VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Vadim Nikitin

GEOTERMINIO GILUMINIO IŠCENTRINIO SIURBLIO HIDRODINAMINIŲ IR TERMODINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS

RESEARCH OF ABYSSAL CENTRIFUGAL PUMP HYDRODYNAMIC AND THERMODYNAMIC PROCESSES

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas ***621E20003***
Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija
Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
(Parašas)
prof. Marijonas Bogdevičius
(Vardas, pavardė)
2014.06.04
(Data)

Vadim Nikitin

GEOTERMINIO GILUMINIO IŠCENTRINIO SIURBLIO HIDRODINAMINIŲ IR TERMODINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS

RESEARCH OF ABYSSAL CENTRIFUGAL PUMP HYDRODYNAMIC AND THERMODYNAMIC PROCESSES

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas *621E20003*
Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija
Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	Vedėjas, prof. M. Bogdevičius		2014.06.04
	(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)
Konsultantas			
	(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)
Konsultantas			
	(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	lekt. el. Petrutienė		2014-06-02
	(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
(Parašas)
prof. Marijonas Bogdevičius
(Vardas, pavardė)
2014-06-04
(Data)

Sausumos transporto inžinerija studijų kryptis

Transporto inžinerija studijų programa, valstybinis kodas *621E20003*

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

.....Nr. .....
Vilnius

Studentui (ei) Vadim Nikitin
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Sedimentinių gilumininių nuosėdinių uolienų bitumo-dinaminių ir termodinaminių savybių tyrimas

patvirtinta 2013 m. 01-31 d. dekano potvarkiu Nr. 67ti

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas *2014*-05-29.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:
Ištirti gamtinių dujų gilumininių nuosėdinių uolienų ir naudojamų gręžimo filtro dangos formuojančių polimerų termodinaminių savybių priklausomybę nuo slėgio ir temperatūros.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas (Parašas) (Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau
(Parašas)
Vadim Nikitin
(Vardas, pavardė)
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Transporto technologinių įrenginių katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Transporto inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Geoterminio giluminio išcentrinio siurblio hidrodinaminių ir termodinaminių procesų tyrimas**

Autorius **Vadim Nikitin**

Vadovas **prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Darbas yra skirtas UAB „Geoterma" eksploatuojamosios geoterminės jėgainės tyrimams atlikti siekiant ištirti eksploatacijos metu pasireiškiančias problemas ir galimas jų priežastis. Darbe yra aprašoma jėgainės sandara, pagrindiniai jos parametrai ir su eksploatacija susijusios problemos. Atlikta mokslinių publikacijų apžvalga darbo tema.

Eksperimentinę dalį sudaro gavybinio gręžinio giluminio daugiapakopio išcentrinio siurblio ir injekcinio gręžinio filtro zonos tyrimai. Tyrimai yra atliekami naudojant programų kompleksą „Ansys", hidrodinamikos skaičiavimai yra atliekami programa „Fluent".

Darbo apimtis – 64 lapai be priedų, 24 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: Geoterminis gręžinys, giluminis siurblys, skysčių dinamika, matematinis modelis

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Transport Technological Equipment

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Transport Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Research of abyssal centrifugal pump hydrodynamic and thermodynamic processes**

Author **Vadim Nikitin**

Academic supervisor **Prof Dr Habil Marijonas Bogdevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The main focus of this work is the study of a geothermal plant operated by UAB "Geoterma" with the goal of analyzing the problems that arise during its operation and their possible causes. The plant's structure as well as its parameters are presented, as well as the review of related scientific publications.

Studies of geothermal multi-stage deep well centrifugal pump and the filter zone of fluid injection well were conducted. Studies were performed within the "Ansys" simulation environment, solution of hydrodynamic problems was performed using "Fluent" software.

Thesis consists of 64 pages, 24 bibliographical sources.

Keywords: Geothermal plant, deep well pump, CFD, fluid dynamics

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vadim Nikitin, 20084429

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerija, TTSfm-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

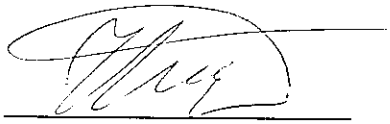
BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2014 m. birželio 3 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Geoterminio giluminio išcentrinio siurblio hidrodinaminių ir termodinaminių procesų tyrimas" patvirtintas 2013 m. sausio 31 d. dekano potvarkiu Nr. 67ti, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Vadim Nikitin

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

Paveikslų sąrašas 7
Lentelių sąrašas 9
Santrumpos ir terminai 10
Įvadas 11
1. Analitinė-metodinė dalis 12
1.1 Mokslinių darbų apžvalga 12
1.2 Tyrimo metodika 17
1.2 UAB „Geoterma“ eksploatuojamos jėgainės sandara 23
1.4 Darbo su „Ansys“ metodika 26
Pirmojo skyriaus išvados 30
2. Gavybinio gręžinio giluminio daugiapakopio išcentrinio siurblio tyrimas 31
2.1 Tiriamosios problemos aprašas. Geoterminio skysčio savybės 31
2.3 Giluminio daugiapakopio išcentrinio siurblio geometrinio modelio paruošimas 32
2.4 Giluminio daugiapakopio išcentrinio siurblio Geometrinio modelio diskretizavimas 39
2.5 Giluminio daugiapakopio išcentrinio siurblio tyrimo kraštinių sąlygų nustatymas 40
2.6 Giluminio daugiapakopio išcentrinio siurblio matematinio eksperimento rezultatų analizė 41
Antrojo skyriaus išvados 46
3. Injekcinio gręžinio filtro zonos tyrimas 47
3.1 Filtro zonos užsiteršimas. Tiriamosios problemos aprašas 48
3.3 Injekcinio gręžinio filtro geometrinio modelio paruošimas 50
3.4 Injekcinio gręžinio geometrinio modelio diskretizavimas 52
3.5 Injekcinio gręžinio tyrimo kraštinių sąlygų nustatymas 55
3.6 Injekcinio gręžinio Tyrimo rezultatų analizė 55
Trečiojo skyriaus išvados 60
Apibendrintos išvados 61
Literatūros sąrašas 62
Priedai 65

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Europos geoterminis žemėlapis. Tamsesnė spalva atitinka aukštesnę temperatūrą. 12
2 pav. Tipinio bendros paskirties išcentrinio siurblio trimatis modelis, suskaidytas į baigtinius elementus (aukštas detalizacijos lygis) (Shojaeefard *et al.* 2012).....13
3 pav. Slėgio kontūrai išcentrinio siurblio ertmėse (Stickland *et al.* 2000) 15
4 pav. Sraigtinio tipo išcentrinio siurblio pjūvis (Cheng *et al.* 2012) 15
5 pav. Skysčio judėjimo greičio vektorių aibė ties išmetimo kiaurymės pradžia ir tarp siurbliaračio menčių: a – esant 20 % nominalaus siurblio debito, b – esant nominaliam siurblio debitui, c – 160 % nominalaus siurblio debito (Barrio *et al.* 2010) 15
6 pav. Siurblio vienos pakopos geometrija: 1 – siurbliaračio darbinė ertmė, 2 – difuzoriaus tūris (a). Ertmių suskaidymas į baigtinius tūrius (b).....18
7 pav. UAB „Geoterma“ eksploatuojamos jėgainės principinė technologinė schema.....23
8 pav. Gavybinio gręžinio GDIS charakteristika 24
9 pav. Gavybinio gręžinio GDIS vienos pakopos charakteristika.....24
10 pav. Trijų pakopų giluminis daugiapakopis išcentinis siurblys (kairėje) ir vienos siurblio pakopos sandara (dešinėje): 1 – siurblio velenas, 2 – siurbliaratis, 3 – difuzorius, 4 – korpusas 25
11 pav. Daugiaparametrinio CFD eksperimento schema, vaizduojanti pagrindinius jo etapus: geometrinio modelio sudarymą, geometrinio modelio skaldymą į baigtinius elementus, sąlygų nustatymą ir sprendimą „Fluent“ moduliu 26
12 pav. Tyrimo atlikimo ir rezultatų apdorojimo schema dirbant su programų kompleksu „Ansys”28
13 pav. UAB „Geoterma“ eksploatuojamos jėgainės gavybinių gręžinių principinė technologinė schema.....31
14 pav. Dujų santykinio tūrio priklausomybės nuo slėgio grafikas 32
15 pav. Gamintojo pateikta siurbliaračio nuotrauka (viršuje) ir sudarytas geometrinis siurbliaračio modelis (apačioje) (pirmasis palyginimas).....34
16 pav. Gamintojo pateikta siurbliaračio nuotrauka (viršuje) ir sudarytas geometrinis siurbliaračio modelis (apačioje) (antrasis palyginimas).....35
17 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos geometrinis modelis, pavaizduotas XZ plokštumoje 36
18 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos geometrinis modelis, XY plokštumoje 36
19 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos geometrinis modelis.....37
20 pav. Geometrinio modelio reikšminių zonų nustatymas: a – rotacinės simetrijos paviršius, b – mentės, c – vidinė sienelė, d – išorinė sienelė.....38

21 pav. Gavybinio gręžinio siurblio pakopos skaldymo į baigtinius elementus nustatymai ir statistika 39
22 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos fragmento geometrinis modelis, suskaldytas į baigtinius elementus 40
23 pav. Pasirinktojo turbulencijos modelio parametrai programoje „Fluent“ 41
24 pav. Siurblio pakopos tyrimo sprendinių konvergavimo grafikai (nustatytas kampinis greitis – 2400 min^{-1}) 42
25 pav. GDIS matematinio eksperimento rezultatai. Slėgio kontūrai, Pa 43
26 pav. GDIS matematinio eksperimento rezultatai. Slėgio kontūrai menčių zonoje, Pa 44
27 pav. Srauto judėjimo vaizdavimas skysčio injekcijos metodu 44
28 pav. Injekcinio gręžinio filtro zona (nuotrauka 1055 m gylyje) 47
29 pav. UAB „Geoterma“ eksploatuojamos jėgainės injekcinių gręžinių principinė technologinė schema 48
30 pav. Daugiaparametrinio filtro tyrimo schema „Ansys Workbench“ 49
31 pav. Filtro vamzdžio zonos fragmento pjūvis (sukurtas geometrinis modelis) 49
32 pav. Injekcinio gręžinio filtro vamzdžio fragmentas (kairėje) ir vielos pjūvis (dešinėje) 50
33 pav. Filtro zonos užsikimšimo imitacijos schema 51
34 pav. Tyrimui naudojama skysčio geometrija: skystis judą per vielos sudarytą susiaurėjimą 52
35 pav. Injekcinio gręžinio filtro fragmento skaldymo į baigtinius elementus nustatymai ir statistika 53
36 pav. Injekcinio gręžinio filtro zonos sudaryto baigtinių elementų tinklo pjūvis per simetrijos plokštumą 54
37 pav. Injekcinio gręžinio filtro zonos sudaryto baigtinių elementų tinklo bendras vaizdas 54
38 pav. Greičio zonų kontūrai injekcinio gręžinio filtro išilginiame pjūvyje (m/s) 56
39 pav. Slėgio zonų kontūrai injekcinio gręžinio filtro išilginiame pjūvyje (Pa) 56
40 pav. Teorinės per filtrą ištekančio skysčio debito reikšmės esant skirtingoms slėgio skirtumo vertėms neimituojant filtro užsiteršimo 57
41 pav. Filtro užsikimšimo tyrimo rezultatai 58

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Gręžinio vamzdžio filtro zonų geometriniai parametrai.....51
2 lentelė. Debitų priklausomybės nuo slėgių skirtumo 57
3 lentelė. Patikslinto filtro užsikimšimo tyrimo rezultatai (debitai nustatyti vienai filtro skylutei) ..58
4 lentelė. Patikslinto filtro užsikimšimo tyrimo rezultatai (debitai nustatyti visam injekciniam vamzdynui).....59

SANTRUMPOS IR TERMINAI

CFD (angl. *Computational Fluid Dynamics*) – skaičiuojamoji skysčių dinamika;

CFL sąlyga (angl. *Courant–Friedrichs–Lewy condition*) – būtinoji stabilumo sąlyga sprendžiant diferencialines lygtis baigtinių skirtumų metodu;

GDIS – giluminis daugiapakopis išcentrinis siurblys;

Injekcinis gręžinys – geoterminės jėgainės gręžinys, skirtas jėgainės veikimo metu naudotam vandeniui grąžinti į gelmes;

Injekcinis siurblys – siurblys, naudojamas skysčio slėgiui sudaryti jį grąžinant į gelmes.

ĮVADAS

Geoterminė energetika yra vienas seniausių bei dabartiniu metu perspektyvių atsinaujinančių energijos šaltinių. Priklausomai nuo panaudojimo galimybių, geoterminių jėgainių išgaunama šilumos energija lokaliu mastu gali sudaryti didžiąją dalį energetikos rinkos. Geoterminės energetikos potencialas tam tikrame regione tiesiogiai priklauso nuo geologinio reljefo, todėl šio energijos šaltinio panaudojimo plėtra nėra visuomet ekonomiškai racionali, o dažnai ir galima (Europos geoterminio potencialo žemėlapis yra pavaizduotas 1 pav.).

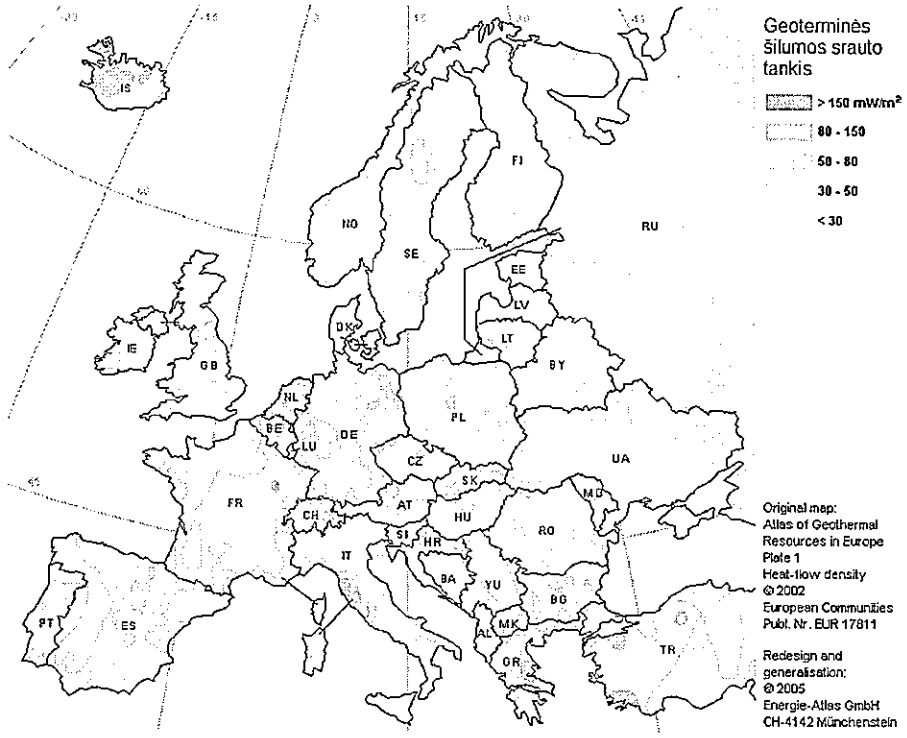
Geoterminės energijos panaudojimo problema yra aktuali ir Lietuvai. Vakarų Lietuva pasižymi nebūdingu likusiai Lietuvos teritorijai mažos entalpijos geoterminės energetikos potencialą turinčia sritimi, siekiančia Jurbarką, Tauragę, Kelmę, Telšius. Šiame regione galima statyti jėgaines, kurios gamintų ekologiškai švarią energiją (Geoterma 2012). Jau daugelį metų šiame regione sėkmingai veikia UAB „Geoterma“, kuriai priklausančioje jėgainėje dalis pagaminamos energijos (13,6 MW iš 35 MW bendro jėgainės galingumo) yra būtent geoterminės prigimties.

Baigiamojo darbo apimtį sudaro trys dalys. Pirmojoje dalyje yra aprašomos UAB „Geoterma“ eksploatuojamos jėgainės konstrukcija, su jos eksploatacija susijusios problemos, jų priežastys ir pagrindiniai jų tyrimo metodai. Antrojoje dalyje yra pateikiamas eksploatuojamojo gavybinio gręžinio iščentrinio siurblio pakopos modeliavimo proceso aprašymas, atlikto tyrimo rezultatai bei jų aptarimas. Trečiojoje dalyje yra aprašoma injekcinio gręžinio sandara, jo filtro zonos modelio kūrimo procesas ir tyrimo metu gauti rezultatai. Darbo pabaigoje yra pateikiami apibendrinti tyrimų rezultatai ir išvados.

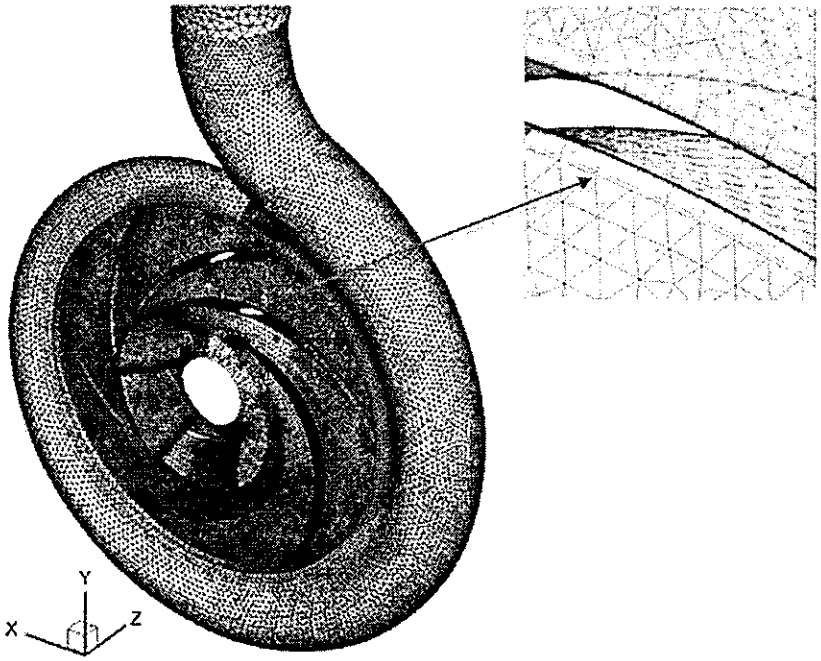
1. ANALITINĖ-METODINĖ DALIS

1.1 MOKSLINIŲ DARBŲ APŽVALGA

Daugiapakopiai giluminiai siurbliai yra plačiai naudojami švariam ar nedaug užterštam vandeniui transportuoti ar cirkuliacijai užtikrinti. Jų konstrukcija pasižymi mažu skerspjūviu, tai leidžia efektyviai juos taikyti gėlam vandeniui tiekti, irigacijai, municipaliniams vandens šaltiniams, pramonei ir geoterminei energijai išgauti. Geoterminė energija turi daug privalumų prieš kitus energijos išteklius: ypač didelis prieinamumas kai kuriose Europos valstybėse, tai atsinaujinantys energijos ištekliai, garantuojantys stabilią ir švarią energijos gamybą bei didelį investicijų atsiperkamumą, pasižymi minimaliais ploto ir gėlo vandens poreikiais efektyviam darbui užtikrinti (Szucs *et al.* 2010). Geoterminė energetika yra viena prioritetinių sričių Europoje, kadangi atitinka bendrąją darniojo vystymosi strategiją, CO_2 emisijų sumažinimo programas ir yra perspektyvi atsižvelgiant į augantį energijos poreikį (Jones 2008). Tokiu būdu gauta energija gali būti panaudota tiesiogiai arba elektros energijai gaminti. Geoterminės energijos dalis šiose srityse pasižymi stabiliu augimu (Rybach 2006). Geoterminėje energetikoje taikomi metodai nuolat tobulėja. Optimalūs šilumos gavimo metodai gali skirtis priklausomai nuo gręžinio specifikos, efektyvumas gali būti daug padidintas tinkamai pritaikius racionalų reinjekcijos būdą (Kaya 2010).



1 pav. Europos geoterminis žemėlapis. Tamsesnė spalva atitinka aukštesnę temperatūrą.



2 pav. Tipinio bendros paskirties išcentrinio siurblio trimatis modelis, suskaidytas į baigtinius elementus (aukštas detalizacijos lygis) (Shojaeefard *et al.* 2012)

Nagrinėjant konkrečiai apie išcentrinį siurblį, nemažai tyrimų atlikta įvertinant konvencinių bei specialią paskirtį turinčių išcentrinių siurblių efektyvumą bei su jų darbu susijusius skysčio parametrus. Atliekant dideliais greičiais veikiančio išcentrinio siurblio veikimo analizę taikant skaičiuojamosios skysčio dinamikos metodą naudojant trimatį siurbliaračio modelį kaip eksperimento pagrindą, gaunamos charakteristikos, pakankamai tiksliai atitinkančios realiąsias (teorinės charakteristikos atitinka šiek tiek efektyvesnį siurblio darbą). Atsižvelgiant į darbo greitį bei bendrąsias darbo sąlygas būtina įvertinti šalutinius procesus, tarp kurių pagrindinis yra kavitacija (Jin *et al.* 2012).

Atliekami siurblio našumo charakteristikos priklausomybės nuo skysčio klampos tyrimai. Palyginus gautas charakteristikas nustatyta, kad jų metu sukurti išcentrinių siurblių modeliai pakankamai tiksliai atitinka realiuosius objektus. Nustatyta, kad nuo skysčio klampos ne tik priklauso darbo efektyvumas (dėl didėjančio trinties jis mažėja esant didesnei klampai), bet ir kinta skysčio judėjimo pobūdis siurbliaračio ertmių ruožuose (Li 2000).

Taip pat nagrinėjamas siurblio išvystomas slėgis varijuojant įvairius siurblio parametrus. Atliekant teorinius tyrimus, nagrinėjant skysčio slėgį, išvystomą 5, 6, 7 mentes turinčio siurbliaračio, didžiausias yra gautas turint 7 menčių sandarą (Jafarzadeh *et al.* 2011). Pažymėtina, kad dauguma

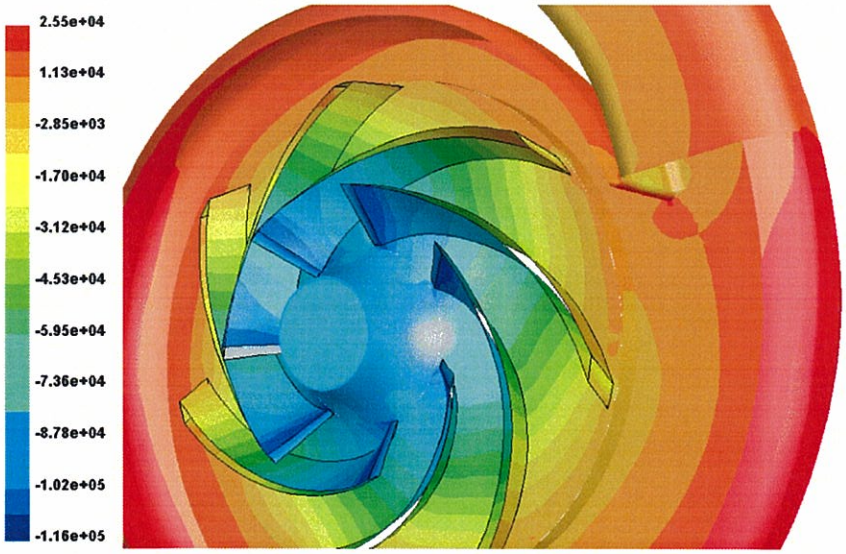
tyrimų yra atlikta naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos kompleksus, jais sprendžiant Navjė-Stokso lygtį sistemai su kintamo tinklo struktūra. (Baoling *et al.* 2006).

Atlikti tyrimai, skirti nustatyti sąveikai tarp siurbliaračio menčių ir skysčio išstūmimo kiaurymės pradžios (Stickland *et al.* 2000). Išcentriniame siurblyje vykstantiems reiškiniams analizuoti, šiuo atveju, yra naudojamas trimačio skysčio tekėjimo siurblyje modelis. Siekiant tiksliau įvertini siurbliaračio menčių bei skysčio išstūmimo kiaurymės geometrijos sąveikos sukeltus slėgio svyravimus, modelis buvo sudarytas naudojant slystančio baigtinių elementų tinklo metodą. Teorinis modelis buvo sudarytas naudojant CFD programinę įrangą, baigtinių elementų metodu. Buvo nagrinėjamas slėgis siurblyje esant skirtingiems skysčio tekėjimo greičiams. Modelio tikslumui nustatyti, modeliavimo metu gauta pagrindinė siurblio charakteristika (slėgio priklausomybė nuo debito), siurblio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo debito, buvo palyginta esant vienodoms sąlygoms su gautais eksperimentinių matavimų metu. Pasinaudojus teoriniu modeliu bei eksperimentų metu gautais duomenimis, buvo įvertini slėgio svyravimai ties skysčio išstumimo kiaurymės pradžia (rezultatai pateikti 3 pav.)

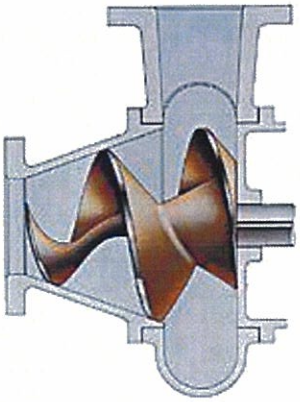
Nemažai tyrimų yra atlikta siekiant optimizuoti siurbliaračio menčių geometriją siekiant efektyvesnio siurblio darbo. Tokiais atvejais tipiškai yra nustatomi tam tikroms darbo sąlygoms pritaikyto siurblio siurbliaračio menčių kampai bei ertmių susiaurėjimo pobūdis. Atliktas tyrimas (Shojaeefard *et al.* 2012), kuomet buvo analizuojamas sumažėjusio išcentrinio siurblio efektyvumo, pumpuojant klampius skysčius, reiškinys. Naudojant sudarytą trimatį skysčio tekėjimo modelį, nagrinrėjamas siurblio darbas, skirtingais atvejais, kečiant siurblio išmetimo kiaurymės kampą bei tarpą tarp darbo rato ir korpuso. Modelio diskretizavimas į baigtinius elementus yra pavaizduotas 2 pav. Skysčio turbulencijai įvertinti buvo naudojamas k-ω modelis.

Eksperimentiniai tyrimai taip pat buvo atlikti išcentrinį siurblį naudojant neniutoniniams skysčiams pumpuoti (Zhang *et al.* 2008). Nustatyta netiesinė charakteristika, pasižyminti tam tikrame greičių diapazone didesniu, bet kitame – mažesniu, efektyvumu palyginti su to paties siurblio darbu pumpuojant niutoninį skystį (vandenį). Išsamesni tyrimai nagrinėja atipinius išcentrinio siurblio eksploatacijos metu atsirandančius procesus, tokius kaip skysčio slydimas, kai kampas, kuriuo skystis išeina iš siurbliaračio, nesutampa su siurbliaračio menčių sudaromu kampu. Ištirti eksperimentiniai būdai, leidžiantys įvertinti šį skysčio fenomeną (Memardezfouli *et al.* 2009).

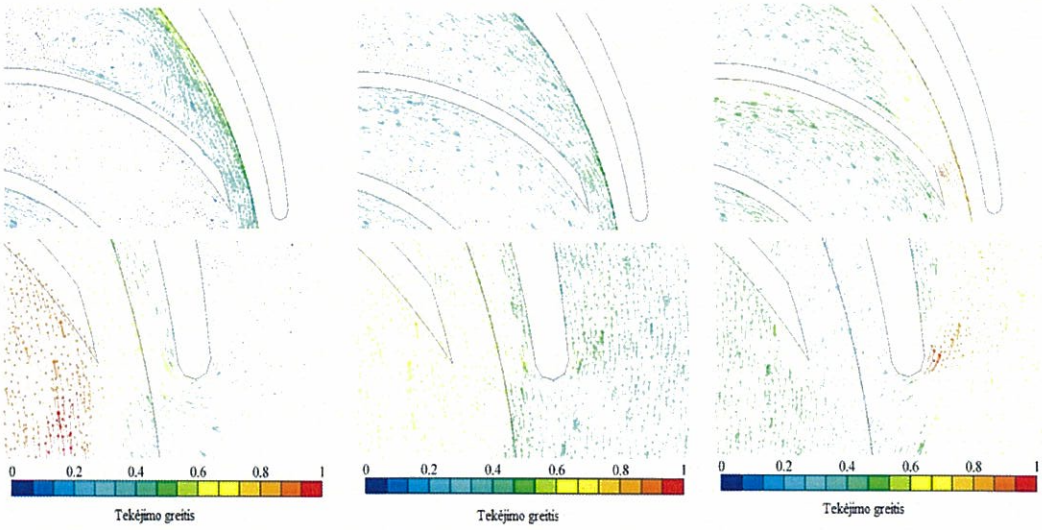
Siekiant išsamiau ištirti skysčio dinamiką siurbliaračio ertmėse gali būti pritaikytas akustinis modelis. Naudojant akustinį modelį gali būti įvertinti žemo dažnio slėgio svyravimai, susiję su menčių sąveika su skysčiu. Nustatyta, kad akustinis metodas gali būti sėkmingai taikomas tiriant žemo dažnio garso sukeliamus hidrodinaminių parametrų svyravimus (Parrondo 2011).



3 pav. Slėgio kontūrai išcentrinio siurblio ertmėse (Stickland *et al.* 2000)



4 pav. Sraigtinio tipo išcentrinio siurblio pjūvis (Cheng *et al.* 2012)



a) b) c)

5 pav. Skysčio judėjimo greičio vektorių aibė ties išmetimo kiaurymės pradžia ir tarp siurbliaračio menčių: a – esant 20 % nominalaus siurblio debito, b – esant nominaliam siurblio debitui, c – 160 % nominalaus siurblio debito (Barrio *et al.* 2010)

Palyginti mažiau yra atlikta tyrimų, skirtų mažiau paplitusioms išcentrinio siurblio konstrukcijos variacijoms. Viena jų yra sraigtinio tipo siurbliaratį turintis išcentrinis siurblys (pavaizduotas 4 pav.). Yra pateikiamos lygčių sistemos pagrindinėms jo charakteristikoms nustatyti (Cheng *et al.* 2012).

Altiktas tyrimas, kuomet yra nagrinėjamas nenusistovėjęs skysčio tekėjimas, ties išėjimu iš darbo zonos, išcentriniame siurblyje (Barrio *et al.* 2010). Tyrimų metu buvo nagrinėjami eksperimentiniai rezultatai, gauti analizuojant laboratorininį bandomąjį siurblį. Teorinis modelis buvo sukurtas naudojant skaičiuojamosios dinamikos programinę įrangą, sukurtas geometrinis modelis diskretizuotas į baigtinius elimentus. Teorinio modelio dalinimo tiklelio bei laiko intervalų dydžiui nustatyti buvo atlikta rezultatų tikslumo analizė, smulkesnis tinklelis, šiuo atveju, buvo pasirinktas ties siurblio išmetimo kiauryme. Įvertinus teorinio modelio tikslumą buvo nagrinėjama skysčio tėkmės pulsacija atsirandanti dėl darbo rato ir išmetimo kiaurymės geometrijos sąveikos. Šis reiškinys buvo analizuomamas kaip tekėjimo greičio funkcija ir nagrinėjamas esant įvairiems tekėjimo greičiams, tiek didesniems, tiek mažesniems už nominalųjį. Tyrimo rezultatų vizualizacija yra pateikta 5 pav.

Didelė dalis tyrimų yra skirta išcentrinių siurblių gedimų diagnostikos metodams tirti. Siūloma atliekant gedimų diagnostiką taikyti „minkštųjų skaičiavimų" metodą, norint padidinti diagnostikos efektyvumą palyginti su tiesioginiu stebėjimu (Sakthivel *et al.* 2012). Taip pat yra išnagrinėtas metodų, skirtų siurblio efektyvumui padidinti bei eksploatacinėms išlaidoms sumažinti, kompleksas (pradedant konstrukcijos optimizavimu ir baigiant prevencinių operacijų eksploatuojant vykdymu) (Nemdili *et al.* 1999). Išcentrinių siurblių gedimai taip pat gali būti diagnozuojami taikant virpesių analizę. Tiriant virpesius galima nustatyti monoblokinio siurblio atskirų komponentų, komponentų grupės gedimus, žalingus procesus (kavitaciją) (Sahthivel *et al.* 2010; Yunlong *et al.* 2012).

1.2 TYRIMO METODIKA

Skaičiuojamosios skysčio dinamikos (CFD) programų kompleksų siūlomos galimybės daro jų taikymą ypač efektyvų įvairiausiose tyrimų srityse. Daugiametė tyrėjų patirtis rodo, kad CFD programų kompleksai gali būti sėkmingai taikomi ir nedidelės problemos analizei, ir stambioms sistemoms, kuriose tyrimo objektą sudaro didelė veiksnių aibė, tirti. Pažymėtina, kad norint įvertinti daugelį veiksnių bei sukurti iš tikrųjų lankstų ir patikimą modelį, aktualu naudoti gerą suderinamumą su kitomis programomis turinčius programų kompleksus.

Jų naudojimas, palyginti su atskiro matematinio modelio kūrimo, turi nemažai privalumų. Naudojant jau sukurtus programų kompleksus modelio kūrimas yra žymiai paprastesnis ir nuoseklesnis. Tyrėjas neturi gilintis į skaičiavimų algoritmus, programos kodo struktūros organizaciją bei kitus su matematinio modelio kūrimu susijusius dalykus. Šiuo atveju tyrėjo laikas ir ištekliai yra skirti fizinėms sąlygoms formuluoti, teorinio eksperimento situacijai formuluoti bei gautų rezultatų analizei.

Kitas svarbus veiksnys yra tai, kad naudojant patikimą, per dešimtis metų atliekant didelį skaičių eksperimentų išbandytą programinę įrangą labai sumažėja klaidos tikimybė dėl programinės matematinio modelio dalies kūrimo etape padarytų klaidų. Pavojingiausia, kad tokios klaidos gali būti ne tik lengvai pastebimos (kai metodo klaidingumas yra akivaizdus, įvertinant eksperimento rezultatus), bet ir tokios, kurias nustatyti yra pakankamai sudėtinga (pavyzdžiui kai dalis rezultatų atitinka fizinio eksperimento rezultatus, o kita dalis negali būti patikrinta).

Bet kuriuo atveju, pradedant tyrimais mokslo institucijose ir baigiant produkcijos, skirtos stambiaserijinei gamybai, projektavimu, simuliacijai skirtų programinės įrangos kompleksų naudojimas yra efektyvus ir patikimas.

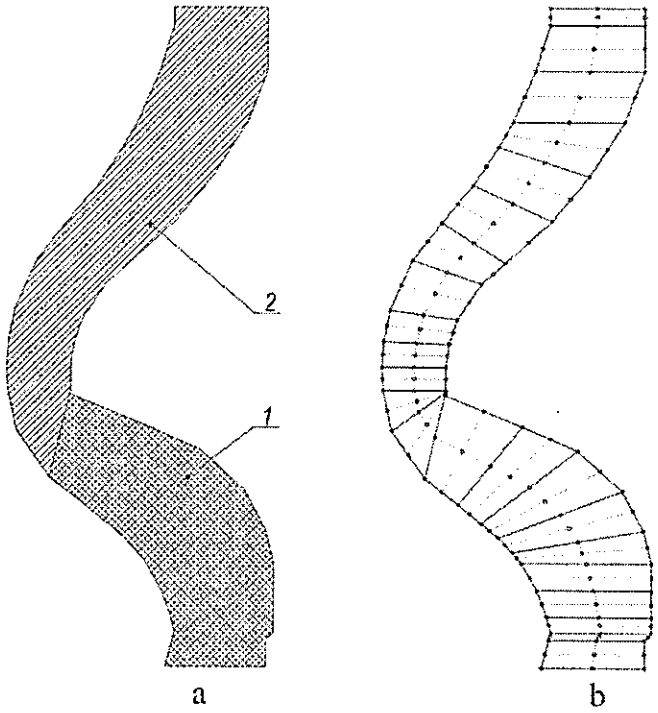
Atlikus pradinę analizę galima teigti, kad programų kompleksas „Ansys“ tinka sudėtingiems teoriniams eksperimentams nagrinėjamoje srityje atlikti. Eksperimento rezultatų tikslumas priklauso nuo pradinių duomenų (tarp jų ir trimačio siurblio komponentų modelio) sudarymo tikslumo bei teisingų eksperimento vykdymo sąlygų nustatymo. Sukurtas teorinis siurblio modelis gali būti panaudotas tolesniems eksperimentmas ir vertinamas kaip didesnės sistemos komponentas.

Kaip jau buvo minėta, daugiausiai panašiems į nagrinėjamą temą tyrimams atlikti yra naudojami jau sukurti programų kompleksai. Tačiau jeigu užduotis nepasižymi ypatingu sudėtingumu, arba ji yra labai specifiška ir dėl to negali būti tiksliai aprašyta naudojant jau sukurtus modulius, gali būti kuriama programa, kurioje atskirai yra aprašomi visi veiksniai, kurie yra susiję su atliekamu tyrimu.

Šio tyrimo atveju, jeigu būtų rašoma programa, pagrindiniams procesams aprašyti būtų naudojamos toliau pateikiamos diferencialinės lygtys.

1.2.1 Sutelktųjų parametrų matematinio modelio kūrimo principai

Tyrimams gali būti naudojamas konkrečiam atvejui atskirai sukurtas sutelktųjų parametrų matematinis modelis. Šiuo atveju hidrodinaminės lygtys yra sudaromos vamzdyno zonas suskirsčius į baigtinius tūrius, kaip yra parodyta 6 pav. Lygtys yra sudaromos kiekvienam makrosistemos elementui.



6 pav. Siurblio vienos pakopos geometrija: 1 – siurbliaračio darbinė ertmė, 2 – difuzoriaus tūris (a). Ertmių suskaidymas į baigtinius tūrius (b)

Elektros variklio matematinis modelis

Pateikiamas vienas iš būdų aprašyti elektros variklio veikimą. Elektros variklio sukimo momento kitimas aprašomas sekančia diferencialine lygtimi:

$$\dot{M}_v = -d_v M_v + c_v \cdot (\omega_0 - \dot{\varphi}_v), \tag{1.1}$$

čia:

$d_v = S_k \cdot \omega_t$,

S_k – elektros variklio slydimas,

$\omega_t = 2\pi f$,

f – elektros tinklo dažnis, Hz,

M_v – variklio momentinis išvystomas sukimo momentas, Nm,

$c_v = 2 \cdot M_k \cdot \omega_t / \omega_0$,

M_k – nominalusis variklio išvystomas sukimo momentas, Nm,

$\omega_0 = \omega_t / p$, s^{-1},

p – el. variklio polių porų skaičius.

Siurblio mechaninės dalies modelis

Siurblio mechaninę dalį sudaro elektros variklis, vertikalus rotorius, ant kurio apatinėje dalyje nustatytu atstumu įtvirtinti siurbliaračiai. Judėjimo lygtims sudaryti mechaninė sistema išskaidoma į pakopas, sudarytas iš siurbliaračio ir virš jo esančios veleno atkarpos. Velenas ir jo atskiros atkarpos aprašomos naudojant standumo ir slopinimo elementų poras. Pasipriešinimo jėgos įvertinamos sukimo momentais siurbliaračių įtvirtinimo taškuose.

Siekiant kuriamo modelio universalumo, naudojamas algoritmas, kuris leidžia sugeneruoti mechanines lygtis bet kuriam pakopų skaičiui. Lygtys gaunamos naudojant Lagranžo antrojo tipo lygtį.

Elektros variklio veleno judėjimo lygtis:

$$\begin{aligned} I_{rot}\ddot{\varphi}_v - k_1(\varphi_1 - \varphi_v) - c_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_v) &= M_{\text{var}}, \\ I_{rot}\ddot{\varphi}_v - k_1(\varphi_1 - \varphi_v) - c_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_v) &= M_{\text{var}}, \end{aligned} \tag{1.2}$$

čia:

$\ddot{\varphi}_v$ – variklio veleno kampinis pagreitis, $1/s^2$,

M_{var} – elektros variklio sukuriamas sukimo momentas, Nm,

$\varphi_v, \varphi_1, \dot{\varphi}_v, \dot{\varphi}_1$ – atitinkamai elektros variklio veleno ir pirmosios pakopos siurbliaračio kampiniai poslinkiai ir greičiai, rad, s^{-1},

I_{rot} – elektros variklio veleno inercijos momentas, $kg \cdot m^2$.

Siurblio i-tojo siurbliaračio judėjimo lygtis:

$$\begin{aligned} &I_i\ddot{\varphi}_i + k_i(\varphi_i - \varphi_{i-1}) + c_i(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_{i-1}) - \\ &-k_{i+1}(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - c_{i+1}(\dot{\varphi}_{i+1} - \dot{\varphi}_i) = M_{pas.i}, \end{aligned} \tag{1.3}$$

čia:

$\ddot{\varphi}_i$ – i-tojo siurbliaračio kampinis pagreitis, $1/s^2$,

$M_{pas.i}$ – pasipriešinimo jėgų sukimo momentas, Nm,

I_i – pakopai priskirtų elementų inercijos momentas, kg·m^2.

Pateikta lygčių sistema tinka bet kokį pakopų skaičių turinčio siurblio mechaninei daliai aprašyti.

Skysčio slėgio, debito ir temperatūros kitimą aprašančios diferencialinės lygtys.

Slėgio kitimas i-ojoje ertmėje aprašomas lygtimi:

$$\dot{p}_i = \frac{K}{V_i}\left(Q_{in} - Q_{out}\right) = \frac{K}{V_i}\sum_{j=1}^{n_t} Q_{ij}, \tag{1.4}$$

čia:

K – skysčio tūrinis tamprumo modulis, Pa,

V_i – nagrinėjamo baigtinio tūrio vertė, m^3,

Q_{in}, Q_{out} – atitinkamai į tūrį įtekančio ir iš jo ištekančio skysčio debitas, m^3/s,

Q_{ij} – debito reikšmė, kurios vertė teigiama skysčiui įtekant į tūrį ir neigiama ištekant, m^3/s.

Debito kitimas tarp nagrinėjamų ertmių užrašomas lygtimi:

$$\dot{Q}_{ij} = \frac{L_{ij}}{S_{ij}}\left(\underbrace{p_i - p_j}_{\substack{\text{tėkmė dėl}\\ \text{slėgių}\\ \text{skirtumo}}} \underbrace{-\frac{1}{2}\rho\xi_{ij}Q_{ij}^2 \operatorname{sign} Q_{ij}}_{\substack{\text{tėkmės sumažėjimas dėl}\\ \text{slėgio nuostolių}}} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho\Omega_k^2 R_{ij}^2 \cos\alpha_{ij}}_{\substack{\text{tėkmė dėl išcentrinės jėgos}}} \right), \tag{1.5}$$

čia:

L_{ij} – atstumas tarp koncentruotų tūrių, m,

S_{ij} – skerspjūvio tarp baigtinių tūrių plotas, m^2,

p_i, p_j – slėgiai atitinkamuose tūriuose, Pa,

ρ – skysčio tankis, kg/m^3,

ξ_{ij} – pasipriešinimo koeficientas,

Ω_k – pakopos, kuriai priklauso nagrinėjama zona, s^{-1},

R_{ij} – atstumas tarp nagrinėjamos zonos centro ir siurbliaračio sukimosi centro, m.

Norint įvertinti sistemos šilumos mainus, į kintamųjų sąrašą įvedama temperatūra, kurios kitimas i-ojoje ertmėje aprašomas lygtimi:

$$\dot{T}_i = \frac{1}{V_i}\left(\underbrace{\sum_{k=1}^{N_{in}} Q_{in,ik} T_j - \sum_{k=1}^{N_{out}} Q_{out,ik} T_i}_{\text{šilumos mainai dėl skysčio įtekėjimo ir ištekėjimo}} - \underbrace{\frac{S_{Vi}}{\rho V_i c_p} h_i (T_i - T_\infty)}_{\text{šilumos nuostoliai per siurblio sienelę}} \right) = \tag{1.6}$$

$$= \frac{1}{V_i}\left(\sum_{k=1}^{n_l} Q_{ik} T_{\substack{i, \text{jei } Q_{ik}<0 \\ k, \text{jei } Q_{ik}<0}} - \frac{S_{Vi}}{\rho V_i c_p} h_i (T_i - T_\infty) \right),$$

čia:

T – indeksą atitinkančiame tūryje esančio skysčio temperatūra, K,

S_{Vi} – nagrinėjamo tūrio sienelių paviršiaus plotas, m^2,

c_p – specifinė izobarinė šiluma, J/(kg·K),

h_i – šilumos atidavimo koeficientas $\left(h = f\left(T_i - T_\infty\right)\right)$.

1.2.1 „Ansys Fluent“ naudojamos diferencialinės lygtys

Tuo atveju, kai naudojamas programų kompleksas „Ansys“, diferencialinės lygtys yra sudaromos automatiškai programinės įrangos.

Toliau yra pateikiamos pagrindinės diferencialinės lygtys, naudojamos nagrinėjamam eksperimentui atlikti. Kadangi atliekant kompleksinį eksperimentą lygtys gali įgyti labai sudėtingą išraišką, pateikiamos tik bazinės lygčių formos.

Visiems skysčiams, naudojant „Ansys Fluent“, yra sudaromos masės (vientisumo) ir impulso tvermės dėsnio lygtys.

Masės tvermės dėsnis (tekmės vientisumo lygtis) yra užrašoma:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m, \tag{1.7}$$

Dvimačiu atveju tėkmės vientisumo lygtis įgyja pavidalą:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)+\frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r)+\frac{\rho v_r}{r}=S_m, \tag{1.8}$$

Impulso tvermės dėsnis bendruoju pavidalu yra užrašomas lygtimi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v})+\nabla\cdot(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla\cdot(\bar{\tau})+\rho\vec{g}+\vec{F}, \tag{1.9}$$

čia:

p – hidrostatinis slėgis,

$\bar{\tau}$ – įtempių tenzorius,

$\rho\vec{g}$ – gravitacinė jėga,

$\vec{F}$ – išorinės jėgos.

Termodinaminiams procesams aprašyti yra naudojama energijos lygtis, turinti tokią bazinę formą:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla\cdot(\vec{v}(\rho E+p))=\nabla\cdot\left(k_{eff}\nabla T-\sum_j h_j\vec{J}_j+\left(\bar{\tau}_{eff}\cdot\vec{v}\right)\right)+S_h, \tag{1.10}$$

čia:

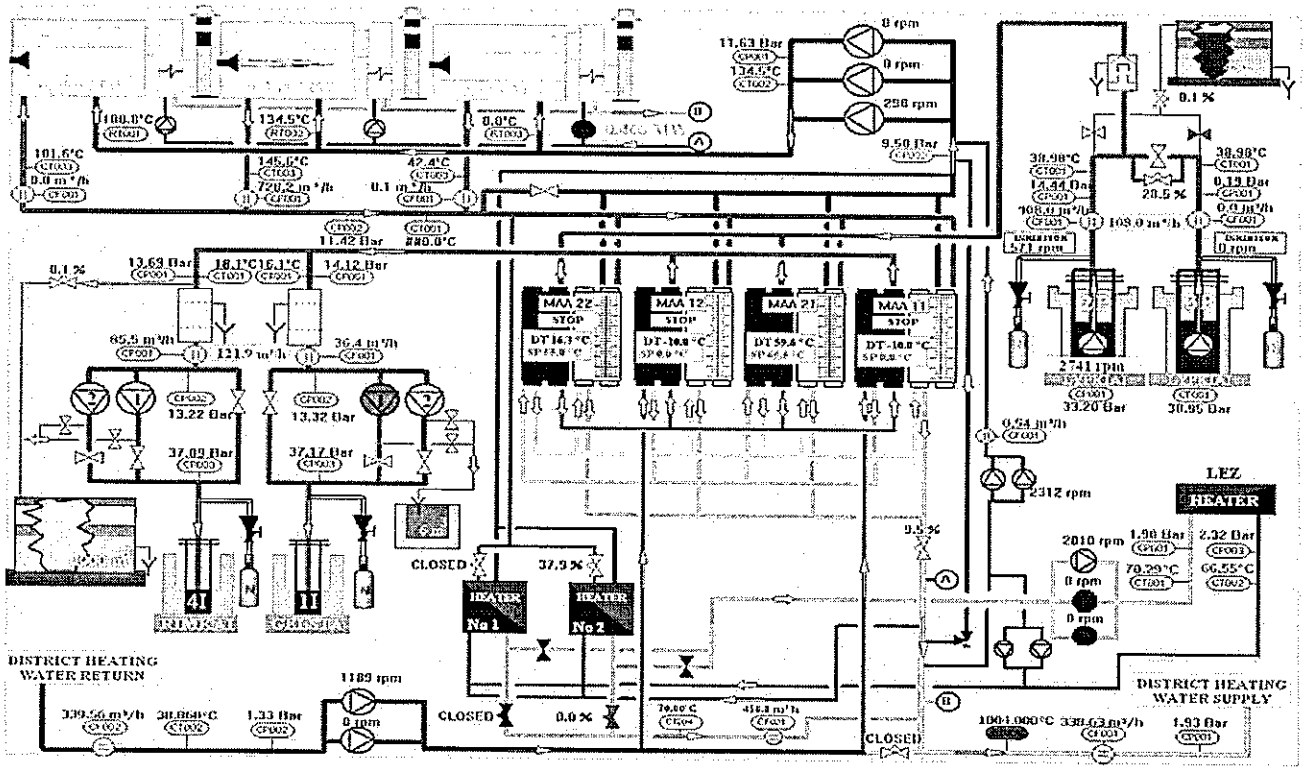
k_{eff} – efektyvusis šilumos laidumas,

$\vec{J}_j$ – difuzinis šilumos srautas.

1.2 UAB „GEOTERMA“ EKSPLOATUOJAMOS JĖGAINĖS SANDARA

UAB „Geoterma“ jėgainės veikimas remiasi uždaro cirkuliavimo principu: dviem gavybiniais gręžiniais (1 135 m gylio) geoterminis vanduo giluminiais siurbliais pakeliamas į žemės paviršių. Vanduo, pratekantis pro filtrus ir absorbcinius šilumos siurblius, injekciniais gręžiniais vėl g rąžinamas į gelmes (Geoterma 2012). Dabartiniu metu jėgainė neveikia maksimaliu gamybiniu pajėgumu. Pagrindinė problema su kuria susiduria UAB „Geoterma“ transportuojant iš žemės gelmių vandenį ir grąžinant jį atgal į gelmes yra didelis ištirpusių dujų kiekis, kurios išsiskiria slėgiui sumažėjus iki 2,0 MPa (apie 180 l/m^3 esant 2,0 MPa slėgiui). Šis veiksnys daro neigiamą įtaką vamzdyne vykstantiems hidrodinaminiams ir termodinaminiams procesams, žymiai sumažėja vamzdyno našumas (apie 50 % projektinio našumo).

Toliau esančiuose paveiksluose yra pateikiama UAB „Geoterma“ eksploatuojamos jėgainės principinės schemos. Jos yra naudojamos kaip pagrindas tiriamiesiems darbams atlikti.

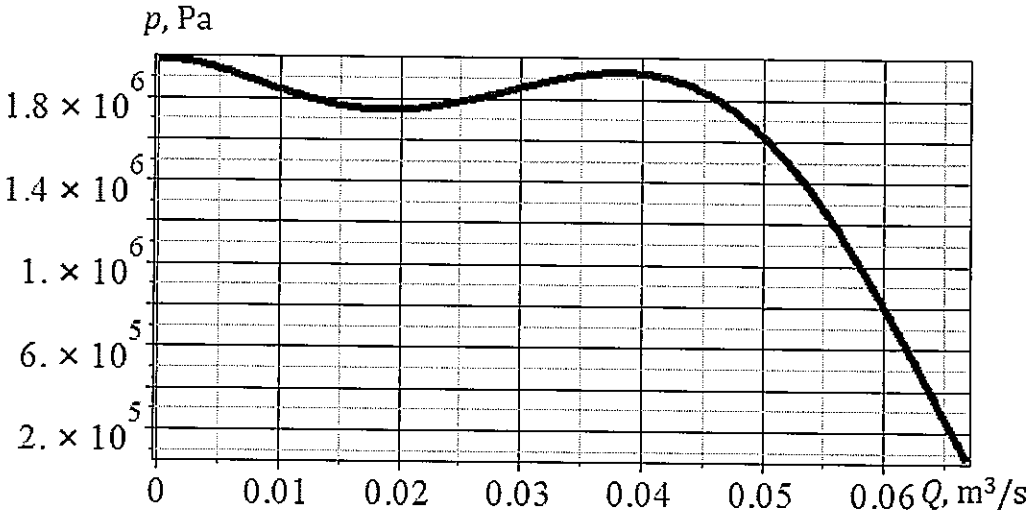


7 pav. UAB „Geoterma“ eksploatuojamos jėgainės principinė technologinė schema

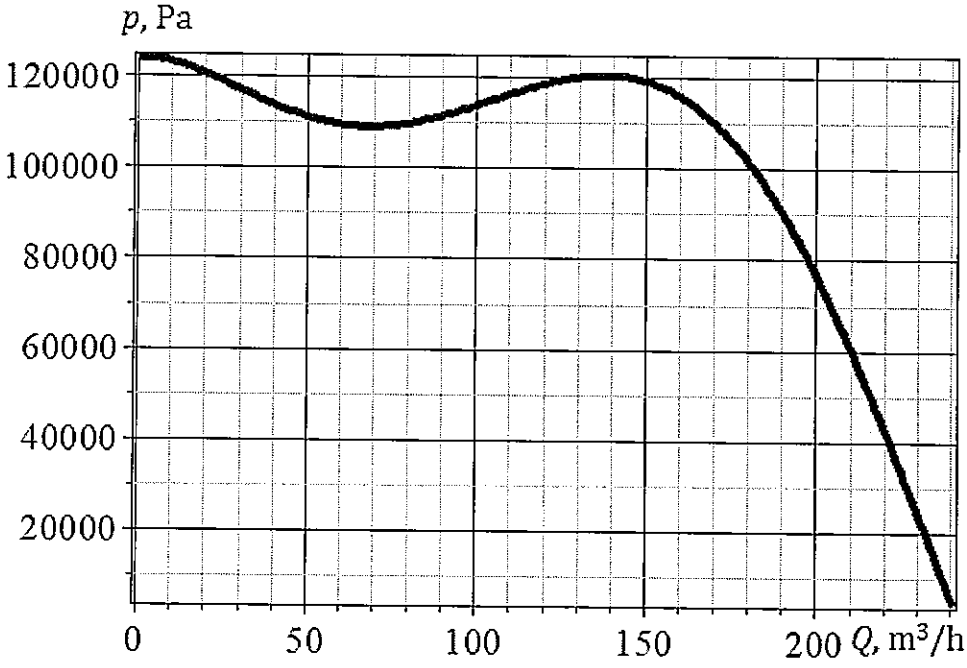
7 pav. pateikta viso geoterminės jėgainės komplekso principinė technologinė schema. Kairėje yra pateikti injekciniai gręžiniai („Rimkai“ ir „Gelsta“), paveikslo dešiniojoje pusėje – gavybiniai gręžiniai.

Daugiapakopio išcentrinio siurblio vidinę dalį sudaro elektros variklis, talpinamas konstrukcijos viršuje dažniausiai virš skysčio lygio, velenas ir siurbliaračiai. Virš siurbliaračio įstatomas difuzorius.

Visas siurblio rotoriaus junginys įkeliamas į bendrą korpusą. 8 ir 9 pav. yra pateikiamos eksploatuojamojo giluminio daugiapakopio išcentrinio siurblio charakteristikos (vienos pakopos ir 16 pakopų).



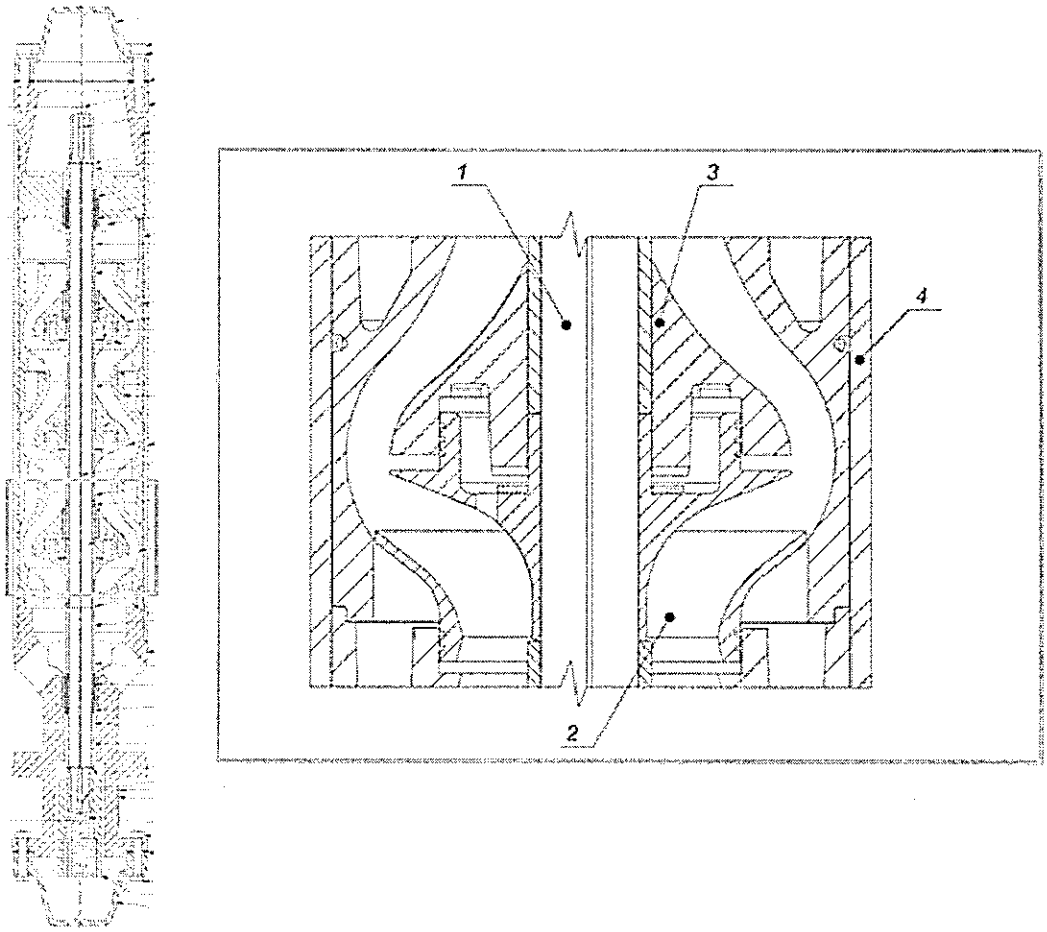
8 pav. Gavybinio gręžinio GDIS charakteristika



9 pav. Gavybinio gręžinio GDIS vienos pakopos charakteristika

Išcentrinis siurblys generuoja slėgį dėl atsirandančių išcentrinių jėgų siurbliaratyje. Patekęs į siurbliaračio darbinę ertmę, dėl jį veikiančių išcentrinių jėgų skystis slegiamas link siurblio išorinės sienelės. Dėl to arčiau sukimosi centro esančioje zonoje susidaro slėgio sumažėjimas, dėl kurio skystis iš žemiau esančios pakopos traukiamas į siurbliaračio darbinę ertmę, o virš siurbliaračio, esančiame bendrame tūryje, skystis juda į viršų. Kadangi vienas iš pagrindinių tokią konstrukciją turinčio siurblio ypatumų yra mažas skersmuo, reikiamam slėgiui gauti ties išsiurbimo anga, būtina

naudoti kelias pakopas. 10 pav. yra pavaizduotas trijų pakopų giluminis daugiapakopis išcentrinis siurblys.

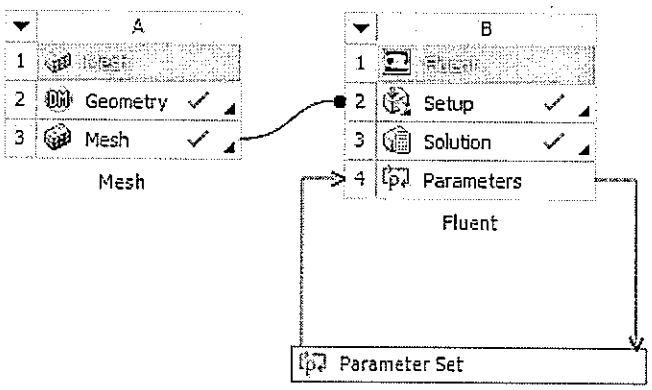


10 pav. Trijų pakopų giluminis daugiapakopis išcentinis siurblys (kairėje) ir vienos siurblio pakopos sandara (dešinėje): 1 – siurblio velenas, 2 – siurbliaratis, 3 – difuzorius, 4 – korpusas

Norint sudaryti tikslų vamzdyno matematinį modelį būtina žinoti tikslius kiekvieno iš jo elementų geometrinius parametrus.

1.4 DARBO SU „ANSYS“ METODIKA

Darbas su „Ansys“ simuliaciniu kompleksu yra nuosekliai atliekamas kelias atskirtais tarpusavyje loginiais ryšiais susietais etapais. Daugiaparametrinio skaičiuojamosios skysčių dinamikos eksperimento schema „Ansys“ simuliacijai skirto programų komplekso aplinkoje „Workbench“ yra pavaizduota 11 pav.



11 pav. Daugiaparametrinio CFD eksperimento schema, vaizduojanti pagrindinius jo etapus: geometrinio modelio sudarymą, geometrinio modelio skaldymą į baigtinius elementus, sąlygų nustatymą ir sprendimą „Fluent“ moduliu

Eksperimentas pradedamas geometrinio nagrinėjamo objekto modelio kūrimas. Modelis gali būti kuriamas naudojant „Ansys“ paketo programą „DesignModeler“, tačiau yra sudaryta galimybė importuoti kitų programų ir formatų geometrinius modelius. Darbe aprašytiems eksperimentams dažniausiai buvo naudojami programa „SolidWorks“ sukurti modeliai. Šiame etapui taip yra priskiriamas pagrindinių eksperimento požiūriu įdomių paviršių žymėjimas, tačiau ši operacija gali būti atliekama ir tolesniais etapais. Atliekamos kitos su eksperimentu susijusios operacijos, pavyzdžiui modelio išdėstymas globalios koordinačių sistemos atžvilgiu priklausomai nuo konkrečių poreikių.

Atlikus minėtus žingsnius yra pereinama prie modelio skaldymo į baigtinius elementus, kitaip tariant tinklo generavimo. Vartotojas nurodo tinklo generavimo algoritmo parametrus atsižvelgiant į reikalavimus eksperimentui. Modelis į baigtinius elementus turi būti suskaldytas pakankamai smulkiai, kad eksperimento metu atlikti skaičiavimai kiek galima tiksliau atitiktų realias sąlygas, tačiau didelis tinklo elementų skaičius lems didesnį išteklių poreikį skaičiavimus atliekančiam kompiuteriui ir ilgesnę skaičiavimų atlikimo trukmę. Tinklo generavimo algoritmai leidžia sudaryti tankesnį tinklą modelio zonose, kuriose geometrija įgyja sudėtingas formas ir naudoti geometriškai didesnius tinklo elementus vietos, kur skaičiavimų tikslumas gali būti pasiektas esant mažesniam baigtinių elementų skaičiui. Kitaip tariant, tinklo tankis automatiškai adaptuojamas prie geometrijos

detalizacijos lygio. Tinklo sudėtingumui įvertinti yra naudojami du pagrindiniai statistiniai parametrai: tinklo mazgų skaičius ir tinklo elementų skaičius. Pagal jų reikšmes galima įvertinti planuojamų skaičiavimų trukmę ir sudėtingumą atliekant tinklo optimizaciją.

Suskaldžius eksperimentui naudojamą geometriją į baigtinius elementus yra pereinama prie konkrečių eksperimento sąlygų sudarymo. Vartotojo įvedami parametrai skiriasi priklausomai nuo eksperimento tipo (pvz. atliekant atsparumo skaičiavimus yra apibrėžiamos apkrovos, ryšiai, tvirtinimo vietos ir kiti parametrai geometrinio modelio paviršiuose, nagrinėjant šilumos perdavimą yra apibrėžiami kaitinami ir aušinami paviršiai ir t. t.).

Baigiamajame darbe yra aprašomi skaičiuojamosios skysčių dinamikos eksperimentai, kuriems atlikti yra naudojama programa „Fluent". Nagrinėjamu atveju eksperimentui atlikti reikalingi parametrai yra susiję su sprendimo algoritmo tipu, objekto būsenai aprašyti naudojamais matematiniais modeliais, objekto ar jo elementų medžiaga ir jos savybėmis, eksperimentui svarbių paviršių parametrais. Atliekami eksperimentai skirstomi į nusistovėjusios (stabilios) būsenos ir laike kintančios būsenos tyrimus. Visi darbe pateikti tyrimai yra atliekami nustatant parametrus sistemai esant stabilioje būsenoje.

Eksperimento parametrų nustatymas yra baigiamas sprendimo algoritmo ir sprendimo inicializacijos parametrų nustatymu.

Sprendimo inicializacija yra atliekama norint nustatyti racionalias eksperimentu nustatomų parametrų pradines reikšmes. Kuo artimesni pradiniai parametrai yra sprendiniui, tuo greičiau (per mažesnį iteracijų skaičių) sprendinys konverguos.

Trumpai konvergavimo sąlyga yra apibrėžiama taip: priimama, kad sprendinys yra stabilus, kuomet yra išpildyta CFL sąlyga, atitinkanti baigtinių skirtumų metodą. Kitaip tariant, sprendinys yra priimamas kuomet atlikus iteraciją parametrų pokytis yra mažesnis, negu nustatyta ribinė reikšmė.

Nagrinėjant skysčio dinamiką *n*-mačioje sistemoje sąlygos išraiška yra:

$$\Delta t \sum_{i=1}^{n} \frac{u_{x_i}}{\Delta x_i} \leq C_{\max}, \tag{2.1}$$

čia:

u – pernešimo greitis, m/s,

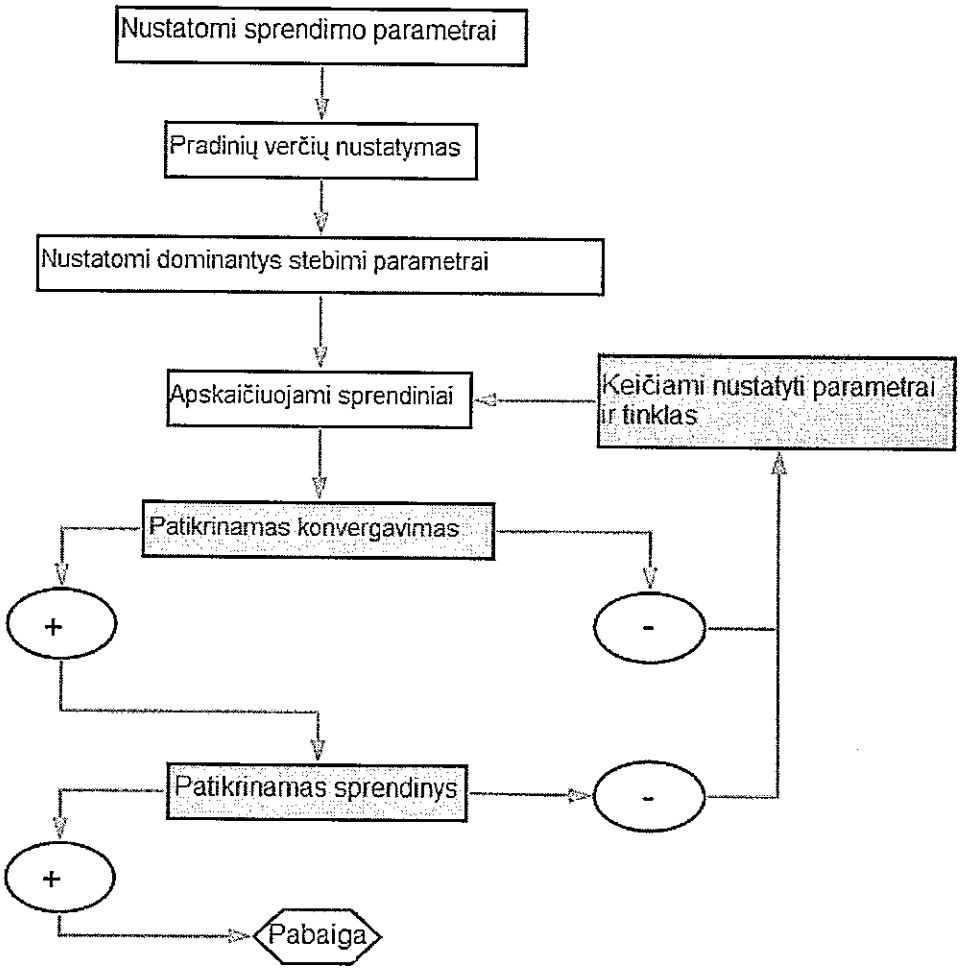
Δt – laiko žingsnis, s,

Δx – erdvinis žingsnis, m,

C_{max} – Courant'o skaičius (bedimensinė konstanta).

Skaičiavimai taip pat gali būti atliekami sudarant dinaminį tinklą, t. y. sudarant galimybes atstumui tarp elementų mazgų kisti priklausomai nuo sistemos būsenos. Aprašomiems eksperimentas atlikti ši opcija nebuvo reikalinga.

Atliekant tyrimus dažniausiai tikslas yra gauti kurio nors svertinio parametro absoliučią vertę (pvz. debitas per skysčio išėjimo paviršių), todėl eksperimentui yra nustatomos stebėjimo priemonės (angl. *monitors*), kurie po kiekvienos iteracijos apskaičiuoja paviršiaus parametrų vertes. Skaičiavimai yra atliekami įvertinant kiekvieno baigtinio elemento, kertamo nagrinėjamo paviršiaus, vertes, jas atitinkamai sumuojant (integravimo veiksmas), nustatant jų vidurkį arba skaičiuojant išvestines pagal nustatytą kintamąjį. Pavyzdžiui, nustatant tūrio arba masės debitą yra sumuojamos paviršiui statmenos debito



12 pav. Tyrimo atlikimo ir rezultatų apdorojimo schema dirbant su programų kompleksu „Ansys"

Norint atlikti daugiaparametrinį eksperimentą, kuomet eksperimentas yra atliekamas tam tikrą skaičių kartų keičiant kurį nors arba kuriuos nors parametrus, nustatant eksperimento sąlygas norimam parametrui arba parametrams pasirenkama ne absoliuti vertė, bet kiekvienam atvejui

parenkama iš vartotojo sudarytos parametrų lentelės. Kiekvienas eksperimentas atliekamas iki konvergavimo.

Atliekant tyrimą didžiąją dalį laiko užima rezultato įvertinimas, apdorojimas ir atitinkamas eksperimento skaičiavimo metodikos koregavimas siekiant gauti tinkamą sprendinį. Darbo su „Ansys“ metodikoje yra patariama tyrimus atlikinėti pagal 12 pav. pateiktą schemą. Sprendinys turi būti visapusiškai stabilus, tie patys rezultatai turi būti gaunami per naują sugeneravus tinklą (neturi priklausyti nuo skaldymo į baigtinius elementus). Kur tai yra galima, gauti rezultatai turi būti patikrinami atliekant atvirkštinį eksperimentą. Pavyzdžiui filtro tyrimo metu buvo nustatomas skysčio debitas priklausomai nuo slėgių skirtumo ertmėse prieš ir už filtro ribos. Rezultatai buvo patikrinti apibrėžiant zoną prieš filtrą kaip pastovaus debito šaltinį, naudojant gautą debito reikšmę. Buvo tikrinama, ar gaunamas prieš tai atlikto eksperimento slėgių skirtumas.

PIRMOJO SKYRIAUS IŠVADOS

1. Geoterminės jėgainės yra perspektyvus alternatyvios energijos šaltinis, aktualus ir Lietuvai. Didelės optimizacijos galimybės, siurblio-vamzdyno sistemos konstrukcijų bei gręžinio charakteristikų įvairovė lemia poreikį išsamiam galimybių tyrimui kiekvieno atskiro geoterminės energetikos taikymo atveju.

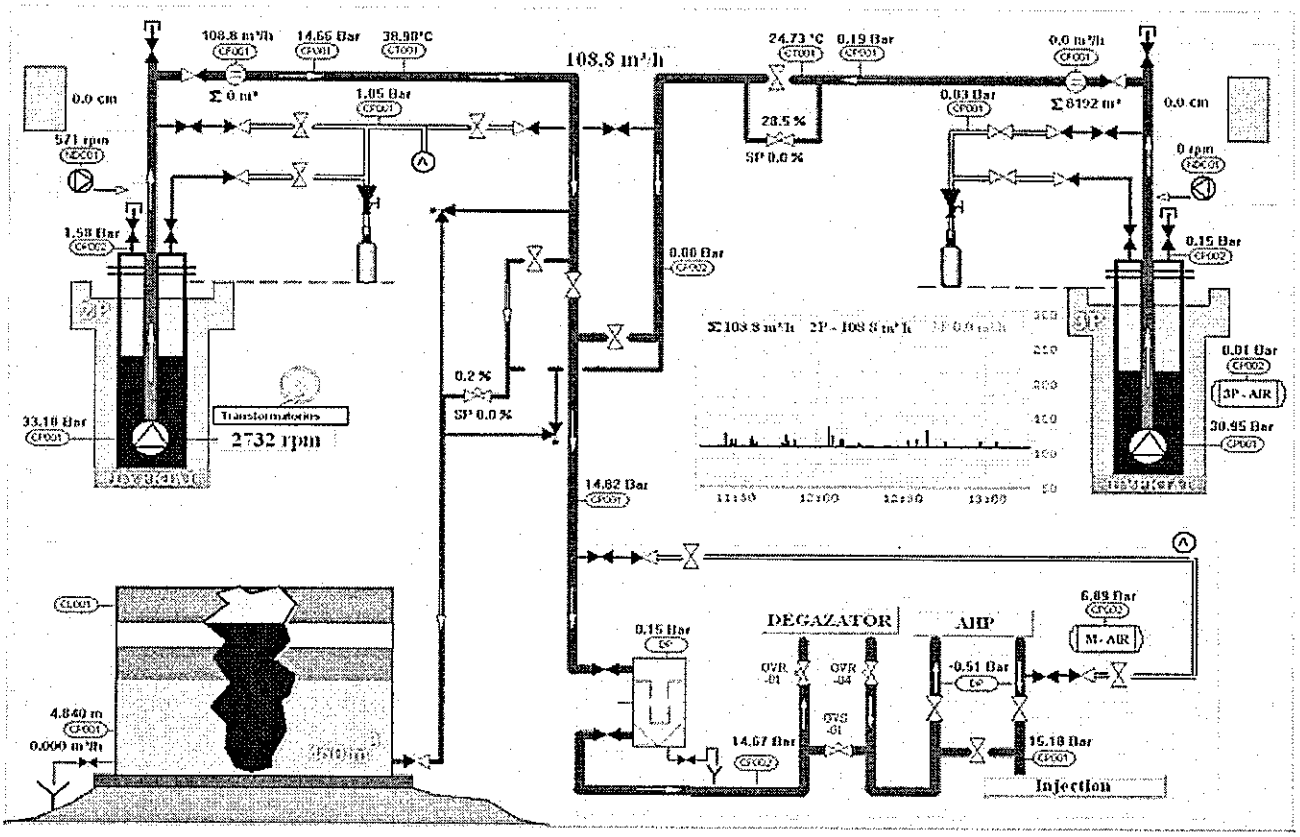
3. Darbo temos aktualumą lemia tai, kad yra nagrinėjama reali sistema siekiant nustatyti potencialius su jos eksploatacija susijusių problemų sprendimo metodus.

2. Nors su išcentriniais siurbliais susijusių parametrų kitimo charakteristikos gali būti numatytos pagal bendrąsias tyrimo metu nustatytas tendencijas, norint gauti tikslias teorines realaus objekto charakteristikas būtina kurti naują matematinį modelį atsižvelgiant į siurblio konstrukciją, geometrinius parametrus bei darbo specifiką (skysčio parametrai bei ypatumai).

4. Nors visi išcentrinių siurblių matematiniai modeliai turi bendrų bruožų, įvertinant sistemos sudėtingumą bei reikiamą modelio tikslumą siekiant realybę atitinkančių teorinio bandymo rezultatų, būtina kurti matematinį modelį, atsižvelgiant į sprendžiamą problemą.

2. GAVYBINIO GRĘŽINIO GILUMINIO DAUGIAPAKOPIO IŠCENTRINIO SIURBLIO TYRIMAS

UAB „Geoterma" eksploatuojamos jėgainės gavybinių gręžinių principinė technologinė schema yra atskirai pateikta 13 pav. Darbe yra tiriamas kairėje parodytas gręžinys. Giluminis siurblys yra patalpintas apytiksliai 300 m gylyje, dėl to siurblio zonoje susidaro 33 bar hidrostatinis slėgis.



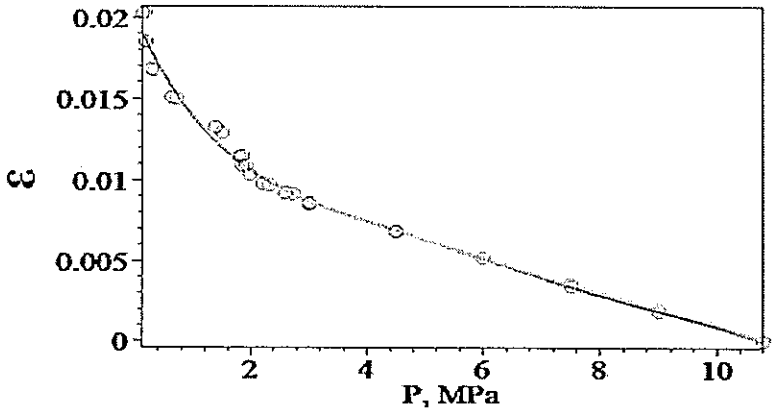
13 pav. UAB „Geoterma" eksploatuojamos jėgainės gavybinių gręžinių principinė technologinė schema

2.1 TIRIAMOSIOS PROBLEMOS APRAŠAS. GEOTERMINIO SKYSČIO SAVYBĖS

Pagrindinė problema su kuria susiduria UAB „Geoterma" transportuojant iš žemės gelmių vandenį ir grąžinant jį atgal į gelmes yra didelis ištirpusių dujų kiekis, kurios išsiskiria slėgiui sumažėjus iki 2,0 MPa. Nustatyta, kad jis sudaro apie 180 l/m^3 esant 2,0 MPa slėgiui. Dėl šio veiksnio žymiai padidėja fluido spūdumas, pasireiškia darbo netolygumas, atsiranda vibracijos. Šis veiksnys daro neigiamą įtaką vamzdyne vykstantiems hidrodinaminiams ir termodinaminiams procesams. Įvertinta, kad vamzdyno našumas šiais atvejais gali sumažėti apie 50 % nuo projektinės vertės.

Yra iškelta hipotezė, kad dujų išsiskyrimo iš geoterminio skysčio reiškinys gali lemti judančių siurblio elementų disbalansą dėl netolygaus dujų zonų skystyje susidarymo ir sukelti papildomą netolygią radialinę siurblio pagrindinio veleno vibraciją.

Yra nustatyta priklausomybė tarp tūrinio tamprumo modulio ir santykinio dujų kiekio, pateikta grafiškai 14 pav.



14 pav. Dujų santykinio tūrio priklausomybės nuo slėgio grafikas

Iš grafiko matoma, kad dujų santykinis tūris pradeda sparčiai didėti fluido slėgiui sumažėjus iki 2 MPa,

Tyrimo tikslas – nustatyti, ar išcentriniam siurbliui veikiant normaliu režimu jo ertmėse susidaro padidinto arba sumažinto slėgio zonos, kokie bus slėgio pokyčiai minėtose zonose ir kokią įtaką jų buvimas gali turėti siurblio eksploatacinėms charakteristikoms.

Sudaromas siurblio pakopos sudaromo skysčio tūrio geometrinis modelis, geometrinis modelis suskaldomas į baigtinius elementus pagal CFD pritaikyta algoritmą naudojant racionalius tinklo infliacijos parametrus. Nurodomos sistemos veikimo sąlygos, skysčio parametrai, ląstelių zonos slėgis, sukimosi ašis ir kampinis greitis min^{-1}.

2.3 GILUMINIO DAUGIAPAKOPIO IŠCENTRINIO SIURBLIO GEOMETRINIO MODELIO PARUOŠIMAS

Tyrimui naudojamas geometrinis modelis buvo sudarytas pagal gamintojo pateiktą siurblio brėžinį (10 pav.) bei gautas siurbliaračio nuotraukas. Palyginimas tarp sukurto trimačio siurblio modelio ir realaus objekto yra pateiktas 15 ir 16 pav. Modelio kūrimas buvo pradėtas atskirų siurblio sistemos komponentų (siurbliaračio ir siurblio pakopos sudaromo skysčio tūrio) kūrimu. Šiame etape pagrindinis tikslas buvo sukurti kiek galima tikslesnius ir realiąją sistemą atitinkančius minėtų komponentų modelius.

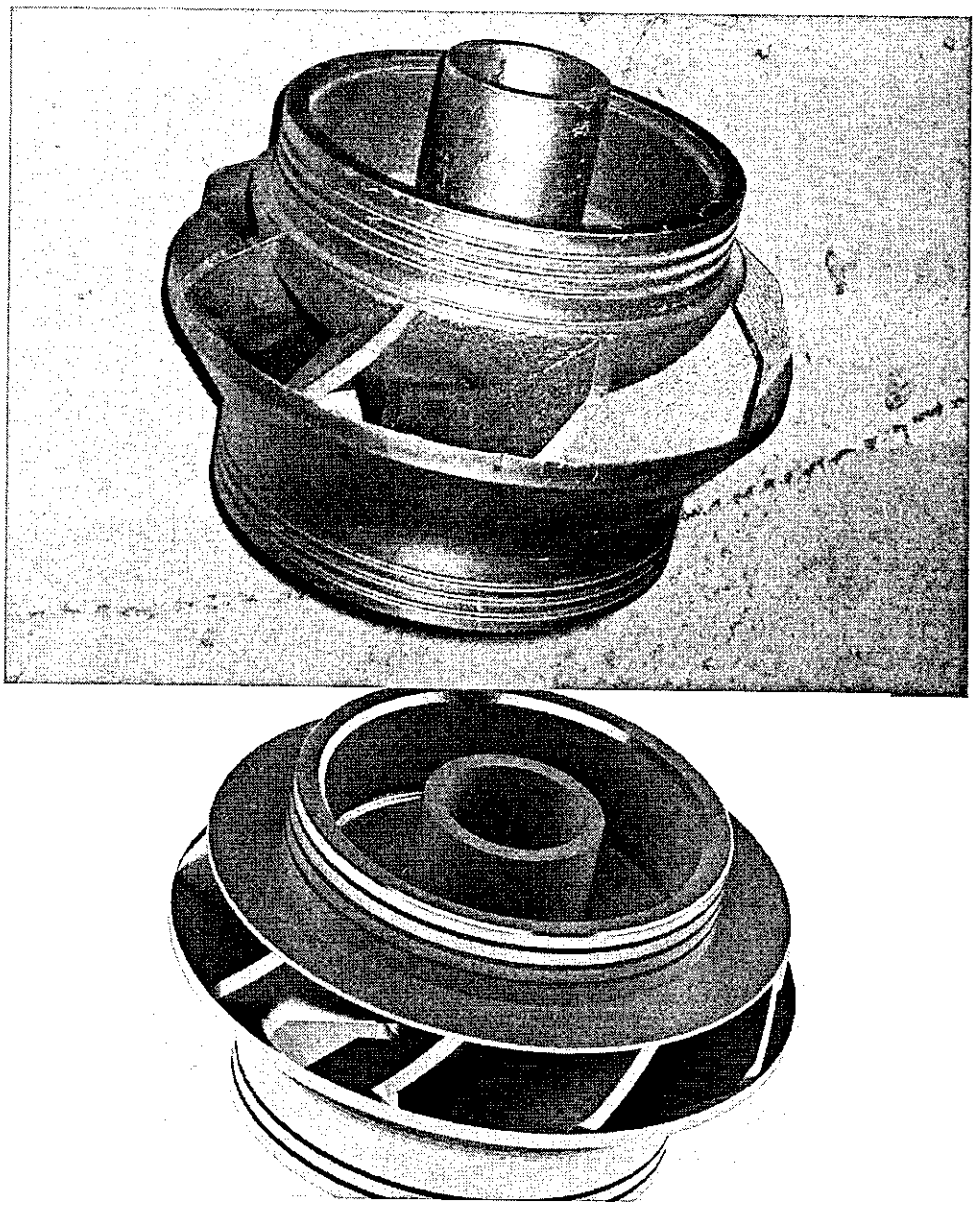
Gauti modeliai buvo apjungti orientuojantis žinomus kontakto paviršius. Atlikus šį žingsnį yra pereinama prie modelio geometrijos redukavimo. Visi sukiniai, neturintys įtakos siurblio pakopos veikimui, yra apjungiami į bendrą nejudantį paviršių, mentės yra apjungiamos į vieną grupę ir yra geometriškai „atimamos“ nuo bendro skysčio tūrio.

Gavus bendrą skysčio tūrį su paviršiais, apibrėžiančiais judančias mentes, pereinama prie geometrijos redukavimo. Pašalinamos smulkios skysčio dinamikai įtakos neturinčios detalės, tikrinama, ar modelis neturi ypatingai plonų elementų arba siaurų ertmių. Minėti elementai gali sudaryti papildomas problemas skaldant modelį į baigtinius elementus, kadangi reikalauja ypatingai tankaus tinklo. Jeigu aprašyti elementai randami, jų įtaka tyrimo rezultatams yra įvertinama, ir jeigu yra nustatoma, kad ji nėra pakankamai didelė, aprašyti elementai yra atitinkamai pakeičiami taip, kad sudarant tinklą nekiltų su jais susijusių prieš tai aprašytų problemų.

Šiam tyrimui naudojamas modelis turi du esminius paviršius: skysčio įsiurbimo ir išsiurbimo angos. Jos yra apibrėžimos geometrijos kūrimo etape.

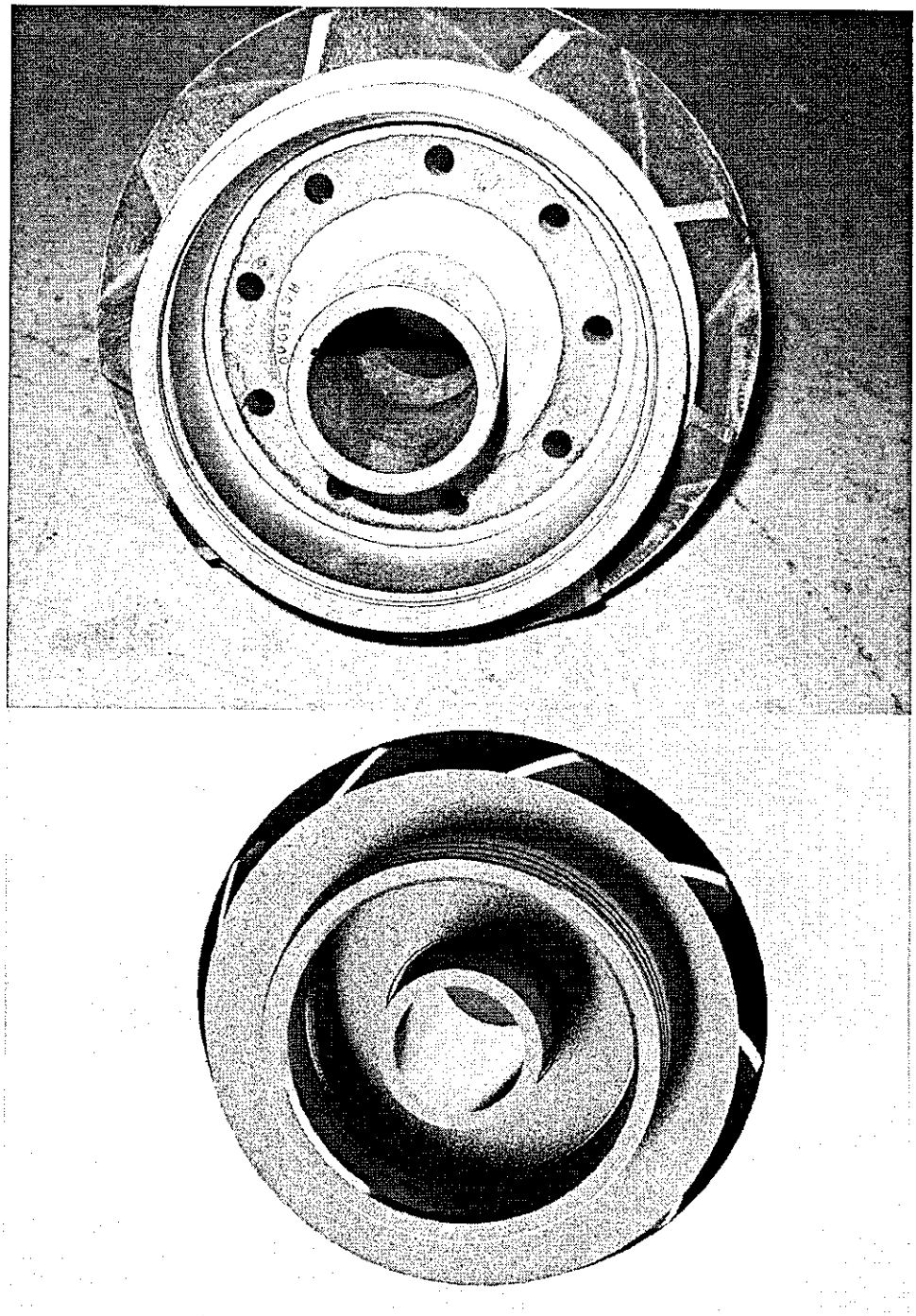
Nustatoma geometrinio modelio orientacija koordinačių pradžios atžvilgiu. Modelis yra išdėstomas taip, kad įsiurbimo angos paviršius sutaptų su XY plokštuma, o Z ašis būtų siurblio pakopos simetrijos ašimi.

Gautas galutinis siurblio pakopos ertmės geometrinis modelis yra pateiktas 17 ir 18 pav.



15 pav. Gamintojo pateikta siurbliaračio nuotrauka (viršuje) ir sudarytas geometrinis siurbliaračio modelis (apačioje) (pirmasis palyginimas)

Iš 15 ir 16 pav. pateiktų palyginamųjų siurbliaračio atvaizdų matoma, kad ne visi sukurto trimačio siurbliaračio modelio paviršiai tiksliai atitinka realųjį objektą. Tačiau visi modelio paviršiai, išskyrus mentes, yra sudaryti pagal gamintojo brėžinius, todėl buvo priimtas sprendimas nedaryti papildomos apytikslės modelio korekcijos.



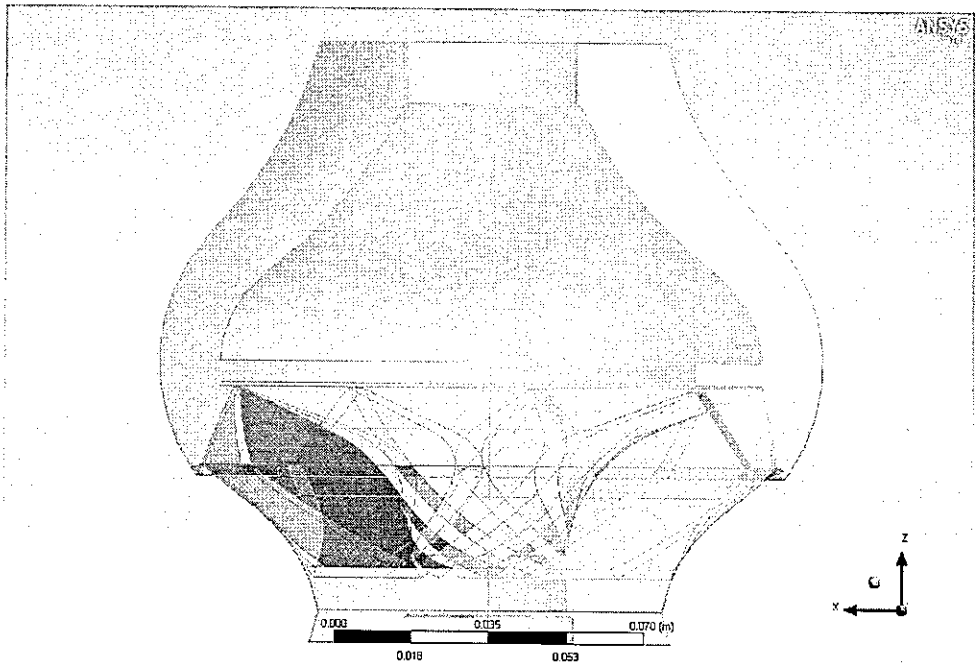
16 pav. Gamintojo pateikta siurbliaračio nuotrauka (viršuje) ir sudarytas geometrinis siurbliaračio modelis (apačioje) (antrasis palyginimas)

Problemos, lemiančios galimus netikslumus

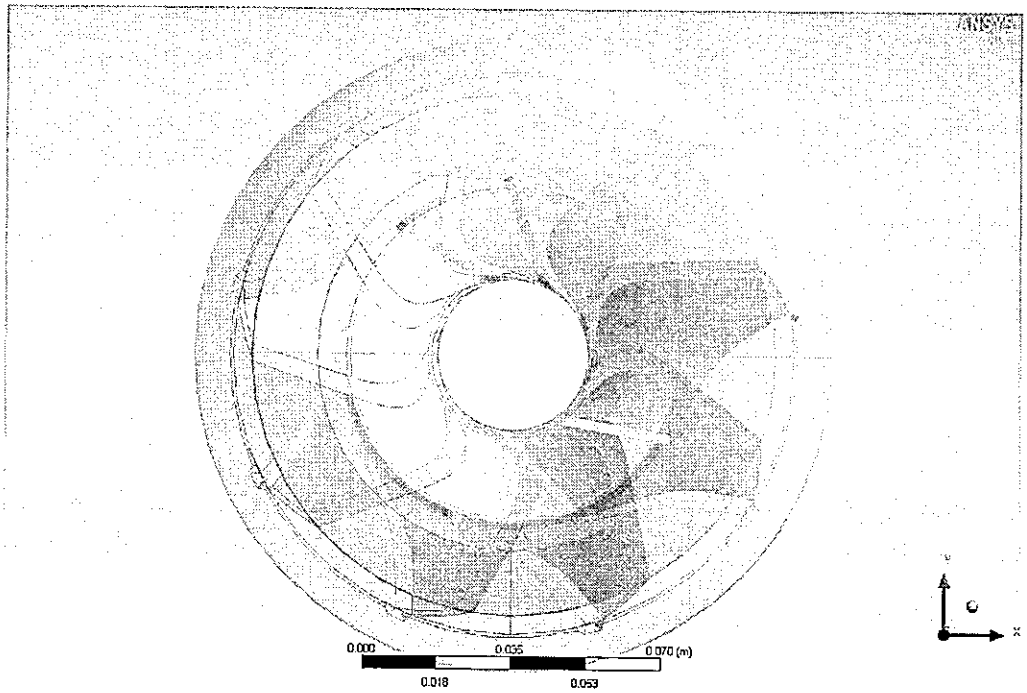
Kuriant geometrinį siurblio pakopos modelį buvo susidurta su keliomis problemomis. Gamintojo pateikti brėžiniai, pagal kuriuos sudarytos siurblio pakopos ir siublaračio ertmės (be menčių) turi akivaizdžių geometrinių nesutapimų lyginant su pateiktu nuotraukose siurbliaračiu (15 pav.). Taip pat nebuvo gauta informacija apie siurbliaračio menčių formą, todėl mentės buvo modeliuojamos

atsižvelgiant į pagrindinius žinomus siurbliaračio parametrus bei bendrus menčių geometrijos sudarymo principus.

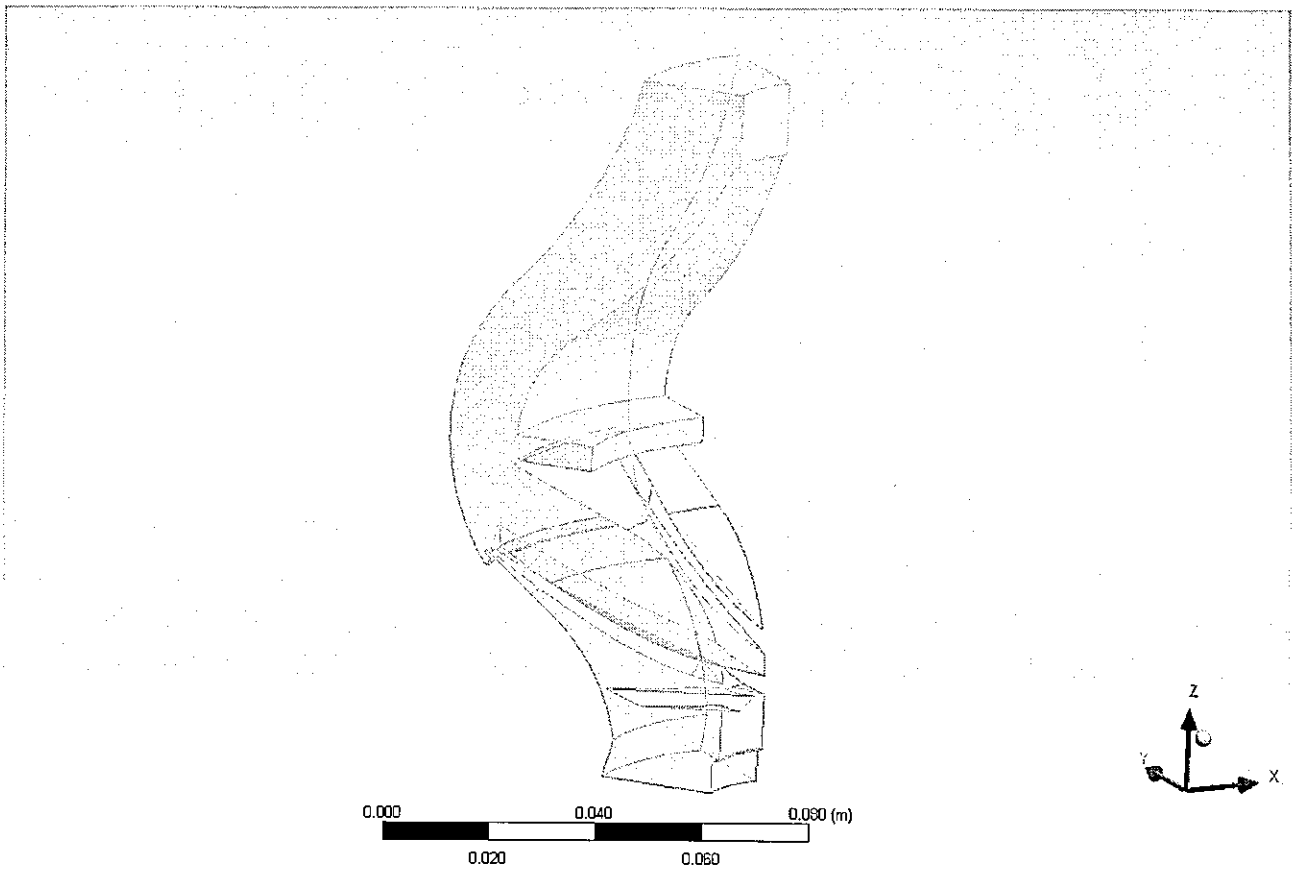
Taip pat būtina paminėti, kad dėl ribotų techninių galimybių modeliuojama tik viena iš siurblio 16 pakopų, taip pat nėra modeliuojama tiek požeminė, tiek antžeminė vamzdyno dalis. Nagrinėjant visą vamzdyno makrosistemą uždavinys pasidaro nepalyginamai sudėtingesnis ir gali būti sprendžiamas tik esant konkrečiam poreikiui vertinti visą sistemą, o ne atskiras jos sudedamąsias.



17 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos geometrinis modelis, pavaizduotas XZ plokštumoje



18 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos geometrinis modelis, XY plokštumoje

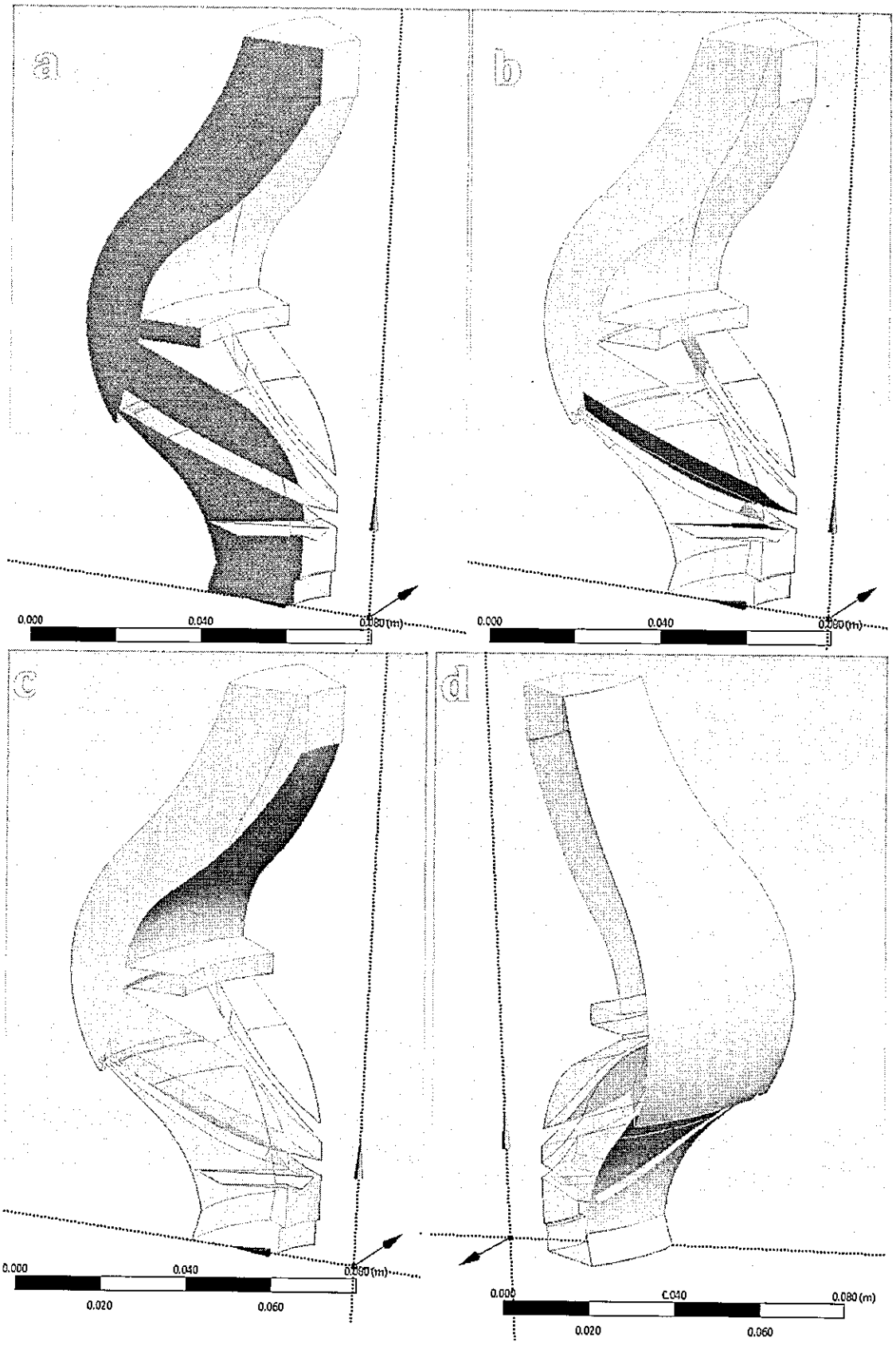


19 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos geometrinis modelis

Kadangi apie Z ašį sumodeliuotos siurbliaračio pakopos geometrija pasikartoja kas 40° (siurbliaratis turi 9 mentes), siekiant palengvinti skaičiavimus yra taikomas periodinės geometrijos metodas, kuomet sprendimo algoritmas nagrinėja tik vieną iš devynių pasikartojančių segmentų priimant, kad procesai vyksta simetriškai metodo neapibrėžtose zonose.

Šis metodas leidžia sumažinti bendrą baigtinių elementų skaičių nemažinant diskretizacijos tankio. Dėl to skaičiavimo trukmė pasidaro žymiai mažesnė ir sumažėja reikalavimai kompiuterio techniniams ištekliams. Gautas modelio segmentas yra pavaizduotas 19 pav.

Atskirus 40° geometrijos segmentą nustatomos jo pagrindinės zonos, parodytos 20 pav. Zonos yra nustatomos atsižvelgiant į jų loginę paskirtį.



20 pav. Geometrinio modelio reikšminių zonų nustatymas: a – rotacinės simetrijos paviršius, b – mentės, c – vidinė sienelė, d – išorinė sienelė

2.4 GILUMINIO DAUGIAPAKOPIO IŠCENTRINIO SIURBLIO GEOMETRINIO MODELIO DISKRETIZAVIMAS

Geometrinio modelio skaldymas į baigtinius elementus yra atliekamas pagal 21 pav. pateiktus nustatymus.

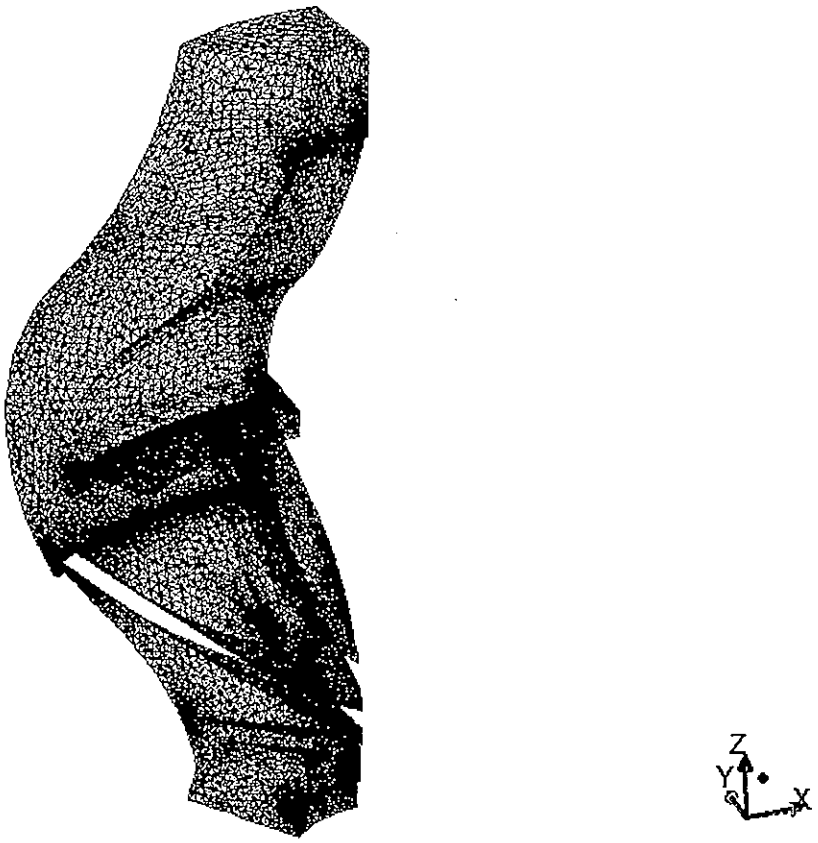
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Proximity Accuracy	0.5
Num Cells Across Gap	Default (3)
Min Size	Default (2.2894e-005 m)
Proximity Min Size	Default (2.2894e-005 m)
Max Face Size	Default (2.2894e-003 m)
Max Size	Default (4.5789e-003 m)
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	7.354e-004 m
Inflation	
Assembly Meshing	
Method	None
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	74302
Elements	380724
Mesh Metric	None

21 pav. Gavybinio gręžinio siurblio pakopos skaldymo į baigtinius elementus nustatymai ir statistika

Atlikus keliasdešimt bandymų buvo nustatyta, kad eksperimentas yra stabilus esant pateiktiems tinklo parametrams, o modelio detalumas (74 302 mazgai, 380 724 elementų) yra racionalus atsižvelgiant į turimus techninius išteklius.

„Fluent“ baigtinių elementų tinklo analizė parodo, kad geometrinis modelis buvo diskretizuotas tinkamai ir neturi vietų, galinčių sukelti problemų skaičiavimo algoritmui.

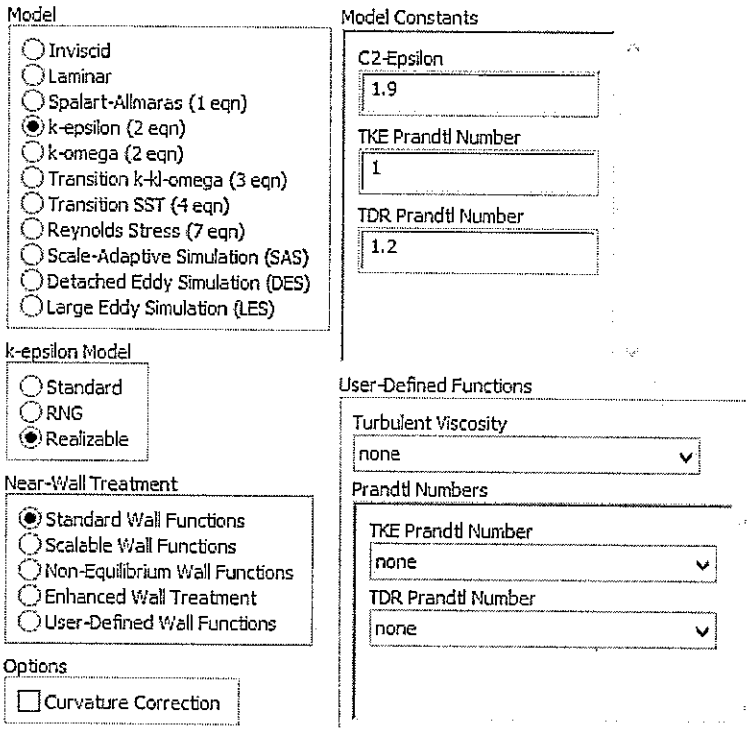
Sugeneruotas baigtinių elementų tinklas GDIS pakopos segmento geometriniam modeliui yra pavaizduotas 22 pav.



22 pav. Tyrimui naudojamas siurblio pakopos fragmento geometrinis modelis, suskaldytas į baigtinius elementus

2.5 GILUMINIO DAUGIAPAKOPIO IŠCENTRINIO SIURBLIO TYRIMO KRAŠTINIŲ SĄLYGŲ NUSTATYMAS

Yra tiriamas nusistovėjęs skysčio judėjimas naudojant slėgiais besiremiantį sprendimo algoritmą. Pasirenkamas siurblio hidrodinamikai tirti rekomenduojamas *k-ε* turbulencijos modelis. Jo parametrai yra pateikti 23 pav. Tyrimui nustatyta medžiaga – vanduo. Visas geometrinis modelis yra nustatomas kaip apie Z ašį judanti ląstelių zona. Nustatomas parametrinis sukimosi greitis. Prieš tai aprašytoms paviršių grupėms yra priskiriamas nulinis kampinis greitis absoliučioje arba ląstelių zonos koordinačių sistemoje priklausomai nuo jo paskirties. Apibrėžiami skysčio įtekėjimo, ištekėjimo ir periodinis paviršiai. Paviršiuose nustatomas vienos pakopos charakteristiką atitinkantis slėgis. Nustatomi konvergavimą gerinantys parametrai, 2000 iteracijų skaičius.

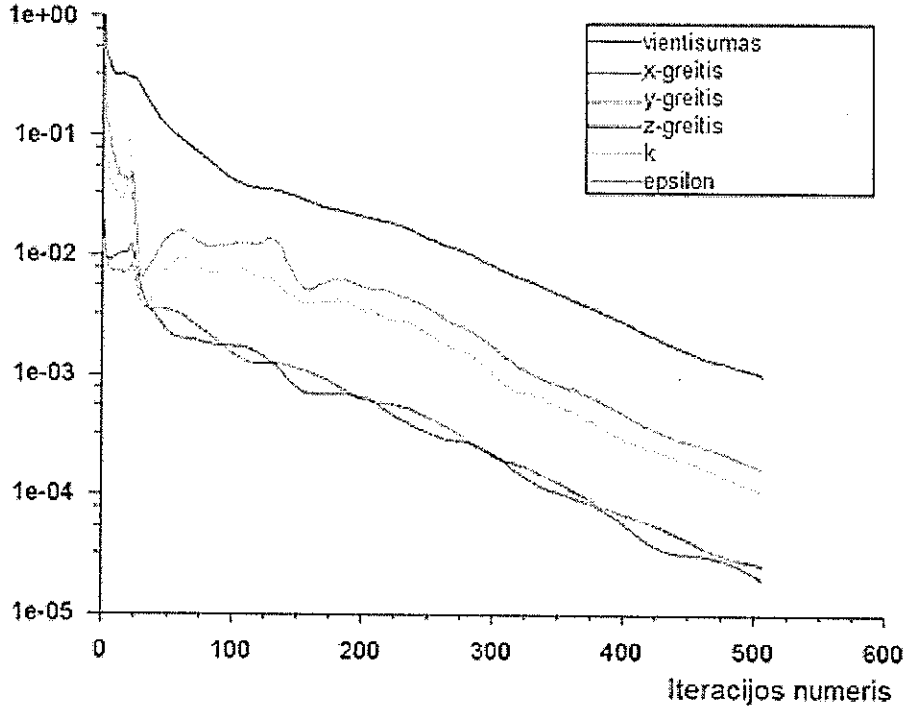


23 pav. Pasirinktojo turbulencijos modelio parametrai programoje „Fluent“

Skaičiavimai atliekami per visą GDIS veikimo dažnių diapazoną (40 – 50 Hz) 1 Hz žingsniu.

2.6 GILUMINIO DAUGIAPAKOPIO IŠCENTRINIO SIURBLIO MATEMATINIO EKSPERIMENTO REZULTATŲ ANALIZĖ

Nustatyta, kad visais nagrinėtais atvejais modelis pasiekdavo stabilumą esant 520–540 iteracijai. Eksperimento sprendinių konvergavimo grafikas yra pateikiamas 24 pav.

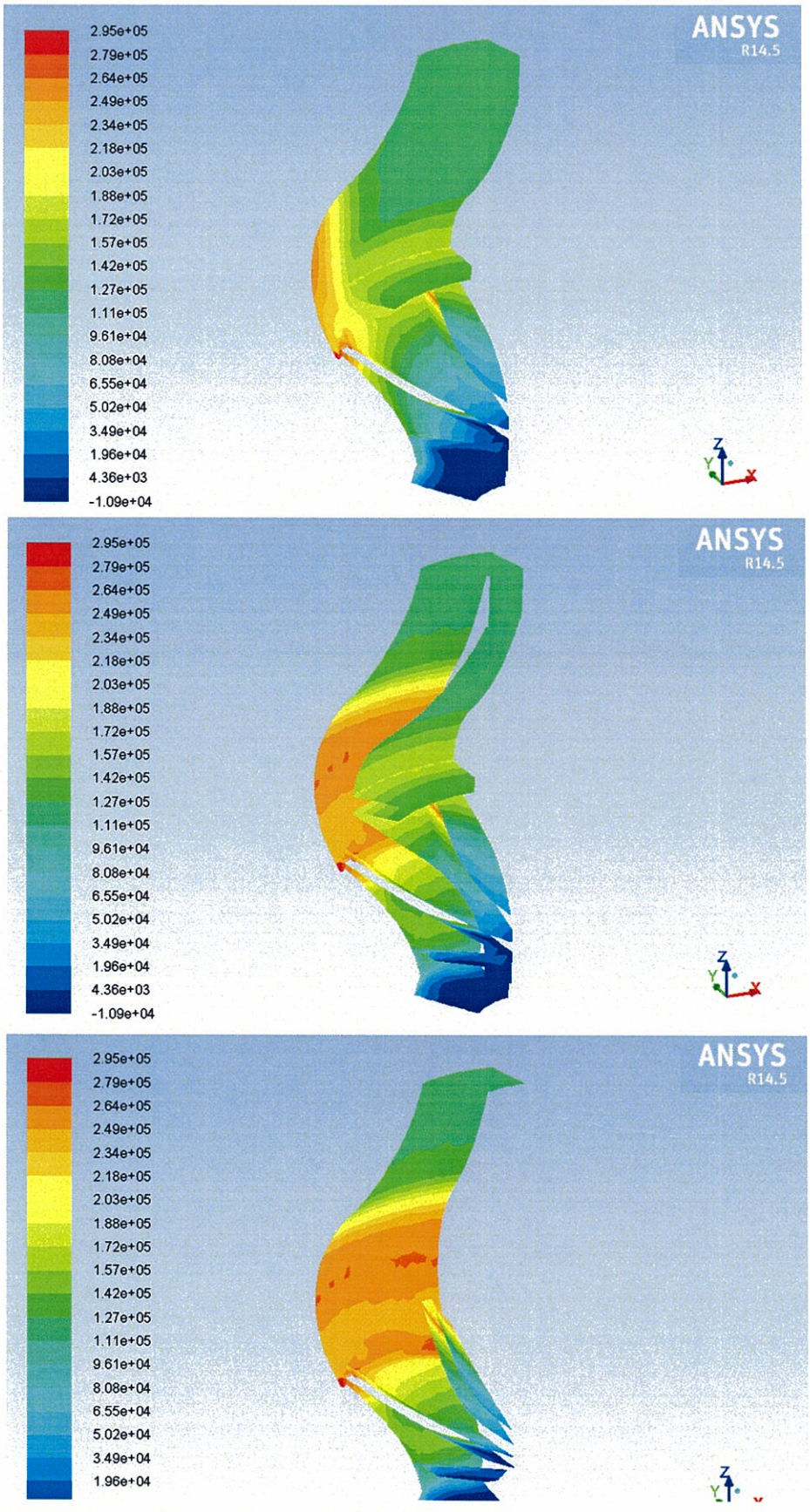


24 pav. Siurblio pakopos tyrimo sprendinių konvergavimo grafikai (nustatytas kampinis greitis – 2400 min^{-1})

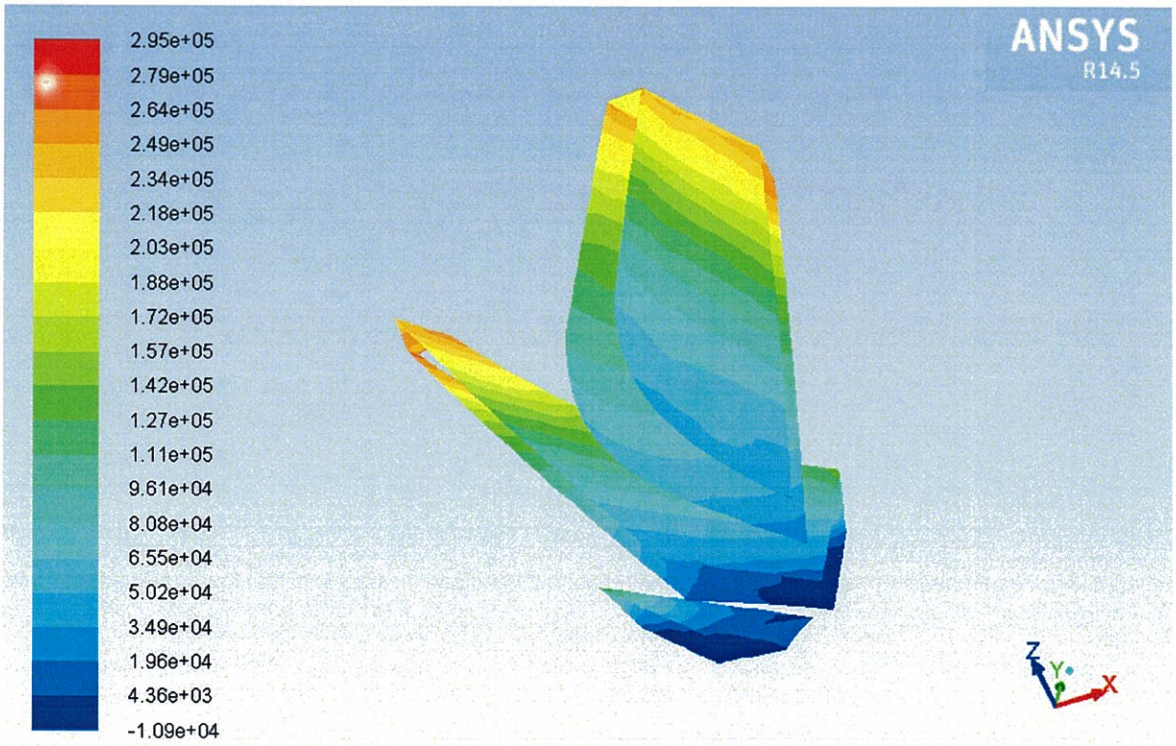
Gauti slėgio kontūrai yra pateikiami 25 pav. Atskirai yra parodomi slėgių kontūrai ant menčių paviršiaus 26 pav.

Skysčio judėjimas GDIS pakopos ertmėse yra vizualizuotas naudojant bandomojo skysčio čiurkšlės injekcijos metodą ir yra pavaizduotas 27 pav.

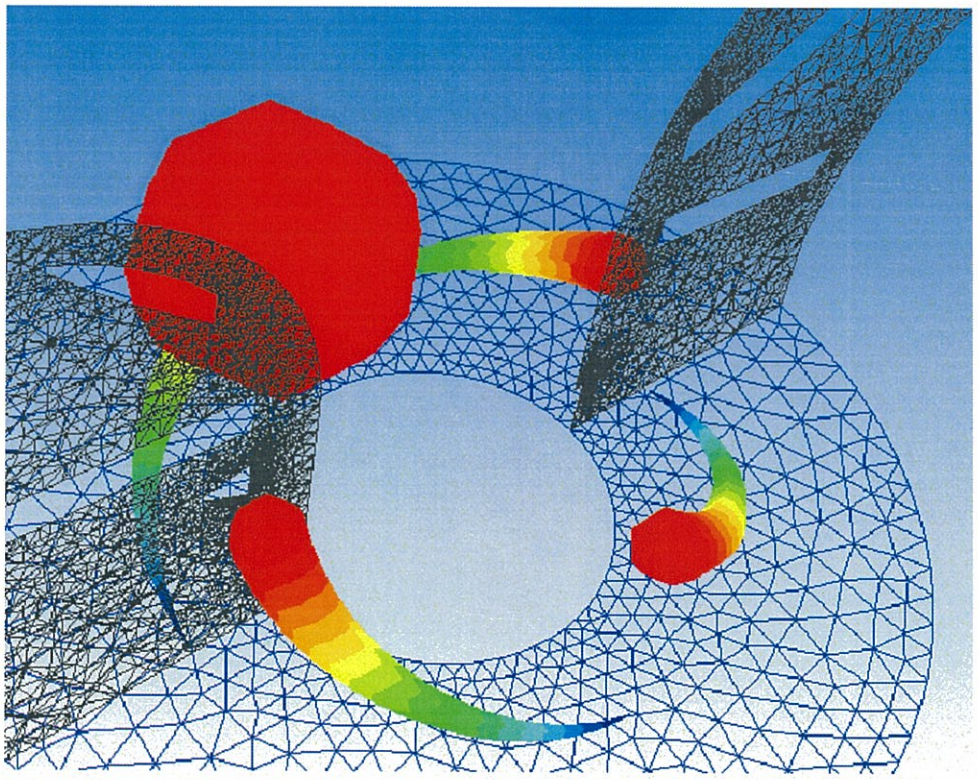
Nustatyta, kad didžiausio slėgio zonoje esant nustatytoms sąlygoms slėgis padidėja 295 kPa, mažiausio slėgio zonoje jis sumažėja 10,9 kPa. Įvertinant tai, kad siurblys veikia 3,3 MPa hidrostatinio slėgio sąlygomis yra daroma išvada, kad intensyvaus dujų išsiskyrimo taškas nėra pasiekiamas GDIS zonoje veikiant normaliomis sąlygomis. Ši slėgio zona pasireiškia žymiai aukščiau žemesnio hidrostatinio slėgio taškuose.



25 pav. GDIS matematinio eksperimento rezultatai. Slėgio kontūrai, Pa



26 pav. GDIS matematinio eksperimento rezultatai. Slėgio kontūrai menčių zonoje, Pa



27 pav. Srauto judėjimo vaizdavimas skysčio injekcijos metodu

Yra žinoma, kad esant 2732 min^{-1} siurblio sūkiams yra gaunamas bendras gręžinio debitas, lygus 108,8 m^3/h. Interpoliuojant gautus rezultatus šiam kampiniam greičiui yra nustatyta 121,5 m^3 debito reikšmė.

Atsižvelgiant į tai yra nustatoma, kad gautosios vertės yra 11,7 % didesnės už eksploatacijos metu nustatytąsias. Įvertinant tai, kad modeliuojant geometriją tyrimui buvo padarytos didelės prielaidos ir siurblio pakopa yra nagrinėjama izoliuotai nuo likusios sistemos priimamas sprendimas, kad modelio tolimesnė korekcija nėra reikalinga.

Taip pat yra svarbu, kad nustatytos vertės yra didesnės, bet ne mažesnės negu nustatytos eksploatacijos metu, kadangi atliekant tyrimą sąlygos yra sudėtingesnės, nei realybėje, todėl paliekama tam tikra atsarga atsižvelgiant į galimus netikslumus.

ANTROJO SKYRIAUS IŠVADOS

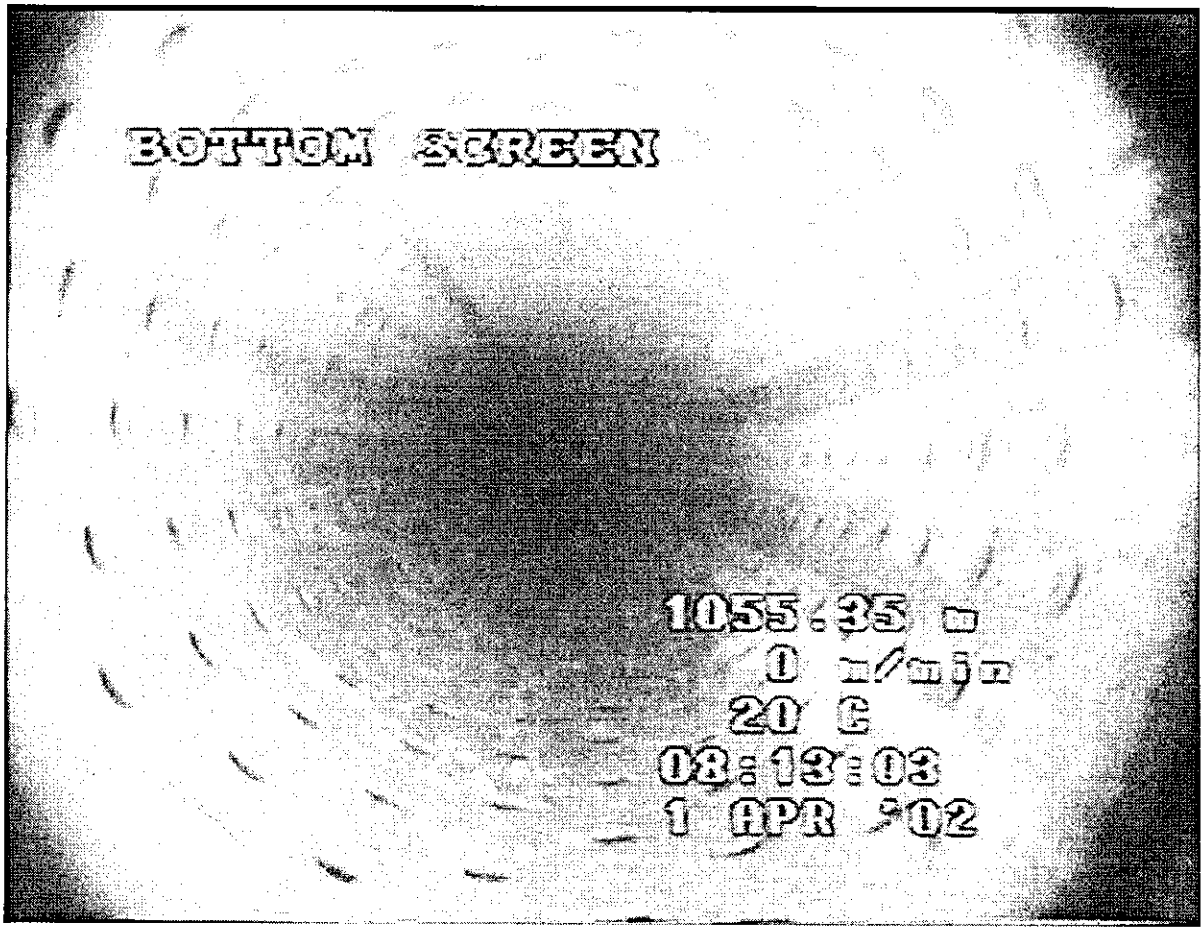
1. Atlikus siurblio pakopos bandymus jo darbinių sūkių diapazone nustatytos charakteristikos atitinka realiąsias. Nustatytos sumažėjusios slėgio zonos, kuriose potencialiai gali pasireikšti dujų išsiskyrimas, turintis neigiamą efektą siurblio našumui ir jo darbo tolygumui.
2. Nustatyta, kad didžiausio slėgio zonoje esant nustatytoms sąlygoms slėgis padidėja 295 kPa, mažiausio slėgio zonoje jis sumažėja 10,9 kPa. Įvertinant tai, kad siurblys veikia 3,3 MPa hidrostatinio slėgio sąlygomis yra daroma išvada, kad intensyvaus dujų išsiskyrimo taškas nėra pasiekiamas GDIS zonoje veikiant normaliomis sąlygomis, nors fluido spūdumas pasireiškia ir esant aprašytoms sąlygoms.
3. Išsamaus gavybinio gręžinio tyrimo metu gauti rezultatai byloja apie pakankamą modelio tikslumą (gauti tyrimo debito parametrai atitinka 11,7 % sudėtingesnes siurblio veikimo sąlygas).

3. INJEKCINIO GRĘŽINIO FILTRO ZONOS TYRIMAS

Nemažiau svarbi geoterminės jėgainės sudaromoji dalis yra injekcinis gręžinys, kuriuo jėgainės naudojamas vanduo yra grąžinamas į gelmes. Su šiuo procesu susijusios problemos yra analizuojamos atliekant šiuos tyrimus:

- Ištekėjimo debito priklausomybės nuo slėgių skirtumo vamzdyno viduje ir išorėje tyrimas;
- Užsikimšimo modeliavimas atliekant geometrinius pakeitimus;
- Atbulinio tekėjimo per filtrą bandymas.

Skyriuje yra aprašoma kiekvienam iš pateiktų tyrimų naudota metodika ir gauti rezultatai. Injekcinio vamzdyno filtro nuotrauka yra pateikiama 28 pav.



28 pav. Injekcinio gręžinio filtro zona (nuotrauka 1055 m gylyje)

Iš nuotraukos gauti duomenys apie filtro skylučių išsidėstymą, kartu su UAB „Geoterma" pateiktais tiksliais geometriniais filtro elementų duomenimis yra pagrindas filtro geometriniam modeliui.

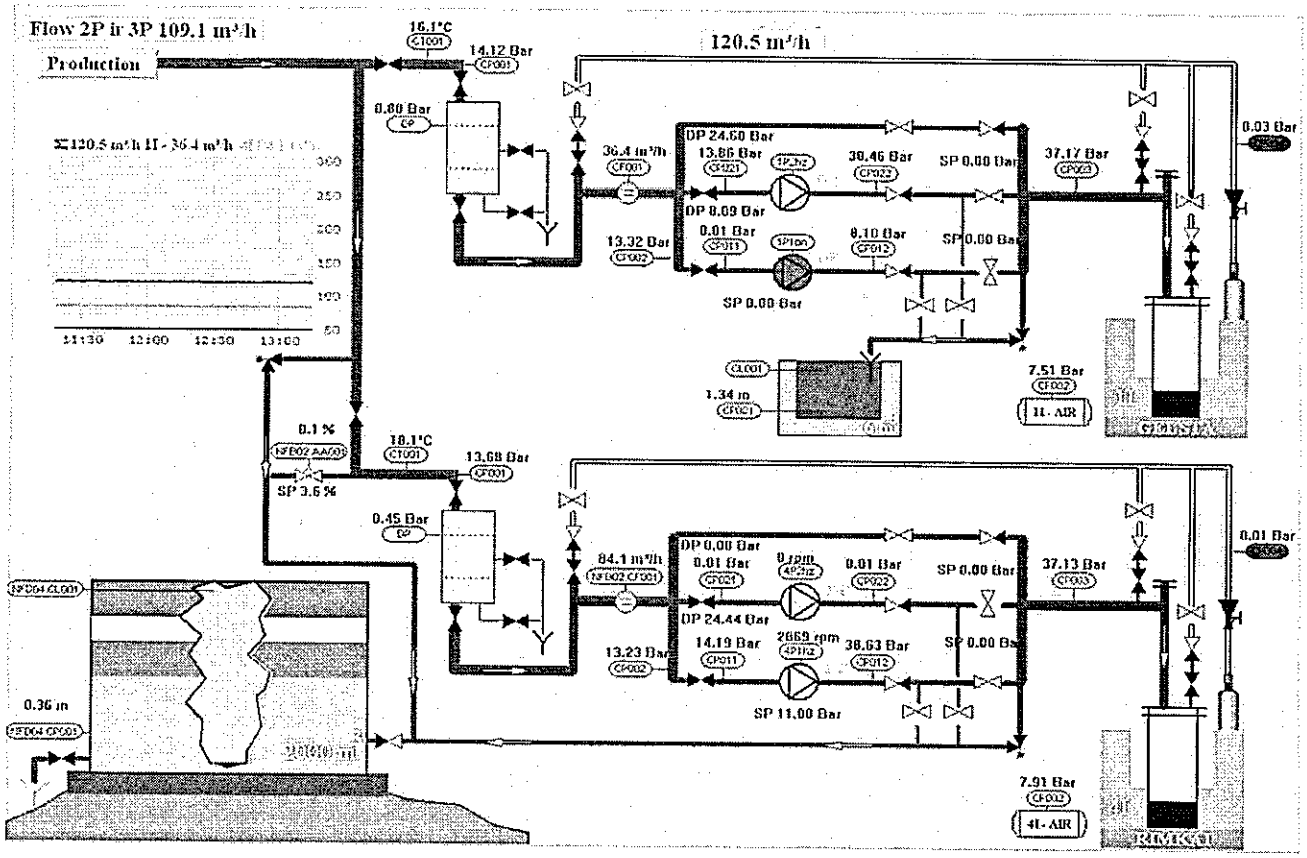
3.1 FILTRO ZONOS UŽSITERŠIMAS. TIRIAMOSIOS PROBLEMOS APRAŠAS

Nagrinėjamas tyrimo objektas yra injekciniame gręžinyje esančio vamzdžio filtro zona. Filtro zoną sudaro perforuotas vamzdis, apvyniotas trapecine viela. Filtro zonos geometriniai parametrai yra pateikti 1 lentelėje.

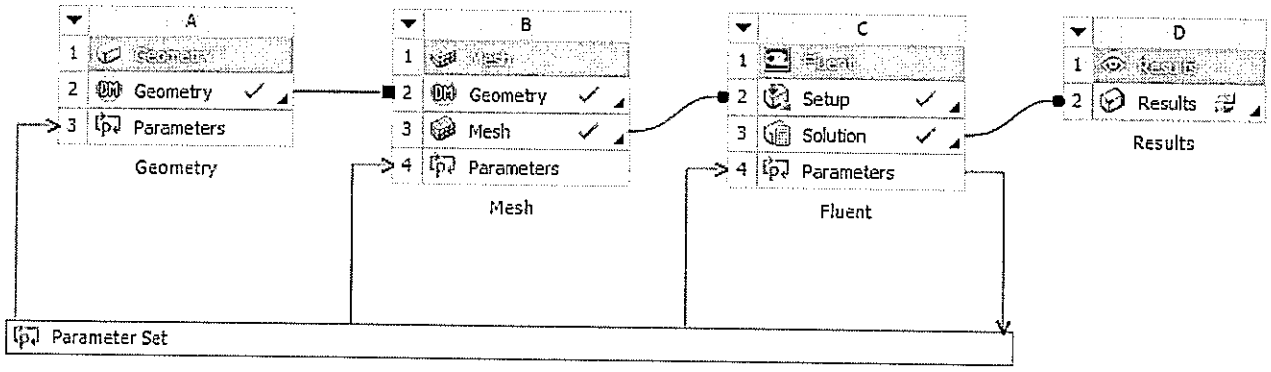
Šiuo atveju nagrinėjamas skysčio tekėjimas iš vamzdžio į aplinką per vieną angą. Siekiant sumažinti skaičiavimo paklaidą dėl atbulinio tekėjimo angos ilgis yra žymiai padidintas. Pagrindinio srauto vamzdyje nustatomas slėgis yra lygus 14,3 MPa sudarytas iš apie 10 MPa hidrostatinio slėgio ir 4 MPa priverstinai siurblio sukuriamo slėgio. Šiuo atveju yra nagrinėjamas tik nedidelis vamzdyno fragmentas. Kuriant modelį yra naudojami tikrieji vamzdyno duomenys.

Tyrimas yra pradedamas nuo bandymo aplinkos sudarymo. Pirmame etape yra modeliuojamas skysčio užimamas tūris. Nagrinėjamu atveju jį sudaro vamzdžio skylutės ertmė ir ertmės tarp vielos vijų.

Injekcinių gręžiniu schema yra pateikta 29 pav.



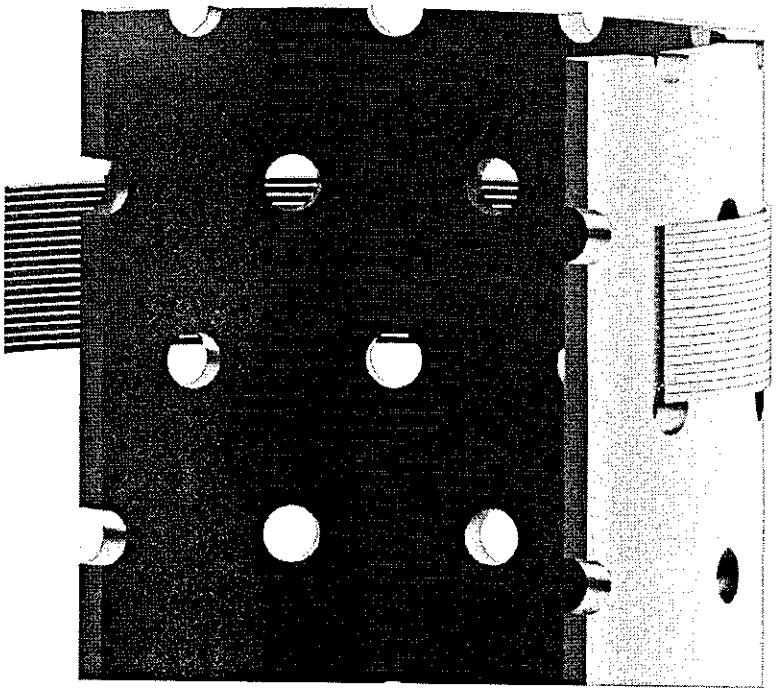
29 pav. UAB „Geoterma" eksploatuojamos jėgainės injekcinių gręžinių principinė technologinė schema



30 pav. Daugiaparametrinio filtro tyrimo schema „Ansys Workbench“

Dėl vamzdyno įsiurbimo filtro zonoje susidarančio papildomo pasipriešinimo sumažėja bendrasis sistemos našumas. Aprašomo tyrimo tikslas yra įvertinti pasipriešinimo įtaką į vamzdyną patenkančio skysčio srautams.

Yra žinoma, kad filtro ertmės yra užterštos, tačiau nėra žinomas jų užterštumo lygis ir pobūdis. Norint nustatyti, kokiomis sąlygomis (esant kokiam slėgio skirtumui) yra gaunamos žinomos geoterminio skysčio reinjekcijos vertės yra atliekamas išsamus tyrimas, kuriuo yra nustatomi ištekėjimo debitai esant skirtingoms slėgio vertėms ir skirtingam tarpui tarp vielos vijų (tyrimo sąlygos yra išsamiau aprašytos toliau esančiame poskyryje).



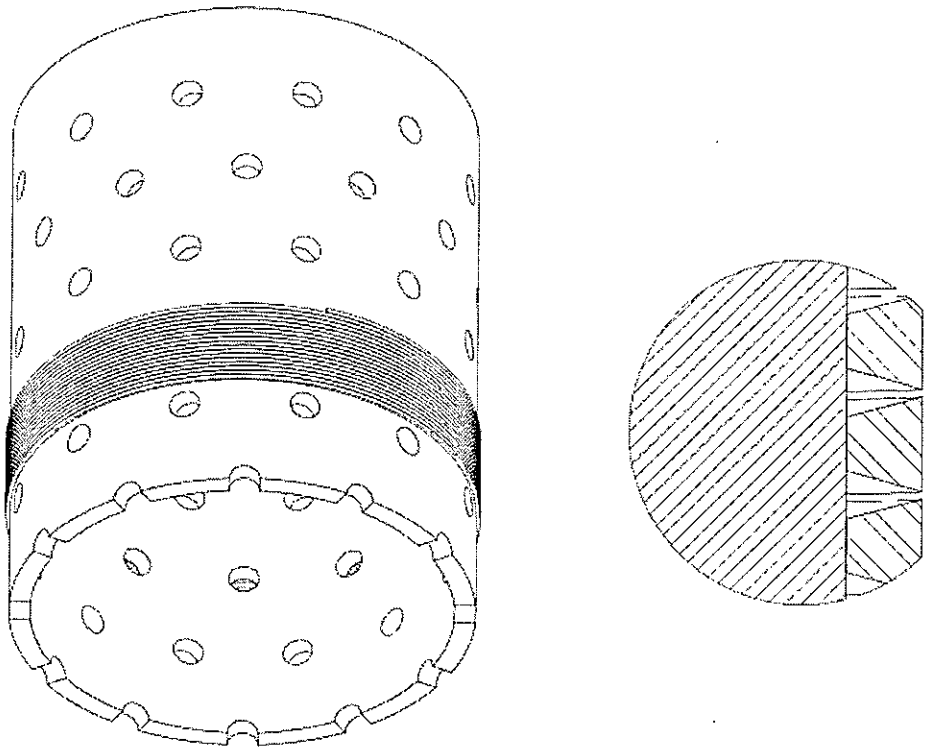
31 pav. Filtro vamzdžio zonos fragmento pjūvis (sukurtas geometrinis modelis)

Kadangi duotasis modelis yra per daug sudėtingas, kad galima būtų efektyviai gauti sprendimą sudarant pakankamai tankų BE tinklą, tyrimui paimamas tik šio modelio fragmentas, pavaizduotas 34 pav.

Eksperimentas pradedamas nuo vamzdyno filtro zonos geometrinio modelio sudarymo bei paruošimo tyrimui.

3.3 INJEKCINIO GRĘŽINIO FILTRO GEOMETRINIO MODELIO PARUOŠIMAS

Nagrinėjamu atveju modeliuojamas yra ne pats vamzdžio fragmentas, bet skysčio tūris, kuris yra sudaromas toje zonoje. Kitaip tariant, iš vientiso skysčio tūrio yra atimamas vamzdyno bei filtro vielos tūris. Gautas modelis yra pavaizduotas 34 pav.

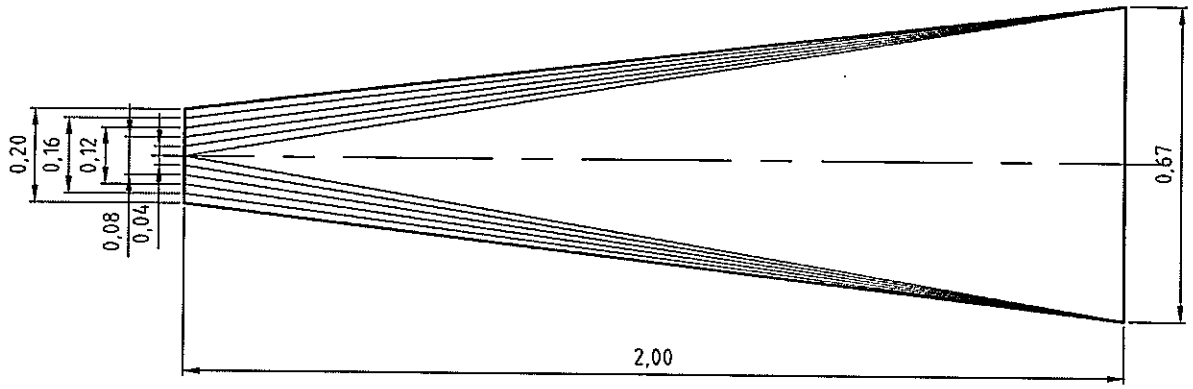


32 pav. Injekcinio gręžinio filtro vamzdžio fragmentas (kairėje) ir vielos pjūvis (dešinėje)

1 lentelė. Gręžinio vamzdžio filtro zonų geometriniai parametrai

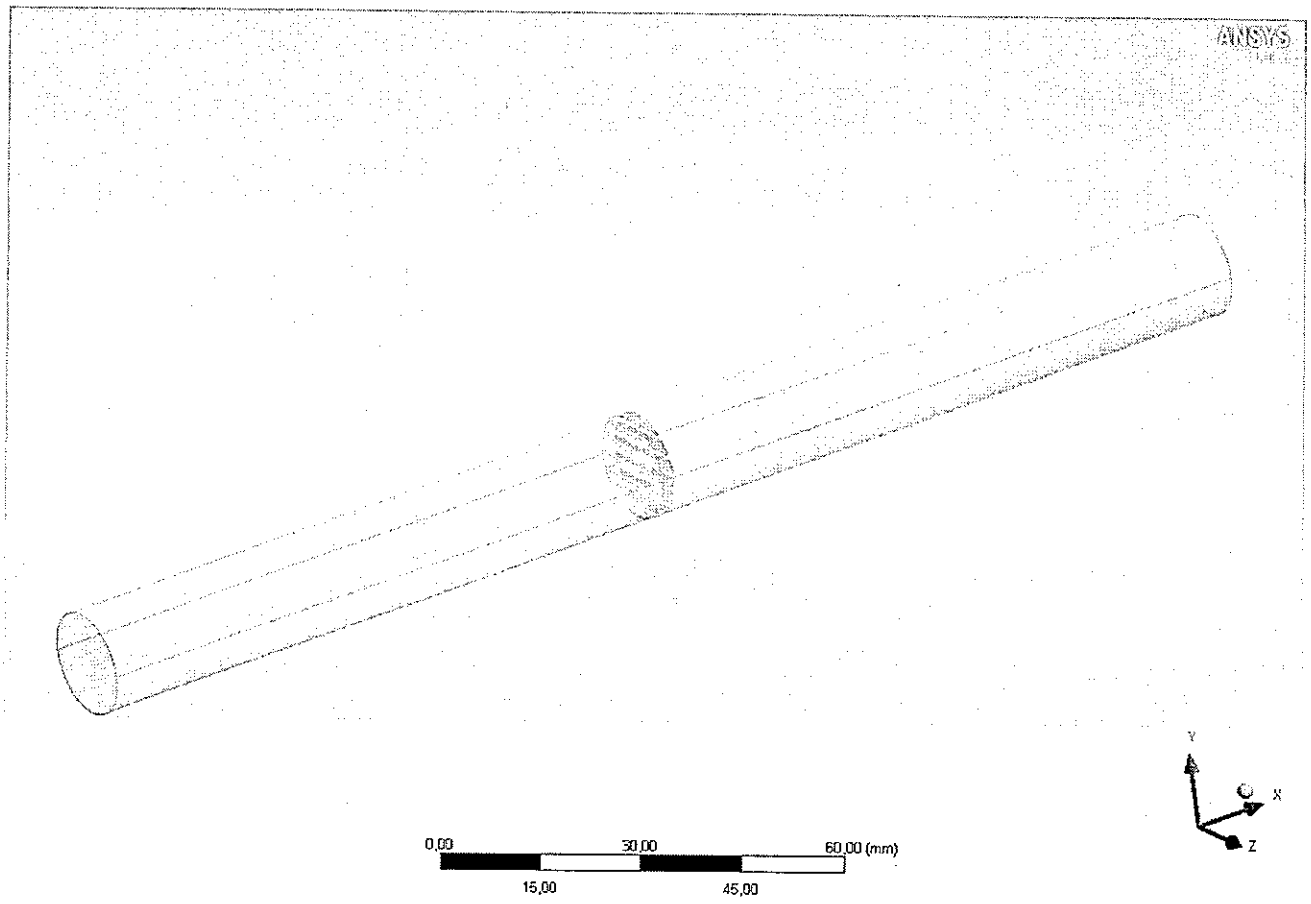
Išorinis vamzdžio skersmuo	9 5/8“
Vidinis filtro vamzdžio skersmuo	8 ¾“
Filtro zonų aukštis	9,282 ÷ 12,866 m
Filtro zonų skaičius	10
Bendras filtravimo zonos aukštis	109,943 m
Skylių eilių skaičius	16
Skylių skaičius viename vamzdžio metre	20
Skylės skersmuo	16 mm
Vielos profilio plotis	2,47 mm
Vielos profilio aukštis	2,0 mm
Vienos vijos ilgis	813 mm
Atstumas tarp vijų	0,2 mm

Kadangi nagrinėjamas objektas yra tiriamas įvertinant galimą paviršių užsiteršimą, būtina apibrėžti užsiteršimo pobūdį ir jo imitacijos metodą. Filtro užsiteršimą siūloma simuliuoti sudarant atitinkamą susiaurėjimą ties skysčio ištekėjimo iš vamzdyno plokštuma. Filtro zonos užsikimšimo imitacijos schema yra pateikiama 33 pav.



33 pav. Filtro zonos užsikimšimo imitacijos schema

Gautas filtro zonos skylutėje skysčio užimamos erdvės geometrinis modelis yra pateikiamas 33 pav.



34 pav. Tyrimui naudojama skysčio geometrija: skystis judą per vielos sudarytą susiaurėjimą

3.4 INJEKCINIO GRĘŽINIO GEOMETRINIO MODELIO DISKRETIZAVIMAS

Geometrinio modelio skaldymas į baigtinius elementus yra atliekamas naudojant 35 pav. pateiktus nustatymus.

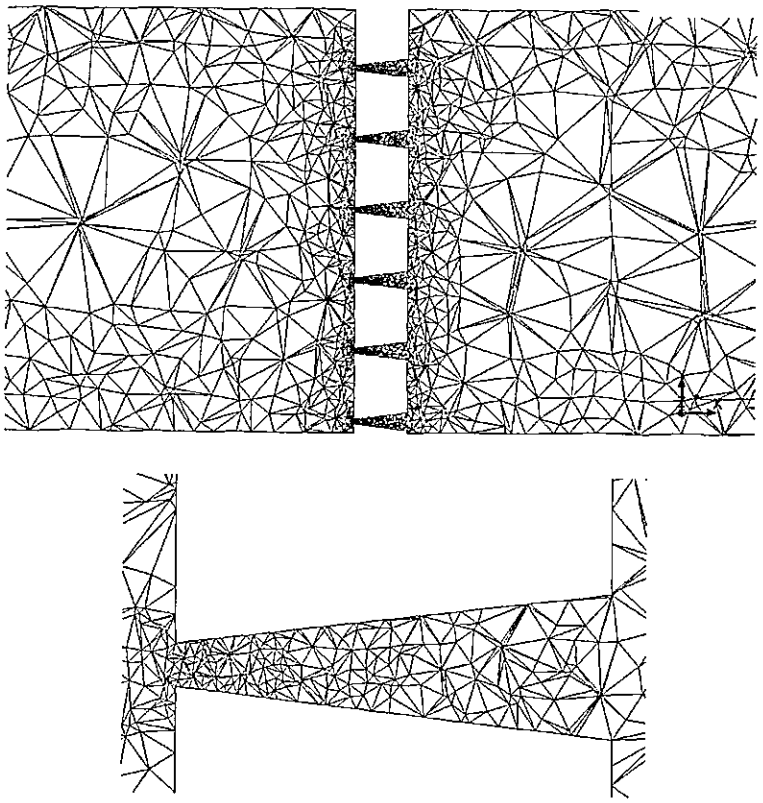
Atlikus keliasdešimt bandymų buvo nustatyta, kad eksperimentas yra stabilus esant pateiktiems tinklo parametrams, o modelio detalumas (449438 mazgai, 296480 elementų) yra racionalus atsižvelgiant į turimus techninius išteklius.

Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Min Size	Default (6.0867e-005 m)
Max Face Size	Default (6.0867e-003 m)
Max Size	Default (1.2173e-002 m)
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	2.0138e-003 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Assembly Meshing	
Method	None
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	449438
Elements	296480
Mesh Metric	None

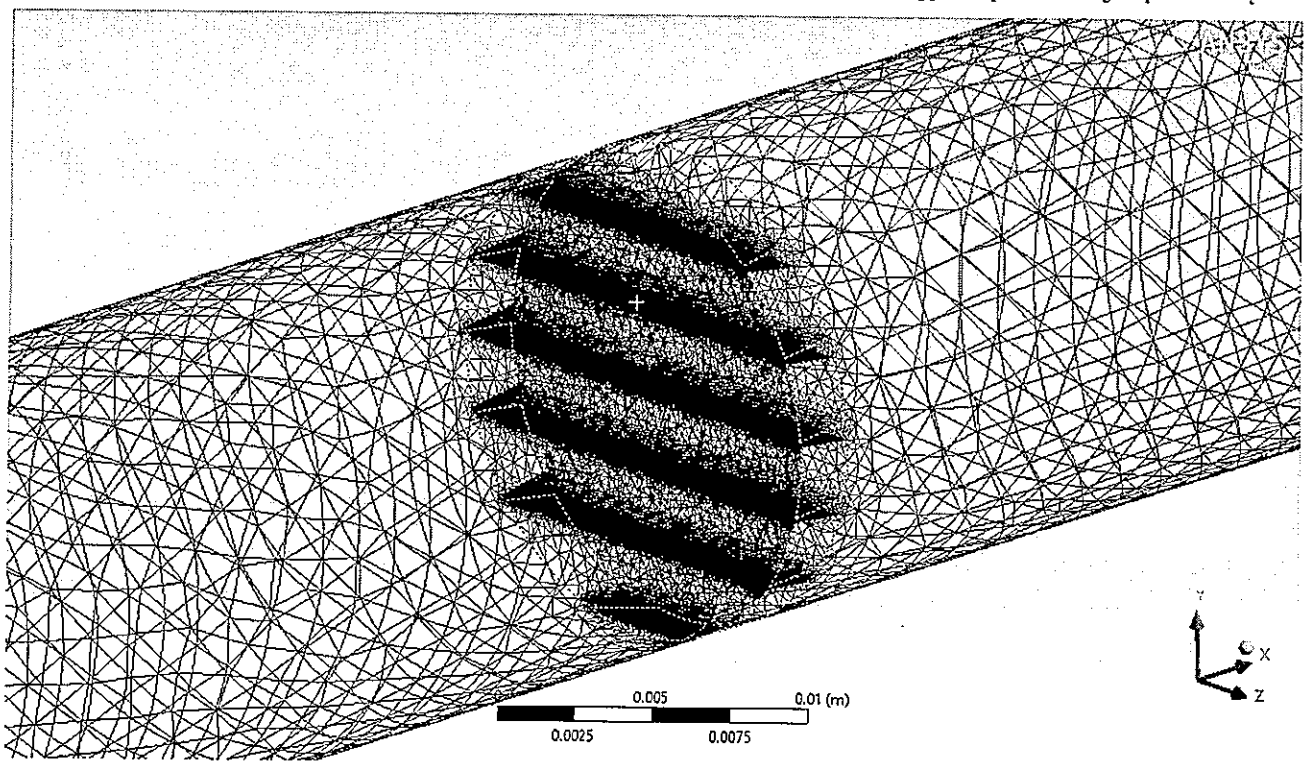
35 pav. Injekcinio gręžinio filtro fragmento skaldymo į baigtinius elementus nustatymai ir statistika

Atlikus „Fluent“ baigtinių elementų tinklo analizę nustatyta, kad geometrinis modelis buvo diskretizuotas tinkamai ir neturi vietų, galinčių sukelti problemų skaičiavimo algoritmui.

Sugeneruotas baigtinių elementų tinklas filtro zonos geometriniam modeliui yra pavaizduotas 36 ir 37 pav.



36 pav. Injekcinio gręžinio filtro zonos sudaryto baigtinių elementų tinklo pjūvis per simetrijos plokštumą



37 pav. Injekcinio gręžinio filtro zonos sudaryto baigtinių elementų tinklo bendras vaizdas

3.5 INJEKCINIO GRĘŽINIO TYRIMO KRAŠTINIŲ SĄLYGŲ NUSTATYMAS

Suskaidžius tūrį į baigtinius elementus pereinama prie eksperimento parametrų nustatymo. Šiame etape yra nustatomi nagrinėjami parametrai, medžiagų savybės (šiuo atveju yra tik viena medžiaga – vanduo), srautų greičiai bei temperatūros. Apibrėžiami du pagrindiniai paviršiai: įtekėjimo ir ištekėjimo. Nustatomi stebėjimo paviršiai, kuriuose nustatomas tekančio skysčio debitas.

Pagal sugeneruotas diferencialines lygtis yra paleidžiamas tam tikro iteracijų skaičiaus (nagrinėjamu atveju buvo atlikta iki 600 iteracijų) sprendimo algoritmas. Atlikus nustatytą skaičių iteracijų pagal konvergavimo požymius įvertinama, ar uždavinys konvergavo. Tuomet pereinama prie rezultatų įvertinimo ir vaizdavimo.

Rezultatai yra patikrinami atliekant tyrimą atvirkštinėmis sąlygomis, kuomet yra užduodamas filtro zonos įėjimo debitas, o nustatomas slėgių pokytis už zonos ribų.

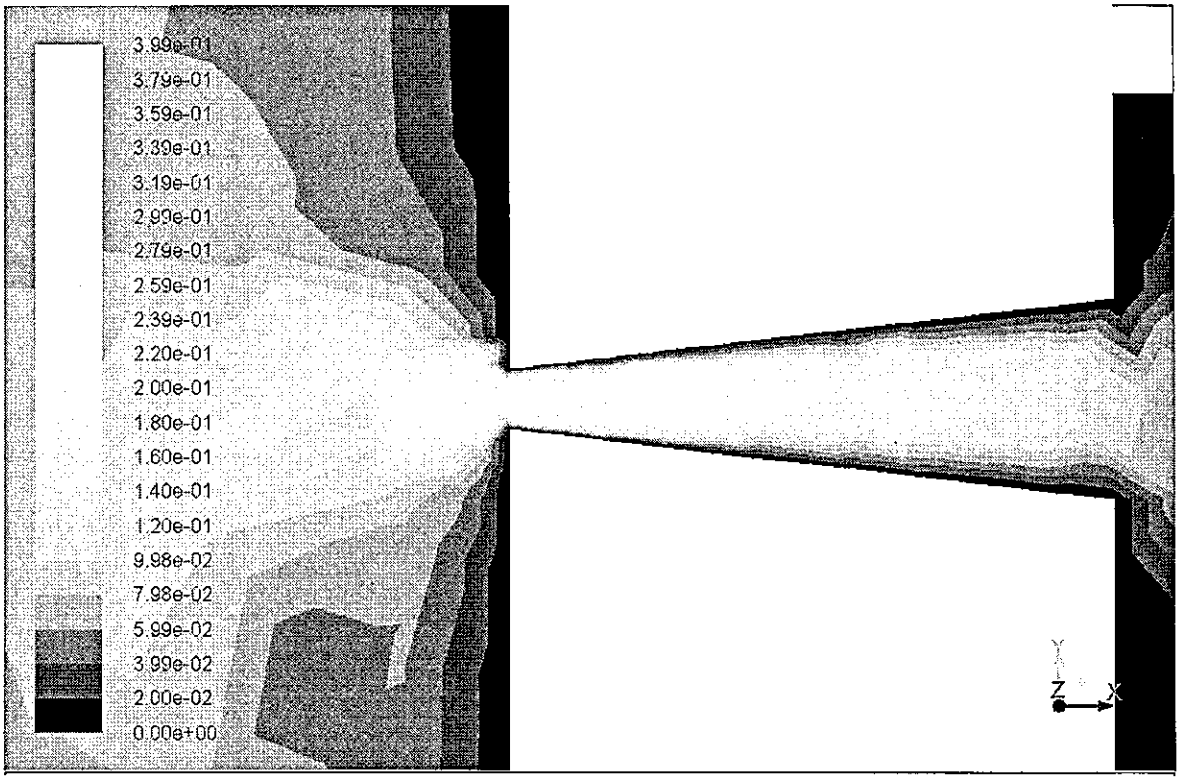
Patikslintas bandymas buvo atliktas varijuojant tarpą 0,02 – 0,2 mm diapazone. Išnagrinėta 100 atvejų (10 slėgių skirtumų 100 Pa žingsniu ir 10 tarpo dydžių 0,02 mm žingsniu), naudoti tikslūs skaičiavimo metodai, didelis iteracijų skaičius.

3.6 INJEKCINIO GRĘŽINIO TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

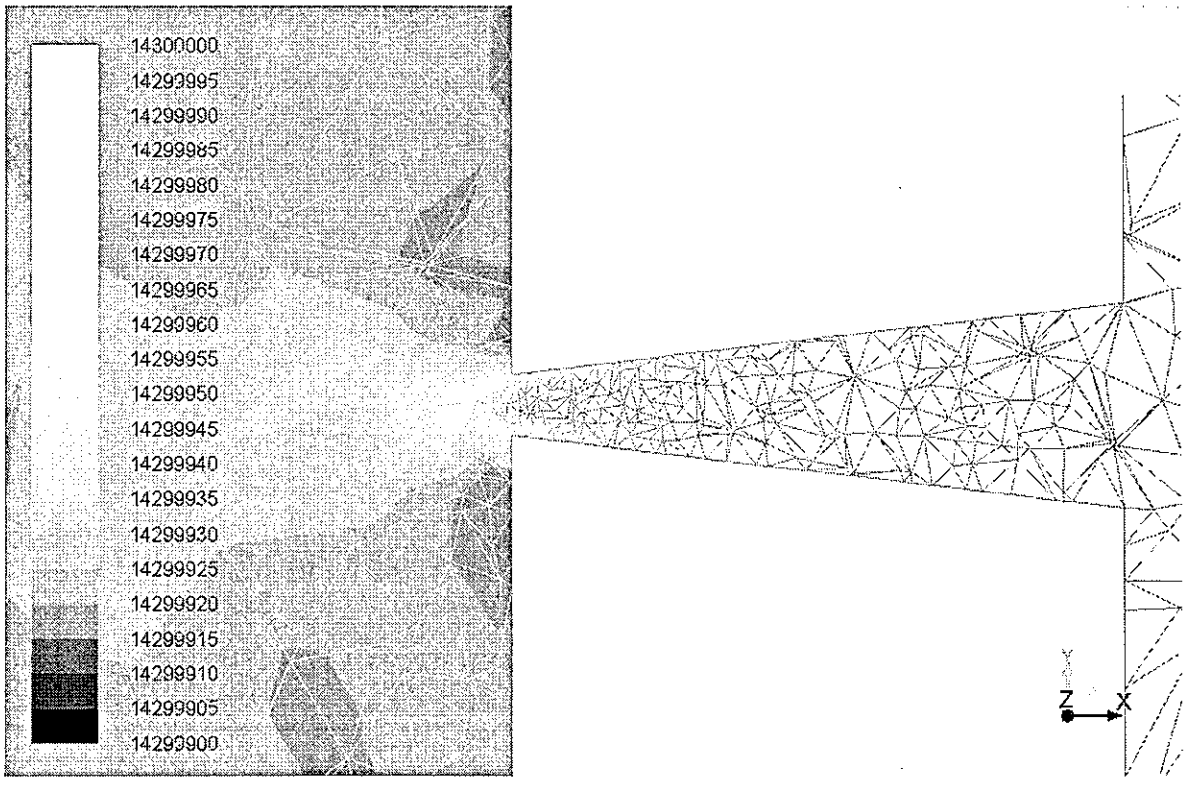
Greičio zonų kontūrai injekcinio gręžinio filtro išilginiame pjūvyje esant 100 Pa slėgių skirtumui yra pateikti 38 pav. Slėgio kontūrai tomis pačiomis sąlygomis yra parodyti 39 pav.

2 lentelėje yra pateikti gautieji matematinio eksperimento metu rezultatai. Pateiktos vienos filtro skylutės ir suminės filtro debito teorinės vertės. Vertės nustatomos 100–1500 Pa slėgių skirtumo diapazone 100 Pa žingsniu. Iš rezultatų matoma, kad nesant užsikimšimui ir vertinant, kad skystis išteka per filtrą į švarią zoną pakanta nedidelio slėgių skirtumo, kad būtų gaunami debitai žymiai didesni pagal savo vertes už gręžinio projektinius.

3 ir 4 lentelėse yra pateikiami patikslinto (100 taškų) bandymo rezultatai. Iš rezultatų matoma, kad pasikartoja nustatytoji debitų priklausomybės nuo sistemos sąlygos tendencija.



38 pav. Greičio zonų kontūrai injekcinio gręžinio filtro išilginiame pjūvyje (m/s)

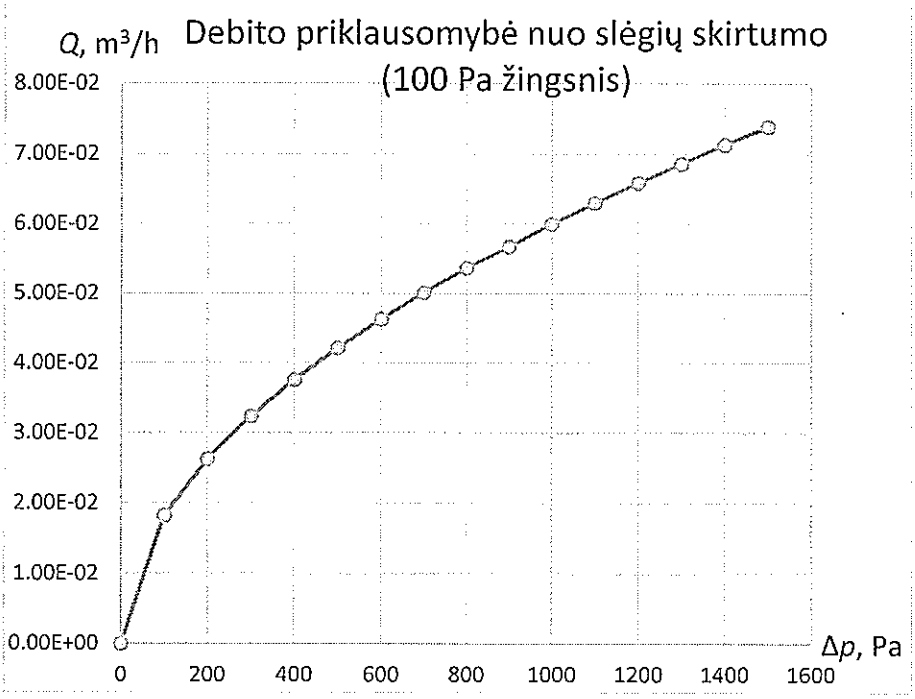


39 pav. Slėgio zonų kontūrai injekcinio gręžinio filtro išilginiame pjūvyje (Pa)

2 lentelė. Debitų priklausomybės nuo slėgių skirtumo

p, Pa	Δp, Pa	v, m/s	Q, m^3/s	Q, m^3/h	$Q_{suminis}$, m^3/h
14300000	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00
14299900	100	2,52E-02	5,07E-06	1,83E-02	642,06
14299800	200	3,63E-02	7,30E-06	2,63E-02	924,29
14299700	300	4,48E-02	9,00E-06	3,24E-02	1139,26
14299600	400	5,20E-02	1,05E-05	3,76E-02	1323,17
14299500	500	5,83E-02	1,17E-05	4,22E-02	1483,16
14299400	600	6,40E-02	1,29E-05	4,63E-02	1628,87
14299300	700	6,92E-02	1,39E-05	5,01E-02	1762,40
14299200	800	7,41E-02	1,49E-05	5,36E-02	1886,70
14299100	900	7,84E-02	1,58E-05	5,67E-02	1995,04
14299000	1000	8,29E-02	1,67E-05	6,00E-02	2110,30
14298900	1100	8,71E-02	1,75E-05	6,30E-02	2216,10
14298800	1200	9,10E-02	1,83E-05	6,59E-02	2317,18
14298700	1300	9,48E-02	1,91E-05	6,86E-02	2413,38
14298600	1400	9,86E-02	1,98E-05	7,13E-02	2509,09
14298500	1500	1,02E-01	2,05E-05	7,39E-02	2599,51

2 lentelės rezultatai pateikti grafiškai 40 pav.

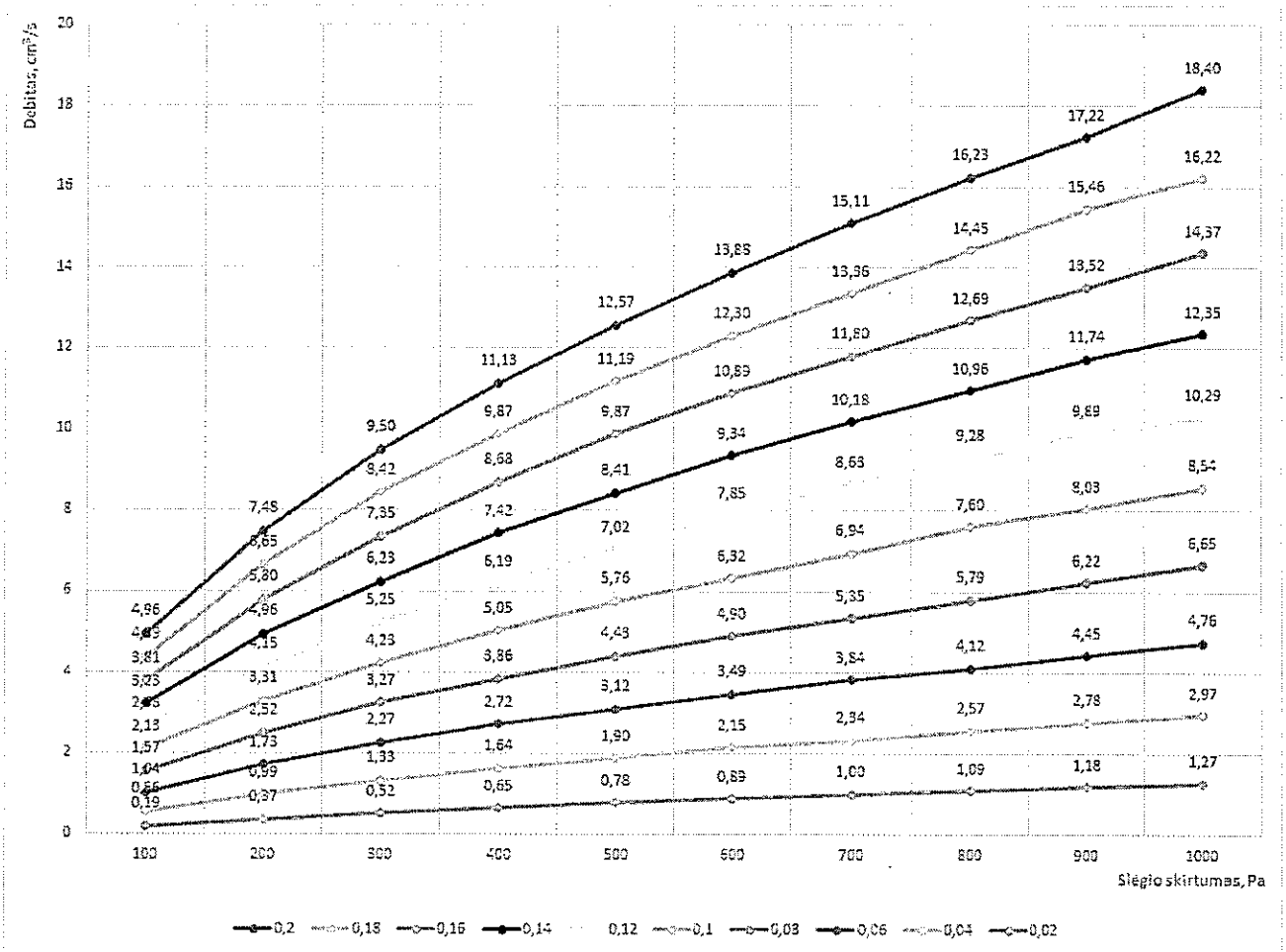


40 pav. Teorinės per filtrą ištekančio skysčio debito reikšmės esant skirtingoms slėgio skirtumo vertėms neimituojant filtro užsiteršimo

3 lentelė. Patikslinto filtro užsikimšimo tyrimo rezultatai (debitai nustatyti vienai filtro skylutei)

Δp, Pa	Tarpo dydis, mm									
	0,2	0,18	0,16	0,14	0,12	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02
	Debitas, cm^3/s									
100	4,96	4,39	3,81	3,23	2,68	2,13	1,57	1,04	0,56	0,19
200	7,48	6,65	5,80	4,96	4,15	3,31	2,52	1,73	0,99	0,37
300	9,50	8,42	7,35	6,23	5,25	4,23	3,27	2,27	1,33	0,52
400	11,13	9,87	8,68	7,42	6,19	5,05	3,86	2,72	1,64	0,65
500	12,57	11,19	9,87	8,41	7,02	5,76	4,43	3,12	1,90	0,78
600	13,88	12,30	10,89	9,34	7,85	6,32	4,90	3,49	2,15	0,89
700	15,11	13,36	11,80	10,18	8,63	6,94	5,35	3,84	2,34	1,00
800	16,23	14,45	12,69	10,96	9,28	7,60	5,79	4,12	2,57	1,09
900	17,22	15,46	13,52	11,74	9,89	8,03	6,22	4,45	2,78	1,18
1000	18,40	16,22	14,37	12,35	10,29	8,54	6,65	4,76	2,97	1,27

4 lentelėje pateikiami duomenys grafiškai vaizduojami 39 pav.



41 pav. Filtro užsikimšimo tyrimo rezultatai

Gauti duomenys yra naudojami nustatant viso injekcinio gręžinio skysčio debitą. Rezultatai yra pateikiami 5 lentelėje.

4 lentelė. Patikslinto filtro užsikimšimo tyrimo rezultatai (debitai nustatyti visam injekciniam vamzdynui)

Δp, Pa	Tarpo dydis, mm									
	0,2	0,18	0,16	0,14	0,12	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02
	Debitas, m^3/h									
100	628,2	556,2	482,4	409,0	338,9	269,3	199,3	131,3	70,6	24,4
200	946,8	841,6	734,3	628,5	525,7	419,6	318,5	218,4	125,3	46,3
300	1202,2	1066,5	930,3	789,3	664,8	536,1	413,5	287,3	168,8	65,4
400	1409,2	1249,7	1099,4	939,2	783,1	639,7	488,4	344,6	208,0	82,6
500	1591,8	1416,6	1250,0	1065,3	888,6	729,7	560,5	394,6	240,0	98,2
600	1757,7	1557,5	1378,7	1182,7	994,3	800,7	620,7	442,0	272,5	112,5
700	1912,4	1691,8	1494,3	1288,3	1092,2	879,2	677,3	485,9	296,8	126,2
800	2054,7	1828,8	1607,1	1387,1	1175,5	962,1	733,2	522,0	325,5	137,9
900	2180,6	1957,7	1711,3	1486,5	1251,6	1017,1	786,9	563,2	351,6	149,7
1000	2329,5	2054,0	1819,2	1563,9	1303,0	1081,7	842,2	602,7	376,0	160,2

Iš lentelėje pateiktų rezultatų matoma, kad realaus objekto injekcinio gręžinio debitas atitinka ypatingai didelio užterštumo slėgių skirtumo ir tarpo dydžio parametrų vertes.

Taip pat buvo nustatyta, kad filtras turi 7,5 % geresnį skysčio pralaidumą esant atbuliniam tekėjimui (t. y. kai yra vietomis sukeistos didesnio ir mažesnio slėgio zonos). Tai yra svarbu vertinant sudėtingesnius vamzdyno filtro zonoje vykstančius procesus.

TREČIOJO SKYRIAUS IŠVADOS

1. Atlikus gautų rezultatų analizę buvo nustatyta iš vamzdyno ištekančio skysčio debito priklausomybė nuo slėgių skirtumo vamzdyje ir už jo ribų. Charakteristika atitinka teorines reikšmes.
2. Įvertinant tai, kad darant prielaidą dėl vamzdyno filtro zonos neužterštumo gaunami debitai yra žymiai didesni už realiuosius galima teigti, kad hipotezė dėl filtro paviršiaus užterštumo pasitvirtino.
3. Atliktas bandymas, kuriuo nustatyta, kad injekcinio gręžinio vamzdyno filtras turi 7,5 % didesnį pralaidumą esant atbuliniam tekėjimui. Tokia pataisa yra būtina vykdant tolesnius tyrimus vertinant procesus vamzdyne kaip makrosistemoje.

APIBENDRINTOS IŠVADOS

- Atlikus siurblio pakopos bandymus jo darbinių sūkių diapazone nustatytos charakteristikos atitinka realiąsias. Nustatytos sumažėjusios slėgio zonos, kuriose gali pasireikšti dujų išsiskyrimas, turintis neigiamą efektą siurblio našumui ir jo darbo tolygumui.
- Nustatyta, kad didžiausio slėgio zonoje esant nustatytoms sąlygoms slėgis padidėja 295 kPa, mažiausio slėgio zonoje jis sumažėja 10,9 kPa. Įvertinant tai, kad siurblys veikia 3,3 MPa hidrostatinio slėgio sąlygomis yra daroma išvada, kad intensyvaus dujų išsiskyrimo taškas nėra pasiekiamas GDIS zonoje veikiant normaliomis sąlygomis, nors fluido spūdumas pasireiškia ir esant aprašytoms sąlygoms.
- Išsamaus gavybinio gręžinio tyrimo metu gauti rezultatai byloja apie pakankamą modelio tikslumą (gauti tyrimo debito parametrai atitinka 11,7 % sudėtingesnes siurblio veikimo sąlygas).
- Atlikus gautų rezultatų analizę buvo nustatyta iš vamzdyno ištekančio skysčio debito priklausomybė nuo slėgių skirtumo vamzdyje ir už jo ribų. Charakteristika atitinka teorines reikšmes, kas liudija apie tai, kad bandymas atliktas sėkmingai.
- Įvertinant tai, kad darant prielaidą dėl vamzdyno filtravimo zonos neužterštumo gaunami debitai yra žymiai didesni už realiuosius galima teigti, kad hipotezė dėl filtravimo zonos užterštumo pasitvirtino.
- Atliktas bandymas, kuriuo nustatyta, kad injekcinio gręžinio vamzdyno filtras turi 7,5 % didesnį pralaidumą esant atbuliniam tekėjimui. Tokia pataisa yra būtina vykdant tolesnius tyrimus vertinant procesus vamzdyne kaip makrosistemoje.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Alternative Energy: Geothermal. 2012 m. gruodžio 17 d. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: < http://www.planetseed.com/node/15258/>.

Baoling, C.; Zuchao, Z. 2006. The Flow Simulation and Experimental Study of Low-Specific-Speed High-Speed Complex Centrifugal Impellers. *Chinese J. Chem. Eng.* 14(4): 435–441.

Barrio R.; Parrondo J.; Blanco E. 2010. Numerical analysis of the unsteady flow in the near-tongue region in a volute-type centrifugal pump for different operating points. *Computers and Fluids* 39, No. 5: 859–870. http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.01.001.

Blanco-Marigorta, E.; Fernandez-Francos, J. 2000. Numerical flow simulation in a centrifugal pump with impeller – volute interaction. *ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting*: 1–9.

Cheng, X.; Li, R. 2012. Parameter equation study for screw centrifugal pump. *Procedia Engineering* 31: 914–921. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1121.

Derakhshan, S.; Nourbakhsh, A. 2008. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation. *Experimental thermal and fluid science* 32: 1620–1627. http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.05.004.

Geoterma. 2012 m. lapkričio 15 d. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://geoterma.lt/>.

Jafarzadeh, B.; Hajari, A. 2011. The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump. *Applied Mathematical Modeling* 35: 242–249. http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.021.

Jin, J.; Fan, Y. 2012. Design and Analysis on Hydraulic Model of the Ultra-low Specific-speed Centrifugal Pump. *Procedia Engineering* 31: 110–114. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.999.

Jones, G.; Ligtenberg, H. 2008. Geothermal energy in Europe. *IPGC 2008*: 54–58.

Kaya E. 2011. Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renewable and Sustainable Energy Review* 15: 205–211. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.032.

Kujawa T and Nowak W. 2003. Winning the geothermal heat energy in one-hole and two-hole systems. *International Geothermal Conference, Reykjavķk*: 26–32.

Li, W. 2000. Effects of viscosity of fluids on centrifugal pump performance and flow pattern in the impeller. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21: 207–212. http://dx.doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00078-8

Memardezfouli, M.; Nourbakhsh, A. 2009. Experimental investigation of slip factors in centrifugal pumps. *Experimental Thermal and Fluid Science* 33: 938–945. http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.03.011.

Nemdili, A.; Hellmann, D-H. 1999. The requirements to successful centrifugal pump application for desalination and power. *Desalination* 126: 199–205. http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00175-7.

Parrondo, J.; Perez, J. 2011. A simple acoustic model to characterize the internal low frequency sound field in centrifugal pumps. *Applied Acoustics* 72: 59–64. http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.08.005.

Rybach, L. 2006. Status and prospects of geothermal energy in Europe – and the achievements of Switzerland. *The Institute of Energy Economics, Japan, Tokyo*: 19–25.

Sakthivel, N. R.; Nair, B. 2012. Soft computing approach to fault diagnosis of centrifugal pump. *Applied Soft Computing* 12: 1574–1581. http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.12.009.

Sakthivel, N. R.; Sugumaran, V. 2010. Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree. *Expert Systems with Applications* 37: 4040–4049. http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.10.002.

Shojaeefard, M. H.; Tahani, M. 2012. Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps viscous fluid. *Computers & Fluids* 60: 61–70. http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.02.028.

Stickland M.T., Scalon T.J. 2000. Numerical flow simulation in a centrifugal pump with impeller volute interaction. *Proceedings of the ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting*: 1–9.

Szucs, P.; Kovacs, B.; Bobok, E.; Toth, A.; Madarasz, T. 2010. Technological review of geothermal energy utilization. *1st Knowbridge Conference on Renewables*: 1–3. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.191.

Yunlong, Z.; Peng, Z. 2012. Vibration Fault Diagnosis Method of Centrifugal Pump Based on EMD Complexity Feature and Least Square Support Vector Machine. *Energy Procedia* 17: 939–945. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.191.

Zhang, G.; Zhang, M. 2008. Effects of non-Newtonian fluid on centrifugal blood pump performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35: 613–617. http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.11.005