

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

RIMAS BURAK

**PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO LIKUTINĖS ŠILUMOS
PANAUDOJIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof., habil. dr. Jonas Gylys

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO LIKUTINĖS ŠILUMOS
PANAUDOJIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Branduolinė energetika (kodas M3126M21)

Vadovas

(parašas) Prof. habil. dr. Jonas Gylys
(data)

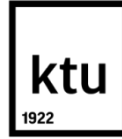
Recenzentas

(parašas) Lekt. Linas Paukštaitis
(data)

Projektą atliko

(parašas) Rimas Burak
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Rimas Burak

(Studento vardas, pavardė)

Branduolinė energetika (kodas M3126M21)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 24 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Rimo Burak**, baigiamasis projektas tema „PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO LIKUTINĖS ŠILUMOS PANAUDOJIMAS“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS IR MECHATRONIKOS FAKULTETAS**

Tvirtinu: _____
Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)
katedros vedėjas Egidijus 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 skiriami kreditai. Šiuo projektu studentas parodo, kad yra sukaupęs pakankamai žinių, turi pakankamai gebėjimų ir nemažą pasirinktos studijų krypties analitinio ar projektavimo darbo 12 patirtį. Taip pat jis parodo savo kūrybingumą, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir jų analizės įgūdžius, gilų nagrinėjamos temos supratimą, projektavimo ir inžinerinės analizės įgūdžius, informacinių technologijų naudojimo ir rašytinio bendravimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema ***Panaudoto branduolinio kuro likutinės šilumos panaudojimas***
.....
Patvirtinta 2016 m. gegužės mėn. 3 d. dekanu įsakymu Nr. V25-11-7
2. Darbo tikslas – ***modifikuoti esamą PBK tvarkymo sistemą, ją pritaikant likutinės šilumos panaudojimui.***
.....
3. Darbo struktūra: ***Įvadas***
 - 1) ***Panaudoto branduolinio kuro likutinės šiluma, jos tvarkymas ir panaudojimo galimybės***.....
 - 2) ***PBK liekamosios šilumos panaudojimo technologija***.....
 - 3) ***Projektiniai šilumokaičio skaičiavimai******Išvados. Literatūros sąrašas. Priedai***
.....
.....
4. Reikalavimai ir sąlygos
Darbas turi atitikti magistro baigiamojo darbo metodinių nurodymų reikalavimus
.....
.....
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2016 m. gegužės mėn. 24 d.
6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.
Išduota studentui ***Rimui Burak***
Užduotį gavau ***Rimas Burak***
..... (studento vardas, pavardė) (parašas) (data)
- Vadovas ***Prof. habil. dr. Jonas Gylys***
..... (Vadovo vardas, pavardė) (parašas) (data)

TURINYS

ĮVADAS	9
1. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO LIKUTINĖS ŠILUMA, JOS TVARKYMAS IR PANAUDOJIMO GALIMYBĖS	11
1.1. PBK likutinė šiluma ir jos atsiradimo priežastys.....	11
1.2. PBK tvarkymo technologijos.....	16
1.2.1. Šlapias saugojimas	17
1.2.2. Sausas saugojimas.....	19
1.3. PBK likutinės šilumos panaudojimo galimybės	21
2. PBK LIEKAMOSIOS ŠILUMOS PANAUDOJIMO TECHNOLOGIJA	25
2.1. Technologijos aprašymas.....	25
2.2. PBK talpykla.....	30
2.3. PBK saugojimo problemos	34
3. PROJEKTINIAI ŠILUMOKAIČIO SKAIČIAVIMAI	40
3.1. Likutinės šilumos skaičiavimas	40
3.2. PBK talpyklos maksimalios temperatūros skaičiavimas.	42
3.3. Šilumokaičio termohidrauliniai skaičiavimai	48
3.3.1. Termodinaminių parametru skaičiavimas.....	48
3.3.2. Hidrauliniai nuostoliai	52
IŠVADOS	56
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	58

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Lengvojo vandens reaktoriaus radioaktyvumo lygis (60 GWd/MTU išdegimas)	12
2 pav. UO2 ir MOX panaudoto branduolinio kuro likutinės šilumos priklausomybė nuo laiko. 13	
3 pav. PWR kuro rinklių likutinės šilumos priklausomybė nuo aušinimo laiko, esant 40 MWd/MTU ir 60MWd/MTU rinklių išdegimui.....	13
4 pav. Likutinės šilumos laiko intervalo radimo schema po reaktoriaus sustabdymo.....	14
5 pav. PBK tvarkymo schema	17
6 pav. PBK likutinės šilumos panaudojimo technologijos	22
7 pav. RTG generatorius.....	23
8 pav. Talpyklų, patalpintų į PBK baseiną planas.....	25
9 pav. Modifikuotos PBK likutinės šilumos nuvedimo sistemos principinė schema.....	26
10 pav. Šilumokaičio projektavimo funkcinė schema.....	29
11 pav. CASTOR-V/21 panaudoto branduolinio kuro talpykla.....	30
12 pav. Talpinamų PWR kuro rinklių principinė schema	32
13 pav. Modifikuotos PBK schema.....	33
14 pav. Modifikuotos PBK talpyklos vaizdas iš viršaus.....	34
15 pav. Vandens tankio priklausomybė nuo efektyvaus neutronų daugėjimo koeficiento reikšmių užtvindyto NAC–STC konteinerio atveju	35
16 pav. Kuro elemento galimi pažeidimai.....	37
17 pav. Likutinės šilumos priklausomybės nuo laiko grafikas.....	40
18 pav. PBK rinklės ir krepšio šilumokaitos uždavinys.....	42
19 pav. Šilumos perdavimo vandeniui uždavinys	45
20 pav. Temperatūros kitimo šilumokaityje schema.....	52

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 Lentelė. Pasaulyje naudojamų kuro rinklių aprašymas.....	16
2 Lentelė. B ir n koeficientų reikšmės	47

Burak, Rimas. Panaudoto branduolinio kuro likutinės šilumos panaudojimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. habil. dr. Jonas Gylys; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *Likutinė šiluma, panaudotas branduolinis kuras, talpykla, šilumokaitis.*

Kaunas, 2016. 60 p.

SANTRAUKA

Įvairių panaudotame branduoliniame kure vykstančių procesų metu išsiskiria likutinė šiluma. Jos pašalinimas yra būtinas siekiant išvengti kuro perkaitimo ar skilimo produktų išspinduliavimo į aplinką. Tad branduolinėje energetikoje neišvengiamai susiduriama su likutinės šilumos šalinimo problemomis. Nors įvairūs pasaulio mokslininkai yra pasiūlę ne vieną likutinės šilumos panaudojimo būdą, tačiau dėl techninių galimybių jie kol kas dar nėra taikomi praktikoje. Tad darbe siūlomas vienas iš panaudoto branduolinio kuro likutinės šilumos panaudojimo būdo ir bandomas pagrįsti jo naudingumas. Tikėtina, kad ateityje taikant panašius metodus sukurta saugi ir efektyvi PBK likutinės šilumos panaudojimo technologija leistų kompensuoti dėl panaudoto branduolinio kuro saugojimo ir tvarkymo patiriamas išlaidas. Tad šio darbo objektas – esamos PBK sistemos modifikavimas, o tikslas – modifikuoti esamą PBK tvarkymo sistemą, ją pritaikant likutinės šilumos panaudojimui.

Darbą sudaro įvadas, trys dėstymo dalys ir išvados. Pirmoje dalyje aprašomos teorinės PBK likutinės šilumos atsiradimo priežastys, panaudojimo galimybės ir PBK tvarkymo technologijos, antroje – modifikuojama ir aprašoma PBK likutinės šilumos panaudojimo technologija, o trečioje – pateikiami talpyklos ir joje integruoto šilumokaičio termohidrauliniai skaičiavimai. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados.

Dėl mažesnių kaštų ir laiko sąnaudų, esamos PBK sistemos modifikavimas, o ne naujos kūrimas, yra ypač naudingas siekiant efektyviai panaudoti likutinę šilumą. Modifikuojant PBK saugojimo sistemą ir kuriant likutinės šilumos panaudojimo technologiją, buvo sujungti sauso ir šlapio saugojimo būdai – PBK patalpinamas į sausąją talpyklą, kurioje integruojamas likutinei šilumai iš talpyklos pašalinti skirtas vandens–vandens šilumokaitis. Pagrįsti modifikuotos PBK likutinės šilumos technologijos naudingumui buvo atlikti termohidrauliniai skaičiavimai, kurie rodo, jog šios sistemos taikymas turi potencialo, tačiau tam reikalingi papildomi skaičiavimai.

Burak, Rimas. *Utilization Of The Residual Heat Of The Spent Nuclear Fuel*: Master's final project/ supervisor assoc. prof. habil. dr. Jonas Gylys. The Faculty of . Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy engineering

Key words: *Residual heat, spent nuclear fuel, cask, heat exchanger*

Kaunas, 2016. 60 p.

SUMMARY

Different spent nuclear fuel processes will evolve residual heat. Its removal is necessary to avoid overheating of the fuel or radioactivity hazard. Thus, nuclear energy raises the residual heat removal problems. Although a variety of the world's scientists have proposed a range of waste heat recovery method, however, due to their ability, they cannot yet be applied in practice. Thus, the work focuses on one of the spent nuclear fuel waste heat recovery method and tested based on its usefulness. It is likely that in the future using similar methods to create a safe and efficient fuel waste heat recovery technology would enable to compensate for the spent nuclear fuel storage and handling costs incurred. The object of this work - the existing fuel system modification, and the goal - to modify existing fuel handling system, adapting it to the residual heat utilization.

The work consists of introduction, three parts and conclusions. The first part describes the theoretical fuel residual heat causes, usability and fuel processing technology, the second - describes modified fuel waste heat recovery technology, and the third - presented the container and its integrated heat exchanger thermalhydraulic calculations. In the end of the work submitted conclusions.

Because of lower costs and time resources, the existing fuel system modification, rather than a new building, is especially useful in order to effectively utilize the residual heat. Replacing the fuel storage system and creation of waste heat recovery technology, it was to combine dry and wet storage methods - the nuclear fuel is placed in a dry container, which integrates the residual heat of the container designed to remove water-water heat exchanger. In order to justify the modified fuel residual heat technology performance has been carried out thermalhydraulic calculations, which show that the application of this system has the potential, but it requires additional calculations.

IVADAS

Temos aktualumas. Visuomenėje nuo seno vyrauja neigiama nuomonė apie branduolinę energetiką. Teigiama, kad ji yra net tik nesaugi, bet ir nuostolinga. Nemaža pasaulio visuomenės dalis nerimauja dėl galimos avarijų grėsmės ir jų atveju kilsiančios radioaktyvios taršos, nuolatinės ir ilgalaikės panaudoto branduolinio kuro (PBK) priežiūros, radioaktyvių atliekų laidojimo problemų, ekonominių veiksnių, tokių kaip oligarchija, grėsmės ir kt. Todėl norint gerinti branduolinės energetikos įvaizdį visuomenėje, reikia kuo efektyviau ir saugiau tvarkyti radioaktyvias atliekas. Šiuo metu taikomos PBK tvarkymo technologijos leidžia tinkamai apsaugoti aplinką nuo radioaktyvumo. Tačiau svarbus ne tik saugus, bet ir efektyvus PBK tvarkymas bei saugojimas. Tik ištrauktas iš reaktoriaus panaudotas branduolinis kuras skleidžia dėl liekamojo branduolių skilimo susidarančią energiją, kuri gali būti efektyviai panaudota. Šiuo metu yra sukurta nemažai likutinės šilumos panaudojimų metodų, tačiau praktikoje dauguma jų vis dar nėra taikomi. Pasirinkta baigiamojo darbo tema yra ypač aktuali, nes kuriamos ir vis tobulinamos likutinės šilumos panaudojimo sistemos atvers kelius į praktinį jų panaudojimą. Tikėtina, kad ateityje sukurta saugi ir efektyvi PBK likutinės šilumos panaudojimo technologija leistų kompensuoti dėl panaudoto branduolinio kuro saugojimo ir tvarkymo patiriamas išlaidas.

Darbo temos naujumas. Mokslinėje literatūroje PBK tvarkymui ir saugojimui skiriama ypač daug dėmesio. Lietuvoje šią temą analizavo Šmaižys A. (2000), Poškas P., Adomaitis J. E., Kilda R. (2003), Justinavičius D., Poškas P. (2011) ir kt. Iš užsienio autorių, nagrinėjusių šią temą, minėtini tokie kaip Bunn M. et al. (2001), Feiveson et al. (2011), Hanson B. et al. (2012), Patterson C. et al. (2015) ir kt. Tačiau būtent likutinės šilumos panaudojimo galimybės kol kas dar nėra išsamiai analizuotos. Jos tirtos daugiau užsienio autorių, tokių kaip Schreiber J. G., Wood. J. G., Chan J. (2007), Ragheb M. (2011), Nusbaumer O. (2014) ir kt. Tačiau Lietuvoje panašaus pobūdžio tyrimų iki šiol nėra. Tad nors likutinės šilumos panaudojimas jau buvo gvildinamas užsienio mokslininkų, tačiau šiai temai nebuvo skirtas didelis dėmesys. Visi atlikti skaičiavimai yra pavieniai, o sukurtos likutinės šilumos panaudojimo technologijos praktikoje netaikomos dėl sudėtingų techninių reikalavimų, todėl tai reikalauja naujų mokslinių tyrimų ir skaičiavimų.

Darbo problema. PBK saugojimas yra vienas aktualiausių socialinių, ekonominių ir aplinkosauginių veiksnių, keliančių problemas branduolinės energetikos plėtrai pasaulyje. Įvairių panaudotame branduoliniame kure vykstančių procesų metu išsiskiria likutinė šiluma. Jos pašalinimas yra būtinas siekiant išvengti kuro perkaitimo ar skilimo produktų išspinduliavimo į aplinką. Dėl aukšto atliekų radioaktyvumo likutinės šilumos panaudojimas yra vertinamas itin atsargiai. Radioaktyvus kuras turi būti tvarkomas taip, kad kuro elementų temperatūra neviršytų leistinų verčių. Tad branduolinėje energetikoje neišvengiamai susiduriama su likutinės šilumos

šalinimo problemomis. Nors įvairūs pasaulio mokslininkai yra pasiūlę ne vieną likutinės šilumos panaudojimo būdą, tačiau dėl techninių galimybių jie kol kas dar nėra taikomi praktikoje. Tad nors PBK generuoja didelį energijos kiekį, dar nėra išrastas būdas kaip šią šilumą efektyviai išgauti ir panaudoti. Tad kyla klausimas, kaip sukurti sistemą, kuria remiantis būtų galima efektyviai panaudoti iš panaudoto branduolinio kuro išsiskiriančią likutinę šilumą?

Darbo objektas – esamos PBK kuro tvarkymo sistemos modifikavimas.

Darbo tikslas – modifikuoti esamą PBK tvarkymo sistemą, ją pritaikant likutinės šilumos panaudojimui.

Tyrimo tikslui įgyvendinti iškeliami šie **uždaviniai**:

1. Išanalizuoti PBK likutinės šilumos atsiradimo priežastis, panaudojimo galimybes ir PBK tvarkymo technologijas;
2. Modifikuoti PBK tvarkymo sistemą bei išanalizuoti jos eksploatavimo metu galinčias kilti PBK saugojimo problemas.
3. Atlikti termohidraulinius modifikuotos PBK talpyklos skaičiavimus

Darbo metodai. Apžvelgti ir išanalizuoti ankstesniems tyrimams, susijusiems su PBK likutinės šilumos panaudojimu, darbe vartojamas teorinės mokslinės literatūros analizės metodas. Praktinė darbo dalis atlikta naudojantis braižymo (Solidworks, Autocad) ir skaičiuoklių (Matlab, MS Excel) programomis. Gauti rezultatai apibendrinti ir susisteminti.

Darbo struktūra. Darbą sudaro įvadas, trys dėstymo dalys ir išvados.

Pirmoje dalyje, išanalizavus mokslinę literatūrą, aprašomos teorinės PBK likutinės šilumos atsiradimo priežastys, panaudojimo galimybės ir PBK tvarkymo technologijos.

Antroje dalyje modifikuojama ir aprašoma PBK likutinės šilumos panaudojimo technologija.

Trečioje dalyje pateikiami talpyklos ir joje integruoto šilumokaičio termohidrauliniai skaičiavimai (šilumos atidavimo koeficientas; slėgio nuostoliai šilumokaityje, talpyklos temperatūra ir kt.).

Darbo pabaigoje pateikiamos išvados.

Darbe yra 20 paveikslėlių ir 2 lentelių. Darbo apimtis 60 lapai be priedų.

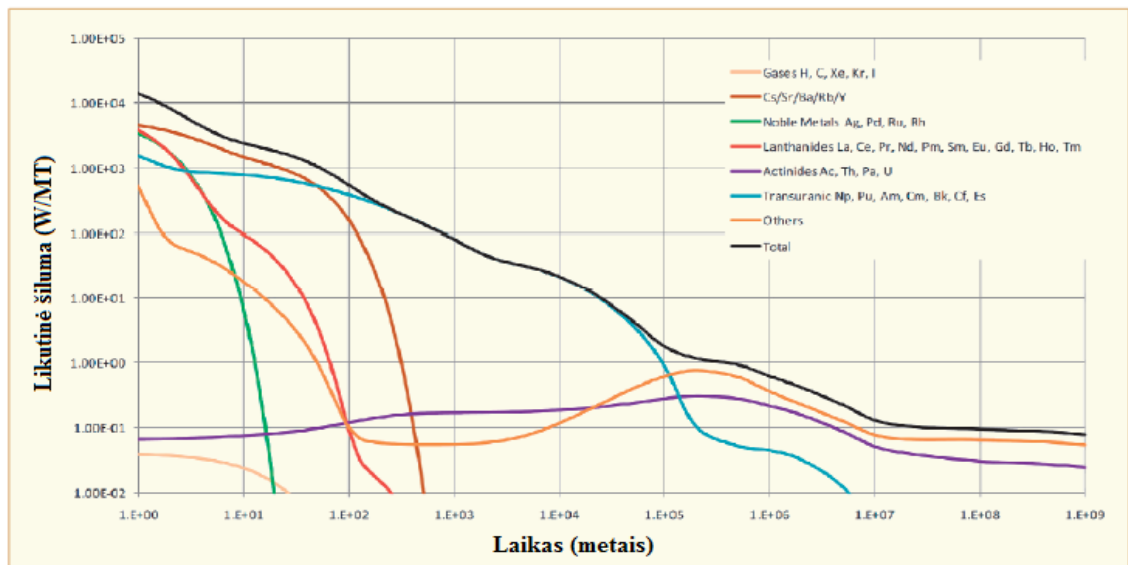
1. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO LIKUTINĖS ŠILUMA, JOS TVARKYMAS IR PANAUDOJIMO GALIMYBĖS

1.1. PBK likutinė šiluma ir jos atsiradimo priežastys

Apšvitinus branduolinį kurą neutronais reaktoriuje vyksta įvairūs procesai. Pagrindinis – tai branduolių skilimo reakcija, kuri reaktoriuje generuoja šiluminę energiją [35]. Po reakcijos likę skilimo produktai dažniausiai yra radioaktyvūs ir atlieka beta bei gama skilimus iki kol tampa stabilūs izotopai. Esant įprastoms eksploatacinėms sąlygoms šie skilimai sudaro nepastebimą šilumos gamybos dalį.

Kitas procesas, kuris taip pat vyksta branduolinį kurą apšvitinus neutronais, yra neutronų pagavimas, kurio metu dalelės absorbuoja papildomą neutroną [25]. Tokia reakcija pagamina skirtingų izotopų elementus, kurie gali skilti ar emituoti alfa daleles. Šie du pagrindiniai procesai atsiranda kartu su elastine ir neelastine sklaida. Sklaida gali pakeisti branduolio energijos lygmenį. Tai paskatina dalelę emituoti gama spindulius. Šių ir kitų reaktoriaus veikimo metu ir po jo išjungimo vykstančių procesų metu kylantis skilimo produktų šilumos generavimas vadinamas likutinės šilumos išsiskyrimu [28]. Tad pagrindinis branduolinės energetikos skirtumas nuo kitų energetikos sričių yra toks, kad netgi sustabdžius reaktoriaus veikimą išskiriama šiluminė energija. Likutinės šilumos pašalinimas yra būtinas siekiant užkirsti kelią kuro perkaitimui ar skilimo produktų išspinduliavimui į aplinką [11]. Branduolinėje energetikoje neišvengiamai susiduriama su likutinės šilumos šalinimo problemomis.

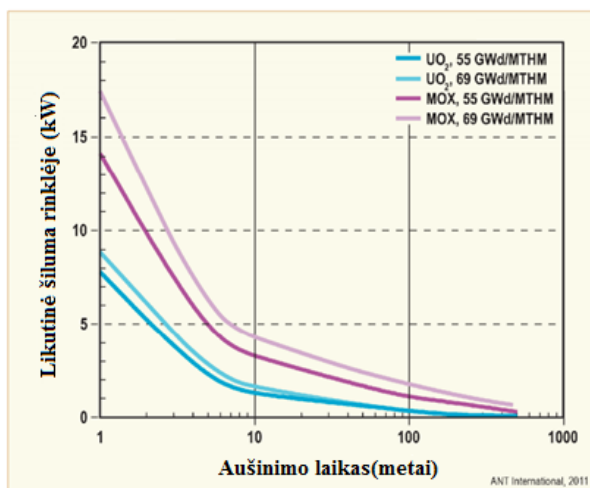
Net tuomet, kai reaktorius yra sustabdytas, radioaktyvus skilimas vis tiek tęsiasi [26]. Visi sugeneruoti radioaktyvūs izotopai turi skirtingus pusamžius: nuo labai trumpų (beveik neišmatuojamų) iki labai ilgų pusamžių. PBK radioaktyvumas ypač priklauso nuo kuro rinklių kompozicijos. Tipinis lengvojo vandens reaktorių radioaktyvumo lygis matomas 1 paveiksle. Pradiniu saugojimo laikotarpiu pagrindiniai elementai, kurie sukelia radioaktyvią spinduliuotę, yra Sr-90 ir Cs-137. Tačiau, kaip matome 1 paveiksle, pirmuosius saugojimo metus būtina atsižvelgti į visus kitus skilimo produktus.



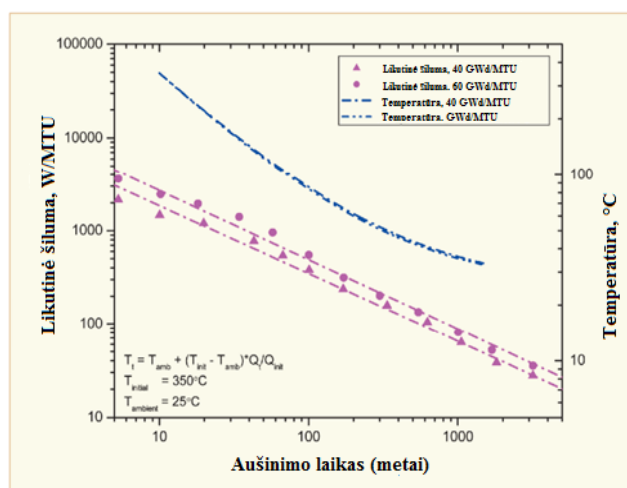
1 pav. Lengvojo vandens reaktoriaus radioaktyvumo lygis (60 GWd/MTU išdegimas)[26]

Likutinės šilumos išsiskyrimas priklauso nuo branduolinio reaktoriaus tipo, o tiksliau – nuo jo energijos tankio. Branduolinio kuro elementų konstrukcija keičiama tam, kad būtų pagerintos jų eksploatacinės charakteristikos. Tai daroma įvairiais būdais. Pavyzdžiui, tobulinant kuro elementus dažnai keliamas jų išdegimo laipsnis, kuris dabar yra dvigubai didesnis nei pradinėje kuro elementų vystymosi stadijoje (prieš 2 dešimtmečius). Taip pat, siekiant pagerinti branduolinio kuro (BK) elementų konstrukcijų eksploatacines charakteristikas, į kuro rinkles vis dažniau integruojama tobulėjanti pagalbinė įranga. Tokiu būdu dar labiau pagerinami kuro elementų išdegimo parametrai bei jų naudingumo laipsnis. Tokios vystymosi tendencijos tikėtinos ir ateityje. Tačiau, būtina paminėti, jog didesnis išdegimo lygis paveikia PBK saugojimo būdo pasirinkimą ir konstrukcines ypatybes. Tai nutinka dėl padidėjusio likutinės šilumos išsiskyrimo, kuris tiesiogiai priklauso nuo kuro išdegimo ir aušinimo.

Radionuklidų, kurie prisideda prie likutinės šilumos generacijos, šilumos išsiskyrimas bėgant laikui kinta priklausomai nuo jų pradinės koncentracijos, skilimo dažnumo ir skilimo grandinės. Tipiškos 60 GWD / MTU išdegimo PWR kuro rinklės išspinduliuota likutinės šilumos kiekio priklausomybė nuo laiko pavaizduota 2 paveiksle. Daugiausiai šilumos yra generuojama šių transuraninių radionuklidų: Pu-239, Pu-240, Am-241 (iš Pu-241) ir Cm-244. Transuraninių elementų koncentracijos lygis kyla didėjant išdegimo laipsniui dėl U-238 epiterminių neutronų absorbcijos ir vėlesnio jų skilimo bei transmutacijos į plutonį.



2 pav. UO₂ ir MOX panaudoto branduolinio kuro likutinės šilumos priklausomybė nuo laiko[26]



3 pav. PWR kuro rinklių likutinės šilumos priklausomybė nuo aušinimo laiko, esant 40 MWd/MTU ir 60MWd/MTU rinklių išdegimui[26]

Transuraninių radionuklidų koncentracija, taip pat ir išdegimas, didesnis yra LWR–MOX panaudotame branduoliniame kure. Taip nutinka dėl to, kad MOX kure pagrindinė skilioji medžiaga yra plutonis, kuris didina transuraninių elementų koncentraciją. Pastaroji padidina likutinę skilimo šilumą bei PBK kuro apvalkalo temperatūrą sausojoje talpykloje. Kaip parodyta 3 paveiksle, vienodu laiko saugojimo laikotarpiu šiluminė apkrova panaudotame MOX kure yra 2–3 kartus didesnė už UO₂ kuro šiluminę apkrovą.

Pagrindiniai skilimo šilumos šaltiniai yra beta ir gama spinduliuotės, bet šios spinduliuotės mažėja priklausomai nuo elementų pusamžių [27]. Beta spinduliuotė atsiranda dėl skilimo produktų neigiamų beta dalelių emisijos:

$$R_{\beta}(T) = 3,8 \times 10^{-6} \cdot T^{-1,2}. \quad (1.1.1)$$

Gama spinduliuotė atsiranda dėl skilimo produktų gama fotonų emisijos (fotonai per sekundę skilimų):

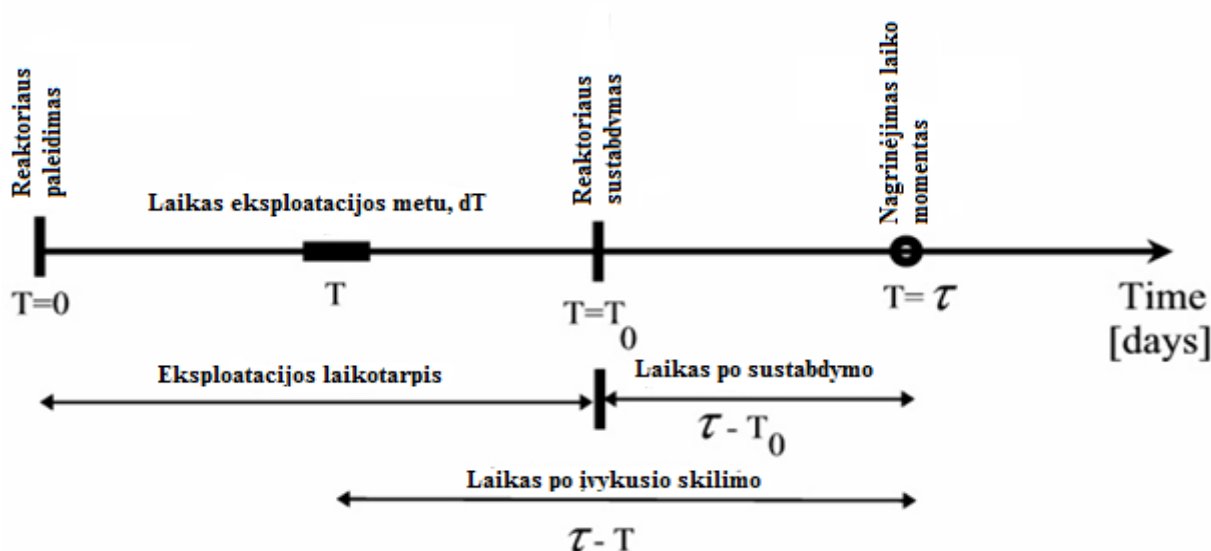
$$R_{\gamma}(T) = 1,9 \times 10^{-6} \cdot T^{-1,2}, \quad (1.1.2)$$

kur T yra laikas (dienomis) po įvykusio skilimo. Yra laikoma, kad vidutinės beta ir gama skilimo energijos yra:

$$E_{\beta} = 0,4 \text{ MeV}, \quad (1.1.4)$$

$$E_{\gamma} = 0,7 \text{ MeV}. \quad (1.1.5)$$

Norint apskaičiuoti šilumos išsiskyrimą po reaktoriaus sustabdymo yra nusistatomos laiko ribos ir atliekama analizė. Laiko ribos yra detalizuotos žemiau pateiktame 4 paveiksle.



4 pav. Likutinės šilumos laiko intervalo radimo schema po reaktoriaus sustabdymo [27]

Energija, pagaminta skilimo reakcijų laiko intervale dT , laiko momentu τ yra lygi (MeV per sekundę skilimų):

$$E_{\tau}(T) = R_{\beta}(T) \cdot \bar{E}_{\beta} + R_{\gamma}(T) E_{\gamma} = 2,85 \times 10^{-6} \cdot (\tau - T)^{-1,2}. \quad (1.1.6)$$

Reaktorius dirba šilumine galia P , o energijos išsiskyrimas kiekvienos reakcijos metu yra 200 MeV. 10 MeV yra pagaunami antineutrinių, kurie susiję su neigiamų beta dalelių skilimu, todėl vieno skilimo metu yra generuojamas apytiksliai 190 MeV energijos kiekis. Skilimo dažnis per dieną dF/dt lygus:

$$\frac{dF}{dt} = P \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{190} \cdot X \cdot T = 2,84 \times 10^{21} P, \quad (1.1.7)$$

kur X yra perskaičiavimo konstanta iš MeV į džaulius yra:

$$X = \frac{1}{1,6 \times 10^{-18}} \left[\frac{\text{MeV}}{\text{J}} \right]. \quad (1.1.8)$$

Skilimų, kurie įvyksta laiko intervale dT , išvestinė yra lygi:

$$N = 2,84 \times 10^{21} P_0 dT, \quad (1.1.9)$$

P_0 yra reaktoriaus šiluminė galia, MW; dT – laikas, dienomis.

Tokiu būdu spinduliavimo laikotarpiu dT išskiriama beta ir gama skilimų energija $\left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$

laiko momentu τ lygi:

$$R(T) = \dot{E}_\tau(T) \cdot N = 8,094 \cdot 10^{21} \cdot P_0 (\tau - T)^{-1,2} dT. \quad (1.1.10)$$

Integruojame spinduliavimo laikotarpį intervale nuo 0 iki T gauname:

$$P = 8,094 \cdot 10^{12} P_0 \int_{T_1=0}^{T_2=T} (\tau - T)^{-1,2} dT. \quad (1.1.11)$$

Suintegravus gauname:

$$\frac{P}{P_0} = 4,05 \cdot 10^{16} \cdot [(\tau - T)^{-0,2} - \tau^{-0,2}]. \quad (1.1.12)$$

Tada santykinis šiluminės galios išsiskyrimas lygus:

$$\frac{P}{P_0} = 4,05 \cdot 10^{16} \cdot X \cdot 10^{-6} \cdot [(\tau - T)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] = 6,48 \cdot 10^{-3} \cdot [(\tau - T)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] \quad (1.1.13)$$

Reikia pastebėti, kad laikas po reaktoriaus sustabdymo yra:

$$t = (\tau - T_0) \quad (1.1.14)$$

Galiausiai likutinės šilumos energija yra apskaičiuojama taip:

$$P = 6,48 \cdot 10^{-3} \cdot P_0 \cdot [(\tau - T)^{-0,2} - \tau^{-0,2}] \quad (1.1.15)$$

Šiose lygtyse: P – likutinės šilumos galia MW ; P_0 – nominali reaktoriaus galia, MW ; τ – laikas nuo reaktoriaus paleidimo, dienomis; T – reaktoriaus sustabdymo laikas, dienomis.

Apšvitinus neutronais branduolinių kūrą reaktoriuje vyksta įvairūs procesai. Vienas pagrindinių – branduolių skilimo reakcija, kuri reaktoriuje generuoja šiluminę energiją. Pagrindiniai skilimo šilumos šaltiniai yra beta ir gama spinduliuotės. Likutinės šilumos išsiskyrimas priklauso nuo branduolinės reaktoriaus tipo, o tiksliau – energijos tankio. Radionuklidų, kurie prisideda prie likutinės šilumos generacijos, šilumos išsiskyrimas bėgant laikui kinta priklausomai nuo jų pradinės koncentracijos, skilimo dažnumo ir skilimo grandinės.

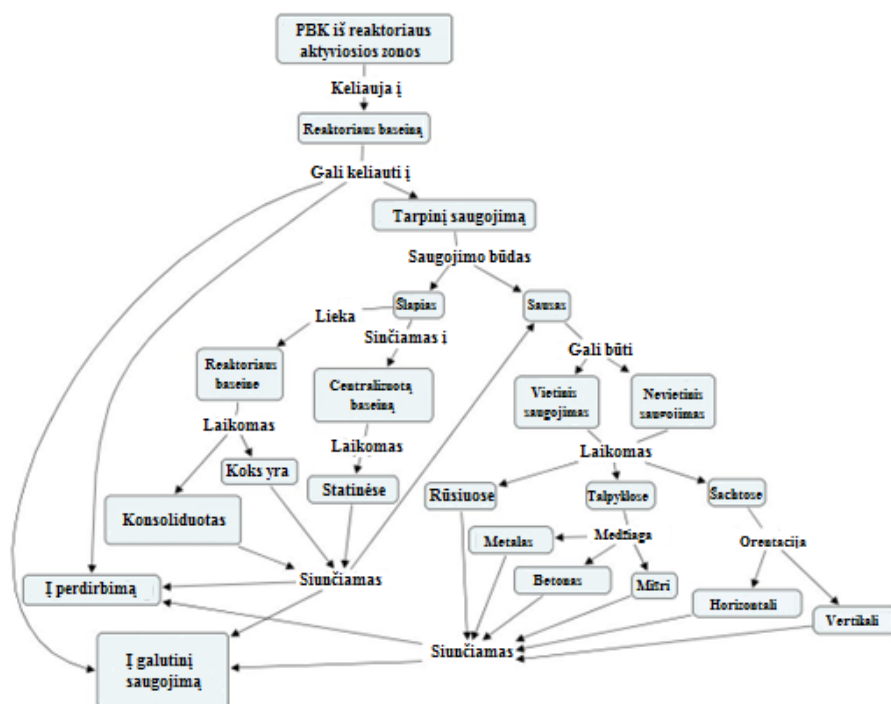
1.2. PBK tvarkymo technologijos

Techninių galimybių taikymas, tvarkant PBK, priklauso nuo reaktoriaus ir jo branduolinio kuro ciklo, kuris atitinkamai priklauso nuo kuro tipo ir konstrukcinių ypatybių [8]. Nors komerciniuose reaktoriuose šiuo metu dominuojanti kuro elementų rūšis yra lengvojo vandens reaktorių kuro elementai, tačiau yra ir kitų kuro elemento rūšių, tokių kaip sunkiojo vandens reaktorių, dujomis aušinamų reaktorių ir kt. Pagrindinės kuro elementų charakteristikos yra pateiktos 1 lentelėje.

1 Lentelė. Pasulyje naudojamų kuro rinklių aprašymas [8]

Tipas	Modelis	Fizinės specifikacijos	Pastabos
LWR	PWR	Kubinis/šešiakampis	<ul style="list-style-type: none"> • Dažniausiai saugomos nepažeistos (gali būti konsoliduojamos) • Perdirbamos
	BWR	skerspjūvis, 4–5 metrų	
	WWER	ilgio, 200~500 kg svorio rinklė	
PHWR	CANDU	10 cm diametro, 50 cm ilgio, 20 kg rinklė	<ul style="list-style-type: none"> • Saugomos dėkluose/krepšiuose • Neperdirbamos
GCR	Magnox	3 cm diametro, 1,1 m ilgio	<ul style="list-style-type: none"> • Reikia perdirbti • Galimas sausas saugojimas
	AGR	sraigtas ir 24 cm diametro, 1 m ilgio rinklė	
Kitas	RBMK	8 cm diametro, 10 m ilgio rinklė (2 sekcijos)	<ul style="list-style-type: none"> • Rinkles reikia perpjauti • Neperdirbamos • Konservuojamos • Galimas perdirbimas
	PBMR	6 cm diametro sferiniai kuro elementai	

Yra du panaudoto branduolinio kuro saugojimo būdai: šlapias saugojimas, kuriame vanduo yra šilumos nešėjas, ir sausas saugojimas, kuriame aušinimas yra palaikomas oro konvekcija. 8 paveiksle matome detalią PBK tvarkymo schemą.



5 pav. PBK tvarkymo schema [8]

1.2.1. Šlapias saugojimas

Labiausiai paplitęs saugojimo būdas panaudotam branduoliniam kurui baigus kampaniją yra vandens baseinai [16]. Taip yra dėl to, kad vanduo gerai perneša šilumą, kurios pašalinimas yra būtinas pradiname aušinimo etape. Atominėse elektrinėse šie baseinai paprastai integruojami į reaktoriaus konstrukciją, nes panaudoto branduolinio kuro šalinimas iš reaktoriaus yra branduolinės elektrinės eksploatavimo dalis. Toks PBK saugojimas dažniausiai vadinamas saugojimu prie reaktoriaus (SPR). Tikėtina, kad šis klasikinis PBK saugojimo metodas ir ateityje liks populiarus dėl jo teikiamų efektyvių aušinimo savybių, aukšto prisodrinimo laipsnio radioaktyvaus panaudoto kuro biologinio ekranavimo. Dauguma vandens baseinų turi bendras technines savybes, bet kai kurių baseinų konstrukcija skiriasi dėl skirtingų PBK reguliavimui keliamų reikalavimų. Baseinų skirtumai yra pastebimi pagal jų konstrukciją, PBK tvarkymą ir išdėstymą, kuris gali būti sugrupuotas į keletą kategorijų:

1. Vienas baseinas. Tai paprasčiausias PBK saugojimui pritaikytas mažos talpos baseinas (įskaitant SPR baseinus). Kranas su kuro rinklių paėmimo mechanizmu naudojamas prieigai prie bet kurios baseino vietos. Apvalūs baseinai su poliariniu kranu suteikia optimalią kuro rinklių išdėstymo

alternatyvą. Kadangi nėra baseino padidinimo galimybių, prireikus panaudotas branduolinis kuras turi būti perkeliamas į išorinius įrenginius.

2. Nuoseklūs baseinai. Tai šlapio saugojimo baseino konstrukcija, kuri vėliau gali būti išplečiama papildomomis baseinų serijomis. Baseinai tarpusavyje yra sujungti vandens vartais, kurie įrengti gretimose baseino sienose arba povandeniniais tuneliais ir PBK transporteriais, kuriuos naudojant panaudotas branduolinis kuras gali būti saugiai perkeliamas iš vieno baseino į kitą. Jei baseinas jau buvo naudojamas panaudoto branduolinio kuro transportavimui, tuomet jo izoliacija turi būti daug sudėtingesnė dėl galimai ateityje prireikšiančio remonto.

3. Lygiagretūs baseinai. Tai koncepcija, kurioje keli baseinai statomi lygiagrečiai vienas kitam. Baseinai tarpusavyje sujungiami vandens kanalais (koridoriais), kuriais panaudotas branduolinis kuras perkeliamas į kitus baseinus. Toliau nuo reaktoriaus esantį baseiną padalijus į keletą saugojimo baseinų ne tik pagerinamas konstrukcinis stiprumas, bet ir palengvinamas remontas, avarinės situacijos atveju yra paliekamas PBK saugojimo rezervas. Šios koncepcijos atveju, dėl nepriklausomo PBK rinklių judėjimo iš vieno baseino į kitą, ilgalaikiam saugojimui suteikiama daugiau lankstumo.

Taip pat, reikia pažymėti, kad ne prie reaktoriaus esantys baseinai keliose Rytų Europos valstybėse ir Rusijoje yra padengti metalo lakštais. Pastarieji leidžia darbuotojams vaikščioti prie baseino bei mažina vandens garavimo nuostolius baseine.

Baseinai yra statomi seisminiu požiūriu kvalifikuotuose betono pastatuose [7]. Kuro rinklės patalpinamos į sandėliavimo lentynas ar krepšius, esančius baseino dugne. Metalinės konstrukcijos yra atsparios judėjimui net esant aukštam seisminio aktyvumo lygiui. Įvairių kuro rūšių saugojimo atveju, įskaitant ir lengvojo vandens reaktorius, lentynos išlaiko kuro rinkles vertikaloje padėtyje ir palaiko atstumą tarp rinklių, kad nebūtų pasiektas subkritiškumas. Rinklės paprastai įdedamos ar išimamos iš lentynos jas laikant vertikaloje padėtyje ir naudojant mechanines valdymo sistemas.

PBK baseinuose yra įrengtos aušinimo sistemos (siurbliai, šilumokaičiai ir kt.), kurios paprastai dirba esant 40 °C arba mažesnei temperatūrai. Kadangi baseino vanduo turi būti ypač kokybiškas, jis yra kruopščiai prižiūrimas ir stebimas. Dėl to PBK baseinuose įrengtos ir valymo sistemos, kurių paskirtis – palaikyti reikiamą vandens kokybę. Taip pat baseinuose yra nuotėkio aptikimo ir nuotekų surinkimo sistemos. Ne prie reaktoriaus esančiuose PBK aušinimo baseinuose įrengtos autonominės PBK iškrovimo (ir pakrovimo) sistemos, kurios pakrovimo ir iškrovimo zonos, dažnai vadinamos atraminiais padėklais, kurą perkelia į transportavimo konteinerius. PBK baseinams yra reikalinga vakuuminė konteinerių džiovinimo ir dezaktyvavimo sistema bei papildoma techninio aptarnavimo galimybė, pavyzdžiui, patikra ir techninė priežiūra.

Šiuo metu yra kuriamos pažangios panaudoto branduolinio kuro saugojimo baseino technologijos, kurias ateityje ketinama įdiegti į esamas sistemas, siekiant pašalinti šlapio saugojimo

trūkumus ir eksploataavimo sąnaudas. Kuriami patobulinimai yra labai įvairūs, pavyzdžiui, moduluojančios aušinimo ir vandens valymo sistemos baseino viduje (kurios eksploatuojamos po vandeniu), apsauginės betoninės dangos ant baseino viršaus ir t.t.

Pradiniame PBK saugojimo etape labiausiai paplitęs būdas yra šlapias saugojimas. Šlapio saugojimo metodas pasižymi tuo, kad jame vanduo atlieka šilumos nešėjo funkciją. Šiuo atveju PBK saugomas vandens baseinuose, kurie pagal jų konstrukcijas, PBK tvarkymą ir išdėstymą baseine skiriami į vieno baseino, nuoseklių bei lygiagrečių baseinų tipus.

1.2.2. Sausas saugojimas

Panaudoto kuro rinklės po keleto metų pradinio aušinimo vandens baseinuose (praėjus ~5 metams po įprasto kuro išdegimo laipsnio ir ~10 metų po aukšto kuro išdegimo laipsnio) patalpinamos sausose talpyklose ir toliau natūraliai jose aušta [17]. Pirminio aušinimo baseinuose vykstančiam procesui reikalingas minimalus laikas nustatomas atsižvelgiant į esamą kuro išdegimo ir radioaktyvumo lygį. Sausieji saugojimo metodai pagrįsti metalo ar betono naudojimu kaip apsauga nuo PBK radioaktyvios spinduliuotės. Sausojo saugojimo technologijos skirstomos pagal jų pagrindines technines charakteristikas: dominuojantis šilumos perdavimo metodas, ekranavimo metodas, talpyklos transportavimo galimybė, atskiros talpyklos nepriklausomumo laipsnis, saugyklos struktūra ir kt. Tarptautinėje rinkoje yra pardavinėjami įvairūs šių sausųjų konteinerių tipai. Taip pat daugėja ir saugyklų, kurios yra pritaikytos kiekvienai sauso saugojimo technologijai. Pastarosios skiriasi medžiagomis, konstrukcija, dydžiu, moduliavimu, panaudoto branduolinio kuro konfigūracija, konteinerių išdėstymu (vertikalus, horizontalus) bei tvarkymo metodu. Atsižvelgiant į visas charakteristikas yra skiriami trys pagrindiniai sausojo saugojimo būdai:

1. Metaliniai konteineriai;
2. Betoniniai konteineriai/moduliai;
3. Rūsiai.

1. **Metaliniai konteineriai.** Metaliniai konteineriai branduolinėje energetikoje jau seniai yra naudojami transportuojant panaudotą branduolinį kurą. Laikui bėgant tokio tipo talpyklos tapo vis patrauklesnės naudoti PBK saugojimui. Šie konteineriai yra trijų rūšių: 1. Vienos paskirties – skirti tik PBK saugojimui; 2. Dvejopos paskirties – skirti tiek saugojimui, tiek kuro transportavimui; 3. Daugiafunkciniai – skirti PBK saugojimui, transportavimui ir laidojimui [9]. Daugiafunkcinės technologijos šiuo metu yra kuriamos (kanistras, kuris skirtas saugojimui, transportavimui ir laidojimui), tačiau jų laidojimo galimybės vis dar nėra pakankamai iširtos.

Konteineriai kartais saugomi atvirose saugyklose, kur sustatomi ant betoninių pamatų arba laikomi sandėliavimo pastatuose – priklausomai nuo konteineriams keliamų reikalavimų. Metalinėse talpyklose panaudoto kuro rinklės yra laikomos kontroliuojamoje sausoje terpėje. Konteineriai

užpildomi inertinėmis dujomis ir užsandarinami po panaudoto branduolinio kuro įkrovimo. Pagrindinės ir dažniausiai naudojamos medžiagos tokių konteinerių gamybai yra kalusis ketus, nerūdijantysis plienas, modulinis ketus arba kitos kompozicinės medžiagos, kurios suteikia apsaugą nuo spinduliuotės poveikio ir gerai perduoda šilumą [8]. Dvigubo suvirinimo konteinerio dangčiai ir korpusas visiškai izoliuoja radioaktyvias PBK medžiagas ir užtikrina apsaugą avarijos metu [29]. Likutinė šiluma iš konteinerio yra pašalinama per korpuso sienes.

Konteineriai yra pats populiariausias PBK saugojimo būdas, kuris šiuo metu gali būti įsigytas ar išsinuomotas. Tarptautinėje rinkoje randama daug įvairių metalinių talpyklų modelių. Tačiau iš esmės visi metaliniai konteineriai yra pritaikyti gabenimui. O tai yra labai svarbus privalumas, atsižvelgiant į galimą konteinerių perkėlimą tolesniam jo saugojimo etapui. Kita vertus, tokių konteinerių kainos yra didesnės dėl jiems keliamų aukštesnių reikalavimų transportavimui.

2. **Betoninės talpyklos/moduliai.** Bendras techninis šių talpyklų bruožas yra betono, kaip apsaugos nuo radiacijos, panaudojimas jų gamyboje.

Tarptautinėje rinkoje yra siūlomi įvairaus dizaino betoniniai konteineriai, kuriuos galima suskirstyti į dvi pagrindines kategorijas: 1. Betono konteineriai ir 2. Betono moduliai [30].

Pagal geometrinę formą *betono konteineriai* yra panašūs į metalinius konteinerius. Betonas apsaugo nuo radioaktyvios spinduliuotės, o vidinis plieninis įdėklas, esantis betono korpuso ertmėje, konteineriui suteikia papildomą izoliaciją. Įdėklas uždaromas po panaudoto branduolinio kuro pakrovimo. Betono statinės gali būti natūraliai aušinamos arba vėdinamos. Talpyklos aušinimo sistema yra panaši į esančią metaliniuose konteineriuose, išskyrus tai, kad ventiliacijai pagerinti yra įdiegti įtekančio ir ištekančio oro srauto kanalai. Tai leidžia iš konteinerio efektyviau pašalinti šilumą. Tokiu būdu į betoninę talpyklą galima patalpinti PBK su didesniu likutinės šilumos išsiskyrimu.

Šie betono konteineriai gali būti saugomi horizontalioje arba vertikalioje padėtyje, atviroje aplinkoje arba pastate. Kadangi panaudotu branduoliniu kuru pakrauti betono konteineriai paprastai nėra transportuojami, todėl šiems konteineriams reikia pakrovimo (ir iškrovimo) patalpų iš/į transportavimo konteinerį (-ius). Betono konteineriai taip pat gali būti pagaminti kaip dvejetainės paskirties konteineriai (saugojimo ir transportavimo). Tačiau tokiu atveju konteineriams gali prireikti specialių šarvų ar papildomo sustiprinimo tam, kad jie atitiktų gabenimo reikalavimus.

Betono moduliai yra didelės monolitinės konstrukcijos, paprastai turinčios gelžbetonines sienas, kurios yra stacionarios ir pritvirtintos prie pamato. Betono modulis suteikia radiacinę apsaugą, o izoliavimas yra pasiekiamas PBK rinkles patalpinant į kanistrus. Kanistrai yra izoliuojami tuomet, kai yra pakraunami panaudotu kuru. Vidinis aušinimas betono moduluose leidžia padidinti šilumos nuvedimą iš talpyklos natūralios konvekcijos būdu ir apsaugo nuo perkaitimo bei betono degradacijos. Tai yra reikšminga tokio tipo talpyklų ypatybė, kuri leidžia pakrauti karštą PBK

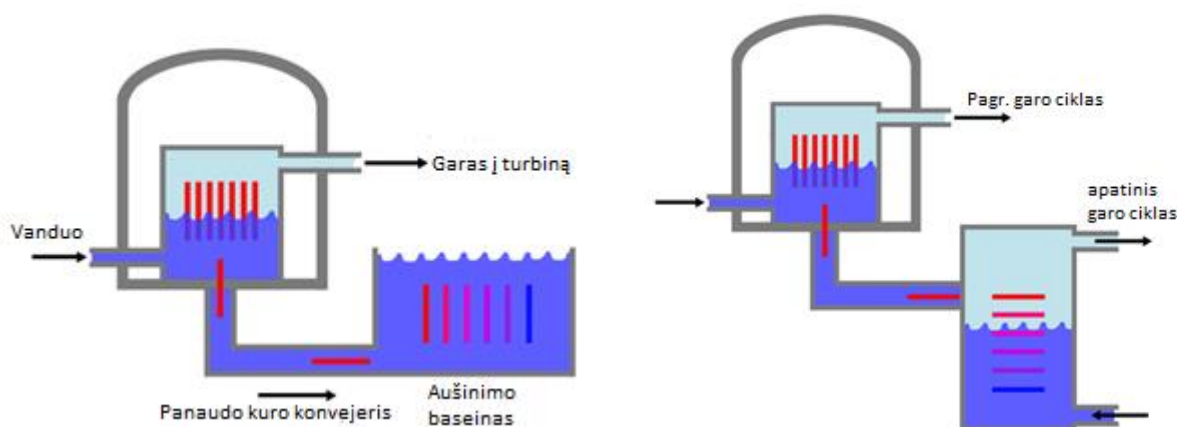
dideliais kiekiais. Tačiau panašios PBK saugojimo sistemos taip pat reikalauja pakrovimo (ir iškrovimo) patalpų iš/i transportavimo konteinerį (-ius).

3. **Rūsiai.** Rūsiai yra sustiprinta ir ekranuota betono struktūra, turinti saugojimo kamerų masyvus, pastatytus virš arba žemiau žemės paviršiaus. Pats rūsys gali būti gana paprastos konstrukcijos, bet jiems reikalinga papildomos infrastruktūros įdiegimas panaudoto kuro rinklių priėmimui ir tvarkymui. Rūsiuose apsaugą nuo radioaktyvios spinduliuotės teikia rūsio sienos [24]. Komerciniai rūšiai yra įrengiami virš žemės paviršiaus, o šiluma paprastai perduodama į atmosferą oro konvekcijos būdu per kanalo angas. Kiekvienoje kameroje arba ertmėje gali būti viena ar daugiau panaudoto branduolinio kuro rinklių, patalpintų į metalinius vamzdžius ar cilindrus [22]. Į šiuos vamzdžius PBK yra pakraunamas kuro saugojimo vietoje, pakrovimo salėje arba prie reaktorių esančiuose baseinuose.

Kai kuras išdžiovinamas, jis patalpintas į sauso saugojimo talpyklas. Jose aušinimas palaikomas natūralia oro konvekcija. Talpyklos skiriamos į metalinius konteinerius, betoninius konteinerius ir rūšius. Vertinant ilgalaikį PBK saugojimą, ekonomiškumą ir saugumą, galima teigti, kad natūralus aušinimas sausosiose talpyklose yra patrauklesnė alternatyva nei šlapias saugojimas aušinimo baseinuose.

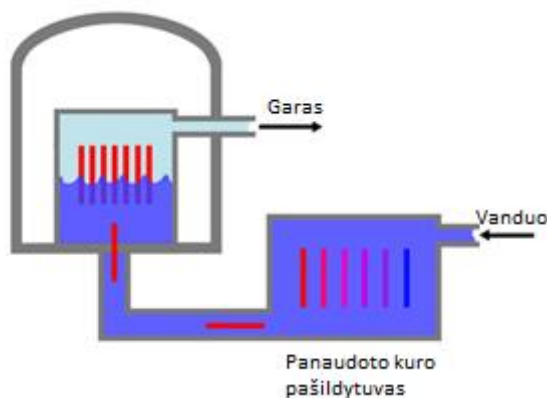
1.3. PBK likutinės šilumos panaudojimo galimybės

Net ir ištrauktuose iš reaktoriaus kuro elementuose dar ilgai vyksta beta ir gama dalelių skilimas [35]. Šis procesas generuoja šilumą, kuri dažniausiai nebūna tikslingai panaudojama (žr. 6 a) pav.). Tačiau šiuo metu yra galimybės likutinę šilumą naudoti: 1. Garo gamybai; 2. Vandens pašildymui; 3. Radioizotopinio termoelektrinio generatoriaus veiklai.



a) Šiuo metu taikoma technologija

b) Likutinės šilumos panaudojimas garo gamybai



c) Likutinės šilumos panaudojimas vandens pašildymui

6 pav. PBK likutinės šilumos panaudojimo technologijos [35]

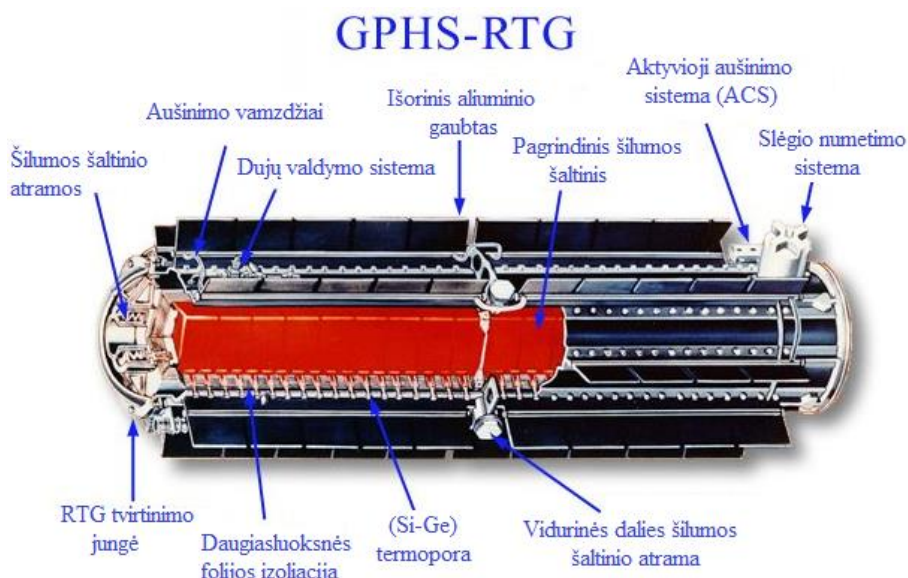
Pirma, likutinė šiluma gali būti naudinga garo gamybai (žr. 6 b) pav.). Garas gali būti gaminamas iš baseine esančio vandens. Šiuo metu aušinimo baseinai yra naudojami visur, nes jų konstrukcija yra ypač paprasta. O kuo paprastesnė yra konstrukcija, tuo mažiau šansų yra kažkam sugesti. Kita vertus, jeigu garas būtų gaminamas aušinimo baseine, jo konstrukcija taptų daug sudėtingesnė. Sugedus pagalbinio ciklo turbinai ar šilumokaičiui, būtų sunku sutaisyti įrenginius neprisiartinus arti radioaktyvių atliekų. Taip pat, aktyvaus aušinimo gedimo baseine atveju, gali būti sustabdytas visos elektrinės darbas. Taip pat aušinimo baseinuose vanduo atlieka ne tik aušinimo, bet ir apsaugos nuo radiacijos vaidmenį. Jei būtų įrengiamas šilumokaitis šilumos nuvedimui, kai kuriose PBK baseino dalyse yra tikėtinas virimas, todėl kuro rinklės bus apsuptos garu, o tai reikš suprastėjusią apsaugą nuo radiacijos poveikio. Žinoma, vanduo gali būti suslegiamas, taip užkertant kelią virimui, tačiau tai sukelia grėsmę ilgalaikiam kuro saugojimui. Lengviausiai būtų įgyvendinti ciklą su išlydyta druska, kuri neverda šiluminio ciklo šilumokaityje net prie atmosferinio slėgio. Tačiau, įgyvendinat tokį ciklą, būtų gaunamas mažas atsiperkamumas ir naudingumas.

Investuojant į tokią likutinės šilumos panaudojimo sistemą reikia žinoti, kad bus būtina įrengti nepriklausomas vandens maitinimo, garotiekio sistemas. Taip pat reikia mažos turbinos, kuri generuotų sąlyginai nedidelį kiekį elektros energijos, kondensatoriaus, apsauginių vožtuvų bei kitų apsauginių sistemų. Kadangi visa ši sistema bus ypač radioaktyvi, tokią elektrinę reikės klasifikuoti kaip branduolinę ir taikyti visus branduolinei energetikai taikomus saugos reikalavimus.

Yra galimybė likutinę šilumą naudoti reaktoriaus kontūro maitinimo vandens šildymui (žr. 15 c) pav.). Tačiau šis būdas taip pat kelia problemų. Vanduo, kuris yra naudojamas aušinti panaudotą branduolinį kūrą, yra užterštas. Skilimo produktai nuolat mažais kiekiais išplaunami nuo panaudoto branduolinio kuro rinklių. Jei šis vanduo nėra filtruojamas, tuomet skilimo produktai sukelia radiacijos padidėjimą ir galimą grėsmę oro užterštumui. Filtrai, kurie naudojami panaudoto branduolinio kuro baseinuose, yra su derva, kuri neatlaiko didesnės nei 60 °C temperatūros (normaliu

atveju temperatūra turi būti laikoma ne didesnė nei 50 °C), todėl tai riboja maksimalią temperatūrą panaudoto branduolinio kuro baseine.

Kitas likutinės šilumos panaudojimo būdas yra radioizotopinis termoelektrinis generatorius (RTG, RITEG). Tai likutinės šilumos pagrindu veikiantis elektrinis generatorius, kuris dirba pagal termoporos veikimo principą (16 pav.) [10].



7 pav. RTG generatorius [10]

RTG yra naudojami palydovuose, kosminiuose zonuose, nepilotuojamuose valdymo įrenginiuose, tokiuose kaip švyturiai Arkties vandenyne. RTG dažniausiai pageidaujami neprižiūrimose sistemose, kur reikia keleto šimtų vatų (ar mažiau) galios.

RTG veikimo procese nėra jokių judančių dalių. RTG konvertuoti šilumai iš radioaktyviųjų medžiagų į elektrą naudoja termoporas. Termoporos, nors ir labai patikimos bei ilgalaikės, tačiau yra labai neefektyvios. Jas naudojant niekada nebuvo pasiektas didesnis nei 10 % našumas, todėl daugumos RTG efektyvumas yra tik 3–7 %. Iki šiol kosmoso misijose naudojamos termoelektrinės medžiagos būdavo silicio–germanio lydiniai, švino telūridas ir stibio telūridai, germanis ir sidabras (TAGS).

Siekiant pagerinti elektros energijos generavimą, buvo atlikti tyrimai naudojant kitas technologijas. Katodinis keitiklis – tai energijos konversijos įrenginys, kuris veikia katodinės emisijos principu. Jį naudojant galima pasiekti 10–20 % efektyvumą, tačiau tam reikalinga aukštesnė temperatūra negu standartiniuose RTG. Kai kuriuose RTG Po-210 prototipuose buvo naudojami katodiniai keitikliai. Taip pat buvo bandoma panaudoti ir kitus radioaktyvius izotopus, tačiau tai padaryti buvo neįmanoma dėl trumpos jų pusėjimo trukmės. Keletas kosmose plaukiojančių branduolinių reaktorių naudoja katodus, tačiau jie yra per sunkūs naudoti daugelyje kosminių zondų.

Termofotovoltiniai kuro elementai atlieka tokias pat funkcijas kaip fotovoltiniai kuro elementai. Skiriasi tik tai, kad termofotovoltiniai elementai karšto paviršiaus skleidžiamus infraraudonuosius spindulius konvertuoja į elektros energiją, o ne regimąją šviesą. Termofotovoltiniai kuro elementai yra šiek tiek efektyvesni negu termoporos ir pastarosios jais gali būti apdengiamos siekiant potencialiai padvigubinti efektyvumą. Modeliuojant radioaktyviųjų izotopų generatorių sistemą su elektros šildytuvais buvo nustatytas 20 % didesnis efektyvumas. Tačiau tai nebuvo išbandyta su realiais radioaktyviausiais izotopais. Kai kurie teoriniai termofotovoltiniai generatorių prototipai pasižymi efektyvumu iki 30 %, tačiau jie dar turi būti patvirtinti ir pagaminti. Būtina pažymėti, kad termofotovoltiniai kuro elementai ir silicio termoporos degraduoja daug greičiau nei metalo termoporos, ypač esant intensyviai jonizuojančiai spinduliuotei [5].

Dinaminiai generatoriai gali suteikti 4 kartus didesnę galią nei RT generatoriai. nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija (NASA) ir Energijos departamente (DOE) buvo kuriamas naujos kartos radioizotopais varomas maitinimo šaltinis, vadinamas Stirlingo radioizotopo generatoriumi (SRG). SRG naudoja stūmoklinius prie generatorių prikabintus Stirlingo variklius, kuriais šiluma konvertuojama į elektros energiją. SRG prototipai parodė vidutinį 23 % efektyvumą. Didesnis efektyvumas gali būti pasiektas didinant temperatūros santykį tarp karšto ir šalto generatoriaus galų. Nekontaktuojančiose judančiose dalyse, nedegraduojančiuose lenkiamuosiuose guoliuose, savaiminio sutepimo ir sandarumo sistemose bandymų metu nebuvo pastebėta jokių pastebimų senėjimo požymių. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad SRG be priežiūros gali būti eksploatuojamas ne vieną dešimtmetį. Galimas Stirlingo radioizotopo generatoriaus taikymas apima žvalgybines ir mokslines misijas kosmose[31].

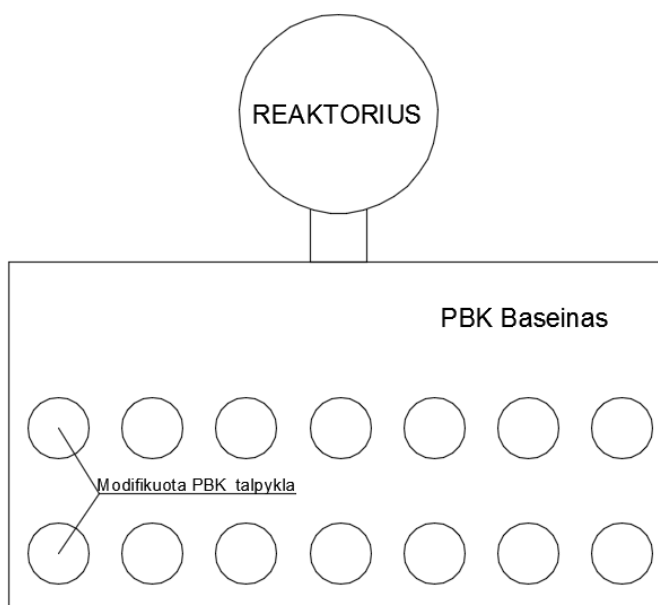
Nors dažniausiai likutinė šiluma nėra panaudojama, tačiau tam padaryti šiuo metu yra nemažai galimybių. Ją galima naudoti garo gamybai, vandens pašildymui ar radioizotopinio termoelektrinio generatoriaus veiklai. Peržvelgus šias likutinės šilumos panaudojimo galimybes, galima teigti, jog praktikoje naudojami tik RTG principu veikiantys įrenginiai. Likutinės šilumos panaudojimas garo gamybai ar reaktoriaus vandens šildymui nors ir yra pakankamai ištirti, tačiau dėl techninių galimybių kol kas dar netaikomi praktikoje.

2. PBK LIEKAMOSIOS ŠILUMOS PANAUDOJIMO TECHNOLOGIJA

2.1. Technologijos aprašymas

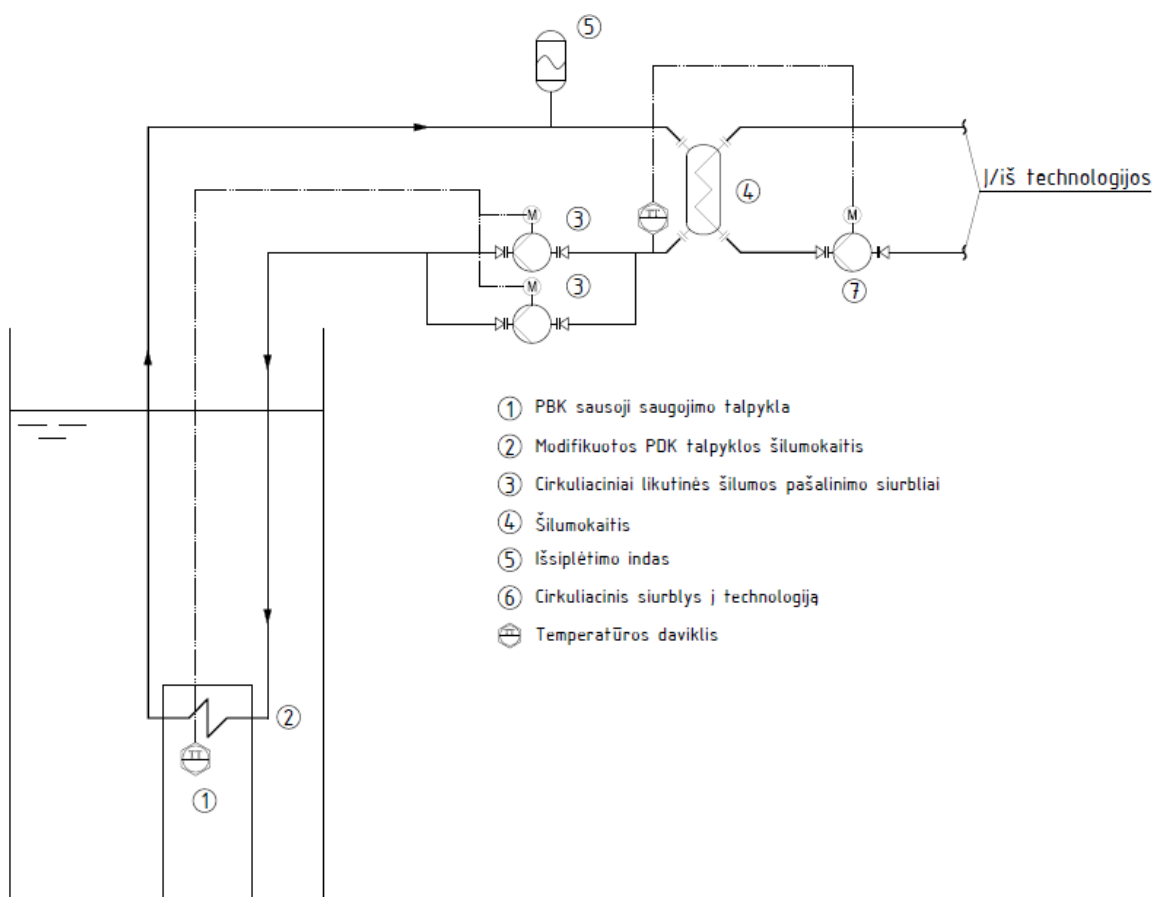
Siekiant pritaikyti PBK saugojimo technologijas likutinės šilumos panaudojimo tikslams, reikia modifikuoti esamas sauso ir šlapio saugojimo technologijas. Tik efektyviai išnaudojant esamą, o ne kuriant naują PBK tvarkymo įrangą, galima pasiekti geriausią rezultatą. Modifikuojant šiuolaikines saugojimo technologijas būtų galima minimizuoti likutinės šilumos panaudojimo technologijos kaštus. Taip pat išliktų PBK saugojimo patirtis, kuri yra sukaupta per visą panaudoto branduolinio kuro saugojimo istoriją. Esamų saugojimo technologijų modifikavimas ne tik sutaupyti kaštų, skirtų naujų likutinės šilumos panaudojimo technologijų diegimui, bet ir laiko, skirto joms įsisavinti. Tad toliau darbe analizuosime vieną iš galimų saugojimo technologijų modifikavimo būdų, kuriais likutinė šiluma būtų efektyviai panaudojama atominės elektrinės technologiniame procese.

Pagal likutinės šilumos panaudojimo technologiją, kurią aptarsime šiame darbe, pirmiausia, baseino dugne yra panardinamos ir lygiagrečiai viena kitai sustatomos modifikuotos, panaudoto branduolinio kuro sausam saugojimui skirtos, talpyklos. Tada panaudoto branduolinio kuro rinklės yra ištraukiamos iš reaktoriaus aktyviosios zonos ir transportuojamos į PBK baseine esančias talpyklas (žr. 8 pav.).



8 pav. Talpyklų, patalpintų į PBK baseiną planas.

Principinė technologinio proceso schema yra pavaizduota 9 pav. Panaudotas branduolinis kuras yra patalpintas į sausąją talpyklą (1), į kurią yra integruotas PBK likutinei šilumai iš talpyklos pašalinti skirtas vandens–vandens šilumokaitis (2). Jis vamzdynais prijungiamas prie tarpinio šilumokaičio (4). Tarpinis šilumokaitis yra sujungiamas su atominės elektrinės technologiniu vamzdynu. Vandens tekėjimas likutinės šilumos pašalinimo iš talpyklos sistemoje yra sukeliamas cirkuliaciniais siurbliais (3). Siurbliai veikia pagal PBK sausojoje talpyklose esančio temperatūros daviklio išduodamą signalą. Pagrindinio kontūro vandens išsiplėtimui, atsiradusio dėl temperatūrų pokyčio vamzdyne, numatomas išsiplėtimo indas (5), kuris neutralizuos po vandens išsiplėtimo atsiradusį tūrio padidėjimą. Cirkuliacija iš atominės elektrinės technologijos pusės gaunama cirkuliacinio siurblio (6) pagalba. Siurblys veikia pagal PBK talpyklos temperatūrą ir debitą prieš tarpinį šilumokaitį.



9 pav. Modifikuotos PBK likutinės šilumos nuvedimo sistemos principinė schema.

Svarbus šios sistemos privalumas yra tai, kad atominė elektrinė nėra priklausoma nuo nagrinėjamos sistemos veikimo. Įvykus gedimui, dėl kurio yra stabdoma PBK likutinės šilumos nuvedimo sistema, atominės elektrinės darbas nėra sutrikdomas. Taip yra todėl, kad PBK likutinės šilumos kontūras yra atskirtas nuo pagrindinio atominės elektrinės ciklo tarpiniu šilumokaičiu.

10 paveiksle yra pavaizduota šilumokaičio projektavimo struktūrinė schema. Pirma sąlyga, kurią privalo tenkinti šilumokaitis, yra proceso reikalavimai. Todėl šilumokaičių konstrukcijos techninėse sąlygose apibrėžiama visa būtina detali informacija apie srautų debitus, darbinį slėgį ir jo nuostolius, šilumokaičio dydį, ilgį, temperatūrą ir kitus apribojimus, tokius kaip kaštai, medžiagos ir jų savybės, šilumokaičio tipas, tekėjimo režimas. Tačiau šiame darbe nesiekama vertinti ekonominių, mechaninių, saugumo, eksploatacijos ir kt. veiksnių. Tyrimas apsiribojamas termohidraulinių šilumokaičio procesų analize, nes tai yra pirmas uždavinys, kurį būtina atlikti, norint tęsti tolimesnius (saugumo, kritiškumo ir kt.) tyrimus. Tad šiame darbe dėmesys skiriamas šilumos mainų tarp panaudoto branduolinio kuro sausosios talpyklos ir šilumokaičio bei jame vykstančių hidraulinių pasipriešinimų analizei. Dėl informacijos stygiaus, yra galimas trūkstamų parametrų numatymas remiantis patirtimi ar prielaidomis[20].

Priklausomai nuo darbo uždavinio specifikacijos yra parenkama šilumokaičio konstrukcija, tekėjimo pobūdis, paviršius ir vidinė geometrija bei medžiagos. Apsibrėžus šias sąlygas yra numatomas darbinis slėgis ir temperatūra, reikalavimai remontui, patikimumas, saugumas, šilumokaičio detalių gamyba ir kaštai.

Šilumokaičio konstrukcija gali būti skirstoma pagal dydžio parinkimo (konstrukcinį) ir našumo (eksploatacinį) uždavinius. Dydžio parinkimo uždavinio metu yra žinomas paviršiaus plotas, o reikia rasti šilumokaičio matmenis. Pradiniai duomenys šio skaičiavimo metu yra:

- Debitai
- Fluido įtekėjimo temperatūros
- Viena fluideo ištekėjimo temperatūra
- Paviršiaus geometrinė forma
- Leidžiami slėgio nuostoliai
- Srautų ir medžiagų termodinaminės savybės

Lyginimo analizėje šilumokaitis jau egzistuoja arba jis yra apytiksliai parinktas. Tokiu atveju pradiniai duomenys turėtų būti tokie:

- Šilumokaičio geometrinės ypatybės ir matmenys,
- Fluido debitai,
- Įtekėjimo temperatūros
- Leidžiami slėgio nuostoliai

Išeinančio fluideo temperatūra, bendra perduodama šiluma ir slėgio nuostoliai šilumokaityje gali būti apskaičiuojami naudojant lyginamuosius skaičiavimus. Lyginamojo skaičiavimo metu rezultatas yra tinkamas tada, kai yra tenkinamos dvi sąlygos – minimalūs leidžiami šilumos mainai ir maksimalūs leidžiami slėgio nuostoliai. Dažnai nutinka taip, kad yra nustatoma keletas modifikacijų, kurios tenkina šias sąlygas. Tada pasirinkimas turi remtis koku nors kitu kriterijumi, pavyzdžiui,

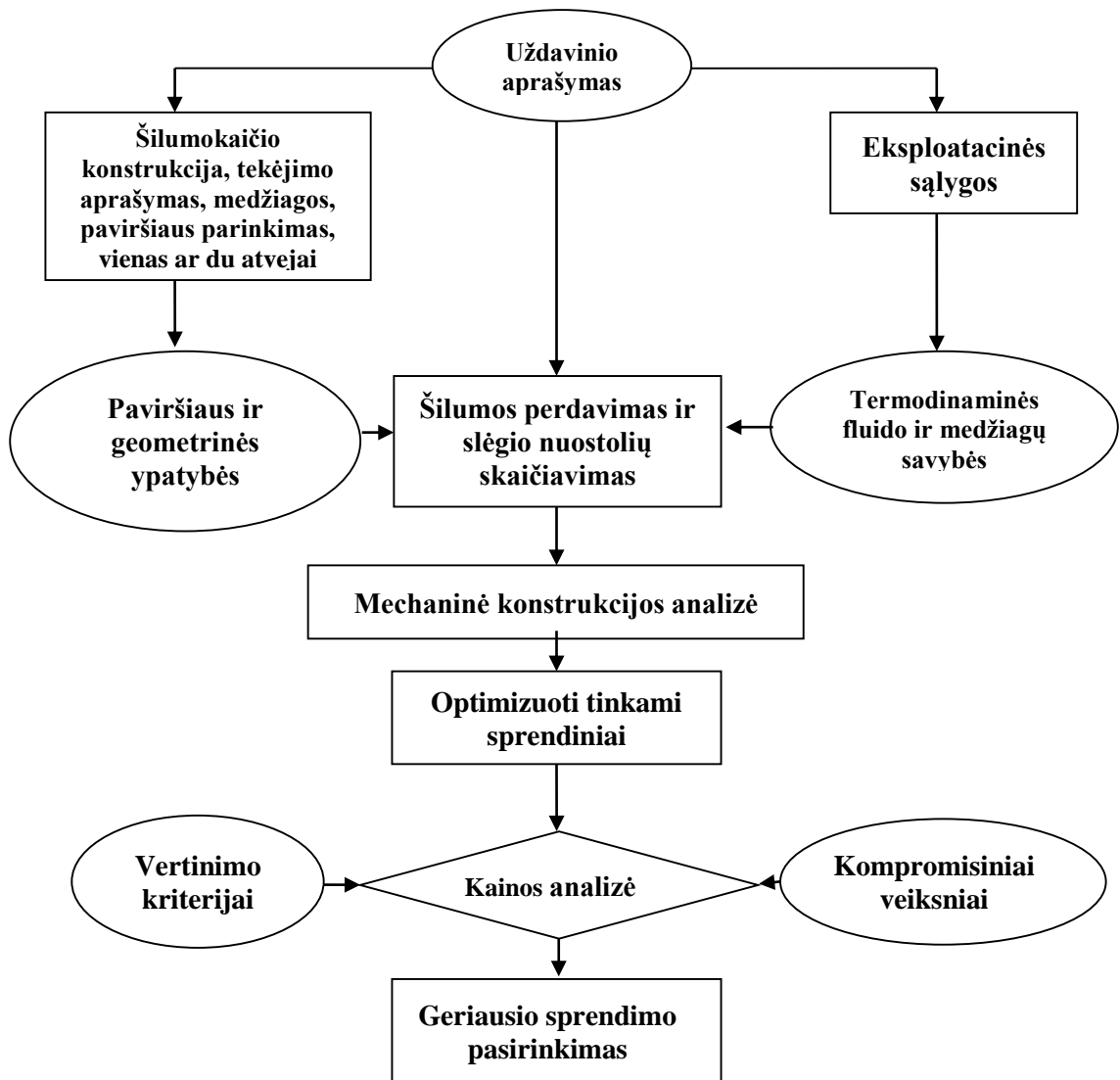
kaina. Kai minėtos sąlygos nėra tenkinamos, reikia parinkti naują šilumokaičio konstrukciją kitam vertinimui. Metodus, kurio metu skaičiavimai grindžiami šilumokaičių modelių keitimu, yra vadinami modifikacijomis[19]. Vertinimas yra atliekamas skaitiniais metodais, kuriais yra aprašomi slėgio nuostoliai ir šilumos mainai šilumokaityje.

Parentant šilumokaitį taip pat reikia įvertinti ir tai, kaip jis atlaikys eksploatacijos metu susidariusias mechanines apkrovas.[20] Todėl po šiluminės analizės seka konstrukcinė analizė. Ją sudaro plokštelių kiekio, vamzdžių, korpuso storių skaičiavimai. Medžiagos turi būti atsparios korozijai, kuri atsiranda dėl fluido tekėjimo ar aplinkos poveikio. Taip pat reikia numatyti optimalias įėjimo ir išėjimo atvamzdžių vietas, laikančiąsias konstrukcijas ir jų medžiagas, slėgio ir temperatūros prietaisų vietas bei vamzdynus. Turi būti atliktas ir terminių įtempimų skaičiavimas stacionarioje ir nestacionarioje būsenose. Galiausiai reikia neužmiršti įvertinti ir kitus faktorius, kurie gali sukelti neigiamų pasekmių šilumokaičio darbui – tai vibracijos, srautų greičiai ir kt.

Sekantis kriterijus, kurį būtina įvertinti projektuojant šilumokaitį – tai jo remontas gedimo atveju. Šilumokaičio konfigūracija ir padėtis yra kruopščiai parenkama tuo tikslu, kad būtų kuo paprasčiau aptarnauti (išvalyti ar pakeisti vamzdžius, tarpines ir kitas detales) Taip pat reikia apmąstyti ir eksploataciją agresyviose aplinkose ar transportavimo metu.

Įvertinus mechanines šilumokaičio charakteristikas, telieka atlikti kaštų analizę. Kaštai yra skaičiuojami pagal optimalią konstrukciją, t.y. šilumokaitis yra parenkamas pagal ekonomiškumo (mažiausių kaštų, kurie tenkina visus keliamus reikalavimus) principą. Šilumokaičio kaštus sudaro kapitaliniai kaštai (medžiagos, gamyba, bandymai, transportavimas ir montavimas) ir eksploataavimo kaštai (savųjų reikmių energijos kaštai, valymas, remontas ir t.t.). Be to, yra tarpusavyje susijusių veiksnių, kuriuos reikia įvertinti optimizuojant šilumokaičio konstrukciją ir kaštus.

Šilumokaičio parinkimo uždavinys yra labai sudėtingas procesas. Tik dalį projektavimo sudaro kiekybinis analitinis vertinimas. Dėl didelio kiekio kokybinių prielaidų ir vertinimų, šilumokaičio projektavimas yra daugiau kūryba, o ne mokslas[20]. Esant neapibrėžtumams, tam pačiam technologiniam procesui galima sukurti be galo daug įvairiausių rūšių šilumokaičių.

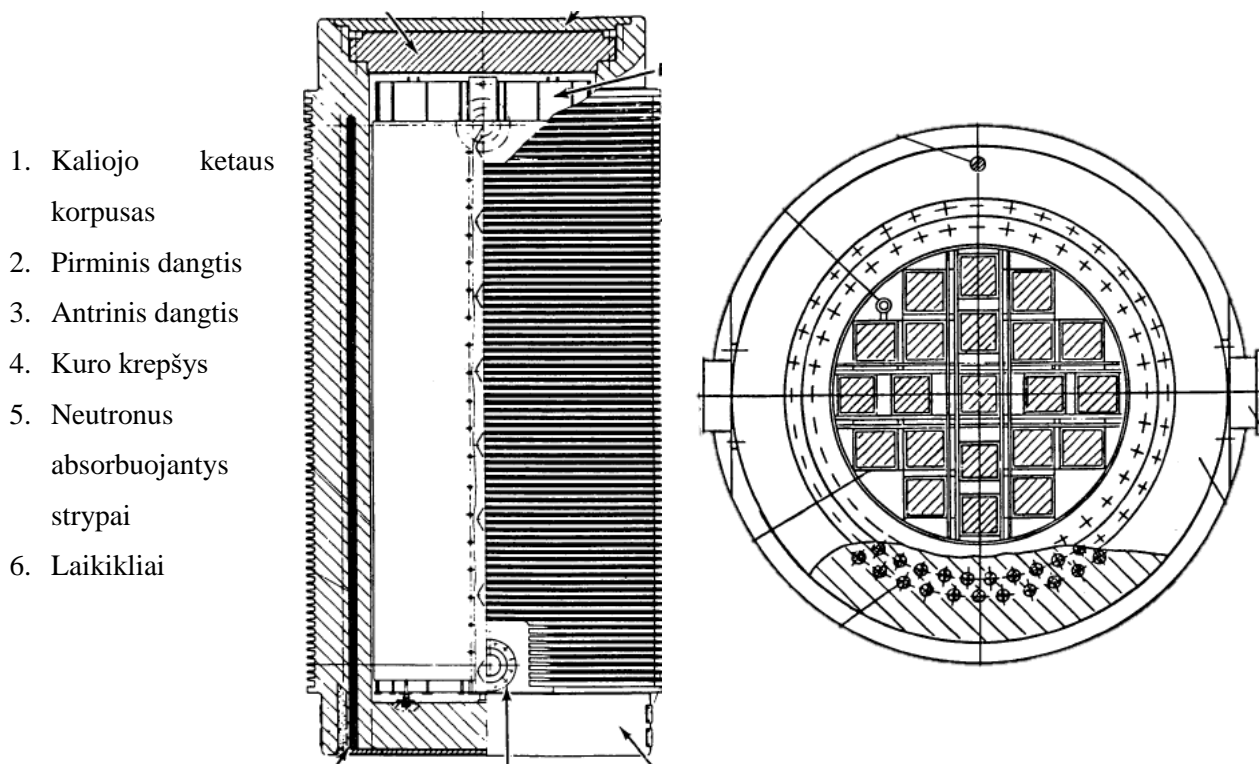


10 pav. Šilumokaičio projektavimo funkcinė schema[20]

Dėl mažesnių kaštų ir laiko sąnaudų, esamos PBK sistemos modifikavimas, o ne naujos kūrimas, yra ypač naudingas aspektas siekiant efektyviai panaudoti likutinę šilumą. Tačiau siekiant tai padaryti, būtina atsižvelgti į daugybę skirtingų faktorių. Svarbu apskaičiuoti minimalius leidžiamus šilumos mainus, maksimalius leidžiamus slėgio nuostolius, terminus įtempimus, būtina nustatyti kaip šilumokaitis atlaikys eksploatacijos metu susidariusias mechanines apkrovas ir kt. Kuriant PBK likutinės šilumos panaudojimo sistemą yra sujungiami sauso ir šlapio saugojimo būdai. PBK patalpinamas į sausąją talpyklą, į kurią integruojamas likutinei šilumai iš talpyklos pašalinti skirtas vandens–vandens šilumokaitis. Vandens tekėjimas likutinės šilumos pašalinimo iš talpyklos sistemoje yra sukeliama cirkuliaciniais siurbliais, kurie veikia pagal PBK sausojoje talpyklose esančio temperatūros daviklio išduodamą signalą. Svarbu paminėti, jog atominė elektrinė nėra priklausoma nuo šios sistemos veikimo, tad joje įvykus gedimui, atominės elektrinės darbas nėra sutrikdomas.

2.2. PBK talpykla

Šiame darbe skaičiavimams buvo naudojama CASTOR–V/21 PBK talpykla [2]. Tai viena iš trijų Jungtinių Amerikos Valstijų Energetikos departamento (angl. U.S. Department of energy) testuotų PBK talpyklų. CASTOR V-21 talpykla pavaizduota 11 pav.



11 pav. CASTOR-V/21 panaudoto branduolinio kuro talpykla [2]

Šios talpyklos korpusas yra monolitinis, cilindro formos kūnas, kuris sudarytas iš pilkojo ketaus. Ši medžiaga teikia stiprumą ir elastingumą, taip pat apsaugo nuo gama spinduliuotės. Bendras talpyklos korpuso aukštis yra 4886 mm, o skersmuo – 2385 mm. Išoriniame paviršiuje yra 73 šilumos perdavimą padidinančios briaunos. Be to, visas korpuso paviršius padengtas epoksidiniais korozijai atspariais dažais.

Korpuso sienelių storis (be briaunų) yra 380 mm storio. Korpuso viduje yra integruoti polietileno strypai, apsaugantys nuo neutronų spinduliuotės. Strypai yra išdėstyti dviem eilėmis aplink visą talpyklą. Iš abiejų talpyklos pusių yra prisukta po du keliamuosius laikiklius.

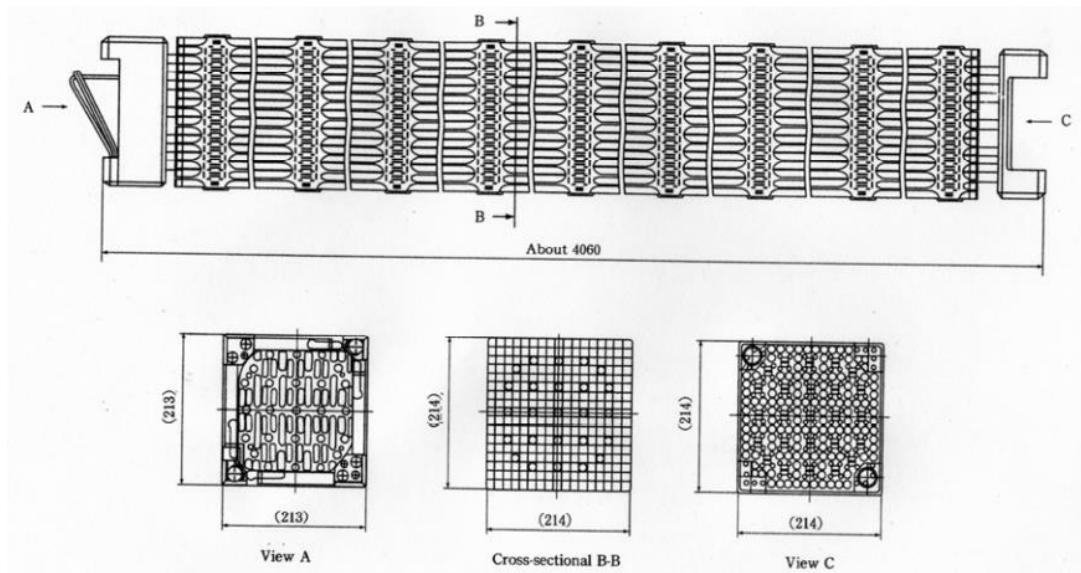
Vidinės korpuso ertmės skersmuo yra 1527 mm, o bendras aukštis – 4152 mm. Korpuso atvirame gale yra ištekinti preciziškai apdirbti paviršiai, kurie užtikrina sandarų tarpinės užspaudimą. Be to, korpuse yra ištekintos skylės varžtams, kuriais pritvirtinamas pirminis ir antrinis dangčiai. Galiausiai visi vidiniai paviršiai, įskaitant ir uždaromuosius paviršius, yra papildomai galvaniziškai padengti nikelio sluoksniu.

PBK krepšys yra cilindrinė struktūra, suvirinta iš nerūdijančio plieno ir nerūdijančio boruoto (1 %) plieno plokščių, kurios skirtos kritiškumo valdymui. Krepšį sudaro dvidešimt vienas kvadratinis kuro kanalas. Šie vamzdiniai kanalai saugojimo metu kuro rinklę palaiko vertikaliaje padėtyje. Krepšio aukštis yra 4110 mm (įskaitant keturis talpyklos korpuso ertmės dugne esančius 130 mm skersmens pamatus, laikančius visą krepšio ir PBK rinklių svorį). Krepšio, kuris tiksliai įsistato į korpuso ertmę, išorinis diametras yra 1524 mm. Kiekvieno kuro vamzdelio gylis yra 4050 mm. Tarpas tarp krepšio ertmės viršaus ir pirminio dangčio vidinio paviršiaus yra 74 mm. Tokiu būdu CASTOR–V/21 talpykloje gali būti kuro rinklės, kurių ilgis yra ne didesnis nei 4124 mm. Taip pat, dėl talpykloje esančio tarpo tarp krepšio ir dangčio, yra galimas fluido šilumos perdavimas konvekcijos būdu.

Nerūdijančio plieno pirminis dangtis yra 1785 mm skersmens ir 290 mm storio. Dangtyje yra išgręžtos keturiasdešimt keturios skylės varžtams, kuriais dangtis pritvirtinamas prie korpuso. Taip pat yra ištekinti du grioveliai per visą dangčio apatinės dalies apkritimo ilgį. Pirmajame griovelyje yra įstatoma „C“ formos tarpinė, kuri yra pirmasis apsaugos barjeras tarp panaudoto kuro ir aplinkos.

Likęs nepaminėtas CASTOR–V/21 PBK sausosios talpyklos elementas – tai 2007 mm skersmens ir 90 mm storio nerūdijančio plieno antrinis dangtis. Dangtyje yra ištekintos 48 skylės varžtams, kurie skirti jo pritvirtinimui prie korpuso. Vidiniame dangčio paviršiuje yra du grioveliai, skirti „C“ ir „O“ formos sandarinimui prie pirminio dangčio.

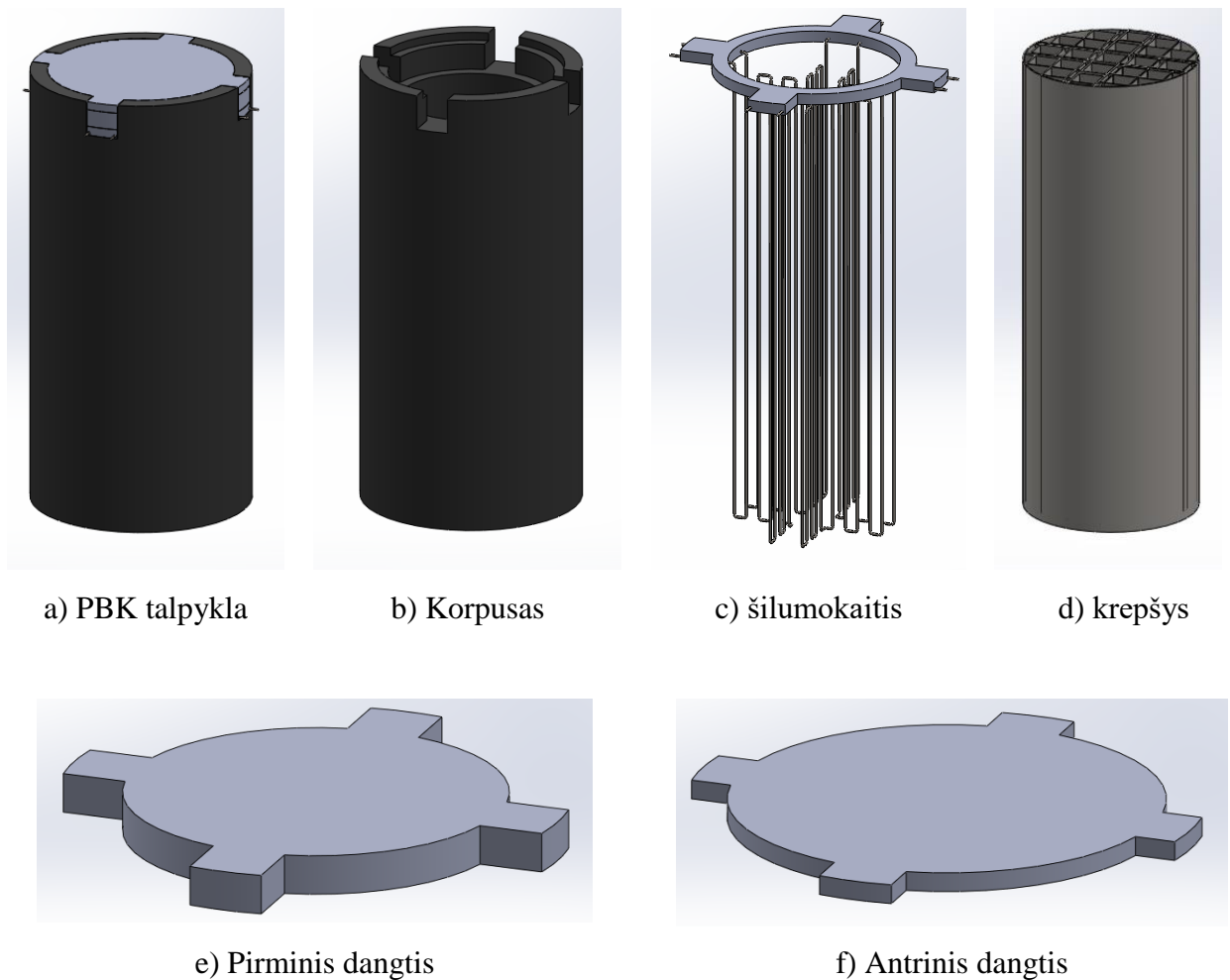
Struktūrinis panaudoto branduolinio kuro rinklės brėžinys pavaizduotas 12 pav. Kuro rinklė yra sudaryta iš 264 kuro strypų, išdėstytų kvadrato 17x17 profiliu, vienos aktyviosios zonos stebėjimo kapsulės, 24 valdymo strypus kreipiančių žiedų, 9 atraminių tinklelių ir dviejų antgalių (vienas viršuje, kitas apačioje). Kuro strypas sudarytas iš apvalaus Cirkalojaus-4 apvalkalo vamzdelio, kuriame patalpintas prisodrintas urano dioksidas. Kuro elementų stabilumą palaiko viršutinėje dalyje esanti nerūdijančio plieno spyruoklė. Abu Cirkalojaus-4 vamzdelio galai suvirinami. Prieš suvirinant kuro strypo galus, jo vidus yra pripildomas helio dujomis. Kuro strypas yra sudarytas taip, kad turėtų viršutinį plenumą ir atitinkamą tarpą tarp kuro elemento ir apvalkalo, siekiant išvengti neleistinų įtempimų apvalkale arba galinėse jungiamosiose siūlėse.[34]



12 pav. Talpinamų PWR kuro rinklių principinė schema [34]

Norint pritaikyti esamą sauso panaudoto branduolinio kuro talpyklą likutinės šilumos panaudojimo tikslams, reikia ją modifikuoti. Pakeitimai turi nesumažinti arba bent jau stipriai nepabloginti saugumui, eksploatacijai, techninei priežiūrai keliamų reikalavimų. Taip pat talpyklos elementai turi būti kuo paprastesni, kad nepadidintų kapitalinių PBK talpyklos kaštų. Įvertinus tai yra suprojektuota nauja PBK talpykla, kuri pavaizduota 13 pav.

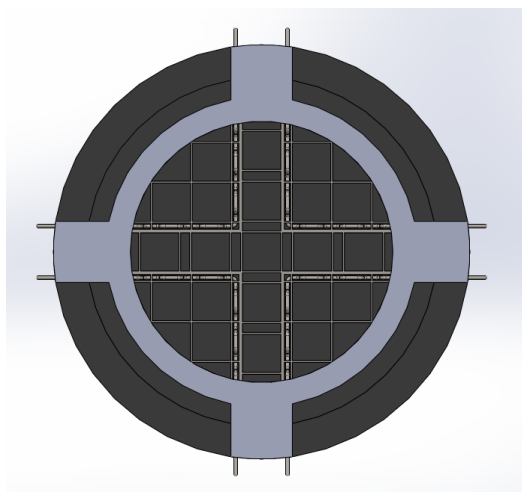
Tai CASTOR–V/21 PBK talpyklos modifikacija, skirta PBK likutinės šilumos potencialui išnaudoti. Modifikuotą talpyklą (žr. 13 pav. (a)) sudaro: (b) kaliojo ketaus korpusas, (c) nerūdijančiojo plieno šilumokaitis, (d) nerūdijančiojo plieno boruotas krepšys, (e) nerūdijančiojo plieno pirminis ir (f) antrinis dangčiai. Talpyklos korpuse, lyginant su originaliu CASTOR–V/21 talpyklos modeliu, buvo pridėtos keturios papildomos 390 mm gylio išpjovos viršutinėje korpuso dalyje. Jos skirtos modifikuotos talpyklos šilumokaičio padėčiai užfiksuoti. Vienos išpjovos plotis yra apie 350 mm. Ant vidinio korpuso pagrindo yra padarytos 75 mm kolonos PBK krepšiui ir PBK rinkei užfiksuoti.



13 pav. Modifikuotos PBK schema.

Nerūdijančiojo plieno šilumokaitis yra sudarytas iš 4 nepriklausomų 33,7 mm išorinio diametro nerūdijančiojo plieno vamzdžių. Vamzdžių bendras ilgis yra 160 metrų. Vamzdynai yra išdėstyti tarp kuro krepšio sienelių. Toks išdėstymas leidžia panaudotą branduolinį kurą saugiai pakrauti į talpyklą. Nerūdijančiojo plieno vamzdžiai yra pritvirtinti prie tvirtinimo elemento, kuris užfiksuoja šilumokaitį talpykloje ir sudaro prieigą į PBK talpyklos vidų iš išorės. Tvirtinimo elementas yra 751 mm vidinio bei 892,5 mm išorinio skersmens, o aukštis – 100 mm.

Po šilumokaičio sumontavimo krepšys įdedamas į korpusą. Krepšio konstrukcija lieka nepakitusi. PBK talpyklos korpuse, kuriame sumontuotas šilumokaitis ir krepšys, pavaizduotas 14 pav. Pakrovus PBK yra uždedami pirminis ir antrinis dangčiai – talpykla tampa visiškai izoliuota. Pirminio ir antrinio dangčio geometrinės charakteristikos pakito dėl atsiradusių išpjovų korpuse užpildymo. Taip pat dėl atsiradusio papildomo šilumokaičio, pirminio dangčio storis sumažėjo 100 mm.



14 pav. Modifikuotos PBK talpyklos vaizdas iš viršaus.

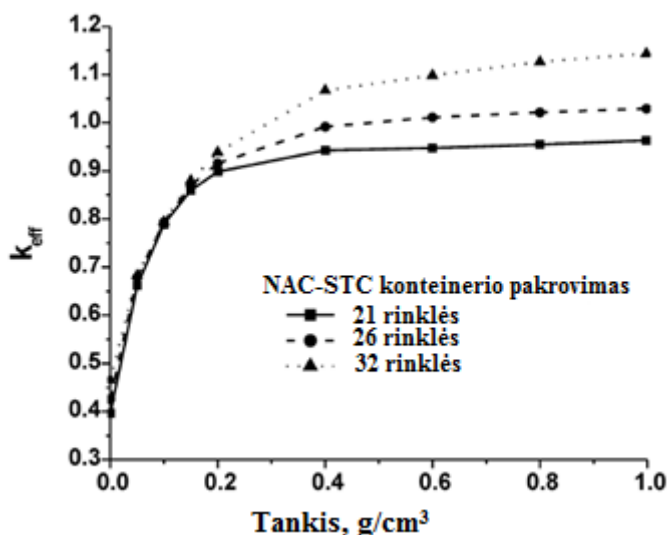
Šiame darbe atlikti skaičiavimams buvo naudojamas CASTOR–V/21 PBK talpyklos modelis. Siekiant talpyklą pritaikyti likutinės šilumos panaudojimo tikslams, ji buvo modifikuota. Modifikuotą talpyklą sudaro kaliojo ketaus korpusas, nerūdijančiojo plieno šilumokaitis, nerūdijančiojo plieno boruotas krepšys, nerūdijančiojo plieno pirminis ir antrinis dangčiai. Modifikuotos talpyklos korpuse buvo pridėtos keturios papildomos 390 mm gylio išpjovos siekiant užfiksuoti šilumokaičio padėtį, o ant vidinio korpuso pagrindo buvo padarytos 75 mm kolonos PBK krepšiui ir PBK rinkei užfiksuoti. Šilumokaitis sudarytas iš 4 nepriklausomų nerūdijančiojo plieno vamzdžių, kurie yra išdėstyti tarp kuro krepšio sienelių. Vamzdžiai pritvirtinti prie tvirtinimo elemento, kuris užfiksuoja šilumokaitį talpykloje ir sudaro prieigą į PBK talpyklos vidų iš išorės. Krepšio konstrukcija lieka nepakitusi, tačiau dėl atsiradusių išpjovų korpuse užpildymo pakito pirminio ir antrinio dangčio geometrinės charakteristikos.

2.3. PBK saugojimo problemos

Keičiant PBK sausosios talpyklos konstrukciją, pirmiausiai reikia atsižvelgti į saugumui keliamus reikalavimus. Viena pagrindinių panaudoto branduolinio kuro saugojimo problemų įprastinėmis sąlygomis (ypač ilgalaikio saugojimo atveju) kyla dėl galimo radioaktyvių medžiagų patekimo į aplinką. Potencialus PBK apvalkalo pažeidimas gali būti sukeltas įvairiais būdais, pavyzdžiui, temperatūros efektais apvalkale, tarpinėse ir ilgalaikėse PBK saugojimo sistemose. Detalus panaudoto kuro charakteristikų aprašymas yra svarbi informacija kuriant PBK saugyklas. Ši informacija yra savita kiekvienai kuro rinkei ir apima platų informacijos kiekį (apvalkalo medžiagą, kuro elemento granuliu dydį, tankį, konfiguraciją kuro rinklėje, termines išdėstymo charakteristikas kuro rinklėje ir kt.) [1].

Kitas saugos reikalavimas – išlaikyti iki kritinę PBK būseną per visą saugojimo ir transportavimo laikotarpį. Subkritiškumo problemos būdingesnės aukštesnio prisodrinimo kurui, įvairaus kuro elementų konstrukcijoms ir padidėjusio išdegimo kurui. Dėl didesnio kuro išdegimo panaudotame kure atsiranda polinkis mažėti reaktyvumui, todėl būtina stengtis sumažinti skilimo produktų koncentraciją transmutuojant ilgaamžes atliekas.

Maučec [23]. analizavo kritiškumo saugą sausojoje talpykloje atsitiktinio konteinerio užliejimo vandeniui atveju NAC – STC sausuosiuose saugojimo konteineriuose. NAC–STC konteineriai skaičiavimų metu liko subkritinės būsenos, nepriklausomai nuo pakrovimo atvejo (žr. 15 pav.). dėl padidėjusio neutronų lėtinimo, konteineris lieka nekritinės būsenos tik tada, kai yra pakrautas 21 šviežia PWR kuro rinkle. Rezultatas yra mažiau palankus didesnio pakrovimo konteineriams, kurie talpina 26 ir 32 kuro rinkles. Kai vandens tankis konteineriuose su 26 arba 32 elementais artėja prie nominalių verčių ($\rho > 0,6 \text{ g/cm}^3$), kritiškumas viršija saugumo reikalavimus.



15 pav. Vandens tankio priklausomybė nuo efektyvaus neutronų daugėjimo koeficiento reikšmių užtvindyto NAC–STC konteinerio atveju [23]

Šiuo metu jau yra sukaupta ilgametė panaudoto branduolinio kuro saugojimo patirtis šlapiosiose saugyklose visame pasaulyje [23]. PBK saugojimas vandens baseinuose reikalauja aktyvių technologinių sistemų, kurios užtikrintų optimalų veikimą bei vandens grynumą, įdiegimo, siekiant išvengti mikrobiologinių elementų (dumblų) augimo ir kontroliuoti agresyviuosius jonus, tokius kaip chloridai. Dėl didelio radionuklidų kiekio ir santykinai pažeidžiamos apsaugos nuo išorinių pavojų (pavyzdžiui, žemės drebėjimo, viesulų, potvynių, orlaivių avarių ir t.t.), šlapias saugojimas yra išsamiai nagrinėjamas atsižvelgiant į įvairias saugumo problemas, ekonomiško

veiksnius, apsaugos priemones ir kt. Pagrindinės problemos, kylančios dėl PBK šlapio tipo saugojimo, yra šios:

- Apvalkalo trūkis dėl slėgio/įtempimų padidėjimo kuro elemento viduje, kuris sukelia normas viršijančias apkrovas. Didžiausia mechaninė apkrova tenka apdangalo vamzdeliui. Taip nutinka dėl to, kad kuro elemente, helio tarpelyje, kaupiasi skilimo metu susidariusios dujos. Daugumai kuro rūšių (net ir aukštojo išdegimo kurui) tenkantys spinduliniai įtempimai apvalkale yra gerokai mažesni nei 80 N/mm^2 . Tuo metu mechaniniai įtempimai apvalkale yra didesni nei 400 N/mm^2 , o tai yra pakankamai dideli rodikliai užtikrinti saugumui. Todėl procesai, susiję su mechaniniais įtempimais, nesukelia didesnių problemų.

- Cirkonio lydinių korozija suslėgta vandenyje ir garuose yra išsamiai tirta esant didesnei nei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai. Likusiame temperatūros intervale korozijos greitis kinta tiesiškai, pagal Arenijaus dėsnį. Palyginus korozijos greitį normaliu baseino darbo metu, t.y. esant $30 \text{ }^\circ\text{C} - 45 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai, su korozijos greičiu, esant reaktoriaus sąlygoms, rezultatai rodo, kad korozijos lygis baseine yra 10^{10} mažesnis [13]. Tai veda prie išvados, kad cirkonio lydiniai yra beveik atsparūs oksidacinei korozijai šlapio saugojimo sąlygomis. Tačiau tai galioja tik tada, kai vanduo yra optimalių cheminių savybių ir demineralizuotas.

- Cirkonio lydiniai cheminių junginių aktyvumo lentelėje yra šalia tauriųjų elementų, priešingai nei aliuminio lydiniai, kurie yra šalia aktyviųjų elementų. Elektrocheminis kontaktas tarp cirkalojaus ir aliuminio sukurtų pakankamą potencialų skirtumą oksiduoti aliuminį ir hidratuoti cirkalojų. Elektrocheminį poveikį tarp cirkalojaus ir aliuminio sušvelnina pasyvacija, atsirandanti dėl oksido sluoksnio ant cirkalojaus paviršiaus, kuris veikia kaip barjeras, trukdantis vandenilio išsiskyrimui. Dėl šios priežasties panaudoto branduolinio kuro tiesioginis kontaktas tarp plikų cirkalojaus bei aliuminio paviršių baseine nepasitaiko. Pasyvuotas nerūdijantysis plienas galvaninių elementų aktyvumo lentelėje taip pat yra netoli tauriųjų elementų. Todėl tarp cirkalojaus ir nerūdijančiojo plieno niekada nebuvo pastebėta elektrocheminės korozijos, kuomet metalai tarpusavyje kontaktuojasi šlapiojoje saugykloje.

- Hidridų susidarymas pakeičia apvalkalo medžiagų mechanines savybes bei sukelia hidridų trūkinėjimą, vandenilio difuziją ir trapumą. Vidutinė vandenilio koncentracija cirkonio lydinių dangose, kai reaktorius yra eksploatacijos pabaigoje, yra tarp 250 ir 550 ppm (priklausomai nuo medžiagų ir pasiekto išdegimo). Kai kuras yra atvėsintas iki temperatūros, artimos saugojimo baseino darbinei temperatūrai, didžioji dalis vandenilio iškrenta į nuosėdas, sudarydamas hidrido trombus. Duobių formavimasis, kuris dar vadinamas Osvaldo augimu, negali atsirasti esant tokiai žemai vandens temperatūrai. Dėl to vandenilio persiskirstymas terminės difuzijos būdu panaudoto kuro baseinuose gali būti atmestas.

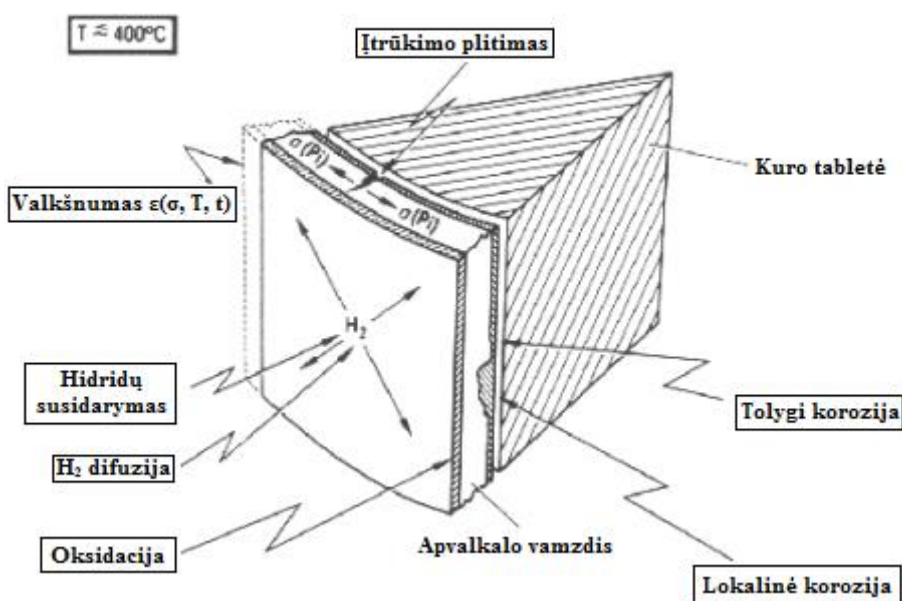
- Su apvalkalo vientisumu susijusių savybių, pavyzdžiui, takumo ir trūkio, pailgėjimas priklauso nuo vandenilio koncentracijos apvalkale. Su padidėjusia vandenilio dangos koncentracija padidėja takumo ir trūkimo įtempimai, o plastiškumas sumažėja. Ilgalaikio saugojimo temperatūra yra žemesnė nei cirkonio hidrido perėjimo iš kaliosios būsenos į trapiąją. Vadinasi, danga atlaikys elastines deformacijas iki stiprumo ribos. Plastinės deformacijos tokiomis sąlygomis gali būti nepaisomos todėl, jeigu kuro rinklės tvarkomos ir saugomos normaliomis sąlygomis, apvalkale esantis vandenilis nedarys jokios neigiamos įtakos tvarkymo ir saugojimo metu.

Vertinant panaudoto branduolinio LWR kuro saugojimą sausosiose saugyklose, gali būti apibrėžti trijų skirtingų temperatūrų režimai:

- Režimas I: staigus kuro aušimas, paprastai vykstantis tarp didžiausios sauso saugojimo temperatūros ir 300 °C temperatūros.
- Režimas II: vidutinis PBK temperatūros mažėjimas, kuro temperatūra laikosi tarp 300 °C ir 200 °C.
- Režimas III dalis: lėtas PBK temperatūros mažėjimas ir žemesnė nei 200 °C kuro temperatūra.

Galiausiai yra susiduriama su problemomis sauso saugojimo metu. Mechanizmai, kurie gali turėti įtakos apvalkalo vientisumui sausojo saugojimo metu yra šie (16 pav.):

1. Valkšnumas;
2. Apvalkalo oksidacija;
3. Mechaniniai įtrūkimai, vientisa ar lokalizuota skilimo produktų korozija;
4. Vandenilio sukelti defektai (uždelstas hidrido sukeltas įtrūkimas, vandenilio difuzija šilumos gradiento kryptimi, suminkštėjimas ir t.t.).



16 pav. Kuro elemento galimi pažeidimai [13]

Apvalkalo mechaninių savybių prastėjimas dėl korozijos iš esmės nėra laiko apibrėžtas faktorius šlapiosiose saugyklose. Terminis valkšnumas laikomas pagrindiniu faktoriumi, ribojančiu eksploatacinę temperatūrą sausosiose saugojimo sistemose.

Šiluminis valkšnumas paprastai yra laikomas pagrindiniu ribojančiu mechanizmu vertinant apvalkalo vientisumą saugojimo metu esant 300–400 °C temperatūrai (I–asis režimas) kuro apvalkalo danga pradeda deformuotis dėl valkšnumo [1]. Valkšnumo deformacijos daugiausiai priklauso nuo kuro elementų vidinio slėgio ir jų temperatūros saugojimo metu. Jei dėl valkšnumo apvalkalas plyšta, tada tai dažniausiai sukelia kamščio tipo skylę. Vis dėlto yra būtina išvengti bet kokio apvalkalo pažeidimo. Tai gali būti pasiekama slopinant valkšnumo deformacijas mažinant temperatūrą, kad jos pasiektų pirminę ar antrinę būsenas.

Vienas iš didžiausių grėsmę keliančių reiškinų PBK saugojimo metu kyla dėl progresyvios urano dioksido oksidacijos, dėl kurios susidaro U_3O_8 , ir didėja panaudoto branduolinio kuro tūris, o viso to pasekmė – kuro apvalkalo pažeidimas [21]. Norint apsaugoti PBK nuo U_3O_8 susidarymo sausosiose talpyklose, kuro temperatūra turi būti palaikoma daug žemesnė nei temperatūra, kurioje vyksta oksidacija. Kadangi oksidacijos reakcija ypač priklauso nuo temperatūros, aušinant kitu fluidu, pavyzdžiui, oru ar anglies dioksidu, reikia atsižvelgti į adekvatų kuro aušinimą saugojimo režimu.

Norint apsaugoti kurą nuo oksidacijos yra naudojamos inertinės dujos. Tai leidžia pakelti maksimalią leidžiamą saugojimo temperatūrą talpykloje, tačiau reikalauja didelio integruotumo bei inertinės aplinkos stebėjimo. Šiuo metu kaip inertinės dujos konteineriuose yra naudojamas oras, helis, azotas arba anglies dioksidas. Inertinių dujų praradimas gali potencialiai sukelti PBK oksidaciją. Yra būtina periodiškai atlikti inertinių dujų kontrolę.

Jodo sukeltas įtempimų korozijos trūkis atsiranda tik tam tikrame aukštos temperatūros diapazone dėl chemiškai aktyvaus jodo ir atitinkamų mechaninių įtempimų. Panaudoto kuro saugojimo metu jodo aktyvumas nėra toks, kuris gali sukelti korozijos įtrūkimą. Dalijimosi produktų elgesys gali būti nusakomas pagal jų stabilumą. UO_2 kuras kristalizuojasi į CaF_2 tipo gardelę, kurioje yra laisvų vakansijų. Dėl vakansijų yra išlaikomi reaktoriaus eksploatacijos metu susidarę skilimo produktai. Be to, kiekvienas skilęs urano atomas palieka papildomą laisvą vietą gardelėje. Dėl to, net esant aukštam kuro išdegimo laipsniui, ne visos laisvos vakansijos vietos yra užimtos, o UO_2 kristalai turi pakankamai galimybių išlaikyti dalijimosi produktus [15].

Kadangi talpykla yra užpildyta vandeniu, taip pat reikia neužmiršti vandens plėtimosi efekto jam šylant. Talpykloje nepertraukiamai susidaro likutinė šiluma, todėl sistema taip pat turi nuolatos veikti. Sustojus šilumos nuvedimui iš talpyklos besiplėsdamas nespūdas vanduo gali pakelti slėgį tiek, kad jis pažeistų ne tik PBK rinkles, bet ir kitas talpyklos konstrukcijas. Be to, talpykloje esantis vanduo lėtina neutronus, o tai savo ruožtu didina kritiškumo pavojų.

Išlaikyti kritinę PBK būseną per visą jo saugojimo laikotarpį yra pagrindinis saugos reikalavimas. PBK įvairiais saugojimo momentais susiduria su skirtingomis problemomis. Pagrindinės problemos, kylančios dėl PBK saugojimo metu, yra apvalkalo trūkis dėl slėgio/įtempimų padidėjimo kuro elemento viduje; cirkonio lydinių korozija suslėgtame vandenyje ir garuose; hidridų susidarymas, kuris pakeičia apvalkalo medžiagų mechanines savybes bei sukelia hidridų trūkinėjimą, vandenilio difuziją ir trapumą; su apvalkalo vientisumu susijusių savybių, pavyzdžiui, takumo ir trūkio, pailgėjimas. Taip pat susiduriama su problemomis, susijusiomis su progresyvia urano dioksido oksidacija, dėl kurios susidaro U_3O_8 ir taip didėja panaudoto branduolinio kuro tūris, kuris pažeidžia apvalkalą.

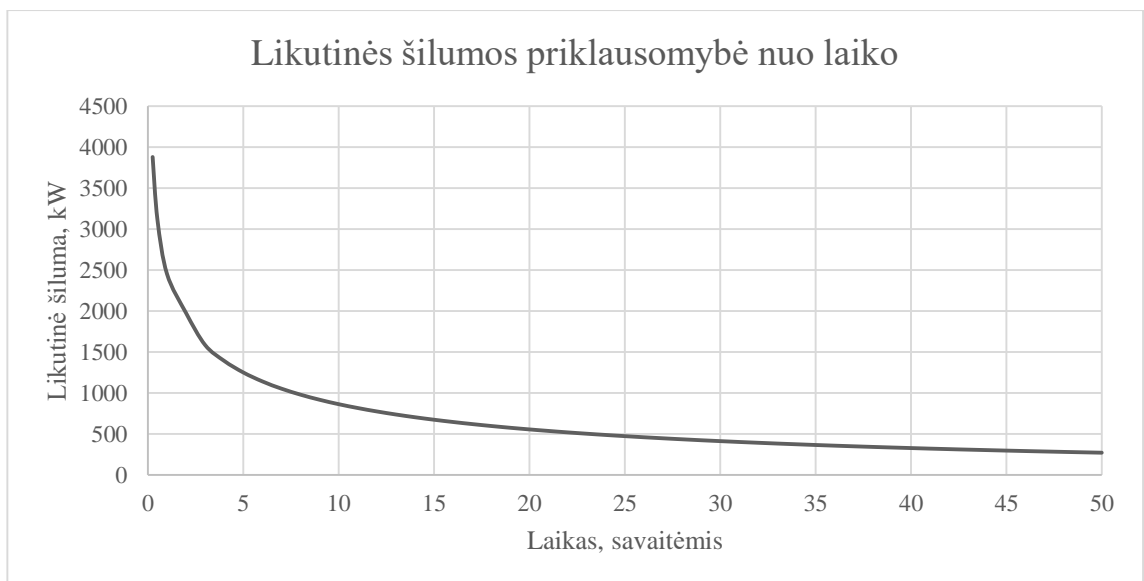
3. PROJEKTINIAI ŠILUMOKAIČIO SKAIČIAVIMAI

3.1. Likutinės šilumos skaičiavimas

Norint apskaičiuoti iš PBK kuro elementų išsiskyrusią likutinę šilumą, pirmiausia reikia įvertinti kiek kuro rinklių ir po kurio laiko bus ištraukta kiekvieną kartą sustabdžius reaktorių. Dauguma elektrinių atlieka branduolinio kuro keitimą kas dvejus metus, todėl skaičiuojant pasirenkamas vidutinis 730 dienų laiko intervalas tarp keitimų[35]. Dažniausiai iš reaktoriaus yra iškraunama tik apie 1/3 ar 1/4 viso branduolinio kuro. Tokiu atveju skaičiavime yra pasirenkama tarpinė 30 % iškraunamo kuro dalis.

Skaičiavimams naudojamas 3400 MW galios suslėgto vandens reaktorius, kuriame yra 17x17 kuro elementų rinklės. Iš [4] formulės nustatome, kiek likutinės šilumos išsiskirs modifikuotos PBK talpyklos eksploatacijos pradžioje:

$$P(t) = 6,48 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot P_0 \cdot [t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}] = 1,944 \cdot 10^{-3} \cdot P_0 \cdot [t^{-0,2} - (t + 730)^{-0,2}] \quad 3.1.1$$



17 pav. Likutinės šilumos priklausomybės nuo laiko grafikas.

17 paveiksle pavaizduotas nubraižytas grafikas, pagal kurį matome, kad iš reaktoriaus ištrauktų panaudoto branduolinio kuro rinklių likutinė šiluma staigiai mažėja. Tik sustabdžius reaktorių likutinė šiluma siekia 6 % visos reaktoriaus galios, tačiau jau po 50 savaičių galia nebesiekia nei 500 kW. Taip nutinka dėl aktyvių mažo pusamžio elementų skilimo į stabilesnius, ilgesnio pusamžio, elementus. Todėl norint panaudoti likutinę šilumą kaip galima efektyviau, būtina sąlyga –

kuo ankstesnė šios energijos generacija. Tačiau išgauti šilumą iš panaudoto branduolinio kuro pavyksta ne iš karto. Reikia įvertinti tokius aspektus kaip PBK iškrovimas (kuris gali trukti iki 1–2 savaitių), šilumos šaltinio, t.y. panaudoto branduolinio kuro, integraciją į šilumos nuvedimo sistemą, paleidimo – derinimo darbus ir kt. Tik įvertinus visus kriterijus galima nustatyti visą likutinės šilumos nuvedimo potencialą.

Projektuojant likutinės šilumos sistemą numatome, kad reaktoriaus pakrovimo – iškrovimo procesas trunka apie 2 savaites. Todėl planuojama, jog likutinė šiluma bus generuojama po 2 savaitių nuo reaktoriaus sustabdymo. Taip pat pasirenkame 5 % atsargos koeficientą. Nors galia laikui bėgant mažėja, toliau skaičiavimuose laikoma, kad gautoji šiluminės galios reikšmė yra pastovi ir nekintanti. Paskaičiuojame projektinį sistemos galingumą:

$$P(t) = 1,944 \cdot 10^{-3} \cdot 3400 \cdot 10^3 \cdot 1,05 \cdot [14^{-0,2} - (14 + 730)^{-0,2}] = 2244,43 \text{ kW} . \quad (3.1.2)$$

Numanome, kad reaktoriuje yra 193 kuro rinklės[4]. Tada vienos kuro rinklės galingumas (kW) yra lygus:

$$Q = \frac{P(t)}{X \cdot 9} = \frac{2244,43}{193 \cdot 0,3} = 38,76 . \quad (3.1.3)$$

Integruojant 3.1.3 funkciją minėtame laiko intervale nuo t_p iki t_g yra gaunamas iš panaudoto branduolinio išsiskiriantis šilumos kiekis:

$$P(t) = 6,48 \cdot 10^{-3} \cdot P_0 \cdot \int_{t_p}^{t_g} [t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}] dt . \quad (3.1.4)$$

Laikome, kad PBK rinklės modifikuotose PBK talpyklose yra eksploatuojamos 10 metų. Apskaičiuojamas šilumos kiekis (kWh), kuris išsiskiria iš talpykloje esančių kuro elementų:

$$P(t) = 6,48 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3400 \cdot 21}{193} \cdot \int_{t_p=14}^{t_g=10 \cdot 365} [t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}] dt = 2,8406 \cdot 10^6 . \quad (3.1.5)$$

Tad siekiant apskaičiuoti iš PBK elementų išsiskiriančią likutinę šilumą, visų pirma reikia įvertinti kiek kuro rinklių ir po kurio laiko bus ištraukta kiekvieną kartą sustabdžius reaktorių. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad tik iš reaktoriaus ištrauktų panaudoto branduolinio kuro rinklių likutinė

šiluma pradeda staigiai mažėti. Todėl norint panaudoti likutinę šilumą kaip galima efektyviau, būtina sąlyga – kuo ankstesnė šios energijos generacija.

3.2. PBK talpyklos maksimalios temperatūros skaičiavimas.

Siekdami nustatyti optimalias eksploatacijos sąlygas, pirmiausiai turime atsižvelgti į temperatūros lauką talpykloje. Laikoma, kad maksimali temperatūra, esanti talpykloje, negali viršyti 250 laipsnių:

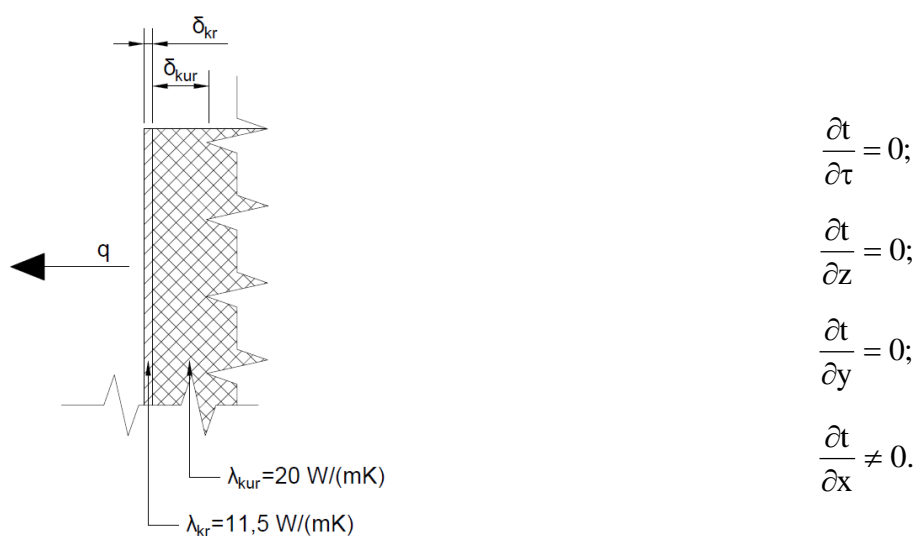
$$T_{\max} \leq 250^{\circ}\text{C}. \quad (3.2.1)$$

Bendru atveju laiko momentu τ temperatūros laukas gali kisti įvairiomis kryptis x, y, z :

$$t^* = \varphi(x, y, z, \tau). \quad (3.2.2)$$

18 pav. pavaizduotas šilumos laidumo pradinės sąlygos per PBK rinkles ir krepšio sienes. Skaičiavimas atliekamas siekiant nustatyti preliminarią temperatūrą esant maksimaliai užsiduotai temperatūrai. Dėl uždavinio neapibrėžtumo, jį išspręsti yra beveik neįmanoma naudojantis įprastais skaičiavimo metodais. Todėl uždavinys supaprastinamas – priimamos kraštinės sąlygos.

Laikome, jog temperatūros laukas yra stacionarus, o temperatūra kinta tik x ašimi. Tokiu atveju stacionaraus vienmačio temperatūrų laukas yra:



18 pav. PBK rinklės ir krepšio šilumokaitos uždavinys.

Dėl asimetrinio šilumos srauto pasiskirstymo, privalu nusistatyti šilumos srautą, kuris bus naudojamas tolimesniuose skaičiavimuose. Todėl skaičiavimuose priimamas homogenizuotas vidutinis šilumos srauto tankis – tai vidutinis šilumos srautas talpykloje, tenkantis vienam ploto vienetui PBK rinklių paviršiaus ploto:

$$q = \frac{Q_1}{A_{\text{sum}}}, \quad (3.2.3)$$

čia Q_1 – suminis PBK rinklių patalpintų į talpyklą, šilumos kiekis, kW. Taip pat laikoma, jog šilumos šaltinių srautai vienas kitam įtakos nedaro. Nagrinėjamoje CASTOR–V/21 talpykloje galima sutalpinti 21 kuro rinklę. Tokiu atveju šilumos srautas talpykloje (kW) lygus:

$$Q_1 = n \cdot Q = 21 \cdot 38,76 = 813,96. \quad (3.2.4)$$

Suminis PBK rinklių paviršiaus plotas įvertinamas pagal jų padėtį talpykloje. Pavyzdžiui, kai kurias kuro rinklės tarpusavyje skiria tik talpyklos krepšio konstrukcija. Todėl įvertinus krepšio konstrukcines ypatybes ir kuro rinklių aukštį apskaičiuojame PBK talpyklos rinklių suminį paviršiaus plotą (m^2):

$$A_1 = 0,48 \cdot 4,06 \cdot 2 + 0,24 \cdot 4,06 \cdot 4 + (0,48 \cdot 0,48 - 0,24 \cdot 0,24) \cdot 2 = 8,14;$$

$$A_2 = 0,24 \cdot 4,06 \cdot 4 + 0,24 \cdot 0,24 \cdot 2 = 4,01;$$

$$A_{\text{sum}} = 4 \cdot A_1 + 9 \cdot A_2 = 4 \cdot 8,14 + 9 \cdot 4,01 = 68,65 .$$

Tokiu atveju vidutinis šilumos srauto tankis talpykloje (kW/m^2) yra lygus:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{813,93}{68,65} = 11,85. \quad (3.2.5)$$

Nagrinėjamoje sistemoje perdavimas vyksta laidumu. Dėl šios priežasties, siekiant apskaičiuoti krepšio išorinių sienelių paviršiaus temperatūrą, yra naudojamas Furjė laidumo dėsnis. Bendru atveju šilumos perdavimas per plokščią sienelę yra:

$$q = \frac{1}{R_1 + R_2} \cdot \Delta T, \quad (3.2.6)$$

kur R_1 ir R_2 yra PBK rinklės terminės varžos. Terminė varža tiesiogiai proporcinga sienelės storiui δ ir atvirkščiai proporcinga nagrinėjamos sienelės laidumo koeficientui λ . Be to, skaičiavimo metu buvo naudojama pusės pločio PBK rinklė (110 mm), nes anksčiau buvo laikyta, jog panaudota kuro rinklė talpykloje spinduliuoja šilumą į visas puses tolygiai. PBK rinklės laidumas yra lygus ($\lambda_1 = 20 \frac{W}{m \cdot K}$). Krepšio sienelės storis yra lygus 10 mm, o laidumas $\lambda_2 = 11,5 \frac{W}{m \cdot K}$ (nerūdijantysis plienas). Tokiu atveju sienelių varžos ($\frac{m^2 \cdot K}{W}$) yra lygios:

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{0,11}{20} = 0,0055 \quad (3.2.7)$$

$$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0,11}{20} = 0,00087 \quad (3.2.8)$$

Tada pagal Furjė laidumo dėsnį apskaičiuojame sienelės temperatūrą:

$$q' = U' \cdot \Delta T \rightarrow T' = T_{\max} - q \cdot (R_1 + R_2) = 250 - 11850 \cdot (0,0055 + 0,000591) = 177,82 \text{ .} \quad (3.2.9)$$

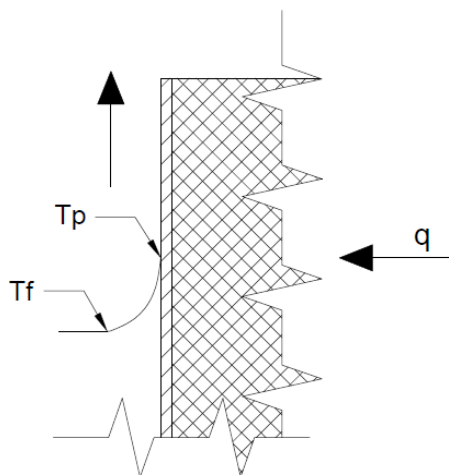
Apskaičiavus galima daryti išvadą, kad norint išgauti šilumą iš PBK talpyklos, sienelių temperatūra neturi viršyti 177,82 °C temperatūros. Tai yra pirmoji sąlyga, kuri turi būti įgyvendinama, norint eksploatuoti PBK likutinės šilumos panaudojimo sistemą. Tačiau tai nėra vienintelė sąlyga, kuri turi būti tenkinama, norint saugiai eksploatuoti įrenginį.

Sekanti sąlyga, kurią būtina tenkinti talpykloje, yra neleisti vandeniui talpyklos viduje pasiekti soties būsenos. Ši sąlyga paremta tuo, kad vandens šilumos laidumas yra apie 30 kartų didesnis už sotaus garo laidumą [18]. Tokiu atveju pradėjus garuoti vandeniui prastėja šilumos perdavimas nuo sienelės paviršiaus, o tai gali sukelti destruktivių padarinių ne tik talpykloje esančioms panaudoto branduolinio kuro rinklėms, bet ir visai talpyklai.

Laikykime, kad tarp krepšio sienelės ir talpykloje esančio vandens vyksta šilumos atidavimas natūralia konvekcija neribotoje erdvėje. Apskaičiuojame šilumos atidavimą vandeniui nuo PBK krepšio sienelės. Šilumos atidavimo koeficiento nustatymas yra sudėtingas procesas, kadangi jį sudaro šiluminių ir hidrodinaminių procesų visuma. Šilumos atidavimo koeficiento priklausomybė turi būti nustatyta teoriškai ir eksperimentiškai. Jei koeficientą bandoma nustatyti teoriškai, reikia išspręsti diferencialines lygtis, kurios apibūdina procesus, vykstančius fluidui aptekant paviršiumi.

Tačiau šiuo atveju šilumokaičio šilumos atidavimo koeficientas yra nustatomas empirinėmis išraiškomis.

Šilumos atidavimo procesas pavaizduotas 19 pav. Talpykloje esančios PBK rinklės, spinduliuodamos šilumos srautą q , pašildo krepšį. Fluidas, kurio temperatūra T_f , kaista nuo PBK krepšio sienelės, kurios temperatūra T_p . Atsiradęs temperatūrų pokytis sukuria varomąją jėgą, kuri verčia fluidą tekėti pagal krepšio sienelę.



19 pav. Šilumos perdavimo vandeniui uždavinys

Tačiau dėl per didelio kiekio nežinomųjų, įprastiniais skaičiavimo metodais šio uždavinio išspręsti yra neįmanoma. Tokiu atveju yra naudojami skaitiniai metodai, kurių pagalba priartėjimo būdu apskaičiuojamas minėtas uždavinys. Naudojant iteracinį metodą, yra užsiduodama pradinė fluideo temperatūros reikšmė. Tuomet yra atliekami skaičiavimai, naudojant užsiduotą temperatūros reikšmę, ir gaunami visi skaičiuotini parametrai. Galiausiai apskaičiuojame užsiduotą temperatūros reikšmę ir lyginime ją su anksčiau užsiduota temperatūra. Jei temperatūrų skirtumas tenkina norimą paklaidą, laikoma, jog temperatūra yra teisinga.

Įvertinus tai, nustatoma, jog fluideo temperatūra yra lygi 80°C . Šilumos atidavimo koeficientą apskaičiuoti galima pagal Nuselto kriterijų. Nuselto kriterijus – tai vienas iš panašumo kriterijų, nusakantis konvekcijos šilumos mainų intensyvumo padidėjimą lyginant su grynu šilumos laidumu[12]. Šilumos atidavimas yra apskaičiuojamas naudojant šią empirinę išraišką:

$$\alpha = \frac{\text{Nu}_m \cdot \lambda}{l}, \quad (3.2.10)$$

čia l – būdingas apiplaunamo kūno paviršiaus matmuo, m, (pavyzdžiui, kai fluidas teka vamzdžiu – tai vamzdžio diametras, plokščio paviršiaus atveju – paviršiaus ilgis, ir t.t.) λ – vandens terminis laidumo koeficientas, $\frac{W}{m \cdot K}$, Nu_m – vidutinis paviršiaus Nuselto kriterijus.

Vykstant natūraliai konvekcijai begalinėje erdvėje, vidutinį viso nagrinėjamo paviršiaus Nuselto kriterijų galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$Nu_m = b \cdot (Gr_m \cdot Pr_m)^n, \quad (3.2.11)$$

čia: Pr_m yra fluideo Prandtlio kriterijus, apibūdinantis santykį tarp hidrodinaminio ir šiluminio pasienio sluoksnių [6]; Gr_m – Grashofo kriterijus, kuris nusako Archimedo jėgų santykį su trinties jėgomis [6]. Tiek Prandtlio, tiek Grashofo kriterijai skaičiuojami pagal vidutinę pasienio sluoksnio temperatūrą (temperatūrą tarp fluideo ir paviršiaus). Grashofo empirinė išraiška atrodo taip:

$$Gr_m = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta T. \quad (3.2.12)$$

Formulėje:

β – terminis plėtimosi koeficientas (1/K)

g – Laisvojo kritimo pagreitis (9,81 m/s²)

l – būdingas apiplaunamo paviršiaus plotas (m)

ν – kinematinis klampumas (m²/s)

ΔT – temperatūrų skirtumas, dėl kurio susidaro laisvoji konvekcija

Terminis plėtimosi koeficientas – tai parametras, parodantis santykinį tankio ar dujų pokytį, tenkantį vienam laipsniui fluideo, kai nekinta slėgis [24]. Šis parametras nustatomas remiantis lygtimi:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = -\frac{1}{889,2} \cdot \frac{(889,2 - 971,8)}{177,82 - 80} = 0,00095 \dots \quad (3.2.13)$$

Toliau apskaičiuojamas Grashofo kriterijus:

$$Gr_m = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta T = \frac{0,00095 \cdot 9,81 \cdot 4,06^3}{0,2425^2} \cdot 97,82 = 1,04 \cdot 10^{15}. \quad (3.2.14)$$

Koeficientų n ir b reikšmės priklauso nuo aptekamo paviršiaus charakteristikų. Be to, koeficientai priklauso ir nuo tekėjimo režimo. Natūralios konvekcijos atveju laminariu tekėjimu laikome tokį tekėjimą, kai $Gr_m \cdot Pr_m$ reikšmė yra mažesnė nei $2 \cdot 10^7$. Kitu atveju tekėjimas yra laikomas turbulentiu. Koeficientų reikšmės yra pateiktos 2 lentelėje[12]

2 Lentelė. B ir n koeficientų reikšmės

Paviršiaus geometrinė forma	$Gr_m \cdot Pr_m$	b	n
Vertikalus paviršius	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
	$2 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^{16}$	0,135	0,333

Nagrinėjamu atveju fluidas apiplauna vertikalią sienelę. Tokiu atveju Nuselto kriterijus yra lygus:

$$Nu_m = 0,135 \cdot (1,04 \cdot 10^{15} \cdot 1,415)^{0,33} = 13668,2. \quad (3.2.15)$$

Tada apskaičiuojamas šilumos atidavimo koeficientas ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$):

$$\alpha_1 = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{l} = \frac{13668,2 \cdot 0,686}{4,06} = 2309,45. \quad (3.2.16)$$

Galiausiai iš Niutono lygties nustatoma maksimali leistina temperatūra ($^{\circ}C$) talpykloje:

$$q' = U' \cdot \Delta T \rightarrow T' = T_{\max} - \frac{q}{\alpha} = 177,82 - \frac{11.850 \cdot 10^3}{2309,45} = 172,7. \quad (3.2.17)$$

Gautoji temperatūros vertė nėra lygi užsiduotai temperatūros vertei. Tokiu atveju skaičiavimai yra tęsiami priimant, jog apskaičiuota T' temperatūra yra lygi užsiduotai temperatūrai. Skaičiavimo rezultatai yra pateikiami 1 priede. Atlikus papildomas tris iteracijas gauta vidutinė vandens temperatūra, kuri apytikriai yra $168^{\circ}C$, o atidavimo koeficientas $\alpha_1 = 1221,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Pagal Furjė laidumo dėsnį buvo apskaičiuota preliminari temperatūra esant maksimaliai užsiduotai PBK apvaskalo temperatūrai. Nustatyta, jog norint išgauti šilumą iš PBK talpyklos, sienelių temperatūra neturi viršyti $177,82^{\circ}C$. Tai yra pirmoji sąlyga, kuri turi būti įgyvendinama, norint eksploatuoti PBK likutinės šilumos panaudojimo sistemą. Taip pat iš Niutono lygties buvo

apskaičiuotas šilumos atidavimas tarp vandens ir PBK krepšio sienelių. Nustatyta, kad vidutinė vandens temperatūra apytikriai yra lygi 168 °C o atidavimo koeficientas $\alpha_1 = 1221,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

3.3. Šilumokaičio termohidrauliniai skaičiavimai

3.3.1. Termodinaminių parametrų skaičiavimas

Šilumokaičio darbo režimas priklauso nuo to, kokių parametrų yra šildantysis fluidas. Laikome, kad nagrinėjama sistema šildo grįžtantį kondensatą iš atominės elektrinės kondensato sistemos. Kondensato temperatūra vasarą gali siekti iki 43 °C [22]. Tokiu atveju į PBK talpyklos šilumokaitį vanduo turi būti tiekiamas ne mažesnės nei 53 laipsnių temperatūros. Įvertinus šias sąlygas, yra atliekami skaičiavimai, kuriais nustatoma iš šilumokaičio ištekancio vandens temperatūrai.

Iš energijos tvermės dėsnio kontroliniam tūriui išraiškos, kai sistema yra stacionari, tekėjimo režimas nusistovėjęs ir yra nepaisoma kinetinės bei potencinės energijos, vandens šilumos srautas Q yra lygus jo srauto entalpijų skirtumui[33]:

$$Q = \Delta h \cdot \dot{m}, \quad (3.3.1)$$

čia: \dot{m} – masinis vandens debitas, kg/s.

Analizuojamame šilumokaityje šiluma yra nuvedama keturiais 29,7 mm vidinio diametro vamzdyno gyvatukais. Suminis vamzdynų skerspjūvio plotas, m^2 yra:

$$A' = 4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 3,14 \cdot 0,0297^2 = 0,002770 . \quad (3.3.2)$$

Skaičiuojant masinį debitą rekomenduojamas didžiausias greitis vamzdyne neturi viršyti 3 m/s [14]. Tačiau priimame konservatyvesnį, 2 m/s, greitį. Paskaičiuojame masinį debitą ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$) šilumokaičio gyvatuke:

$$\dot{m} = w \cdot A \cdot \rho = 2 \cdot 0,00277 \cdot 980 = 5,43. \quad (3.3.3)$$

Laikoma, kad vanduo neatlieka fazinio virsmo tekėdamas vamzdžiu ir jo specifinė šiluma c_p nekinta. Tokiu atveju vandens temperatūra, jam tekant talpykloje esančiais vamzdynais, pakis

temperatūros skirtumu ΔT . Pertvarkę lygtį apskaičiuojame išeinančio iš šilumokaičio vandens temperatūrą, °C:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \rightarrow T_{is} = T_{iej} + \frac{Q}{c_p \cdot \dot{m}} = 53 + \frac{813,96 \cdot 10^3}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 5,43} \cong 89. \quad (3.3.4)$$

Skaičiavimų rezultatai parodė, kad vanduo, tekėdamas pro PBK šilumokaitį, pašyla 37 laipsniais. Šis temperatūrų skirtumas yra paskaičiuotas esant maksimaliam sistemos greičiui. Norint keisti šilumokaičio kontūro vandens temperatūrą, reikia įvertinti, koku būdu bus reguliuojamas srautas. Tiekiančio vandens srautą sistemoje galima reguliuoti trimis būdais: kokybiniu, kiekybiniu ir mišriu[12]. Reguluojant tiekiamą šilumą kokybiškai, sistemoje keičiama paduodamo šilumos nuvedėjo temperatūra, o debitas lieka pastovus. Reguluojant kiekybiškai viskas vyksta priešingai – siurbliais yra reguliuojamas debitas, o temperatūra lieka tokia pati. Naudojamas ir mišrus reguliavimo būdas, kai sistemoje yra keičiamas fluido srautas ir temperatūra. Pavyzdžiui, norint padidinti iš talpyklos išeinančio vandens temperatūrą, reikia mažinti praleidžiamą pro vamzdinę debitą.

Toliau bandomą nustatyti vandens temperatūrą PBK talpykloje. Šilumos perdavimas per cilindrinę sienelę yra lygus:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{log} = (U_1 + U_2 + U_3) \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta T_{log}, \quad (3.3.5)$$

kur:

U_1 – Išorinę sienelę apiplaunančio vandens atidavimo koeficientas, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$;

U_2 – sienelės šilumos perdavimo koeficientas, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$;

U_3 – vidinę sienelę apiplaunančio vandens atidavimo koeficientas $\frac{W}{m^2 \cdot K}$,;

l - šilumokaičio vamzdžio ilgis PBK talpykloje, m²;

ΔT_{log} – logaritminis temperatūrų skirtumas, °C.

Vidutinis logaritminis temperatūros skirtumas šilumos perdavimo procese priklauso nuo vandens srautų kryptių. Laikoma, kad nagrinėjamos PBK talpyklos vanduo juda ta pačia kryptimi kaip ir šilumokaičio vandens srautas. Tokiu atveju turime paralelinį srautą. Iš 3.3.6 lygties gauname logaritminio temperatūrų skirtumo išraišką:

$$\Delta T_{\log} = \frac{Q}{\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_{i\text{s}}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{vid}}}{d_{i\text{s}}}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{vid}}}} \cdot \pi \cdot l}} \dots \quad (3.3.6)$$

Priimama, kad išorinis vamzdžio šilumos atidavimo koeficientas yra apytikriai lygus šilumos atidavimo koeficientui PBK talpyklos vandeniui apiplaunant krepšio sienelės. Todėl:

$$\alpha_1 = 1221,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (3.3.7)$$

Kai vamzdžio sienelės storis yra 2 mm, o šilumos terminis laidumo koeficientas per ją yra $11,5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$, tai terminė sienelės varža $R_s \left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)$ yra:

$$R_s = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{i\text{s}}}{d_{\text{vid}}} = \frac{1}{2 \cdot 11,5} \ln \frac{0,0337}{0,0297} = 0,0055. \quad (3.3.8)$$

Vandeniui tekant uždaru kanalu, šilumos atidavimas $\alpha_2 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)$ yra lygus:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_f \cdot \lambda}{l}, \quad (3.3.9)$$

čia l – būdingas apiplaunamo kūno paviršiaus matmuo (šiuo atveju vamzdžio skersmuo); Nu_f – vandens Nuselto kriterijus, λ – vandens terminis laidumo koeficientas $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Tekėjimo režimą apibrėžia Reinoldso kriterijus, pagal kurį apskaičiuojamas inercijos jėgų ir trinties jėgų santykis[24]: Kai $Re < 2300$, tai tekėjimas uždarais kanalais yra laminarinis, kai $Re > 10000$ – turbulentinis, o likusiais atvejais – pereinamasis. Tada nagrinėjamo šilumokaičio Reinoldso kriterijus yra lygus:

$$Re_f = \frac{w \cdot d_e}{\nu} = \frac{2,00 \cdot 0,0297}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 1,627 \cdot 10^5, \quad (3.3.10)$$

čia w – fluído greitis kanale (m/s); ν – kinematinis klampumo koeficientas (m^2/s), d_e – ekvivalentinis vamzdžio vidinis skersmuo.

Gautas tekėjimo režimas yra turbulentinis. Toliau apskaičiuojamas Nuselto kriterijus:

$$\text{Nu}_f = 0,021 \cdot \text{Re}_f^{0,8} \text{Pr}_f^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_p} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_1. \quad (3.3.11)$$

Pr_f ir Pr_p atitinkamai yra fluído Prandtlio kriterijai centrinėje ir periferinėje dalyse. Dydis ε_1 yra koeficientas, įvertinantis pokytį stabilizacijos ruože. Jis priklauso nuo ilgio ir diametro santykio. Yra laikoma, kad l/d santykis visame stabilizacijos ruože yra didesnis nei 50, todėl $\varepsilon_1=1$.

Po to apskaičiuojame Nuselto kriterijų:

$$\text{Nu}_f = 0,021 \cdot (1,627 \cdot 10^5)^{0,8} 2,21^{0,43} \cdot \left(\frac{2,21}{1,95_p} \right)^{0,25} = 450. \quad (3.3.12)$$

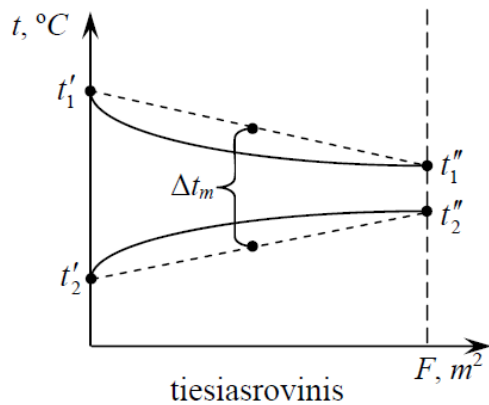
Apskaičiavus Nuselto kriterijų, nustatomas šilumokaičio gyvatuke tekančio vandens atidavimo koeficientas, $\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$:

$$\alpha_2 = \frac{450 \cdot 0,675}{0,0297} = 10277. \quad (3.3.13)$$

Tada vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas ($^{\circ}\text{C}$) yra lygus:

$$\Delta T_{\log} = \frac{813,96}{\frac{1}{\frac{1}{1221,7 \cdot 0,0337} + 0,0055} + \frac{1}{10227 \cdot 0,0297}} \cdot 3,14 \cdot 160 = 53,6.. \quad (3.3.14)$$

Iš logaritminio temperatūrų (žr. 20 pav.) skirtumo nustatome talpyklos vandens temperatūrą prie šilumokaičio vamzdžių išėjimo[32]:



$$\Delta T_{\log} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} = \frac{(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)}{\ln \frac{(t'_1 - t'_2)}{(t''_1 - t''_2)}}$$

Iš šios lygybės išreiškiamas t'_{\min} gaunama, kad:

$$t'_{\min} = 114,6^\circ\text{C}$$

20 pav. Temperatūros kitimo šilumokaityje schema [20]

Tad šilumokaičio darbo režimas priklauso nuo šildančio fluido parametru. Kadangi į PBK talpyklos šilumokaitį vanduo turi būti tiekiamas ne mažesnės nei 53 laipsnių temperatūros, tad buvo atlikti skaičiavimai, kuriais nustatyta iš šilumokaičio ištekančio vandens temperatūra. Rezultatai parodė, kad vanduo, tekėdamas pro PBK šilumokaitį, pašyla 36 laipsniais (nuo 53 iki 89 °C). Šis temperatūrų skirtumas yra paskaičiuotas esant maksimaliam sistemos greičiui. Taip pat remiantis šilumos perdavimo per šilumokaičio vamzdžio sienelę skaičiavimais buvo nustatyta, kad minimali PBK talpyklos temperatūra yra 114,6 °C.

3.3.2. Hidrauliniai nuostoliai

Šilumokaityje vandens tekėjimą trikdo hidrauliniai pasipriešinimai[20]. Trinties reiškiniai šilumokaityje yra tiek pat svarbūs, kiek ir šilumos mainai tarp šilumokaičio ir PBK talpyklos, nes jie nusako tekančio vandens slėgio kritimą ir jam reikalingą siurblio galingumą. Siurbliu yra palaikomas reikalingas srautas, todėl jis sudaro reikšmingą kapitalinių ir eksploatacinių kaštų dedamąją dalį. Kaštai, kurie sutaupomi šilumokaitį suprojektavus atsižvelgiant į aukštesnius hidraulinius pasipriešinimus, gali būti prarandami dėl padidėjusių eksploatacijos kaštų. Todėl yra stengiamasi suprojektuoti tokį šilumokaitį, kuris pasiektų kiek galima aukštesnius šilumos perdavimo parametrus su mažiausiais slėgio nuostoliais.

Kai šilumokaičiu teka fluidas, slėgio skirtumą sudaro tokios dedamosios:

$$\Delta p = \Delta p_{tr} + \Delta p_v + \Delta p_{pag} + \Delta p_{sav}, \quad (3.3.16)$$

kur:

Δp_{tr} – slėgio nuostoliai, susidarę dėl pasipriešinimo į vamzdyno sienelės, Pa;

Δp_v – vietinių kliūčių slėgio nuostoliai, Pa;

Δp_{pag} – slėgio nuostoliai susidarę dėl pagreičio pasipriešinimo, Pa;

Δp_{sav} – savaiminio tekėjimo slėgio nuostoliai, Pa.

Šilumokaičio vamzdyne, visiškai susiformavus srautui, hidraulinių trinties nuostolių priklausomybė bendruoju atveju gali būti aprašoma taip:

$$\frac{\Delta p}{L} = \phi(w_m, d, \rho, \mu, k), \quad (3.3.17)$$

kur L – vamzdžio ilgis, m; w_m – vidutinis vandens greitis, m/s; d – vidinis vamzdžio skersmuo, m; ρ – vandens tankis, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; μ – dinaminis klampumas, Pa·s; e – absoliutus vamzdžio paviršiaus šiurkštumas, m.

Pritaikius panašumo teoriją gaunamas bedimensinis parametras – tai trinties nuostolių koeficientas ξ . Jis priklauso nuo tekėjimo ir paviršiaus sąlygų:

$$\xi = \phi(\text{Re}, \frac{e}{d}). \quad (3.3.18)$$

Paviršiaus sąlygas nusako vamzdžio šiurkštumo ir jo diametro santykis. Palyginus du vienodo skersmens vamzdžius pastebima, kad kuo didesnis yra šiurkštumas, tuo trinties nuostoliai yra aukštesni. Šiurkštumas priklauso nuo vamzdžio medžiagos ir jos savybių ir apdirbimo būdo. Pavyzdžiui, naujai temptų plieninių vamzdžiui šiurkštumas yra 0,02–0,1 mm, kai garui ir karštam vandeniui naudojamų plieninių vamzdžių šiurkštumas yra 0,3–0,8 mm. Šiuo atveju laikoma, jog nagrinėjamas vamzdis yra preciziškai lygus.

Hidrauliniai trinties nuostoliai apskaičiuojami iš Karmano-Nikuradzės empirinės išraiškos (formulė galioja $3 \cdot 10^4 < \text{Re} < 10^6$ reikšmių intervale):

$$\xi = 0,046 \cdot \text{Re}^{-0,2} = 0,046 \cdot (1,627 \cdot 10^5)^{-0,2} = 0,004173. \quad (3.3.19)$$

Laikoma, kad trinties nuostoliai vamzdyne yra proporcingi vamzdyno ilgiui L . Šilumokaičio suminis vamzdžių ilgis yra apie 160 metrų. Todėl vamzdynų slėgio nuostoliai (Pa) šilumokaičiuje yra lygūs:

$$\Delta p_{tr} = 4 \cdot \xi \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{\rho w^2}{2} = 4 \cdot 0,004173 \cdot \frac{971,8 \cdot 2,0^2}{2} \cdot \frac{160}{0,0297} = 174775 \text{ .} \quad (3.3.20)$$

Vietinės kliūtys šilumokaityje susidaro fazoninėse vamzdyno dalyse. Kliūčių vietose staiga pakinta srauto greitis, galimas atitrūkimas nuo sienelių, atsiranda sūkuriavimas. Visa tai susiję su papildomais slėgio nuostoliais. Šie nuostoliai vandens tiekimo sistemose gali sudaryti apie 10–20 % trinties nuostolių. Vietinių kliūčių pasipriešinimai, Pa yra lygūs:

$$\Delta p_v = 4 \cdot \xi \cdot \frac{\rho w^2}{2} \sum \frac{L}{d_i} \text{ .} \quad (3.3.21)$$

L/d_i yra įvairių vietinių kliūčių koeficientai. Jie įvairioms vietinėms kliūtims paprastai nustatomi eksperimentiškai ir priklausomai nuo kliūties pobūdžio pateikiami formulėmis, grafikais arba lentelėmis. Analizuojamas šilumokaitis turi 32 180° ir 20 90° sulenkimus, kurių vietiniai pasipriešinimo koeficientai atitinkamai lygūs 50 ir 16,5[20]. Turbulentinio srauto slėgio pasipriešinimas vietinėms kliūtims įveikti yra proporcingas greičio kvadratui, o koeficientas L/d_i priklauso tik nuo kliūties tipo ir beveik nepriklauso nuo Re skaičiaus. Viską įvertinus yra apskaičiuojamas vietinių kliūčių koeficientas Δp_v Pa:

$$\Delta p_v = 4 \cdot 0,004173 \cdot \frac{971,8 \cdot 2,0^2}{2} \cdot (32 \cdot 50 + 20 \cdot 16,5) = 62614 \text{ .} \quad (3.3.22)$$

Vanduo tekėdamas šilumokaičiu kaista. Kartu su temperatūros didėjimu didėja ir greitis, tačiau mažėja vandens tankis. Todėl plotui nepakitęs didėja kinetinė energija, tačiau mažėja potencinė. Iš to matyti, kad slėgio nuostoliai dėl vandens pagreitėjimo šilumokaityje Δp_{pag} , Pa, yra:

$$\Delta p_{pag} = \rho_2 \cdot w_2^2 - \rho_1 \cdot w_1^2 \text{ .} \quad (3.3.23)$$

Tačiau pagreičio slėgių skirtumas šiuo atveju nedaro didelės įtakos, lyginant su trinties ir vietinių kliūčių nuostoliais. To priežastis – skystos fazės fluido tankio pokytis yra sąlyginai mažas lyginant su dujų tankio pokyčiu. Todėl nepaisoma slėgio nuostolių, kurie patiriami dėl vandens pagreitėjimo.

Taip pat fluido tekėjimui poveikį daro savaiminio tekėjimo slėgio nuostoliai, kurie atsiranda dėl gyvatuko altitudės pokyčio.[24] Esant temperatūros skirtumams, atsiranda varomoji jėga, šaldomame kanale nukreipta žemyn, o šildomame – aukštyn. Nagrinėjamu atveju savaiminio

tekėjimo pasipriešinimo taip pat galima nepaisyti, nes vertikaliuose kanaluose susidarę nuostoliai vienas kitą kompensuoja. Todėl:

$$\Delta p_{sav} = \pm g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cong 0. \quad (3.3.24)$$

Galiausiai apskaičiuojami suminiai slėgio nuostoliai modifikuotoje panaudoto branduolinio kuro talpykloje, bar:

$$\Delta p_{sav} = \frac{174775 + 62614 + 0 + 0}{10^5} \cong 2,37. \quad (3.3.25)$$

Slėgimo galia, kuri yra būtina srautui cirkuliuoti šilumokaičiu taip pat yra svarbus parametras, kaip ir šilumokaičio šilumos mainų parametrai. Siurblio galia yra proporcinga slėgio nuostoliams Δp , kurie atsiranda šilumokaičio kanaluose. Vanduo, kuris teka šilumokaičio kanalu tūriniu debitu V , siurbimo galia (kW) yra lygi:

$$N = \frac{\Delta p \cdot \dot{V}}{\eta_{iz}} = \frac{2,76 \cdot 10^5 \cdot 0,00454}{0,8} = 1,34, \quad (3.3.26)$$

kur η_{iz} yra izoentropinis siurblio naudingumo koeficientas.

Vandens tekėjimą šilumokaityje nuolat trikdo hidrauliniai pasipriešinimai. Tad buvo apskaičiuoti šilumokaičio vamzdynuose patiriami slėgio nuostoliai, kurie lygūs 174775 Pa, ir vietinių kliūčių nuostoliai, kurie yra 62614 Pa. Remiantis šiais duomenimis buvo apskaičiuoti suminiai slėgio nuostoliai modifikuotoje panaudoto branduolinio kuro talpykloje – 2,37 bar. Galiausiai buvo nustatyta 1,34 kW siurblio galia, kuri reikalinga tam, kad būtų įveikti pasipriešinimai šilumokaičio vamzdyne.

IŠVADOS

1. Pagrindinis branduolinės energetikos ir kitų energetikos sričių skirtumas yra toks, kad netgi sustabdžius reaktoriaus veikimą branduolinis kuras išskiria šiluminę energiją, kuri yra vadinama likutine šiluma. Tad saugant PBK neišvengiamai susiduriama su likutinės šilumos šalinimo problemomis. Pradiniame PBK saugojimo etape labiausiai paplitęs būdas yra šlapias saugojimas. Šis metodas pasižymi tuo, kad jame vanduo atlieka šilumos nešėjo funkciją. Antrame PBK saugojimo etape kuras patalpinamas į sauso saugojimo talpyklas. Jose aušinimas palaikomas natūralia oro konvekcija. Vertinant ilgalaikį PBK saugojimą, ekonomiškumą ir saugumą, galima teigti, kad natūralus aušinamas sausosiose talpyklose yra patrauklesnė alternatyva nei šlapias saugojimas aušinimo baseinuose. Tiek šlapio, tiek sauso saugojimo metu išsiskiriančiai likutinei šilumai panaudoti yra sukurta nemažai teorinių galimybių, vis dėl to dažniausiai jos potencialas nėra išnaudojamas praktikoje.

2. Dėl mažesnių kaštų ir laiko sąnaudų, esamos PBK sistemos modifikavimas, o ne naujos kūrimas, yra ypač naudingas siekiant efektyviai panaudoti likutinę šilumą. Modifikuojant PBK saugojimo sistemą ir kuriant likutinės šilumos panaudojimo technologiją, buvo sujungti sauso ir šlapio saugojimo būdai – PBK patalpinamas į sausąją talpyklą, kurioje integruojamas likutinei šilumai iš talpyklos pašalinti skirtas vandens–vandens šilumokaitis. Vandens tekėjimas likutinės šilumos pašalinimo iš talpyklos sistemoje yra sukeliama cirkuliaciniais siurbliais, kurie veikia pagal PBK sausojoje talpyklose esančio temperatūros daviklio išduodamą signalą. Svarbu tai, jog atominė elektrinė nėra priklausoma nuo šios sistemos veikimo, tad joje įvykus gedimui, atominės elektrinės darbas nėra sutrikdomas. Vis dėl to taikant šią sistemą gali būti susiduriama su nemažai saugojimui grėsmę keliančių veiksnių. Vienos pagrindinių problemų, kurios gali kilti PBK saugojimo metu, yra apvalkalo trūkis dėl įtempimų padidėjimo, kritiškumas, lydinių korozija, hidridų susidarymas.

Šiame darbe kuriant likutinės šilumos panaudojimo sistemą buvo modifikuojama CASTOR–V/21 PBK talpykla. Modifikuotą talpyklą sudaro kaliojo ketaus korpusas, nerūdijančiojo plieno šilumokaitis, boruotas krepšys, plieno pirminis ir antrinis dangčiai. Modifikuotos talpyklos korpuse buvo pridėtos keturios papildomos 390 mm gylio išpjovos, o ant vidinio korpuso pagrindo padarytos 75 mm kolonos PBK krepšiui ir PBK rinkei užfiksuoti. Šilumokaitis sudarytas iš 4 nepriklausomų nerūdijančiojo plieno vamzdžių, kurie yra išdėstyti tarp kuro krepšio sienelių. Vamzdžių paskirtis – užfiksuoti šilumokaitį talpykloje ir sudaryti prieigą į PBK talpyklos vidų iš išorės. Krepšio konstrukcija liko nepakitusi, tačiau dėl atsiradusių išpjovų korpuse užpildymo pakito pirminio ir antrinio dangčio geometrinės charakteristikos.

3. Pagrįsti modifikuotos PBK likutinės šilumos technologijos naudingumui buvo atlikti termohidrauliniai skaičiavimai. Pirmiausiai, siekiant nustatyti iš PBK elementų išsiskiriančią likutinę

šilumą, buvo pastebėta, jog iš reaktoriaus ištrauktų panaudoto branduolinio kuro rinklių likutinė šiluma iš karto pradeda staigiai mažėti. Todėl norint panaudoti likutinę šilumą kuo efektyviau, būtina kuo ankstesnė šios energijos generacija.

Toliau darbe apskaičiuota preliminari temperatūra esant maksimaliai užsiduotai PBK apvalkalo temperatūrai. Nustatyta, jog norint išgauti šilumą iš PBK talpyklos, sienelių temperatūra neturi viršyti 177,82 °C. Tai yra pirmoji sąlyga, norint eksploatuoti PBK likutinės šilumos panaudojimo sistemą. Taip pat iš Niutono lygties buvo apskaičiuotas šilumos atidavimas tarp vandens ir PBK krepšio sienelių. Nustatyta, kad vidutinė vandens temperatūra apytikriai yra lygi 168 °C, o jos

$$\text{atidavimo koeficientas } \alpha_1 = 1221,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Kadangi į PBK talpyklos šilumokaitį vanduo turi būti tiekiamas ne mažesnės nei 53 laipsnių temperatūros, tad buvo atlikti skaičiavimai, kuriais nustatyta iš šilumokaičio ištekancio vandens temperatūra. Rezultatai parodė, kad vanduo, tekėdamas pro PBK šilumokaitį, pašyla 36 laipsniais (nuo 53 iki 89 °C). Taip pat, remiantis šilumos perdavimo per šilumokaičio vamzdžio sienelę skaičiavimais, buvo nustatyta, kad minimali PBK talpyklos temperatūra yra 114,6 °C.

Vandens tekėjimą šilumokaityje nuolat trikdo hidrauliniai pasipriešinimai. Tad buvo apskaičiuota, kad šilumokaičio vamzdynuose patiriami slėgio nuostoliai yra lygūs 174775 Pa, o vietinių kliūčių nuostoliai yra 62614 Pa. Remiantis šiais duomenimis buvo išsiaiškinti suminiai slėgio nuostoliai modifikuotoje panaudoto branduolinio kuro talpykloje – 2,37 bar. Galiausiai nustatyta, jog įveikti pasipriešinimams šilumokaičio vamzdyne yra reikalinga 1,34 kW siurblio galia.

Atlikti termohidrauliniai skaičiavimai rodo, jog PBK likutinės šilumos panaudojimo sistemos taikymas turi potencialo, tačiau tam reikalingi papildomi skaičiavimai.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. American national standard, Characterizing Damaged Spent Nuclear. Fuel for the Purpose of Storage and Transport, AINSI N14.33–2005 (2005)
2. Bare W.C., Torgerson L.D. Dry Cask Storage Characterization Project-Phase 1: CASTOR V/21 Cask Opening and Examination. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, August 2001, NUREG/CR-6745, INEEL/EXT-01-00183
3. Bunn M. et al. Interim Storage of Spent Nuclear Fuel. A Safe, Flexible, and Cost-Effective Near-Term Approach to Spent Fuel Management, 2001
4. Buongiorno J. PWR Description. 22.06 Engineering of Nuclear Systems. Massachusetts institute of Technology, 2010.
5. Caillat T., Sakamoto J., Jewell A., Huang C. – K., Cheng J., Paik J., Gogna P., Fleurial J. P. and Ewell R. Status of Skutterudite-Based Segmented Thermoelectric Technology Components Development at JPL. Jet Propulsion Laboratory/California institute of Technology, 2006
6. Campo A.. On the Teaching of the Lumped Model for Unsteady Heat Conduction: Natural Convection Versus Forced Convection. Latin American and Caribbean Journal of engineering education, Vol. 5(2), 20101, August 26, 2011
7. Energy resources international. Spent Fuel Storage Handbook, Edison Electric institute (1990)
8. Feiveson H., Mian Z., Ramana M.V., von Hippel F. Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors Experience and Lessons from Around the World. International Panel on Fissile Materials, September 2011, ISBN 978-0-9819275-9-6
9. Forsberg Ch. W. Rethinking Multipurpose Spent Nuclear Fuel Casks and Canisters // Article Prepared for Spent Fuel Management Seminar XIX, 2008
10. Furlong R. R., Wahlquist E. J. U.S. space missions using radioisotope power systems. Nuclear news, April 1999
11. Garland J. Decay Heat Estimates for MNR, 39 Years of Academic & Research Excellence, Technical Report 1998-03, 1999
12. Gimbutis G., Kajutis K., Krukoniš V., Pranckūnas A., Švenčianas P. Šiluminė technika. „Mokslas“, 1993, Vilnius, ISBN 5-420-00751-7
13. Hanson B., Alsaed H., Stockman C., Enos D., Meyer R. Sorenson K. Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel/Used fuel disposition campaign. Fuel cycle research and development, January 31, 2012, FCRD–USED-2011-000136, Rev. 0
14. Houghtalen R. J., Akan A. O., Hwang N. H. C. Fundamentals of Hydraulic Engineering systems. Fourth Edition. Prentice Hall, 2009, ISBN 13: 9780136016380

15. International Atomic Energy Agency. Long term storage of spent nuclear fuel – Survey and recommendations. Vienna, 2002, IAEA–TECDOC-1293
16. International Atomic Energy Agency. Spent fuel performance assessment and research/Final report of a Co-ordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR) 1997–2001. Vienna, 2003, IAEA–TECDOC-1343
17. International Atomic Energy Agency. Survey of wet and dry spent fuel storage. Vienna, Austria, 1999, IAEA-TECDOC-1100
18. International Atomic Energy Agency. Thermophysical properties of materials for water cooled reactors, Vienna, Austria, 1997, IAEA-TECDOC-949
19. Yee T. F., Grossmann I. E. Optimization model for structural modifications in the retrofit of heat exchanger networks. Department of Civil and Environmental Engineering, Carnegie Institute of Technology, USA, 1986
20. Kakac S Liu H. Heat exchangers. Slection, rating and thermal design. Second edition. CRC PRESS, Washington D.C., 2002, JAV
21. Kim D.-J., Kim J. H., Kim K. S., Yang J. H., Kim S. K., Koo Y.-H. Thermodynamic Assessment of UO₂ Pellet Oxidation in Mixture Atmospheres under Spent Fuel Pool Accident. „World Journal of Nuclear Science and Technology“, LWR Fuel Technology Division, Korea Atomic Energy Research institute, Daejeon, South Korea, 2015, 5, 102–106
22. Larinoff M.W., Moles W.E. and Reichhelm R.. Design and Specification of Air-Cooled Steam Condensers
23. Maučec M., Glumac B. Criticality safety and sensitivity analyses of pwr spent nuclear fuel repository facilities. Nuclear technology – January 2005, Vol. 149
24. N. Liutikas, J. Gudzinskas. Termohidromechanika. Vadovėlis. Technologija, Kaunas, 2001
25. Nusbaumer O. Decay heat in nuclear reactors // Ameripysics, 2014
26. Patterson C., Garzarolli F., Adamson R., Coleman K. Fuel Performance in Dry Storage/ Dry Storage Handbook. Advanced Nuclear Technology International, Sweden, March 2015
27. Ragheb M. Decay heat generation in fission reactors, 2011-03-22.
28. Ragheb M. Nuclear Power - Deployment, Operation and Sustainability, Pavel Tsvetkov (Ed.), 2011. ISBN : 978-953-307-474-0
29. Romanato L. S. Advantages of Dry Hardened Cask Storage Over Wet Storage for Spent Nuclear Fuel // International Nuclear Atlantic Conference – INAC, 2011. ISBN: 978-85-99141-04-5
30. Safety And Security Of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage: Public Report, 2006, ISBN: 0309105110, 9780309105118

31. Schreiber J. G., Wood. J. G., Chan J Development of Advanced Stirling Radioisotope Generator for Space Exploration. Space Technology and Applications International Forum, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Cleveland, May 2007, NASA/TM–2007–214806
32. Šilumos ir atomo energetikos katedra. Branduolinių įrenginių šilumokaičiai. Paskaitų medžiaga
33. Švenčianas P, Adomavičius A. Inžinerinė termodinamika. Vadovėlis. KTU leidykla „Technologija“, 2011, Kaunas, ISBN 978-609-02-0047-6
34. Thermal and Nuclear Power Engineering Society of Japan (TENPES). Handbook for Thermal and Nuclear Power Engineers, English Edition of the 6th Edition, 2002
35. Tilghman M., „Using Nuclear Waste Heat as Power Source“, Stanford University, March 19, 2012

1 PRIEDAS

$$T_{u\check{s}} = 172,7^{\circ}\text{C}$$

Antroji laisvosios konvekcijos uždavinio iteracija.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = -\frac{1}{889,2} \cdot \frac{(889,2 - 894,5)}{172,7 - 177,8} = 0,00012 \frac{1}{\text{K}}$$

Toliau apskaičiuojamas Grashofo kriterijus:

$$Gr_m = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta T = \frac{0,00012 \cdot 9,81 \cdot 4,06^3}{0,177^2 \cdot 10^{-12}} \cdot 5,1 = 1,28 \cdot 10^{14}$$

Koeficientų n ir b reikšmės priklauso nuo aptekamo paviršiaus charakteristikų. Be to, koeficientai priklauso ir nuo tekėjimo režimo. Natūralios konvekcijos atveju laminariu tekėjimu laikome tokį tekėjimą, kai $Gr_m \cdot Pr_m$ reikšmė yra mažesnė nei $2 \cdot 10^7$. Kitu atveju tekėjimas yra laikomas turbulentiiniu. Koeficientų reikšmės yra pateiktos 2 lentelėje

Nagrinėjamu atveju fluidas apiplauna vertikalią sienelę. Tokiu atveju Nuselto kriterijus yra lygus:

$$Nu_m = 0,135 \cdot (1,28 \cdot 10^{14} \cdot 1,025)^{0,33} = 6114,5$$

Tada apskaičiuojame likusius nežinomuosius (atidavimo koeficientą ir fluido temperatūrą).

$$\alpha = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{l} = \frac{6114,5 \cdot 0,677}{4,06} = 1019,6;$$

$$q' = U' \cdot \Delta T \rightarrow T' = T_{max} - \frac{q}{\alpha}$$

$$T' = 177,8 - \frac{11,85 \cdot 10^3}{1019,6} = 166,2^{\circ}\text{C}$$

$$T_{u\check{s}} = 166,2^{\circ}\text{C}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = -\frac{1}{889,2} \cdot \frac{(889,2 - 901,0)}{177,8 - 165,9} = 0,00113 \frac{1}{K}$$

$$Gr_m = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta T = \frac{0,00113 \cdot 9,81 \cdot 4,06^3}{0,187^2 \cdot 10^{-12}} \cdot 11,9 = 2,52 \cdot 10^{14}$$

$$Nu_m = 0,135 \cdot (2,52 \cdot 10^{14} \cdot 1,06)^{0,33} = 7783$$

$$\alpha = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{l} = \frac{7783 \cdot 0,681}{4,06} = 1305,5;$$

$$T' = 177,8 - \frac{11,85 \cdot 10^3}{1305,5} = 168,7^\circ\text{C}$$

$$T_{u\check{s}} = 168,7^\circ\text{C}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = -\frac{1}{889,2} \cdot \frac{(889,2 - 898,6)}{177,8 - 168,7} = 0,00116 \frac{1}{K}$$

$$Gr_m = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta T = \frac{0,00116 \cdot 9,81 \cdot 4,06^3}{0,183^2 \cdot 10^{-12}} \cdot 9,1 = 2,07 \cdot 10^{14}$$

$$Nu_m = 0,135 \cdot (2,07 \cdot 10^{14} \cdot 1,06)^{0,33} = 7294$$

$$\alpha = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{l} = \frac{7294 \cdot 0,680}{4,06} = 1221,7;$$

$$T' = 177,8 - \frac{11,85 \cdot 10^3}{1221,7} = 168,1^\circ\text{C}$$

$$T_{u\check{s}} \cong T' \cong 168^\circ\text{C}$$