamas plotas (cirkalojaus-2) pagal (3.7) formulę:

$$S_{metalo \text{ cirkal.}} = S_{apv.} + S_{centr.met} = 1078,40 + 414,48 = 1492,88 \text{ mm}^2.$$

Kadangi kuro rinklę gaubia slėgio vamzdis (cirkalojus-2, 4 mm storio), kalandrijos vamzdis (cirkalojus-2, 2,1 mm storio, užpildytas oru) ir lėtiklis (sunkusis vanduo) aplink kalandrijos vamzdį, todėl skaičiuojame ekvivalentinius šių medžiagų plotus, tenkančius vienai kuro rinklei:

$$\begin{aligned} S_{metalo \text{ sl.vamzd.}} &= \pi \cdot r_{sl.OD}^2 - \pi \cdot r_{sl.ID}^2 = 3,14 \cdot 64^2 - 3,14 \cdot 60^2 = 1557,44 \text{ mm}^2; \\ S_{metalo \text{ kal.vamzd.}} &= \pi \cdot r_{kal.OD}^2 - \pi \cdot r_{kal.ID}^2 = 3,14 \cdot 84^2 - 3,14 \cdot 81,9^2 = 1093,95 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

Kalandrijos vamzdis užpildytas oru, oro plotas:

$$S_{oro \text{ kal.vamzd.}} = \pi \cdot r_{kal.ID}^2 - \pi \cdot r_{sl.OD}^2 = 3,14 \cdot 81,9^2 - 3,14 \cdot 64^2 = 8200,45 \text{ mm}^2;$$

Kuro elementus gaubia kalandrija, kuri užpildyta sunkiuoju vandeniu, jos plotas:

$$S_{kalandrijos} = \pi \cdot r_{kalandrijos}^2 = 3,14 \cdot 3450^2 = 37373850 \text{ mm}^2.$$

Ekvivalentinės kuro rinklės plotas su išoriniais vamzdžiais:

$$\begin{aligned} S_{ekv.kuro \text{ rinklės1}} &= S_{kuro \text{ rinklės}} + S_{metalo \text{ sl.vamzd.}} + S_{metalo \text{ kal.vamzd.}} + S_{oro \text{ kal.vamzd.}} = \\ &= 10930,34 + 1557,44 + 1093,95 + 8200,45 = 21782,18 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

Tuomet iš kalandrijos ploto atėmus visų kuro rinklių užimamą plotą gauname sunkiojo vandens plotą:

$$\begin{aligned} S_{D_2O \text{ viso}} &= S_{kalandrijos} - S_{ekv.kuro \text{ rinklės1}} \cdot 452 = 37373850 - 21782,18 \cdot 4 = \\ &= 27528304,64 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

Vienai kuro rinklei tenkantis sunkiojo vandens plotas:

$$S_{D_2O} = \frac{S_{D_2O \text{ viso}}}{452} = \frac{27528304,64}{452} = 60903,33 \text{ mm}^2.$$

Tuomet visos kuro rinklės užimamas ekvivalentinis plotas kalandrijoje:

$$\begin{aligned} S_{ekv.kuro \text{ rinklės}} &= S_{ekv.kuro \text{ rinklės1}} + S_{D_2O} = 21782,18 + 60903,33 = 82685,51 \text{ mm}^2; \\ S_{ekv.metalo \text{ cirkal.}} &= S_{metalo \text{ cirkal.}} + S_{metalo \text{ sl.vamzd.}} + S_{metalo \text{ kal.vamzd.}} = 1492,88 + 1557,44 + 1093,95 = \\ &= 4144,27 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

**Paskaičiuojame medžiagų tūrius ir mases pagal (3.8) ir (3.9) formules:**

Bendras metalo kiekis ekvivalentinėje kuro rinklėje, kai aukštis  $H=3,5$  m:

$$V_{metal} = S_{ekv.metal} \cdot H = 4144,27 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,0145 \text{ m}^3.$$

Cirkalojaus-2 tankis:

$$\rho_{cirkal.} = 6550 \text{ kg/m}^3.$$

Metalo masė:

$$m_{metal} = V_{metal} \cdot \rho_{metal} = 0,0145 \cdot 6550 = 94,975 \text{ kg}.$$

Apskaičiuojame gamtinio vandens masę aktyviojoje zonoje, kai jo temperatūra  $t=285$  °C, slėgis  $p=7$

Mpa:

$$\rho_{H_2O} = 741,404 \text{ kg/m}^3;$$

$$V_{H_2O} = S_{H_2O} \cdot H = 5198,46 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,01819 \text{ m}^3;$$

$$m_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} = 0,01819 \cdot 741,404 = 13,486 \text{ kg}.$$

Paskaičiuojame oro masę, kai  $t=180$  °C,  $p=7$  MPa:

$$\rho_{oro} = 53,811 \text{ kg/m}^3;$$

$$V_{oro} = S_{oro} \cdot H = 8200,45 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,02870 \text{ m}^3;$$

$$m_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} = 0,02870 \cdot 53,811 = 1,544 \text{ kg}.$$

Paskaičiuojame sunkiojo vandens masę, kai  $t=75$ °C,  $p=7$  MPa:

$$\rho_{D_2O} = 1093 \text{ kg/m}^3;$$

$$V_{D_2O} = S_{D_2O} \cdot H = 60903,33 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,2132 \text{ m}^3;$$

$$m_{D_2O} = V_{D_2O} \cdot \rho_{D_2O} = 0,2132 \cdot 1093 = 232,044 \text{ kg}.$$

ThO<sub>2</sub> parametrai:

$$S_{ThO_2} = 4096,52 \text{ mm}^2;$$

$$V_{ThO_2} = S_{ThO_2} \cdot H = 4096,52 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,014337 \text{ m}^3;$$

$$\rho_{ThO_2} = 10000 \text{ kg/m}^3;$$

$$m_{ThO_2} = V_{ThO_2} \cdot \rho_{ThO_2} = 0,014337 \cdot 10000 = 143,337 \text{ kg}.$$

UO<sub>2</sub> parametrai:

$$S_{UO_2} = 81,25 \text{ mm}^2;$$

$$V_{UO_2} = S_{UO_2} \cdot H = 81,25 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,0002844 \text{ m}^3;$$

$$\rho_{UO_2} = 10970 \text{ kg/m}^3;$$

$$m_{UO_2} = V_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} = 0,0002844 \cdot 10970 = 3,119 \text{ kg}.$$

PuO<sub>2</sub> parametrai:

$$S_{PuO_2} = 61,23 \text{ mm}^2;$$

$$V_{PuO_2} = S_{PuO_2} \cdot H = 61,23 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,0002143 \text{ m}^3;$$

$$\rho_{PuO_2} = 11500 \text{ kg/m}^3;$$

$$m_{PuO_2} = V_{PuO_2} \cdot \rho_{PuO_2} = 0,0002143 \cdot 11500 = 2,464 \text{ kg}.$$

**Pagal (3.10) formulę paskaičiuojame plotus, tenkančius vienam šiluminiam elementui:**

$$S_{met1} = \frac{S_{met.}}{54} = \frac{4144,27}{54} = 76,75 \text{ mm}^2;$$

$$S_{D_2O1} = \frac{S_{D_2O}}{54} = \frac{60903,33}{54} = 1127,84 \text{ mm}^2;$$

$$S_{H_2O1} = \frac{S_{H_2O}}{54} = \frac{5198,46}{54} = 96,27 \text{ mm}^2;$$

$$S_{oro1} = \frac{S_{oro}}{54} = \frac{8200,45}{54} = 151,86 \text{ mm}^2;$$

$$S_{ThO_21} = \frac{S_{ThO_2}}{54} = \frac{4096,52}{54} = 75,86 \text{ mm}^2;$$

$$S_{UO_21} = \frac{S_{UO_2}}{54} = \frac{81,25}{54} = 1,50 \text{ mm}^2;$$

$$S_{PuO_21} = \frac{S_{PuO_2}}{54} = \frac{61,23}{54} = 1,13 \text{ mm}^2.$$

**Tuomet ekvivalentiniai spinduliai pagal (3.11 formulę):**

$$R_1 = R_{ekv.ThO_2} = \sqrt{\frac{S_{ThO_21}}{\pi}} = \sqrt{\frac{75,86}{\pi}} = 4,92 \text{ mm};$$

$$R_2 = R_{ekv.UO_2} = \sqrt{\frac{S_{ThO_21} + S_{UO_21}}{\pi}} = \sqrt{\frac{75,86 + 1,50}{\pi}} = 4,96 \text{ mm};$$

$$R_3 = R_{ekv.PuO_2} = \sqrt{\frac{S_{ThO_21} + S_{UO_21} + S_{PuO_21}}{\pi}} = \sqrt{\frac{75,86 + 1,50 + 1,13}{\pi}} = 4,99 \text{ mm};$$

$$R_4 = R_{ekv.met.} = \sqrt{\frac{S_{ThO_21} + S_{UO_21} + S_{PuO_21} + S_{met1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{78,49 + 76,75}{\pi}} = 7,03 \text{ mm};$$

$$R_5 = R_{ekv.H_2O} = \sqrt{\frac{S_{ThO_21} + S_{UO_21} + S_{PuO_21} + S_{met1} + S_{H_2O1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{155,24 + 96,27}{\pi}} = 8,95 \text{ mm};$$

$$R_6 = R_{ekv.oro} = \sqrt{\frac{S_{ThO_21} + S_{UO_21} + S_{PuO_21} + S_{met1} + S_{H_2O1} + S_{oro1}}{\pi}} =$$

$$= \sqrt{\frac{251,51 + 151,86}{\pi}} = 11,33 \text{ mm};$$

$$R_7 = R_{ekv.D_2O} = \sqrt{\frac{S_{ThO_2 1} + S_{UO_2 1} + S_{PuO_2 1} + S_{met 1} + S_{H_2O 1} + S_{oro 1} + S_{D_2O 1}}{\pi}} =$$

$$= \sqrt{\frac{403,37 + 1127,84}{\pi}} = 22,08 \text{ mm}.$$

**Kuro rinklė padalinama į 2 zonas:**

1. Branduolinio kuro  $ThO_2$ ,  $UO_2$ ,  $PuO_2$ ;
2.  $D_2O$ ,  $H_2O$ , oro ir metalo.

**Pagal (3.12) ir (3.13) paskaičiuojame ekvivalentinius tūrius. Aukštį parenkame  $h = 10 \text{ mm}$ .**

$$V_1 = \pi \cdot R_3^2 \cdot h = \pi \cdot 4,99^2 \cdot 10 = 781,86 \text{ mm}^3;$$

$$V_2 = (\pi \cdot R_7^2 - \pi \cdot R_3^2) \cdot h = (\pi \cdot 22,08^2 - \pi \cdot 4,99^2) \cdot 10 = 7489,69 \text{ mm}^3;$$

$$V_{ThO_2} = \pi \cdot R_1^2 \cdot h = \pi \cdot 4,92^2 \cdot 10 = 760,08 \text{ mm}^3;$$

$$V_{UO_2} = (\pi \cdot R_2^2 - \pi \cdot R_1^2) \cdot h = (\pi \cdot 4,96^2 - \pi \cdot 4,92^2) \cdot 10 = 12,41 \text{ mm}^3;$$

$$V_{PuO_2} = V_1 - V_{ThO_2} - V_{UO_2} = 781,86 - 760,08 - 12,41 = 9,37 \text{ mm}^3;$$

$$V_{met.} = \pi \cdot R_4^2 \cdot h - V_1 = \pi \cdot 7,03^2 \cdot 10 - 781,86 = 769,96 \text{ mm}^3;$$

$$V_{H_2O} = (\pi \cdot R_5^2 - \pi \cdot R_4^2) \cdot h = (\pi \cdot 8,95^2 - \pi \cdot 7,03^2) \cdot 10 = 963,40 \text{ mm}^3;$$

$$V_{oro} = (\pi \cdot R_6^2 - \pi \cdot R_5^2) \cdot h = (\pi \cdot 11,33^2 - \pi \cdot 8,95^2) \cdot 10 = 1515,56 \text{ mm}^3;$$

$$V_{D_2O} = V_2 - V_{met.} - V_{H_2O} - V_{oro} = 7489,69 - 769,96 - 963,40 - 1515,56 =$$

$$= 4240,77 \text{ mm}^3.$$

**Skaičiuojant branduolių koncentracijas reikalingi medžiagų tankiai:**

$$\gamma_{ThO_2} = 10 \text{ g/cm}^3;$$

$$\gamma_{UO_2} = 10,95 \text{ g/cm}^3;$$

$$\gamma_{PuO_2} = 11,50 \text{ g/cm}^3;$$

$$\gamma_{met.} = 6,55 \text{ g/cm}^3;$$

$$\gamma_{H_2O} = 0,741 \text{ g/cm}^3;$$

$$\gamma_{oro} = 0,053 \text{ g/cm}^3;$$

$$\gamma_{D_2O} = 1,093 \text{ g/cm}^3.$$

**Surandame atominės masės skaičius:**

$$A_{ThO_2} = 264,04 \text{ g/mol};$$

$$A_{UO_2} = 265,02 \text{ g/mol};$$

$$A_{PuO_2} = 276,06 \text{ g/mol};$$

$$A_{H_2O} = 18,02 \text{ g/mol};$$

$$A_{met.} = 0,012 \cdot 118,71 + 0,01 \cdot 55,84 + 91,22 \cdot 0,978 = 91,2 \text{ g/mol};$$

$$A_{oro} = 28,97 \text{ g/mol};$$

$$A_{D_2O} = 20,03 \text{ g/mol}.$$

**Elementų branduolių koncentracijos paskaičiuojamos pagal (3.14) formulę:**

$$\rho_{ThO_2} = \frac{\gamma_{ThO_2} \cdot N_A}{A_{ThO_2}} = \frac{10 \cdot 0,6023 \cdot 10^{24}}{264,04} = 0,02281093 \cdot 10^{24}, \text{ brand./cm}^3;$$

$$\rho_{UO_2} = \frac{\gamma_{UO_2} \cdot N_A}{A_{UO_2}} = \frac{10,95 \cdot 0,6023 \cdot 10^{24}}{265,02} = 0,02488561 \cdot 10^{24}, \text{ brand./cm}^3;$$

$$\rho_{PuO_2} = \frac{\gamma_{PuO_2} \cdot N_A}{A_{PuO_2}} = \frac{11,5 \cdot 0,6023 \cdot 10^{24}}{276,06} = 0,02509037 \cdot 10^{24}, \text{ brand./cm}^3;$$

$$\rho_{met.} = \frac{\gamma_{met.} \cdot N_A}{A_{met.}} = \frac{6,55 \cdot 0,6023 \cdot 10^{24}}{91,2} = 0,04325729 \cdot 10^{24}, \text{ brand./cm}^3;$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{\gamma_{H_2O} \cdot N_A}{A_{H_2O}} = \frac{0,741 \cdot 0,6023 \cdot 10^{24}}{18,02} = 0,02476716 \cdot 10^{24}, \text{ brand./cm}^3;$$

$$\rho_{oro} = \frac{\gamma_{oro} \cdot N_A}{A_{oro}} = \frac{0,053 \cdot 0,6023 \cdot 10^{24}}{28,97} = 0,00110189 \cdot 10^{24}, \text{ brand./cm}^3;$$

$$\rho_{D_2O} = \frac{\gamma_{D_2O} \cdot N_A}{A_{D_2O}} = \frac{1,093 \cdot 0,6023 \cdot 10^{24}}{20,03} = 0,03286639 \cdot 10^{24}, \text{ brand./cm}^3.$$

**Duomenis suvedu į 3.1 lentelę:**

3.1 lentelė. Medžiagų charakteristikos ir tūrio dalys

| Elementas                           | V, mm <sup>3</sup> | $\rho \cdot 10^{24}$ ,<br>brand./cm <sup>3</sup> | $\gamma$ , g/cm <sup>3</sup> | A, g/mol | Tūrio<br>dalis |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|----------|----------------|
| Kuras ThO <sub>2</sub>              | 760,08             | 0,02281093                                       | 10                           | 264,04   | 0,0919         |
| Kuras UO <sub>2</sub>               | 12,41              | 0,02488561                                       | 10,95                        | 265,02   | 0,0015         |
| Kuras PuO <sub>2</sub>              | 9,37               | 0,02509037                                       | 11,50                        | 276,06   | 0,0011         |
| Metalas<br>(Cirkalojus-2)           | 769,96             | 0,04325729                                       | 6,55                         | 91,2     | 0,0931         |
| Oras                                | 1515,56            | 0,00110189                                       | 0,053                        | 28,97    | 0,1832         |
| Gamtinis vanduo<br>H <sub>2</sub> O | 963,40             | 0,02476716                                       | 0,741                        | 18,02    | 0,1165         |
| Sunkusis vanduo<br>D <sub>2</sub> O | 4240,77            | 0,03286639                                       | 1,093                        | 20,03    | 0,5127         |

**Paskaičiuojame kiekvieno elemento branduolių koncentracijas pagal (3.15) formulę:**

$$\rho_{Th} = \frac{V_{ThO_2}}{V_1} \cdot \rho_{ThO_2} = \frac{760,08}{781,86} \cdot 0,02281093 \cdot 10^{24} = 0,02217549 \cdot 10^{24};$$

$$\rho_{U_{233}} = \frac{V_{UO_2}}{V_1} \cdot \rho_{UO_2} = \frac{12,41}{781,86} \cdot 0,02488561 \cdot 10^{24} = 0,00039499 \cdot 10^{24};$$

$$\rho_{Pu} = \frac{V_{PuO_2}}{V_1} \cdot \rho_{PuO_2} = \frac{9,37}{781,86} \cdot 0,02509037 \cdot 10^{24} = 0,00030068 \cdot 10^{24};$$

$$\begin{aligned} \rho_O &= \frac{V_{ThO_2}}{V_1} \cdot 2 \cdot \rho_{ThO_2} + \frac{V_{UO_2}}{V_1} \cdot 2 \cdot \rho_{UO_2} + \frac{V_{PuO_2}}{V_1} \cdot 2 \cdot \rho_{PuO_2} = \\ &= \frac{760,08}{781,86} \cdot 2 \cdot 0,02281093 \cdot 10^{24} + \frac{12,41}{781,86} \cdot 2 \cdot 0,02488561 \cdot 10^{24} + \\ &+ \frac{9,37}{781,86} \cdot 2 \cdot 0,02509037 \cdot 10^{24} = 0,04574235 \cdot 10^{24}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{Zr} &= \frac{V_{met.}}{V_2} \cdot \rho_{met.} \cdot 0,978 = \frac{769,96}{7489,69} \cdot 0,04325729 \cdot 10^{24} \cdot 0,978 = \\ &= 0,00434913 \cdot 10^{24}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{Sn} &= \frac{V_{met.}}{V_2} \cdot \rho_{met.} \cdot 0,012 = \frac{769,96}{7489,69} \cdot 0,04325729 \cdot 10^{24} \cdot 0,012 = \\ &= 0,00005336 \cdot 10^{24}; \end{aligned}$$

$$\rho_{Fe} = \frac{V_{met.}}{V_2} \cdot \rho_{met.} \cdot 0,01 = \frac{769,96}{7489,69} \cdot 0,04325729 \cdot 10^{24} \cdot 0,01 = 0,00005336 \cdot 10^{24};$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_2} \cdot \rho_{H_2O} = \frac{963,40}{7489,69} \cdot 0,02476716 \cdot 10^{24} = 0,00318580 \cdot 10^{24};$$

$$\rho_N = \frac{V_{oro}}{V_2} \cdot \rho_{oro} \cdot 0,78 = \frac{1515,56}{7489,69} \cdot 0,00110189 \cdot 10^{24} \cdot 0,78 = 0,000173917 \cdot 10^{24};$$

$$\rho_O = \frac{V_{oro}}{V_2} \cdot \rho_{oro} \cdot 0,22 = \frac{1515,56}{7489,69} \cdot 0,00110189 \cdot 10^{24} \cdot 0,22 = 0,000049053 \cdot 10^{24};$$

$$\rho_{D_2O} = \frac{V_{D_2O}}{V_2} \cdot \rho_{D_2O} = \frac{4240,77}{7489,69} \cdot 0,03286639 \cdot 10^{24} = 0,01860942 \cdot 10^{24}.$$

**Pagal (3.16) formulę randame zonų tūrio dalis:**

$$\varepsilon_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{781,86}{781,86 + 7489,69} = 0,0945;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{V_2}{V_1 + V_2} = \frac{7489,69}{781,86 + 7489,69} = 0,9055.$$

**Duomenys pateikiami 3.2 lentelėje, pagal zonas:**

3.2 lentelė. Elementų branduolių koncentracijos pagal zonų tūrio dalis

| Zona | Elementas        | V, mm <sup>3</sup> | $\rho \cdot 10^{24}$ | $\epsilon$ |
|------|------------------|--------------------|----------------------|------------|
| 1.   | Th               | 781,86             | 0,02217549           | 0,0945     |
|      | <sup>233</sup> U |                    | 0,00039499           |            |
|      | Pu               |                    | 0,00030068           |            |
|      | O                |                    | 0,04574235           |            |
| 2.   | Zr               | 7489,69            | 0,00434913           | 0,9055     |
|      | Sn               |                    | 0,00005336           |            |
|      | Fe               |                    | 0,00005336           |            |
|      | H <sub>2</sub> O |                    | 0,00318580           |            |
|      | N                |                    | 0,00017391           |            |
|      | O                |                    | 0,00004905           |            |
|      | D <sub>2</sub> O |                    | 0,01860942           |            |

3.3 lentelėje pateikiami visų elementų mikroskopiniai efektyvieji skerspjūviai:

3.3 lentelė. Elementų mikroskopiniai efektyvieji skerspjūviai

| Elementas         | $\sigma_a$ , barnai<br>0,025eV | $\sigma_f$ , barnai<br>0,025eV | $\sigma_{tr}$ , barnai<br>0,025eV | $\xi\sigma_s$ , barnai<br>1eV | $\sigma_s(1-\mu)$ ,<br>barnai 1eV | $\nu$ |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------|
| <sup>232</sup> Th | 7,40                           | -                              | 11,84                             | 0,385                         | 12,67                             | -     |
| <sup>233</sup> U  | 364                            | 332                            | 12,19                             | 0,12                          | 13,96                             | 2,48  |
| <sup>239</sup> Pu | 1045                           | 695                            | 7,9                               | 0,492                         | 7,3                               | 2,93  |
| <sup>16</sup> O   | 0                              | -                              | 3,64                              | 0,46                          | 3,6                               | -     |
| <sup>91</sup> Zr  | 0,185                          | -                              | 6,49                              | 0,008                         | 6,4                               | -     |
| <sup>119</sup> Sn | 0,63                           | -                              | 0,03703                           | 0,11                          | 0,0233                            | -     |
| <sup>56</sup> Fe  | 2,55                           | -                              | 3,8                               | 0,09                          | 4,62                              | -     |
| H <sub>2</sub> O  | 0,664                          | -                              | 2,32                              | 0,022                         | 2,32                              | -     |
| <sup>14</sup> N   | 1,85                           | -                              | 10,29                             | 0,087                         | 10,29                             | -     |
| D <sub>2</sub> O  | 0,00133                        | -                              | 0,414                             | 4,42                          | 0,414                             | -     |

Paskaičiuojami zonų efektyvieji makroskopiniai skerspjūviai pagal (3.17) formulę:

$T_0$  – vidutinė temperatūra reaktoriuje yra 285 °C=558 K.

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{a1}(kT_0) &= \sigma_{a(Th)} \cdot \rho_{Th} + \sigma_{a(U_{233})} \cdot \rho_{U_{233}} + \sigma_{a(Pu)} \cdot \rho_{Pu} = \\ &= 7,4 \cdot 0,02217549 + 364 \cdot 0,00039499 + 1045 \cdot 0,00030068 = 0,622086 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{a2}(kT_0) &= \sigma_{a(Zr)} \cdot \rho_{Zr} + \sigma_{a(Sn)} \cdot \rho_{Sn} + \sigma_{a(Fe)} \cdot \rho_{Fe} + \\ &+ \sigma_{a(H_2O)} \cdot \rho_{H_2O} + \sigma_{a(N)} \cdot \rho_N + \sigma_{a(D_2O)} \cdot \rho_{D_2O} = \\ &= 0,185 \cdot 0,00434913 + 0,63 \cdot 0,00005336 + 2,55 \cdot 0,00005336 + 0,664 \\ &\cdot 0,00318580 + 1,85 \cdot 0,00017391 + 0,00133 \cdot 0,01860942 = 0,003436 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma_a(kT_0) &= \bar{\Sigma}_a(0,025) \cdot \sqrt{\frac{297}{T_0}} = (\bar{\Sigma}_{a1} \cdot \varepsilon_1 + \bar{\Sigma}_{a2} \cdot \varepsilon_2) \cdot \sqrt{\frac{297}{T_0}} = \\ &= (0,622086 \cdot 0,0945 + 0,003436 \cdot 0,9055) \cdot \sqrt{\frac{297}{558}} = 0,045159 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\xi \bar{\Sigma}_{s1}(kT_0) &= \xi \sigma_{s(O)} \cdot \rho_O + \xi \sigma_{s(Th)} \cdot \rho_{Th} + \xi \sigma_{s(U_{233})} \cdot \rho_{U_{233}} + \xi \sigma_{s(Pu)} \cdot \\ &\cdot \rho_{Pu} = 0,46 \cdot 0,04574235 + 0,385 \cdot 0,02217549 + 0,12 \cdot 0,00039499 + \\ &0,492 \cdot 0,00030068 = 0,029774 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\xi \bar{\Sigma}_{s2}(kT_0) &= \xi \sigma_{s(Zr)} \cdot \rho_{Zr} + \xi \sigma_{s(Sn)} \cdot \rho_{Sn} + \xi \sigma_{s(Fe)} \cdot \rho_{Fe} + \xi \sigma_{s(H_2O)} \cdot \\ &\cdot \rho_{H_2O} + \xi \sigma_{s(N)} \cdot \rho_N + \xi \sigma_{s(O)} \cdot \rho_O + \xi \sigma_{s(D_2O)} \cdot \rho_{D_2O} = 0,008 \cdot 0,00434913 + \\ &+ 0,11 \cdot 0,00005336 + 0,09 \cdot 0,00005336 + 0,022 \cdot 0,00318580 + 0,087 \cdot \\ &\cdot 0,00017391 + 0,46 \cdot 0,00004905 + 4,42 \cdot 0,01860942 = 0,082407 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\xi \Sigma_s(kT_0) &= \xi \bar{\Sigma}_s(0,025) \cdot \sqrt{\frac{297}{T_0}} = (\xi \bar{\Sigma}_{s1} \cdot \varepsilon_1 + \xi \bar{\Sigma}_{s2} \cdot \varepsilon_2) \cdot \sqrt{\frac{297}{T_0}} = \\ &= (0,029774 \cdot 0,0945 + 0,082407 \cdot 0,9055) \cdot \sqrt{\frac{297}{558}} = 0,056492 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{s1}(1-\mu)(kT_0) &= \xi \sigma_{s(O)}(1-\mu) \cdot \rho_O + \xi \sigma_{s(Th)}(1-\mu) \cdot \rho_{Th} + \\ &+ \xi \sigma_{s(U-233)}(1-\mu) \cdot \rho_{U-233} + \xi \sigma_{s(Pu)}(1-\mu) \cdot \rho_{Pu} = 3,6 \cdot 0,04574235 + \\ &+ 12,67 \cdot 0,02217549 + 13,96 \cdot 0,00039499 + 7,3 \cdot 0,00030068 = 0,453345 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{s2}(1-\mu)(kT_0) &= \xi \sigma_{s(Zr)}(1-\mu) \cdot \rho_{Zr} + \xi \sigma_{s(Sn)}(1-\mu) \cdot \rho_{Sn} + \\ &+ \xi \sigma_{s(Fe)}(1-\mu) \cdot \rho_{Fe} + \xi \sigma_{s(H_2O)}(1-\mu) \cdot \rho_{H_2O} + \xi \sigma_{s(N)}(1-\mu) \cdot \rho_N + \\ &+ \xi \sigma_{s(O)}(1-\mu) \cdot \rho_O + \xi \sigma_{s(D_2O)}(1-\mu) \cdot \rho_{D_2O} = 6,4 \cdot 0,00434913 +\end{aligned}$$

$$+0,0233 \cdot 0,00005336 + 4,62 \cdot 0,00005336 + 2,32 \cdot 0,00318580 + 10,29 \cdot 0,00017391 + 3,6 \cdot 0,00004905 + 0,414 \cdot 0,01860942 = 0,045144 \text{ cm}^{-1};$$

$$\begin{aligned} \bar{\Sigma}_{tr1}(kT_0) &= \sigma_{tr(Th)} \cdot \rho_{Th} + \sigma_{tr(U_{233})} \cdot \rho_{U_{233}} + \sigma_{tr(Pu)} \cdot \rho_{Pu} + \sigma_{tr(O)} \cdot \rho_O = \\ &= 11,84 \cdot 0,02217549 + 12,19 \cdot 0,00039499 + 7,9 \cdot 0,00030068 + \\ &+ 3,64 \cdot 0,04574235 = 0,4362503 \text{ cm}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\Sigma}_{tr2}(kT_0) &= \sigma_{tr(Zr)} \cdot \rho_{Zr} + \sigma_{tr(Sn)} \cdot \rho_{Sn} + \sigma_{tr(Fe)} \cdot \rho_{Fe} + \sigma_{tr(H_2O)} \cdot \rho_{H_2O} + \\ &+ \sigma_{tr(N)} \cdot \rho_N + \sigma_{tr(O)} \cdot \rho_O + \sigma_{tr(D_2O)} \cdot \rho_{D_2O} = 6,49 \cdot 0,00434913 + \\ &+ 0,03703 \cdot 0,00005336 + 3,8 \cdot 0,00005336 + 2,32 \cdot 0,00318580 + 10,29 \cdot 0,00017391 + \\ &+ 3,64 \cdot 0,00004905 + 0,414 \cdot 0,01860942 = 0,045494 \text{ cm}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{tr}(kT_0) &= \bar{\Sigma}_{tr}(0,025) \cdot \sqrt{\frac{297}{T_0}} = (\bar{\Sigma}_{tr1} \cdot \varepsilon_1 + \bar{\Sigma}_{tr2} \cdot \varepsilon_2) \cdot \sqrt{\frac{297}{T_0}} = \\ &= (0,4362503 \cdot 0,0945 + 0,045494 \cdot 0,9055) \cdot \sqrt{\frac{297}{558}} = 0,060128 \text{ cm}^{-1}. \end{aligned}$$

**Gauti duomenys pateikiami 3.4 lentelėje:**

3.4 lentelė. Zonų makroskopiniai efektyvieji pjūviai

| Zona    | $\Sigma_a(0,025), \text{ cm}^{-1}$ | $\xi \Sigma_s(1\text{eV}), \text{ cm}^{-1}$ | $\Sigma_s(1-\mu), \text{ cm}^{-1}$ | $\Sigma_{tr}(0,025), \text{ cm}^{-1}$ |
|---------|------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1.      | 0,622086                           | 0,029774                                    | 0,453345                           | 0,436250                              |
| 2.      | 0,003436                           | 0,082407                                    | 0,045144                           | 0,045494                              |
| Bendras | 0,045159                           | 0,056492                                    | -                                  | 0,060128                              |

**Paskaičiuojama neutroninių dujų temperatūra pagal (3.18) formulę:**

$$T_{neut.dujų} = T_0 \left( 1 + 1,4 \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s} \right) = 558 \cdot \left( 1 + 1,4 \cdot \frac{0,045159}{0,056492} \right) = 1182 \text{ K}.$$

**Iš lentelės parenkamas Veskoto faktorius pagal  $^{233}\text{U}$ :**

$$X_{gr}=6;$$

$$f(X_{gr})=0,896;$$

$$g_a=1,032;$$

$$g_f=0,909.$$

**Apskaičiuojami vidutiniai mikroskopiniai skerspjūviai pagal (3.19) formulę:**

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(Th)} &= \sigma_{a(Th)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 7,4 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 3,407 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(U_{233})} &= \sigma_{a(U_{233})} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 364 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 167,577 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(Pu)} &= \sigma_{a(Pu)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 1045 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 481,093 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(Zr)} &= \sigma_{a(Zr)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 0,185 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 0,085 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(Sn)} &= \sigma_{a(Sn)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 0,63 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 0,29 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(Fe)} &= \sigma_{a(Fe)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 2,55 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 1,174 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(H_2O)} &= \sigma_{a(H_2O)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 0,664 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 0,306 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(N)} &= \sigma_{a(N)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 1,85 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 0,852 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{a(D_2O)} &= \sigma_{a(D_2O)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_a(T_{n.d.}) = 0,00133 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 0,0006 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{f(U_{233})} &= \sigma_{f(U_{233})} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_f(T_{n.d.}) = 332 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 152,845 \text{ barnu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{f(Pu)} &= \sigma_{f(Pu)} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{n.d.}}} \cdot f(x_{gr}) \cdot g_f(T_{n.d.}) = 695 \cdot \sqrt{\frac{293}{1182}} \cdot 0,896 \cdot 1,032 = \\ &= 319,961 \text{ barnų.}\end{aligned}$$

**Gauti duomenys pateikti 3.5 lentelėje:**

3.5 lentelė. Vidutiniai mikroskopiniai skerspjūviai

| Elementas            | $\sigma_a$ ,<br>barnai | $\sigma_f$ ,<br>barnai |
|----------------------|------------------------|------------------------|
| $^{232}\text{Th}$    | 3,407                  | -                      |
| $^{233}\text{U}$     | 167,577                | 152,845                |
| $^{239}\text{Pu}$    | 481,093                | 319,961                |
| $^{16}\text{O}$      | 0                      | -                      |
| $^{91}\text{Zr}$     | 0,085                  | -                      |
| $^{119}\text{Sn}$    | 0,29                   | -                      |
| $^{56}\text{Fe}$     | 1,174                  | -                      |
| $\text{H}_2\text{O}$ | 0,306                  | -                      |
| $^{14}\text{N}$      | 0,852                  | -                      |
| $\text{D}_2\text{O}$ | 0,0006                 | -                      |

**Makroskopiniai skerspjūviai skaičiuojami pagal (3.20) ir (3.21) formules:**

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{a1} &= \sigma_{a(Th)} \cdot \rho_{Th} + \sigma_{a(U_{233})} \cdot \rho_{U_{233}} + \sigma_{a(Pu)} \cdot \rho_{Pu} = 3,407 \cdot 0,02217549 + \\ &+ 167,577 \cdot 0,00039499 + 481,093 \cdot 0,00030068 = 0,286398 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{a2} &= \sigma_{a(Zr)} \cdot \rho_{Zr} + \sigma_{a(Sn)} \cdot \rho_{Sn} + \sigma_{a(Fe)} \cdot \rho_{Fe} + \sigma_{a(H_2O)} \cdot \rho_{H_2O} + \sigma_{a(N)} \cdot \rho_{(N)} + \\ &+ \sigma_{a(D_2O)} \cdot \rho_{D_2O} = 0,085 \cdot 0,00434913 + 0,29 \cdot 0,00005336 + 1,174 \cdot 0,00005336 + \\ &+ 0,306 \cdot 0,00318580 + 0,852 \cdot 0,00017391 + 0,0006 \cdot 0,01860942 = \\ &= 0,001582 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{f1} &= \sigma_{f(U_{233})} \cdot \rho_{U_{233}} + \sigma_{f(Pu)} \cdot \rho_{Pu} = 152,845 \cdot 0,00039499 + \\ &+ 319,961 \cdot 0,00030068 = 0,156578 \text{ cm}^{-1};\end{aligned}$$

$$v \bar{\Sigma}_{f1} = 2,705 \cdot 0,156578 = 0,423543 \text{ cm}^{-1};$$

$$\begin{aligned}\bar{\Sigma}_{tr1} &= (\sigma_{s(O)}(1 - \mu) \cdot \rho_O + \sigma_{s(Th)}(1 - \mu) \cdot \rho_{Th} + \sigma_{s(U_{233})}(1 - \mu) \cdot \rho_{U_{233}} + \\ &+ \sigma_{s(Pu)}(1 - \mu) \cdot \rho_{Pu}) + \bar{\Sigma}_{a1} =\end{aligned}$$

$$= (3,6 \cdot 0,04574235 + 12,67 \cdot 0,02217549 + 13,96 \cdot 0,00039499 + 7,3 \cdot 0,00030068) + 0,286398 = 0,739743 \text{ cm}^{-1};$$

$$\begin{aligned} \bar{\Sigma}_{tr2} &= (\sigma_{s(Zr)}(1 - \mu) \cdot \rho_{Zr} + \sigma_{s(Sn)}(1 - \mu) \cdot \rho_{Sn} + \sigma_{s(Fe)}(1 - \mu) \cdot \rho_{Fe} \\ &+ \sigma_{s(H_2O)}(1 - \mu) \cdot \rho_{H_2O} + \sigma_{s(N)}(1 - \mu) \cdot \rho_N + \sigma_{s(O)}(1 - \mu) \cdot \rho_O + \sigma_{s(D_2O)}(1 - \mu) \\ &\cdot \rho_{D_2O}) + \bar{\Sigma}_{a2} = (6,4 \cdot 0,00434913 + 0,0233 \cdot 0,00005336 + 4,62 \cdot 0,00005336 \\ &+ 2,32 \cdot 0,00318580 + 10,29 \cdot 0,00017391 + 3,6 \cdot 0,00004905 + 0,414 \\ &\cdot 0,01860942) + 0,001582 = 0,046726 \text{ cm}^{-1}. \end{aligned}$$

**Difuzijos koeficientai skaičiuojami pagal (3.22), (3.23) ir (3.24) formules:**

$$D(1) = \frac{1}{3 \bar{\Sigma}_{tr1}} = \frac{1}{3 \cdot 0,739743} = 0,450607 \text{ cm};$$

$$D(2) = \frac{1}{3 \bar{\Sigma}_{tr2}} = \frac{1}{3 \cdot 0,046726} = 7,133787 \text{ cm};$$

$$L^2(1) = \frac{D(1)}{\bar{\Sigma}_{a1}} = \frac{0,450607}{0,286398} = 1,573359 \text{ cm}^2;$$

$$L^2(2) = \frac{D(2)}{\bar{\Sigma}_{a2}} = \frac{7,133787}{0,001582} = 4509,347 \text{ cm}^2;$$

$$\alpha(1) = \frac{1}{\sqrt{L^2(1)}} = \frac{1}{\sqrt{1,573359^2}} = 0,635583 \text{ cm}^{-1};$$

$$\alpha(2) = \frac{1}{\sqrt{L^2(2)}} = \frac{1}{\sqrt{4509,347^2}} = 0,000222 \text{ cm}^{-1}.$$

**Duomenys pateikiami 3.6 lentelėje pagal zonas:**

3.6 lentelė. Makroskopiniai skerspjūviai pagal zonas

|                | 1 zona   | 2 zona   |
|----------------|----------|----------|
| $\Sigma_a$     | 0,286398 | 0,001582 |
| $\Sigma_f$     | 0,156578 | --       |
| $v \Sigma_f$   | 0,423543 | --       |
| $\xi \Sigma_s$ | 0,029774 | 0,082407 |
| $\Sigma_{tr}$  | 0,739743 | 0,046726 |
| D              | 0,450607 | 7,133787 |
| L              | 1,573359 | 4509,347 |
| $\alpha$       | 0,635583 | 0,000222 |

**Neutronų srautų skaičiavimas pagal (3.25) formulę:**

$$\alpha_2 \cdot R_2 = 0,000222 \cdot 2,208 = 0,00049 < 0,75, \text{ nepaisome absorbcijos 2 zonoje.}$$

$$\frac{\xi \Sigma_s^{(1)}}{\xi \Sigma_s^{(2)}} = \frac{0,029774}{0,082407} = 0,3613 < 0,5 \text{ galima nevertinti šiluminių neutronų atsiradimo 1 zonoje.}$$

$$d = \frac{1}{2} \alpha_1 R_1 \frac{I_0(\alpha_1 R_1)}{I_1(\alpha_1 R_1)} + \frac{1}{2} (\alpha_1 R_1)^2 \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{\Psi^2}{\Psi^2 - 1} \cdot \left[ \frac{\Psi^2}{\Psi^2 - 1} \cdot \ln \Psi - \frac{3}{4} + \frac{1}{4 \Psi^2} \right] =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 0,31715 \cdot \frac{1,003}{0,0501} + \frac{1}{2} (0,31715)^2 \cdot \frac{0,450607}{7,133787} \cdot 4,745256 = 3,189739.$$

**Duomenys pateikiami 3.7 lentelėje:**

3.7 lentelė. Nuostolių koeficiento skaičiavimo dedamosios

| $\alpha_2 R_2$ | $\xi \Sigma_s^{(1)} / \xi \Sigma_s^{(2)}$ | $\Psi = R_2 / R_1$ | $\alpha_1 R_1$ | $I_0(\alpha_1 R_1)$ | $I_1(\alpha_1 R_1)$ | d        |
|----------------|-------------------------------------------|--------------------|----------------|---------------------|---------------------|----------|
| 0,00049        | 0,3613                                    | 4,42484            | 0,31715        | 1,003               | 0,0501              | 3,189739 |

**Paskaičiuojamos neutronų daugėjimo koeficiento dedamosios:**

**Šiluminio panaudojimo koeficientas pagal (3.26) formulę:**

$$\Theta = \frac{1}{1 + d \cdot \frac{\bar{\Sigma}_a(2)}{\bar{\Sigma}_a(1)} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} = \frac{1}{1 + 3,189739 \cdot \frac{0,001582}{0,286398} \cdot \frac{0,9055}{0,0945}} = 0,856.$$

**Neutronų padaugėjimo dėl šiluminių neutronų įtakos koeficientas skaičiuojamas pagal (3.27) formulę:**

$$\eta = \frac{\rho_{U_{233}} \cdot \sigma_f(U_{233}) \cdot v_f(U_{233}) + \rho_{Pu_{239}} \cdot \sigma_f(Pu_{239}) \cdot v_f(Pu_{239})}{\rho_{U_{233}} \cdot \sigma_a(U_{233}) + \rho_{Pu_{239}} \cdot \sigma_a(Pu_{239})} =$$

$$= \frac{0,00039499 \cdot 152,845 \cdot 2,48 + 0,00030068 \cdot 319,961 \cdot 2,93}{0,00039499 \cdot 167,577 + 0,00030068 \cdot 481,093} = 1,8006.$$

**Vidutinis absorbcijos skerspjūvis:**

$$\bar{\Sigma}_a = \frac{\bar{\Sigma}_{a1} \cdot \varepsilon_1 + \bar{\Sigma}_{a2} \cdot \varepsilon_2 \cdot d}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot d} = \frac{0,286398 \cdot 0,0945 + 0,001582 \cdot 0,9055 \cdot 3,189739}{0,0945 + 0,9055 \cdot 3,189739} =$$

$$= 0,010605 \text{ cm}^{-1}.$$

**Vidutinis dalijimosi skerspjūvis:**

$$\bar{\Sigma}_f = \frac{\bar{\Sigma}_f \cdot \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot d} = \frac{0,156578 \cdot 0,0945}{0,0945 + 0,9055 \cdot 3,189739} = 0,0049606 \text{ cm}^{-1}.$$

**Vidutinis transportinis skerspjūvis:**

$$\bar{\Sigma}_{tr} = \frac{\bar{\Sigma}_{tr1} \cdot \varepsilon_1 + \bar{\Sigma}_{tr2} \cdot \varepsilon_2 \cdot d}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot d} = \frac{0,739743 \cdot 0,0945 + 0,046726 \cdot 0,9055 \cdot 3,189739}{0,0945 + 0,9055 \cdot 3,189739} = 0,069199 \text{ cm}^{-1}.$$

**Vidutinio difuzijos kelio ilgio kvadratas:**

$$L^2 = \frac{1}{3 \cdot \bar{\Sigma}_a \cdot \bar{\Sigma}_{tr}} = \frac{1}{3 \cdot 0,010605 \cdot 0,069199} = 454,2221 \text{ cm}^2.$$

**Vidutinis difuzijos koeficientas:**

$$D = \frac{1}{3 \cdot \bar{\Sigma}_{tr}} = \frac{1}{3 \cdot 0,069199} = 4,81703 \text{ cm}^2;$$

**Rezultatus suvedu į 3.8 lentelę:**

3.8 lentelė. Neutronų daugėjimo koeficiento dedamosios

| $\theta$ | $\eta$ | $\bar{\Sigma}_a$ | $\bar{\Sigma}_f$ | $\bar{\Sigma}_{tr}$ | $L^2$    | D       |
|----------|--------|------------------|------------------|---------------------|----------|---------|
| 0,856    | 1,8006 | 0,010605         | 0,0049606        | 0,069199            | 454,2221 | 4,81703 |

**Neutronų amžiaus skaičiavimas:**

Neutronų amžiaus skaičiavimas, kai energija 1,46eV:

$$\tau_{1,46}^{D_2O} = 16,5 \text{ cm}^2;$$

$$\begin{aligned} \tau_{1,46} &= \tau_{1,46}^{D_2O} \frac{\left(1 + \frac{V_{UO_2}}{V_{H_2O}} + \frac{V_{PuO_2}}{V_{H_2O}} + \frac{V_{met.}}{V_{H_2O}}\right)^2}{\left(\gamma_{D_2O} + 0,82 \cdot \frac{V_{ThO_2}}{V_{D_2O}} + 0,4 \cdot \frac{V_{met.}}{V_{D_2O}}\right)^2} = \\ &= 16,5 \cdot \frac{\left(1 + \frac{12,41 \cdot 10^{-3}}{963,40 \cdot 10^{-3}} + \frac{9,37 \cdot 10^{-3}}{963,40 \cdot 10^{-3}} + \frac{769,96 \cdot 10^{-3}}{963,40 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{\left(1,093 + 0,82 \cdot \frac{760,08 \cdot 10^{-3}}{4240,77 \cdot 10^{-3}} + 0,4 \cdot \frac{769,96 \cdot 10^{-3}}{4240,77 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 25,786 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

**Pagal paskaičiuotą neutroninių dujų temperatūrą paskaičiuojama energija ir perskaičiuojamas amžius:**

$$E_{gr} = x_{gr} \cdot k \cdot T_{n.d.} = 6 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot 1182 = 0,6111 \text{ eV};$$

$$\tau^p = \tau_{1,46}^p + \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}(1eV) \cdot \xi \Sigma_s(1eV)} \cdot \ln \frac{1,46}{E_{gr}} =$$

$$= 27,786 + \frac{1}{3 \cdot 0,739743 \cdot 0,056492} \cdot \ln \frac{1,46}{0,6111} = 193,0282 \text{ cm}^2.$$

**Migracijos kelio ilgio kvadratas:**

$$M^2 = L^2 + \tau^p = 454,2221 + 193,0282 = 647,2503 \text{ cm}^2.$$

**Rezultatai pateikiami 3.9 lentelėje:**

3.9 lentelė. Neutronų amžiaus ir migracijos kelio ilgio kvadrato reikšmės pagal energiją

| $\tau_{1,46}^{D_2O}$ | $\tau_{1,46}$ | $E_{gr}$ | $\tau^p$ | $M^2$    |
|----------------------|---------------|----------|----------|----------|
| 16,5                 | 25,786        | 0,6111   | 193,0282 | 647,2503 |

**Neutronų padaugėjimo dėl greitųjų neutronų įtakos koeficientas pagal (3.28) formulę:**

$$\varepsilon = 1 + \frac{\Sigma_f^{232}(v_f^{232} - 1)}{\Sigma_d + \Sigma_f^{232}(1 - 0,13 \cdot v_f^{232})} = 1 + \frac{0,13 \cdot (2,35 - 1)}{2,54 + 0,13 \cdot (1 - 0,13 \cdot 2,35)} = 1,067.$$

**Rezonansiniai integralai:**

$$\xi \Sigma_s = \sum_i \bar{\rho}_i \cdot \xi \sigma_s^i = 0,52075;$$

$$\sum_i I_c^i \cdot \bar{\rho} = 0,1474 \text{ cm}^{-1}.$$

**Tikimybė išvengti rezonansinio pagavimo skaičiuojama pagal (3.29) formulę:**

$$\varphi = e^{-\frac{\Sigma_i I_c^i \cdot \bar{\rho}}{\xi \Sigma_s}} = e^{-\frac{0,1474}{0,52075}} = 0,753.$$

**Pagal (3.30) formulę surandamas begalinės terpės neutronų daugėjimo koeficientas:**

$$k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta = 1,8006 \cdot 1,067 \cdot 0,753 \cdot 0,856 = 1,2384.$$

**Efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas pagal (3.31) formulę:**

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{350}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{145}\right)^2 = 0,000356;$$

$$k_{ef} = \frac{k_\infty}{1 + M^2 \cdot B^2} = \frac{1,2384}{1 + 647,2503 \cdot 0,000356} = 1,0065.$$

## IŠVADOS

Pagal sudarytą skaičiavimo planą nustatytos pasirinkto pažangiojo sunkiojo vandens AHWR 300 projekcinio reaktoriaus fizikinės neutroninės charakteristikos. Išanalizuota torio kuro pagrindo veikimo galimybė tokio tipo reaktoriuje. Reaktoriaus kritiškumo sąlyga buvo patikrinta pasirinkus tam tikrus daliųjų izotopų kiekius bendrame metalų oksidų mišinio kure. Išnagrinėtos reaktoriaus ir kuro fizikinės neutroninės charakteristikos parodė, kad:

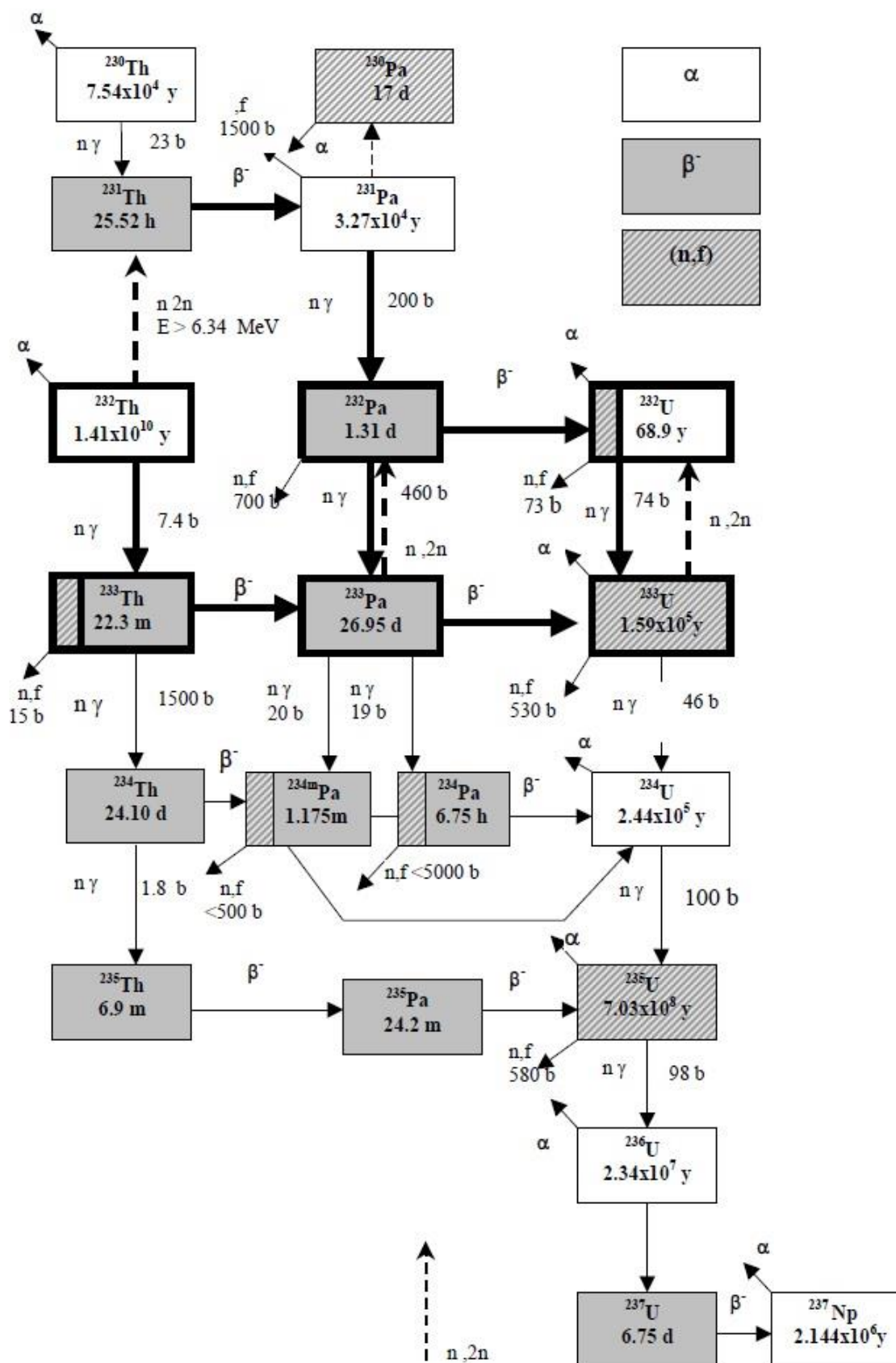
1.  $^{233}\text{U}$  izotopas geresnė dalioji medžiaga tiek šiluminių, tiek vidutinės energijos neutronų srityje dėl žemesnio pagavimo–dalijimosi skerspjuvių santykio lyginant su  $^{239}\text{Pu}$ . Atitinkamai šie santykiai yra 8,0 %, 26,5 % šiluminių neutronų srityje. Šis santykis parodo, jog įvykus daliosios medžiagos reakcijai su neutronu  $^{233}\text{U}$  branduolys turi didžiausią tikimybę dalijimuisi.
2. Plačiame neutronų energijų spektre  $^{233}\text{U}$  atpalaiduoja daugiau neutronų vienam absorbuotam neutronui už  $^{239}\text{Pu}$ , todėl šiuo atžvilgiu  $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$  ciklas pranašesnis už  $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$  ciklą.
3. Nustatytas efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{\text{eff}} = 1,0065$  rodo, jog reaktoriaus branduolinio kuro ir neutronų lėtiklio homogeniškas mišinys tenkina kritiškumo sąlygą. Ši sąlyga pasiekta esant 10 % (6,75 %  $^{233}\text{U}$  ir 3,25 %  $^{239}\text{Pu}$ ) daliųjų izotopų oksidų priemaišų kiekiui torio oksido kure. Surastos neutronų daugėjimo koeficiento dedamosios:
  - Šiluminio panaudojimo koeficientas  $\Theta = 0,856$ ;
  - Neutronų padaugėjimo dėl šiluminių neutronų įtakos koeficientas  $\eta = 1,8006$ ;
  - Neutronų padaugėjimo dėl greitųjų neutronų įtakos koeficientas  $\varepsilon = 1,067$ ;
  - Tikimybė išvengti rezonansinio pagavimo  $\phi = 0,753$ .
4. Gauta tenkinanti kritiškumo sąlyga patvirtina neutronų pakankamumą daliosios medžiagos ( $^{233}\text{U}$ ) gamybai iš  $^{232}\text{Th}$ .

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. BARC / ADVANCED HEAVY WATER REACTOR (AHWR).  
<https://aris.iaea.org/sites/..%5CPDF%5CAHWR.pdf>, 06/2013.
2. BARC / BARC Highlights - AHWR Technology and Engineering.  
<http://www.uxc.com/smr/Library%5CDesign%20Specific/AHWR/Other%20Documents/BARC%20Highlights%20-%20AHWR%20Technology%20and%20Engineering.pdf>
3. Bhardwaj, S.A. / Indian nuclear power programme - Past, present and future.  
<http://www.ias.ac.in/sadhana/Pdf2013Oct/2.pdf>, 10/2013.
4. Gyls J. / Branduolinių energetinių sistemų medžiagos, Kaunas: Technologija, 2000, p. 85–86.
5. Gyls, J. / Branduolinės inžinerijos įvadas, Kaunas: Technologija, 1997, p. 130–148.
6. Gyls, J., Ašmantas L. / Atominių elektrinių branduoliniai energetiniai įrenginiai, Kaunas: Technologija, 2011, 139 p.
7. IAEA–TECDOC-1450 / Thorium fuel cycle – potential benefits and challenges. [http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1450\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf), 05/2005.
8. Krishnani, P.D., Singh, B., Kannan, U., Kumar, Ar., Mukerji, S., Srivenkatesan, R., BARC / Studies of Advanced Fuel Cycles in Indian Pressurized Heavy Water Reactors and Advanced Heavy Water Reactor.  
[http://www.researchgate.net/profile/P\\_Krishnani/publication/264858505\\_Studies\\_of\\_advanced\\_fuel\\_cycles\\_in\\_Indian\\_Pressurised\\_Heavy\\_Water\\_Reactors\\_and\\_Advanced\\_Heavy\\_Water\\_Reactor/links/54c0e5250cf21674cea07719.pdf](http://www.researchgate.net/profile/P_Krishnani/publication/264858505_Studies_of_advanced_fuel_cycles_in_Indian_Pressurised_Heavy_Water_Reactors_and_Advanced_Heavy_Water_Reactor/links/54c0e5250cf21674cea07719.pdf), 04/2004.
9. Kumar, A., Srivenkatesan, R., Sinha, R.K., IAEA–CN-164–3S03 / On the Physics Design of Advanced Heavy Water Reactor (AHWR). BARC. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500\\_CD\\_Web/htm/pdf/topic3/3S03\\_A.%20Kumar.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500_CD_Web/htm/pdf/topic3/3S03_A.%20Kumar.pdf)
10. Nuclear Power in the World Today. <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today/> (atnaujinta 2015-02, paskutinį kartą žiūrėta 2015-05-17).
11. Prasad, N., Kumar, An., Kannan, U., Kumar, Ar., Krishnani P.D., Sinha R.K., IAEA–CN-184/207 / Study for use of LEU along with Thorium in Advanced Heavy Water Reactor (AHWR) to Enhance Proliferation Resistance Characteristics of Fuel.  
<http://www.uxc.com/smr/Library%5CDesign%20Specific/AHWR/Papers/2010%20-%20Study%20for%20Use%20of%20LEU%20along%20with%20Thorium%20in%20AHWR%20to%20Enhance%20Proliferation%20Resistance%20Characteristics%20of%20Fuel.pdf>

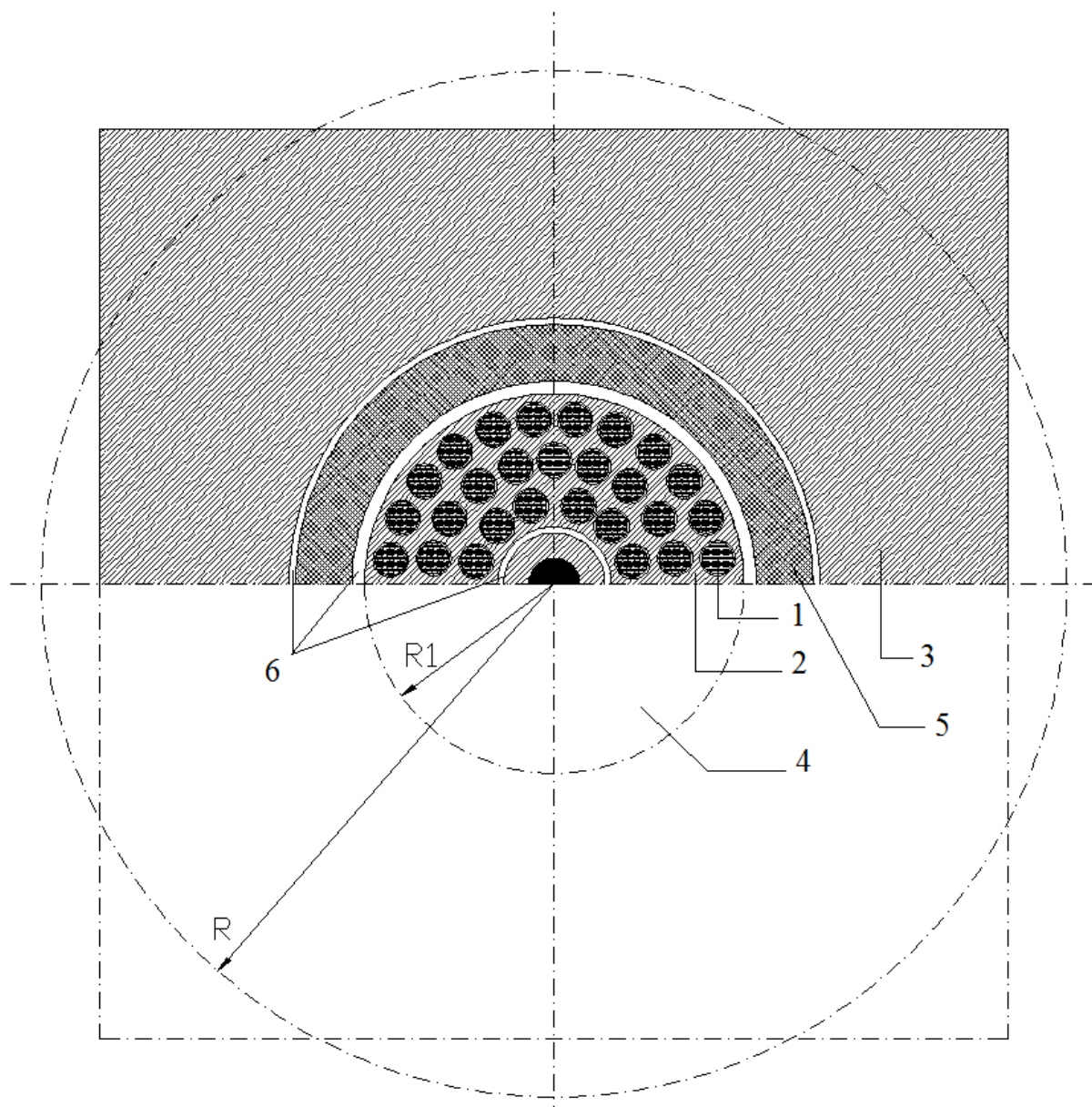
12. Raina, V.K., Critical facility for AHWR and PHWRs.  
<http://www.phys.vt.edu/~kimballton/gem-star/workshop/presentations/raina.pdf>
13. Schaffer, M.B. / Abundant thorium as an alternative nuclear fuel. Important waste disposal and weapon proliferation advantages.  
<http://web.mit.edu/12.000/www/m2018/pdfs/japan/thorium.pdf>, 04/2013.
14. Sinha, R.K. / Advanced Nuclear Reactor Systems – An Indian Perspective.  
<http://www.igcar.ernet.in/events/anup2010/RKSinha.pdf>, 2010.
15. Sinha, R.K., Kakodkar, A. / Design and development of the AHWR—the Indian thorium fuelled innovative nuclear reactor. [http://anilkakodkar.in/kakodkar\\_pdf/journal\\_003.pdf](http://anilkakodkar.in/kakodkar_pdf/journal_003.pdf), 09/2005.
16. Todosow, M., Aronson, A., Cheng, L.–Y., BNL-98372–2012 / The Indian Advanced Heavy Water Reactor (AHWR) and Non-Proliferation Attributes.  
<https://www.bnl.gov/isd/documents/79014.pdf>, 08/2012.
17. World thorium resources. <http://www.world-nuclear.org/info/current-and-future-generation/thorium/> (atnaujinta 2015-04, paskutinį kartą žiūrėta 2015-05-17).

## A. PRIEDAS. Torio skilimo grandinė



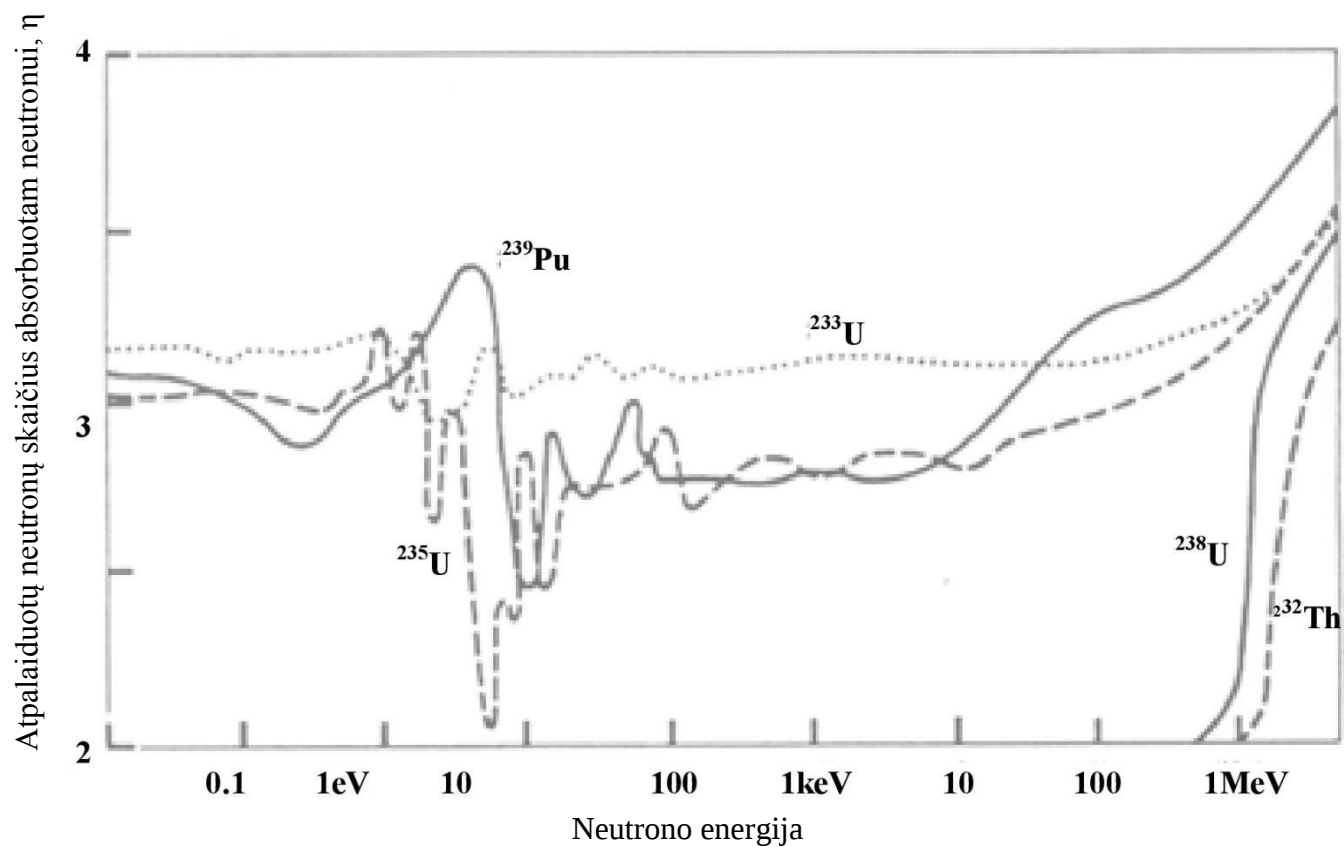
2.1 pav. Torio skilimo grandinė

## B. PRIEDAS. Homogenizuotas blokas



3.1 pav. Homogenizuotas blokas: R1 – bloko spindulys; R – gardelės kontūro spindulys; 1 – branduolinis kuras; 2 – šilumnešis; 3 – lėtiklis; 4 – homogenizuotas blokas; 5 – dujų (oro) tarpas; 6 – tarpeliai.

### C. PRIEDAS. Momentinių neutronų skaičius vienam absorbuotam neutronui



4.1 pav. Neutronų išeiga absorbuojant neutroną