



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Edvinas Janušauskas

BRANDUOLINIO REAKTORIAUS IZOLIUOJANČIO
REGULIUOJANČIO VOŽTUVO TYRIMAS SKAITINIAIS
METODAIS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Linas Paukštaitis

KAUNAS, 2015

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

TVIRTINU
Katedros vedėjas
(parašas) doc. E. Puida
(data)

BRANDUOLINIO REAKTORIAUS IZOLIUOJANČIO
REGULIUOJANČIO VOŽTUVO TYRIMAS SKAITINIAIS
METODAIS

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (kodas 621E30001)M

Vadovas
(parašas) Linas Paukštaitis
(data)

Recenzentas
(parašas) Doc. dr. Martynas Gylis
(data)

Projektą atliko
(parašas) Edvinas Janušauskas
(data)

KAUNAS, 2015

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS IR MECHATRONIKOS FAKULTETAS**

Tvirtinu:

Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)
katedros vedėjas doc. E. Puida
(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS**

Studijų programa TERMOINŽINERIJA

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

1. Darbo tema: Branduolinio reaktoriaus izoliuojančio reguliuojančio vožtuvo tyrimas skaitiniais metodais.

Patvirtinta 2015 m. mėn. d. dekanų įsakymu Nr.

2. Darbo tikslas: Ištirti dvifazio srauto izoliuojančiame reguliuojančiame vožtuve susidarymo galimybę.

3. Darbo struktūra:

- ❖ Santrauka anglų kalba
- ❖ Įvadas
- ❖ RBMK tipo reaktorius
- ❖ Skaičiuojamoji fluidų dinamika
- ❖ Modelis kambario temperatūros sąlygomis
- ❖ Dvifazio srauto modeliavimas
- ❖ Išvados
- ❖ Literatūros sąrašas
- ❖ Priedai

4. Reikalavimai ir sąlygos: darbas turi atitikti baigiamajam magistro darbui keliamus reikalavimus.

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2015 m. gegužės mėn. 29 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui Edvinui Janušauskui

Užduotį gavau Edvinas Janušauskas
(studento vardas, pavardė)

.....
(parašas) (data)

Vadovas Linas Paukštaitis
(pareigos, vardas, pavardė)

.....
(parašas) (data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Edvinas Janušauskas

(Studento vardas, pavardė)

Termoinžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Branduolinio reaktoriaus izoliuojančio reguliuojančio vožtuvo tyrimas skaitiniais metodais

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 _____
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Edvino Janušausko** baigiamasis projektas tema „Branduolinio reaktoriaus izoliuojančio reguliuojančio vožtuvo tyrimas skaitiniais metodais“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Janušauskas E. The study of isolating – regulating nuclear reactor valve by numerical methods. Master thesis / supervisor Linas Paukštaitis; Kaunas technology university, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Thermal and Nuclear Energy.

Kaunas, 2015. 70 pages.

SUMMARY

Nuclear energy is highly efficient and clean compared to conventional methods to produce energy. However past catastrophes in nuclear energy industry had shown there is not enough attention to secure the operation during different conditions and external disruptions. Overheating of reactor core is the main threat.

Reactor's cooling system contains isolating – regulating valve (IRV) which is this paper's numerical analysis object. Under normal conditions of RBMK type reactor water passes through IRV at 270°C and pressure of 7 MPa. Due to complex geometry of valve and its functionality pressure inside IRV drops potentially enabling water to reach its saturation conditions, boil inside valve and disrupt safe operation of reactor. Numerical analysis was performed to examine the production of two – phase flow inside IRV.

TURINYS

IVADAS.....	11
1 RBMK TIPO REAKTORIUS	13
1.1 RBMK-1500 reaktoriaus konstrukcija.....	14
1.2 Kuro rinklė.....	14
1.3 Aušinimo kontūras.....	15
1.4 Aušinimo vandens parametrai	17
1.5 Izoliuojantis – reguliuojantis vožtuvas	18
2 SKAIČIUOJAMOJI FLUIDŲ DINAMIKA.....	20
2.1 Taikymas	21
2.2 Modeliavimo eiga.....	22
2.2.1 Modeliuojamas objektas.....	22
2.2.2 Diskretizavimas.....	23
2.2.3 Kraštinės sąlygos.....	23
2.2.4 Sprendimo kontrolė	24
2.2.5 Rezultatų apdorojimas.....	25
2.3 Sprendžiamos lygtys.....	25
2.4 Dvifazis srautas.....	26
2.5 Dvifazio srauto tekėjimo modeliai	26
2.5.1 Dreifo modelis.....	27
2.5.2 Heterogeninis modelis.....	27
2.5.3 Keturių lygčių modelis	27
2.5.4 Homogeninės pusiausvyros modelis	27
3 MODELIS KAMBARIO TEMPERATŪROS SĄLYGOMIS	28
3.1 Vožtuvo modelis.....	29
3.2 Vamzduko modelis	30
3.2.1 Vamzduko tinklelis ir kraštinės sąlygos.....	31
3.2.2 Vamzduko rezultatai	33
3.3 Kraštinės sąlygos	34
3.4 Sprendimas	35
3.5 Modelio tinkleliai	35
3.5.1 4 mm vožtuvo atsidarymas.....	35
3.5.2 6 mm vožtuvo atsidarymas.....	37
3.5.3 8 mm vožtuvo atsidarymas.....	38
3.5.4 10 mm vožtuvo atsidarymas.....	40
3.5.5 12 mm vožtuvo atsidarymas.....	41
3.6 Rezultatai	43
4 DVIFAZIO SRAUTO MODELIAVIMAS.....	47
4.1 Kraštinės sąlygos	47
4.2 Rezultatai	47
4.2.1 4 mm vožtuvo atsidarymas.....	47
4.2.2 6 mm vožtuvo atsidarymas.....	50
4.2.3 8 mm vožtuvo atsidarymas.....	53
4.2.4 10 mm vožtuvo atsidarymas.....	56

4.2.5	12 mm vožtuvo atsidarymas.....	59
4.3	Paklaidų šaltiniai.....	62
5	IŠVADOS.....	63
6	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	64
7	PRIEDAI.....	65
7.1	Izoliuojančio – reguliuojančio vožtuvo surinkimo brėžinys	65
7.2	Korpuso brėžinys	65
7.3	Balno brėžinys	65
7.4	Sklandies brėžinys	65
7.5	Vamzduko brėžinys	65

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. RBMK tipo reaktorių pasiskirstymas pasaulyje [3]	13
1.2 lentelė. Aušinančio vandens parametrai RBMK-1500 reaktoriuje	17
1.3 lentelė. Debito skerspjūvio priklausomybė nuo atsidarymo laipsnio.....	19
3.1 lentelė. Eksperimentiniai ir skaitinio modeliavimo rezultatai (1).....	43
3.2 lentelė. Eksperimentiniai ir skaitinio modeliavimo rezultatai (2).....	43
4.1 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai.....	47
4.2 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai.....	50
4.3 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai.....	53
4.4 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai.....	56
4.5 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai.....	59

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Kuro rinklė [7].....	15
1.2 pav. RBMK-1500 reaktoriaus pjūvis [6].....	16
1.3 pav. Principinė reaktoriaus aušinimo schema[6].....	17
1.4 pav. Vandens parametrų priklausomybė nuo aukščio kuro kanale[6]	18
1.5 pav. Izolijuojantis reguliuojantis vožtuvas: 1 - vožtuvas, 2 - rutulinis debitomatis, 3 – vamzdynas į šiluminį kanalą, 4 – grupinis paskirstymo kolektorius.....	19
1.6 pav. Vožtuvo slėgio nuostolių priklausomybė nuo debito	20
pav. 2.1 Naujasis ryšys tarp tyrimo metodų	21
2.2 pav. Modeliavimo eigos schema	22
2.3 pav. Principinė domeno diskretizavimo schema [9]	23
2.4 pav. Vidutinių kvadratinių paklaidų dinamikos pavyzdys CFX aplinkoje	24
3.1 pav. Vožtuvo modelis SolidWorks aplinkoje.....	29
3.2 pav. Vožtuvo fluido tūrio (domeno) modelis ANSYS CFX aplinkoje.	30
3.3 pav. Vamzdžio tarp grupinio paskirstymo kolektoriaus ir vožtuvo fluido (domeno) modelis ANSYS CFX aplinkoje	31
3.4 pav. Vamzduko tinklelis (bendras vaizdas).....	32
3.5 pav. Vamzduko tinklelis (vamzduko išėjimas)	32
3.6 pav. Vamzduko greičio profilis simetrijos plokštumoje	33
3.7 pav. Vamzduko greičio profilis išėjime	34
3.8 pav. 4 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje	35
3.9 pav. 4 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje	36
3.10 pav. 4 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje.....	36
3.11 pav. 6 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje	37
3.12 pav. 6 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje	37
3.13 pav. 6 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje.....	38
3.14 pav. 8 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje	38
3.15 pav. 8 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje	39
3.16 pav. 8 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje.....	39
3.17 pav. 10 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje	40
3.18 pav. 10 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje	40
3.19 pav. 10 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje.....	41
3.20 pav. 12 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje	41
3.21 pav. 12 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje	42
3.22 pav. 12 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje.....	42
3.23 pav. Vožtuvo slėgio nuostolių nuo debito priklausomybės skirtingiems vožtuvo atsidarymo laipsniams.....	43
3.24 pav. Taškų sraute judėjimo linijos.....	44
3.25 pav. Greičio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje	45
3.26 pav. Greičio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje. Sandarinimo zona.	45
3.27 pav. Slėgio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje	46
3.28 pav. Slėgio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje. Sandarinimo zona.	46
4.1 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito	48
4.2 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 50 m ³ /h)....	48
4.3 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 75 m ³ /h)....	49

4.4 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 100 m ³ /h)..	49
4.5 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 125 m ³ /h)..	50
4.6 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito	51
4.7 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 75 m ³ /h)....	51
4.8 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 100 m ³ /h)..	52
4.9 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 150 m ³ /h)..	52
4.10 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 200 m ³ /h)	53
4.11 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito	54
4.12 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas 100 m ³ /h)	54
4.13 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas 150 m ³ /h)	55
4.14 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas 200 m ³ /h)	55
4.15 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas 250 m ³ /h)	56
4.16 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito	57
4.17 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 100 m ³ /h)	57
4.18 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 200 m ³ /h)	58
4.19 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 250 m ³ /h)	58
4.20 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 300 m ³ /h)	59
4.21 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito	60
4.22 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 100 m ³ /h)	60
4.23 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 150 m ³ /h)	61
4.24 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 250 m ³ /h)	61
4.25 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 350 m ³ /h)	62

IVADAS

Šiuo metu branduolinės elektrinės gamina maždaug trečdalį elektros energijos ir 15 proc. visos Europos Sąjungoje (ES) suvartojamos energijos. 2015 sausį Europoje veikė 185 branduolinės jėgainės (5 jėgainės Azijinėje Rusijos dalyje), kurių bendra instaliuota elektrinė galia – 163,144 MWe. Tuo tarpu 17 jėgainių, kurių bendra suminė galia 15,559 MWe šešiose šalyse dabar dar tik statoma.

1 lentelė. Branduolinė energetika Europoje [1]

Šalis	Veikiančios atominės elektrinės		Statomos atominės elektrinės	
	Skaičius	Suminė elektrinė galia, MWe	Skaičius	Suminė elektrinė galia, MWe
Baltarusija	-	-	2	2,218
Belgija	7	5,927	-	-
Bulgarija	2	1,906	-	-
Čekijos Respublika	6	3,884	-	-
Suomija	4	2,752	1	1,6
Prancūzija	58	63,13	1	1,63
Vokietija	9	12,068	-	-
Vengrija	4	1,889	-	-
Olandija	1	482	-	-
Rumunija	2	1,3	-	-
Rusija	34	24,654	9	7,371
Slovakija	4	1,815	2	880
Slovėnija	1	688	-	-
Ispanija	7	7,121	-	-
Švedija	10	9,474	-	-
Šveicarija	5	3,308	-	-
Ukraina	15	13,107	2	1,9
Jungtinė Karalystė	16	9,243	-	-
Viso:	185	163,144	17	15,599

Šis sektorius išskiria mažai anglies dioksido ir tiekia energiją palyginti stabiliomis kainomis, dėl to yra patrauklus siekiant energijos tiekimo saugumo ir kovojant su klimato kaita [2].

Tačiau branduolinė energetika yra daug jautresnė saugumo klausimais, o vieninteliai atvejai, kai branduolinėse jėgainėse kilo avarijos yra žinomi visam pasauliui. Saugiam reaktoriaus darbui kritiškai svarbus aktyviosios zonos aušinimas. Tyrimų objektas – RBMK tipo reaktoriaus, kurių šiai dienai veikiančių yra dar 11 [3], aušinimo kontūre esantis izoliuojantis –

reguliuojantis vožtuvas, kuris priklausomai nuo šiluminio kanalo galios, kontroliuoja šilumnešio debitą į aktyviąją zoną.

Šilumnešiui tekant pro vožtuvą, krinta jo slėgis. Dėl aukštos darbinės temperatūros yra reali galimybė pasiekti sotinimo slėgį, kuomet vanduo pradeda virti ir generuoti antrą fazę sraute – garą. Žvelgiant technologiškai, vanduo į aktyviosios zonos kanalą (t.y. iš vožtuvo) turėtų patekti be garo priemaišų ir pradėti virti tik šiluminiame kanale. Priešingu atveju mažėja šilumos atidavimo koeficientas, reaktoriaus efektyvumas, o esant kritiniam garo srautui tai tampa ir saugumo klausimu.

Šio projekto tikslas, pasitelkiant skaičiuojamąją fluidų dinamiką, ištirti dvifazio srauto susidarymo izoliuojančiame – reguliuojančiame vožtuve galimybę ir įvertinti ar tai kelia grėsmę saugiam reaktoriaus darbui.

Darbo uždaviniai:

- apžvelgti RBMK tipo reaktoriaus aušinimo kontūrą;
- sukurti trimatį izoliuojančio – reguliuojančio vožtuvo modelį;
- palyginti skaitinius rezultatus su eksperimentiniais [4];
- Apkraunant vožtuvą iki 10 kartų didesniu nei eksperimentinis tūrinis debitu nustatyti garo susidarymo vožtuve kiekybines reikšmes.

1 RBMK TIPO REAKTORIUS

RBMK (didelės galios kanalų tipo reaktorius) - tai savitos konstrukcijos didelės galios reaktorius, pirmą kartą Sovietų Sąjungoje pradėtas naudoti 1973 m. Reaktorius gali būti naudojamas elektros energijai gaminti ir išgauti plutoniui. Tai yra vienintelis pasaulyje reaktorius lėtikliui naudojantis grafitą, o aušinimui - paprastą vandenį [5]. 1.1 lentelėje pavaizduotas šio tipo reaktorių pasiskirstymas pasaulyje.

1.1 lentelė. RBMK tipo reaktorių pasiskirstymas pasaulyje [3]

Vieta	Vienetai	Paleidimo metai	Reaktoriaus galia (MWe)	Būsena
Lietuva				
Ignalina	1	1983	1185	Uždarytas 2004 gruodį
	2	1987	1185	Uždarytas 2009 gruodį
Rusija				
Kurskas	1	1976	925	Veikiantis iki 2021
	2	1979	925	Veikiantis iki 2024
	3	1984	925	Veikiantis iki 2014.03
	4	1986	925	Veikiantis iki 2016 vasario
	5	-		Statyba sustabdyta
Sankt Peterburgas	1	1973	925	Veikiantis iki 2019
	2	1975	925	Veikiantis iki 2021
	3	1979	925	Veikiantis iki 2025 birželio
	4	1981	925	Veikiantis iki 2026 rugpjūčio
Smolenskas	1	1983	925	Veikiantis iki 2013 gruodžio
	2	1985	925	Veikiantis iki 2015 liepos
	3	1990	925	Veikiantis iki 2023 liepos
Ukraina				
Černobylis	1	1977	925	Uždarytas 1996
	2	1978	925	Uždarytas 1991
	3	1981	925	Uždarytas 2000
	4	1983	925	Reaktorius išardytas 1986 balandį
	5	-	925	Statyba atšaukta
	6	-	925	Statyba atšaukta

Kaip parodė Černobylio incidentas keli RBMK tipo projektiniai sprendimai – konkrečiai valdymo strypų valdymo sistema ir teigiamas reaktyvumo koeficientas (teigiama koreliacija tarp garo dalies kanale ir kanalo šiluminės galios) buvo nesaugūs. 11-oje šiuo metu veikiančių RBMK tipo reaktorių po Černobylio avarijos buvo imtasi esminių konstrukcinių pakeitimų, siekiant išvengti panašių incidentų ateityje.

RBMK reaktoriai yra seno tipo ir yra laikomi mažiausiai saugiais lyginant su šiuolaikiniais reaktoriais. Lietuvai 2004 m. įstojus į Europos Sąjungą abipusiu susitarimu Lietuva prisiėmė atsakomybę uždaryti Ignalinos atominės elektrinės antrąjį bloką. Apie tris ketvirtadalius Lietuvos elektros poreikio iki tol tenkinęs RBMK 1500 tipo reaktorius 2009 metais buvo pilnai sustabdytas.

1.1 RBMK-1500 reaktoriaus konstrukcija

Svarbiausia reaktoriaus konstrukcijos dalis – grafitinis klojinys su branduoliniu kuru, strypais – sugėrikliais ir gaubiančiomis jį metalo konstrukcijomis – įrengta betoninėje šachtoje. Vertikaliuose grafitinio klojinio kolonose yra technologiniai kanalai su branduoliniu kuru bei valdymo ir apsaugos sistemos kanalai. Klojinys įrengtas ant suvirintos metalinės konstrukcijos, besiremiančios į betoninį pagrindą. Iš viršaus klojinys perdengiamas viršutiniąja metaline konstrukcija, besiremiančia į biologinės apsaugos žiedinį vandens baką. Suvirintas cilindrinis gaubtas, gaubiantis klojinį, viršutinė ir apatinė reaktoriaus metalinės konstrukcijos sudaro hermetišką reaktoriaus ertmę. Ji užpildyta helio ir azoto mišiniu, kad grafitas nesioksiduotų ir būtų geresnis šilumos perdavimas nuo grafito į technologinius kanalus.

Numatyta galimybė keisti valdymo – apsaugos ir technologinius kanalus remontuojant, kai reaktorius sustabdytas ir atvėsęs.

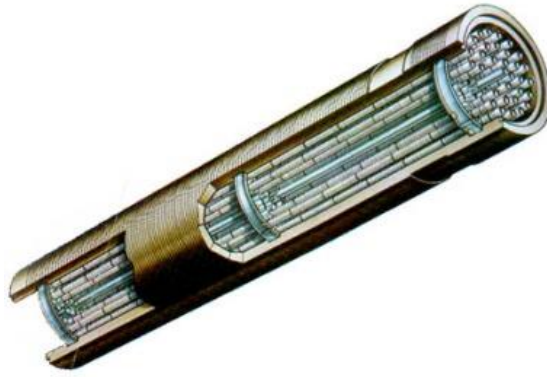
Technologiniai kanalai – vamzdžio konstrukcijos, kurios viršutinė ir apatinė dalys pagamintos iš korozijai atsparaus plieno, o vidurinioji iš cirkonio lydinio. Pjautiniai grafito žiedai kanaluose užtikrina šiluminį kontaktą su klojinio grafito blokais.

Į technologinį kanalą ant pakabos įleidžiama šilumą išskirianti kasetė. Ji sudaryta iš dviejų rinklių, turinčių po 18 šilumą išskiriančių elementų, kurie yra hermetiški cirkonio lydinio vamzdeliai, užpildyti kuro tabletėmis iš urano dioksido.

Reaktoriaus biologinei apsaugai naudojamas anglinis plienas, serpentino skalda ir gargždas, betonas, smėlis, vanduo [6].

1.2 Kuro rinklė

Vienas iš skiriamųjų RBMK reaktoriaus charakteristikų yra tai, kad kiekvienas kuro surinkimo vienetas – elementas yra talpinamas individualiame slėginiame – technologiniame kanale. Į kanalą dedamas aukštai temperatūrai atsparus cirkonio lydinio strypas, kurio viduje yra branduolinio kuro – urano dioksido 11,5 mm skersmens ir 15mm ilgio tabletės. Kuro rinklė pavaizduota 1.2 paveiksle.



1.1 pav. Kuro rinklė [7]

Siekiant suvienodinti energijos išsiskyrimą kuro rinklėje, tenka naudoti skirtingo prisotinimo šiluminius elementus: silpnai sodrintus – periferinėje dalyje, stipriau sodrintus – centrinėje rinklės dalyje.

RBMK reaktoriaus branduolys susideda iš 1661 technologinių kuro kanalų, kuriuos vieną nuo kito skiria slėginių vamzdžių sienelės ir grafito blokai. Kiekvienas slėginis vamzdis yra autonomiškas. Pavyzdžiui, aušinančio vandens debitas yra kontroliuojamas reguliuojančio – izoliuojančio vožtuvo. Šio vožtuvo pagalba galima atjungti atskirą kanalą nuo pirminės aušinimo sistemos kol reaktorius veikia.

Šilumos agentas – vanduo tiekiamas į kiekvieną technologinį kanalą iš apačios. Šilumos mainams pagerinti ant viršutinės šilumą išskiriančios rinklės įrengtos grotelės – intensifikatoriai. Šilumą išskiriančios kasetės su išdegusiu kuru iškraunamos ir gabenamos į saugojimo vietą. Kasečių pakeitimas naujomis vykdomas krovimo mašina esančia centrinėje elektrinės salėje.

1.3 Aušinimo kontūras

Kaip minėta ankščiau, RBMK-1500 reaktorius turi 1661 kuro kanalus, kurie yra tarsi 1661 maži reaktoriaus branduoliai. Reaktoriaus branduolio ir kitų komponentų vieta pavaizduota 1.1 paveiksle. Reaktoriaus aušinimo sistema turi 2 vienodus kontūrus, kurie tarpusavyje sujungti garo vamzdynu, tačiau neturi bendro vamzdyno vandens daliai. Vanduo tiekiamas į 1661 kuro kanalus (2), kur dalinai išgarinamas skilimo reakcijos metu išsiskyrusios energijos dėka. Vandens ir garo mišinys tuomet patenka į būgninį garo separatorių (16) bendrą abejiems kontūrams, kuriame garas atskiriamas nuo vandens ir yra nukreipiamas į turbinas. Iš kiekvieno separatoriaus garas į turbinas patenka dviem garotiekiais.

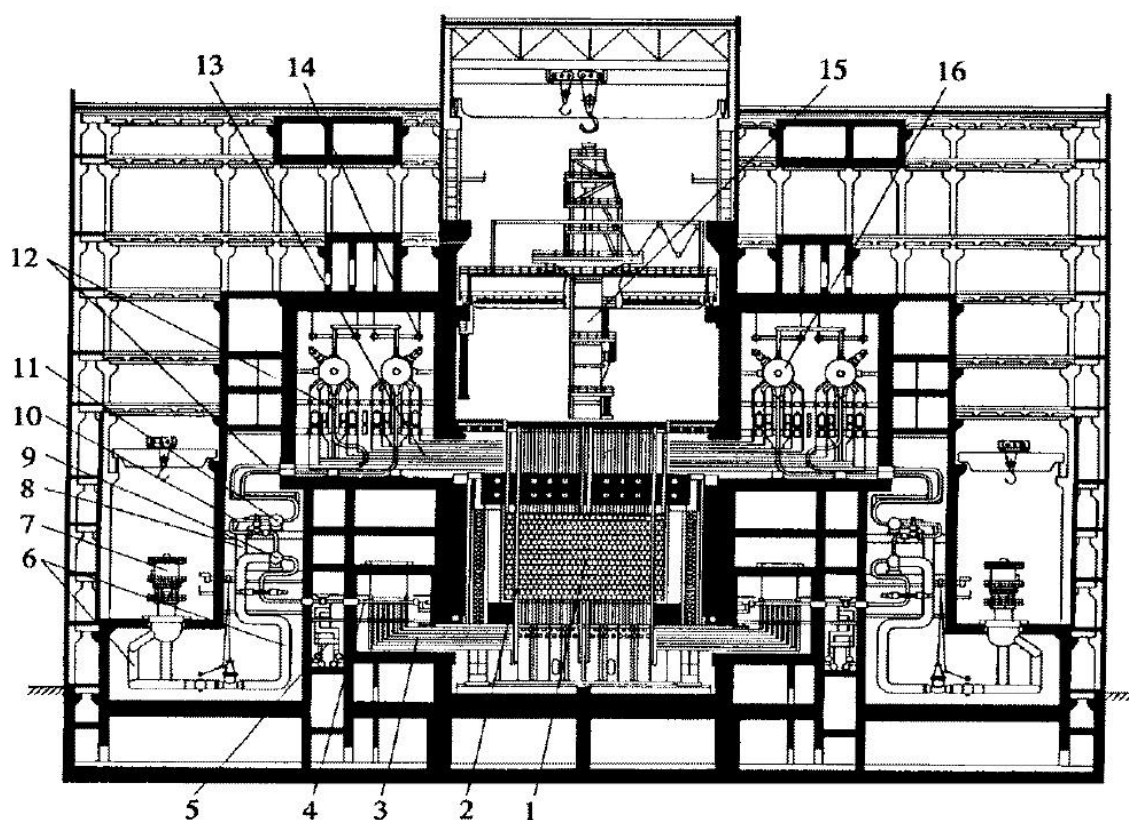
Garotiekis įrengtas taip, kad būtų galima užtikrinti kiekvieno separatoriaus ryšį su dviem turbinomis. Įrengimų ir garotiekio apsaugai nuo neleistino slėgio pakilimo numatyta garo droseliavimo sistema, per kurią garo perteklius patenka į turbinų kondensatorius arba lokalizavimo sistemos kondensacines kameras. Garas, praėjęs turbinas, yra nukreipiamas į kondensatorius, kuriuose kondensuojasi. Kondensatas tiekiamas į deaeratorius iš kur maitinimo

siurbliais yra grąžinamas į reaktoriaus aušinimo kontūrą. Vanduo iš būgninio garo separatoriaus (16) grįžtamoju vamzdynu (12) patenka į siurbimo kolektorių (11) ir tuomet siurbliais (7) yra tiekiamas į pagrindinių cirkuliacinių siurbių slėginį kolektorių (9), kurie tiekimo vamzdynu sujungti su 20 grupinių paskirstymo kolektorių.

Siurbliai dirba su 100% rezervavimu. Siurbliai – vertikalūs, išcentriniai, vienos pakopos. Nominalus siurblio debitas – $8500\text{m}^3/\text{val.}$, esant 200 m. vand. st. slėgiui. Sukimosi dažnis – 1000 aps/min., elektros variklio galia – 5500 kW.

Kiekvieno pagrindinio cirkuliacijos siurblio įsiurbiančiame vamzdyne įrengta uždarymo sklendė. Slėgimo vamzdyne – atbulinis vožtuvas, droselinis vožtuvas ir uždarymo sklendė. Įsiurbiantys ir slėgimo kiekvienos kilpos kolektoriai sujungti šešiais baipasiniais vamzdynais, turinčiais po uždarymo sklendę ir atbulinį vožtuvą. Apėjimo vamzdynas (10) užtikrina natūralią šilumnešio cirkuliaciją esant avariniam pagrindinių cirkuliacijos siurbių išsijungimui.

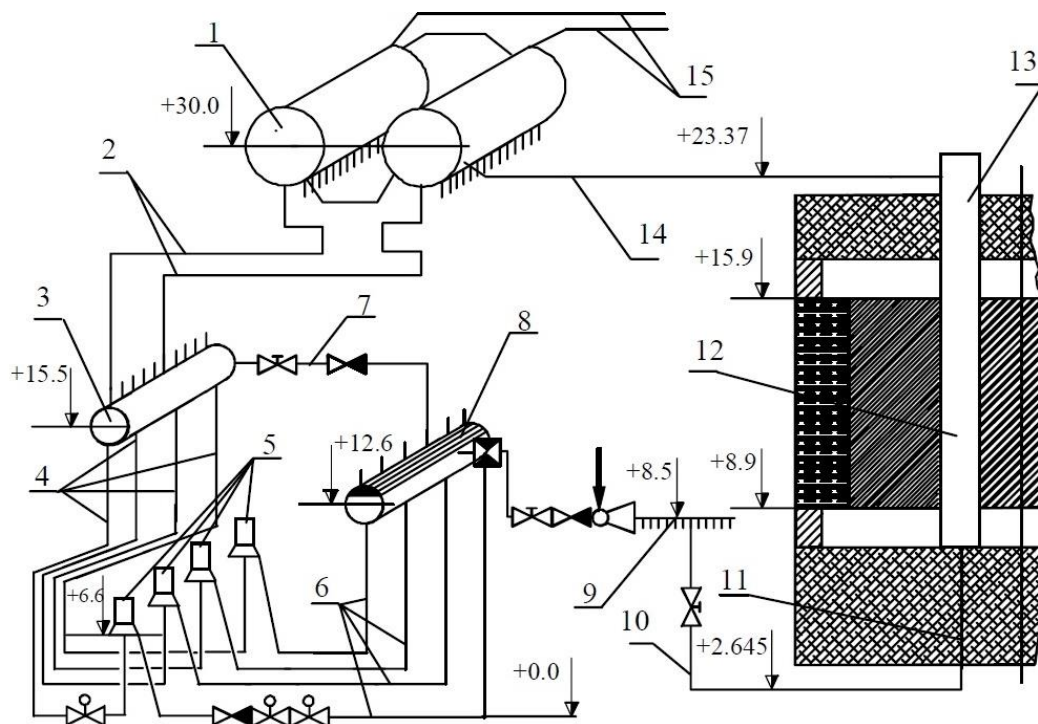
Viso yra 40 grupinių paskirstymo kolektorių (20 kolektorių kiekvienam reaktoriaus aušinimo kontūrai). Kiekvienas grupinis paskirstymo kolektorius apatiniu vandens paskirstymo vamzdynu (3) vandenį tiekia 41 – 43 kuro kanalams (2). Šilumnešio debitas per kiekvieną kuro kanalą yra reguliuojamas izoliuojančiu – reguliuojančiu vožtuvu, kuris yra ant kiekvieno vandens paskirstymo vamzdyno (3). [6]



1.2 pav. RBMK-1500 reaktoriaus pjūvis [6]: 1 – grafito strypai, 2 – kuro kanalas, 3 – apatinis vandens vamzdynas, 4 – grupinis paskirstymo kolektorius, 5 – avarinis branduolio aušinimo vamzdynas, 6 – pagrindinių siurbių slėginis vamzdynas, 7 – pagrindiniai cirkuliaciniai siurbliai,

8 – siurbimo vamzdynas, 9 – slėginis kolektorius, 10 – apėjimo vamzdynas, 11 – siurbimo kolektorius, 12 – grįžimo vamzdynas, 13 – garo ir vandens vamzdynas, 14 – garo vamzdynas, 15 – kuro papildymo mašina, 16 – garo separatorius

Viename aušinimo kontūre šiluma nuvedama nuo pusės reaktoriaus. Šilumos agentas paskirstomas reaktoriaus technologiniams kanalams priklausomai nuo energijos išsiskyrimo aktyviojoje zonoje.



1.3 pav. Principinė reaktoriaus aušinimo schema[6]: 1 – būgninis garo separatorius, 2 - apatinis vandens vamzdynas, 3 – siurbimo kolektorius, 4 – cirkuliacinių siurblių siurbimo vamzdynas, 5 – cirkuliaciniai siurbliai, 6 – slėginis vamzdynas, 7 – apėjimo vamzdynas, 8 – slėgimo kolektorius, 9 – grupinis paskirstymo kolektorius, 10 – apatinis vandens vamzdynas, 11 – kuro kanalas prieš branduolį, 12 – kuro kanalas branduolyje, 13 – kuro kanalas virš branduolio, 14 – vandens – garo vamzdynas, 15 – garo vamzdynas

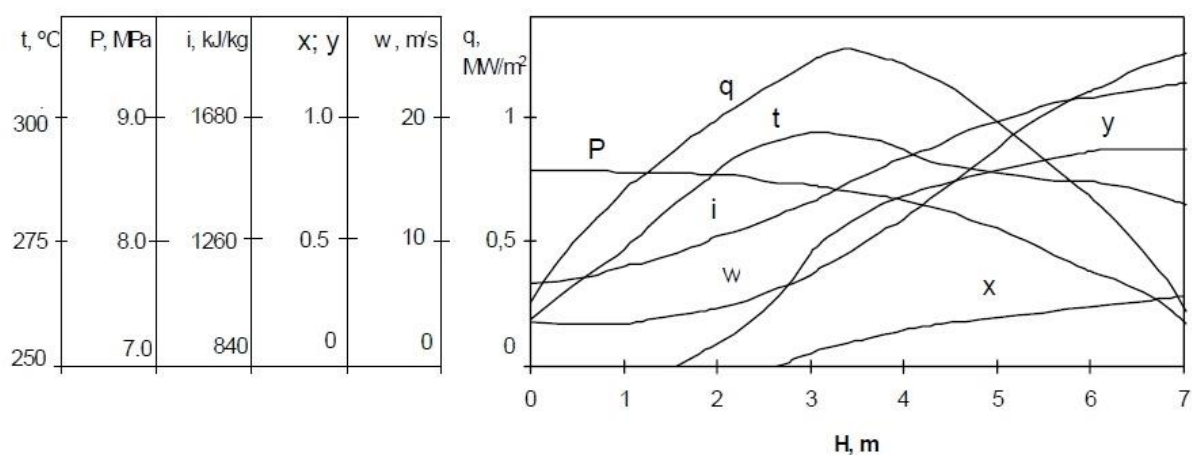
1.4 Aušinimo vandens parametrai

Aušinančio vandens darbiniai parametrai reaktoriuje pateikti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Aušinančio vandens parametrai RBMK-1500 reaktoriuje

Garų debitas separatoriaus būgne, kg/s	2055-2125
Maitinimo vandens debitas, kg/s	2055-2125
Debitas branduolyje, m ³ /s (m ³ /h)	10,83-13,33 (39000-48000)
Sotaus garo slėgis separatoriaus būgne (abs), MPa	6,47-6,96
Fluido temperatūra įėjime į branduolį, °C	260-266
Garų dalis garo-vandens mišinyje, % masės dalies	23,0-29,0
Masinė vandens dalis atskirtame gare, %	apie 0,1

Kaip žinoma vandens parametrai turi tamprią priklausomybę nuo slėgio ir temperatūros. Aušinimo vanduo, patekęs į apatinę kanalo dalį, šyla. Pasiekęs sotinimo būseną- verda, taip susidaro dvifazis srautas. Viršutinėje kanalo dalyje didžioji frakcija yra dujinės būsenos. Vandens parametrai sparčiai kinta. Parametrų kitimas priklausomai nuo vandens pakilimo kanale aukščio pateiktas 1.4 paveiksle (esant maksimaliai 4200 MWt reaktoriaus galiai).



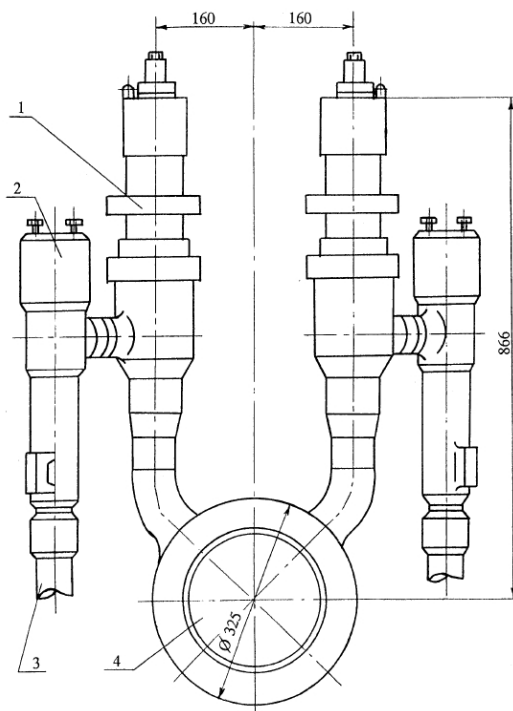
1.4 pav. Vandens parametrų priklausomybė nuo aukščio kuro kanale[6]: p - slėgis, i - entalpija, w - greitis, q – šilumos srautas, y – tūrinė garo dalis garo – vandens mišinyje, t – temperatūra, x – garo kokybė (masinė garo dalis mišinyje)

1.5 Izoliuojantis – reguliuojantis vožtuvas

Kaip minėta 1.3 skyriuje tyrimo objektas – izoliuojantis reguliuojantis vožtuvas aušinimo kontūre yra prieš aktyviają zoną – šilumos kanalus. Aušinimo vanduo, praėjęs cirkuliacinius siurblius ir hidraulinę armatūrą, patenka į grupinį paskirstymo kolektorių. Iš 325 mm išorinio skersmens ir 15 mm sienelės storio kolektoriaus 45° kryptimi išeina 40 – 43 atvamzdžiai, kurie įeina į ant kiekvieno vamzdžio esančius vertikaliai orientuotus izoliuojančius – reguliuojančius vožtuvus.

Detalūs trimačių modelių brėžiniai pateikti prieduose 1 – 5. Principinis vožtuvo brėžinys pavaizduotas 1.5 pav.

Priklausomai nuo kuro sodrinimo šilumos kanalų galia reaktoriaus pjūvyje ženkliai skiriasi. Aušinimas reguliuojamas individualiai kiekvienam šilumos kanalui. Tad tokių kolektorių yra 40.



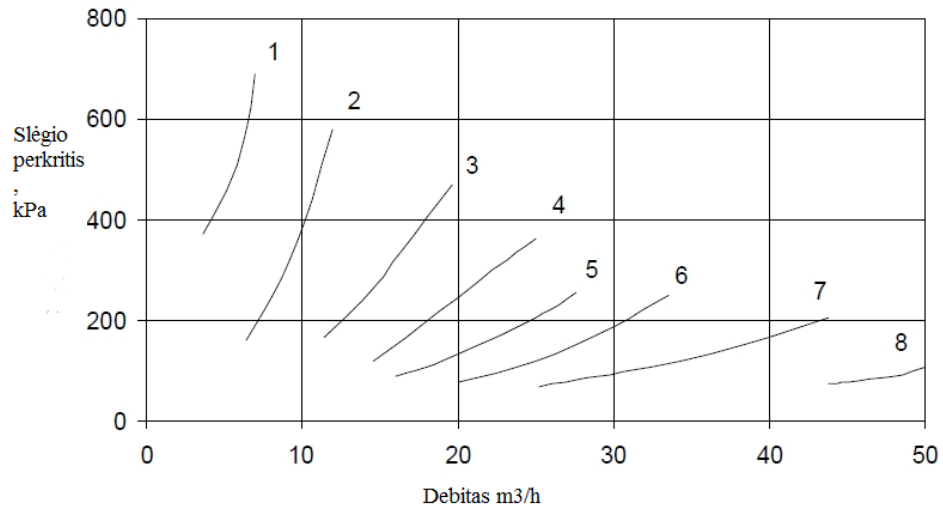
1.5 pav. Izoliuojantis reguliuojantis vožtuvas: 1 - vožtuvas, 2 - rutulinis debitomatis, 3 – vamzdynas į šiluminį kanalą, 4 – grupinis paskirstymo kolektorius

Rutulinis debitomatis skirtas matuoti pratekantį vandens debitą, o žinant temperatūrą, taip pat ir šiluminę galią. Izoliuojantis reguliuojantis vožtuvas reguliuoja kanalo debitą priklausomai nuo norimos pasiekti kanalo galios arba aušinimo poreikio.

Spyruoklinis reguliavimo mechanizmas yra viršutinėje vožtuvo dalyje ir šiame darbe modeliuotas nebuvo, nes mechaninė vožtuvo sistema jokios įtakos jo hidraulinėms savybėms nedaro. Pratekantis debitas keičiasi priklausomai nuo debito skerspjūvio vožtuve (atsidarymo laipsnio). Atidarymo laipsnis reguliuojamas rankiniu būdu iš atskirų patalpų, esančių greta reaktoriaus bloko. Numatoma izoliuojančio reguliuojančio vožtuvo tarnavimo trukmė – 50000 valandų. Deklaruojama vožtuvo darbo kreivė pateikta 1.6 paveiksle ir 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Debito skerspjūvio priklausomybė nuo atsidarymo laipsnio

Kreivė	Vožtuvo sklandies dispozicija (atsidarymo laipsnis), mm	Debito skerspjūvio plotas, mm ²
1	2	54
2	4	102
3	6	153
4	8	206
5	10	263
6	12	319
7	16	437
8	24	691



1.6 pav. Vožtuvo slėgio nuostolių priklausomybė nuo debito

Debitai kiekviename kuro kanale priklauso nuo numatomos kuro ir branduolio dinamikos ir apima lokalinės galios kitimą (individualus kuro rinklės galios reguliavimas). Dėl laipsniško kuro išdegimo ir galios mažėjimo atliekamas periodinis izoliuojančių reguliuojančių vožtuvų debito koregavimas. [12]

2 SKAIČIUOJAMOJI FLUIDŲ DINAMIKA

Skaičiuojamoji fluidų dinamika (angl. computational fluid dynamics – CFD) Tai skysčių mechanikos sritis, kuri šiandien plačiai naudojama analizuojant su fluidų tekėjimu susijusias problemas.

Siekiant išnagrinėti srauto tekėjimą skaičiuojamojoje fluidų dinamikoje, paprastai nagrinėjamas baigtinio tūrio elementas srauto tėkmėje. Formuojant matematinį modelį priimamos trys pagrindinės prielaidos:

1. masės tvermė – įtekėjusi ir ištekėjusi iš baigtinio tūrio fluido masė yra pastovi;
2. $F = m \cdot a$ (impulso tvermė – antrasis Niutono dėsnis) – fluido impulso pokytis proporcingas fluidą veikiančių jėgų sumai;
3. energijos tvermė – pirmasis termodinamikos dėsnis – energijos pokytis proporcingas atlikto darbo ir šilumos pokyčiams.

Šie fundamentalūs principai gali būti išreikšti per matematinės lygtis, kurios bendru atveju yra dalinių išvestinių lygtys.

Devynioliktojo amžiaus pirmoje pusėje nepriklausomai vienas nuo kito panašiu laikotarpiu prancūzas M. Navie ir anglas G. Stoksas išvedė šiandien vieną pagrindinių fluidų dinamikos lygčių. Bendroje formoje Navie-Stokso lygtis (2.1):

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + f \quad (2.1)$$

čia:

v – srauto greitis;

ρ - fluído tankis;

T – skysčio įtempių matrica;

f – erdvinės jėgos, veikiančios fluידą;

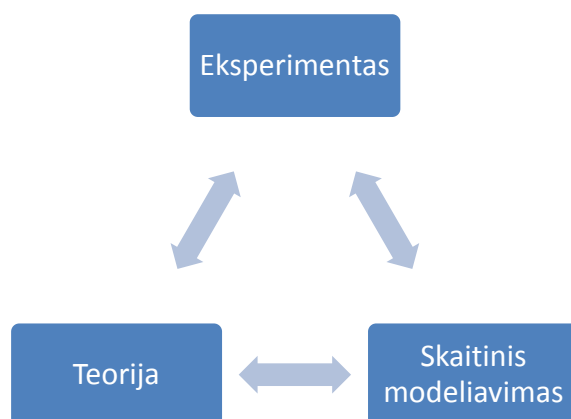
∇ - matematinis operatorius.

Skaičiuojamosios fluidų dinamikos pagrindinis uždavinys - (2.1) lygtyje esančias dalines išvestines, matematinius operatorius ir kitas išraiškas pakeisti skaičių matrica – lauku, kuris kaip įmanoma tiksliau apibūdintų nagrinėjamą fizikinį reiškinį.

Retais atvejais skaičiuojamosios skysčių dinamikos uždaviniai gali būti išspręsti tiesiogiai, tačiau dažniausiai praktikoje sutinkamas sprendimas yra iteracinis. Sprendimo eigoje naudojama tūkstančiai, dažnai ir milijonai skaičių – užduotis, kuri žmogiškai yra neįmanoma be kompiuterio pagalbos. Būtent todėl, instrumentas, kuris lėmė sparčią skaičiuojamosios skysčių dinamikos plėtrą yra didelės skaičiuojamosios galios kompiuteriai. Šios srities plėtra nagrinėjant vis detalesnius modelius yra glaudžiai susijusi su kompiuterinės įrangos – ypač atminties saugojimo ir skaičiavimo greičio evoliucija. Todėl viena stipriausių varančiųjų jėgų kompiuterinės technikos tobulinime yra skaičiuojamosios fluidų dinamikos bendruomenė [8].

2.1 Taikymas

Dvidešimtojo amžiaus pradžioje tradicinis mokslo modelis buvo paremtas teorija ir eksperimentu, tačiau amžiui įpusėjus į šį modelį įsiterpė skaitinis modeliavimas.



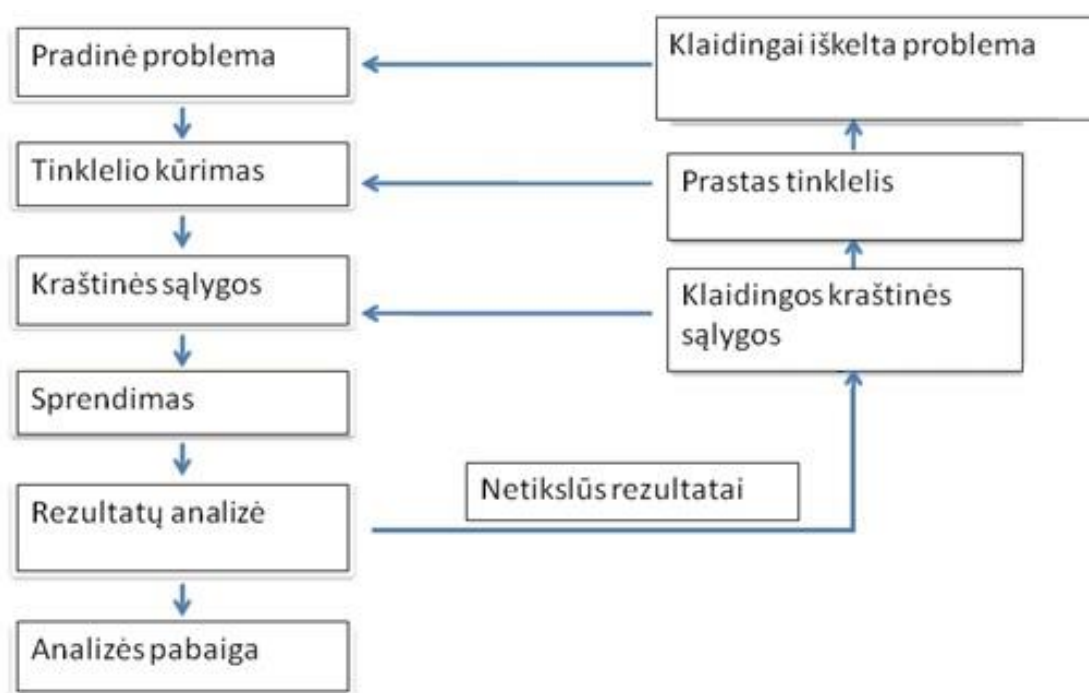
pav. 2.1 Naujasis ryšys tarp tyrimo metodų

Fluidų dinamikos tyrimai skaitiniais metodais turėjo didžiulę įtaką aviacijoje, hidromechanikoje, aerodinamikoje ir kitose su fluidų tekėjimu susijusiose tyrimų srityse.

Šiandien skaičiuojamoji fluidų dinamika taikoma eilėje industrijų: biomedicinoje, pramonėje, energetikoje, branduolinėje saugoje, elektronikoje, gynybinėse sistemose, aviacijoje, aplinkosaugoje ir kitose srityse. Sprendžiami uždaviniai taip pat labai įvairūs. Skaitinis modeliavimas gali būti pasitelktas, kai eksperimento negalima atlikti fiziškai, vykstantys fizikiniai procesai yra sunkiai išmatuojami, yra ypač greiti ar lėti, kyla pavojus žmonių saugai ar dėl finansinių resursų. Modeliavimas taip pat naudojamas tobulinant technologinius procesus – aerodinamiką turbogeneratoriuose, vėjo energetikoje, mašinų gamyboje, projektuojant naujus įrengimus ir tiriant esamus.

2.2 Modeliavimo eiga

2.2 paveiksle pavaizduota bendra skaičiuojamosios fluidų dinamikos modeliavimo uždavinių eiga. Trumpai paminėsime, kas vyksta kiekviename iš etapų.



2.2 pav. Modeliavimo eigos schema

2.2.1 Modeliuojamas objektas

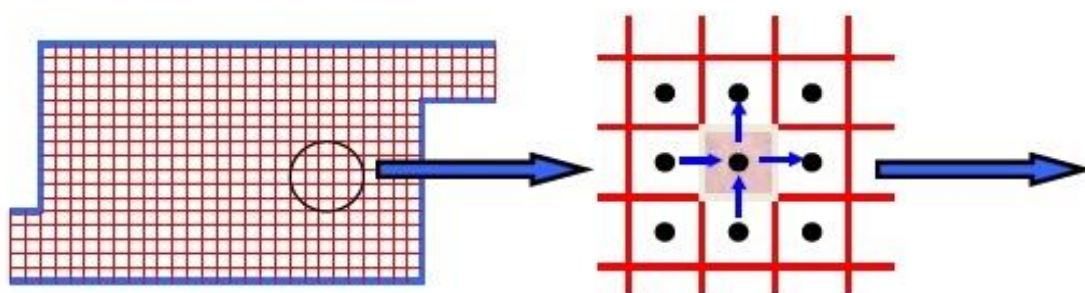
Analizuojant modeliuojamą situaciją pirmiausia nustatomas proceso pobūdis. Ar procesas stacionarus ar kintantis laike. Tai gali būti laminarinis tekėjimas, dvifazio srauto susidarymas, skirtingų fazinių būsenų maišymasis ar pernaša, įvairūs masės ir šilumos mainai, įvairių rūšių

turbulencija, spinduliavimo reiškiniai, geometrijoje apibrėžtos judančios zonos (maišymas, turbinų darbo ratai), vykstančios cheminės reakcijos. Nustatomi modeliavimo tikslai.

Pagal apibrėžtą fizikinį uždavinį, formuojamas domenas (angl. domain) – fluído kūnas. Šiam tikslui pasitelkiamos CAD programos.

2.2.2 Diskretizavimas

Modelio diskretizavimas arba domeno skaidymas į baigtinius elementus yra vienas svarbiausių modeliavimo etapų, nes kaip galima įsitikinti vėlesniuose skyriuose, nuo tinkelio kokybės ir detalumo aukštų parametrų gradientų zonose labai priklauso sprendimo eiga ir rezultatai. Egzistuoja keli diskretizavimo metodai: baigtinių skirtumų, baigtinių elementų, spektrinių elementų, aukšto išskaidymo (angl. high-resolution), tačiau praktikoje ir komerciniuose skaitinių tyrimų paketuose plačiausiai taikomas metodas yra baigtinių tūrių.



2.3 pav. Principinė domeno diskretizavimo schema [9]

Baigtiniais tūriais suskaidytiems elementams galioja sąlyga:

$$\int_s \vec{V} \cdot \hat{n} ds = 0 \quad (2.2)$$

T.y. paviršinis tūrinio debito integralas statmenai elemento paviršiui yra lygus 0 (galioja įtekančių ir ištekančių srautų lygybė).

Tinkelio gamybai yra sukurta aibė kompiuterinių programų: Ansys Modeller, Grid Generator, GMSH, Engrid, Salome, NetGen ir kt.

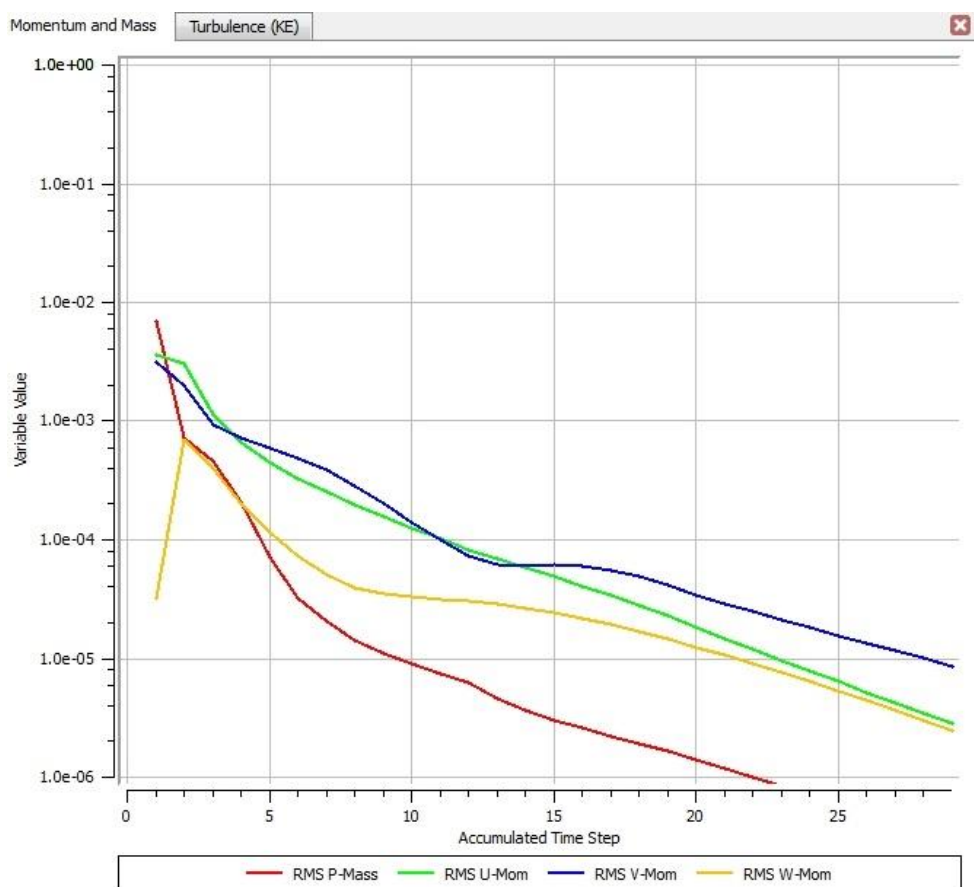
2.2.3 Kraštinės sąlygos

Kraštinės sąlygos yra dar vienas labai svarbus modeliavimo etapas, kurio tikslas yra kuo tiksliau aprašyti sistemoje vykstantį fizikinį reiškinį. Šiame etape nurodomi įėjimo ir išėjimo (ar simetrijos) paviršiai, nurodomos medžiagos, jų savybės, žinomos srauto savybės (greitis, debitas, slėgis, temperatūra, tankis ar kt.), parametrų priklausomybės nuo kitų parametrų ar kitimo laike. Apibrėžiamos vykstančios cheminės reakcijos, masės ar šilumos mainų šaltiniai ir/ar paviršiai, apibrėžiama fluידą ribojanti geometrija, sienų pralaidumas, parenkami turbulentiškumo modeliai.

2.2.4 Sprendimo kontrolė

Sprendimas šiandien, kaip minėta, įprastai atliekamas pasitelkiant kompiuterinius resursus. Tam taip pat yra sukurta nemažai programinių paketų: CFX, Fluent, StarCD, Flow3D, Phoenix, Numerica, OpenFoam ir kt. tačiau rinkoje lyderio vietą tvirtai užsitikrinę Ansys Fluent ir CFX paketai.

Šiame darbe tirtas vožtuvas buvo analizuojamas pasitelkiant ANSYS CFX paketą.



2.4 pav. Vidutinių kvadratinų paklaidų dinamikos pavyzdys CFX aplinkoje

2.4 paveiksle pavaizduotas modeliavimo uždavimo sprendimas Ansys CFX aplinkoje. Konkrečiu atveju vertikaloje ašyje atidėtos sprendžiamų tolydumo lygties ir judesio kiekio x, y, z kryptimis vidutinės kvadratinės paklaidos (angl. RMS – root mean square).

Stebint paklaidų dinamiką galima daryti prielaidas apie būsimus rezultatus, esant reikalui – nutraukti skaičiavimą.

Skaičiuojamosios fluidų dinamikos ribojantis faktorius yra skaičiavimo paklaidos. Jos atsiranda dėl apvalinimo, lygčių netikslumo, priimant įvairias prielaidas, pačio iteracinio metodo, kraštinių sąlygų netikslumo, geometrijos supaprastinimo ir kitų priežasčių. Prieš sprendimą nurodoma konvergavimo sąlyga – paprastai paklaidų dydis (pvz. 10^{-4}), kurį pasiekus stabdomas skaičiavimas.

2.2.5 Rezultatų apdorojimas

Sprendimo rezultatų apdorojimo etapas (angl. post-processing) yra baigiamoji projekto dalis, kurioje ant pačio modelio braižomi įvairių kintamųjų laukai, grafikai, išskaičiuojami ieškomi kintamieji nurodytose modelio vietose, sudarinėjamos lentelės, kintamųjų priklausomybės ir visa kita, ko buvo siekiama prieš pradėdant modeliuoti. Idealiu atveju modeliavimo rezultatai yra lyginami su eksperimentiniais duomenimis, daromos išvados.

Jei rezultatai yra nepatenkinami, (žr. 2.2 pav.) tikrinamos kraštinės sąlygos, tobulinamas tinklelis, esant reikalui – ir geometrija, tikrinama pirminė problemos analizė, ar teisingai suformuotas fizikinis uždavinys.

2.3 Sprendžiamos lygtys

Kaip minėta 2.2.4 skyriuje sprendimo eigoje ANSYS CFX vaizduoja sprendžiamų lygčių dinamiką. Svarbu suvokti kas įeina į šias lygtis ir būtent kokios lygtys yra sprendžiamos.

- Tolydumo lygtis:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.3)$$

- Judesio kiekio lygtys:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2.4)$$

- Bendra energijos lygtis:

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_t) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (2.5)$$

Šiose lygtyse esantys dydžiai:

ρ - tankis;

U – greitis;

t – laikas;

τ – įtempių tenzorius;

S_M – judesio kiekio šaltinis;

h_t – suminė entalpija;

λ - šilumos laidumo koeficientas;

S_E – šilumos srauto šaltinis[10];

Sprendžiant stacionarų uždavinį, kuomet kraštinės sąlygos ir parametrai laike nekinta, kintamieji, kurie turi laiko dedamąją yra lygūs nuliui ir lygtys supaprastėja.

Tai tik pagrindinės lygtys, tačiau priklausomai nuo pasirinktų kraštinių sąlygų yra sprendžiamos turbulencijos lygtys, gravitacijos įtakos, masės mainų, fluido būsenos lygtys.

2.4 Dvifazis srautas

Užsienio literatūroje dvifaziu srautu dažnai vadinami dviejų skirtingų medžiagų srautai esantys toje pačioje fazinėje būsenoje. Mes, kalbėdami apie dvifazius srautus, toliau turėsime mintyje vienos ar dviejų medžiagų srautą, kuriame medžiaga (-os) yra dviejų skirtingų fazinių būsenų ir yra skiriamos tarpfazinio paviršiaus.

Dvifaziai srautai gamtoje sutinkami kasdien – burbulai, lietus, jūros bangos, putos, geizeriai. Tačiau praktikoje daug aktualesnis srauto tyrimas tam tikrose srityse – kriogenikoje, turbinose, kondensatoriuose, degimo, džiovavimo įrenginiuose ir kitur, siekiant tobulinti naudojamą įrangą, taupyti energiją ar teršalų emisijas.

Dvifazių srautų mokslinis nagrinėjimas įgavo pagreitį 20 amžiuje, prasidėjus intensyviai pramonės garo mašinų gamybai ir eksploatacijai - atsirado poreikis suprasti pereinamuosius procesus vykstančius fluidams keičiant fazinę būseną ir taip užtikrinti saugų mašinų ir dirbančių žmonių darbą. Tradicinėje energetikoje garas gaminamas garo katiluose, kur suslėgtas vanduo kaitinamas katilo šilumokaičiuose keičia fazinę būseną ir suka garo turbiną. Projektuojant tokius katilus buvo būtina suprasti dvifazio srauto elgseną, kuri ženkliai skiriasi nuo vienfazio srauto.

Tačiau pagrindinį poreikį tyrimams šioje srityje tikriausiai turi pasaulinė atominės energetikos plėtra pasaulyje. Branduoliniuose reaktoriuose skylant urano izotopams išsiskiria milžiniški energijos kiekiai, kuriuos būtina šalinti iš aktyviosios zonos siekiant išlaikyti temperatūras saugiame, darbiname intervale. Reaktoriaus aktyviąją zoną aušina vanduo, kuris tradiciniame suslėgto vandens reaktoriuje, tekėdamas kanalu iš apačios į viršų, absorbuoja išskirtą energiją, verda ir aušina reaktorių.

Branduolinėje energetikoje egzistuoja atskira tyrimų sritis – aušinimo agento praradimo avarija (angl. a loss-of-coolant accident LOCA), kuri tiria avarinių situacijų prevencines priemones ir patikimų aušinimo sistemų projektinius – konstrukcinius sprendimus.

2.5 Dvifazio srauto tekėjimo modeliai

Dvifazių srautų teorija nėra pilnai išnagrinėta. Šiandien tebekuriami nauji, tobulinami jau naudojami modeliai siekiant kuo tiksliau aprašyti vykstančius termohidromechaninius procesus. Praktikoje šiandien plačiausiai taikomi 4 pagrindiniai dvifazių srautų teoriniai modeliai.

2.5.1 Dreifo modelis

Tokiame tekėjime skysčio ir garų greičiai gana smarkiai skiriasi ir jų negalime laikyti vienodais. Ryšys tarp tūrinio debitinio garingumo ir masinio debitinio garingumo negali būti analitiškai apskaičiuotas ir reikalauja tam tikrų analitinių duomenų, kurie jungia šiuos dydžius. Per paskutinius 50 metų buvo siūloma daug pusiau empirinių modelių. Pusiau empirinis modelis, turintis daugiausia fizinio pagrindo – dreifo modelis, kuris aprašo skysčio – dujų greičių skirtumą kaip dreifo srautą (arba dreifo greitį).

Dreifo modelyje priimama, kad fazių greičiai yra skirtingi ir tarpusavyje susiję santykiu (slydimo koeficientu):

$$s = \frac{w_d}{w_{sk}} \quad (2.6)$$

Šį modelį tinkama naudoti esant pastoviam arba beveik pastovios būsenos srautui ir esant mažiems slėgiams ir debitams.

2.5.2 Heterogeninis modelis

Šiame modelyje dvifazis srautas yra analizuojamas taip, lyg dujos ir skystis tekėtų atskirais vamzdžiais, kurių skerspjūvio plotas yra proporcingas tūriniam debitiniam garingumui. Siekiant įvertinti skysčio ir dujų sąveiką, formuluojant lygtis kontroliniam tūriui, įvedamos konstantos (masės, judesio kiekio ir energijos perdavimo greičiai i-ajai fazei), o pačios lygtys rašomos tiek skystai, tiek dujinai agregatinei būsenai. Todėl yra ne 3, kaip paprastai, o 6 lygtys. Patobulintos šio modelio lygtys naudojamos programiniuose paketuose.

Modelis tinkamas naudoti tarp fazių esant dideliems greičių ir temperatūrų skirtumams. Pateiktos lygtys nevertina trinties, paviršiaus įtempimo jėgų.

2.5.3 Keturių lygčių modelis

Skaičiuojant heterogeninių modelių lygtis susiduriama su kompiuterinių skaičiuojamųjų resursų problema – skaičiavimai tampa sudėtingi ir ilgai trunkantys. Ieškoma būdų supaprastinti skaičiavimus ir taikomos lygtys, kuriose dirbtinai nurodomos tam tikros proceso sąlygos. Pavyzdžiui: lygtis nusakanti fazių greičių skirtumo priklausomybę nuo laiko.

2.5.4 Homogeninės pusiausvyros modelis

Siekiant kuo paprasčiau modeliuoti dvifazį srautą jį galima laikyti kaip tam tikro vieno fluideo tekėjimą.

Homogeninės pusiausvyros modelyje (angl. Homogenous equilibrium model arba HEM) yra priimama, kad greitis, temperatūra ir slėgis tarp fazių ar srauto komponentų yra vienodas.

Tokia prielaida daroma laikantis, kad skirtumai tarp šių trijų potencinių kintamųjų (ir cheminio potencialo, jei atsižvelgiama į sraute vykstančias reakcijas) išvystys tokį momentą, energiją ir masės mainus tarp fazių pakankamai greitai, kad būtų pasiekta pusiausvyra. Kartais galima tokią prielaidą daryti, kai viena fazė yra smulkiai disperguota kitoje fazėje sukuriant didelį fazinių ribų paviršiaus plotą. Pavyzdžiui burbulinio oro ar garo tekėjimo vandenyje prie aukštų slėgių. Bendrai tariant, modelį patogiu naudoti esant aukštiems slėgiams ir debitams[11].

Kai naudojamas homogeninės pusiausvyros modelis, patartina palyginimui pasitikrinti jo prielaidų galiojimą naudojantis tikslesniais, teoriniais modeliais. Staigūs slėgio ar greičio kitimai ne visada gali būti tiksliai sumodeliuoti naudojant HEM modelį. Tarkime hidroužtvarų dvifaziame sraute atidarymas / uždarymas arba hidrosmūgio plitimas dvifaziame sraute. Tai ypač pasireiškia, kai slėgio kitimas yra didelis palyginus su aplinkos slėgiu ar bet kurio kito iš minėtų potencinių parametrų pokyčiai lyginant su sistemos tipinėmis reikšmėmis. Todėl naudojant šį modelį, reikia atsižvelgti į jo taikymo apribojimus.

Vėlesniuose skyriuose modeliuojant dvifazio srauto susidarymo galimybes izoliuojančiame – reguliuojančiame vožtuve priimtas homogeninis tekėjimo modelis.

3 MODELIS KAMBARIO TEMPERATŪROS SĄLYGOMIS

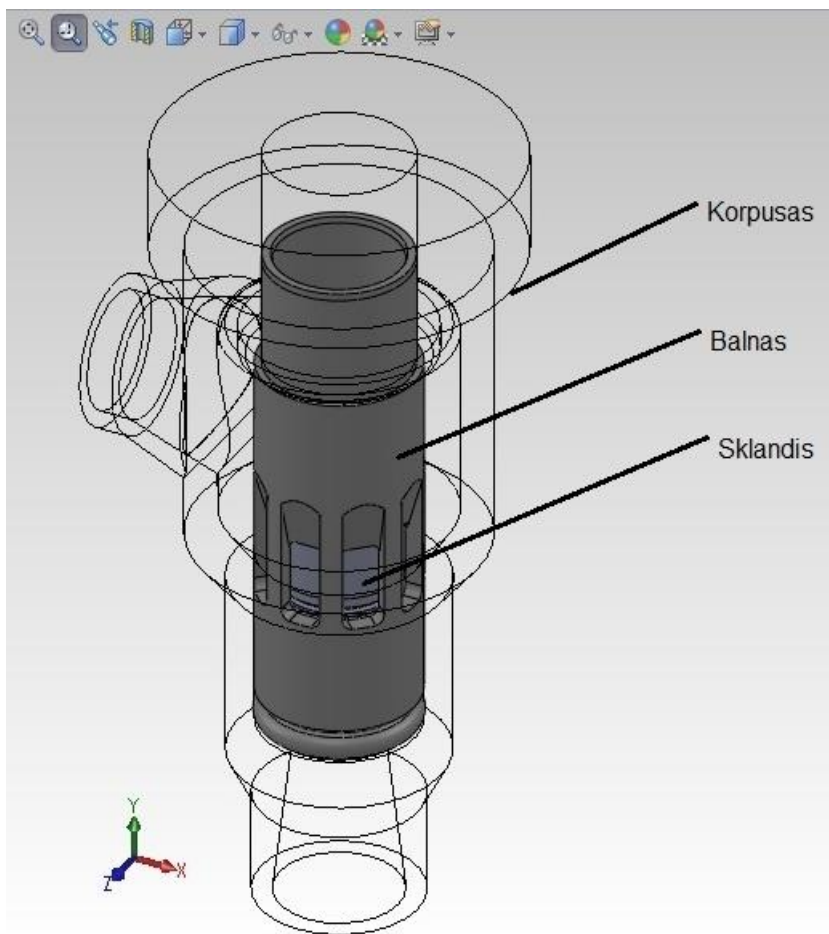
Tiriant bet koki fizikinį reiškinį skaitiniais metodais, idealu yra gautus duomenis lyginti tokių pačių, arba panašių kraštinių sąlygų eksperimentiniais duomenimis. Dvifazio srauto tekėjimo izoliuojančiame vožtuve eksperimentas iki šiol nebuvo atliktas, tačiau rusų mokslininkai yra atlikę panašią studiją [4], kurioje buvo sudarytos slėgio nuostolių per vožtuvą priklausomybės nuo pratekėjusio per jį tūrinio debito, kai vandens temperatūra – 25°C, o statinis slėgis – 1 bar.

Būtent ši studija tampa atraminiu tašku, pagal kurią, lyginant modeliavimo rezultatus, esant kambario temperatūros fluideo tekėjimo pobūdžiui, yra modeliuojamos realios vožtuvo darbinės sąlygos RBMK reaktoriaus aušinimo kontūre.

Kadangi kraštinės sąlygos yra pakankamai griežtai apibrėžtos, labiausiai rezultatus lemiantis veiksnys tampa modelio diskretizavimo rezultatas – tinklelis. Taigi šio etapo tikslas – modeliuojant kambario temperatūros vandens tekėjimą per vožtuvą, sukurti pakankamo tikslumo tinklelius kiekvienam tiriamam atsidarymo laipsniui, kuriais remiantis, vėliau galima būtų tirti dvifazio srauto susidarymą.

3.1 Vožtuvo modelis

Trimatis vožtuvo modelis sudarytas SolidWorks programos aplinkoje pavaizduotas 3.1 paveiksle.

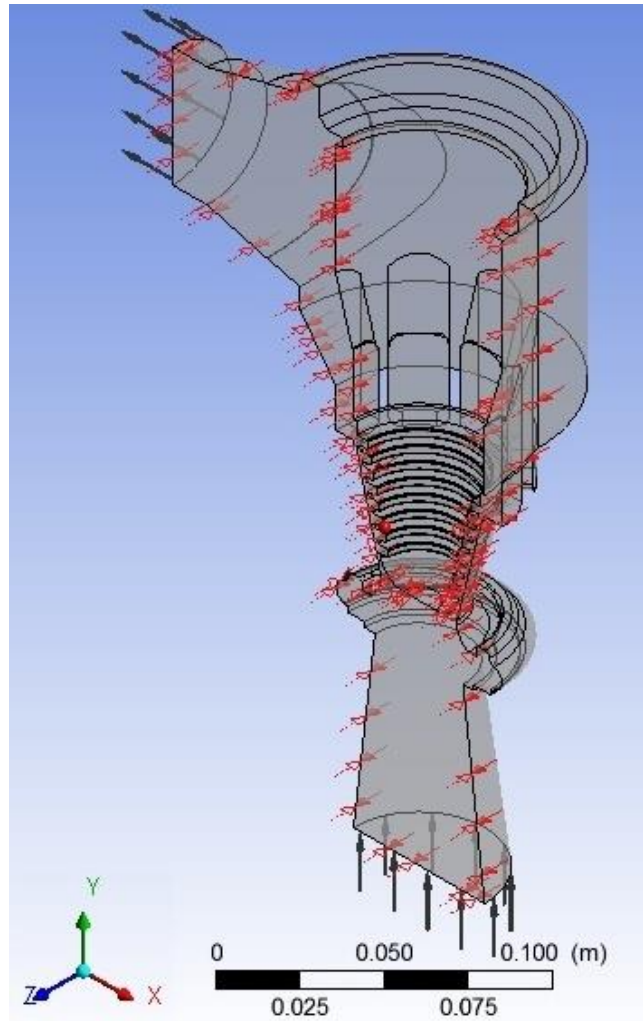


3.1 pav. Vožtuvo modelis SolidWorks aplinkoje

Vožtuvas sudarytas iš trijų komponentų – korpuso, į jį tvirtinamo balno ir jame esančios judančios – uždaromosios dalies – sklandies. Detalūs vožtuvo brėžiniai pateikti prieduose 1-4.

Sklandies dispozicija vožtuve yra spyruoklinio reguliavimo mechanizmo esančioje virš pavaizduotos vožtuvo dalies rezultatas. Reguliavimo mechanizmas nemodeliuojamas, nes nepaisant įtakos į sklandį, kurią galima užduoti ir be mechanizmo modelio – jokios įtakos hidraulinėms vožtuvo savybėms neturi.

ANSYS CFX aplinkoje analizė prasideda importuojant SolidWorks geometrinį modelį. Vožtuvas „pripildomas“ tūriu, iš kurio pašalinami korpusas, balnas ir sklandis. Taip suformuojamas fluido tūris vožtuvo viduje – domenas, pavaizduotas 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Vožtuvo fluído tūrio (domeno) modelis ANSYS CFX aplinkoje. Apačioje – fluído įtekėjimo zona (angl. inlet), viršuje neigiama x kryptimi – ištekėjimo plokštuma (angl. outlet), XY plokštuma – simetrijos plokštuma

Vožtuvo koordinatinių sistemų SolidWorks ir Ansys CFX programiniuose paketuose sutapatintos. Kaip matyti 3.1 ir 3.2 paveiksluose vožtuvas yra simetriškas XY plokštumos atžvilgiu.

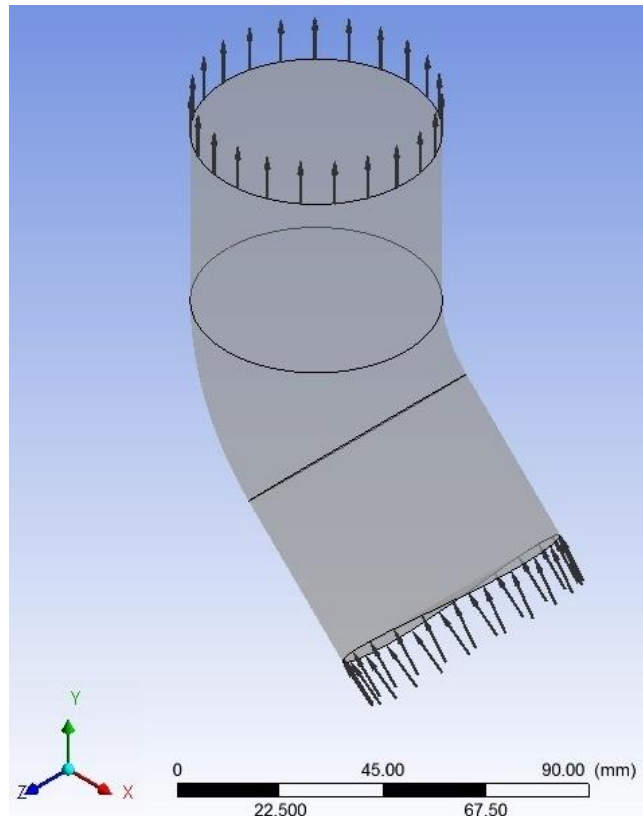
Siekiant pagreitinti sprendimo eigą, kompiuterinius resursus, nedarant įtakos rezultatams yra išnaudojama lengvinanti aplinkybė – vožtuvo simetriškumas. Fluído domeną kertamas pusiau YZ plokštumoje, taip suformuojant galutinį geometrinį modelį, ant kurio bus kuriamas tinklas, formuojamos kraštinės uždavinio sąlygos.

3.2 Vamzduko modelis

Priklausomai nuo vožtuvo darbo sąlygų ir atsidarymo laipsnio juo prateka kintantis debitas. Formuojant kraštines sąlygas vožtuvo įėjime, teigiama y koordinatės kryptimi užduodamas masinis debitas (kg/s). Tačiau realiai, kaip buvo minėta 1.5 skyriuje vožtuvą su kolektoriumi jungia vamzdis, kuriame tekantis fluידas keičia tekėjimo kryptį.

Šio modelio tikslas gauti greičio lauką (greičio profilį) XZ plokštumoje, t.y. vamzduko išėjime, kuri galima būtų importuoti kaip vožtuvo įėjimo kraštinę sąlygą. Tokiu būdu vožtuvo modelis bus artimesnis realiai išsivystančiai fluido tėkmei ir gaunami rezultatai bus patikimesni.

3.3 paveiksle pavaizduotas trimatis vamzduko fluido (pašalinus patį vamzdį) modelis, ant kurio kuriamas tinklelis ir formuojamos kraštinės sąlygos. Detalesnis vamzduko brėžinys pateiktas 5 priede.



3.3 pav. Vamzdžio tarp grupinio paskirstymo kolektoriaus ir vožtuvo fluido (domeno) modelis ANSYS CFX aplinkoje

3.2.1 Vamzduko tinklelis ir kraštinės sąlygos

Dėl paprastos geometrijos galima sukurti paprastą ir efektyvų tinklelį. Tas pats tinklelis gali būti panaudotas visoms kraštinėms sąlygoms (skirtingiems sprendiniams). Tinklelio vaizdai pateikti 3.4, 3.5 paveiksluose. Suformuotas tinklelis turi 1,858,140 mazgus (angl. nodes) ir viso 1,845,571 elementus.

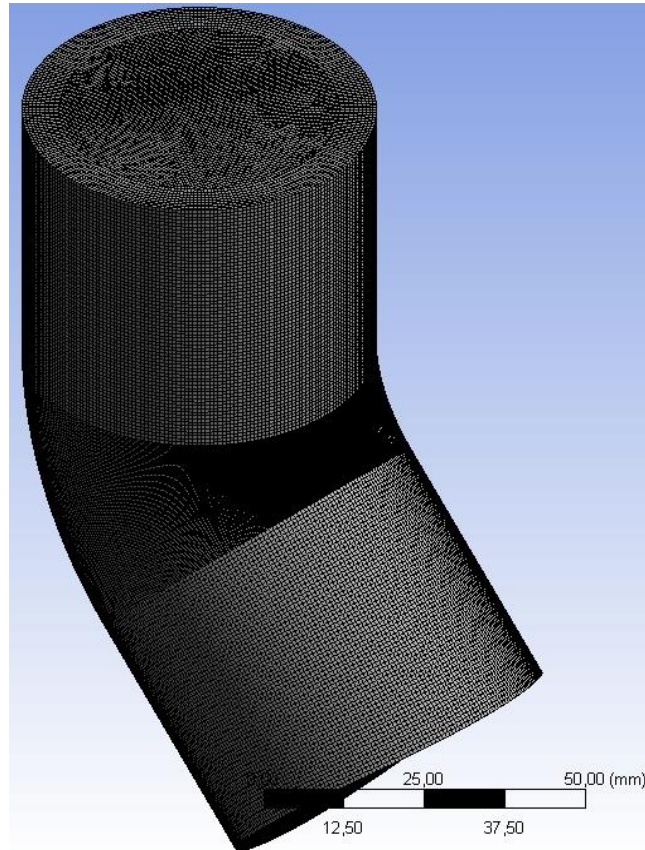
Simetrija nemodeliuojama dėl paprastos geometrijos ir greito sprendimo. Vamzduko įėjime užduodamas masinis debitas, perskaičiuotas iš tūrinio pagal žinomą 25°C ir 1 bar slėgį atitinkantį vandens tankį (997,05 kg/m³), o vamzduko išėjime, kaip ir vėliau modeliuojamame vožtuvo išėjime formuojama sąlyga:

$$\frac{1}{A} \int_S p_i dA = 0 \quad (3.1)$$

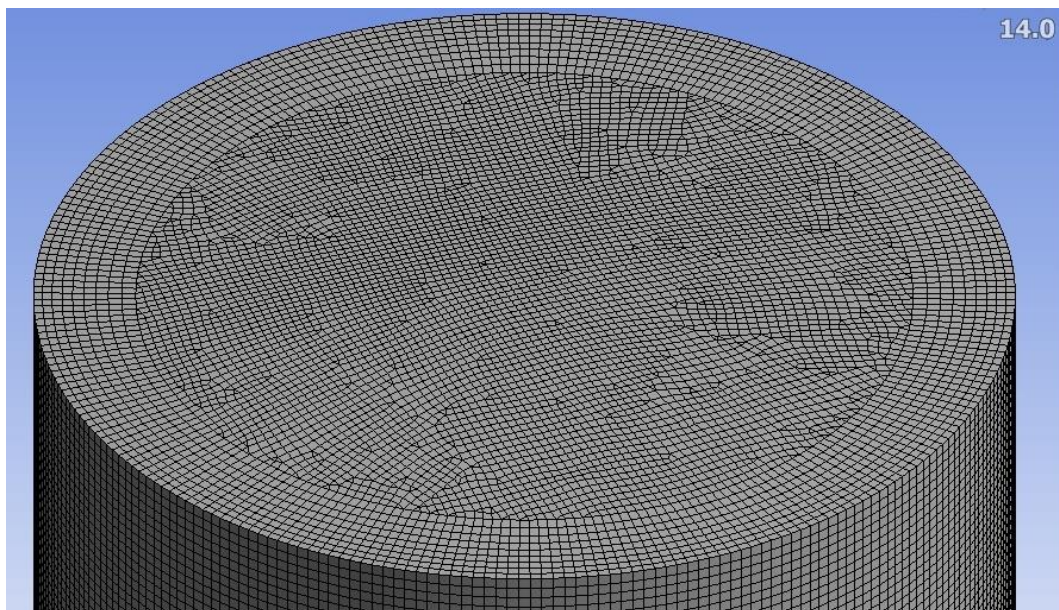
kur:

p_i – slėgis kiekviename skerspjūvio A integravimo taške.

Pagal šią sąlygą slėgio profilis ant išėjimo iš fluido domeno gali kisti, tačiau vidutinis statinis slėgis būna lygus 0 [10].



3.4 pav. Vamzduko tinklelis (bendras vaizdas)



3.5 pav. Vamzduko tinklelis (vamzduko išėjimas)

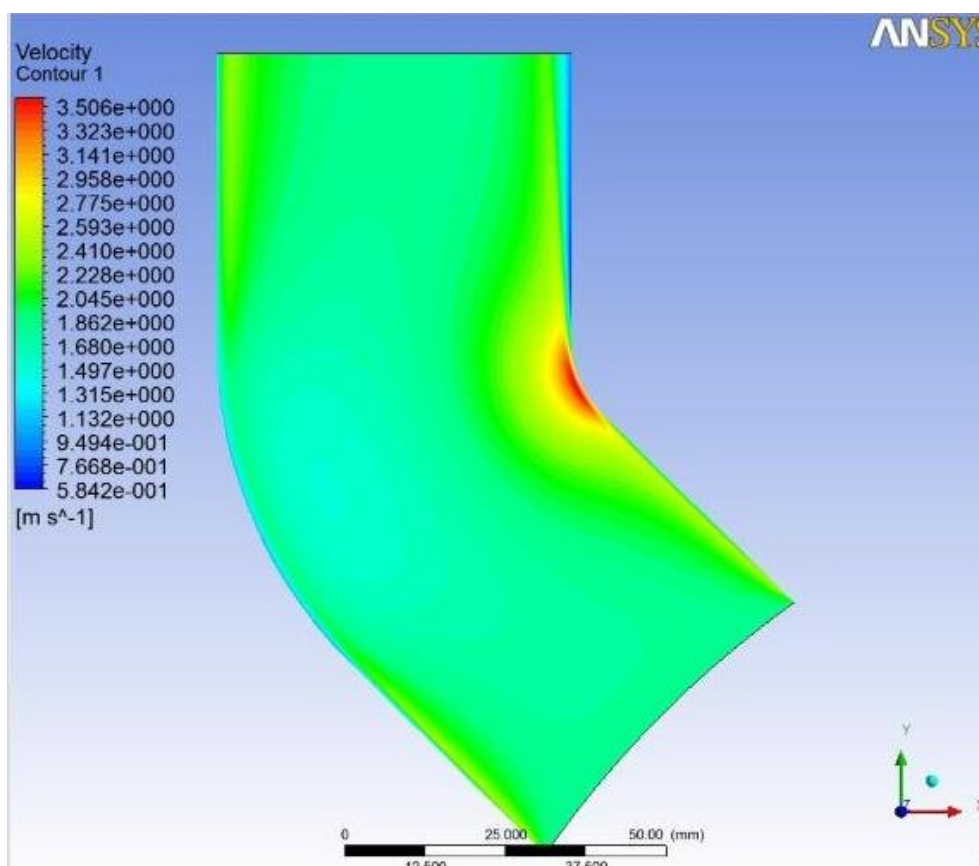
Pats modelis – stacionarus, nėra šilumos, masės mainų su sienelėmis, atsižvelgta į gravitacinę įtaką neigiama y koordinatės kryptimi. Modeliuojant dvifazį srautą net ir tolesniuose skyriuose užduotomis sąlygomis vamzduke dvifazis srautas išėjime (vožtuvo įėjime) nesusidaro.

3.2.2 Vamzduko rezultatai

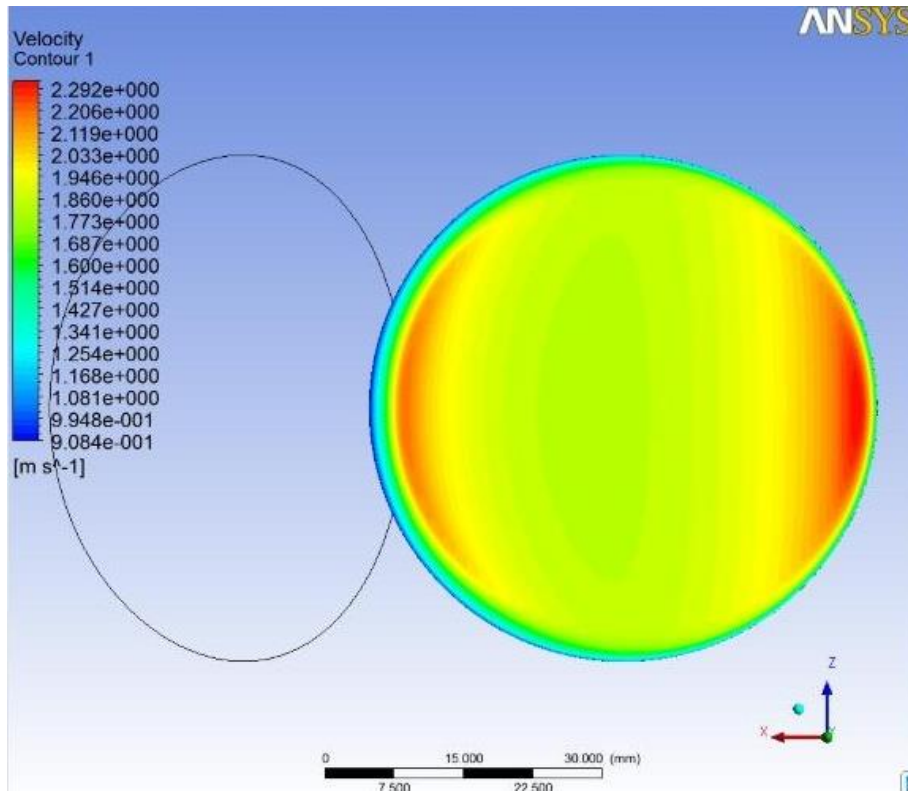
Suformuoti sekantys greičio profiliai:

- Eksperimentiniams rezultatams tikrinti (25°C; 1 bar) – 6,6; 10; 12; 11; 20; 14; 26; 16; 30; 19; 35 m³/h;
- Dvifaziam srautui tirti (270°C; 70 bar) – 20; 50; 75; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 350 m³/h.

Keičiant debitą vamzduko įėjime greičio laukas, o taip pat ir profilis išėjime keičiasi nežymiai (t.y. tik kiekybinėmis vertėmis, tačiau ne turbulencijų sukeltais sūkuriais, kaip galėjo nutikti), todėl pateikiamas tik vienas iš sprendinių pavyzdžių kaip atrodo fluido tėkmė vamzduke 3.6, 3.7 paveiksluose pavaizduoti greičio laukai – kai debitas iš kolektoriaus į vamzduką – 16m³/h (arba 4,431 kg/s), o fluido temperatūra – 25°C.



3.6 pav. Vamzduko greičio profilis simetrijos plokštumoje



3.7 pav. Vamzduko greičio profilis išėjime

3.3 Kraštinės sąlygos

Sprendžiant 25°C temperatūros vandens tekėjimą izoliuojančiame – reguliuojančiame vožtuve, priimamos šios kraštinės sąlygos (3.2 pav. pavaizduotam fluido tūriui):

- vandens tekėjimas stacionarus – t.y. kraštinės sąlygos laike nekinta;
- fluidas – vanduo, kurio temperatūra – 25°C. Modelis izoterminis;
- slėgis sistemoje – 1 bar;
- turbulentinis modelis – standartinis $k-\epsilon$;
- -9.8066 m/s^2 gravitacinė komponentė neigiama y kryptimi;
- įtekėjimo zonos sąlyga – užduotas greičio profilis iš vamzduko modelio rezultatų, pagal atsidarymo laipsnį ir bandymų debitą (žr. 3.1, 3.2 lenteles);
- ištekėjimo sąlyga pagal (3.1) formulę – vidutinis statinis slėgis išėjime – 0 Pa;
- XY simetrijos plokštuma;
- Nėra masės, šilumos mainų su vožtuvo sienelėmis, nevertinamas sienelės šiurkštumas.

3.4 Sprendimas

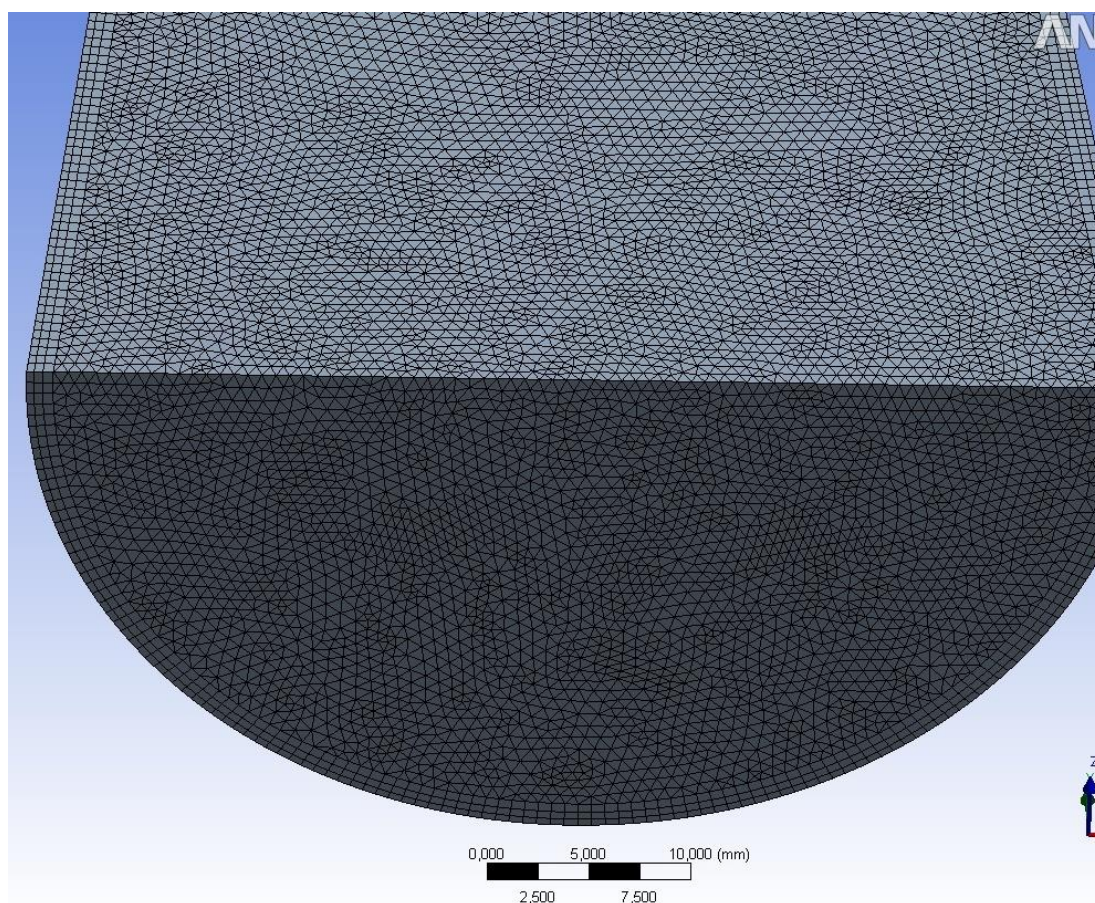
Sudėtingiausia modeliavimo proceso dalis – tinklelio kūrimas. Kiekvienam atsidarymo laipsniui buvo kuriamas individualus tinklelis, kuris tiksliausiai lyginant su eksperimentiniais duomenimis padėtų apskaičiuoti slėgio kritimą vožtuve. Kuo atsidarymo laipsnis mažesnis – tuo sunkiau išgauti tikslių atsakymą. Aktualiausios sandarinimo tarp sklandies ir balno zonos, kur greičio ir slėgio gradientai didžiausi esant 4mm vožtuvo atsidarymui plotis sudaro tik 1 mm. Taigi pats modeliavimo procesas taip pat iteracinis.

Modeliavimo eigoje taip pat pastebėta, kad smulkesnis tinklelis ne visada reiškia tikslesnį sprendimą. Kiekvienam debitui egzistuoja optimalus tinklelis, prie kurio buvo stengtasi priartėti. Iš pradžių generuojant tinklelį su numatytais ANSYS Mesher programos vertėmis, o vėliau smulkinant ir sprendžiant eilę tinklelių pastebėta, kad tam modeliui egzistuoja kritinis elementų skaičius, kurį pasiekus, sprendinio santykinė paklaida vėl pradeda augti.

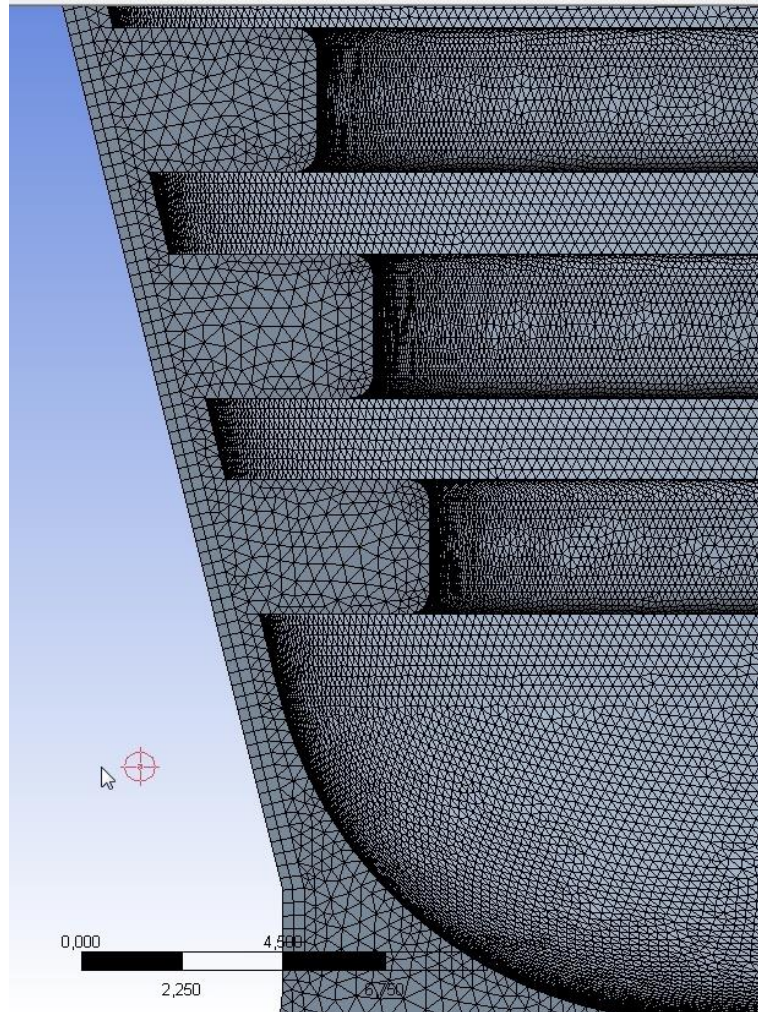
3.5 Modelio tinkleliai

3.5.1 4 mm vožtuvo atsidarymas

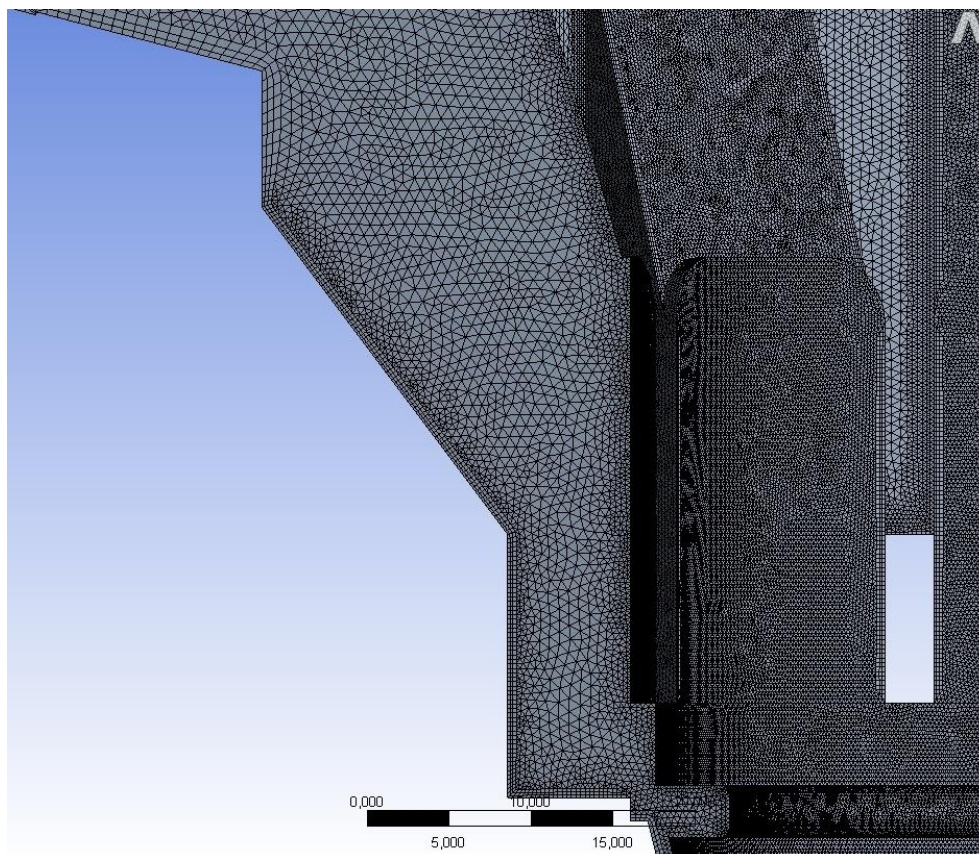
Tinklelio elementų skaičius: 17,027,269; mazgų skaičius: 3,483,524. 3.8 – 3.10 paveiksluose pavaizduotos esminės tinklelio zonos.



3.8 pav. 4 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje



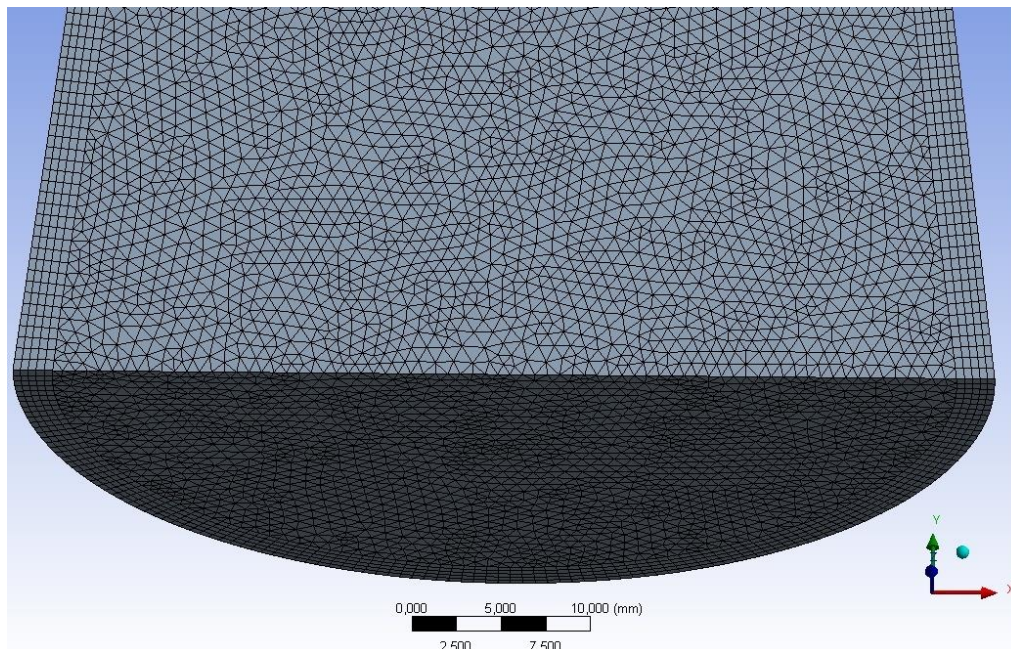
3.9 pav. 4 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje



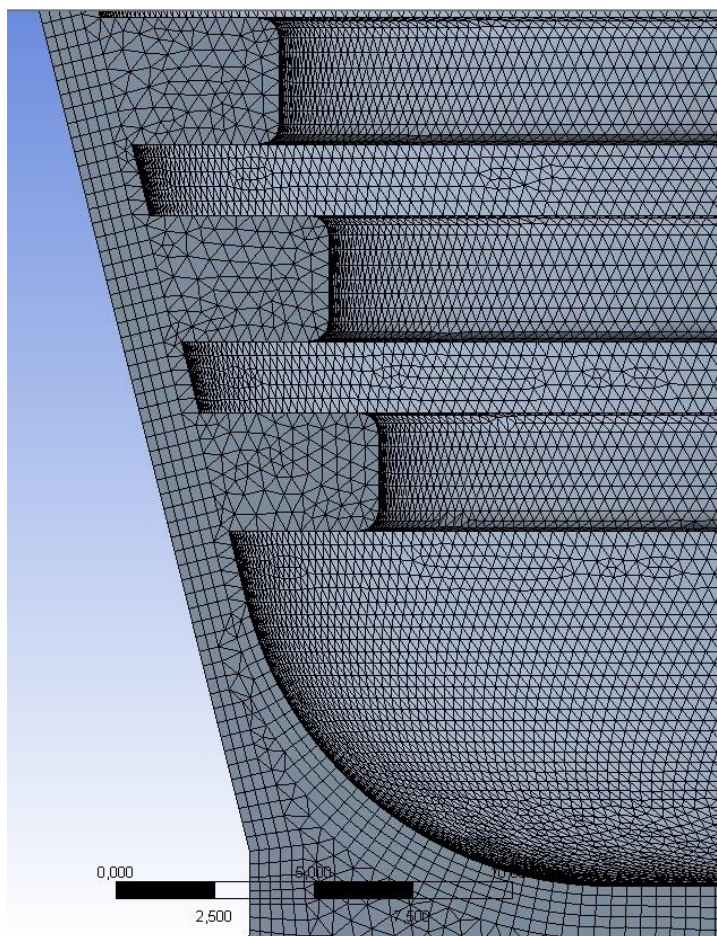
3.10 pav. 4 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje

3.5.2 6 mm vožtuvo atsidarymas

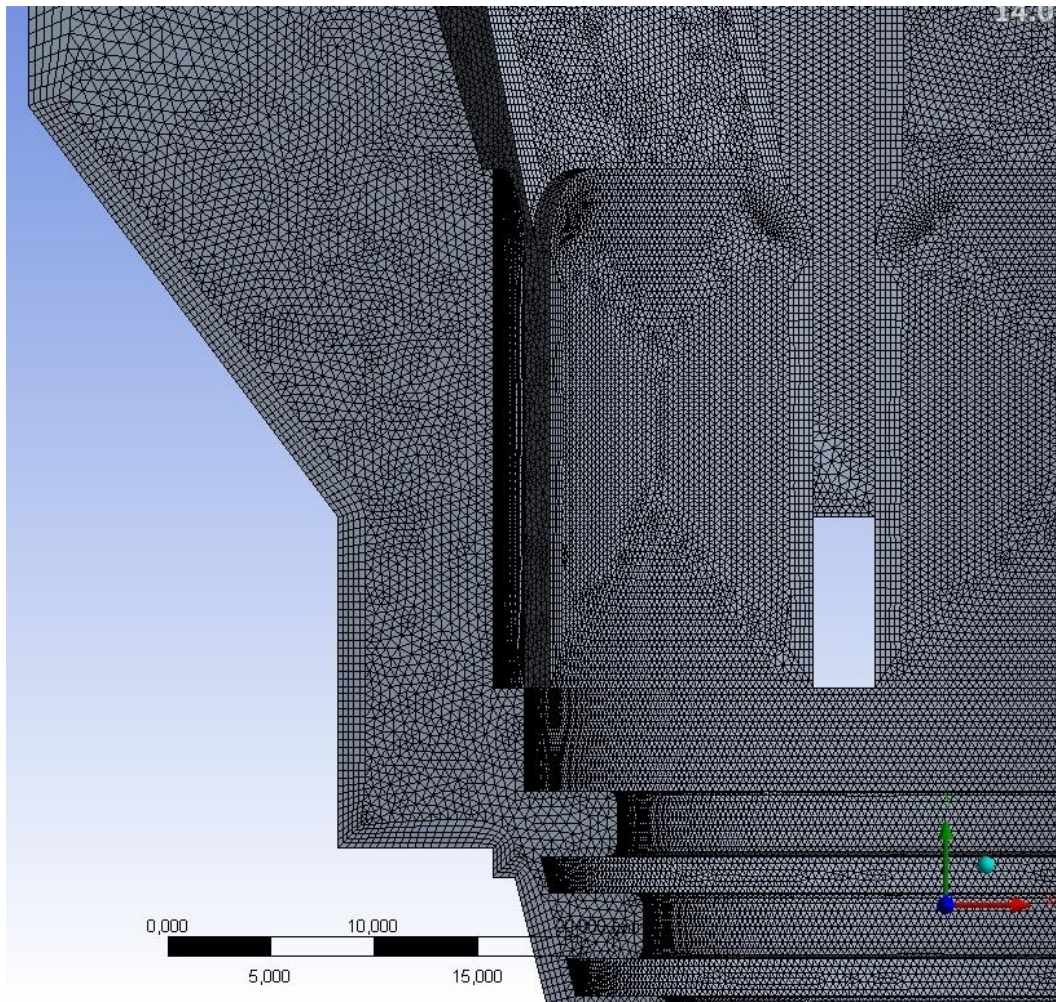
Tinklelio elementų skaičius: 6,951,602; mazgų skaičius: 1,904,243. 3.11 – 3.13 paveiksluose pavaizduotos esminės tinklelio zonos.



3.11 pav. 6 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje



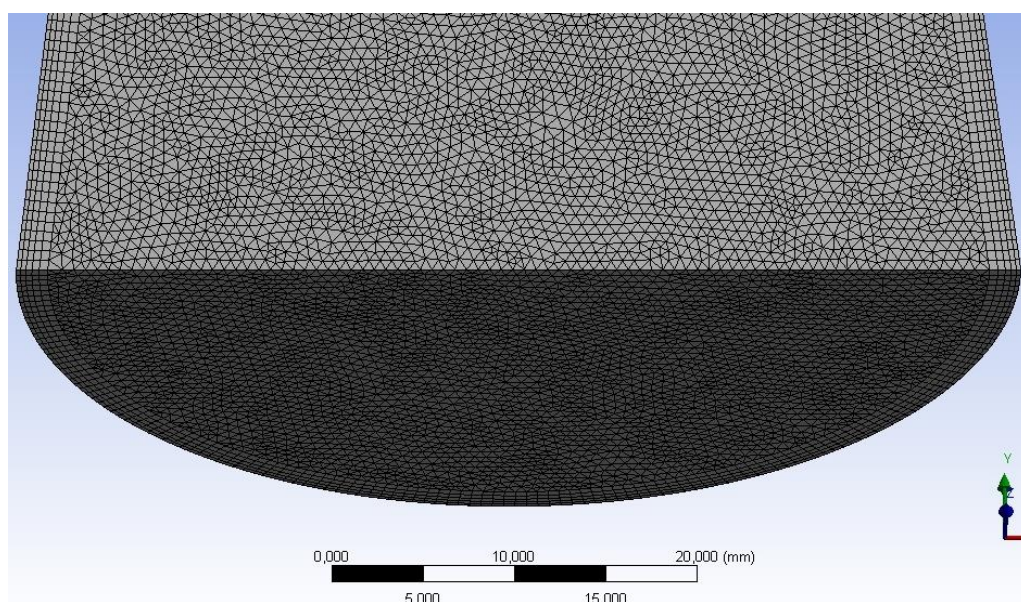
3.12 pav. 6 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje



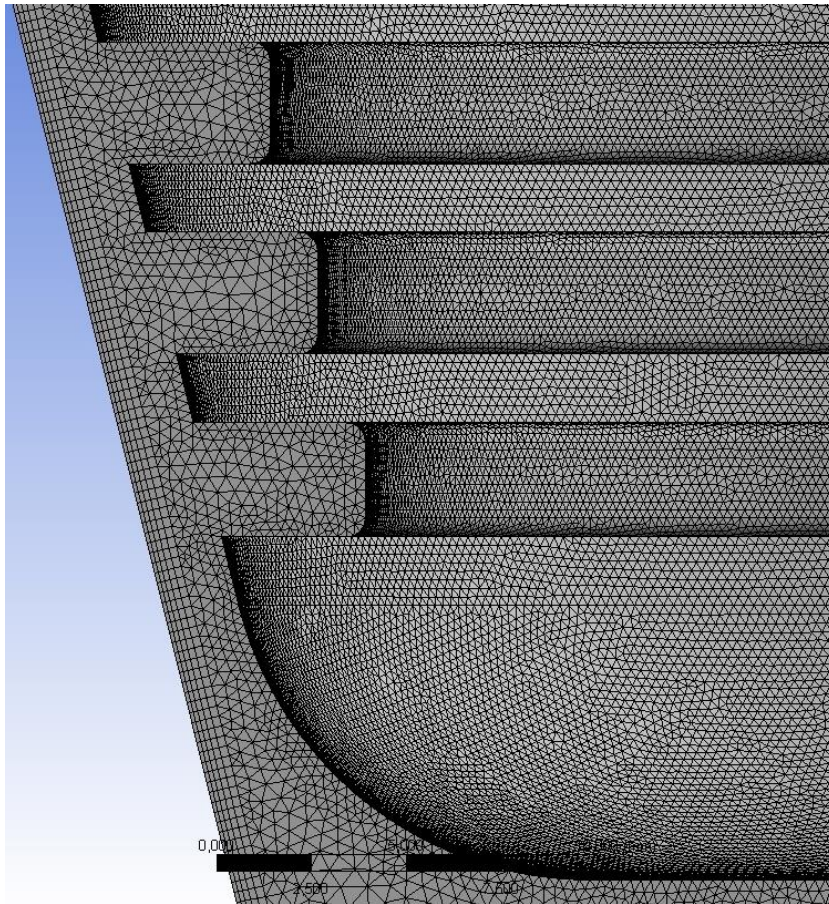
3.13 pav. 6 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje

3.5.3 8 mm vožtuvo atsidarymas

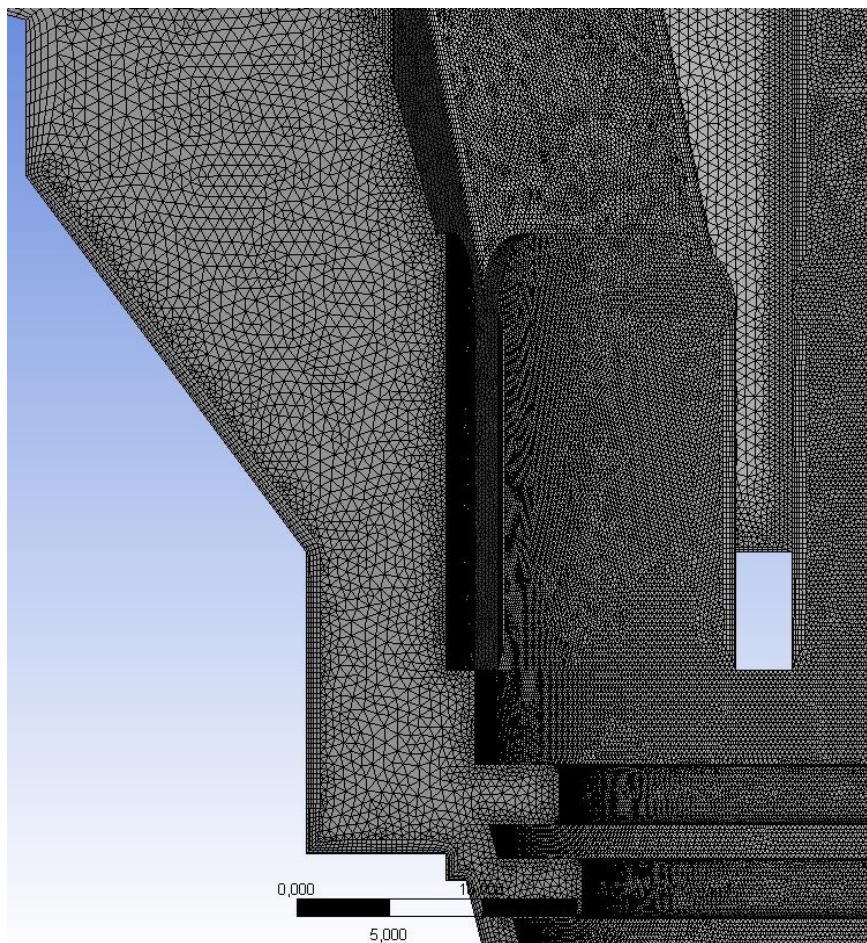
Tinklelio elementų skaičius: 20,500,007; mazgų skaičius: 4,444,400. 3.14 – 3.16 paveiksluose pavaizduotos esminės tinklelio zonos.



3.14 pav. 8 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje



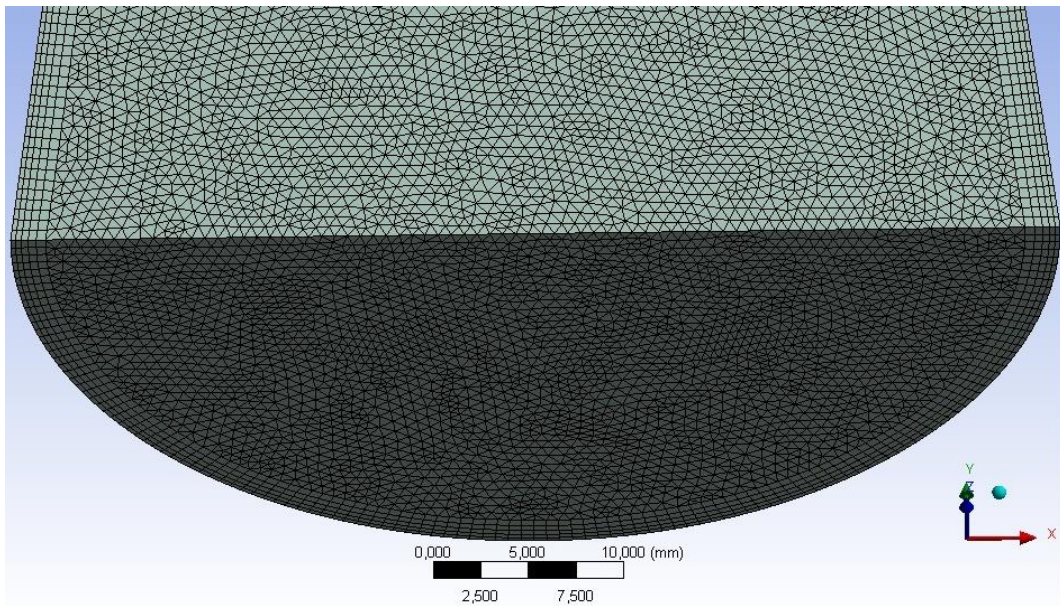
3.15 pav. 8 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje



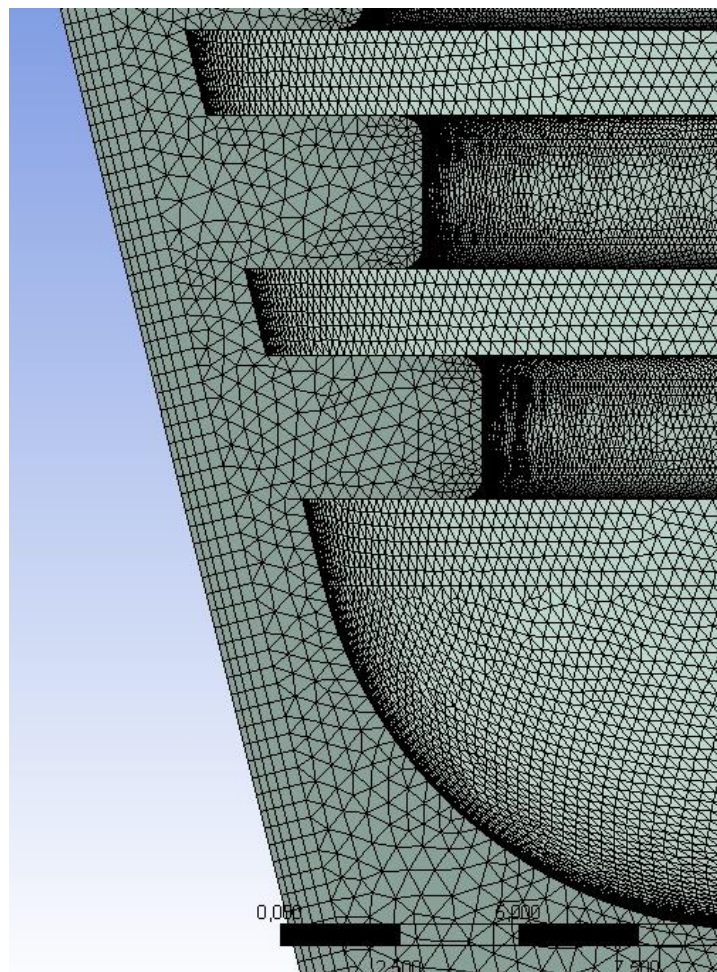
3.16 pav. 8 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje

3.5.4 10 mm vožtuvo atsidarymas

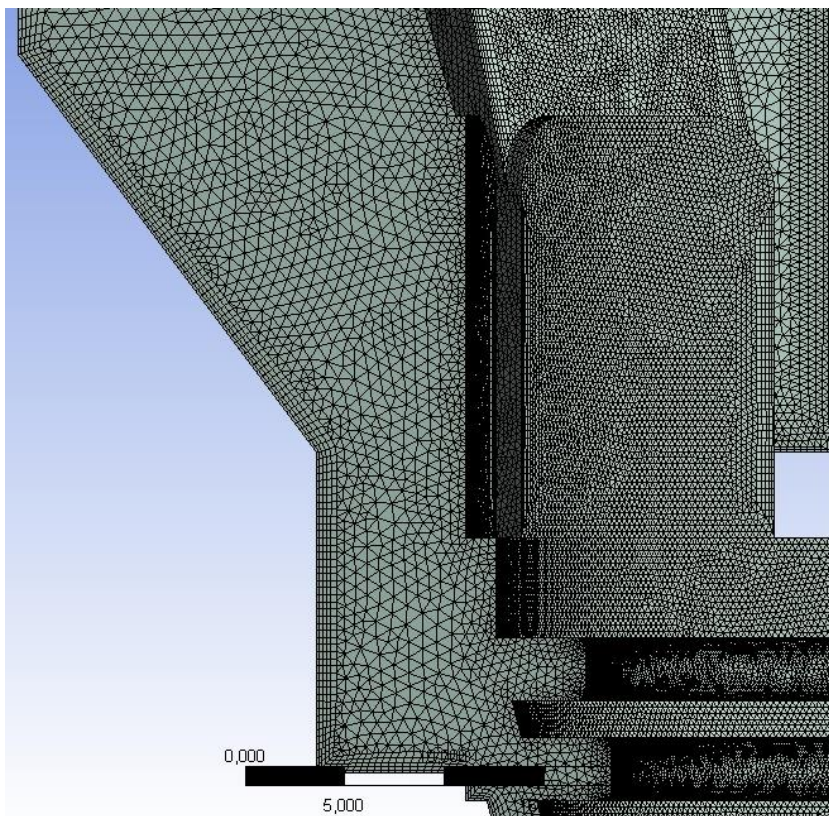
Tinklelio elementų skaičius: 14,548,672; mazgų skaičius: 3,109,569. 3.17 – 3.19 paveiksluose pavaizduotos esminės tinklelio zonos.



3.17 pav. 10 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje



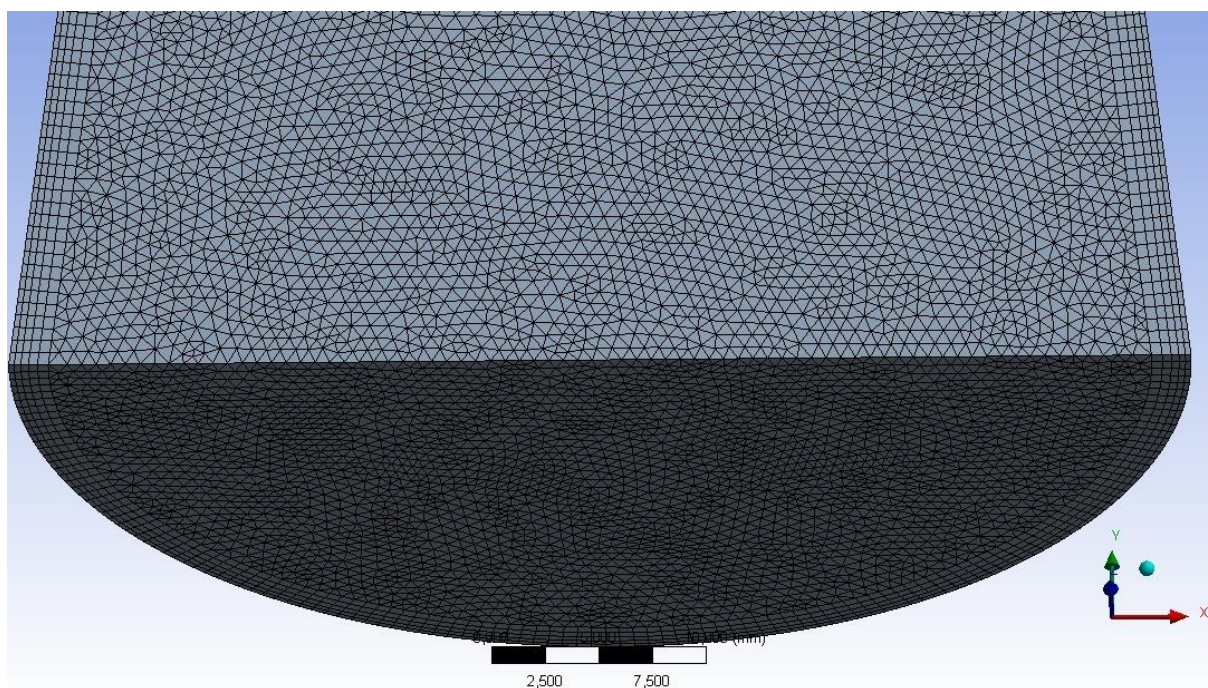
3.18 pav. 10 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje



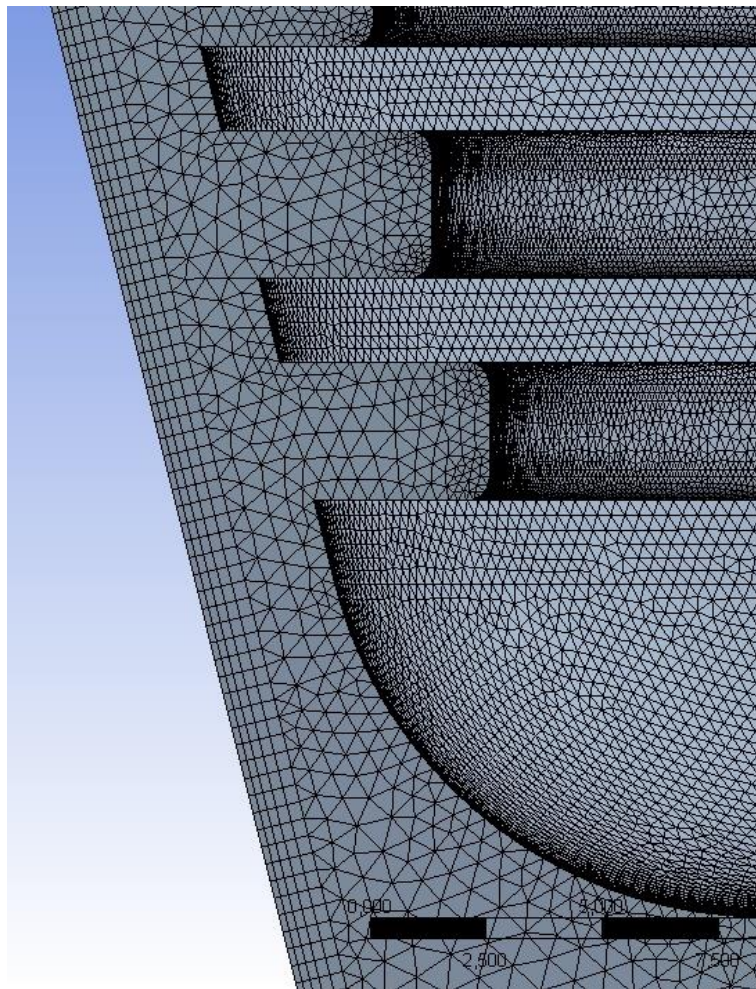
3.19 pav. 10 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje

3.5.5 12 mm vožtuvo atsidarymas

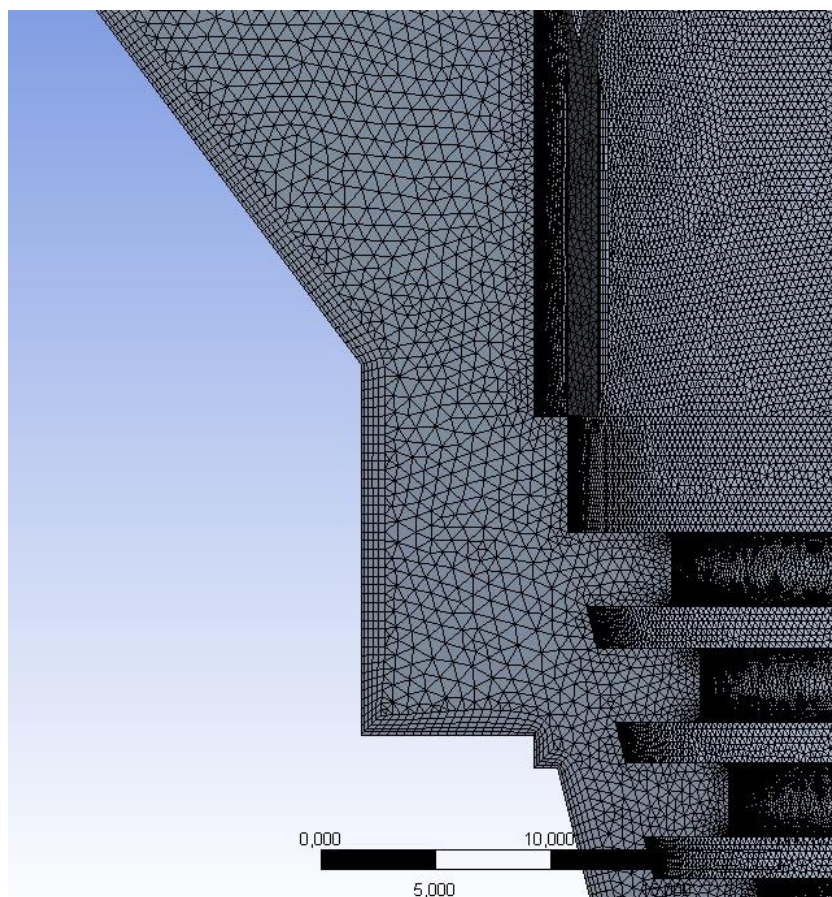
Tinklelio elementų skaičius: 13,792,061; mazgų skaičius: 2,942,745. 3.20 – 3.22 paveiksluose pavaizduotos esminės tinklelio zonos.



3.20 pav. 12 mm atsidarymo tinklelis vandens įtekėjimo zonoje



3.21 pav. 12 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pradžioje



3.22 pav. 12 mm atsidarymo tinklelis sandarinimo zonos pabaigoje

3.6 Rezultatai

Kaip minėta ankstesniuose skyriuose, šio etapo rezultatai yra lyginami su eksperimentiniais [4] studijos rezultatais. Skaičiavimų rezultatai pateikti 3.1 ir 3.2 lentelėse:

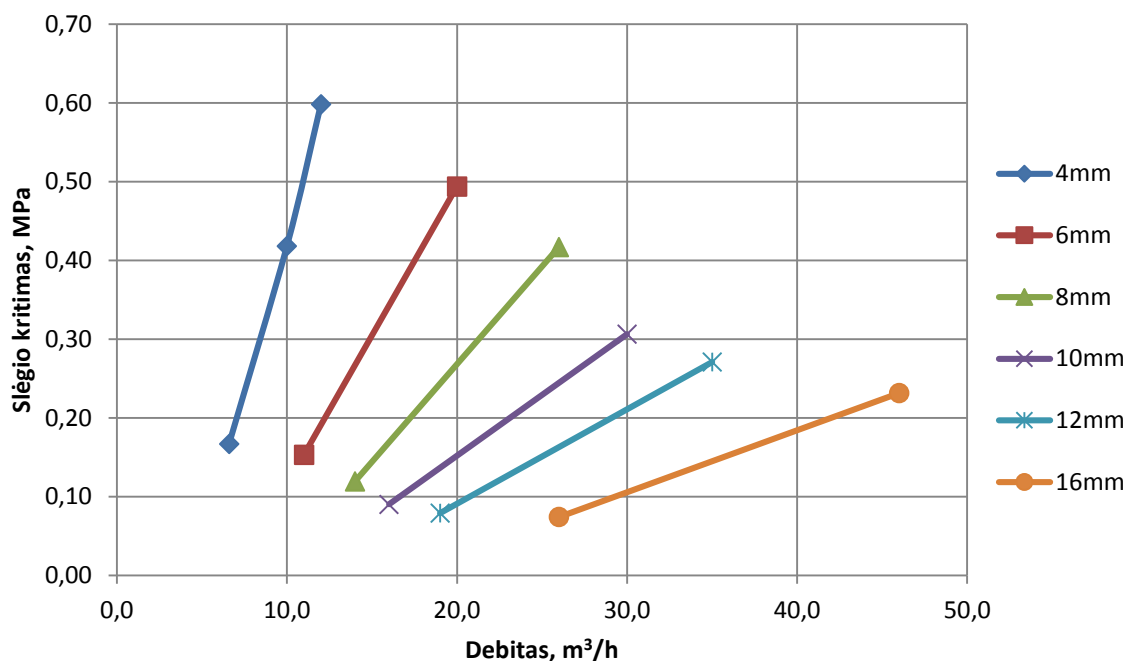
3.1 lentelė. Eksperimentiniai ir skaitinio modeliavimo rezultatai (1)

Vožtuvo atsidarymas, mm	4	4	4	6	6	8	8
Debitas, m ³ /h	6,6	10,0	12,0	11,0	20,0	14,0	26,0
Slėgio kritimas IRV, MPa (eksperimento metu)	0,172	0,407	0,579	0,147	0,496	0,113	0,402
Slėgio kritimas IRV, MPa (apskaičiuotas)	0,1670	0,4182	0,5985	0,1534	0,4940	0,1194	0,4171
Absoliuti paklaida, %	-0,0050	0,0112	0,0195	0,0064	-0,0020	0,0064	0,0151
Santykinė paklaida, %	-2,89%	2,74%	3,38%	4,32%	-0,40%	5,67%	3,75%

3.2 lentelė. Eksperimentiniai ir skaitinio modeliavimo rezultatai (2)

Vožtuvo atsidarymas, mm	10	10	12	12
Debitas, m ³ /h	16,0	30,0	19,0	35,0
Slėgio kritimas IRV, MPa (eksperimento metu)	0,088	0,304	0,0785	0,270
Slėgio kritimas IRV, MPa (apskaičiuotas)	0,0902	0,3064	0,0791	0,2710
Absoliuti paklaida, %	0,0022	0,0024	0,0006	0,0010
Santykinė paklaida, %	2,54%	0,80%	0,70%	0,38%

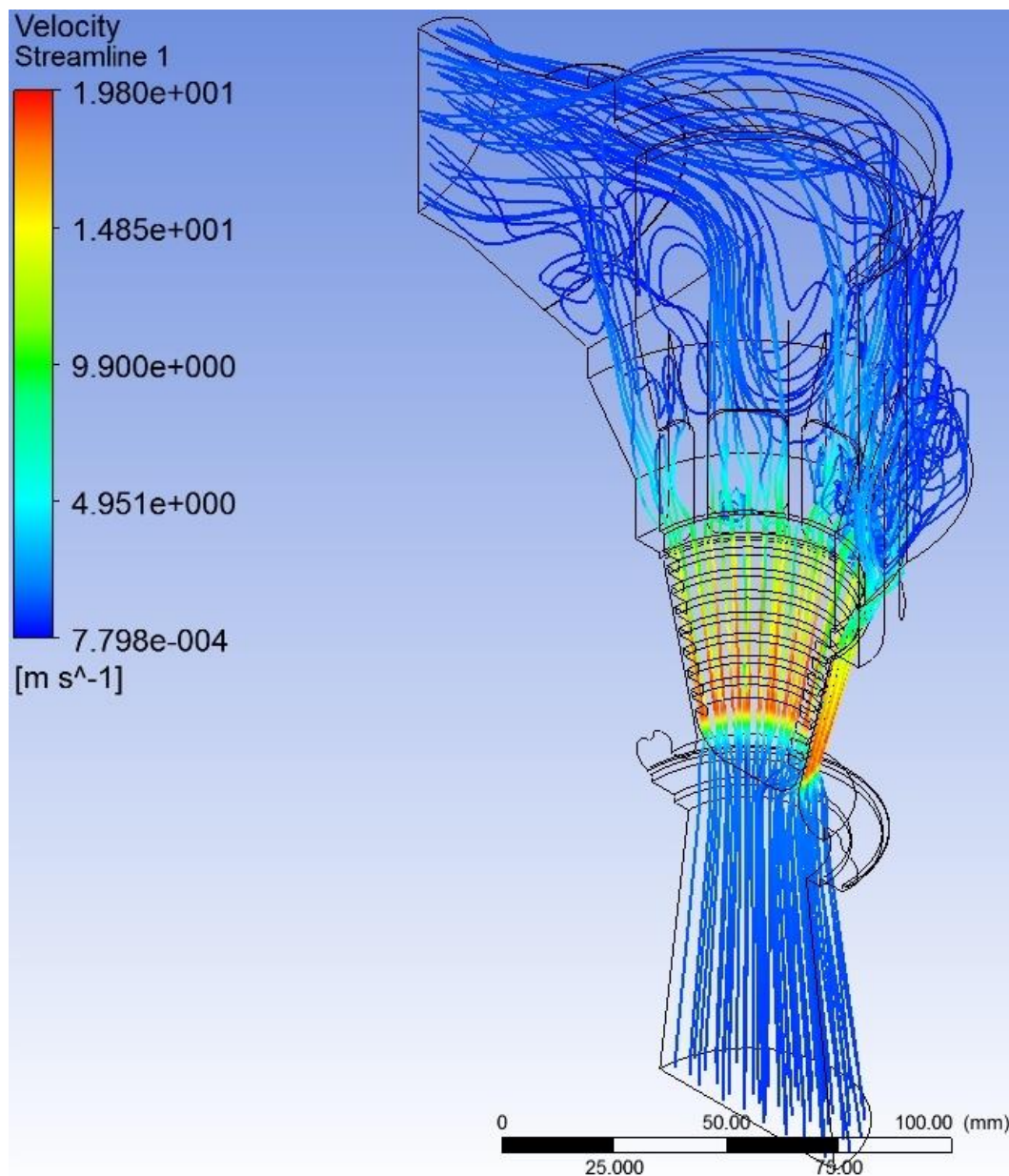
Pagal 3.1 ir 3.2 lentelių duomenis galima sudaryti vožtuvo charakteristiką. Ji skirtingiems atsidarymo laipsniams pavaizduota 3.8 paveiksle:



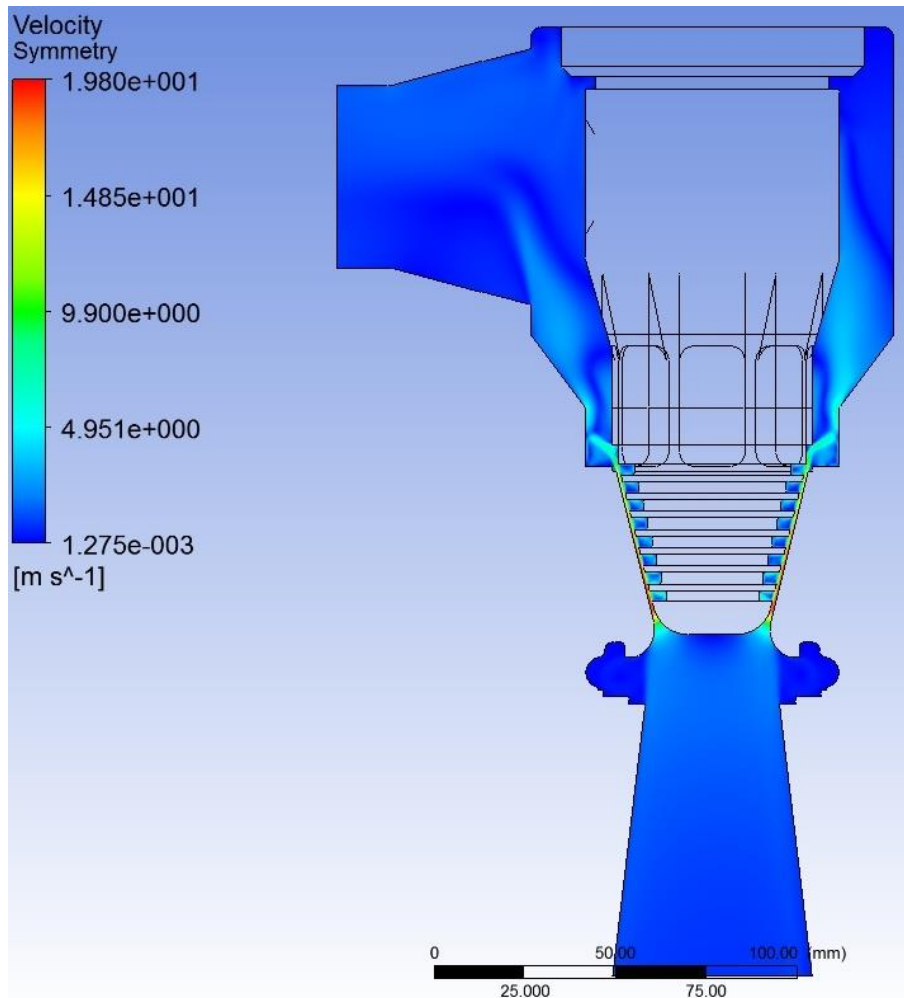
3.23 pav. Vožtuvo slėgio nuostolių nuo debito priklausomybės skirtingiems vožtuvo atsidarymo laipsniams

Gautų skaitinio modeliavimo rezultatų santykinės paklaidos daugeliu atveju neviršija 5%, tad galima laikyti, kad fluido tekėjimas, lyginant su eksperimentiniais rezultatais, vožtuve atkurtas pakankamu tikslumu, o sukurti tinkleliai yra tinkami modeliuoti dvifazio srauto susidarymą.

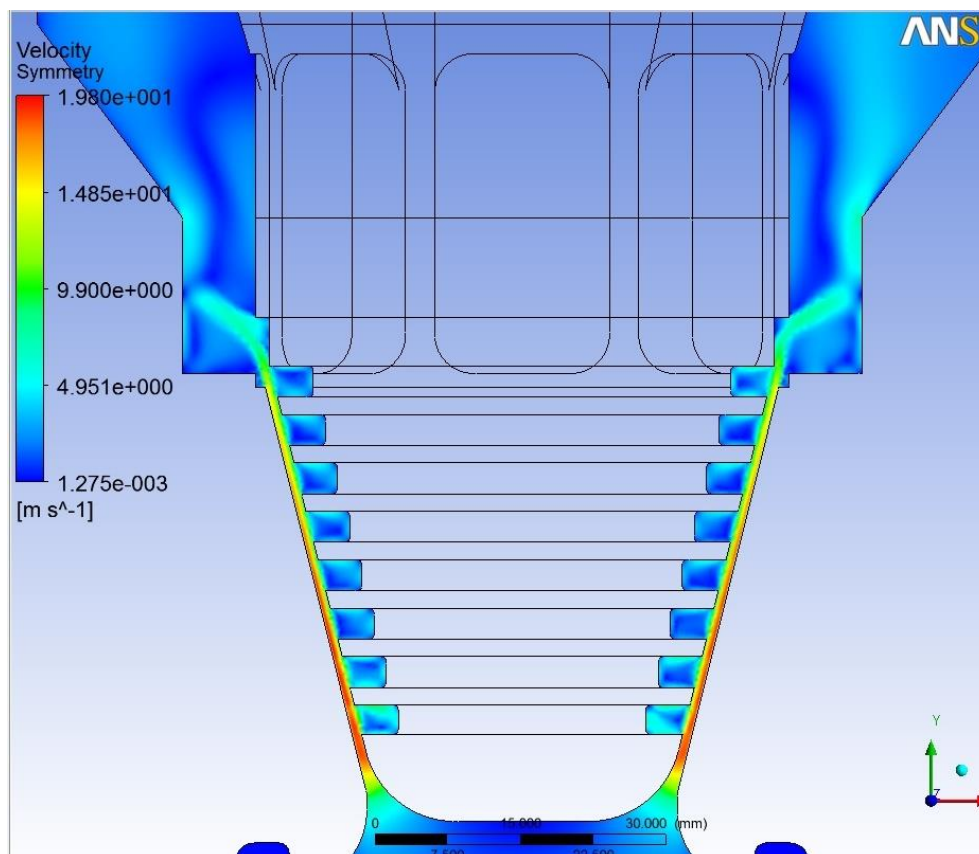
3.24 – 3.28 paveiksluose pateikti pavyzdiniai 4 mm atsidarymo, kai debitas $6,6 \text{ m}^3/\text{h}$ greičio ir slėgio pasiskirstymo vožtuve, profiliai.



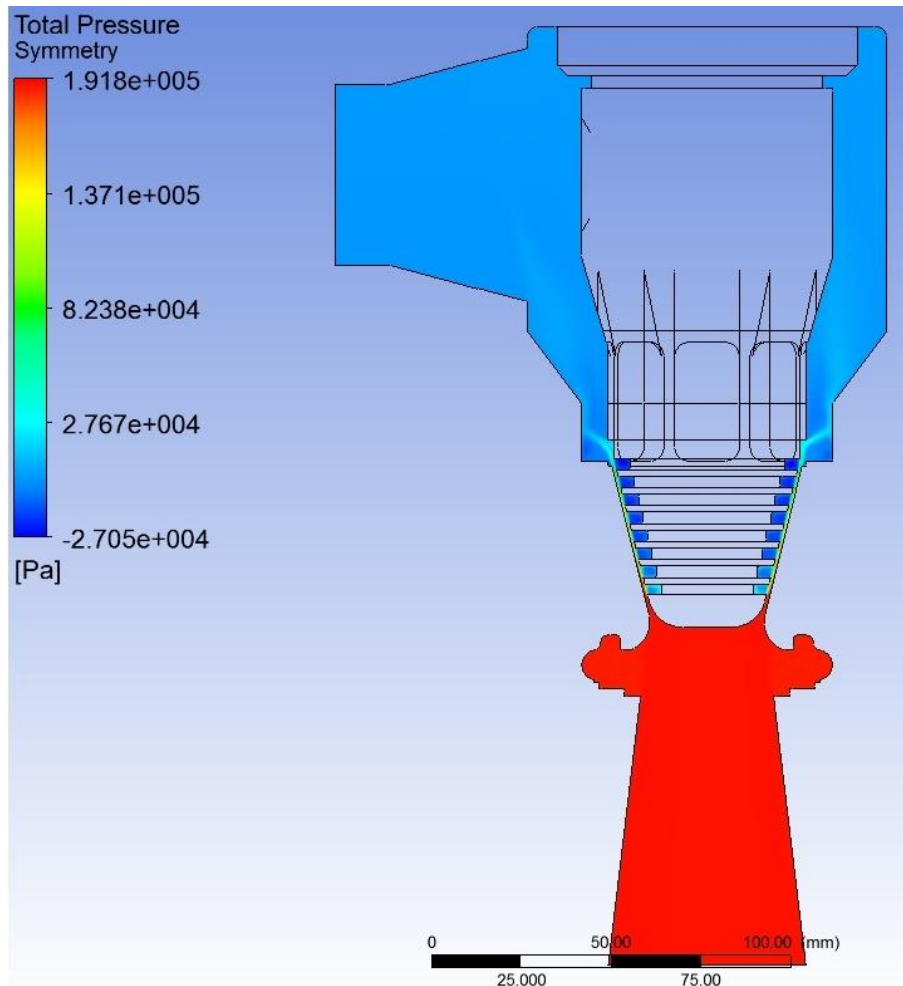
3.24 pav. Taškų sraute judėjimo linijos



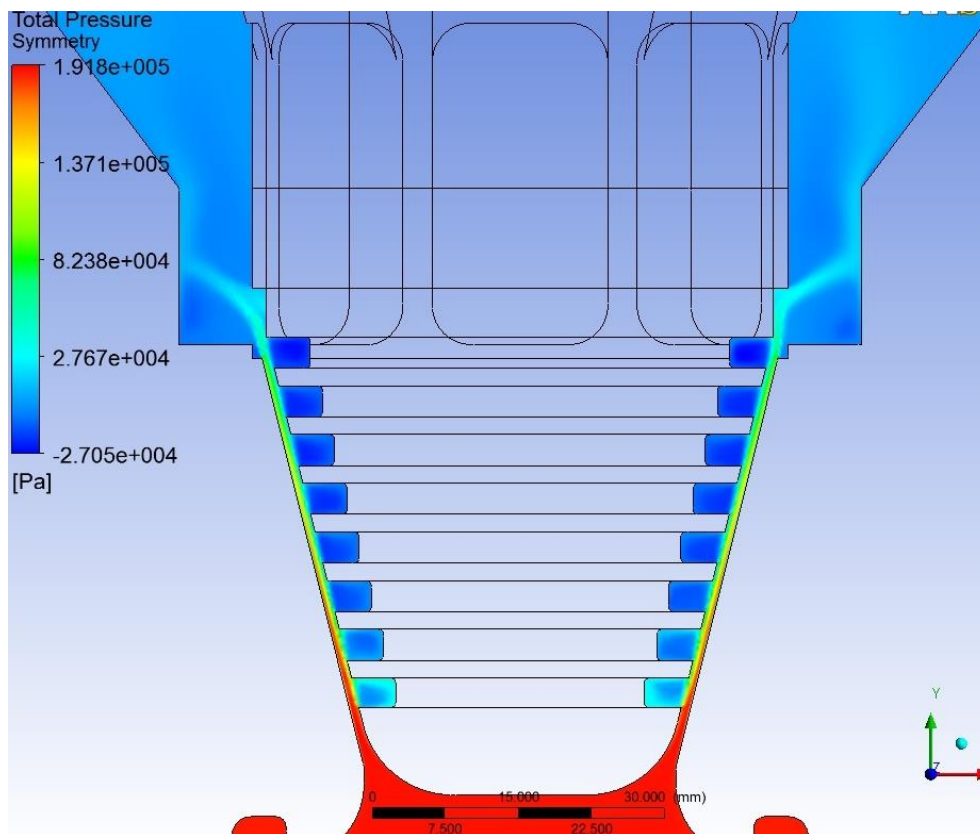
3.25 pav. Greičio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje



3.26 pav. Greičio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje. Sandarinimo zona.



3.27 pav. Slėgio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje



3.28 pav. Slėgio laukas vožtuvo simetrijos plokštumoje. Sandarinimo zona.

4 DVIFAZIO SRAUTO MODELIAVIMAS

Turint tinklelius, kuriuos panaudojus izoliuojančio – reguliuojančio vožtuvo modelyje gaunami rezultatai pakankamai tiksliai atkartoja eksperimentinius rezultatus, galima imtis pagrindinio šio projekto tikslo – modeliuoti dvifazio srauto susidarymo vožtuvo viduje galimybę.

4.1 Kraštinės sąlygos

Šiuo atveju modelis nebeizoterminis. Sprendžiama papildoma – energijos lygtis. Vandens temperatūra – 270°C, slėgis sistemoje – 7 MPa. Dėl aukšto slėgio ir didelio greičio pritaikomas homogeninis dvifazio srauto modelis.

Dvifazio srauto susidarymui iš pradžių keičiamos vamzduko kraštinės sąlygos ir įtekėjimo debitai iš kolektoriaus. Konkrečiam atsidarymo laipsniui buvo imamas maksimalus eksperimentinis tūrinis debitas ir laipsniškai didinamas iki apie 10 kartų didesnio tūrinio debito.

Pavyzdžiui: darant eksperimentą [4] maksimalus pro vožtuvą praėjęs debitas buvo 20 m³/h, kai jo atsidarymo laipsnis – 6 mm. Modeliuojant dvifazį srautą vožtuvui buvo užduoti sekantys tūrinio debito suformuoti greičio profiliai vamzduko išėjime: 50, 75, 100, 150, 200 m³/h. Analogiškai kitiems atsidarymo laipsniams. Pažymėtina, kad masinis debitas dėl mažesnio tankio (769,63 m³/kg) padidėja mažiau.

4.2 Rezultatai

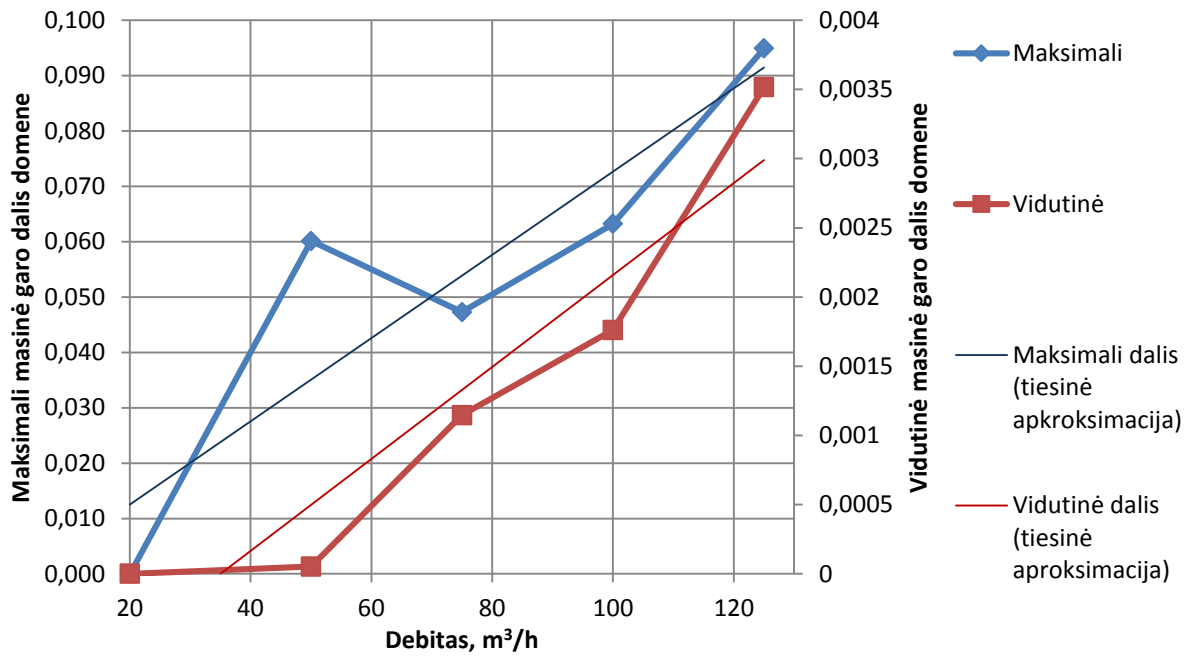
4.2.1 4 mm vožtuvo atsidarymas

Skaičiavimų rezultatai 4 mm atsidarymo laipsniui pateikti 4.1 lentelėje.

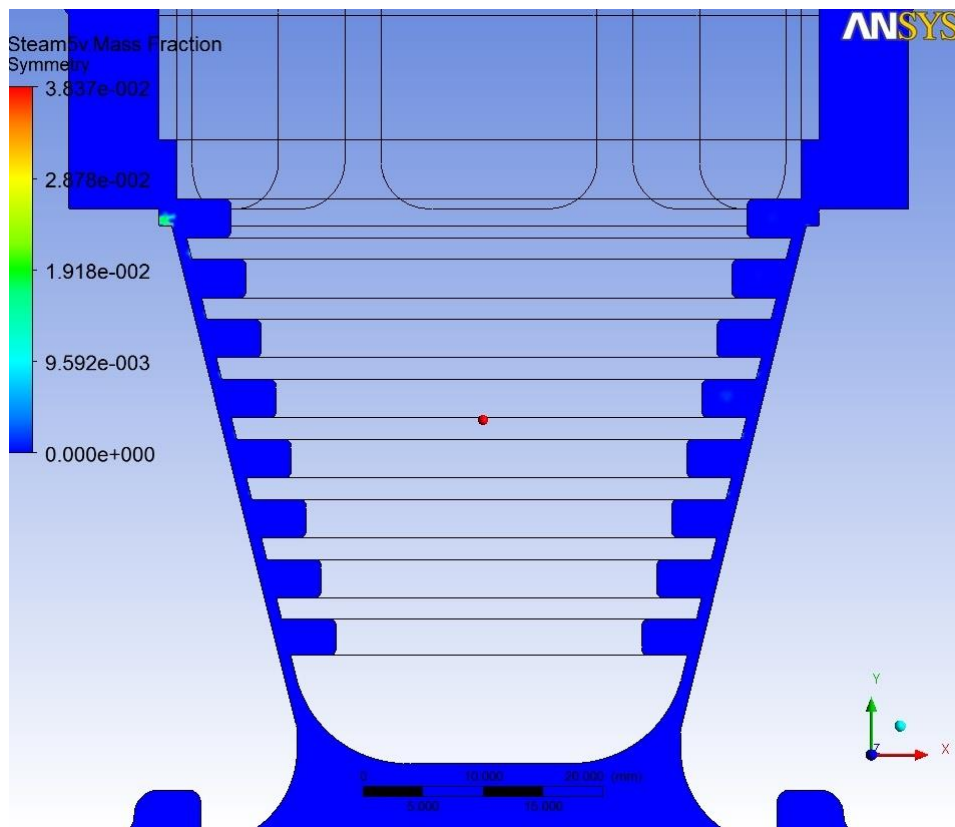
4.1 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai

Atsidarymas	4mm				
	20	50	75	100	125
Debitas, m ³ /h					
Masinė garo dalis					
Vožtuvo tūryje (domene)					
Maksimali	0,000	0,060	0,047	0,063	0,095
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	5,28E-05	0,001146	0,001761	0,003516
Vožtuvo išėjime					
Maksimali	0	0	0	0	0
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0	0	0	0

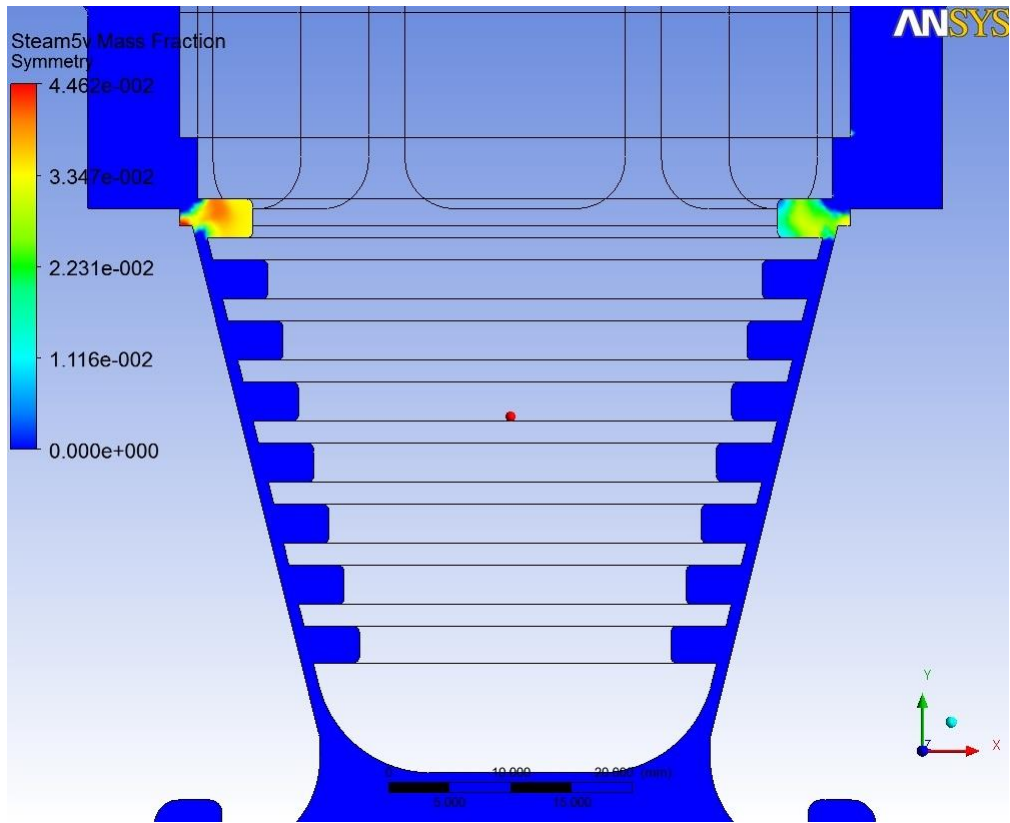
Vizualizuoti rezultatai pateikti 4.1 paveiksle.



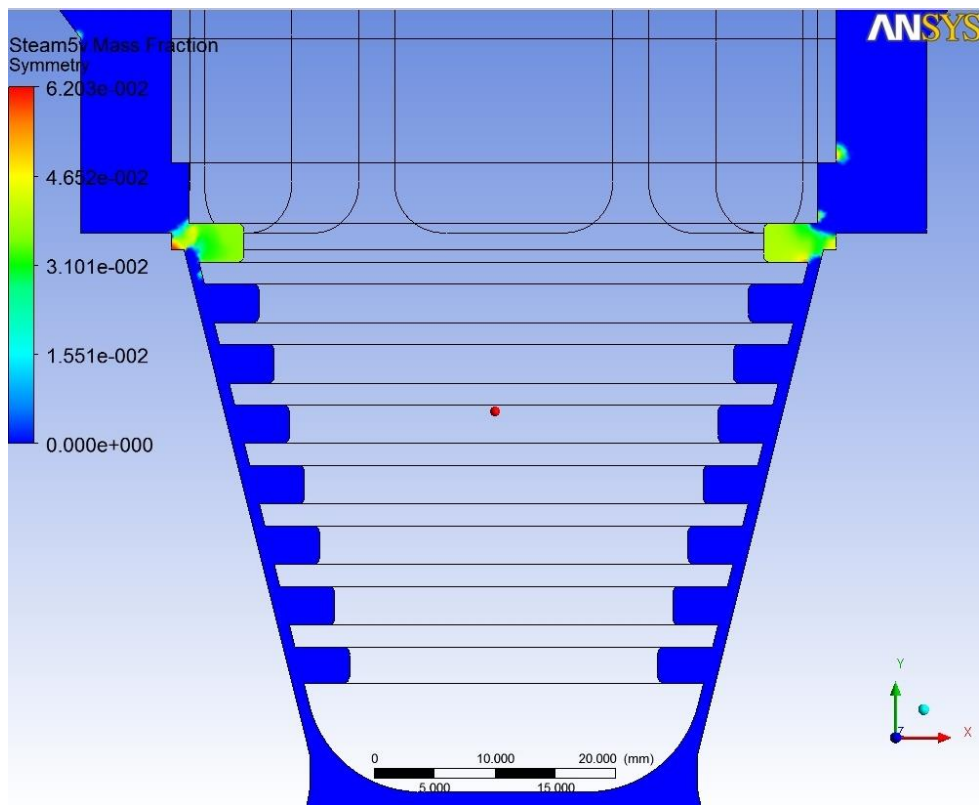
4.1 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito



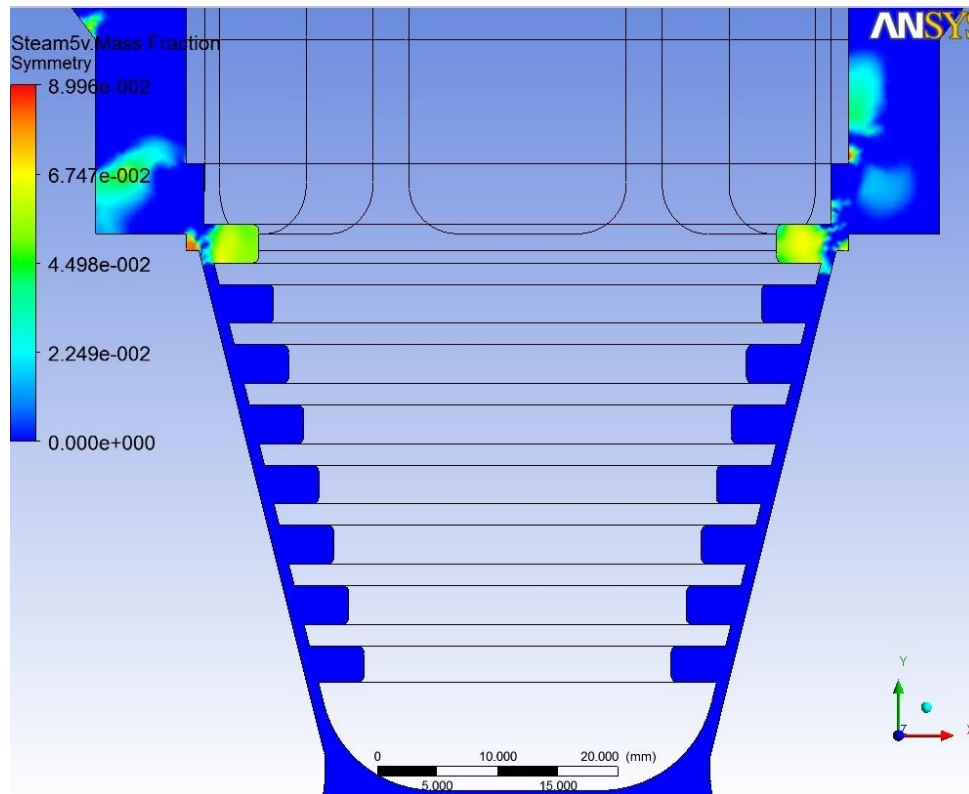
4.2 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 50 m³/h)



4.3 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 75 m³/h)



4.4 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 100 m³/h)



4.5 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (4 mm atsidarymas, debitas 125 m³/h)

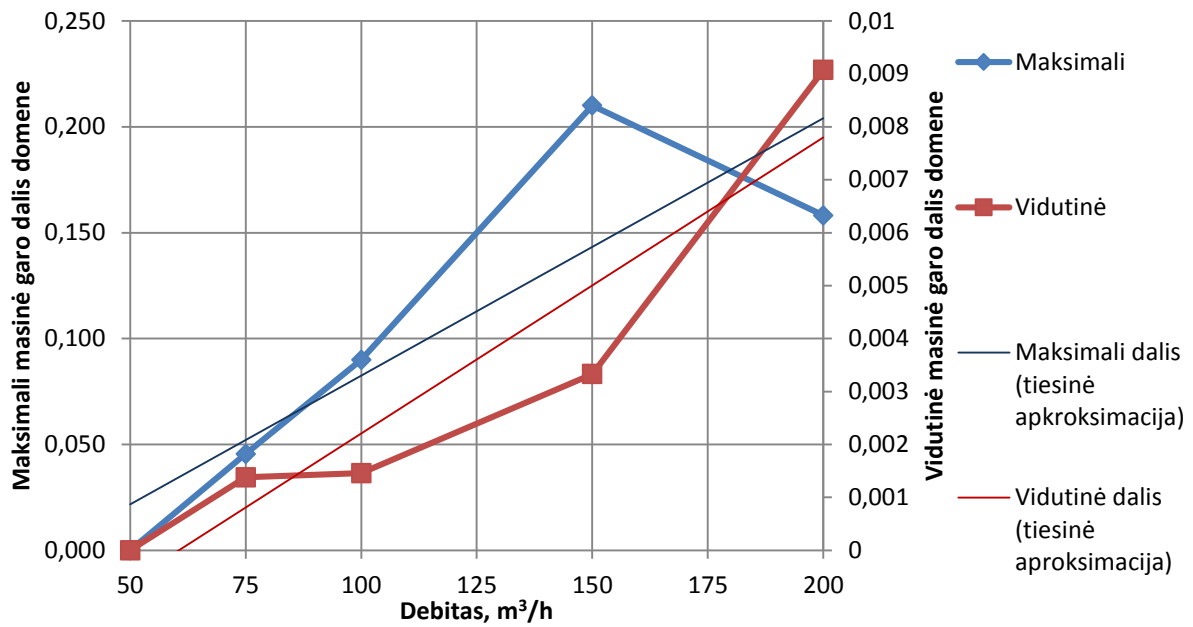
4.2.2 6 mm vožtuvo atsidarymas

Skaičiavimų rezultatai 6 mm atsidarymo laipsniui pateikti 4.2 lentelėje.

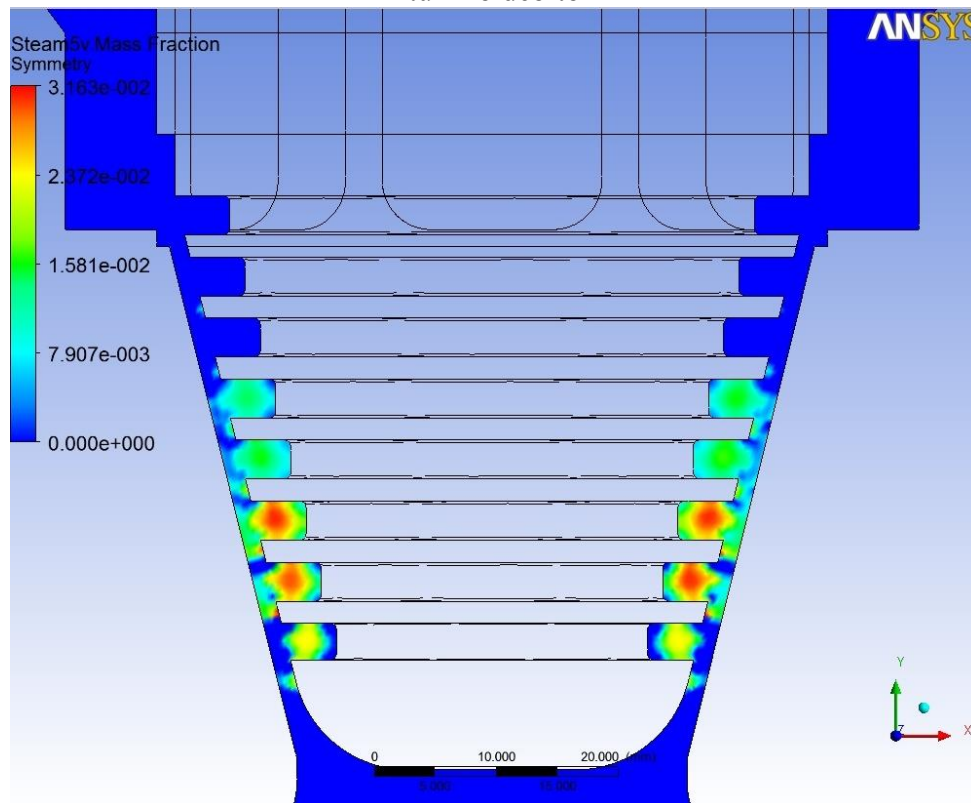
4.2 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai

Atsidarymas	6mm				
	50	75	100	150	200
Masinė garo dalis					
Vožtuvo tūryje (domene)					
Maksimali	0,000	0,045	0,090	0,210	0,158
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0,001	0,001	0,003	0,009
Vožtuvo išėjime					
Maksimali	0	0	0	0	0
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0	0	0	0

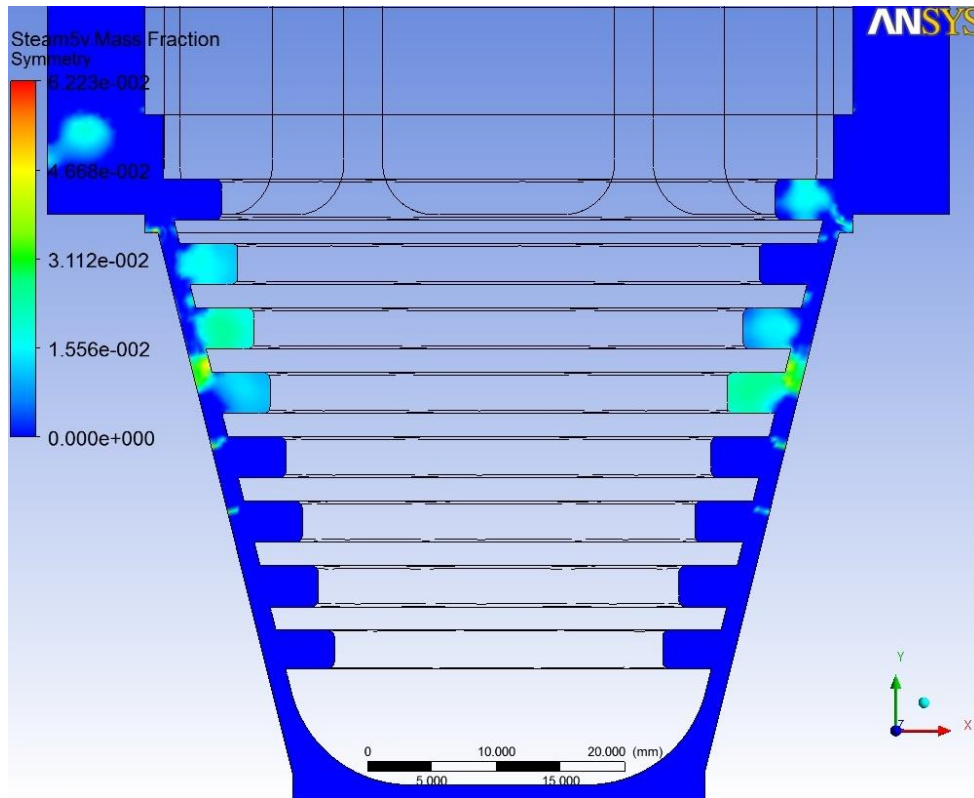
Vizualizuoti rezultatai pateikti 4.6 paveiksle.



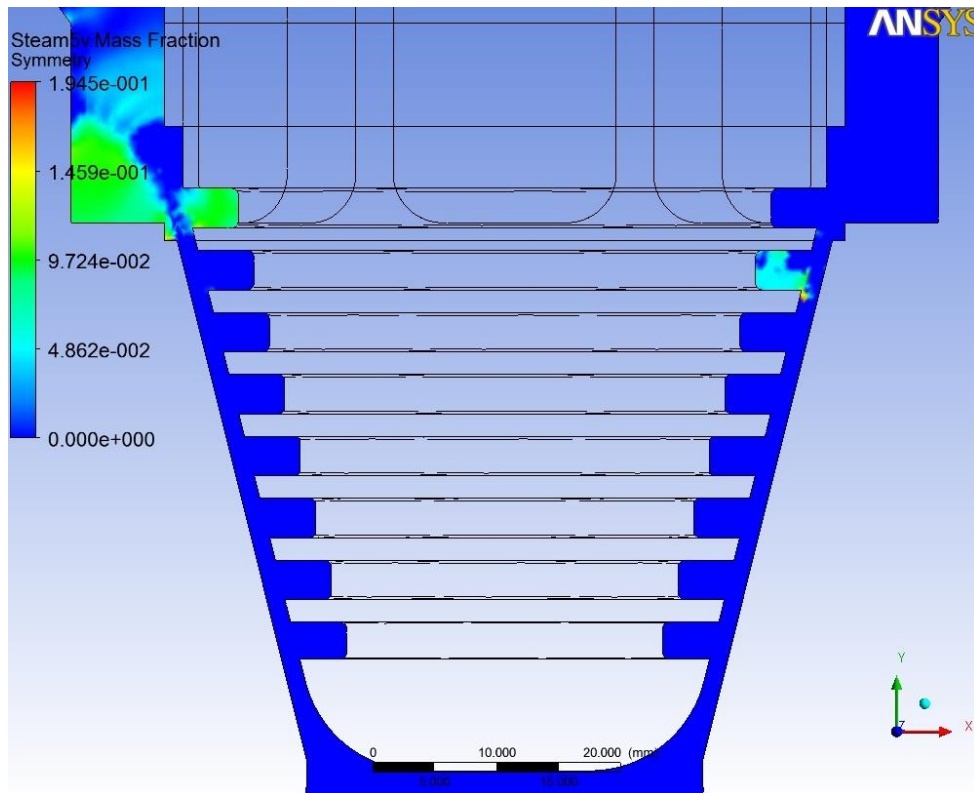
4.6 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito



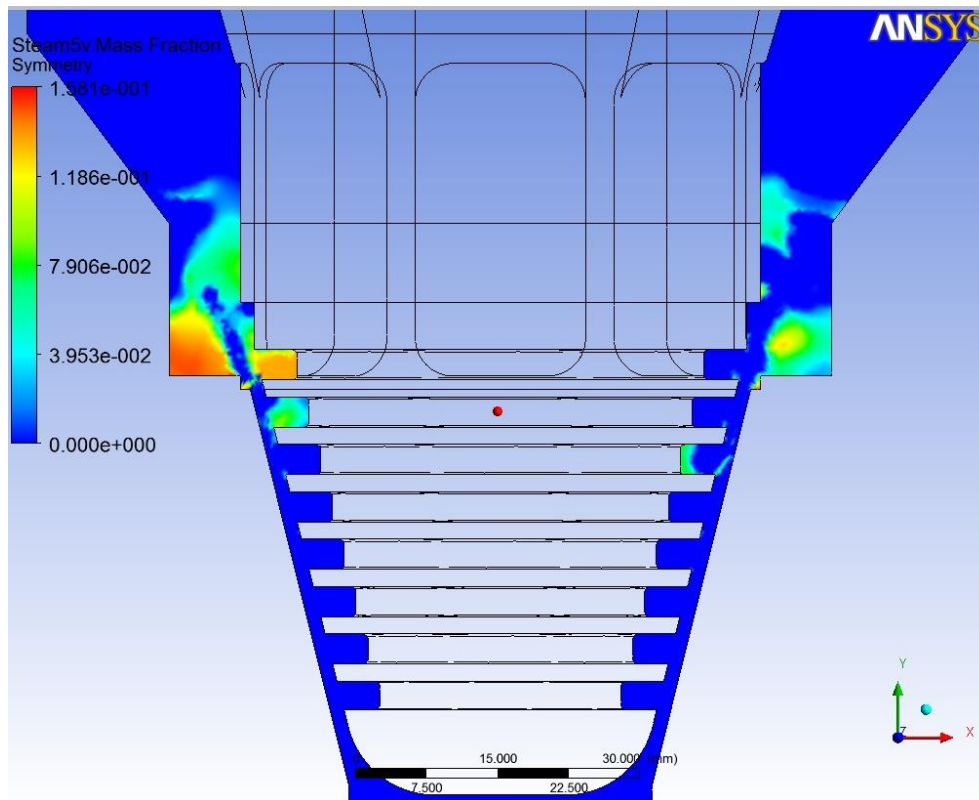
4.7 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 75 m³/h)



4.8 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 100 m³/h)



4.9 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 150 m³/h)



4.10 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (6 mm atsidarymas, debitas 200 m³/h)

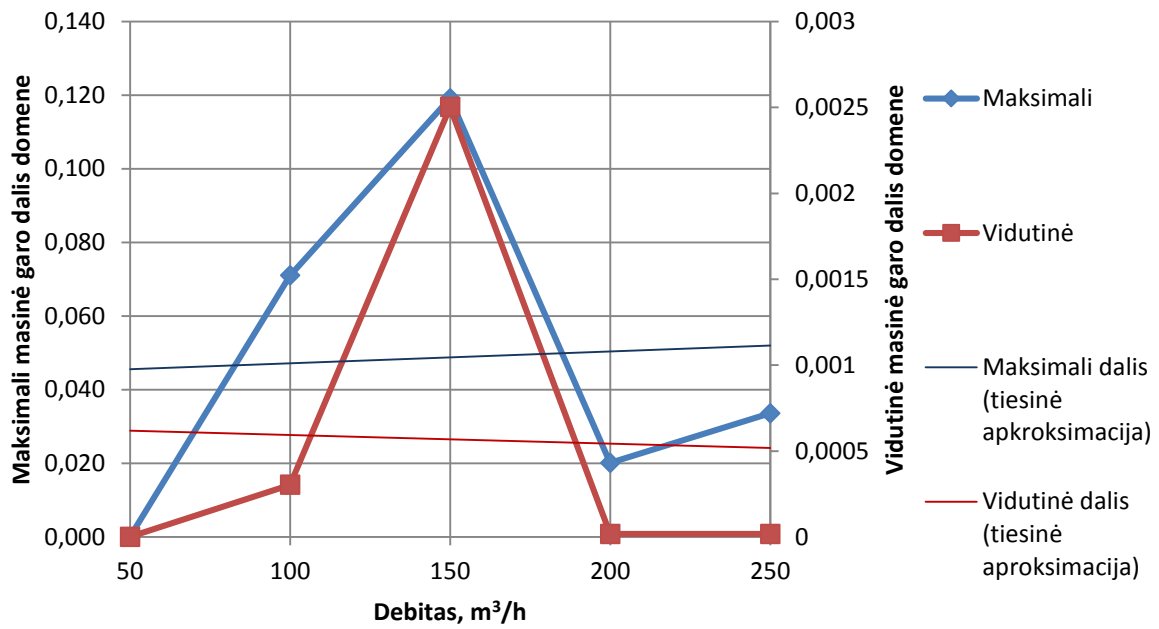
4.2.3 8 mm vožtuvo atsidarymas

Skaičiavimų rezultatai 8 mm atsidarymo laipsniui pateikti 4.3 lentelėje.

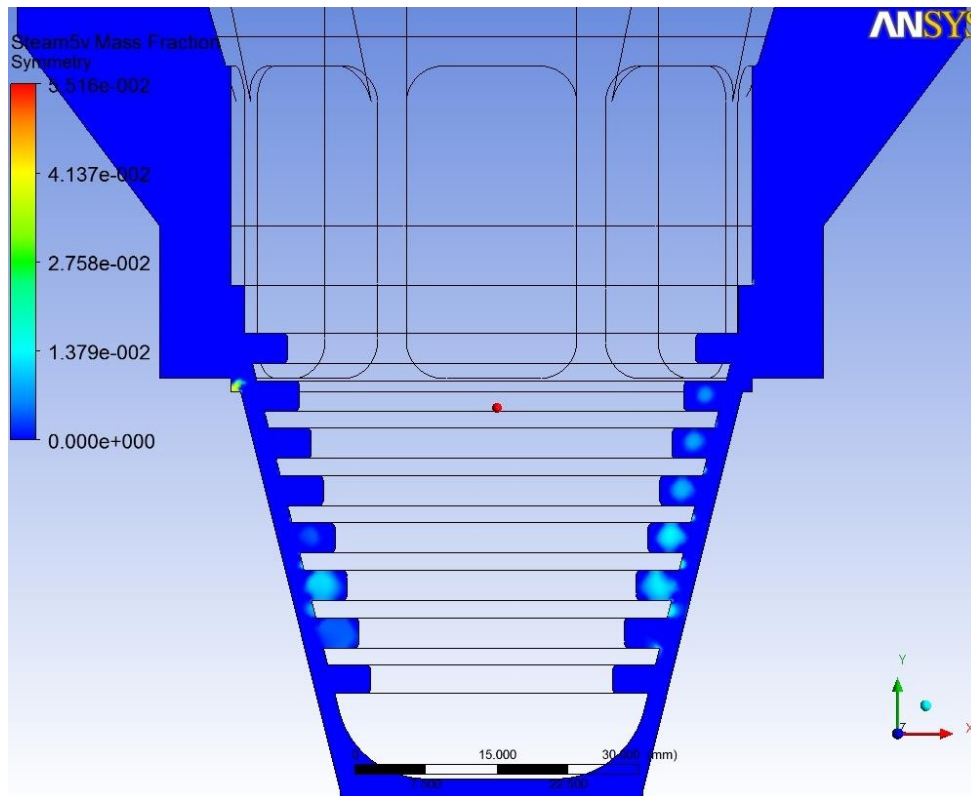
4.3 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai

Atsidarymas	8mm				
Debitas, m ³ /h	50	100	150	200	250
Masinė garo dalis					
Vožtuvo tūryje (domene)					
Maksimali	0,000	0,071	0,119	0,020	0,034
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0,000303	0,002502	1,69E-05	1,68E-05
Vožtuvo išėjime					
Maksimali	0	0	0	0	0
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0	0	0	0

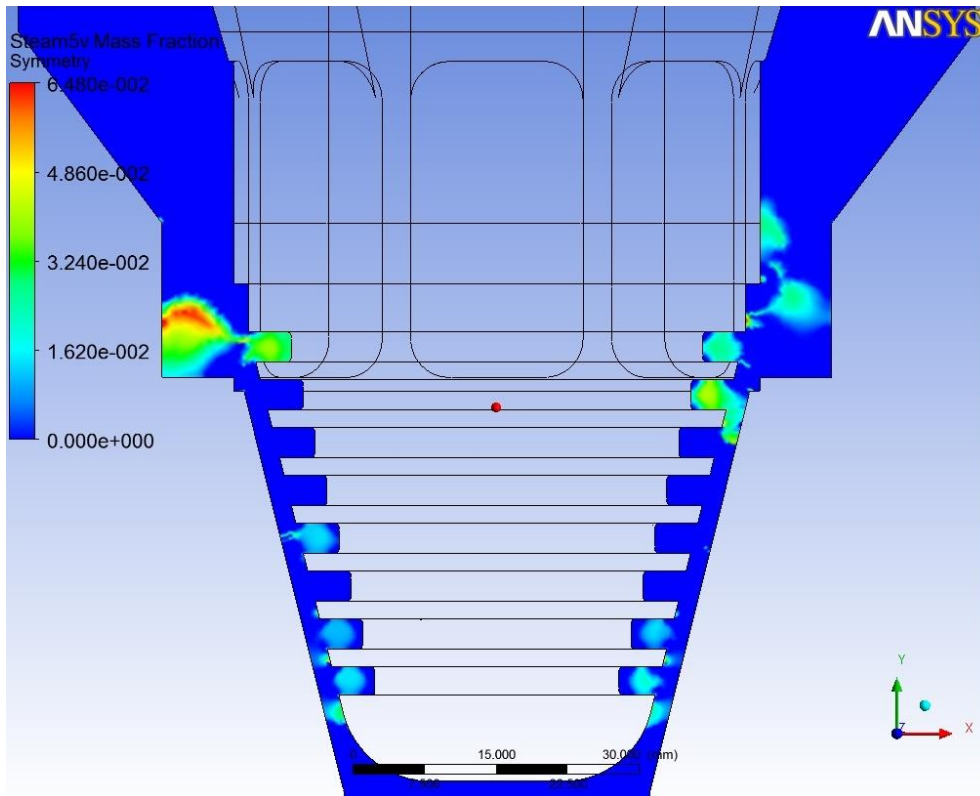
Vizualizuoti rezultatai pateikti 4.11 paveiksle.



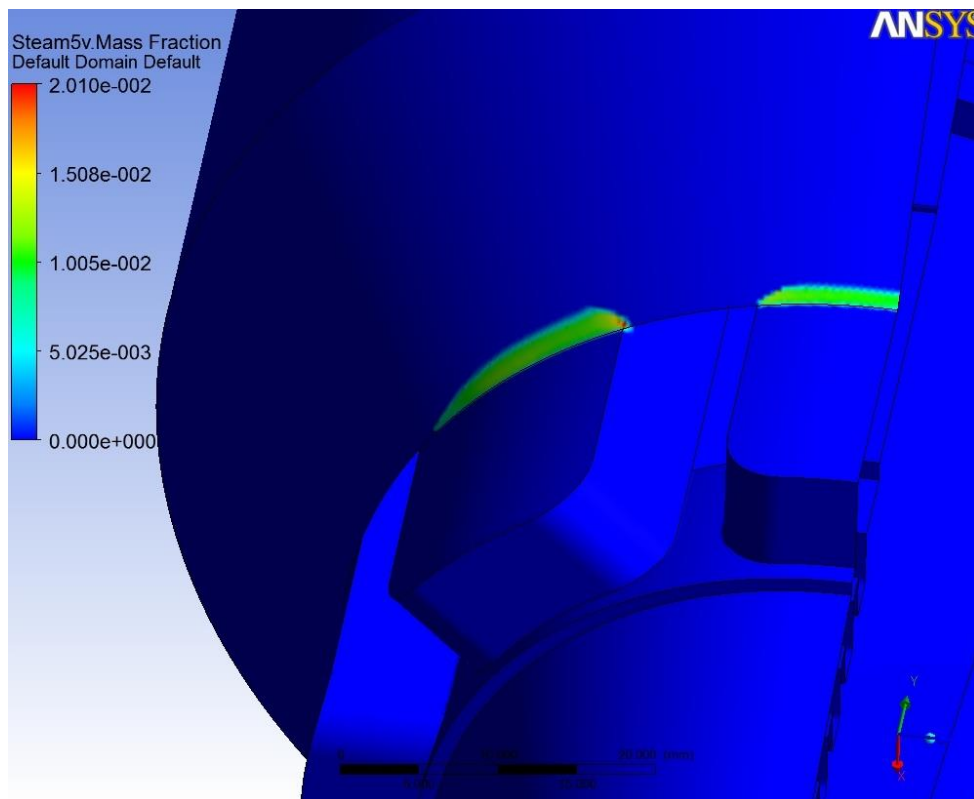
4.11 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito



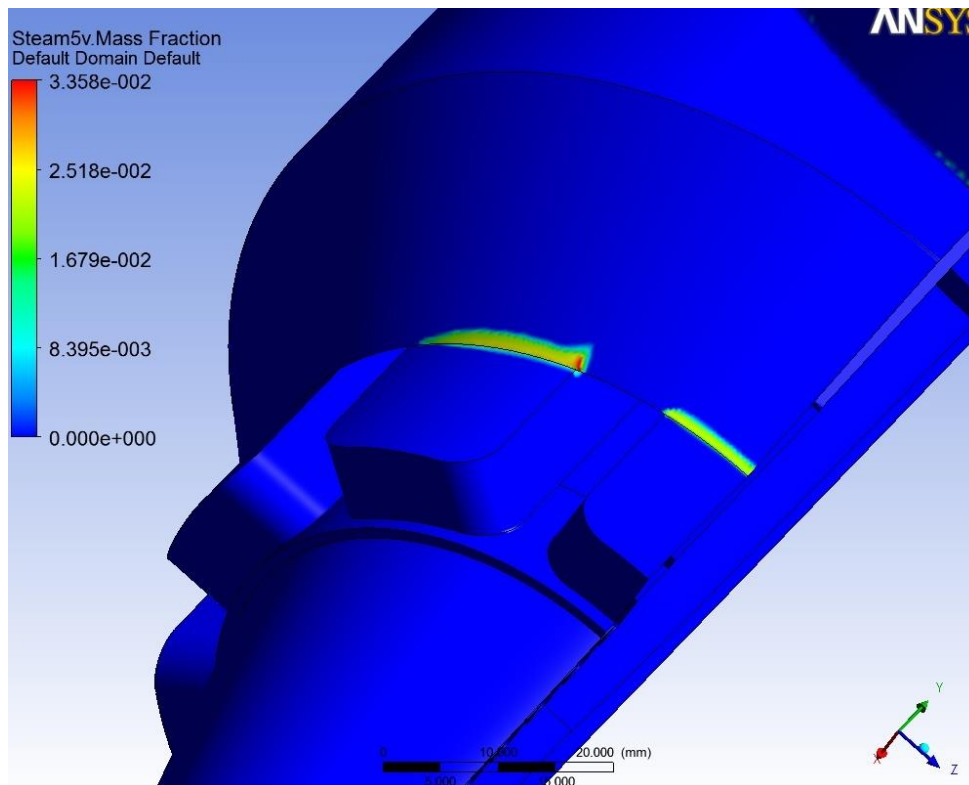
4.12 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas 100 m³/h)



4.13 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas $150 \text{ m}^3/\text{h}$)



4.14 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas $200 \text{ m}^3/\text{h}$)
(simetrijos plokštumoje šiuo atveju garo nebuvo)



4.15 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (8 mm atsidarymas, debitas 250 m³/h) (simetrijos plokštumoje šiuo atveju garo nebuvo)

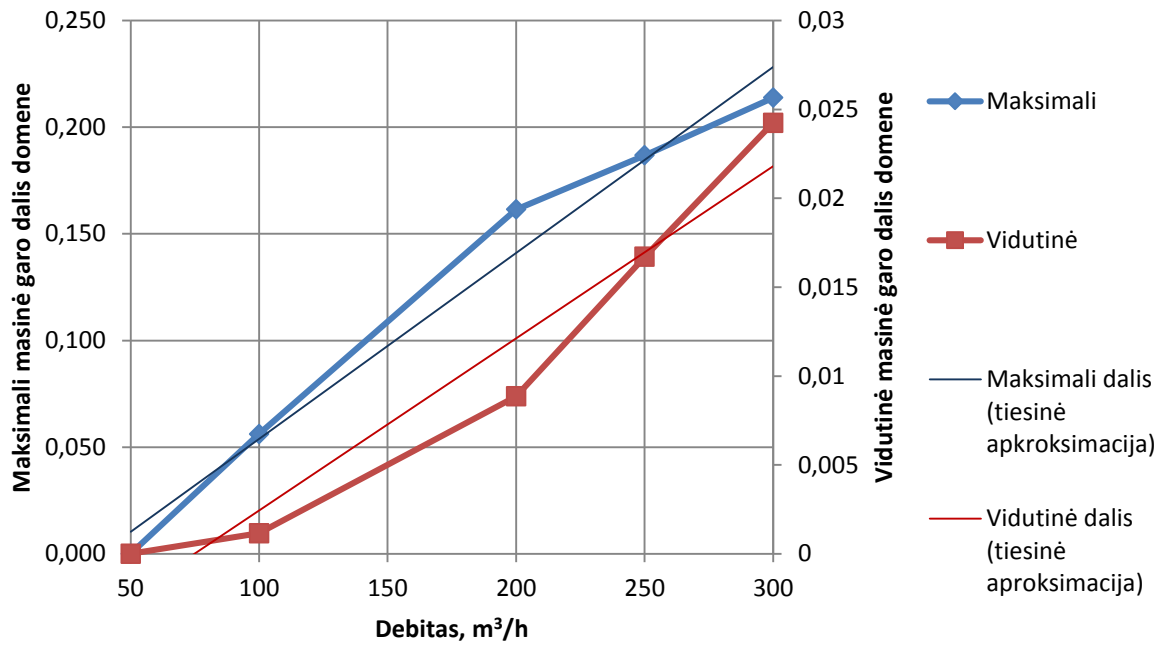
4.2.4 10 mm vožtuvo atsidarymas

Skaičiavimų rezultatai 10 mm atsidarymo laipsniui pateikti 4.4 lentelėje.

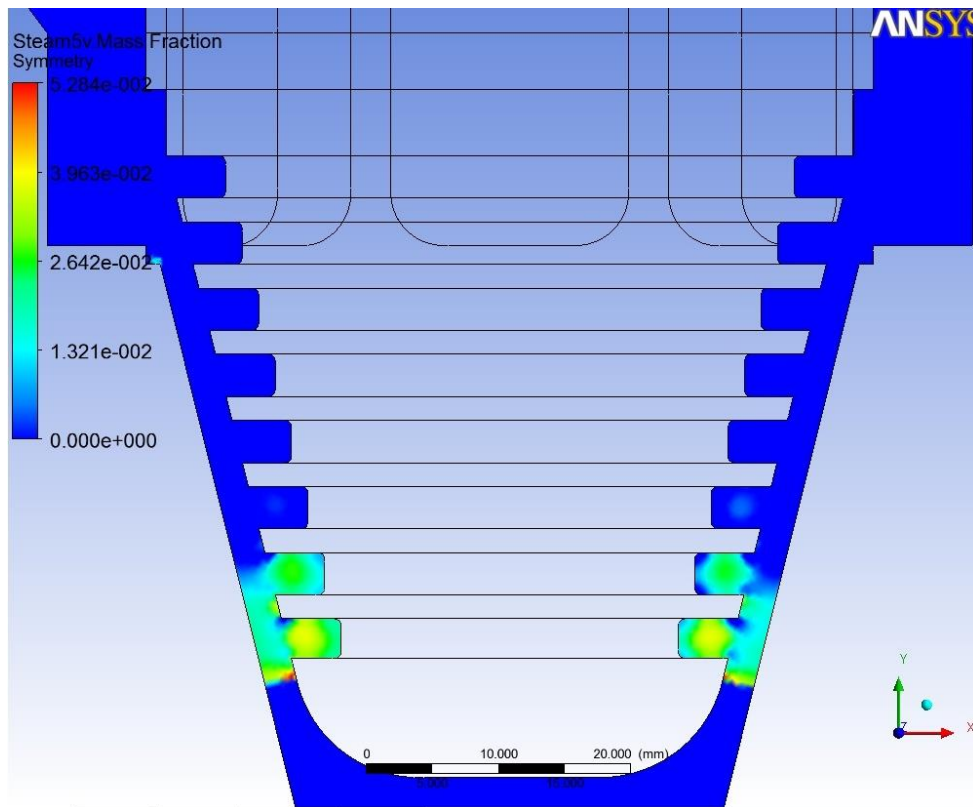
4.4 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai

Atsidarymas	10mm				
Debitas, m ³ /h	50	100	200	250	300
Masinė garo dalis					
Vožtuvo tūryje (domene)					
Maksimali	0,000	0,056	0,161	0,187	0,214
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0,001151	0,008857	0,016708	0,024239
Vožtuvo išėjime					
Maksimali	0	0	0	0	0
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0	0	0	0

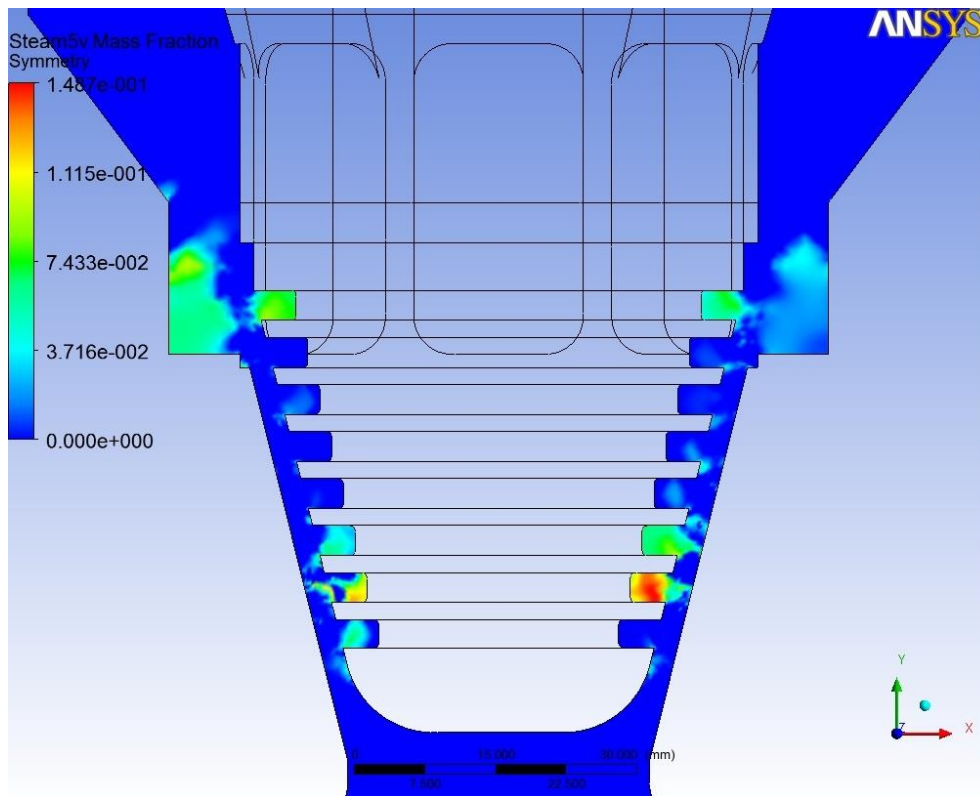
Vizualizuoti rezultatai pateikti 4.16 paveiksle.



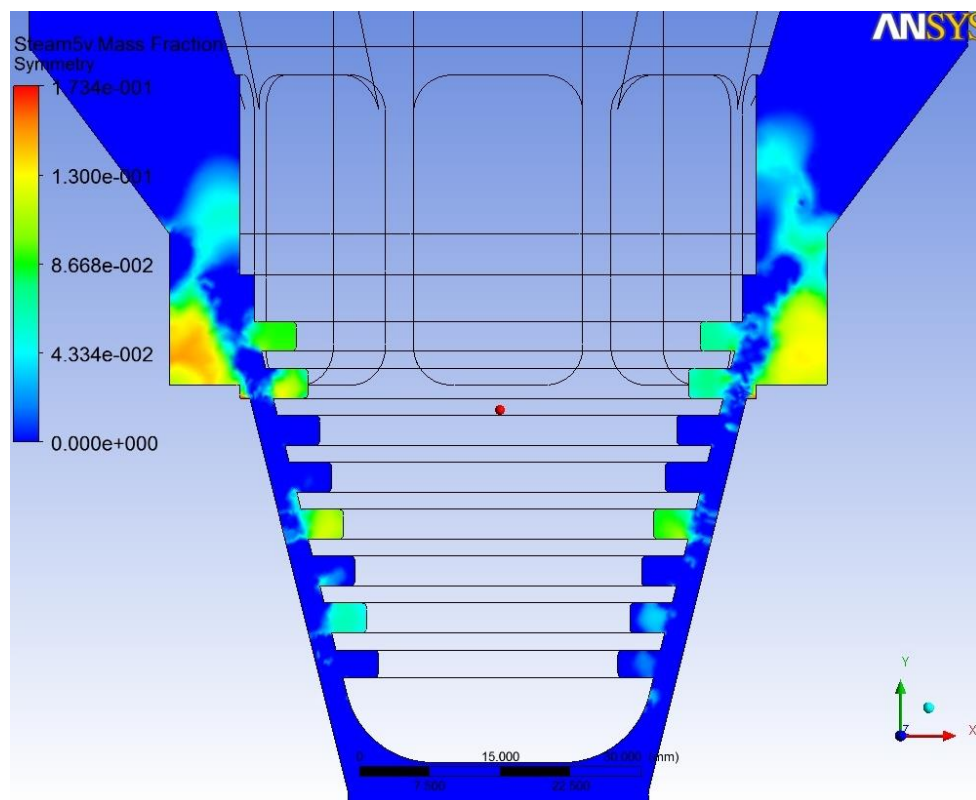
4.16 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito



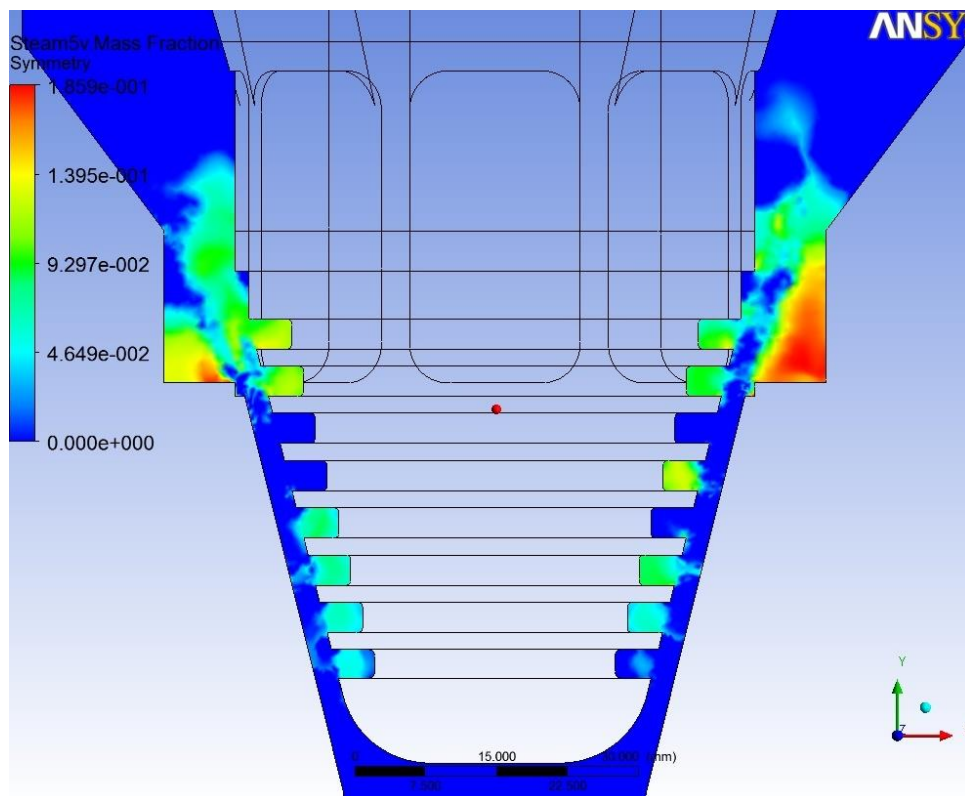
4.17 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 100 m³/h)



4.18 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 200 m³/h)



4.19 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 250 m³/h)



4.20 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (10 mm atsidarymas, debitas 300 m³/h)

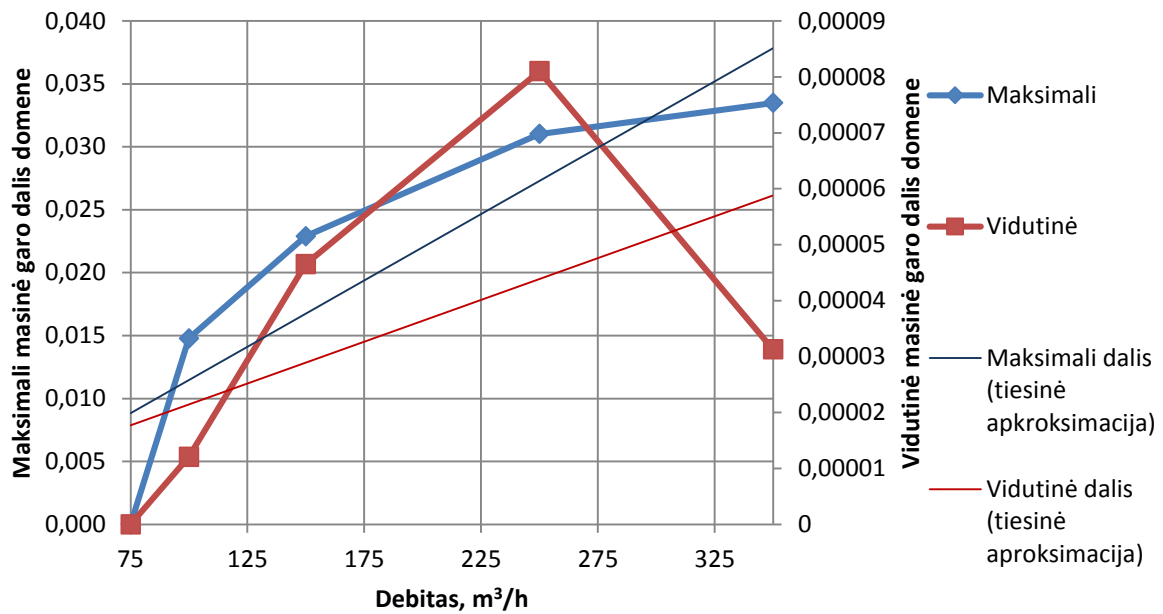
4.2.5 12 mm vožtuvo atsidarymas

Skaičiavimų rezultatai 10 mm atsidarymo laipsniui pateikti 4.5 lentelėje.

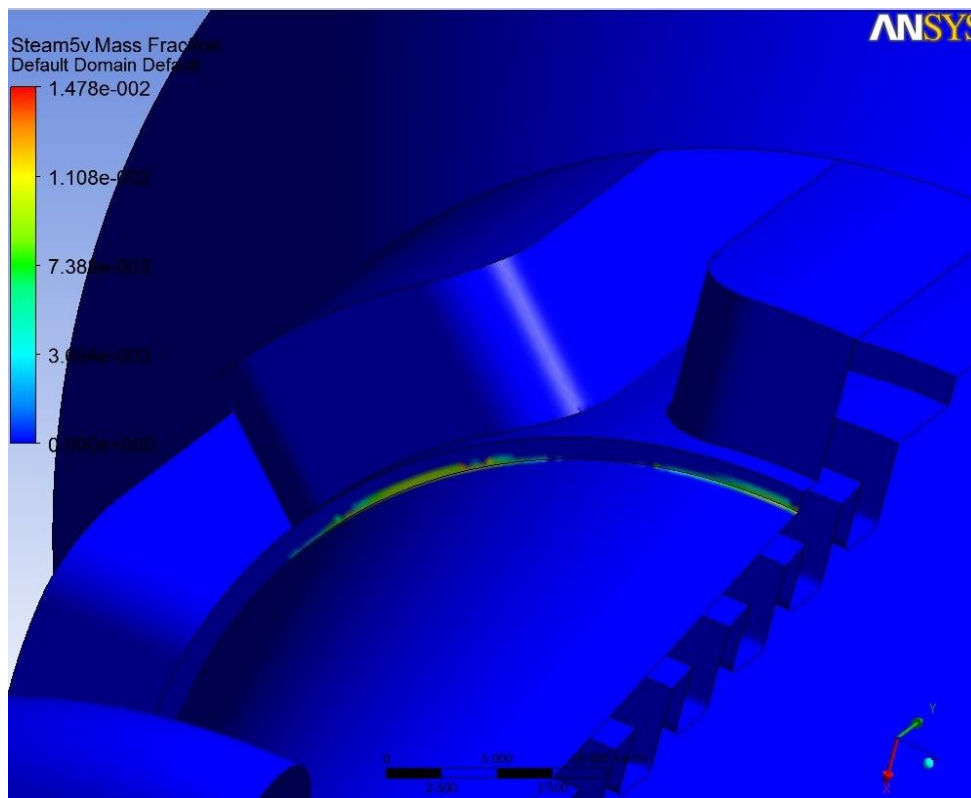
4.5 lentelė. Dvifazio srauto susidarymo skaičiavimo rezultatai

Atsidarymas	12mm				
Debitas, m ³ /h	75	100	150	250	350
	0				
	0				
Maksimali	0,000	0,015	0,023	0,031	0,033
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	1,21E-05	4,65E-05	8,1E-05	3,13E-05
Vožtuvo išėjime					
Maksimali	0	0	0	0	0
Minimali	0	0	0	0	0
Vidutinė	0	0	0	0	0

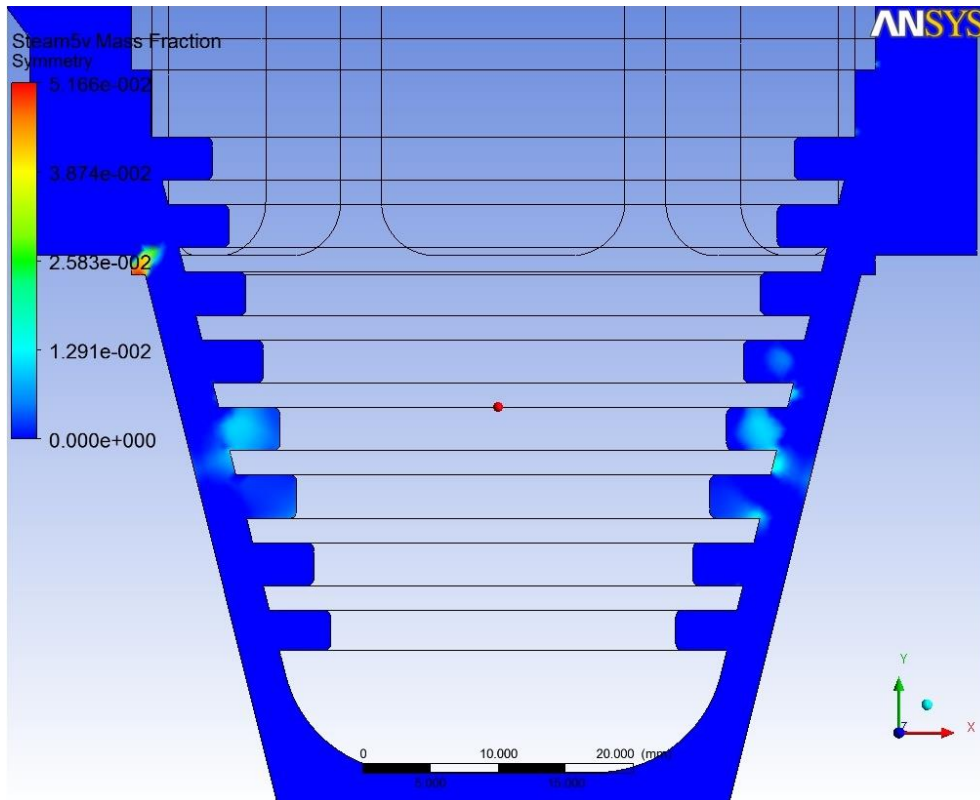
Vizualizuoti rezultatai pateikti 4.21 paveiksle.



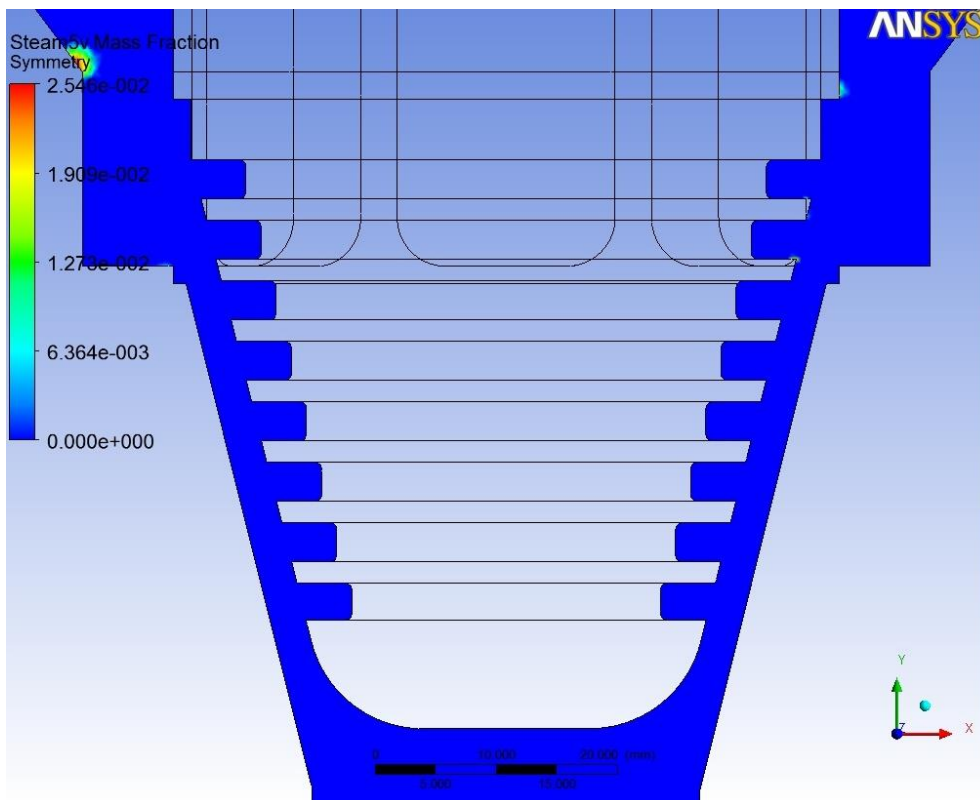
4.21 pav. Maksimalios ir vidutinės masinės garo dalies vožtuvo domene priklausomybė nuo tūrinio debito



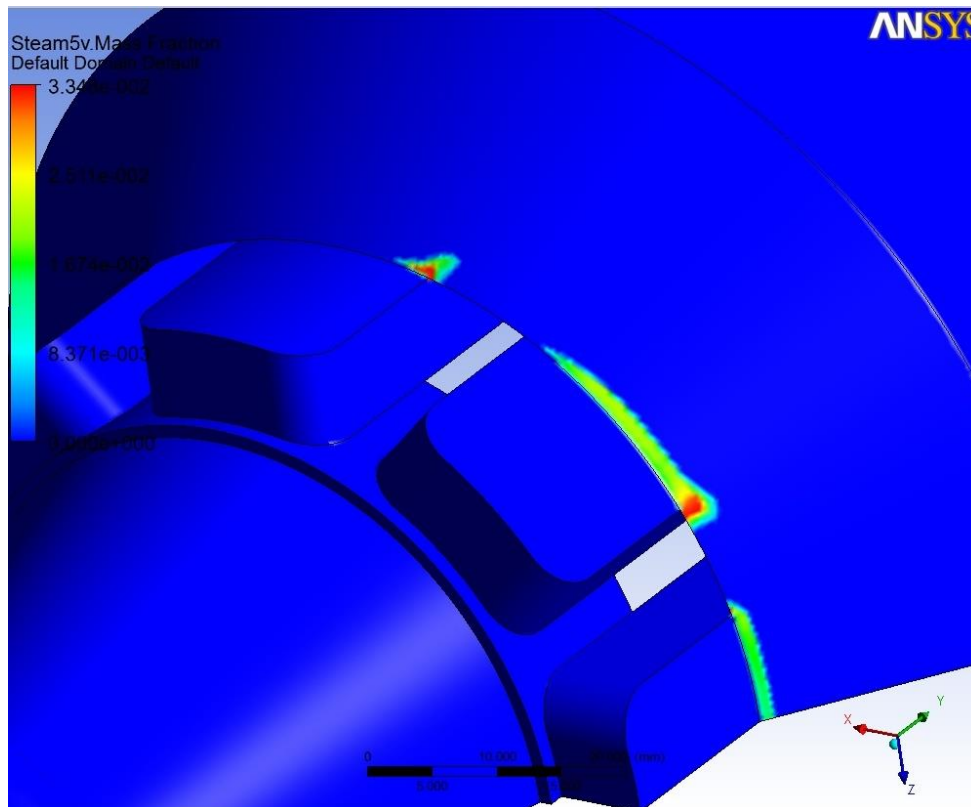
4.22 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 100 m³/h) (simetrijos plokštumoje šiuo atveju garo nebuvo)



4.23 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 150 m³/h)



4.24 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 250 m³/h)



4.25 pav. Garo masinė dalis vožtuvo sandarinimo zonoje (12 mm atsidarymas, debitas 350 m³/h) (simetrijos plokštumoje šiuo atveju garo nebuvo)

4.3 Paklaidų šaltiniai

Kiekvienam atsidarymo laipsniui sukūrus 5 taškus ryškėja tiesioginė priklausomybė tarp pro izoliuojantį – reguliuojantį vožtuvą pratekėjusio vandens ir susidariusios garo masinės dalies. Tačiau 8 mm atsidarymo modelis nėra toks sklandus kaip kiti. Problemą greičiausiai galima sieti su neadekvačiu tinkleliu, prisimenant, kad lyginant su eksperimentiniais duomenimis šis generavo didžiausią santykinę paklaidą tarp žinomų kontrolinių taškų (atsidarymo, debito ir slėgio nuostolių).

Sprendimo eiga ANSYS CFX aplinkoje visais nagrinėtais dvifazio srauto atvejais taip pat nebuvo tokia sklandi kaip sprendžiant uždavinį be šilumos mainų tarp fazių. Modeliuojamas procesas yra sudėtingas, o jis vyksta mažų gabaritų (keliolikos centimetrų eilės) izoliuojančiame – reguliuojančiame vožtuve, kuris turi itin sudėtingą geometriją, todėl čia atsiremiami į rezultatų patikimumo be eksperimentinio stendo (dvifazio srauto susidarymo atveju) klausimą.

5 IŠVADOS

Atlikus skaitinį RBMK tipo reaktoriaus izoliuojančio – reguliuojančio vožtuvo modeliavimą galima daryti šias išvadas:

1. Kaip ir galima buvo tikėtis – esant bet kokiai vožtuvo sklandies dispozicijai korpuse (atsidarymo laipsniui) ir didinant pratekanti debitą, realiomis termodinaminėmis reaktoriaus sąlygomis dvifazis srautas susidaro.
2. „Perkrovus“ vožtuvą net iki 10 kartų didesniu tūriniu debitu, nei eksperimentinis, vožtuvo išėjime garo fazės nebelieka. Išėjęs iš sandarinimo zonos, kurioje tipiška ir generuojasi garas, jis, patekęs į aukštesnio slėgio ir mažesnio greičio sritį, pilnai kondensuojasi, todėl grėsmės RBMK tipo reaktoriaus darbui, remiantis šio projekto rezultatais, neturi.
3. Maksimali užfiksuota masinė garo fazės dalis homogeniniame mišinyje sudaro 21,4%. Analizuojant stacionarų mišinio tekėjimą vožtuve galima teigti, kad nėra prielaidų garo kamščiui susidaryti.
4. Nors modelis buvo pakankamai tikslus lyginant su eksperimentiniais rezultatais, tačiau egzistuoja galimybė, kad tiriant dvifazio srauto susidarymą jo patikimumas yra sumažėjęs dėl besikeičiančio debito, kuris, kaip buvo pastebėta, lyginant su eksperimentiniais duomenimis, taip pat turi įtaką tikslumui.

6 LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Nuclear power plants in Europe,
<https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-europe.htm>
2. Atominė energetika Europoje ir Pasulyje,
http://www.enmin.lt/lt/atomine_energetika_EU_world.php?clear_cache=Y
3. RBMK Reactors, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Appendices/RBMK-Reactors/>
4. О.Ю. Новосельский, А.П. Скибин, С.Л. Соловьев, А.В. Шишов (ОЦРК, НИКИЭТ)
Исследование гидравлических характеристик запорно-регулирующего клапана топливного канала РБМК-1000 с параметрами теплоносителя на момент начала аварии на энергоблоке №4 Чернобыльской АЭС
5. Reaktorių klasifikavimas pagal lėtikliui naudojamą medžiagą,
http://www.vae.lt/lt/pages/pagal_letikliui_naudojama_medziaga
6. 1. K. Almenas, A. Kaliatka and E. Ušpuras, “Ignalina RBMK-1500, A Source Book, , Ignalina RBMK-1500, Lithuanian Energy Institute, , 1998;
7. [http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/AGR_fuel_assembly\(1\).jpg](http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/AGR_fuel_assembly(1).jpg);
8. John F. Wendt Computational Fluid Dynamics An Introduction;
9. Lappeenranta University of Technology, Computational Fluid Dynamics paskaitų teorinė medžiaga. Discretization methods;
10. ANSYS CFX-Solver Theory Guide;
11. Kauno technologijos universitetas; Napoleonas Liutikas, Juozas Gudzinskas, Termohidromechanika, Kaunas, Technologija, 2001
12. Ремонтное Обслуживание Устройств Регулирования Расхода Теплоносителя В Технологические Каналы Реактора Рбмк-1500, В.Зимин

7 PRIEDAI

7.1 Izoliuojančio – reguliuojančio vožtuvo surinkimo brėžinys

7.2 Korpuso brėžinys

7.3 Balno brėžinys

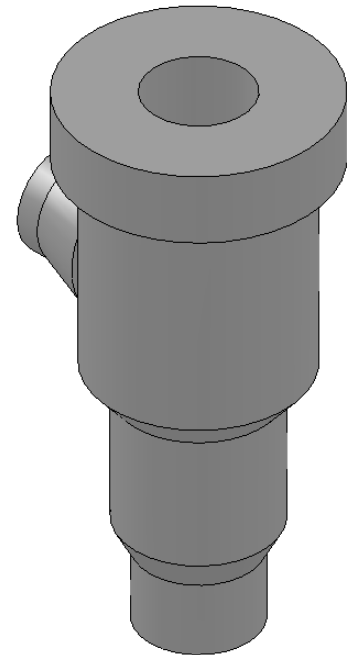
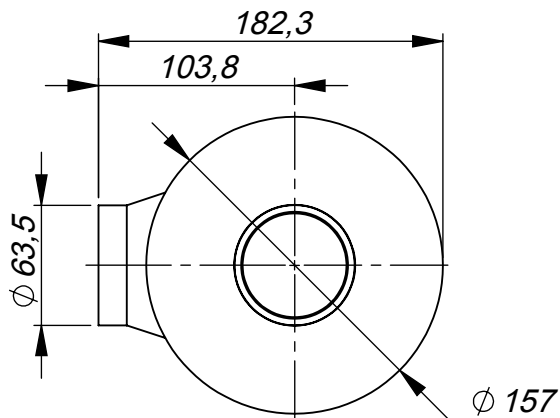
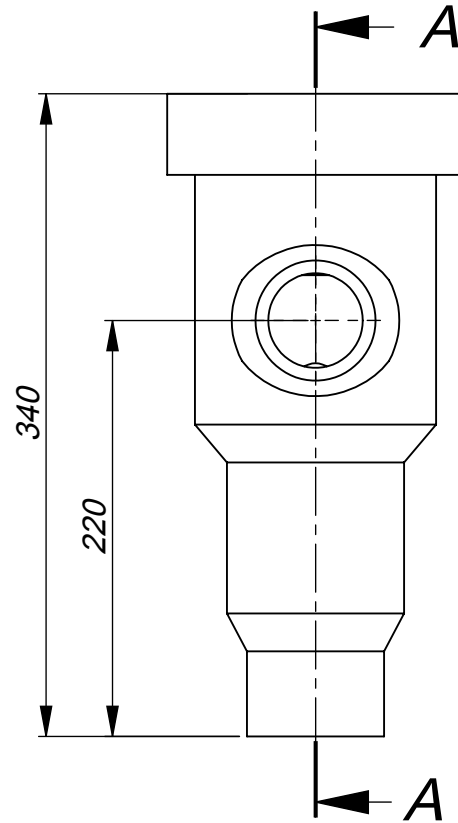
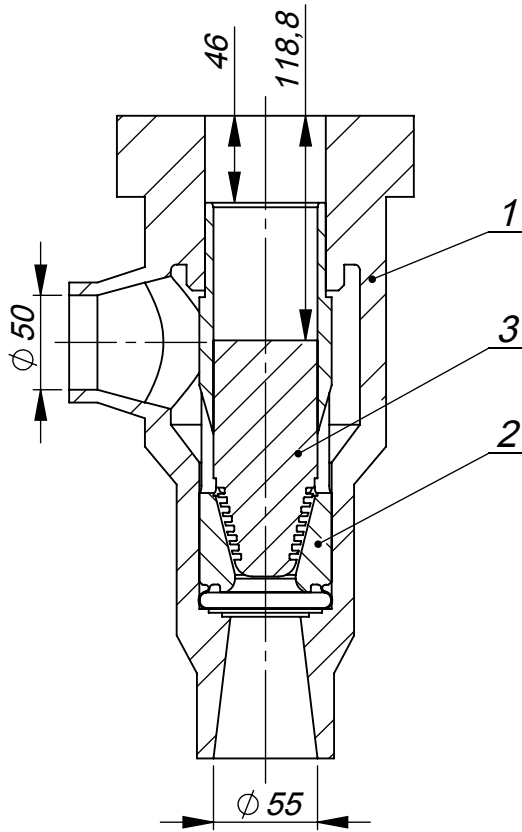
7.4 Sklandies brėžinys

7.5 Vamzduko brėžinys

Priedas nr. 1

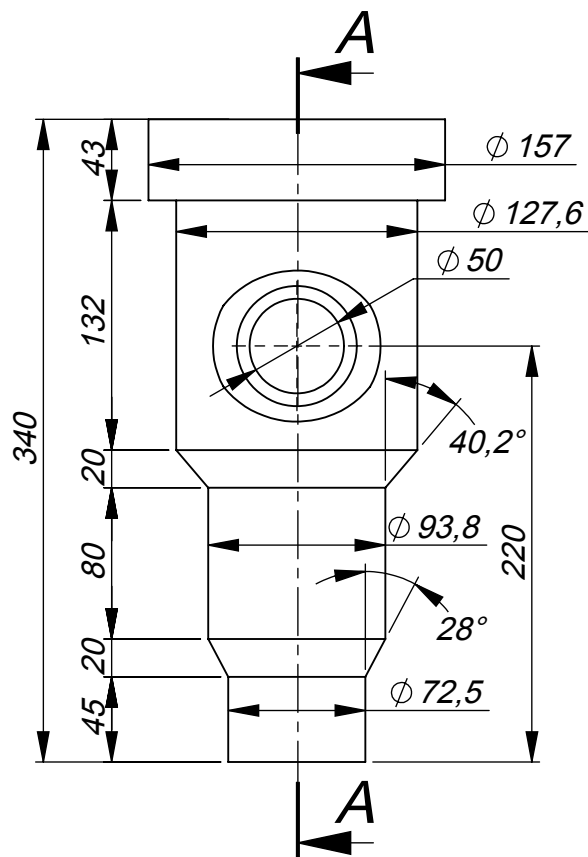
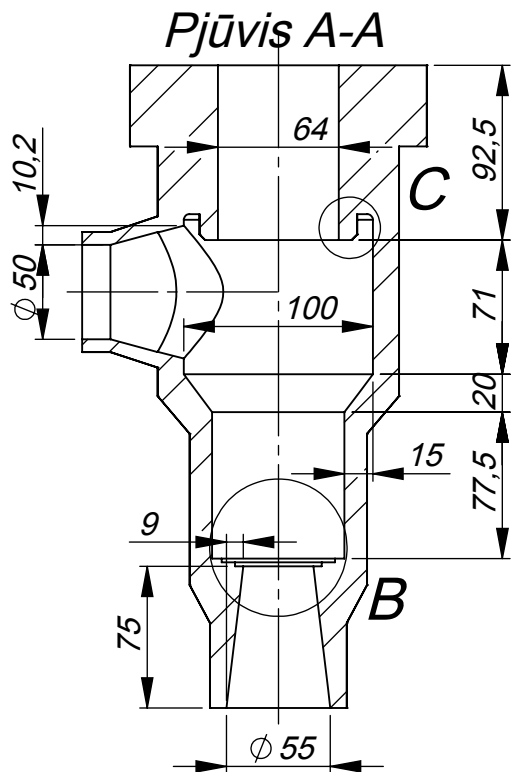
Eil. Nr.	Byla	Pavadinimas	Kiekis
1	IRV 01	Korpusas	1
2	IRV 02	Balnas	1
3	IRV 03	Sklandis	1

Pjūvis A-A

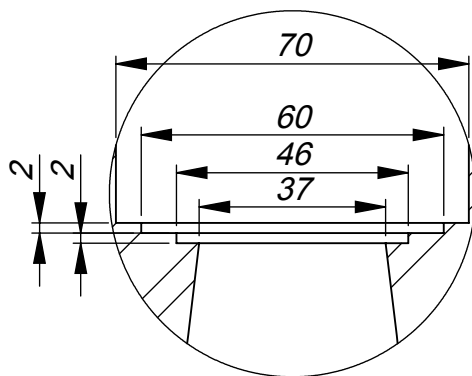


	Byla, laikmena	Papildoma informacija Vožtuvo atsidarymas - 6mm	Medžiaga	Mastelis 1:4
Padalinys Šilumos ir atomo energetikos katedra	Techninis vadovas	Dokumento tipas	Dokumento statusas	
Organizacija KTU	Ruošė E. Janušauskas	Pavadinimas, papildomas pavadinimas Izoliuojantis - reguliuojantis vožtuvas	IRV 00 SB	
	Tvirtino L. Paukštaitis		Perž. Data A 2015.05.23	Kalba Lapas Lt 1/4

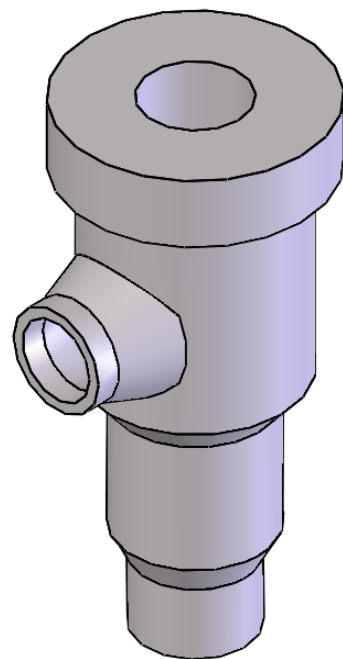
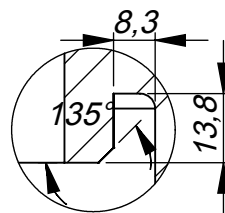
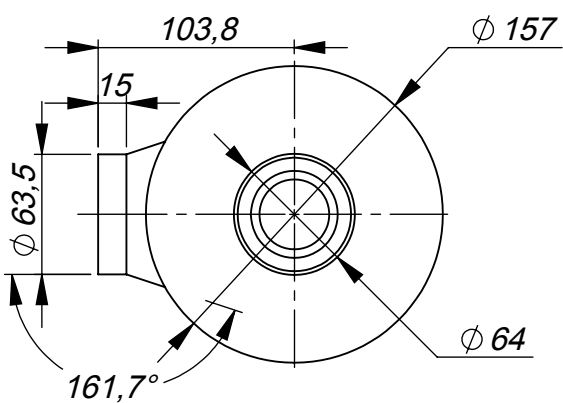
Priedas nr. 2



B 2 : 3

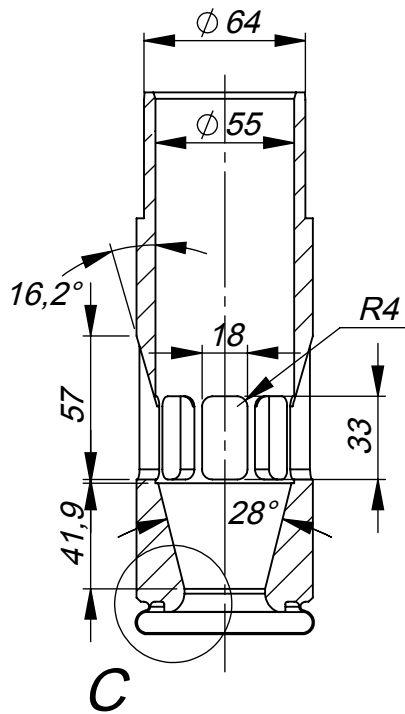


C 2 : 3

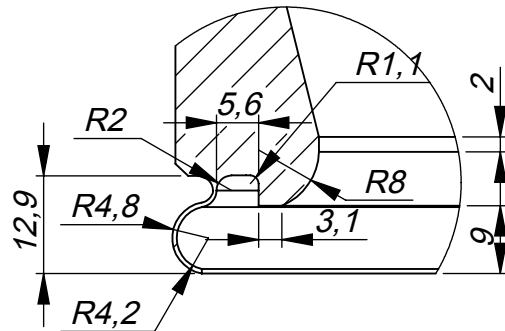
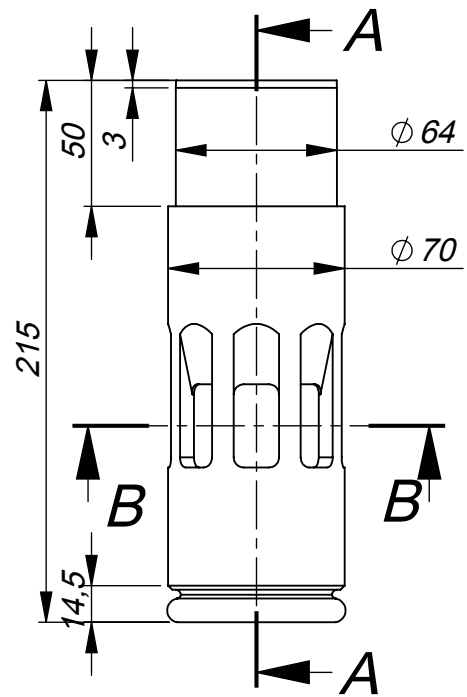


	Byla, laikmena	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis 1:4
Padalinys Šilumos ir atomo energetikos katedra	Techninis vadovas	Dokumento tipas		Dokumento statusas
Organizacija KTU	Ruošė E. Janušauskas Tvirtino L. Paukštaitis	Pavadinimas, papildomas pavadinimas Korpusas		IRV 01 Perž. Data A 2015.05.23 Kalba Lapas Lt 2/4

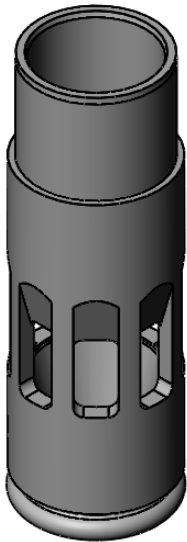
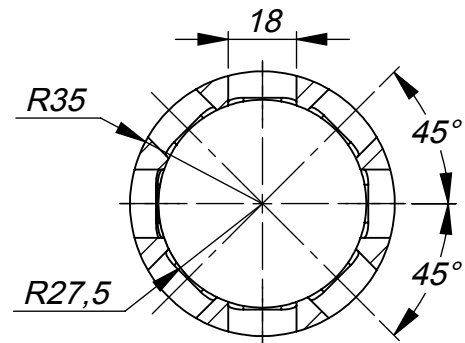
Priedas nr. 3



C 1:1

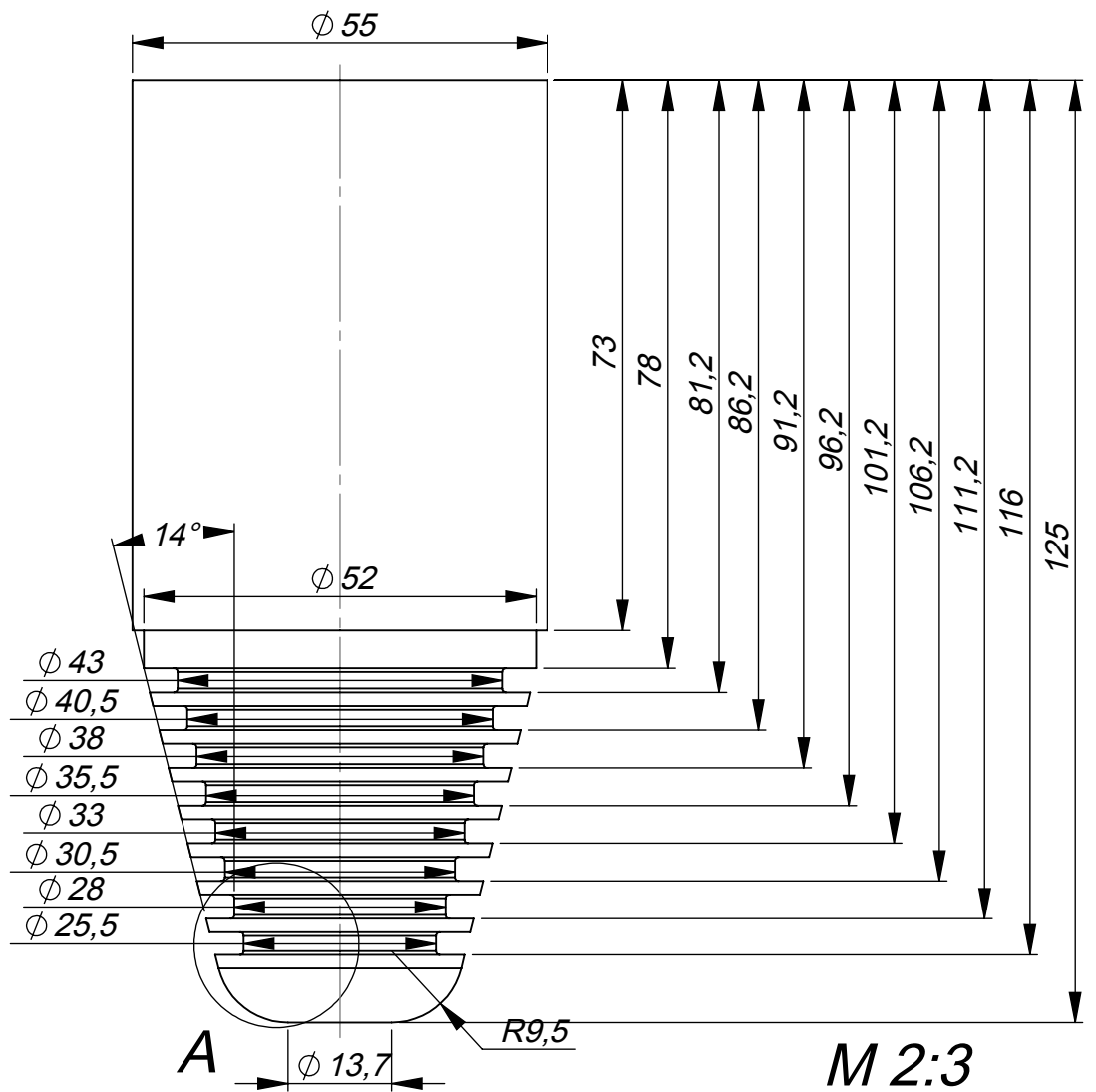


B-B 1:2

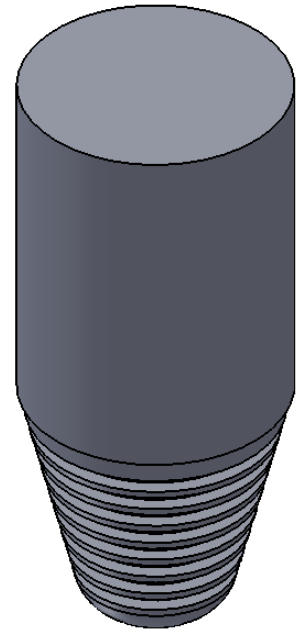
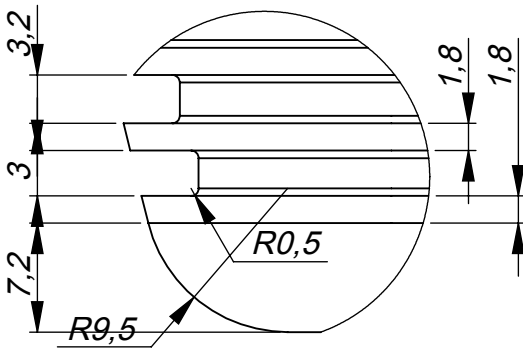


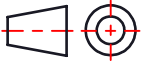
	Byla, laikmena	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis 1:3
Padalinys Šilumos ir atomo energetikos katedra	Techninis vadovas	Dokumento tipas		Dokumento statusas
Organizacija KTU	Ruošė E. Janušauskas Tvirtino L. Paukštaitis	Pavadinimas, papildomas pavadinimas Balnas		IRV 02 Perž. Data A 2015.05.23 Kalba Lapas Lt 3/4

Priedas nr. 4

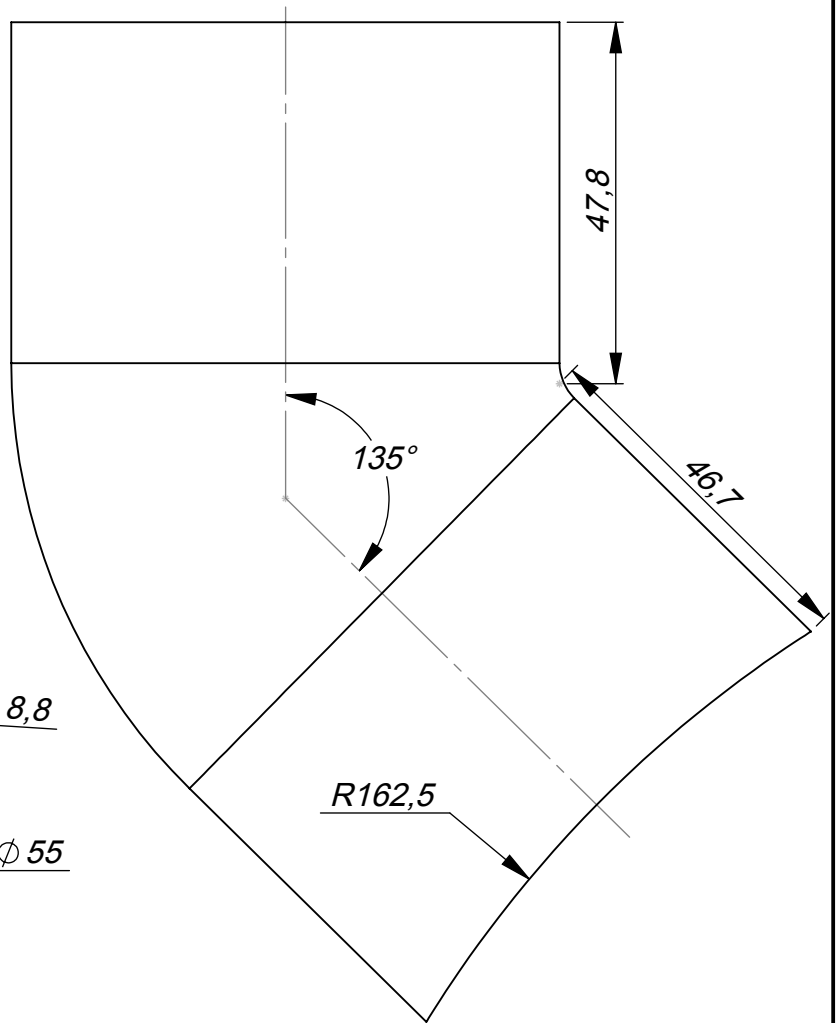
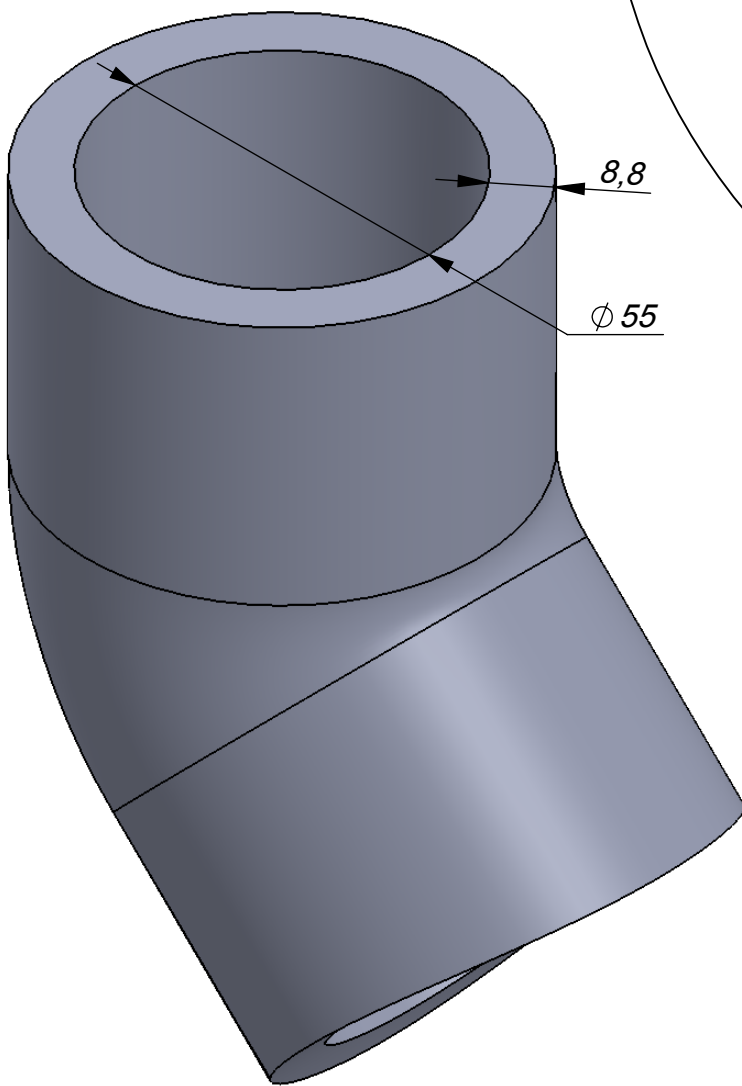


A 2:1



	Byla, laikmena	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis 1:1
Padalinys Šilumos ir atomo energetikos katedra	Techninis vadovas	Dokumento tipas	Dokumento statusas	
Organizacija KTU	Ruošė E. Janušauskas Tvirtino L. Paukštaitis	Pavadinimas, papildomas pavadinimas Sklandis	IRV 03	
			Perž. A	Data 2015.05.23 Kalba Lt Lapas 4/4

Priedas nr. 5



	<i>Byla, laikmena</i>	<i>Papildoma informacija</i>	<i>Medžiaga</i>	<i>Mastelis</i> 1:1	
<i>Padalinys</i> Šilumos ir atomo energetikos katedra	<i>Techninis vadovas</i>	<i>Dokumento tipas</i>		<i>Dokumento statusas</i>	
<i>Organizacija</i> KTU	<i>Ruošė</i> E. Janušauskas	<i>Pavadinimas, papildomas pavadinimas</i> Vamzdukas		00.01	
<i>Tvirtino</i> L. Paukštaitis	<i>Perž.</i> A			<i>Data</i> 2015.05.27	<i>Kalba</i> Lt