



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

**Denisas Murnikovas**

**BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS OBJEKTŲ**  
**EKSPLOATACINIŲ IR EKONOMINIŲ FAKTORIŲ SĄVEIKOS**  
**TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Linas Paukštaitis

**KAUNAS, 2015**

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

**TVIRTINU**  
Katedros vedėjas  
(parašas) doc. dr. Egidijus Puida  
(data)

**BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS OBJEKTŲ**  
**EKSPLOATACINIŲ IR EKONOMINIŲ FAKTORIŲ SĄVEIKOS**  
**TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
**Branduolinė energetika** (kodas 621E32001)M

**Vadovas**  
(parašas) dr. Linas Paukštaitis  
(data)

**Recenzentas**  
(parašas) doc. dr. Juozas Gudzinskas  
(data)

**Projektą atliko**  
(parašas) Denisas Murnikovas  
(data)

**KAUNAS, 2015**

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

**Tvirtinu:** \_\_\_\_\_  
*(parašas, data)*

Šilumos ir atomo energetikos katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
Doc. Egidijus Puida  
*(vardas, pavardė)*

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

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema – **“Branduolinės energetikos objektų eksploatacinių ir ekonominių faktorių sąveikos tyrimas”**

**“The study of nuclear energy objects operating and economical factors interaction”**

Patvirtinta 2015 m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. ST17-F-11-2

2. Darbo tikslas – analizuoti branduolinės energetikos objektų eksploatacinių ir ekonominių faktorių sąveiką. Analizę patikrinti priskiriant branduolinį energetinį objektą ABWR 1350. Atlikti ABWR 1350 šiluminius ir fizikinius neutroninius skaičiavimus, kuriais naudojantis apskaičiuoti panaudoto branduolinio kuro ir radioaktyviųjų atliekų kiekius. ABWR 1350 ekonominių faktorių sąveika. Paskaičiuoti bendrus ekonomiškumo rodiklius.

3. Darbo struktūra: 1. Įvadas, 2. Branduolinio kuro ciklas: kasyba, sodrinimas bei kuro gamyba. 3. Branduolinio kuro ciklas: radioaktyviųjų atliekų šalinimas bei jų perdirbimas. 4. Šiluminis ABWR 1350 skaičiavimas. 5. Fizikinis – neutroninis ABWR 1350 skaičiavimas. 6. Per kampanijos laiką susidariusio panaudoto branduolinio kuro kiekis. 7. Bendri ekonomiškumo rodikliai. 8. Išvados ir rekomendacijos.

4. Reikalavimai ir sąlygos: Branduolinės energetikos objektų eksploatacinių ir ekonominių faktorių apžvalga, reaktoriaus šiluminio ir fizikinio - neutroninio skaičiavimo metodikos pritaikymas ABWR 1350, įvertinti radioaktyviųjų atliekų ir panaudoto branduolinio kuro kiekio susidarymą ir tvarkymo galimybes. Paskaičiuoti bendrus ekonomiškumo rodiklius.

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2015 m. birželio mėn. 3 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui **Denisui Murnikovui** .....

Užduotį gavau **Denisas Murnikovas** .....  
*(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)*

Vadovas asistentas **Linas Paukštaitis** .....  
*(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)*



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

(Fakultetas)

**DENISAS MURNIKOVAS**

(Studento vardas, pavardė)

**Branduolinė energetika, 621E32001**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „**Branduolinės energetikos objektų eksploatacinių ir ekonominių faktorių sąveikos tyrimas**“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 birželio 3 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Deniso Murnikovo** baigiamasis projektas tema „**Branduolinės energetikos objektų eksploatacinių ir ekonominių faktorių sąveikos 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)

Murnikovas, D. "The study of nuclear energy objects operating and economical factors interaction". *Master's* final project / head dr. Linas Paukštaitis; Kaunas university of technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, department of Thermal and Nuclear Energy. Kaunas, 2015. 46 pages.

## SUMMARY

Project theme "The study of nuclear energy objects operating and economical factors interaction" was chosen to assess the cost-effectiveness of each stage of the nuclear fuel cycle. It is important to analyze the price of fuel components: the cost of uranium mining, enrichment, fuel fabrication; to compare the prices of alternative fuels, to review the positive and negative aspects of the nuclear fuel operation. These days it is very important not only the price of fuel or its efficiency. Therefore, by comparing its competitiveness with other energy sources, it is important to consider not only the cost of construction of energy facilities, but also fossil fuel, decommissioning and radioactive waste storage prices. The evaluation factors contributing carbon dioxide, nitrogen compounds and sulfur emissions into the environment. Nuclear energy also has disadvantages - some of the biggest is the spent fuel storage, processing, and disposal of radioactive waste. In order to understand the scale of the shortcomings, it is necessary to examine radioactive waste management and disposal, to find out which methods are the most common and the relevance of the environment.

Operational factors research purposes, selected for Lithuania planned to build a nuclear reactor ABWR 1350 thermal calculation. Taking advantage of these calculations carried out physical - neutron counting ABWR 1350. Calculation of Reactor technical data useful to calculate the amount of the reactor during the operating period will store spent nuclear fuel, as well as to assess the extent of uranium ore to be mined to produce the fuel. Over the lifetime of the reactor campaign, you need to calculate the overall cost-effectiveness indicators, compare them and determine what is the price of electricity. Also, calculate how much is planned to raise funds to provident fund for the decommissioning of the reactor, and that will be enough of these funds spent nuclear fuel and radioactive waste handle. A review of all nuclear facilities operational and economic factors will lead to the conclusion that nuclear fuel cycle stages the most expensive, or the resources used to produce nuclear fuel efficient, which fuel the advantages and disadvantages compared with other fossil fuels.

## TURINYS

ĮVADAS .....	8
1. BRANDUOLINIO KURO CIKLAS: KASYBA, SODRINIMAS, KURO GAMYBA .....	9
1.1 Urano išgavimas bei įsodrinimas .....	9
1.2 Branduolinio kuro gamyba.....	11
1.3 Branduolinio kuro kaina. Palyginimas su anglių ir gamtinių dujų kainomis .....	12
2. BRANDUOLINIO KURO CIKLAS: RADIOAKTYVIŲ ATLIEKŲ ŠALINIMAS BEI JŲ PERDIRBIMAS .....	14
2.1 Radioaktyviosios atliekos ir jų šalinimas.....	14
2.2 Panaudoto branduolinio kuro perdirbimas .....	15
3. ABWR 1350 LIETUVOJE EKONOMINIO VERTINIMO ANALIZĖ .....	17
3.1 Visagino atominės elektrinės reikšmė elektros rinkoje.....	17
3.2 Projekto perspektyvumas .....	18
3.3 Investicijų pritraukimas.....	18
3.4 Atominės elektrinės statyba mažina priklausomybę nuo importuojamos elektros .....	18
3.5 Lietuvos regiono turimos galimybės ir pajėgumai.....	19
3.6 Pasiūlos trūkumas .....	21
4. ŠILUMINIS ABWR 1350 SKAIČIAVIMAS .....	23
4.1 ABWR 1350.....	23
4.2 Preliminarus šiluminis skaičiavimas .....	25
5. FIZIKINIS – NEUTRONINIS ABWR 1350 SKAIČIAVIMAS .....	27
6. PER KAMPANIJOS LAIKĄ SUSIDARIUSIO PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO KIEKIS .....	40
7. BENDRI EKONOMIŠKUMO RODIKLIAI .....	42
IŠVADOS.....	45
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	46

## LENTELIŲ SĄRAŠAS:

<b>3.1 lentelė.</b> Regiono galimybės. ....	20
<b>3.2 lentelė.</b> Projekto sritys ir kainos. ....	20
<b>3.3 lentelė.</b> Elektrinės Baltijos šalyse. ....	21
<b>3.4 lentelė.</b> Elektros gamyba 2009, 2010, 2011 m. ....	22
<b>5.1 lentelė.</b> Skaičiavimo rezultatai. ....	29
<b>5.2 lentelė.</b> Skaičiavimo rezultatai. ....	32

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS:

<b>1.1 pav.</b> Vidutinės gamtinio urano, tiekiamo pagal momentines ir ilgalaikes sutartis, kainos [2]. ...	10
<b>1.2 pav.</b> Kuro kainų pokyčiai gaminant elektros energiją nuo 1996 m. iki 2010 m. (branduolinė energetika, anglių bei gamtinių dujų kainos) [7]. ....	13
<b>2.1 pav.</b> Skirtingos rūšies atliekos radioaktyviosios atliekos ir joms skirti atliekynai. ....	14
<b>2.2 pav.</b> Kuro perdirbimo eiga. ....	16
<b>4.1 pav.</b> ABWR kuro kasetės pjūvis. ....	24
<b>4.2 pav.</b> Šiluminio elemento pjūvis (ABWR tipo). 1-branduolinis kuras ( $UO_2$ ); 2- kontaktinis sluoksnis; 3- apvalkalas; 4- šilumnešis; ....	24
<b>4.3 pav.</b> ABWR rinklė. ....	25
<b>5.1 pav.</b> Parametro Z radimas. ....	34

## IVADAS

Projekto tema „Branduolinės energetikos objektų eksploatacinių ir ekonominių faktorių sąveikos tyrimas“ pasirinkta, norint įvertinti kiekvieno etapo ekonominį naudingumą branduoliniame kuro cikle. Svarbu išanalizuoti kuro kainos dedamąsias: kiek kainuoja urano kasimas, sodrinimas, kuro gamyba; palyginti kainas su alternatyviomis kuro rūšimis, apžvelgti teigiamus ir neigiamus branduolinio kuro eksploatacijos aspektus.

Šiomis dienomis labai svarbu ne tik kuro kaina ar jo efektyvumas. Todėl, lyginant jos konkurencingumą su kitais energijos šaltiniais, svarbu atsižvelgti ne tik į energetinių objektų statybos sąnaudas, bet ir iškastinio kuro, elektrinės uždarymo bei radioaktyviųjų atliekų saugojimo kainas. Prie vertinimo faktorių prisideda anglies dvideginio, azoto junginių ir sieros junginių išmetimai į aplinką. Lyginant šiuos faktorius branduolinė energetika stipriai lenkia visas kitas energijos generavimo priemones ir jų vartojamas kuro rūšis, tačiau tai reikia pagrįsti skaičiais. Branduolinė energetika irgi turi trūkumų - vieni didžiausių yra panaudoto branduolinio kuro saugojimas, perdirbimas, bei radioaktyviųjų atliekų laidojimas. Norint suprasti šių trūkumų mastą, reikia išnagrinėti radioaktyviųjų atliekų tvarkymo ir šalinimo būdus, išsiaiškinti, kokie būdai labiausiai paplitę ir kokią reikšmę turi aplinkai. Taip pat išanalizuoti panaudoto branduolinio kuro saugojimo ypatumus ir technologinius sprendimus.

Eksploatacinių faktorių tyrimo tikslais, pasirinkta atlikti Lietuvoje planuojamo statyti branduolinio reaktoriaus ABWR 1350 šiluminį skaičiavimą. Pasinaudojant šiais skaičiavimais atliekamas fizikinis – neutroninis ABWR 1350 skaičiavimas. Apskaičiavus reaktoriaus techninius duomenis, naudinga paskaičiuoti, kiek šis reaktorius per eksploatacijos laikotarpį sukaups panaudoto branduolinio kuro, taip pat įvertinti, kiek urano rūdos reikia iškasti šiam kurui pagaminti.

Vertinant visą reaktoriaus kampaniją, reikia paskaičiuoti bendrus ekonomiškumo rodiklius, juos palyginti ir nustatyti, kokia yra elektros energijos kaina. Taip pat apskaičiuoti, kiek planuojama surinkti lėšų į kaupiamąjį fondą, skirtą reaktoriaus uždarymui, ir ar užteks šių lėšų panaudotam branduoliniam kurui, bei radioaktyvioms atliekom tvarkyti.

Apžvelgus branduolinės energetikos objektų eksploatacinius ir ekonominius faktorius, bus galima daryti išvadą, kurie branduolio kuro ciklo etapai brangiausi, ar ištekliai branduoliniam kurui gaminti naudojami efektyviai, kokie branduolinio kuro privalumai ir trūkumai, lyginant su kitomis iškastinio kuro rūšimis.



## 1. BRANDUOLINIO KURO CIKLAS: KASYBA, SODRINIMAS, KURO GAMYBA

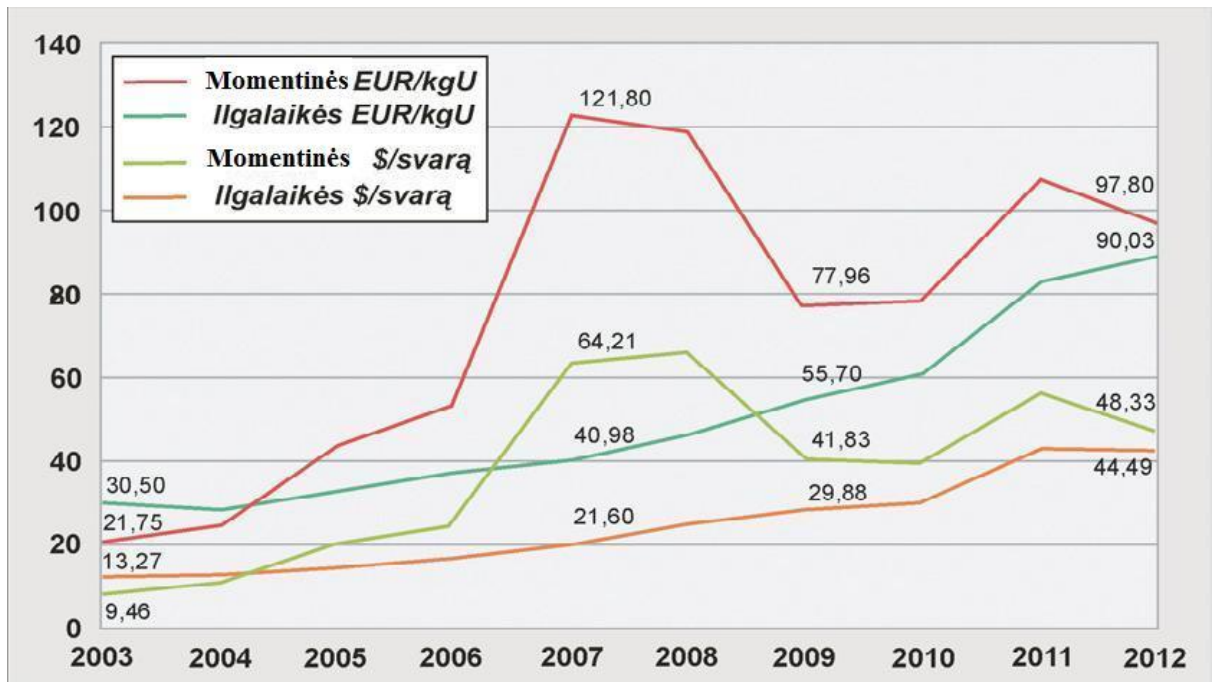
Branduolinio kuro ciklą sudaro 4 etapai. Kiekviename etape skiriasi tiek naudojamos technologijos, tiek ir pačio proceso, žaliavų kaštai, tačiau jie veda prie galutinio produkto – elektros energijos. Šiame skyriuje apžvelgiami pirmieji kuro ciklo etapai: urano kasyba ir jos technologijos, urano sodrinimas bei branduolinio kuro gamyba.

### 1.1 Urano išgavimas bei įsodrinimas

Gamtinis uranas išgaunamas keleriopai. Daugiausia urano iškasama tradicinėse kasyklose bei išplovimo metodu. 2006 m. 41 % bendrosios gamtinio urano produkcijos buvo gauta iš požeminių kasyklų, 24 % – iš atvirųjų kasyklų ir 26 % – naudojant požeminį išplovimą. 9 % bendrosios urano produkcijos buvo gauta kaip kitų kalnakasybos produktų (vario ir aukso) subproduktai. Tradicinėse kasyklose rūda išgaunama iš uolienos. Norint aprūpinti branduoliniu kuru vieną vidutinės galios reaktorių, per metus reikia iškasti apie 50 tūkst. tonų urano rūdos. Didžiausia problema laikoma ta, kad išgaunant uraną, apie 96 proc. rūdos tampa radioaktyviomis atliekomis, o jų saugojimas itin brangus [1].

Urano rūdos kasyba ir jos koncentravimas vyksta toje pačioje vietoje, nes paties urano rūdoje labai retai kada būna daugiau nei 1 % ir, siekiant išvengti balastinės uolienos transportavimo išlaidų,  $U_3O_8$  išskiriamas iš rūdos šalia kasyklų. Atominių elektrinių kritikai pabrėžia, kad urano gavybos technologija yra labai agresyvi gamtos atžvilgiu. Rūdos gavybos išėiga yra neekonomiška nes kaip ir minėta anksčiau iš pirminės žaliavos išgaunamas tik 1 proc. atominių elektrinių darbui reikalingos rūdos, o 99 proc. lieka „gulėti“ greta kasyklų kaip amžinai tiksinti ekologinė bomba. Tačiau vertinant urano gavybos kaštus verta pažymėti, kad galima paskaičiuoti tik jau išgauto urano kainą, kuri yra svyruojanti ir priklauso nuo sutarties formos, tačiau pastaruoju metu urano kaina yra auganti [2].

Įvertinti urano kasybos kaštus sudėtinga, kadangi prieinamiausia informacija yra tik apie įsodrinto t.y. jau pagaminto produkto kainas. Dėl šios priežasties toliau aptariami įsodrinto urano pardavimo kaštai. Paprastai nauja atominė elektrinė per metus suvartoja apie 30 tonų įsodrinto urano kaip kuro, o tam reikia 200 tonų gamtinio urano. Tikslus kuro rinklių ir urano kiekis branduolinio reaktoriaus viduje priklauso nuo reaktoriaus tipo ir jo galingumo. Dėl šios priežasties tam tikra dalimi skiriasi ir elektrinių eksploatacijos kaštai. Verta pažymėti, kad galima pirkti arba kuro rinkles, paruoštas naudoti reaktoriuje, arba iškastą gamtinį uraną. Bendrai gali būti panaudota apie 75 – 90 % bendro urano kiekio rūdoje [3].



1.1 pav. Vidutinės gamtinio urano, tiekiamo pagal momentines ir ilgalaikes sutartis, kainos [2].

Analizuojant 1.1 pav. galima pastebėti, kad perkant įsodrintą uraną 2012 m. pagal momentinę sutartį bei skaičiuojant kainą eurais ir taikant sąlygą, kad nauja atominė elektrinė per metus suvartas apie 30 tonų įsodrinto urano, vidutinė įsodrinto urano kaina bus 2934000 eurų. (kadangi 2012 m. urano kilogramas kainavo 97,80 eurų) metams. Tuo tarpu pasirašius ilgalaikę sutartį pagal anksčiau paminėtas sąlygas įsodrintas uranas kainuos 2700900 eurų. metams (2012 m. urano kilogramas kainavo 90,03 eurai). Įžvelgiama, kad pigesnis variantas yra antrasis t.y. pirkti įsodrintą uraną ilgalaikių sutarčių pagalba.

Kalbant apie urano sodrinimo technologijas iki šiol naudojami tik du sodrinimo metodai: UF<sub>6</sub> dujų difuzijos per specialias membranas ir centrifugavimas. Sodrinant dujų difuzijos metodu reikia labai daug elektros energijos. Centrifugavimui jos reikia beveik 50 kartų mažiau. Todėl beveik visur pereinama prie centrifugavimo, ir paskutinė gamykla, tebe naudojanti difuzijos technologiją yra JAV, kuri bus uždaryta dar šiais metais. Dar viena šalis, naudojusi dujų difuziją – Prancūzija – sustabdė šio tipo gamyklą 2011 metais. Visur kitur naudojamos tik ultracentrifugos. JAV sukūrė technologiją ir rengiasi statyti lazerines technologijas naudojančią pramoninę gamyklą, tačiau ji pradės veikti tik apie 2020 metus [2].

Dėl sodrinimo proceso sudėtingumo, didelių energijos sąnaudų, daugelio istorinių ir politinių aplinkybių urano sodrinimas yra sukonzentruotas tik keturiose kompanijose, esančiose didžiosiose pasaulio valstybėse. Svarbiausias veiksnys, atvedęs prie tokios gamybos koncentracijos, yra tas, kad sodrinimo technologija tiesiogiai atveria kelią branduoliniam ginklui gaminti. Todėl, tik tenkinant ypatingai griežtas branduolinio ginklo neplatavimo tarptautinių sutarčių sąlygas, kažkuri kita nauja šalis gali pradėti sodrinti uraną. Net 44 % bendros pasaulio

sodrinimo įmonių galios yra Rusijoje. 2012 metais Rusijai teko 41 % sodrinimo paslaugų, suteiktų Europos Sąjungos atominėms elektrinėms. O buvusios Sovietų Sąjungos ir Rytų Europos valstybėse esančioms elektrinėms per 90 % reikalingo įsodrinto urano tiekia Rusija. Matyt, dėl to, kad urano sodrinimas yra labai daug energijos sunaudojantis procesas, o elektros energijos kainos Vakarų Europoje pastarąjį dešimtmetį pamažu kilo, Europos Sąjungos atominės elektrinės vis daugiau naudojosi Rusijos urano sodrinimo paslaugomis [2].

Apibendrinus verta paminėti, kad branduolinė energetika, suteikia galimybę kurą importuoti iš įvairių šalių (uraną tiekia daugiau nei 15 valstybių) ir jo atsargų yra daug, kas užtikrina stabilias energijos gamybos kainas, o branduolinis kuras, patikimumo požiūriu, yra laikomas vietiniu, nes jo reikia mažai (metams tik 20-30 tonų branduolinio kuro 1000 MW elektrinei). Dėl šios priežasties atominė energetika vis dar išlieka populiari pasaulyje [4].

## 1.2 Branduolinio kuro gamyba

Didžiąją dalį AE gamybos išlaidų sudaro priežiūros ir elektrinės eksploatavimo bei kuro išlaidos. Taip pat žinoma, jog 2009 m. pradžioje kuro kainą sudarė maždaug šios sudėtinės dalys: urano kaina – 40 %, konversija – 5 %, sodrinimas – 40 %, ir kuro gamyba – 15 % [4]. Todėl toliau bus vertinama branduolinio kuro kaina sekančiame etape t.y. kuro gamyboje.

Galutinis branduolinio kuro, tinkamo įkrauti į reaktorių, ciklo produktas yra branduolinio kuro rinklė. Tai gan sudėtingas inžinerinis įrenginys, kuriame sumontuota daug apvalios formos nedidelio skersmens (9–12 mm) hermetiškų apie 4 m ilgio vamzdelių su branduolinio kuro keraminėmis  $UO_2$  tabletėmis jų viduje. Kuro rinklė turi garantuoti visos konstrukcijos stabilumą ir tvirtumą, ja dideliu greičiu tekant aukšto slėgio vandeniui. Branduolinio reaktoriaus aktyviąją zoną, kurioje gaminama šiluminė energija, ir sudaro tokių cilindrinės formos rinklių paketas. Visa konstrukcija turi būti labai patikima per visą kuro rinklės buvimą reaktoriuje (3–4 metus), o taip pat per jos ilgalaikį saugojimą panaudoto kuro baseinuose. Dėl šių priežasčių kuro rinkles gamina labai nedaug gamyklų, dažniausiai priklausančių branduolinių reaktorių gamintojams. Konkrečiai atominei elektrinei kuro rinkles paprastai tiekia ta pati kompanija, kuri patiekė ir pagrindinę įrangą visam reaktoriui. Tai reiškia, kad pastačius atominę elektrinę išlieki priklausomas nuo tai elektrinei reaktorių patiekusios kompanijos [4].

Kaip minėta anksčiau tikslus kuro rinklių ir urano kiekis branduolinio reaktoriaus viduje priklauso nuo reaktoriaus tipo ir jo galingumo. Branduolinio kuro gamybos etape vyksta įsodrinto urano heksafluorido konversija į urano oksidą ir tablečių bei šilumą išskiriančių elementų gamyba. Urano oksidas paverčiamas į keramiką ir supresuojamas į 1,5 bei 2 cm skersmens tabletes. Įvardijama, kad supresuotos kuro tabletės savo efektyvumu pagal pagamintą energiją atstoja 1 toną anglių. Kuro tabletės dedamos į apytiksliai 4 m ilgio vamzdelius, pagamintus iš cirkonio lydinio

arba nerūdijančio plieno. Po to keletas šilumą išskiriančių elementų surenkama į apytiksliai 30 cm skersmens kuro rinkles [3].

Analizuojant kuro rinklių kainą, šiuo atveju kaip pavyzdį galima imti 1100 MWe galingumo atominę elektrinę su įmontuotu vakarietišku PWR reaktoriumi kurio aktyviojoje zonoje sumontuotos 193 kuro rinklės sudarytos iš daugiau nei 50.000 kuro strypų ir 18 mln. kuro tablečių [6]. Žinant, jog 2009 m. šios kuro tabletės vieno vieneto kaina siekė 2,71 eurų., galima paskaičiuoti, kad visam reaktoriui aprūpinti galutinė kuro tablečių kaina gaunasi 48780000 eurų [5]. Tai sudaro gana nedidelę galutinės energijos kainos dalį.

### **1.3 Branduolinio kuro kaina. Palyginimas su anglių ir gamtinių dujų kainomis.**

Kiekviename branduolinio kuro ciklo etape egzistuoja kainų skirtumai, kurie priklauso tiek nuo pasirašytų sutarčių, tiek nuo perkamo kuro kiekio, tiek nuo politinių ar ekonominių šalių situacijų. Tai lemia, jog analizuojant kuro ciklo kainas skirtingais metais, neretai jos skiriasi. Žinoma, jog vis brangsta tiek radioaktyviųjų atliekų tvarkymas, tiek urano perdirbimas. Tačiau kalbant apie ateities perspektyvas teigiama, jog tolimesni kainų pokyčiai nebus drastiški.

Trumpai apžvelgsime tikėtiną branduolinio kuro ciklo kainą kiekvienama gamybos etape 2009 m. (mažiausia/ vidutinė/didžiausia):

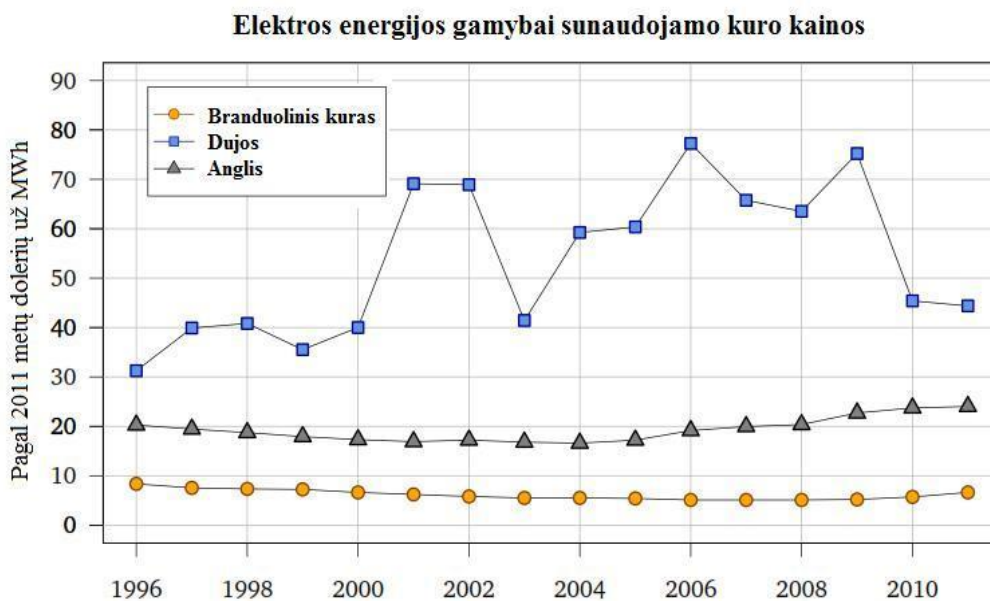
- Urano rūda (\$/kgU) – 25/60/240; (eurų/kgU) – 22,57/54,17/216,68;
- Konversija (\$/kgU) – 5/10/15; (eurų/kgU) – 4,51/9,03/13,54;
- Įsodrinimas (\$/SWU) – 80/105/130; (eurų/SWU) – 72,23/94,8/117,37;
- Kuro gamyba (\$/kg EU) – 200/240/300; (eurų/kg EU) – 180,57/216,68/270,86
- Panaudoto branduolinio kuro saugojimas (\$/kgHM) – 100/120/300; (eurų/kgHM) – 90,29/108,34/270,86;
- Atliekų tvarkymas (\$/kgHM) – 400/1000/1600; (eurų/kgHM) – 361,14/902,85/1444,56
- Urano perdirbimas (\$/kgHM) – 500/1000/1500; (eurų/kgHM) – 451,43/902,85/1354,28 [8].

Šių dienų rinkoje branduolinės energijos patrauklumas priklauso nuo būsimų anglies ir gamtinių dujų kainų. Gaminant elektros energiją branduolinėse elektrinėse galutinė kaina yra mažai priklausoma nuo pagrindinio kuro urano kainų, nes išlaidos kurui sudaro nedidelę dalį eksploataavimo sąnaudų.

Yra paskaičiuota, kad jei anglies bei gamtinių dujų kainos ateinančius 30-40 metų išliktų panašios, tuomet atominė energetika būtų brangesnė 40 procentų. Tačiau, dėl didelės taršos numatoma, jog ateityje bus taikomi vis didesni mokesčiai tiek angliai, tiek gamtinėms dujoms.

Tokiu atveju, branduolinė energija taptų reikšmingai pigesniu energijos šaltiniu. Jei dėl infliacijos gamtinių dujų kainos ateityje būtų didesnės nei 6,77 eurai už MMBTU (vienas milijonas 1055 džaulių), tuomet iš gamtinių dujų gaunama energija būtų brangesnė nei branduolinė energija, net skaičiuojant be mokesčio už taršą t.y. anglies dvideginio emisiją [7]. Branduolinės energijos sąnaudos yra visiškai nepriklausomos nuo anglies dvideginio mokesčių, nes gaminant elektros energiją tokiu būdu, anglies dvideginio emisija yra minimali ir šiuo atveju nereikšminga, vertinant galutinę energijos kainą.

Branduolinis kuras pranašesnis ir pabrangimo aspektu. Lyginant, kas nutiktų jei pakiltų anglies, gamtinių dujų ar branduolinio kuro kainos, galutiniam vartotojui branduolinio kuro pabrangimas turėtų mažiausiai įtakos. Pavyzdžiui, padvigubinus branduolinės energijos kuro sąnaudas, branduolinė energijos kaina padidėtų 10%. Tuo tarpu, tiek pat padidinus anglies ar gamtinių dujų kainas, išlaidos joms atitinkamai padidėtų 32% ir 77%. Šiuo atveju pripažįstama, kad gamtinių dujų kainų pokyčiai ateityje yra mažiau nuspėjami nei anglių, todėl egzistuoja toks kainų skirtumas [7]. Verta pastebėti, kad dėl šių priežasčių vyksta gana intensyvi tiek reaktorių, tiek branduolinėms jėgainėms reikalingų technologijų plėtra bei tyrimai. Pigesnė pagaminta energija ir nenumatomas ateityje didesnis kuro kainų šuolis didina branduolinės energijos patrauklumą.



**1.2 pav.** Kuro kainų pokyčiai gaminant elektros energiją nuo 1996 m. iki 2010 m. (branduolinė energetika, anglių bei gamtinių dujų kainos) [7].

## 2. BRANDUOLINIO KURO CIKLAS: RADIOAKTYVIŲ ATLIEKŲ ŠALINIMAS BEI JŲ PERDIRBIMAS

Radioaktyvios atliekos, tai medžiagos užterštos radionuklidais arba jeigu jų yra sudėtyje. Itin aukšti reikalavimai keliami radioaktyvių atliekų tvarkymui, saugojimui, laidojimui. Tokios atliekos turi būti rūšiuojamos, apdorojamos ir vežamos į radioaktyviųjų atliekų aikšteles arba saugyklas.

### 2.1 Radioaktyviosios atliekos ir jų šalinimas

Pagal žmogui ir aplinkai keliamą pavojų radioaktyviosios atliekos yra skirstomos į labai mažai aktyvias, mažai ir vidutiniškai aktyvias ir labai aktyvias. Radioaktyviosios atliekos pagal jose esančių radionuklidų pusėjimo trukmę ir aktyvumą yra skirstomos į:

- trumpaamžės labai mažai radioaktyvias;
- trumpaamžės mažai ir vidutiniškai radioaktyvias;
- panaudotą branduolinį kurą ir kitas ilgaamžes atliekas.



2.1 pav. Skirtingos rūšies atliekos radioaktyviosios atliekos ir joms skirti atliekynai.

Tarptautinės atominės energetikos agentūros (TATENA) duomenimis, 2003 m. pradžioje pasaulyje įvairiose panaudoto branduolinio kuro (toliau PBK) saugyklose buvo saugojama 171 tūkst. tonų panaudoto branduolinio kuro. Šiuo metu apie 95% pasaulyje susikaupusio PBK yra saugoma baseinuose, t. y. „šlapio“ tipo saugyklose. Tačiau pastaruosiu metu vis populiaresnės tampa „sausos“ tipo saugyklos ir nemažai šalių jas yra pasistačiusios arba numato ateityje statyti.

2008 m. branduolinės energetikos mokslininkų bei specialistų analizė apie radioaktyvių atliekų šalinimo būdus parodė, jog vertinant radioaktyvių atliekų užkasimą ar jų laidojimą vietoje atitinkamuose kapinyuose, pigesnis variantas yra atliekų užkasimas. Per 1000 m. laikotarpį atliekų užkasimas kelia mažiausią pavojų žmonių populiacijai bei žemiausią ekonominį, socialinį bei pačio

projekto vertės išlaidų lygį. Per šį laikotarpį minėtas atliekų šalinimo būdas kainuotų 8,94 eurų milijardus, tuo tarpu radioaktyvių atliekų laidojimas vietoje kainuoja tarp 12 ir 24 milijardų eurų priklausomai nuo katastrofų, kurios galėtų pažeisti šiuos kapinynus ir kartu padidinti jų eksploatacijos kainas [9].

Analizuojant pavyzdžiui Jungtinės Karalystės radioaktyvias atliekas jų bendra suma (įskaitant ir ateityje tikėtinas atliekas kurios bus gautos iš esamų branduolinių įrenginių) yra 4,7 mln. m<sup>3</sup> arba apie 5 mln. tonų. Dar 1 mln m<sup>3</sup> atliekų jau yra pašalintos. JK apie 94% (t.y. apie 4,4 mln m<sup>3</sup>) radioaktyviųjų atliekų patenka į mažo aktyvumo radioaktyviųjų atliekų kategoriją. Apie 6% (290,000 m<sup>3</sup>) priskiriamos vidutinio aktyvumo radioaktyviosioms atliekoms, ir mažiau kaip 0,1% (1000 m<sup>3</sup>) yra klasifikuojamas kaip didelio aktyvumo atliekos [10]. Tai yra vienas iš pavyzdžių, rodančių, kad daugiausiai atliekų yra mažo aktyvumo, tačiau vis dėl to brangiausiai kainuoja didelio ir vidutinio radioaktyvumo atliekų saugojimas ir šalinimas.

Tipinis 1000 MWe lengvojo vandens reaktorius (tiesiogiai ir netiesiogiai) sukurs 200 – 350 m<sup>3</sup> mažo ir vidutinio radioaktyvumo atliekų per metus. Tuo tarpu panaudoto branduolinio kuro, kuro strypų iš kurių ir susideda didelio radioaktyvumo atliekos bendras kiekis nėra didelis ir sudaro apie 27 tonas panaudoto kuro kuris perdirbant gali būti sumažintas iki 3 m<sup>3</sup> [10].

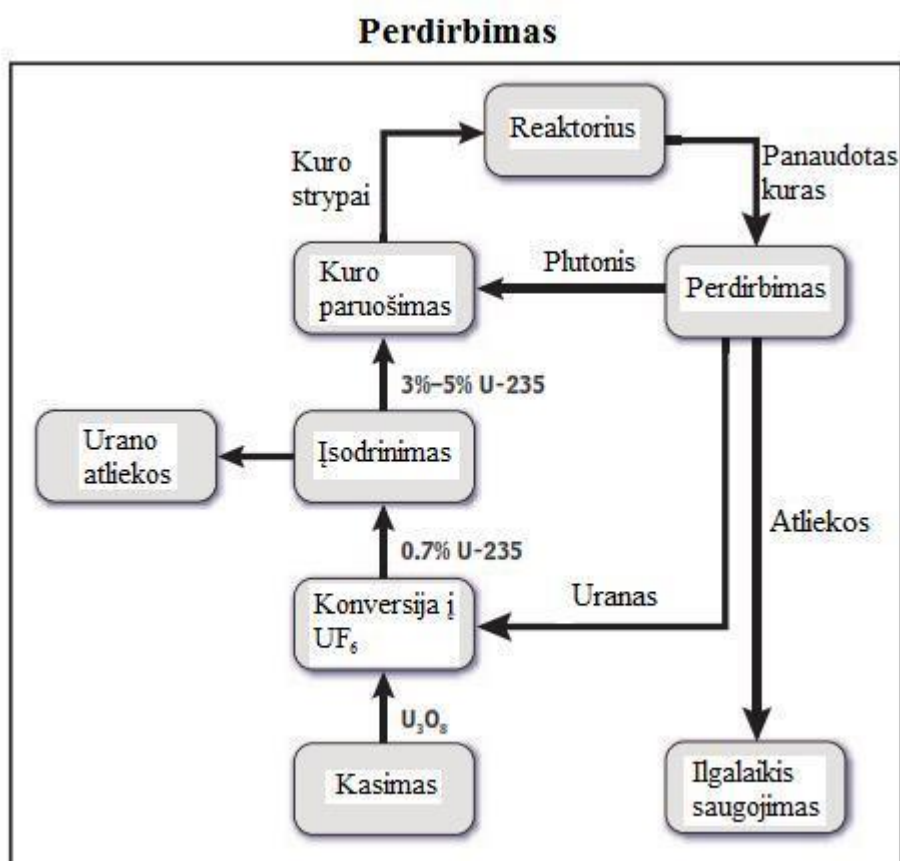
## **2.2 Panaudoto branduolinio kuro perdirbimas**

Jeigu planuojamas branduolinio kuro perdirbimas, panaudotas branduolinis kuras gabenamas į perdirbimo gamyklą. Gamykloje cheminių reakcijų pagalba išskiriami tik tie cheminiai elementai, kurie yra reikalingi. Perdirbimo gamyklas gali turėti tik ekonomiškai stiprios valstybės. Nors tarša radionuklidais mažinama, bet procedūra reikalauja daug lėšų. Kartais atliekamas pažangusis perdirbimas, kurio metu fotonų ar neutronų srautas nukreipiamas į panaudotą branduolinį kurą. Dar vienas metodas - radionuklidų transmutacija. Šio proceso metu ilgaamžiai radionuklidai virsta trumpaamžiais.

Galima pastebėti iš ankstesnės analizės, radioaktyviųjų atliekų šalinimas – itin brangus procesas. Be to, visada išlieka katastrofų, avarių tikimybė, kuomet radioaktyviosios medžiagos patektų į aplinką. Dėl šios priežasties daugelį metų vyksta diskusijos dėl galimybės perdirbti radioaktyvias atliekas šiuo atveju uraną, ir jį vėl naudoti tolesnėms branduolinių elektrinių reikmėms. Šiuo atveju bus analizuojamas paskutinis branduolinio kuro etapas – kuro perdirbimas. Teigiama, kad šis procesas nėra pigus, tačiau svarbus ne vien tik dėl ekonominių motyvų.

Analizuojant branduolinio kuro perdirbimo eigą, pirmiausiai branduolinės elektrinės savininkas turi apmokėti išlaidas: a) pervežimo į perdirbimo gamyklą kainą; b) kuro perdirbimo kainą; c) išskirstymo į aukšto, vidutinio ir žemo radioaktyvumo atliekas kainą. Gamykloje atskiriamas uranas nuo plutonio, kuris ir vėl gali būti naudojamas kaip kuras. Dar į šią kainą

įsiskaičiuoja plutonio pavertimas mišriu oksidu (toliau MOX), papildomos kuro išlaidos, leidimo gavimas MOX naudoti reaktoriuje. Pažymima, jog oficialios kainos analizuojant branduolinio kuro perdirbimą viešai nėra skelbiamos. Kuro perdirbimo įmonės tokios kaip COGEMA, BNFL ir Belgonucléaire nesuinteresuotos išlaidų ar savikainų pateikimu visuomenei, todėl informacija apie pateikiamas kainas gali būti neviseiškai tiksli. Teigiama, kad įtraukiant įvairias pačios gamyklos sąnaudas, galutinė perdirbimo kaina apie 902,85 eurų/kgHM. Tai lemia, kad perdirbimo kaina vis dar daugelį kartų brangesnė nei urano pirkimo kaina (apie 325 eurų/kg). Lygiai taip pat kuro perdirbimo kaina yra maždaug 30%/kg didesnė nei tiesioginis atliekų šalinimas kuris kainuoja apie 501,08 eurų/kg. [11].



2.2 pav. Kuro perdirbimo eiga

Šiuo atveju perdirbtas kuras išskirstomas į tris dalis: plutonis gražinamas į kuro gamybos etapą, uranas konvertuojamas į heksafluoridą, o likusios radioaktyviosios atliekos patenka į ilgalaikio saugojimo kapinynus. Nepaisant branduolinio kuro perdirbimo naudos ekologijai, dėl urano pigumo prie panaudoto kuro perdirbimo, regeneracijos ir pakartotinio gražinimo į ciklą pereinama itin lėtai [12].



### **3. ABWR 1350 LIETUVOJE EKONOMINIO VERTINIMO ANALIZĖ**

Planuojamas statyti ABWR 1350 reaktorius Lietuvoje yra didžiausią investiciją iš užsienio pritraukęs projektas. Strateginis investuotojas „Hitachi“ ir regioniniai partneriai planuoja investuoti 2,9 – 4,1 mlrd. eurų. Reaktoriaus eksploatacijos laikotarpis 60 metų. Šiuo laikotarpiu aplinkiniuose regionuose atsiras ekonominis augimas. Planuojamas BVP augimas Lietuvoje 7,8 – 10,2 mlrd. eurų. Elektros energijos perteklius bus eksportuojamas, sumažės gamtinių dujų ir elektros energijos importas. Lietuvos investicijos į projektą papildys biudžetą 1,4 – 1,7 mlrd. eurų., o dividendai sieks 11 mlrd. eurų. Regionas kuriame bus statoma atominė elektrinė gali pretenduoti į darbus kurių vertė apie 1,7 mlrd. eurų. Visų statybų metu planuojamos sukurti 6000 darbo vietos.

Kiekvienais metais Lietuva išleidžia 0,6 mlrd eurų. elektros importui ir dujų importui, kurios naudojamos elektros gamybai. Lietuvos investicijos dalis atsipirks per 3,5 metų. Kadangi atominė elektrinė minimaliai išskiria CO<sub>2</sub> dujų. Tai padės sutaupyti CO<sub>2</sub> emisijų kvotos dalį ir jas bus galima parduoti rinkoje arba sunaudoti kituose objektuose.

#### **3.1 Visagino atominės elektrinės reikšmė elektros rinkoje**

Vienas svarbiausių faktorių yra energetinė nepriklausomybė. Norint ją pasiekti reikia turėti arba daug smulkių elektrinių arba vieną galingą elektrinę. Mažų elektrinių Lietuvoje pastatyta yra gana daug, bet jos naudoja biokurą arba dujas. Tai palyginti brangus kuras. Dažnai kintanti kuro kaina neleidžia planuoti toli į ateitį. Šios elektrinės turi didelius CO<sub>2</sub> išmetimus. Kuro dedamoji vienai kilovatvalandei yra didelė. Biokuro elektrinės dažniausiai naudojamos šilumos energijai gaminti ir mažai jų gamina elektros energiją. O dujas naudojančios elektrinės yra naudojamos daugiau kaip rezervinės elektrinės. Jų pagamintos elektros kaina didesnė, negu importuojamos elektros energijos. Šiuo atveju, patogiausiai turėti branduolinę elektrinę. Stabili, žema kaina ir ilgas eksploatacijos laikotarpis suteikia stabilumą, o planuojamas reaktorius ABWR 1350, didelį kiekį elektros energijos. Kuro kainos šuoliai mažai įtakoja elektros energijos kainą. Toks reaktorius suteikia reikšmingą energetinę nepriklausomybę. Galima įžvelgti ir dar vieną svarbų faktorių – atnaujinamas elektros energijos generavimo inventorių. Taip apsisaugoma nuo pasenusių elektrinių, kurios dirba neefektyviai, reikšmingai teršia aplinką, gamina brangią elektros energiją. Lyginant su kitais scenarijais, šis atrodo patraukliausias. Įgyvendinus šį scenarijų sumažės importo ir padidės eksportuojamos elektros energijos dalis. Šis sprendimas palengvins Lietuvos ir Baltijos šalių įsijungimą į bendrą Europos rinką ir kontinentinės Europos tinklą.

### **3.2 Projekto perspektyvumas**

Šis projektas laikomas komerciškai perspektyviu. Rastas strateginis investuotojas ir regioniniai partneriai. Visi jie pasiryžę investuoti į naujos Visagino atominės elektrinės statybas. Strateginis investuotojas „Hitachi“ investuos 20 proc. atominės elektrinės statybai reikalingų investicijų. Lietuvai pasirinkus stiprų strateginį investuotoją atsirado galimybė skolintis lėšų iš platesnio spektro bankų ir agentūrų. Regioniniai partneriai – Latvija ir Estija investuos savo dalį taip pat. Juos remia įmonių akcininkai ir valstybės. Visi šie partneriai, kaip ir Lietuva, prisiima visą projekto statybos ir kainų kitimo riziką. Projekte paskaičiuotos kuro ir eksploatacijos ir eksploatacijos nutraukimo dedamosios elektros energijos kainoje. Numatomos kuro išlaidos 0,61 – 0,9 ct/kWh, eksploatacinės išlaidos 1,1 – 1,71 ct/kWh, eksploataavimo nutraukimo išlaidos 0,23 – 0,32 ct/kWh [14].

### **3.3 Investicijų pritraukimas**

Pritraukti investicijų tokiam dideliame projektui – didelis iššūkis. Lietuvoje buvo sukurta stipri bazė šiuo klausimu. Pirmiausiai patrauktas investuotojų dėmesys patraukliomis komercinėmis sąlygomis. Pagrindinė jų buvo 8-12 proc. finansinė grąža atskaičius mokesčius. Taip pat atsižvelgiama į privataus sektoriaus grąžos reikalavimus.

Nacionalinis Lietuvos investuotojas UAB Visagino Atominė Elektrinė turės finansuoti 1,73 mrd. eurų kapitalinių investicijų (pagal 2011 metų kainas). Numatoma 45-60 proc. reikalingos sumos pasiskolinti. Šiai paskolai gauti reikalinga Lietuvos valstybės garantija. Garantiją valstybė suteikia. Tačiau modelis numato, kad garantijos panaudojimas nebūtų reikalingas. Galutinės kredito sąlygos paaiškės vėlyvesniame etape. Likusi reikalinga investicijų dalis bus gaunama iš nacionalinio investuotojo valdomų bendrovių. Lietuvos turtinis įnašas į Visagino AE taip pat yra investicija į projektą. Lietuvos turtinio įnašo vertė, ne mažesnė kaip 50 mln. eurų (173 mln. Lt) yra sutarta vienoje iš Koncesijos sutarties sąlygų. Numatytos galimybės visuomenei, bei kitiems investuotojams, investuoti į projektą.

### **3.4 Atominės elektrinės statyba mažina priklausomybę nuo importuojamos elektros**

Geriausi būdai mažinti priklausomybę nuo importuojamos elektros energijos, tai plėtoti regione nuosavą jos gamybą ir turėti daugiau negu vieną importo šaltinį.

Istorija rodo, kad priklausomybė nuo vieno tiekėjo gali atnešti labai didelius nuostolius vien sutrikus jos veiklai. Nevertinamas monopolio principas, kai derinamos ilgalaikės sutartys ir elektrai arba dujoms pirkti. Iki Lietuvos elektros energija keliauja kelis tūkstančius kilometrų. Šiame kelyje kerta ne vieną objektą. Kuo didesnis objektų skaičius, tuo didesnė rizika, kad kuris nors objektas gali patirti avariją ar laikinus nesklandumus, dėl kurių elektros energijos tiekimas gali sutrikti.

Vertinant buvusius įvykius JAV ir paskaičiuojant kokius nuostolius galima padaryti Lietuvos regionui gaunami tokie skaičiai – 145-232 mln. eurų žala.

Vertinant scenarijų, kad atominė elektrinė nestatoma. Padidėja priklausomybė nuo dujų importo ir IPS/UPS elektros sistemos. Elektros energijos kainos bus didesnės ir mažiau stabilios. Perspektyvoje numatomas dar vienas dujų tiekėjas, tik jo našumas mažesnis. Remiantis pavyzdžiu Ukrainoje 2006 ir 2009 m. Buvo sutrikęs dujų tiekimas visam regionui. Lyginant situacijas gauname, kad dešimčiai dienų nutrauktas dujų tiekimas per 2016 m. pirmąjį ketvirtį Lietuvai padarytų žalos už maždaug 290 mln. eurų.

Lietuva 2011 metais už elektros energijos ir dujų, kurias naudojo elektrai gaminti, importą sumokėjo 0,5 mlrd. eurų. Prie šios sumos dar pridedamas mokestis už tiekimo saugumą 100 mln. eurų., juos sumoka Lietuvos vartotojai. Nesunku paskaičiuoti, kad visa suma skiriama elektros energijos ir dujų pirkimui, kurios naudojamos elektrai gaminti, per metus siekia 600 mln. eurų. Taigi 3,5 metų importo laikotarpis lygus investicijų į Visagino atominę elektrinę dydžiui.

Lietuvos valdžia skyrė didelį dėmesį energetinio tiekimo saugumui stiprinti, mažinti priklausomybei nuo importuojamos elektros energijos ir energijos gamybos naudojant importuotą kurą. Didelis uždavinys, nuolatos atnaujinti senstančius energijos gamybos įrenginius naujais, taip vykdant plėtrą. Branduolinės energetikos vystymas Lietuvoje šias kilusias problemas sumažintu.

Kaip jau minėta, prognozuojama, kad Baltijos šalys ateityje vis stipriau priklausys nuo dujų arba naftos, kaip pagrindinių elektros energijos gamybos šaltinių, jeigu regione nebus branduolinės jėgainės. Pačios valstybės šių gamtinių išteklių neturi, taigi regione bus didelė nepatikimo tiekimo ir tiekimo sutrikimų rizika, taip pat vyraus nepastovios iškastinio kuro kainos.

Pastatyta Visagino AE padės sumažinti priklausomybę nuo importo ir apsaugoti nuo iš trečiųjų šalių importuojamos elektros energijos tiekimo Lietuvos vartotojams sutrikimų (ir iš dalies kainų augimo). Šios nuolatinės priklausymo nuo importo rizikos eliminavimo svarbą rodo strateginiam tikslui suteikta didelė politinė svarba – nepriklausyti nuo importo iš IPS / UPS sistemos net ir dėl pirminio rezervo (t. y. importuoti elektros energiją, siekiant akimirksniu subalansuoti sistemą, esant sutrikimams) metų eigoje

Parengtoje Lietuvos nacionalinėje energetikos strategijoje nurodyta, kad pagrindinis elektros energijai gaminti naudojamas kuras – dujos, gali būti tiekiamos iš vieno šaltinio ne daugiau kaip 30 proc. bendro kuro balanso. Uždarius Ignalinos atominę elektrinę, būtent taip ir nutiko, kad du trečdaliai įrengimų Lietuvoje naudoja dujas elektros energijos gamyboje ir tik iš vieno šaltinio.

### **3.5 Lietuvos regiono turimos galimybės ir pajėgumai**

Lietuvos regione gerai išvystyta statybų sfera. Ją galima panaudoti didžiąjai daliai darbų atlikti statant Visagino atominę elektrinę. Ne paslaptis, kad atominės elektrinės statybose dalyvauja

labia daug statybų inžinierių, kurie mažai yra susiję su branduoline energetika. Labai daug darbų gali atlikti įvairios statybų kompanijos. Naujausi elektrinių statymo metodai regione pakoreguoti dalyvaujant užsienio kompanijoms. Todėl padaryta didelė pažanga projektų valdymo ir statybos technologijų srityse. Pastebėtina, kad yra daug bendrovių, kurios nuolatos dirbo ir vis dar dirba su Ignalinos atominė elektrine. Šie darbai buvo vykdomi atominės elektrinės eksploatacijos laikotarpiu ir eksploatacijos nutraukimo metu.

**3.1 lentelė.** Regiono galimybės.

<b>Projekto sritis</b>	<b>Regiono egzistuojančios galimybės ir pajėgumai</b>
Projektavimas ir planavimas	Specializuotų elektrinės komponentų ir susijusios su jais infrastruktūros projektavimas, detalus aikštelės planas, pastatai aptarnaujančiam personalui, aplinkos tvarkymas ir aplinkos apsaugos priemonės.
Statybos darbai ir medžiagos	Šiam projektui įgyvendinti užteks iki 10% metinių regiono statybos išteklių.
Specializuoti statybos darbai	Inžinerinių sistemų projektavimas ir montavimas.
Mašinos ir įrengimai	Reikalingos technikos statybos vietoje ir po statybų (eksploatavimo metu) projektavimas ir montavimas.
Transporto paslaugos	Nestandartinių krovinių vežimas įprastu kelių transportu, su tuo susiję projektavimo darbai.
IT	Informacinių technologijų infrastruktūra, duomenų saugojimas, informacijos tvarkymas, apsaugos priemonės.

Atlikus tyrimą, kurio metu buvo apklausiamos įmonės regione, paaiškėjo kokius darbus gali atlikti konkrečios įmonės. Šios įmonės siūlė prelimenarias kainas darbams. Žinoma, apklausa nėra tikslus rodiklis ir kaina gali skirtis, kai bus suformuota aiški užduotis.

**3.2 lentelė.** Projekto sritys ir kainos.

<b>Projekto sritis</b>	<b>Biudžeto dalis, %</b>	<b>Maks. biudžetas* mln. eurų</b>	<b>Regiono pajėgumai, %</b>	<b>Regiono dalis, mln. eurų</b>
Projektavimas ir licencijų gavimas	22	1100	25	949
Branduolinio garo tiekimo sistema	28	1400	0	0
Statybos darbai	20	1000	70	2415
Turbina ir mechaniniai įrenginiai	13	650	35	785
Kontrolinis matavimas ir valdymas (V ir K)	6	300	35	362
Kita	11	550	35	664
<b>Iš viso</b>	<b>100</b>	<b>5000</b>	<b>30</b>	<b>5175</b>

### 3.6 Pasiūlos trūkumas

Konsultantai padarę rinkos analizę turėjo nustatyti ar yra ekonominis pagrindimas rinkoje investuoti į Visagino atominės elektrinės statybas. Išvados gautos tokios:

Artimiausių kelerių metų laikotarpyje labai pasens esami įrengimai. Juos reiks pakeisti kitais, o jų trūksta. Suplanuota per mažai naujų įrenginių. Prie šios pasiūlos trūkumo prisideda ir naujų tinklų prijungimas, kuris pakels elektros energijos kainas iki Europinių kainų lygio

Prognozės rodo, kad Baltijos šalyse bus stipriai juntamas elektros energijos trūkumas. Atsiras nauji tinklai, kurie leis importuoti daugiau elektros energijos. Tačiau importą reikia mažinti, o šiame kontekste pastatyti Lietuvoje galingą elektros energijos generatorių

Analizuojant pasiūlos ir paklausos aspektus prognozuojama:

- Pastačius elektros jungtis elektros rinkoje kaina pakils iki 50-70 eurų/MWh. Prie tokio dydžio kainų, planuojama Visagino atominė elektrinė atrodo labai solidžiai.
- Pasiūlos trūkumas bus jaučiamas ir pastačius naują Visagino atominę elektrinę, tad galima tikėtis, kad elektros energija bus supirkta efektyviai.

Veikianti Ignalinos atominė elektrinė tenkindavo 70 proc. Lietuvos regiono ir 30 proc. kaimyninių regionų elektros energijos poreikio.

Visos trys Baltijos šalys elektrą gamina skirtingais būdais. Lietuvoje dauguma elektros energijos pagaminama šiluminėse elektrinėse, naudojančiose gamtines dujas, Latvijoje yra daug hidroelektrinių, o Estijos rinkoje dominuoja elektros gamyba iš skalūnų. Pasiskirstymas parodytas 3.3 lentelėje.

**3.3 lentelė.** Elektrinės Baltijos šalyse.

<b>Rinka</b>	<b>Šiluminės elektrinės</b>	<b>Hidroenergija</b>	<b>Kita</b>	<b>Įrengti pajėgumai (GW)</b>
Baltijos šalys	74,7 %	21,6 %	3,7 %	8,9
Estija	96,7 %	0,3 %	3,0 %	2,7
Latvija	34,7 %	63,2 %	2,1 %	2,4
Lietuva	67,8 %	24,9 %	7,2 %	3,8

Uždarius Ignalinos atominę elektrinę, galingiausias elektros energijos generatorius, kuris pagamina bazinę energiją yra Lietuvos elektrinė. Jos instaliuota galia siekia 1800 MW. Nors tai labai galingas objektas, bet jo įranga yra pasenusi ir neekonomiška. Šiuo metu yra pastatytas naujas 450 MW galios kombinuoto ciklo dujų turbinos blokas. Kitos elektrinės Lietuvoje yra gerokai mažesnių pajėgumų.

Elektros energijos gamybos pajėgumų plėtra Lietuvoje iki 2020 m.:

- naujas 450 MW galios blokas Lietuvos elektrinėje;
- naujas 250 MW galios blokas Kruonio HAE;
- nauja 1 350 MW galios Visagino AE;
- iki 500 MW galios vėjo jėgainės.

Matyti iš 3.4 lentelės, kad elektros gamyba uždarius Ignalinos atominę elektrinę sumažėjo beveik tris kartus. Po atominės elektrinės uždarymo 2010 metais Lietuvos elektrinė padidino savo apimtį du kartus. Prasidėjo atsinaujinančių energijos šaltinių statybos. Blogiausias rodiklis šioje lentelėje yra importas, jis padidėjo 8 kartus.

**3.4 lentelė.** Elektros gamyba 2009, 2010, 2011 m.

<b>Balansas, TWh</b>	<b>2009 m.</b>	<b>2010 m.</b>	<b>2011 m.</b>
<b>Elektros energijos gamyba</b>	<b>15,32</b>	<b>5,70</b>	<b>4,77</b>
Ignalinos AE	10,85	0,00	0,00
Lietuvos elektrinė	0,96	2,02	1,19
Vilniaus elektrinė (TEC2 + TEC3)	0,63	0,77	0,55
Kauno elektrinė	0,63	0,50	0,43
Mažeikių elektrinė	0,21	0,14	0,14
Klaipėdos elektrinė	0,02	0,02	0,02
Panevėžio elektrinė	0,19	0,18	0,20
Kauno hidroelektrinė	0,35	0,45	0,39
Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė	0,71	0,76	0,57
Mažosios hidroelektrinės	0,07	0,09	0,09
Kitos elektrinės	0,43	0,40	0,48
Vėjo elektrinės	0,16	0,22	0,47
Biomasės elektrinės	0,11	0,15	0,24
Saulės elektrinės		0,00	0,00
Elektrinių savos reikmės	1,20	0,37	0,32
<b>Pateikta į tinklą</b>	<b>14,12</b>	<b>5,33</b>	<b>4,46</b>
Kruonio HAE užkrovimas	1,01	1,04	0,80
<b>Eksportas</b>	<b>3,61</b>	<b>1,14</b>	<b>1,97</b>
<b>Importas</b>	<b>0,68</b>	<b>7,13</b>	<b>8,71</b>
<b>Elektros poreikiai</b>	<b>10,18</b>	<b>10,28</b>	<b>10,40</b>
Elektros tinklų nuostoliai	0,97	0,99	0,87
Elektros tinklų savos reikmės	0,05	0,07	0,07
<b>Galutinis suvartojimas</b>	<b>9,16</b>	<b>9,22</b>	<b>9,46</b>
Pramonė	2,65	3,07	3,61
Transportas	0,07	0,08	0,10
Žemės ūkis	0,16	0,17	0,21
Gyventojai	2,75	2,59	2,62
Įmonės ir kiti vartotojai	3,53	3,30	2,93

## 4. ŠILUMINIS ABWR 1350 SKAIČIAVIMAS

### 4.1 ABWR 1350

ABWR 1350 duomenys:

Lėtiklis – lengvasis vanduo

Vidutinė vandens temperatūra

$$\bar{t}_{\text{H}_2\text{O}} = 235,6^{\circ}\text{C}.$$

Vandens slėgis

$$p = 7,17\text{MPa}.$$

Vidutinis vandens tankis

$$\bar{\gamma}_{\text{H}_2\text{O}} = 831,72\text{kg/m}^3.$$

Įeinančio vandens temperatūra

$$t_{iej.} = 215,6^{\circ}\text{C}.$$

Išeinančio vandens temperatūra

$$t_{isej.} = 255,6^{\circ}\text{C}.$$

Šilumnešis - vanduo.

Šiluminiai elementai – strypo pavidalo, su išoriniu aušinimu (4.2 pav.). Išmatavimai [13]:

$$r_1 = 0,5132\text{ cm}.$$

$$r_2 = 0,5432\text{ cm}.$$

$$r_3 = 0,5592\text{ cm}.$$

Šiluminių elementų storis

$$\delta'' = 0,06\text{cm}.$$

Kiekvienoje kasetėje (rinklėje) yra kuro elementų

$$n = 92$$

Reaktoriaus kasečių kiekis

$$n' = 872$$

Šiluminiai elementai kasetėje

sudaro keturkampę gardelę, kurios žingsnis

$$a'' = 1,8\text{cm}.$$

Kasetės plotis

$$a' = 14,00\text{cm}.$$

Kasetės apvalkalo storis

$$\delta = 0,25\text{cm}.$$

Kasetės žingsnis

$$a = 14,90\text{cm}.$$

Tarpkasetinio tarpelio plotis

$$\delta = 0,9\text{cm}.$$

Kasečių bei šiluminių elementų apvalkalų medžiaga – cirkalojus - 2 (cirkonis su 1,0% niobio priemaiša).

Branduolinis kuras – urano dioksidas

Prisodrinimo laipsnis

$$x = 3,5\%.$$

Urano dioksido tankis

$$\gamma_{\text{UO}_2} = 10,9\text{ g/cm}^3.$$

Bendra reaktoriaus charakteristika

Šiluminė galia

$$N = 3926\text{ MW}.$$

Reaktorius – cilindro formos, aukščio

ir skersmens santykis

$$m = 0,7115 \text{ m.}$$

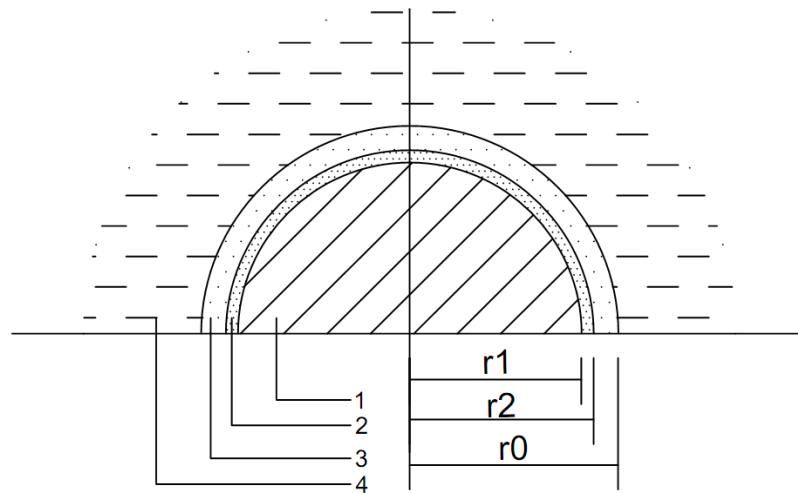
Vidutinis šiluminis srautas

šiluminių elementų paviršiuje

$$\bar{q} = 0,0335 \text{ MW/m}^2.$$

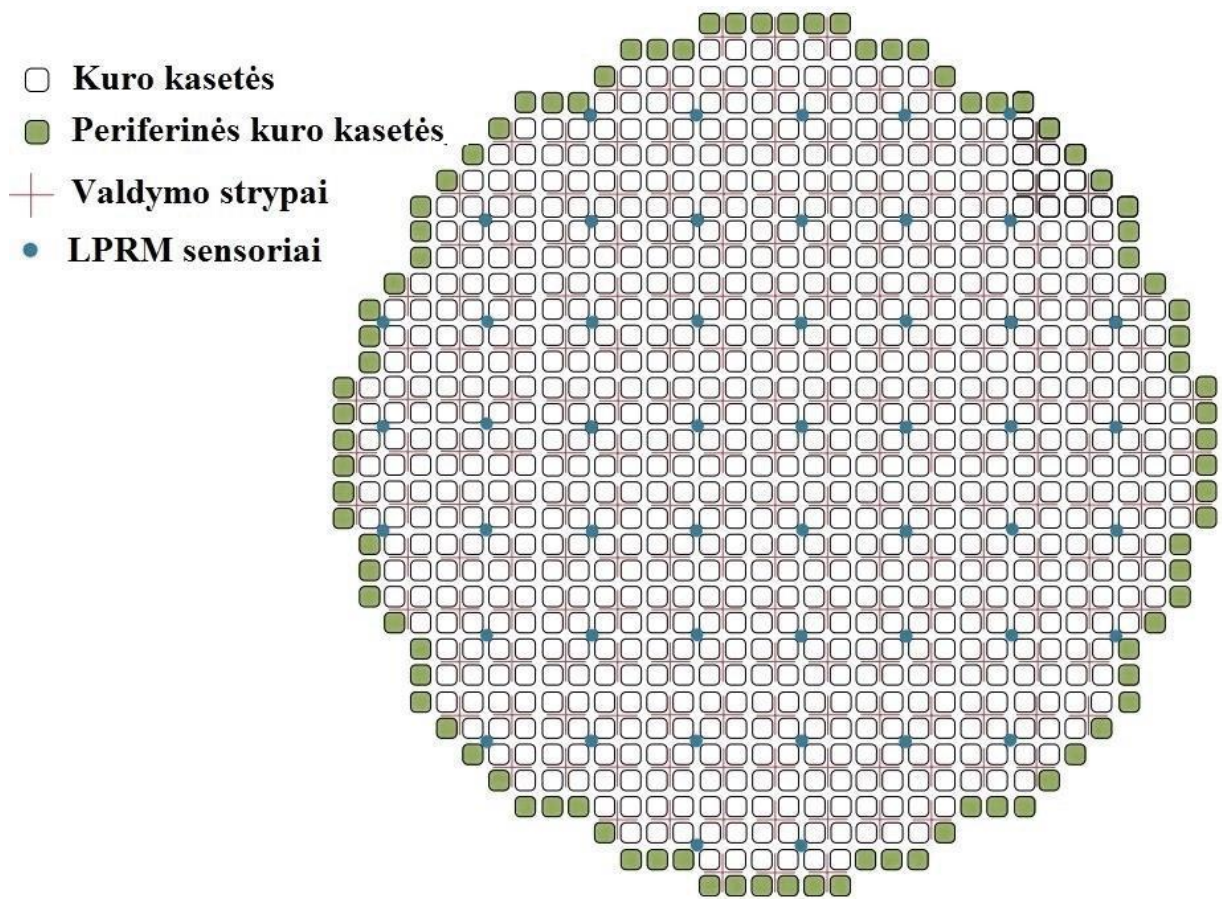


4.1 pav. ABWR kuro kasetės pjūvis.



4.2 pav. Šiluminio elemento pjūvis (ABWR tipo). 1-branduolinis kuras ( $\text{UO}_2$ ); 2- kontaktinis sluoksnis; 3- apvalkalas; 4- šilumnešis;





4.3 pav. ABWR rinklė.

## 4.2 Preliminarus šiluminis skaičiavimas

Apskaičiuoju vidutinį energetinį aktyviosios zonos tūrio apkrovimą.

Tuo tikslu surandu kasetės pjūvio plotą,  $\text{cm}^2$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= a^2, \\
 V_0 &= 14^2 = 203,06
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Apskaičiuoju vieno šiluminio elemento (ŠIEL'o) šilumą išskiriančio paviršiaus perimetrą, cm

$$\begin{aligned}
 \pi_0 &= 2\pi \cdot r_q, \\
 \pi_0 &= 2 \cdot \pi \cdot 0,5592 = 3,5136.
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Surandu vidutinę energetinę aktyviosios zonos tūrio vieneto apkrovą,  $\text{MW}/\text{m}^3$

$$\bar{N}_0 = \frac{\bar{q} \cdot \pi_0 \cdot n}{V_0},$$

$$\bar{N}_0 = \frac{0,0335 \cdot 3,5136 \cdot 10^{-2} \cdot 872}{203,06 \cdot 10^{-4}} = 50,6$$
(4.3)

kur:  $n'$  – ŠIEL'ų skaičius kasetėje,  $\bar{q}$  - vidut. šilumos srautas, tenkantis šiluminių elementų paviršiaus ploto vienetui (paimtas pagal prototipo duomenis).

Priimu koeficiento, įvertinančio aktyviosios zonos tūrio padidėjimą dėl valdymo ir matavimo strypų, reikšmę  $\eta = 1.05$  ir apskaičiuoju aktyviosios zonos tūrį,  $m^3$

$$V_{a.z.} = \frac{N}{\bar{N}_0} \cdot \eta,$$

$$V_{a.z.} = \frac{3926}{50,6} \cdot 1,05 = 81,557$$
(4.4)

Surandu aktyviosios zonos skersmenį, m

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.z.}}{\pi \cdot m}},$$

$$D = 5,265.$$
(4.5)

Aktyviosios zonos aukštis, m

$$H = m \cdot D,$$

$$H = 3,746$$
(4.6)

Apskaičiuoju šilumnešio greitį erdvėje tarp ŠIEL'ų. Tuo tikslu surandu šilumnešio užimtą kasetės pjūvio plotą, tenkanti vienam ŠIEL'ui,  $cm^2$

$$f_0 = \frac{(a' - 2\delta)^2 - n \cdot \pi \cdot r_q^2 - n' \cdot \pi \cdot r_q^2}{n},$$

$$f_0 = \frac{(14,0 - 0,25 \cdot 2)^2 - 872 \cdot \pi \cdot 0,5592^2 - 92 \cdot \pi \cdot 0,5592^2}{872} = 0,877.$$
(4.7)

Šilumnešio entalpijų skirtumas išėjime ir įėjime [5],  $kJ/(kg \cdot K)$

$$\Delta i = c_p (t_{isej.} - t_{iej.}),$$

$$\Delta i = 4,69(255,6 - 215,6) = 187,508.$$
(4.8)

Priimu radialinio šilumos išsiskyrimo netolygumo koeficientą  $k_r \approx 2.0$ .

Maksimalus šilumnešio greitis viduriniame reaktoriaus pjūvyje, m/s

$$w = \frac{\bar{q} \cdot \pi_0 \cdot H \cdot k_r}{k_r \cdot f_0 \cdot \bar{\gamma}_{H_2O} \cdot \Delta i}, \quad (4.9)$$

$$w = \frac{0,0335 \cdot 10^6 \cdot 3,5136 \cdot 10^{-2} \cdot 5,265 \cdot 2,0}{2,0 \cdot 0,877 \cdot 10^{-4} \cdot 823,5685 \cdot 187,508 \cdot 10^3} = 0,458$$

Apskaičiavęs maksimalų šilumnešio greitį, gavau  $w = 0,458$  m/s. Neviršijamas saugus 10 m/s greitis, kuris pasitaiko labai retais ir išskirtiniais atvejais.

## 5. FIZIKINIS – NEUTRONINIS ABWR 1350 SKAIČIAVIMAS

Surandu aktyviosios zonos fizikines charakteristikas

Apskaičiuoju aktyviają zoną sudarančių medžiagų tūrius  $V_i$ , tenkančius 1 kasetės ilgio centimetrui.

Kuro (urano dioksido) tūris,  $\text{cm}^2$

$$V_{UO_2} = \pi \cdot r_1^2 \cdot n, \quad (5.1)$$

$$V_{UO_2} = \pi \cdot 0,5132^2 \cdot 872 = 721,51$$

ŠIEL'ų apvaskalų tūris,  $\text{cm}^2$

$$V'_{Zr+Sn} = \pi(r_q^2 - r_2^2) \cdot n, \quad (5.2)$$

$$V'_{Zr+Sn} = \pi(0,5592^2 - 0,5132^2) \cdot 872 = 135,139.$$

Kasetės apvaskalo tūris,  $\text{cm}^2$

$$V''_{Zr+Sn} = [a^2 - (a' - 2\delta)^2], \quad (5.3)$$

$$V''_{Zr+Sn} = [14,00^2 - (14,00 - 2 \cdot 0,25)^2] = 13,75.$$

Bendras cirkonio ir alavo lydinio tūris,  $\text{cm}^2$

$$V_{Zr+Sn} = V'_{Zr+Sn} + V''_{Zr+Sn}, \quad (5.4)$$

$$V_{Zr+Sn} = 135,139 + 13,75 = 148,889.$$

Vandens tūris kasetėje,  $\text{cm}^2$

$$\begin{aligned} V'_{H_2O} &= (a' - 2\delta)^2 \cdot n \cdot \pi \cdot r_q^2, \\ V'_{H_2O} &= (14,00 - 2 \cdot 0,25)^2 - 92 \cdot \pi \cdot 0,5592^2 = 153,481. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Vandens tūris tarpelyje tarp kasečių,  $\text{cm}^2$

$$\begin{aligned} V''_{H_2O} &= (a^2 - a'^2), \\ V''_{H_2O} &= (14,90^2 - 14,00^2) = 26,01. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Bendras vandens tūris,  $\text{cm}^2$

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= V'_{H_2O} + V''_{H_2O}, \\ V_{H_2O} &= 153,481 + 26,01 = 179,41. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Surandu medžiagų branduolines koncentracijas:

vandeniui, kurio  $\bar{\gamma}_{H_2O} = 0,82356 \text{g/cm}^3$ , randu  $\rho_{H_2O} = 0,0284 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}$

urano dioksidui, kurio  $\bar{\lambda}_{UO_2} = 10,9 \text{g/cm}^3$ , randu  $\rho_{UO_2} = 0,0243 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}$

deguoniui, kurio  $\bar{\lambda}_O = 1,14 \text{g/cm}^3$ , randu  $\rho_O = 0,0429 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}$

$$\text{uranui, kurio } \bar{\lambda}_U = 18,0 \text{g/cm}^3 \quad \rho_U = 0,0456 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}. \quad (5.8)$$

Įvertindamas prisodrinimo laipsnį  $\chi$ , surandu abiejų urano izotopų branduolinius tankius

$$\begin{aligned} \rho_{U_{235}} &= \rho_U \cdot \frac{\chi}{100}, \\ \rho_{U_{235}} &= 0,0401 \cdot 10^{24} \cdot \frac{3,5}{100} = 0,00141 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}, \\ \rho_{U_{238}} &= \rho_U \left(1 - \frac{\chi}{100}\right), \\ \rho_{U_{238}} &= 0,0401 \cdot 10^{24} \left(1 - \frac{3,5}{100}\right) = 0,0387 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Įvertindamas cirkonio ir alavo lydinį, surandu abiejų medžiagų branduolinius tankius

$$\rho_{Sn} = \rho_U \cdot \frac{\chi}{100},$$

$$\rho_{Sn} = 0,0248 \cdot 10^{24} \cdot \frac{1,5}{100} = 0,000372 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}.$$

$$\rho_{Zr} = \rho_U \left(1 - \frac{\chi}{100}\right),$$

$$\rho_{Zr} = 0,0248 \cdot 10^{24} \left(1 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,024428 \cdot 10^{24} \frac{\text{branduol.}}{\text{cm}^3}.$$
(5.10)

Skaičiavimo rezultatus pateikiu lentelės pavidalu (5.1 lentelė)

**5.1 lentelė.** Skaičiavimo rezultatai.

Medžiaga	V, cm <sup>2</sup>	$\rho, 10^{24}$ brand./cm <sup>3</sup>	$\sigma_a$ , (0,025), barnai	$\delta_s$ , barnai	$\xi$	$\xi \cdot \sigma_s$ , barnai	V · $\rho$ · $\sigma_a$ , cm	V · $\rho$ · $\xi$ · $\sigma_s$ , cm
U <sup>235</sup>	721,506	0,0016	494,0	10,0	-	-	568,8523	-
U <sup>238</sup>	721,506	0,04400	5,71	8,3	-	-	181,2875	-
O	721,506	0,04291	0,003	4,8	0,158	0,456	0,10525	16,000
Zr	184,3319	0,02443	0,0335	6,2	0,021	0,135	47,41	5,53
Sn	2,80709	0,00037	0,0335	-	-	0,135	0,72	0,08
H <sub>2</sub> O	179,410	0,0293	6,66	-	8,000	42,500	35,02397	223,50
Suma:							833,399	245,11

Surandu makroskopinius pjūvius, būtinus neutroninių dujų temperatūros apskaičiavimui. Pasinaudodamas 5.1 lentelės dujiniais, randu:

šiluminių neutronų makroskopinį absorbcijos pjūvį, cm<sup>-1</sup>

$$\sum_a(0,025) = \frac{1}{V_0} \sum_i (V \cdot \rho \cdot \sigma_a)_i,$$

$$\sum_a(0,025) = \frac{1}{203,0625} \cdot 833,399 = 4,104.$$
(5.11)

lėtinimo gebą, cm<sup>-1</sup>

$$\xi \cdot \sum_s = \frac{1}{V_0} \sum_i (V \cdot \rho \cdot \xi \cdot \sigma_s)_i, \quad (5.12)$$

$$\xi \cdot \sum_s = \frac{1}{203,0625} \cdot 245,11 = 1,207$$

Vidutinė lėtiklio temperatūra [6], K

$$T_0 = \bar{t}_{H_2O} + 273,15, \quad (5.13)$$

$$T_0 = 235,6 + 273,15 = 508,75,$$

Makroskopinis absorbcijos pjūvis, esant  $T_0$  lėtiklio temperatūrai,  $\text{cm}^{-1}$

$$\sum_a (kT_0) \approx \sum_a (0,025) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_0}}, \quad (5.14)$$

$$\sum_a (kT_0) \approx 7,5505 \cdot \sqrt{\frac{293}{508,75}} \approx 5,73.$$

Neutroninių dujų temperatūra, K

$$T_n = T_0 \left[ 1 + 1,4 \frac{\sum_a (kT_0)}{\xi \sum_s} \right] \quad (5.15)$$

$$T_n = 508,75 \left[ 1 + 1,4 \frac{5,73}{1,207} \right] = 3890,02.$$

Kitų elementų suvienodinti pjūviai apskaičiuojami dydžius  $\sigma_a(0,025)$  padauginus iš koeficiento

$$S = 0,886 \sqrt{\frac{293}{T_n}} \cdot F(\chi_{rib.}), \quad (5.16)$$

$$S = 0,886 \sqrt{\frac{293}{3890,02}} \cdot 0,954 = 0,232$$

Makroskopinius pjūvius energijų intervalui ( $E_{rib.} - E_T$ ) apskaičiuoju įvertindamas 5.2 lentelės davinius pagal formulę, cm

$$\sum_a(E_{rib.}, E_T) = \frac{1}{V_0} \{S[(V \cdot \rho \cdot \sigma_a)_{238} + (V \cdot \rho \cdot \sigma_a)_{Zr+Sn} + (V \cdot \rho \cdot \sigma_a)_{H2O}] + (V \cdot \rho \cdot \bar{\sigma}_a)_{235}\},$$

$$\sum_a(E_{rib.}, E_T) = \frac{1}{203,0625} \{0,232 \cdot [181,2875 + 48,13 + 35,02397] + 568,8523\} = 3,104$$
(5.17)

Surandu santykį

$$\frac{\sum_a(E_{rib.}, E_T)}{\xi \sum_s} = f(\chi_{rib}),$$

$$\frac{3,104}{1,207} = 2,571.$$
(5.18)

Apskaičiuotoms  $T_n$  ir  $\chi_{rib.}$  reikšmėms surandu suvienodintus mikroskopinius pjūvius, barnai

$$\sigma_a^{235} = 133,15 \cdot \sigma_f^{235} = 111,851$$

$$\sigma_a^{238} = \sigma_a^{238}(0,025) \cdot S = 5,71 \cdot 0,232 = 1,325,$$

$$\sigma_a^{Zr} = \sigma_a^{Zr}(0,025) \cdot S = 0,0035 \cdot 0,232 = 0,0008,$$

$$\sigma_a^{H2O} = \sigma_a^{H2O}(0,025) \cdot S = 6,66 \cdot 0,232 = 1,545.$$
(5.19)

Suvienodintus transportinius pjūvius šiluminiams neutronams apskaičiuojame pagal formulę

$$\bar{\sigma}_{tr}^i = \sigma_a^i + \sigma_s^i(1 - \bar{\mu}_i) \text{ barnai.}$$
(5.20)

$$\bar{\mu}_i = \frac{2}{3A_i}.$$
(5.21)

Vandeniui

$$\bar{\sigma}_{tr}^{H_2O} = 69 \sqrt{\frac{293}{T_n}} \text{ barnai.} \quad (5.22)$$

Skaičiavimų rezultatus surašau i lentelę(5.2 lentelė).

**5.2 lentelė.** Skaičiavimo rezultatai.

Medžiaga	V, cm <sup>2</sup>	$\rho, 10^{24}$ brand./cm <sup>3</sup>	$\bar{\sigma}_a$ , barnai	$\bar{\sigma}_{tr}$ , barnai	$\sigma_{tr}$ , barnai	V $\rho\bar{\sigma}_a$ , cm	V $\rho\bar{\sigma}_{tr}$ , cm	V $\rho\sigma_{tr}$ , cm
U <sup>235</sup>	721,506	0,00160	133,1516	503,972	9,97	153,327	580,33	11,48
U <sup>238</sup>	721,506	0,04400	1,5391	13,987	8,28	48,8638	444,07	262,88
O	721,506	0,04862	0,002	4,603	0,456	0,06929	161,49	16,00
Zr	184,332	0,02447	0,124	6,13017	0,135	0,55936	202,67	5,53
Sn	2,807	0,02484	0,124	6,15083	0,135	0,00013	0,72	2,36
H <sub>2</sub> O	179,410	0,02931	0,15833	18,6747	42,5	0,83263	98,21	223,50
Suma:						203,652	1487,49	521,75

Kadangi šiluminių elementų skersmuo mažas, be to, kasetėje jie sudaro kompaktišką gardelę, tai mikroskopiniai neutronų srauto netolygumai šiluminių neutronų srityje bus nežymūs, todėl visas suvienodintas aktyviosios zonos charakteristikas (išskyrus tikimybę išvengti rezonansinio pagavimo) galima apskaičiuoti paprastos homogenizacijos metodu.

Aktyviosios zonos makroskopinis absorbcijos pjūvis,  $cm^{-1}$

$$\sum_a = \frac{1}{V_0} \sum (V \cdot \rho \cdot \bar{\sigma}_a)_i, \quad (5.23)$$

$$\sum_a = \frac{1}{203,0625} \cdot 203,652 = 1,003.$$

Makroskopinis transportinis pjūvis,  $cm^{-1}$



$$\begin{aligned}\sum_{tr} &= \frac{1}{V_0} \sum_i (V \cdot \rho \cdot \bar{\sigma}_{tr})_i, \\ \sum_{tr} &= \frac{1}{203,0625} \cdot 1487,49 = 7,325. \\ \sum_{tr}(1eV) &= \frac{1}{V_0} \sum_i (V \cdot \rho \cdot \sigma_{tr})_i, \\ \sum_{tr}(1eV) &= \frac{1}{203,0625} \cdot 521,75 = 2,569.\end{aligned}\tag{5.24}$$

Neutronų, kurių energija didesnė negu šiluminė, difuzijos koeficientas, cm

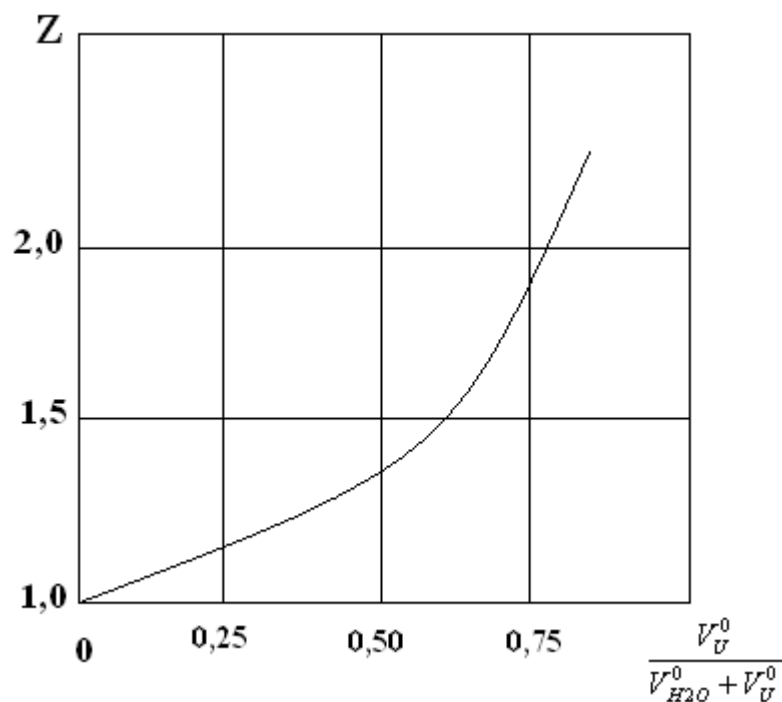
$$\begin{aligned}D_1 &= \frac{1}{3 \sum_{tr}(1eV)}, \\ D_1 &= \frac{1}{3 \cdot 2,569} = 0,1298\end{aligned}\tag{5.25}$$

Šiluminės energijos neutronų difuzijos koeficientas, cm

$$\begin{aligned}D_2 &= \frac{1}{3 \sum_{tr}}, \\ D_2 &= \frac{1}{3 \cdot 7,325} = 0,0455.\end{aligned}\tag{5.26}$$

Difuzijos kelio ilgio kvadratas, cm<sup>2</sup>

$$\begin{aligned}L^2 &= \frac{D_2}{\sum_a}, \\ L^2 &= \frac{0,0455}{1,003} = 0,0454\end{aligned}\tag{5.27}$$



5.1 pav. Parametro Z radimas.

Lėtėjimo kelio ilgio kvadratą  $\tau$  randu iš 5.1 pav. Perskaičiuoju urano ir vandens tūrius normaliems branduoliniams tankiams,  $\text{cm}^2$

$$\begin{aligned}
 V_U^0 &= V_U \cdot \frac{\rho_U}{\rho_U^0}, \\
 V_U^0 &= 721,506 \cdot \frac{0,00160}{0,0456} = 25,316. \\
 V_{H_2O}^0 &= V_{H_2O} \cdot \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O}^0}, \\
 V_{H_2O}^0 &= 179,410 \cdot \frac{0,02931}{0,0334} = 157,440.
 \end{aligned}
 \tag{5.28}$$

čia:  $\rho_U^0 = 0,0456 \text{ brand./cm}^3$  - branduolinis urano tankis normaliomis sąlygomis;

$\rho_{H_2O}^0 = 0,0334 \text{ brand./cm}^3$  - branduolinis vandens tankis normaliomis sąlygomis;

Cirkonio ir deguonies ( $\text{UO}_2$  sudėtyje) įtaką patogiausia įvertinti pakeitus juos “ekvivalentiniu“ urano tūriu  $\Delta V_U^0$ , priimant branduolinių tankių bei išsklaidymo pjūvių skirtumus,  $\text{cm}^2$

$$\Delta V_U^0 = \frac{V_{Zr+Sn} \cdot \rho_{Zr+Sn} \cdot \sigma_{tr.}^{Zr+Sn} + V_0 \cdot \sigma_0 \cdot \sigma_{tr.}^o}{\rho_U^0 \cdot \sigma_{tr.}^U}, \quad (5.29)$$

$$\Delta V_U^0 = \frac{148,889 \cdot 0,0248 \cdot 0,27 + 721,506 \cdot 0,0486 \cdot 0,456}{0,044 \cdot 8,28} = 46,626.$$

Apskaičiuoju funkcijos  $Z\left(\frac{V_U^0 + \Delta V_U^0}{V_U^0 + \Delta V_U^0 + V_{H_2O}^0}\right)$  argumentą  $\frac{V_U^0 + \Delta V_U^0}{V_U^0 + \Delta V_U^0 + V_{H_2O}^0}$  ir iš 5.1 pav. surandu funkcijos Z reikšmę.

$$\frac{V_U^0 + \Delta V_U^0}{V_U^0 + \Delta V_U^0 + V_{H_2O}^0} = \frac{25,316 + 46,626}{25,316 + 46,626 + 157,440} \approx 0,313. \quad (5.30)$$

$$Z \approx 1,28$$

Tada lėtėjimo kelio ilgio kvadratas,  $\text{cm}^2$

$$\tau = \tau_{H_2O} \frac{Z \cdot V_0^2}{(V_{H_2O}^0 + V_U^0 + \Delta V_U^0)^2}, \quad (5.31)$$

$$\tau = 31,0 \frac{1,28 \cdot 203,0625^2}{(157,44 + 25,316 + 46,626)^2} = 31,0966.$$

kur:  $\tau_{H_2O} = 31,0 \text{cm}^2$  lėtėjimo kelio ilgio kvadratas vandenyje esant normaliam branduoliniam tankiui.

Randu begalinės terpės neutronų dauginimo koeficientą.

Begalinės terpės neutronų dauginimo koeficientą apskaičiuoju pagal keturių dauginamųjų formulę

$$k_\infty = \theta \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi; \quad (5.32)$$

Šiluminio išnaudojimo koeficientą  $\theta$  apskaičiuoju pagal formulę

$$\theta = \frac{(V \cdot \rho \cdot \bar{\sigma}_a)_{235}}{\sum_i (V \cdot \rho \cdot \bar{\sigma}_a)_i},$$

$$\theta = \frac{153,327}{203,652} = 0,753. \quad (5.33)$$

Neutronų padaugėjimo dėl šiluminių neutronų įtakos koeficientą  $\eta$  apskaičiuoju pagal formulę

$$\eta = \frac{\bar{\sigma}_f^{235}}{\bar{\sigma}_a^{235}} \cdot \nu^{235},$$

$$\eta = 2.47 \frac{111,851}{133,156} = 2,075. \quad (5.34)$$

Neutronų padaugėjimo dėl greitųjų neutronų įtakos koeficientą  $\varepsilon$  apskaičiuoju pagal formulę

$$\varepsilon = 1 + 0,19 \frac{V_U^0}{V_U^0 + V_{H_2O}^0},$$

$$\varepsilon = 1 + 0,19 \frac{721,506}{721,506 + 157,440} = 1,056. \quad (5.35)$$

Šioje formulėje visiškai neįvertinu cirkonio ir deguonies įtakos, kadangi jų geba lėtinti, lyginant su vandens geba lėtinti, yra nežymus, be to jie neskyla.

Apskaičiuoju tikimybę išvengti rezonansinio pagavimo  $\varphi$ .

$$-\ln \varphi = \frac{\lambda_s \cdot k_T \cdot r^{3/2} + 0.73r^2}{\xi \cdot S}. \quad (5.36)$$

$$\lambda_{s_{H_2O}} = \frac{1}{1,541} = 0,648\text{cm.}$$

$$\xi_{H_2O} = 0,92.$$

(5.37)

$$\frac{\lambda_s}{\xi} = 0,65\text{cm.}$$

čia:  $k_T$  – daugiklis, įvertinantis rezonansinės absorbcijos priklausomybę nuo urano temperatūros;  $S$  – lėtiklio pjūvio plotas gardelėje,  $\text{cm}^2$ .

$$T_U = 529,75\text{K (priimu } T_U > T_n),$$

(5.38)

$$k_T = 0,775(1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0.5}),$$

$$k_T = 1,087$$

(5.39)

Gardelės plotas  $S = 0,8274\text{cm}^2$ ;  $r_1 = 0,5132\text{cm}$ ;

$$-\ln \varphi = 0,65 \cdot \frac{1,087 \cdot 0,51^{1.5} + 0,73 \cdot 0,51^2}{0,8274} = 0,4602,$$

$$-\ln \varphi = 0,4602$$

$$\varphi = 0,776.$$

(5.40)

Begalinės terpės neutronų dauginimo koeficientas

$$k_{\infty} = 0,753 \cdot 2,075 \cdot 1,056 \cdot 0,776 = 1,28$$

(5.41)

Apskaičiuoti begalinės terpės neutronų daugėjimo koeficientą – tai parinkti tokios sudėties aktyviają zoną, kad  $k_{\infty}$  turėtų tinkamiausią reikšmę esamomis reaktoriaus konstravimo sąlygomis, t.y., esant tam tikram branduoliniam kurui, lėtikliui, konstrukcinėms medžiagoms ir t.t. Parinkus aktyviosios zonos sudėtį, reikia sukurti tokį tūrį, kad neutronų nuostolis, tenkantis kiekvienam kuro pagautam šiluminiam neutronui, tenkintų lygtį  $(k_{\infty} - 1) \geq 0$ .

Šią sąlygą tenkinantys aktyviosios zonos matmenys vadinami kritiniais matmenimis. Kartais kalbama apie reaktoriaus “kritinę masę“, tačiau ta sąvoka ne visai teisinga, kadangi reaktoriaus kritiškumui turi įtakos ne tik aktyviosios zonos tūris, bet ir jos geometrinė forma bei matmenų santykis.

Paprastai reaktoriaus aktyvioji zona projektuojama virškritinė, t.y. jos matmenys projektuojami šiek tiek didesni už kritinius. Dėl šios priežasties neutronų nuostolis, tenkantis kiekvienam šiluminiam neutronui, absorbuotam branduolinio kuro, bus mažesnis negu  $(k_{\infty} - 1)$ , o efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas  $k_{ef} \geq 0$  [2]. Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k_{ef} = k_{\infty} \cdot p_f \cdot p_t, \quad (5.42)$$

čia:  $p_f$  - tikimybė, kad greitieji neutronai išvengs nuotėkio;  $p_t$  - tikimybė, kad šiluminiai neutronai išvengs nuotėkio.

Tikimybės  $(1 - p_f)ir(1 - p_t)$  reiškia santykinius greitųjų ir šiluminių neutronų nuotėkius. Aišku, kad tiek  $p_f$ , tiek  $p_t$  turi didėti didėjant aktyviosios zonos tūriui, o taip pat ir taip keičiant zonos formą, kad mažėtų zonos paviršiaus ir tūrio santykis. Vadinasi, formulėse, skirtose  $p_f$  ir  $p_t$  apskaičiuoti, turi būti ne tik tūrio, bet ir formos įtaką. Geometrinis parametras paprastai žymimas  $B_g^2$  ir yra neutronų srauto  $\phi$  bet kuriame kritinio reaktoriaus taške kreivumo matas, priklausantis nuo aktyviosios zonos geometrijos. Šis parametras skirtingos formos kūnams išreiškiamas skirtingai.

Kadangi aktyvioji zona yra cilindro formos tai skaičiuoju cilindriui, kurio spindulys R ir aukštis H. Tokiu atveju difuzijos lygtis atrodytų taip

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + B_g^2 \phi = 0, \quad (5.43)$$

iš kur

$$\phi = A \cos \frac{\pi z}{H} J_0 \left( \frac{2,405r}{R} \right). \quad (5.44)$$

Ribinės sąlygos:  $\phi_{max}$  - centre, kai  $r = 0$ ; kai  $z = \frac{H}{2}$ , tai  $\phi = 0$ .

Tada geometrinis parametras

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R}\right)^2,$$

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{374,6}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{\frac{5,265}{2}}\right)^2 = 0,0001538 \quad (5.45)$$

Žinodamas dydžius  $B^2, \tau, L^2$ , galiu apskaičiuoti tikimybę išvengti nuotėkio greitųjų neutronų lėtėjimo metu

$$p_f = e^{-B^2 \tau},$$

$$p_f = e^{-0,0001538 \cdot 1,0} = 0,952322 \quad (5.46)$$

Tikimybė išvengti šiluminių neutronų nuotėkio

$$p_t = \frac{1}{1 + B^2 \cdot L^2},$$

$$p_t = \frac{1}{1 + (0,0001538)^2 \cdot (0,0002715)^2} = 0,99999. \quad (5.47)$$

Apskaičiuoju efektyvųjį neutronų daugėjimo koeficientą

$$k_{ef} = 1,28 \cdot 0,952322 \cdot 0,99999 = 1,219.$$

Reaktyvumo atsarga

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1,0}{k_{ef}} = \frac{1,219 - 1,0}{1,219} = 0,18. \quad (5.48)$$

## 6. PER KAMPANIJOS LAIKĄ SUSIDARIUSIO PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO KIEKIS

Skaičiuosime kiek atliekų susidaro sodrinant branduolinį kurą, kurį naudosime ABWR.

### Duomenys:

UO <sub>2</sub> tankis	10500 kg/m <sup>3</sup>
Kuro strypų skaičius rinklėje	92
Rinklių skaičius	872
Įsodrinimo laipsnis	3,5 %
Lengvojo urano izotopo koncentracija gamtiniame urane	0,711%
Urano U <sup>235</sup> koncentracija atliekose	0.2%
Medžiagų balanso lygtis:	

$$F=P+W; \quad (6.1)$$

F – tiekimas;

P – Įsodrintas produktas;

W – atliekinis produktas.

$$F_{Co}=Px+Wy; \quad (6.2)$$

Co – lengvojo urano izotopo koncentracija gamtiniame urane;

x – koncentracija įsodrintame urane;

y – urano koncentracija atliekose.

Tarę, kad P=1 kg, o vietoje nežinomojo W irasę W=F-P, gausime išraišką, kuria apskaičiuojamas gamtinio urano panaudojimo koeficientas, kg gamtinio urano/kg įsodrintojo urano:

$$f_0=F/P=(x-y)/(c_0-y)=(3.5-0.2)/(0.711-0.2)=6.46; \quad (6.3)$$

$$W=F-P=6.46-1=5.46 \quad (6.4)$$

Norint pasigaminti 1000 kg urano 235 įsodrinto iki 3.5% reikia 6460 kg gamtinio urano į atliekas kelias 5460 kg.

ABWR vienas pilnas kuro užkrovimas:

ABR kuro tabletės skersmuo 0,01026 m.

ABWR kuro tabletės aukštis 2,3 m.



$$V=\pi*0.005132*2.3=0.00019006 \text{ m}^3; \quad (6.5)$$

$$m=0.00019006*92*872*10500=160,097 \text{ t}. \quad (6.6)$$

Vienam pilnam reaktoriaus užkrovimui, kuris būna paleidžiant naują reaktorių reikalinga 160,097 t UO<sub>2</sub> įsodrinto iki 3,5%. Tokios reaktoriaus sąnaudos per vieną ciklą, tai yra per 2 metus.

Per visą savo 60 metų tarnavimo laiką bus panaudota kuro:

$$m_1=60/2*160.097=4802.91 \text{ t}. \quad (6.7)$$

Taigi randame, kiek reikia gamtinio urano norint pagaminti 4802.91 t urano įsodrinto iki 3,5% :

$$F=P+W=4802.91+(5.46*4802.91)=4802,91+26223,89=31026,8 \text{ t}. \quad (6.8)$$

Apskaičiuojame, kad reaktorių po reaktoriaus eksploatacijos nutraukimo liks 4802,91 t. radioaktyvaus panaudoto branduolinio kuro ir 26223,89 t. mažai radioaktyvių atliekų likusių gaminant kurą.

## 7. BENDRI EKONOMIŠKUMO RODIKLIAI

Paklausai po truputi augant, o pasiūlai atvirkščiai mažėjant, dėl objektų senumo, reikalingi nauji sprendimai ir naujos elektrinės. Viena jų Visagino atominės elektrinės statyba. Lietuvoje planuojamas ABWR1350 reaktorius. Šiame darbe pagrindžiamas tokio branduolinio reaktoriaus ekonomiškumas.

Svarstant ar statyti branduolinį reaktorių ar pasirinkti kitą energijos gamybos įrenginį buvo įvertinti keli faktoriai. Statybos kaina, kuro dedamoji, kapitalinių įdėjimų dalis, metinių išlaidų dalis eksploataciniam personalui, palūkanų dalis, elektros energijos kaina, galimas pagaminti elektros energijos kiekis per metus.

Į aktyviąją zoną pakrautas urano kiekis	160097 kg
Urano išdegimo laipsnis	45 GW parų/t U
Reaktoriaus kampanijos laikas	2 metai

Pilna atominės elektrinės statybos kaina, eurų:

$$\begin{aligned}k_{st} &= k \cdot W_{inst}, \\k_{st} &= 1750 \cdot 1350000 = 2,36 \cdot 10^9,\end{aligned}\tag{7.1}$$

čia:  $k$  – priimama statybos kaina 1750 eurų/kW;  $W_{inst}$  – AE galia kW.

Kuro dedamoji, eurų:

$$\begin{aligned}S_{kuro} &= B_{met} \cdot C_k, \\S_{kuro} &= 0,0064 \cdot 11234700000 = 71902080.\end{aligned}\tag{7.2}$$

čia:  $B_{met}$  – kuro kaina pagaminti 1 kWh elektros energijos, eurų/kWh;  $C_k$  – Pagaminta elektrinėje elektros energijos per metus, kWh.

Metinių išlaidų dalis, priklausanti nuo pradinių kapitalinių įdėjimų, eurų.

$$S_k = (p_a + p_{rem} + p_{kitos}) \cdot k_{st} / 60 = p_k \cdot k_{st}.\tag{7.3}$$

čia:  $p_a$  – koeficientas, įvertinantis amortizacinius atskaitymus pilnam objekto atstatymui pasibaigus tarnavimo laikui ir kapitalinius remontus,  $p_a = 0,08$ ;  $p_{rem} = 0,2p_a$ , koeficientas įvertinantis išlaidas einamajam remontui;  $p_{kitos} = 0,37p_a$  koeficientas, įvertinantis kitas išlaidas įrenginiams (modernizacija, papildomų įrenginių įsigijimas).

$$\begin{aligned}
p_k &= p_a + p_{rem} + p_{kitos}, \\
p_k &= 0,08 + 0,016 + 0,0296 = 0,1256. \\
S_k &= 0,1256 \cdot 2,36 \cdot 10^9 / 60 = 4,940266 \cdot 10^6 \text{ Eur};
\end{aligned}
\tag{7.4}$$

Metinių išlaidų dalis eksploataciniam personalui, eurų / metus:

$$\begin{aligned}
S_{pagr} &= V \cdot \Pi \cdot m, \\
S_{pagr} &= 300 \cdot 1000 \cdot 12 = 3600000.
\end{aligned}
\tag{7.5}$$

čia: V – personalo skaičius;  $\Pi$  – vidutinis atlyginimas, m – mėnesių skaičius.

$$S_{pers} = (1 + p_{pers}) \cdot S_{pagr}.\tag{7.6}$$

čia:  $p_{pers}$  – koeficientas įvertinantis kitas išlaidas personalui (premijos, profesinis parengimas, kvalifikacijos kėlimas).

$$S_{pers} = (1 + 0,27) \cdot 3600000 = 4572000 \text{ Eur / metai}.\tag{7.7}$$

Suminės metinės išlaidos, eurų:

$$\begin{aligned}
S_{met} &= S_{kuro} + S_k + S_{pers}; \\
S_{met} &= 71902080 + 4940266 + 4752000 = 81414346.
\end{aligned}
\tag{7.8}$$

Apskaičiuoju metinę šiluminės energijos gamybą, kWh

$$E_{met.\tilde{s}il.} = q' \cdot T,\tag{7.9}$$

kur:  $q'$  – šiluminė energija, tiekama vartotojui, kW; T – reaktoriaus darbo valandų skaičius metuose, h

$$E_{met.el.} = 3926000 \cdot 8409.6 = 33016089600.\tag{7.10}$$

Darome prielaidą, kad 96% laiko metuose dirbs reaktorius pastoviu maksimaliu režimu.

Apskaičiuoju metinę elektros energijos gamybą [6], kWh

$$E_{met.el.} = Q' \cdot T,\tag{7.11}$$

kur:  $Q'$  – elektros energija, tiekama vartotojui, kW:  $T$  – reaktoriaus darbo valandų skaičius metuose, h

$$E_{met.el} = 1350000 \cdot 8409.6 = 11352960000. \quad (7.12)$$

Priimu, kad diskonto norma bus 8%, atidavimas anuiteto būdu. Paskolą už elektrinės pastatymą reikia gražinti per 20 metų. Tada metinė įmoka bus, eurų / metus:

$$E_{met.pas.} = 19739985,63 \cdot 12 = 236879827.56 \quad (7.13)$$

Reaktoriaus eksploatacijos nutraukimui ir radioaktyvių atliekų utilizavimui skirtas fondas, eurų:

$$\begin{aligned} F &= S_{kuro} \cdot 1,3; \\ F &= 71902080 \cdot 1,3 = 93472704 \end{aligned} \quad (7.14)$$

Darome prielaidą, kad 96% laiko metuose dirbs reaktorius pastoviu maksimaliu režimu.

Randu šilumos energijos savikainą, ct/kWh

$$\begin{aligned} S_{s.energ} &= \frac{S_{met} + E_{met.pas.} + F}{E_{met.šil}}; \\ S_{s.energ} &= \frac{81414346 + 236879827.56 + 93472704}{33016089600} = 0,0125 \text{Eur} / \text{kWh} \approx 1,25 \text{ct} / \text{kWh} \end{aligned} \quad (7.15)$$

Randu elektros energijos savikainą, ct/kWh

$$\begin{aligned} S_{el.energ} &= \frac{S_{met} + E_{met.pas.} + F}{E_{met.el}}; \\ S_{el.energ} &= \frac{81414346 + 236879827.56 + 93472704}{11352960000} = 0,0363 \text{Eur} / \text{kWh} \approx 3,63 \text{ct} / \text{kWh} \end{aligned} \quad (7.16)$$

## IŠVADOS

Nustačiau, kad net 96% urano rudos gaminant branduolinį kurą, pirmuose etapuose, pavirsta į radioaktyvias atliekas, kurių saugojimas ir laidojimas yra brangus ir iki galo neišspręstas. Tik iš 4% urano rudos pagaminamas branduolinis kuras, kuris naudojamas branduoliniuose reaktoriuose.

Vykdamas šiluminį reaktoriaus skaičiavimą. Gavau tokias technines charakteristikas:

Vidutinė energetinė aktyviosios zonos tūrio veineto apkrova	50,6 MW/m <sup>3</sup>
Aktyviosios zonos tūris	81,557 m <sup>3</sup>
Šilumnešio užimamas kasetės pjūvio plotas	0,877 cm <sup>2</sup>
Maksimalus šilumnešio greitis per aktyviąją zoną	0,458 m/s

Fizikinio – neutroninio branduolinio reaktoriaus skaičiavimo metu gautos tokios branduolinės charakteristikos

Neutronų padaugėjimo dėl šiluminių neutronų įtaka	2,0750
Neutronų padaugėjimo dėl greitųjų neutronų įtakos	1,0560
Šiluminio išnaudojimo koeficientas	0,7530
Tikimybė išvengti rezonansinio pagavimo	0,7760
Begalinės terpės neutronų dauginimo koeficientas	1,2800
Efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas	1,2190
Reaktyvumo atsarga	0,2190

Reaktoriaus šiluminius ir fizikinius skaičiavimus atlikau teisingai, nes gautos reikšmės, su nedidelėm paklaidom, atitinka apytiksles leistinas ribas.

Suskaičiavau, kad reaktoriui per 60 metų kampanijos laiką reikės 4802,91 t

Remiantis branduolinio kuro ciklo duomenimis suskaičiavau mažai radioaktyvių atliekų kiekį, kuris susidarys gaminant branduolinį kurą ABWR 1350 reaktoriui per 60 metų 26223,89 t

Ekonominio skaičiavimo metu suskaičiavau:

Kuro dedamoji vieneriems metams	71,1902 mln. eurų
Suminės metinės išlaidos	81,4143 mln. eurų
Per metus pagamintas elektros energijos kiekis	11,352960 TWh
Vieno reaktoriaus pastatymo kaina	2,36 mlrd. eurų
Šilumos gamybos savikaina	0,0125eurų/KW
Elektros gamybos savikaina	0,0363 eurų/KW
Elektrinės darbo laikas per metus	8409,6h
Elektrinės apkrovimas per metus	96%

## LITERATŪROS SARAŠAS

1. Lietuvos žaliųjų sąjunga. Net jei ignoruotume branduolinės avarijos galimybę. Prieiga per internetą: <http://www.zalieji.lt/lt/branduolins-energetikos-klausimu>
2. Vilemas, J., 2012. Branduolinio kuro tiekimo grandinė – monopolijų viešpatija. Prieiga per internetą: <http://www.mokslasirtechnika.lt/mokslo-naujienos/branduolinio-kuro-tiekimo-grandin-monopolij-viespatija.html>
3. Pagrindinės žinios apie branduolinį kurą. Prieiga per internetą: [http://www.elektroklubas.lt/index.php?option=com\\_content&task=view&id=902](http://www.elektroklubas.lt/index.php?option=com_content&task=view&id=902)
4. Visagino AE verslo planas, 2012. Prieiga per internetą: <http://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.lrv.lt%2FEP%2FVAE%2520verslo%2520planas.pdf&ei=U8eyVM7IJa0Ue7GgNgE&usq=AFQjCNGPvLmk04HiyD3rHFuCYwNdnyp9UA>
5. Prieiga per internetą: <http://epsc221.wustl.edu/Lectures/221L36.pdf>
6. Nuclear fuel fabrication, 2014. Prieiga per internetą: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Fuel-Fabrication/>
7. Michael T. Hogue, 2012. A Review of the Costs of Nuclear Power Generation. Prieiga per internetą: [http://bebr.business.utah.edu/sites/bebr/Documents/studies/Nuclear\\_Report\\_Final\\_Web\\_7Mar2012.pdf](http://bebr.business.utah.edu/sites/bebr/Documents/studies/Nuclear_Report_Final_Web_7Mar2012.pdf)
8. Williams, A., 2009. Reactor and Fuel Cycle Economics – Can Nuclear Power Compete? Prieiga per internetą: [http://web.ornl.gov/sci/nsed/outreach/presentation/2009/KentWilliams\\_seminar.pdf](http://web.ornl.gov/sci/nsed/outreach/presentation/2009/KentWilliams_seminar.pdf)
9. Napoleon A., Fisher J., Steinhurst W., 2008. The Real Costs of Cleaning Up Nuclear Waste: A Full Cost Accounting of Cleanup Options for the West Valley Nuclear Waste Site. Prieiga per internetą: [https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=https%3A%2F%2Fwww.nirs.org%2Fradwaste%2Fdecommissioning%2Fwvfcareport1108.pdf&ei=BGuyVNvFK4u0UZGfgbgM&usq=AFQjCNHX\\_pS18ldlo6GY\\_friOD-zrqzubQ&bvm=bv.83339334,d.d24](https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=https%3A%2F%2Fwww.nirs.org%2Fradwaste%2Fdecommissioning%2Fwvfcareport1108.pdf&ei=BGuyVNvFK4u0UZGfgbgM&usq=AFQjCNHX_pS18ldlo6GY_friOD-zrqzubQ&bvm=bv.83339334,d.d24)
10. World Nuclear Association, 2014. Radioactive Waste Management. Prieiga per internetą: <http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management/>
11. Bunn, Matthew, Fetter S., Holdren J., Zwaan B., 2003. The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel. Prieiga per internetą: [http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/2089/economics\\_of\\_reprocessing\\_vs\\_direct\\_disposal\\_of\\_spent\\_nuclear\\_fuel.html](http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/2089/economics_of_reprocessing_vs_direct_disposal_of_spent_nuclear_fuel.html)
12. Orszag, P. R., 2007. Costs of Reprocessing Versus Directly Disposing of Spent Nuclear Fuel. Prieiga per internetą: [www.state.nv.us/nucwaste/library/Reprocessing/CBO-11-14-nuclearfuel.pdf](http://www.state.nv.us/nucwaste/library/Reprocessing/CBO-11-14-nuclearfuel.pdf)
13. J. Gylis, Branduolinės inžinerijos įvadas, Kaunas: Technologija, 1997 – 141 p.
14. Iš LR Vyriausybės ir UAB „Visagino atominė elektrinė“ perspektyvos. Prieiga per internetą [http://www.vae.lt/files/Visagino\\_AE\\_projekto\\_verslo\\_planas.pdf](http://www.vae.lt/files/Visagino_AE_projekto_verslo_planas.pdf)